

令和 5 年 6 月 3 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21038

研究課題名（和文）波長別光環境を考慮した建築内植物の生育評価手法に関する研究

研究課題名（英文）Evaluation of indoor plant growth considering spectral light environment

研究代表者

田邊 新一（Shin-ichi, Tanabe）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：30188362

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、分光放射照度の数値シミュレーションを応用し、植物の光合成と相関が高い光合成有効光量子束密度を建築の3次元モデルソフトを利用して計算する手法を開発した。実測値と計算値を比較することで、開発した手法の予測精度が高いことを検証した。また、農学の分野でも知見の少ない、観葉植物の居室内での適切な光環境について、グロースチャンバーを用いた実験を行った。オフィスを模擬した3つの照明条件で観葉植物を約半年間栽培し、生育に必要な光量を明らかにした。以上の研究により、在室者の快適性や知的生産性の向上を意図した屋内緑化について、植物の持続的な生育を可能にする室内光環境の評価法や条件を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、執務者の快適性や知的生産性の向上のため、建築内緑化の事例が増加している。建築内の植物が持続的に生育可能な光環境の評価方法や条件が求められる。本研究では、波長別光環境シミュレーション技術を用いて、植物の光補償点などを基準とした光量の評価と、植物の光受容体の分光感度を考慮した光質の評価が可能な方法を開発した。また、農学分野でも知見の少ない、観葉植物に求められる光環境の条件を実験により明らかにした。本研究の成果は、植物の生理を考慮した屋内緑化の設計手法に応用可能であり、温室の設計などを通して農学へも成果の展開が可能なものである。

研究成果の概要（英文）：This study developed a method to calculate the photosynthetic photon flux density that correlates with plant photosynthesis using 3D modeling software and spectral irradiance simulation. The accuracy of the developed method was verified by comparing measured and calculated values. Additionally, experiments using a growth chamber were conducted to investigate the appropriate light environment for indoor foliage plants, which is an area with limited knowledge in the field of agriculture. Foliage plants were grown under three lighting conditions simulated to office environment for approximately six months, and the amount of light necessary for growth was determined. This research provided a new evaluation method of light environment for indoor plants and knowledge on required light levels for sustainable growth of indoor foliage plants.

研究分野：建築環境学

キーワード：屋内緑化 バイオフィリックデザイン シミュレーション グロースチャンバー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築分野では、建築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」が執務者の快適性や知的生産性の向上に寄与するとして注目を集めており、屋内緑化の事例が増加している。しかし、建築設計において植物の生理に関する知見が反映されないことで、植物の健全な生育が持続しない例や、植物への過剰な補光によるエネルギーロスが発生した例が報告されている。屋内直物を持続的に生育可能な室内環境の設計・計画に関する知見が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、波長別光環境を考慮した建築内の植物の生育評価手法を開発することである。建築学と農学の知見を反映し、屋内植物が持続的に生育可能な光環境の設計や評価に貢献することを目標としている。

3. 研究の方法

植物生理に関する知見に基づいた屋内植物の生育評価手法を開発するため、以下の項目について研究を実施した。

(1) 波長別光環境シミュレーションを用いた建築内植物の生育評価手法の開発

光合成有効光量子束密度 (Photosynthetic Photon Flux Density、以下 PPF) 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評価指標として用いられている。本研究では、建築の 3D モデル内で PPF の空間分布を計算する手法を開発した。本手法を用いることで、植物の植物の光飽和点 (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、農学の知見を活用して建築の光環境を設計・評価することが可能になる。本実験では、大学教室での分光放射照度の実測値と、3D モデリングソフト Rhinoceros のプラグイン Adaptive Lighting for Alertness (以下 ALFA) による計算値を比較することで、開発した手法による PPF の予測精度を検証した。

図 1(A) に実測対象教室の内観、図 1(B) に教室を再現した 3D モデルの内観を示す。図 2 に分光放射照度の測定位置を示す。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。天候はほぼ全ての時刻で晴天であった。天井には直管蛍光灯が 4 列設置されており、全ての照明を実測中は常に点灯させた。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。シミュレーションでは、実測対象建物および周囲の建物の 3D モデルを作成し、教室内外の分光放射照度を実測と同じ位置で計算した。また、照明光を再現するために別の実測を行い、全ての照明モデルに実測値に基づいた配光データと分光分布のデータを入力した。教室内の各部材の分光反射率も分光測色計 (コニカミノルタ、CM-26d) による実測値を入力した。

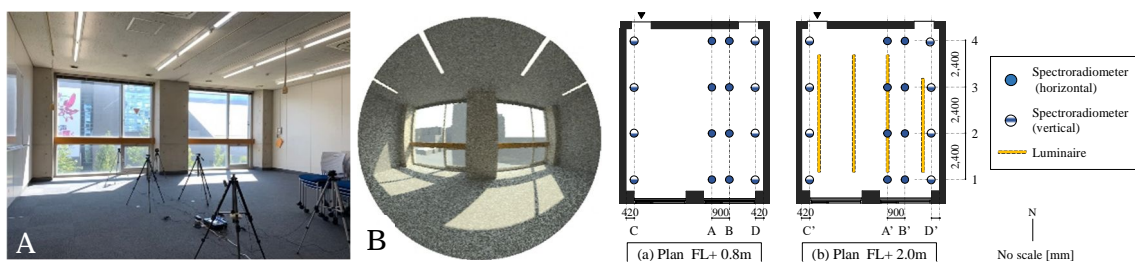


図 1 (A)実測対象教室 (B) 教室の 3D モデルの内観

図 2 分光放射照度の測定位置

(2) 温室での分光放射照度の予測と光合成・光形態形成の評価

茨城県つくば市のトマトが定植されている温室と、それを再現した温室の 3D モデル内で、それぞれ分光放射照度の測定と計算を行った。植物の群落における波長別光環境の再現性を検証することを目的とした。図 3 に測定点と測定時の写真を示す。PPFD と、植物の光形態形成に係る赤色光と遠赤色光の比 (以下、R/FR) の予測精度を検証した。分光放射照度はトマト群落内と屋上で測定した。群落の葉面積指数 (LAI) は測定位置付近の 4 株の葉の形状を定規で測定し、既往研究の推定式を用いて算出した。測定した LAI を反映して群落の 3D モデルを作成した。

温室の 3D モデルのガラスの分光透過率は、温室内外の分光放射照度の測定値に基づき入力した。群落の葉の分光透過率および分光反射率は、既往研究を参考に入力した。さらに、植物群落内の分光分布の再現に必要なパラメータを調べるため、4 種類の群落モデルを作成して計算を行った (図 4)。

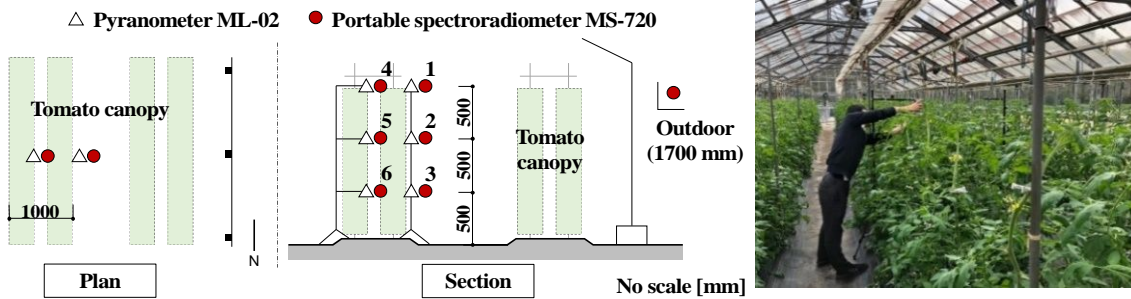


図3 温室内の分光放射照度の測定点と測定時の写真

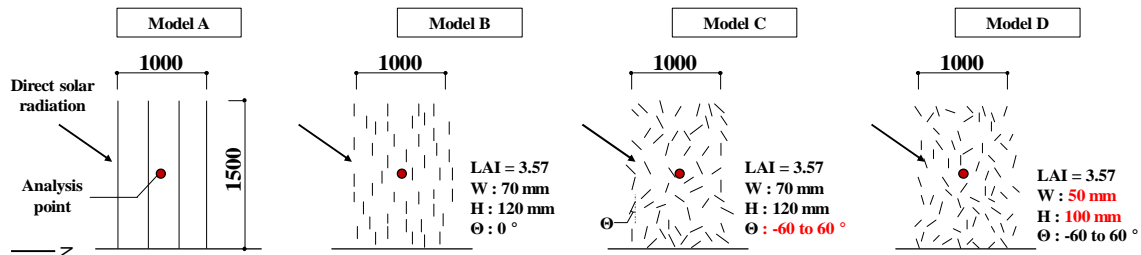


図4 植物群落を再現したモデルの概要

(3) グロースチャンバーを用いた観葉植物の生育評価実験

室内の観賞用植物の生育に適した光量に関する知見は限られている。本実験では、オフィスの室内環境を模擬した低照度条件下での観賞植物の生育可能性を検証することを目的とした。また、一日当たりの露光時間や植物への補光の強度が観葉植物の成長に及ぼす影響も併せて分析した。3種の観葉植物 (*Epipremnum aureum*, *Pachira aquatica*, *Rhaphidophora tetrasperma*) を、光強度と露光時間の組み合わせが異なる3種の環境条件のグロースチャンバー内で約半年にわたり生育した。表1に各実験条件での環境の測定値、図5にグロースチャンバー内の供試植物を示す。グロースチャンバー内の照明には青色LEDに黄色の蛍光塗料を用いた白色LED照明を用いた。温度は約22℃、相対湿度は約50%を目標に制御した。

1か月に一度の頻度で、葉の葉緑素量と相関するSPAD値や葉の枚数を測定した。*P. aquatica* については、光合成蒸散測定器を用いて光合成速度を測定した。また、実験期間の最後には供試植物を分解し、新鮮重や乾物重、葉面積を測定し、相対成長速度を算出した。

表1 各実験条件での環境の測定値, Mean(SD)

	Case 1 (Low)	Case 2 (Medium)	Case 3 (High)	Accuracy
Air temp. (°C)	23.1 (1.0)	22.5 (0.4)	22.1 (0.2)	±0.5°C
Humidity (%RH)	45 (7)	55 (5)	59 (8)	±5%
CO ₂ (ppm)	491 (86)	512 (93)	472 (69)	±50 ppm
Illuminance (lx)	498 (10)	490 (6)	1496 (12)	±5%
PPFD (μmol / m ² ·s)	6.8 (0.1)	6.7 (0.1)	20.1 (0.2)	-
Light exposure time (h / d)	9	18	18	-
DLI (mol / m ²)	0.22	0.43	1.30	-



図5 グロースチャンバー内の供試植物

4. 研究成果

(1) 波長別光環境シミュレーションを用いた建築内植物の生育評価手法の開発

図6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、430nmを除き、波長405-680nmの範囲で実測値と計算値が概ね一致した。この時PPFDの計算値と実測値も概ね一致した。図7に屋内の分光放射照度の実測値と計算値を示す。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。代表して机上高さの水平面のA列（FL+800mm）の結果を示した。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。分光放射照度の実測値と計算値の差の主な原因には、窓ガラスモデルへの分光透過率や分光反射率の入力値の誤差などが考えられた。

屋内の各解析点のPPFDの計算値はそれぞれ実測値の93-104%の範囲となり、日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。なお、壁面付近などの他の実測点においてもPPFDの計算値は実測値と概ね一致した。本研究で提示した手法により、建築の3Dモデル内でPPFDの経時変化を把握することで、各場所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が可能になった。

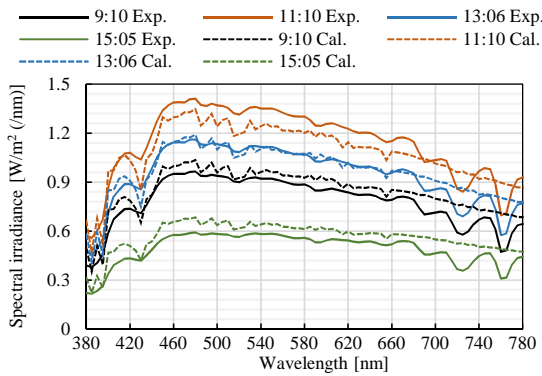


図6 屋外の分光放射照度の実測値と計算値

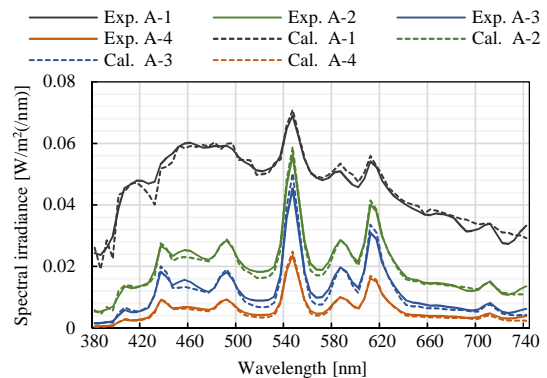


図7 屋内の分光放射照度の実測値と計算値

(2) 温室での分光放射照度の予測と光合成・光形態形成の評価

図8に温室内外とトマト群落内の分光放射照度の実測値と計算値を示す。群落内の測定値は、2つの測定点（図3中の測定点5、6）の平均値で示した。屋外と温室内の分光放射照度の測定値と計算値は概ね一致し、研究課題(1)で開発したPPFDの予測手法が温室でも適用できることが示された。一方で、太陽光のフラウンホーファー線（380~400nm）と大気中のH₂O、O₂分子の吸収帯（約690、730、750nm）の波長域では、分光放射照度の計算値が測定値を上回る傾向がみられた。

群落内の分光放射照度の分布は、個葉のモデルの大きさや傾きが計算結果に影響することを確認した。特にModel Cを用いた場合に、最も計算値が実測値と近い値を得た。この時、PPFDの実測値は65 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、計算値は80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ であった。また、R/FRの実測値は0.61、計算値は0.71であった。R/FRの計算においてはスカイモデルの分子の吸収帯の再現性が誤差の原因となるため、スカイモデルの精度を更に向上させる必要がある。本研究では、植物の群落の内部に形成される波長別光環境の再現方法について、群落の3Dモデルを用いた手法を開発した。

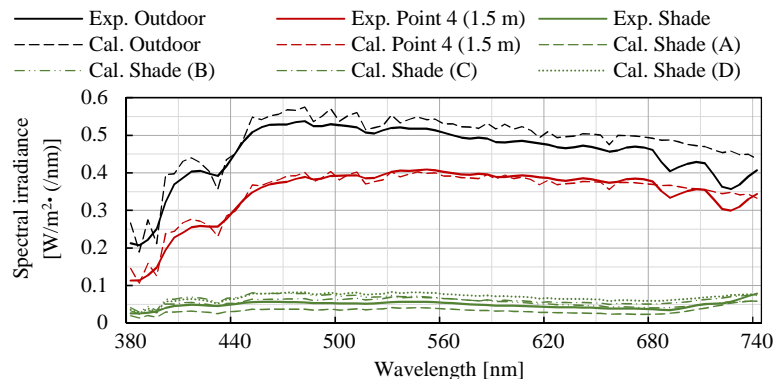


図8 温室内外とトマト群落内の分光放射照度の実測値と計算値

(3) グロースチャンバーを用いた観葉植物の生育評価実験

図9に各実験条件での処理後の供試植物の外観写真を示す。最も白色LED照明による日積算受光量が少ない条件(500lx、9時間露光、DLI = 0.22 mol/m²・d)でも、3種の植物が持続的に生育できることが確認された。このことから、十分な耐陰性を持つ植物種を選択してオフィス内に配置する場合には、植物のための補光によるエネルギー消費は不要である可能性が示された。一方、約500 lx (PPFD = 6.8 μmol/m²・s)の光量を与えた条件と、1500 lx (PPFD = 20.1 μmol/m²・s)の光量を与えた条件では、外観や相対成長速度、光合成能力に差が生じることが明らかになった(図10, 11)。補光により観葉植物の成長速度や外観が異なることが示されたため、植物の生長を求める場合や照明のエネルギー消費を抑える場合など、緑化計画の意図に応じて照明の量を調整することが有効と考えられる。本実験では建築の照明によるPPFDの差によって植物の生育が異なることが示された。研究課題(1)では建築内のPPFDの空間的な分布を精度よく計算する手法を示しており、本実験の結果と併せて屋内緑化空間の照明設計や昼光利用の計画に活用できると考えられる。

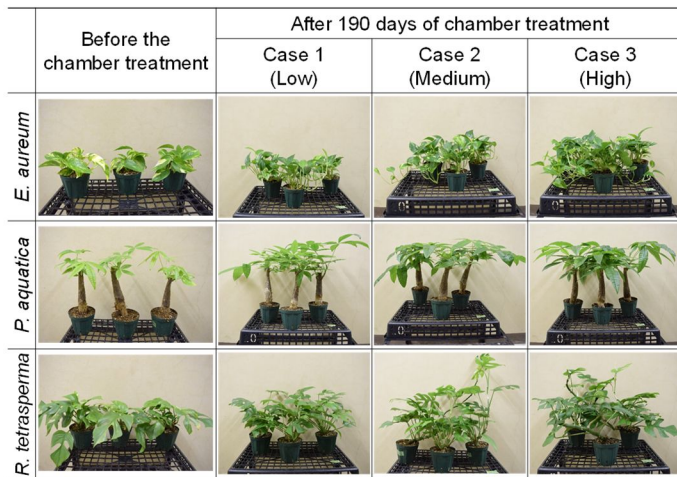


図9 各実験条件での処理後の供試植物の外観

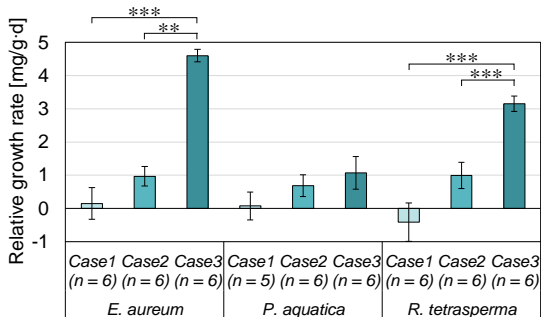


図10 実験条件ごとの相対成長速度の測定値

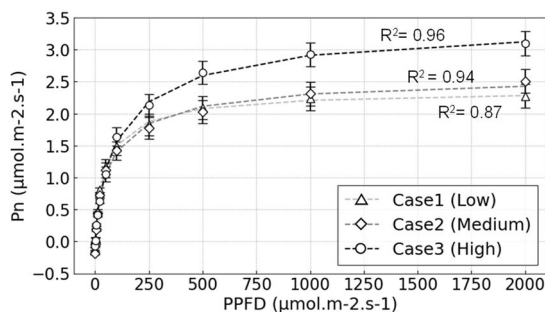


図11 *P. aquatica*の実験条件ごとの光合成曲線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sugano Soma, Nitta Ryo, Shindo Kan, Nomoto Akihisa, Yoda Shu, Shigemura Tamaho, Ishii Masahisa, Tanabe Shin ichi	4. 巻 4
2. 論文標題 Spectral irradiance simulation for evaluating light environments for indoor plants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW	6. 最初と最後の頁 649 ~ 659
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2475-8876.12246	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 菅野颯馬, 新田竜, 新藤幹, 野元彬久, 依田柊, 重村珠穂, 石井雅久, 田辺新一	4. 巻 86
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 337 ~ 346
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aije.86.337	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sugano Soma, Tazaki Miku, Arai Haruka, Matsuo Kazuya, Tanabe Shin ichi	4. 巻 5
2. 論文標題 Characteristics of eye movements while viewing indoor plants and improvements in occupants' cognitive functions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW	6. 最初と最後の頁 621 ~ 632
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2475-8876.12284	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 菅野颯馬, 田崎未空, 新田竜, 大庭檀, 高橋秀介, 田辺新一
2. 発表標題 バイオフィリックデザインを導入した模擬執務空間での心理・生理的効果に関する被験者実験 第1報 実験概要と生理量の測定結果
3. 学会等名 日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田崎未空, 菅野颯馬, 新田竜, 大庭檀, 高橋秀介, 田辺新一
2. 発表標題 バイオフィリックデザインのための波長別光環境解析に関する研究 第2報 心理量の測定結果
3. 学会等名 日本建築学会大会(関東)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅野颯馬, 田崎未空, 新田竜, 大庭檀, 高橋秀介, 田辺新一
2. 発表標題 窓と観葉植物を併用した室内での心理・生理的効果に関する被験者実験 第1報 実験概要と生理量の測定結果
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会(福島)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田崎未空, 菅野颯馬, 新田竜, 大庭檀, 高橋秀介, 田辺新一
2. 発表標題 窓と観葉植物を併用した室内での心理・生理的効果に関する被験者実験 第2報 心理量、知的生産性および視線計測の結果
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会(福島)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅野颯馬, 新田竜, 新藤幹, 野元彬久, 依田柊, 重村珠穂, 石井雅久, 田辺新一
2. 発表標題 バイオフィリックデザインのための波長別光環境解析に関する研究 第1報: 実測およびシミュレーション概要
3. 学会等名 日本建築学会大会(関東)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新田竜、菅野颯馬、新藤幹、野元彬久、依田柊、重村珠穂、石井雅久、田辺新一
2. 発表標題 バイオフィリックデザインのための波長別光環境解析に関する研究 第2報：精度検証結果と光合成有効光量子束密度の算出
3. 学会等名 日本建築学会大会（関東）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅野颯馬、新田竜、新藤幹、石井雅久、田辺新一
2. 発表標題 波長別光環境解析を応用したバイオフィリックデザインに関する研究 第1報 植物生育評価指標の算出方法とオフィスモデルを用いたケーススタディ
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新田竜、菅野颯馬、新藤幹、石井雅久、田辺新一
2. 発表標題 波長別光環境解析を応用したバイオフィリックデザインに関する研究 第2報 波長別光環境解析の精度検証と植物生育評価指標に基づく光環境評価
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Soma Sugano, Miku Tazaki, Haruka Arai, Kazuya Matsuo, Shin-ichi Tanabe
2. 発表標題 Effects of Indoor Plants on Occupants' Cognitive Functions: A Systematic Review
3. 学会等名 Indoor Air 2022（国際学会）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Miku Tazaki, Soma Sugano, Ryo Nitta, Mayumi Ohba, Shusuke Takahashi, Shin-ichi Tanabe
2. 発表標題 Gender Differences in Psychological Responses and Eye Movements for Biophilic Rooms
3. 学会等名 Indoor Air 2022 (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅野颯馬, 田崎未空, 新井遥, 松尾和弥, 田辺新一
2. 発表標題 視線計測を用いた観葉植物による認知機能の改善効果に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Soma Sugano, Masahisa Ishii, Shin-ichi Tanabe
2. 発表標題 Study on the lighting requirements of indoor ornamental plants using growth chambers
3. 学会等名 Healthy Buildings Europe 2023 (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------