屋内植物のための光環境評価に向けた波長別光環境解析に関する研究

SPECTRAL IRRADIANCE SIMULATION FOR
EVALUATING LIGHT ENVIRONMENTS FOR INDOOR PLANTS菅野 颯馬^{*1}, 新田 竜^{*2}, 新藤 幹^{*2}, 野元 彬久^{*1},
依田 柊^{*2}, 重村 珠穂^{*3}, 石井 雅久^{*4}, 田辺 新一^{*5}Soma SUGANO, Ryo NITTA, Kan SHINDO, Akihisa NOMOTO,
Shu YODA, Tamaho SHIGEMURA, Masahisa ISHII and Shin-ichi TANABE

Recently, the interest in biophilic design and indoor greenery has been increasing. However, the growth of indoor plants may become stunted owing to unfavorable light conditions. Therefore, a method for evaluating the light environments required for indoor plants to thrive is needed. In this study, we verify the accuracy of a spectral irradiance simulation for the evaluation of light environmental conditions for indoor greenery. Additionally, the photosynthetic photon flux density, which is strongly correlated to photosynthesis, is calculated. The growth of indoor plants is evaluated by applying knowledge gained in the field of plant physiology.

Keywords : Biophilic Design, Indoor Greenery, Simulation, Spectral Irradiance, Photosynthetic Photon Flux Density

バイオフィリックデザイン, 屋内緑化, シミュレーション, 分光放射照度, 光合成有効量子束密度

1. はじめに

近年、建築内に植物などの自然の要素を取り入れるバイオフィリックデザインが注目を集めている。オフィス環境の評価システムである WELL Building Standard¹⁾や CASBEE ウェルネスオフィス評価認証制度²⁾にもバイオフィリックデザインに関する項目が定められ、屋内緑化の導入事例は今後増加することが予想される。

屋内緑化が人間に及ぼす心理的、生理的影響に関しては国内外の研究により有効性の検証が進められている。仁科ら³⁾は植物の存在や香りが人間の生理や心理に寄与する影響を脳波測定や SD 法を用いたアンケートで検討した。脳波の測定結果から、精油を気化させた香りが快適性に寄与する可能性を示した。Qin ら⁴⁾は机上に置いた植物の色や大きさ、香りが人間の生理や心理に与える影響を検討し、緑色の植物や微かな香りを持つ植物が快適性に寄与することを示した。オフィスへの植物の設置による執務者への効果を検討した研究も複数見られる。橋本ら⁵⁾は模擬執務空間で植物やデスクの配置の違いが人間の心理や生理に与える影響を検討し、被験者相互の存在が視野に入らないデスク配置かつ緑視率 3.4% の条件で心理的、生理的評価が高くなることを示した。岩崎ら⁶⁾はオフィスのデスクへの植物の設置方法が執務者の主観評価や心理評価に与える影響を検討し、自席のデスク上に植物を設置することで職場の環境満足度が上がることを示した。源城ら⁷⁾は業種の異なる執務者が働く 2 室

のオフィスに植物を設置した際の生理心理反応および知的生産性への影響を検討し、視覚疲労や自覚症状の緩和効果を確認した。Sanchez ら⁸⁾は執務空間への植物と昼光の導入が執務者の健康性や知的生産性に与える影響を検討し、植物と昼光を複合して導入した条件で、メンタルワークロードの減少や創造的な作業のタスク成績の向上を確認した。また、Yin ら⁹⁾は Virtual Reality 空間内の部屋における植物や昼光などが、人間のストレスや不安感の回復に与える影響を検討し、植物や木質の内装が生理的観点でのストレスの回復に、昼光が不安感の回復に寄与することを示した。

以上のように、屋内緑化が人間に及ぼす心理的、生理的影響に関する研究がある一方で、屋内植物の生育を考慮した建築計画に関する研究事例は少ない。室内の光環境の計画では、色温度や演色性などを考慮し、人間の視的快適性を向上させることが重要である。一方で、屋内緑化の事例の増加が予想される中で、人間と植物が共存するための光環境の計画も今後は重要になると考えられる。建築内では主に光量の不足を原因とした植物の生育不良が懸念される¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。また、植物種によっては過度な日射の強光ストレスに起因する生育不良も実験で確認されている¹²⁾。屋内植物の生育不良はメンテナンスや交換のコストを増加させるため、屋内緑化を導入する上での課題となる。また、Tan ら¹³⁾は屋内緑化されたオフィスビルで光環境を測定し、昼光導入に加えて照明による植物への補光がなさ

^{*1} 早稲田大学大学院創造理工学研究科建築学専攻 博士課程・修士(工学)^{*2} 早稲田大学大学院創造理工学研究科建築学専攻 修士課程^{*3} (株)アルゴリズムデザインラボ^{*4} 農研機構農村工学研究部門 博士(学術)^{*5} 早稲田大学創造理工学部建築学科 教授・工博

Grad. Student, Dept. of Architecture, Waseda Univ., M.Eng.

Grad. Student, Dept. of Architecture, Waseda Univ.

Algorithm Design Lab., Inc.

Institute for Rural Engineering, NARO, Ph.D.

Prof., Dept. of Architecture, Waseda Univ., Dr.Eng.

れる場所では、植物の光補償点を超えた過剰な光量となり、エネルギーの損失が生じていることを指摘した。

屋内植物の持続的な成長や、適切な光量の供給によるエネルギーロスの削減を目指した建築設計においては、植物生理と光環境の関係についての知見を参照し、植物の成長に適した環境を評価する手法が求められる。図 1 に明所視標準視感度と光合成作用スペクトル¹⁴⁾、光量子感度の比較を示す。植物の光合成と人間の視覚では、光の波長に対して異なる作用スペクトルを持つため、植物を対象とした光環境評価に照度を用いることは不適切である。図 1 の光合成作用スペクトルが示す通り、光合成における光の利用効率は波長 400 nm から 680 nm 付近で比較的高く、400 nm 未満および 700 nm 以上ではこれらに比較して急激に低くなる。そこで、農学分野では光合成との相関が高い波長 400–700 nm の光量子束密度を、光合成有効光量子束密度（Photosynthetic Photon Flux Density、以下 PPFD）として光環境評価に用いている¹⁵⁾。PPFD は 400–700 nm の波長域の光エネルギーの総量である光合成有効放射（Photosynthetically Active Radiation, PAR）（単位：W/m²）よりも精度よく光合成作用を予測可能であることが検証されている¹⁵⁾。

本研究の目的は、波長別光環境解析で得られた建築内の分光放射照度から PPFD を算出し、屋内植物に適した光環境を農学分野の知見を用いて評価する手法を提示することである。建築の 3D モデル内で、植物の生育に適した光環境の詳細な検討を可能にすることを意図した。本研究では、3D モデリングソフト Rhinoceros^{注 1)}のプラグインである Adaptive Lighting for Alertness^{注 2)}（以下 ALFA）で分光放射照度を計算した。ALFA による植物のための光環境評価の妥当性を検証するためには、実測値と計算値の比較による精度検証が求められる。本研究では、大学教室内での分光放射照度の実測値と ALFA の計算値を比較して計算精度を検証した。さらに、実測値と計算値から算出した PPFD と植物の光飽和点や光補償点の知見を比較し、屋内植物の生育の観点から建築内の光環境を評価した。

2. PPFD を用いた屋内植物のための光環境評価

PPFD は波長 400–700 nm の光量子が単位時間に単位面積を通過する量を表し、光合成との相関が高いため、農学分野では光環境の汎用的な評価指標として用いられている¹⁵⁾。PPFD は分光放射照度を用いて以下の式 (1) より算出できる。ALFA では 380–780 nm 波長域の分光放射照度を 5 nm の波長間隔で計算するため、本研究では 5 nm ごとの分光放射照度の計算値から PPFD を算出した。

$$PPFD = \int_{400}^{700} \frac{E_{\lambda} \times \lambda}{N \times h \times c} d\lambda \tag{1}$$

E_{λ}

:

分光放射照度

[W/m² (nm)]

N

:

アボガドロ数 (6.02×10²³)

[mol⁻¹]

$PPFD$

:

光合成有効光量子束密度

[mol/m²·s]

c

:

光速 (3×10⁸)

[m/s]

h

:

プランク定数 (6.626×10⁻³⁴)

[J·s]

λ

:

波長

[nm]

PPFD の算出により、植物の光飽和点（光合成速度が最大かつ一定となる光強度）や光補償点（光合成速度と呼吸速度が等しくなる光強度）など、農学分野の知見を活用することが可能になる。特に、

Fig.1 Comparison of CIE luminous efficiency functions, Photosynthetically action spectrum and ideal photon response

Fig.2 Spectral irradiance at 1000 lx for each light source

Table 1 Calculated PPFD at 1000 lx for each light source

Light source	CIE D65	White-LED	Fluorescent
PPFD [μmol/m ² ·s]	18.0	14.5	16.2

植物の光補償点に関する知見と建築内で得られた PPFD の比較は、屋内植物が最低限の生育を持続するのに必要な光環境の評価に有効である。したがって、指標の精度のみならず、植物の光環境を評価するのに適した指標であることも考慮し、本研究では、PPFD を指標として用いることとした。

建築内で同一の照度を得られた場合でも、光源の分光分布により PPFD は異なる。図 2 に光源ごとに 1000 lx の照度を得る場合の分光放射照度を示す。昼光、白色 LED、蛍光灯の 5 nm ごとの分光分布と標準視感度のデータ¹⁶⁾を用い、それぞれの分光分布をもつ光源下の水平面で 1000 lx の照度を得る際の、受光面の分光放射照度を計算した。昼光の分光分布は CIE 標準光源 D65 のデータ¹⁶⁾を用い、白色 LED と蛍光灯の分光分布は ALFA のライブラリからそれぞれ“LED 0.87”と“Fluorescent 1.28”を選択して計算に用いた。

表 1 に各光源で 1000 lx の照度を得る場合の PPFD を示す。図 2 に示した各光源の 5 nm ごとの分光放射照度から PPFD を算出した。各分光分布をもつ光源下の水平面で同一の光束を得る場合、CIE 標準光源 D65 で得られる PPFD は白色 LED の約 1.24 倍、蛍光灯の約 1.11 倍となった。したがって PPFD による評価では、植物の光合成作用における白色 LED や蛍光灯などに対する昼光の優位性が評価されることが考えられる。建築内では昼光と照明光の混在など、複数種類の光源により光環境が形成される場合があるため、受光面の分光分布を考慮することは屋内植物の生理的応答を詳細に評価する上で有効である。

3. 大学教室内での分光放射照度の実測概要

ALFA による分光放射照度の計算値と比較して精度を検証するため、東京都新宿区に所在する大学の教室で分光放射照度を実測した。

表 2 に測定項目、図 3 に実測風景、図 4 に測定点を示す。実測は 2019 年 10 月 5 日の 9 時から 17 時に、早稲田大学 55 号館 407 教室（以下、教室）と同建物の屋上で実施した。教室は 9 階建ての建物の 4 階に位置し、地表面から教室床面までの高さは約 12 m であった。屋上の高さは地表面から約 37 m であり、周囲に遮蔽物は存在しなかった。天候はほとんど全ての時刻で晴天であった。

教室の大きさは 8.4 m×7.1 m、天井高さは 2.7 m であり、教室の長手方向は概ね南北の方角を向いていた。また、南面には 2.6 m×2.6 m の大きさの窓が 2 つ設置されていた。窓の外には、道路を挟んだ約 30 m 先に、高さ約 32 m の建物が面していた。天井には南北方向に直管蛍光灯が 4 列設置されており、照明器具は Panasonic 社製 FSA41038F-VPN9、ランプは Panasonic 社製 Hf 蛍光灯 FHF32EX-N-H であった。図 3 (b) に照明の配置を伏図で示した。全ての照明を実測中は常に点灯させた。

3.1 分光放射照度の測定

教室内外の分光放射照度は携帯型分光放射計（英弘精機、MS-720）を用いて測定した。室内 32 点、屋上 1 点の合計 33 点を 1 時間ごとに測定した。測定点は屋内緑化の事例を参考に、机上高さ（FL+800 mm）と頭上高さ（FL+2000 mm）の水平面と、東西壁面付近の屋内方向を向いた鉛直面とした。窓のある南側から北側へ順に 1-4 行とし、水平面は照明直下に A、A'列、照明間に B、B'列を、鉛直面は西側壁面に C、C'列、東側壁面に D、D'列を設定した。以下、A 列 1 行の測定点を A-1 のように呼称する。鉛直面の測定は、分光放射計を据付けた三脚の幅を考慮し、壁から 420 mm 離れた位置で実施した。測定は測定者が移動しながら行い、屋内および屋上の全測定点での測定には、移動時間を含めて約 10 分を要した。測定時には分光放射計の受光面に測定者の影が被らないように注意した。

3.2 日射量の測定

実測対象建物の屋上で、熱電式の全天日射計を備えた気象観測ステーション（ブリード、PRMET-100）で屋外の日射量（波長域 300–2800 nm）を測定した。また、光電式の小型日射計（英弘精機、ML-02）で屋内の机上高さの日射量（波長域 300–1100 nm）を測定した。

3.3 屋内外の温湿度の測定

室内の温湿度は温湿度計（T&D、TR-74Ui / THA-3151）を用いて 1 点で測定した。屋外の温湿度は気象観測ステーション（ブリード、PRMET-100）で測定した。

4. 分光放射照度のシミュレーション概要

教室での分光放射照度の実測値と ALFA による計算値を比較するため、実測対象建物および周囲の建物の 3D モデルを Rhinoceros で作成し、ALFA で教室内外の分光放射照度を計算した。

表 3 に計算条件^{注 3)}、図 5 に 3D モデルの外観と教室のモデルの内観を示す。解析点は分光放射照度の測定点と同じ位置とした。周囲の建物のモデルは、各解析点の天空率や反射日射に大きく影響すると思われる建物を選定して作成した。全ての分光放射照度の計算値は、ランダム変動の影響を小さくするため、同一条件下で 4 回計算した結果の平均値により示した。

Table 2 Measured variables

Variable	Position		Interval
Spectral irradiance (350-1050nm) [W/m ² (nm)]	indoor	FL +800, 2000 mm	1 h
Solar radiation [W/m ²]		FL + 800 mm	10 s
Air temperature [°C] Relative humidity [%]		FL+ 800 mm	1 min
Solar radiation [W/m ²] Air temperature [°C] Relative humidity [%]	outdoor	FL + 1700 mm	10 s

Fig.3 Images of the measured classroom

Fig.4 Measurement position

Fig.5 Exterior of the 3D model and interior of the classroom model

Table 3 Simulation conditions

Date and time	October 5, 2019; 9:00 to 17:00
Location	35.42 °N / 139.42 °E / 28m (Tokyo)
Ambient bounce (-ab)	6
Limit weight (-lw)	0.01
Ground spectrum / Albedo	Uniform / 0.08
Sky model	Clear / Hazy (17:00)

4.1 スカイモデルの選定

ALFA では輝度分布の異なる 4 種類のスカイモデル^{注 4)}を入力できる。実測対象建物の屋上での分光放射照度の実測値と、スカイモデルごとの計算値を比較し、実測値との差が最も小さいスカイモデルを選択した。17:00 以外の時間帯は Clear、17:00 は Hazy のスカイモデルを入力した。

4.2 各マテリアルへの分光反射率と分光透過率の入力

図 6 に入力した窓ガラスモデルの分光透過率と分光反射率を示す。窓ガラスのモデルには 5 nm ごとの分光透過率と表裏面の分光反射率を入力した。可視光域の平均透過率は 84 %、表裏面の分光反射率は波長によらず一律 8.0 %とした。

図 7 に教室内の各部材の分光反射率を示す。分光測色計（コニカミノルタ、CM-26d）を用いて教室内の各部材の波長域 380–740 nm の分光反射率を測定し、3D モデルに入力した。正反射光を含む測色方式（Specular Component Included, SCI）と含まない測色方式（Specular Component Excluded, SCE）で測定と入力をし、部材の鏡面性を再現した。実測対象建物と周囲の建物の外壁には、分光反射率が 380–740 nm の波長域で SCI、SCE とともに一律 30.0 % のマテリアルを入力した^{注 5)}。また、屋外の地表面には、アスファルトを想定し、分光反射率が 380–740 nm の波長域で SCI、SCE とともに一律 8.0 %のマテリアルを入力した。

4.3 照明モデルの入力と検証

実測した教室の照明は、経年劣化や埃の付着などにより、光度が低下していることが予想された。そのため、夜間にブラインドを降ろし、照明を点灯させた教室内で、照明光のみの分光放射照度の測定を行い、入力値の参考とした。図 8 に照明の分光放射照度の測定点を示す。照明直下と 2 列の照明間の位置における異なる 3 つの高さ、計 6 点（a–f）で照明光の実測をした。

照明直下の測定点 a で得られた分光放射照度の実測値は、照明のピークの波長（545 nm）で、メーカーが配付する IESNA（北米照明学会）規格の配光データ¹⁷⁾をそのまま入力した場合の計算値の 87%となった。したがって、これ以降の計算では、メーカーが配付する配光データの光度を、全方向で一律で 87%に減少させたデータを入力した。また、照明モデルの分光分布のデータは、照明の直下で測定した分光放射照度の強度比を 5 nm ごとに算出して入力した。

図 9 に照明モデルを修正した後の各測定点における照明の分光放射照度の実測値と計算値を示す。計算値には、スカイモデルから輝度の出力がない 24:00 において、照明モデルのみを光源として得た値を示した。図 8 に示した 6 つの測定点で、分光放射照度の実測値と計算値が概ね一致することを確認した。したがって、これ以降の計算でも、全ての照明モデルに実測値に基づいて編集した配光データと分光分布のデータを入力した。

Fig.6 Spectral transmittance and reflectance of the glass model

Fig.7 Spectral reflectance of each material in the classroom

Fig.8 Measurement position of luminaire spectral irradiance

Fig.9 Measured and calculated luminaire spectral irradiance

5. 実測およびシミュレーションの結果

5.1 屋内外の温湿度の実測結果

外気温は 27–34 °C、室温は 22–25 °C、外気相対湿度は 27–46 %、室内の相対湿度は 39–48 % であった。

5.2 日射量の実測結果

図 10 に屋外および室内 4 点における日射量を示す。最も窓側の測定点 A-1 では直達日射の影響を受け、最大で 480 W/m² に達した。室奥側の 2、3、4 行には直達日射が届かず、2 行で最大で 14 W/m²、3 行で最大で 7 W/m²、4 行で最大で 4 W/m² であった。

5.3 屋外の分光放射照度の実測値および計算値

図 11 に屋外の分光放射照度の実測値と計算値を示す。最も雲量が少なかった 13:06 では、430 nm を除き、波長 405–680 nm の範囲で実測値と計算値が概ね一致した。11:10 や 15:05 では、測定時に太陽にわずかに雲がかかったことで、実測値と計算値に差が生じたと考えられる。一方で、スカイモデルにおいて太陽光のフラウンホーファー線を再現していると考えられる¹⁸⁾ 380–400 nm や 430 nm の波長域では、13:06 においても実測値と計算値に差が生じた。また、実測値の 690 nm 付近や 730 nm、750 nm 付近に確認できる大気中 H₂O、O₂ 分子の吸収帯を ALFA は再現しておらず、全ての時刻で計算値が過大となった。

表 4 に各時刻における PPFD の実測値と計算値を示す。各時刻の分光放射照度の実測値と計算値から PPFD を算出した。最も雲量が少なかった 13:06 では PPFD の実測値と計算値が概ね一致した。その他の時刻では、PPFD の実測値と計算値にある程度の差が生じた。雲の存在により、スカイモデルに入力された輝度と実際の天空の輝度に差が生じたためと考えられる。

400–700 nm の波長域外におけるスカイモデルの再現性は照度や PPFD の計算にはほとんど影響しないが^{注 6)}、植物が受光する光の波長と、植物の光形態形成^{注 7)}の関係を検討する際には課題となる場合がある。特に、他の植物の陰に入った植物が茎の伸長や花芽形成の促進を示す避陰反応は、赤色光と遠赤色光の光束比 (R/FR 比) が関係する¹⁹⁾。R/FR 比の定義は研究者ごとに異なるが、一般的には Smith²⁰⁾ が提唱した 655–665 nm と 725–735 nm の波長域の光束比で計算される¹⁹⁾。したがって、遠赤色光の波長域での分子の吸収帯の非再現は、昼光が支配的な環境下で ALFA を用いた植物の避陰反応の予測をする際には改善すべき課題となる。

5.4 屋内の分光放射照度の実測値および計算値

屋外の分光放射照度の実測値と計算値が概ね一致した 13:00 付近において、屋内の各測定点の実測値と計算値を比較した。745–780 nm の波長域は分光測色計の測定範囲外であり、各部材の分光反射率を入力していないため、比較の対象外とした。

5.4.1 水平面における分光放射照度の実測値および計算値

図 12 に 13:00 付近における水平面の分光放射照度の実測値と計算値を示す。机上高さの A 列 (FL+800mm) と頭上高さの A' 列 (FL+2000mm) の結果を示した。

A、A' 列の解析点では、いずれも分光放射照度の実測値と計算値がほとんどの波長域で概ね一致した。昼光の影響を比較的大きく受けた A-1 では、545–680 nm の波長域で計算値が実測値を 1–9% 程度上回る傾向がみられた。これは主に窓ガラスモデルの分光透過率や分光反射率の入力値が原因であると考えられる。

Fig.10 Measured indoor and outdoor solar radiation

Fig.11 Measured and calculated outdoor spectral irradiance

Table 4 Measured and calculated outdoor PPFD

Time		9:10	11:10	13:06	15:05
PPFD [μmol/m²·s]	Exp.	1163	1701	1404	733
	Cal.	1231	1591	1411	822

また、スカイモデルでの大気中分子の吸収帯の非再現の影響を受け、690 nm や 730 nm 付近では計算値が実測値を上回った。A'-1 や A'-3 では 545 nm や 595 nm、610 nm などの照明の分光分布のピークの波長域で計算値が実測値をわずかに上回る傾向がみられた。これは実際の照明器具と入力した照明モデルの配光特性の差や、測定点と解析点の位置のずれが影響した可能性がある。

表 5 に 13:00 付近における水平面の PPFD の実測値と計算値を示す。分光放射照度の実測値と計算値から、各解析点の PPFD を算出した。各解析点の PPFD の計算値はそれぞれ実測値の 93–104% の範囲となり、昼光と照明光が混在する室内環境下で、PPFD の計算値は実測値と概ね一致した値を得た。

Fig.12 Measured and calculated indoor spectral irradiance (Horizontal plane, around 13:00)

Table 5 Measured and calculated indoor PPFD (Horizontal plane, around 13:00)

Position		A-1	A-2	A-3	A-4	A'-1	A'-2	A'-3	A'-4
PPFD [$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]	Exp.	66	30	19	9	31	29	23	7
	Cal.	67.2	29.8	18.0	9.0	32.2	28.7	21.3	6.5

Fig.13 Measured and calculated indoor spectral irradiance (Vertical plane, around 13:00)

Table 6 Measured and calculated indoor PPFD (Vertical plane, around 13:00)

Position		C-1	D-1	C-3	D-3	C'-1	D'-1	C'-3	D'-3
PPFD [$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]	Exp.	50	487	13	13	49	53	18	18
	Cal.	50.4	526.4	13.7	14.3	50.9	53.5	18.2	17.6

5.4.2 鉛直面における分光放射照度の実測値および計算値

図 13 に 13:00 付近における鉛直面の分光放射照度の実測値と計算値を示す。机上高さの C、D 列 (FL+800mm) の結果と頭上高さの C'、D' 列 (FL+2000mm) の結果を示した。

直達日射を受けた東側壁面の D-1 や、昼光の影響を比較的大きく受けた C'-1 や D'-1 では、545–680 nm の波長域で計算値が実測値を上回る傾向がみられた。これらは主に窓ガラスモデルの入力値に起因すると考えられる。一方で、室奥側の解析点では多くの波長域で分光放射照度の計算値が実測値と概ね一致した。

表 6 に鉛直面の各測定点における PPFD の実測値と計算値を示す。13:00 付近において、鉛直面の各解析点での PPFD の計算値はそれぞれ実測値の 98–110% の範囲となった。屋外の分光放射照度の再現が良好な 13:00 では、屋内の分光放射照度や PPFD の計算値が

実測値と近い値を得ることを確認した。特に直達日射を受けなかった解析点では PPFD の実測値と計算値の差の絶対値が概ね $2 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 以内となった。

本研究の PPFD の計算値は、ALFA で計算した 5 nm の波長間隔の分光放射照度から算出したが、屋内の PPFD の実測値と概ね一致した値を得た。したがって、5 nm の波長間隔の分光放射照度の計算値であっても、PPFD の予測に十分な結果が得られることが確認できた。分光放射照度の計算から建築内の PPFD を予測することで、主に屋内植物の生育に最低限必要な光強度を効率よく確保する際の検討に活用できる。特に、照明光の分光放射照度が比較的精度よく予測できたことから、照明を用いた植物への補光量の検討などに活用可能であると考えられる。

6 各測定点での PPFD の経時変化

分光放射照度の実測値および計算値から、各測定点の PPFD の経時変化を 1 時間ごとに算出した。

6.1 机上高さの水平面における PPFD の経時変化

図 14 に机上高さの水平面 (FL+800 mm) の PPFD の実測値と計算値を示す。測定点 A-1、B-1、A-3、B-3 の結果を示した。

窓付近の A-1、B-1 では直達日射を受ける時間帯がみられた。これらの時間帯では実測値と計算値が概ね一致したが、A-1 の 12:00 や B-1 の 14:00 などは、窓サッシなどのモデリング精度の影響や、測定点と解析点の位置のずれの影響を受け、実測値と計算値に差が生じた可能性がある。室内側の A-3、B-3 では、各時刻の計算値がそれぞれ実測値の 93–109% の範囲となり、時刻によらず比較的高い予測精度が得られた。

6.2 頭上高さの水平面における PPFD の経時変化

図 15 に頭上高さの水平面 (FL+2000 mm) の PPFD の実測値と計算値を示す。測定点 A'-1、B'-1、A'-3、B'-3 の結果を示した。

窓付近の A'-1、B'-1 では拡散日射の影響を比較的大きく受け、PPFD の実測値と計算値の差が変動した。主に午前中に計算値が過大になる場合がみられ、実際の天空と入力したスカイモデルの輝度分布の差の影響を受けた可能性がある。また、午後には実測値と計算値の差が減少する傾向があることから、地表面や周辺建物の外壁からの反射日射を忠実に再現することが困難であったことが影響した可能性がある。室内側の A'-3、B'-3 では、各時刻の計算値がそれぞれ実測値の 91–110% の範囲となり、時刻によらず比較的高い予測精度が得られた。

6.3 鉛直面における PPFD の経時変化

図 16 に鉛直面の PPFD の実測値と計算値を示す。西側壁面の机上高さの測定点 C-1、C-3 と頭上高さの測定点 C'-1、C'-3 の結果を示した。

C-1 では午前中に直達日射を受け PPFD が大きく変動したが、計算値は実測値と概ね同様の変動を示した。C'-1 では A'-1 や B'-1 と同様の原因により、時刻によって PPFD の実測値と計算値の差が変動したと考えられる。室内側の C-3 や C'-3 では、実測値と計算値がほとんどの時刻で概ね一致した。壁付近の鉛直面においても、照明光や室内側での拡散日射の受光量の予測が妥当であり、PPFD の予測精度が高く得られたと考えられる。

7 PPFD の実測値および計算値と植物生理指標の比較

各解析点での PPFD の経時変化を把握することで、それぞれの位置で植物の生育に十分な光量を得られる時間や、補光が必要になる時間帯の把握に活用できる。Tazawa²¹⁾は複数種類の植物の光補償点や光飽和点をまとめている。一般的な作物の光補償点は $PPFD = 17\text{--}34 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 程度、観葉植物の光補償点は $PPFD = 3.4\text{--}10.1 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 程度と示されている。植物の生育を維持するためには、それぞれの植物種の光補償点を超える PPFD を屋内で確保することが必要になる。PPFD の計算値と植物の光補償点の知見を比較することで、3D モデルでの計算により植物の生育に適した光環境を検討可能になる。

窓側の机上面の測定点 A-1、B-1 で直達日射を受けた時刻では PPFD の実測値および計算値が $600\text{--}1090 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 程度となった

Fig.14 Measured and calculated PPFD (Horizontal plane, FL+800)

Fig.15 Measured and calculated PPFD (Horizontal plane, FL+2000)

Fig.16 Measured and calculated PPFD (Vertical plane)

ことから、一般的な作物の光補償点や観葉植物の光飽和点 (PPFD=50–420 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) ²¹⁾を超えていたと判断できる。一方で、室奥側の A-3、B-3 では PPFD の実測値が 11–19 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 、計算値が 9.9–18.1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ となり、観葉植物の光補償点に概ね到達していることが定量的に示された。しかし、一般的な作物の光補償点には届かず、緑化に用いる植物種によっては、持続的な生育のために補光が必要になる場合があると考えられる。また、このとき A-3、B-3 の照度の実測値は 797–1250 lx であり、一般的なオフィスの光環境よりも大きな PPFD が得られていた可能性がある。

照明直下の頭上高さの測定点 A'-3 では PPFD の実測値が 19–23 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 、計算値が 17.5–21.7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ となった。照明間の頭上高さの測定点 B'-3 は PPFD の実測値が 10–15 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 、計算値が 11.0–15.4 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ となった。実測値と計算値とともに、照明直下の測定点では机上高さの水平面よりも大きな PPFD が得られることを示し、頭上高さであっても照明から水平位置が外れた場所では、机上高さよりも PPFD が小さくなる場合があることを示した。また、照明直下においても、PPFD が一般的な作物の光補償点には到達せず、光量が不足する可能性があることが示された。

窓側の鉛直面の測定点 C'-1 は拡散日射の影響を受け、時刻により PPFD が比較的大きく変動した。実測値、計算値ともにほとんどの時刻で 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ を上回り、一般的な作物の光補償点に達した。室奥側の鉛直面の測定点 C'-3 では実測値と計算値がともに 10–20 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 程度となり、観葉植物の光補償点には達するが、多くの時刻で一般的な作物の光補償点に達しない可能性が高い。壁付近の鉛直面の PPFD は、窓や照明との距離により解析点ごとに PPFD が大きく異なった。本手法で PPFD の分布を把握することは、壁面緑化のための効率的な補光用照明の配置や、昼光を利用した植物配置の検討などに役立つと考えられる。

これまでに述べた通り、建築内の分光放射照度の実測値や計算値から算出した PPFD と、植物の光飽和点や光補償点に関する知見の比較が可能になった。加えて、PPFD の経時変化から PPFD の日積算量である積算光合成有効光量子数 (Daily Light Integral、以下 DLI) (単位: mol/m^2) の概算が可能となる。DLI は主に温室で栽培される作物の収量や品質に関係する指標として用いられ ²²⁾、園芸作物の品質との関係 ²³⁾や、観葉植物の生育との関係を検証した研究も存在する ¹³⁾。植物の生育と DLI の関係についての知見を今後さらに収集することで、多角的な根拠から屋内植物のための光環境計画が可能になると考えられる。

一方で、PPFD の計算値と植物の光補償点に関する知見を比較する際には、屋内植物が暗所に順化し、光補償点が低くなる場合があることに注意が必要である。園芸用植物を屋内で生育し、低照度への順化を検証した研究では 1000 lx の低照度に適応した植物種も挙げられている ²⁴⁾。また、耐陰性の植物や暗所に順化した植物に過度な日射を当てることは、強光ストレスによる枯死の原因となる可能性がある。したがって、植物種の違いや環境への順化の度合いを勘案したうえで適切な建築内の光環境を計画する必要がある。同時に、頻繁に緑化に用いられる植物種については、建築内の温熱環境や CO₂ 濃度の条件を考慮した上で、持続的な生育が可能な光環境条件に関する更なる知見の収集が求められる。

8. まとめ

- 1) 本研究では屋内緑化のための光環境評価手法の提案に向け、波長別光環境解析「ALFA」の精度を大学教室での分光放射計を用いた実測により検証した。その後、分光放射照度の実測値や計算値から算出した PPFD により、植物の光飽和点や光補償点などの知見を利用して建築内の光環境を評価する手法を示した。
- 2) 屋外の分光放射照度の計算において、ALFA のスカイモデルで太陽光のブラウンホーファー線を再現している波長域や、大気中の H₂O、O₂ 分子の吸収帯を再現していない波長域で実測値と計算値の差が生じた。その他の波長域では、雲の影響が小さい場合、Clear のスカイモデルで得られた屋外の分光放射照度の計算値は実測値と概ね一致した。また、この時 PPFD の計算値と実測値も概ね一致した。
- 3) 屋内の分光放射照度の計算において、3D モデル内の各部材の分光反射率や照明の配光特性を実測に基づき入力した。屋外の分光放射照度の再現が良好な時刻では、屋内の分光放射照度の計算値も実測値と近い値を得た。本研究で分光放射照度の実測値と計算値の差が生じた主な原因には、窓ガラスモデルへの入力値や、雲の存在による天空の輝度分布とスカイモデルの輝度分布の差などが考えられた。
- 4) 屋内で分光放射照度の予測精度が高く得られた解析点では、PPFD の計算値も実測値と近い値を得た。したがって、本研究で検討した手法は、照明による屋内植物への効率的な補光量の検討や、昼光を有効に活用した屋内植物の配置の検討などに活用可能であると考えられる。

謝辞

本研究は、農林水産省人工知能未来農業創造プロジェクト推進事業/内閣府官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM)「AI を活用した栽培・労務管理の最適化技術の開発」および、科学研究費補助金・挑戦的研究 (萌芽) (課題番号 20K21038)、早稲田大学理工学術院総合研究所のプロジェクトの一部である。また、本研究の実施においては、当時早稲田大学大学院の高橋好斗氏に実験への協力や助言を頂いた。ここに記して感謝の意を示す。

注

注 1) Rhinoceros は Robert McNeel & Associates が開発した 3 次元 CAD ソフトウェアである。

注 2) ALFA (Adaptive Lighting for Alertness) は SOLEMA LLC により開発された光環境解析ソフトウェアである。光環境解析エンジン Radiance を拡張しており、380 から 780 nm の波長域で 5 nm ごとの分光放射照度の計算が可能である。ALFA では、Progressive Backwards Raytracing がアルゴリズムに採用されている。これにより、GPU を利用した計算の並列処理が可能になり、計算速度の向上を図っている。

注 3) 今回は解析点から光線を飛ばす試行回数を 20 回に設定して計算した。ALFA では 1 方向のビューの計算において、1 回につき 32 アンビエントサンプルを使用する。今回は各解析点につき 20 パスを計算したため、32×20=640 が各解析点でのアンビエントサンプル数となる。なお、ALFA では Progressive Backwards Raytracing のアルゴリズムを採用しているため、光線の情報に関するキャッシュデータが不要になっている。したがって、Ambient accuracy (-aa)や Ambient resolution (-ar)といった Radiance のパラメータは適用対象外となっている。また、ALFA での反射光の計算では、Radiance のパラメータ Ambient divisions (-ad)=1 とされており、Ambient super-sample (-as)は適用されていない。

- 注 4) ALFA のスカイモデルは、放射伝達ライブラリ libRadtran¹⁸⁾を用いて天空の色の分布を再現している。また、緯度、経度、高度および時刻の情報に加え、Sky Condition (Clear, Hazy, Overcast, Heavy rain cloud の 4 種類) の入力により、天空の輝度分布および分光分布を出力する。
- 注 5) 分光放射照度の計算において、建物の外壁の分光反射率に関する推奨値を示した文献は見られない。本研究では、Illuminating Engineering Society が提示する外壁の可視光反射率の推奨値 30%²⁵⁾を参考に、周辺建物の外壁の分光反射率を入力した。
- 注 6) 照度と PPFD の計算では、400 nm 以下と 700 nm 以上の波長域の影響はほとんど無視できると考えられる。これは、400 nm 以下と 700 nm 以上の人間の比視感度がほとんど 0 であること、PPFD の計算範囲が 400-700 nm の波長域であることによる。
- 注 7) 光形態形成とは植物の発芽や節間伸長などの光に依存して発生する形態変化を指し、各種の光受容体での反応を介して生じる。

参考文献

- INTERNATIONAL WELL BUILDING INSTITUTE, “WELL v2™ pilot”, (online), available from <https://v2.wellcertified.com/v2.2/en/overview> (accessed 2020-04-15)
- Institute for Building Environment and Energy Conservation, “CASBEE wellness office certification”, (online), available from <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/certification/WO_certification.html> (in Japanese) (accessed 2020-04-15).
一般社団法人建築設備・省エネルギー機構: CASBEE ウェルネスオフィス評価認証, (参照 2020-04-15)
- Nishina, H., Nakamoto, Y.: Analysis of Amenity Effect of Plnts and Fragrance on Human Physiology and Psychology by Means of Brain Waves and Semantic Differential Technique, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No. 509, pp.71-75, 1998. 7 (in Japanese)
仁科弘重, 中本有美: 観葉植物, 花, 香りが人間に及ぼす生理・心理的効果の脳波および SD 法による解析, 日本建築学会計画系論文集, 第 509 号, pp.71-75, 1998. 7
- Qin, J., Sun, C., Zhou, X., Leng, H., & Lian, Z.: The Effect of Indoor Plants on Human Comfort, Indoor and Built Environment, Vol.23(5), pp.709-723, 2013
- Hashimoto, Y., Toriumi, Y.: Study on Stress Recovery Effect of Greenery Volume in an Office Space, Result of Subject Experiments in a Simulated Office Space, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), Vol. 77, No.680, pp.2371-2378, 2012. 10 (in Japanese)
橋本幸博, 鳥海吉弘: オフィス空間における植物量のストレス緩和への影響に関する研究 模擬執務空間における被験者実験結果, 日本建築学会計画系論文集, 第 77 巻, 第 680 号, pp.2371-2378, 2012. 10.
- Iwasaki, Y., Kikuchi, N., Otsuka, Y., Yamada, R., Nakamura, M.: Effect of Plants Installation in Office Space upon the Office Worker, Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology, Vol.41, No.1, pp.239-242, 2015 (in Japanese)
岩崎寛, 菊池典子, 大塚芳崇, 山田隆介, 中村勝: オフィスにおける植物の設置が勤務者の心理に及ぼす影響, 日本緑化工学会誌, Vol.41, No.1, pp.239-242. 2015
- Genjo, K., Matsumoto, H., Ogata, N., Nakano, T.: Faesibility Study on Mental Healthcare Effect Using Plants Installation in Office Space, Journal of Environmental Engineering, (Transactions of AIJ), Vol. 83, No.743, pp.1-10, 2018. 1 (in Japanese)
源城かほり, 松本博, 緒方伸昭, 中野卓立: オフィス空間への植物設置によるメンタルヘルスクエ効果に関する実証研究, 日本建築学会環境系論文集, 第83巻, 第743号, pp.1-10, 2018. 1
- Ayuso Sanchez, J., Ikaga, T., & Vega Sanchez, S.: Quantitative Improvement in Workplace Performance through Biophilic Design: A Pilot Experiment Case Study, Energy and Buildings, Vol.177, pp.316-328, 2018
- Yin, J., Yuan, J., Arfaei, N., Catalano, P. J., Allen, J. G., Spengler, J. D.: Effects of Biophilic Indoor Environment on Stress and Anxiety Recovery: A Between-Subjects Experiment in Virtual Reality, Environment International, Vol.136, pp.1-10, 2020
- Kurita, T., Kawamura, T., Kondo, M: On Possibility of Growth of Plants for Landscaping Intensity of Illumination Indoors, J.JILA, Vol.59(1), pp.12-23, 1995 (in Japanese)
栗田瑞江, 河村止, 近藤三雄: 室内の低照度条件下における造園植物の生育可能性について, J.JILA, Vol.59(1), pp.12-23, 1995
- Oide, E., Kondo, M: Viability of Four Landscaping Tree Species under Interior Low Light Conditions, J.JILA, Vol.64(5), pp.537-540, 2001 (in Japanese)
大出英子, 近藤三雄: 光条件の異なる室内緑化空間での造園樹木 4 種の生育可能性について, J.JILA, Vol.64(5), pp.537-540, 2001
- Iwasaki, Y., Inoue, S., Yamamoto, S.: Effect on Growth of the Foliage Plants as Interior Goods under Different Managenent. LRJ, Vol.69(5), pp.447-450, 2006 (in Japanese)
岩崎寛, 井上紗代, 山本聡: インテリア雑貨としての観葉植物の生育特性に関する研究, ランドスケープ研究, Vol.69(5), pp.447-450, 2006
- Tan, C. L., Wong, N. H., Tan, P. Y., Ismail, M., and Wee, L. Y.: Growth Light Provision for Indoor Greenery: A Case Study, Energy and Buildings, Vol.144, pp.207-217, 2017
- McCree, K. J.: The Action Spectrum, Absorptance and Quantum Yield of Photosynthesis in Crop Plants, Agric. Meteorol., Vol.9, pp.191-216, 1972
- McCree, K. J.: Significance of Enhancement for Calculations Based on the Actioin Spectrum for Photosynthesis, Plant Physiol., Vol.49, pp.704-706, 1972
- CIE standards, (online), available from <http://www.cvlr.org/cie.htm> (accessed 2020-04-15)
- Panasonic, “IESNA light distribution data file”, (online), available from <https://www2.panasonic.biz/lsc/cec/ieshk/> (in Japanese) (accessed 2020-06-01)
Panasonic: IESNA 配光データファイル, (参照 2020-06-01)
- Mayer, B., Kylling, A.: Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use, Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, Vol.5(2), pp.1319-1381, 2005
- Goto, E.: Effects of Light Quality on Growth of Crop Plants under Artificial Lighting, Environment Control in Biology, Vol.41(2), pp.121-132, 2003
- Smith, H.: Sensing the Light Environment: the Functions of the Phytochrome Family, Photomorphogenesis in Plants, Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, pp.377-416, 1994
- Tazawa, S.: Effects of Various Radiant Sources on Plant Growth (Part1), Japan Agricultural Research Quarterly, Vol.33(3), pp.163-176, 1999
- Faust, J.E.: Ball Redbook: Crop Production, Ball Publishing, pp.71-84, 2001
- Faust, J. E., Holcombe, V., Rajapakse, N. C., and Layne, D. R.: The effect of daily light integral on bedding plant growth and flowering, HortScience, Vol.40(3), pp.645-649, 2005
- Okazawa, T., Nishijima, T.: Effect of Low Light Intensity on Longevity of Flowering on Bedding Plants Targeted for Indoor Use. Japan Agricultural Research Quarterly, Vol.51(3), pp.279-286, 2017
- Illuminating Engineering Society: IES LM-83-12, IES Spatial Datlight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE), 2013

SPECTRAL IRRADIANCE SIMULATION FOR EVALUATING LIGHT ENVIRONMENTS FOR INDOOR PLANTS

Soma SUGANO^{*1}, *Ryo NITTA*^{*2}, *Kan SHINDO*^{*2}, *Akihisa NOMOTO*^{*1},
Shu YODA^{*2}, *Tamaho SHIGEMURA*^{*3}, *Masahisa ISHII*^{*4} and *Shin-ichi TANABE*^{*5}

^{*1} Grad. Student, Dept. of Architecture, Waseda Univ., M.Eng.

^{*2} Grad. Student, Dept. of Architecture, Waseda Univ.

^{*3} Algorithm Design Lab., Inc.

^{*4} Institute for Rural Engineering, NARO, Ph.D.

^{*5} Prof., Dept. of Architecture, Waseda Univ., Dr.Eng.

Ornamental plants are frequently used in office workplaces to improve the well-being and productivity of employees. Additionally, the WELL Building Standard includes definitions for precondition and optimization features related to biophilia. Hence, there is a growing interest in biophilic design and indoor greenery. However, the growth of indoor plants may become stunted due to unfavorable lighting conditions. Therefore, a method for evaluating the light environments required for indoor plants to thrive is needed.

The purpose of this study is to apply a spectral irradiance simulation to develop a method for evaluating the appropriate light environment for indoor plants based on plant physiology. We used field measurements to verify the accuracy of the spectral irradiance simulations, which were performed by Adaptive Lightning for Alertness (ALFA), a circadian lighting design software. After verification, we calculated the photosynthetic photon flux density (PPFD), which is strongly correlated to photosynthesis, from the measured and predicted values of spectral irradiance. Based on knowledge of the relationship between PPFD and the light saturation and light compensation points of plants, we evaluated the suitability of the light environment in the building for plant growth.

The measurements were performed on a sunny day (October 5, 2019). The spectral irradiance was measured in the horizontal and vertical planes at desk and overhead heights (FL+800, 2000 mm) in a university classroom. In the simulation, measurement-based lighting distribution characteristics, spectral distribution, as well as the reflectance of each material were provided as input, and the spectral irradiance was calculated in a 3D model of the classroom. The accuracy of the simulation was verified by comparing the predicted and measured spectral irradiances both inside and outside the classroom.

The results demonstrate that the ALFA sky model produced errors when predicting the spectral irradiance in wavelength ranges that simulate the Fraunhofer line of sunlight (380–400 nm) and the absorption bands of H₂O and O₂ molecules in the atmosphere (approximately 680, 730 and 750 nm). In the 405–710 nm wavelength range, the measured and calculated spectral irradiance were almost the same. At indoor measurement points where the influence of direct solar radiation and light luminaire were significant, the spectral irradiance was predicted with a high degree of accuracy. Errors in this study were mainly caused by errors in the spectral transmittance of the glass models, as well as input errors in the spectral reflectance of the ground surface and the surrounding buildings.

By calculating the PPFD from the measured and simulated spectral irradiance values, it was possible to evaluate the light environment, in an indoor space based on knowledge of plant physiology such as light saturation and light compensation points of plants. This method can be applied to the planning of supplementary lighting for plants and the planning of indoor plant placement that makes effective use of daylight.

(2020 年 7 月 6 日原稿受理, 2020 年 12 月 14 日採用決定)