

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02322

研究課題名（和文）植物の水利用戦略からみた光環境とストレス要因の複合影響の解明と環境制御への応用

研究課題名（英文）Evaluation of the effects of light environment on plant responses to stressors through changes in water use strategies and its application to environmental control in horticultural production.

研究代表者

渋谷 俊夫 (Shibuya, Toshio)

大阪公立大学・大学院農学研究科・教授

研究者番号：50316014

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：遠赤色光（FR）の割合の異なる照射光に順化したキュウリ実生の通水コンダクタンス（Kleaf）を評価した。KleafはFRの減少とともに増大した。葉脈密度を調べた結果、低FRによるKleafの増大は葉脈の発達によることが示唆された。低FRに順化した植物のストレス応答特性を調べるために、異なるFRの割合に順化した実生を高飽差（VPD）条件に移したときの気孔コンダクタンス（ g_s ）の変化を評価した。高VPDへの移行後における g_s と葉内水ポテンシャルの低下は、FRの少ない照射光に順化した実生では程度が小さかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

チャンパーとフィールドでのストレス影響の違いについての研究は、光強度に注目したものが多いが、それに対し本研究では、光質（遠赤色光）に着目し、植物の水利用戦略の可塑性からその可能性を示した点は学術的に価値が高い。葉内の通水コンダクタンスに及ぼす光質の影響は、植物生産科学分野においても報告されており、生産性の制限因子としてその重要性が指摘されているが、水利用戦略の変化を介してストレス制御を行った事例はみあたらない。遠赤色光によって通水コンダクタンスを高めることによって高飽差におけるストレスを緩和できたことは、人工光源を用いたハードニング技術として植物ストレス制御の新しい展開をもたらすものである。

研究成果の概要（英文）：We evaluated leaf hydraulic conductance (Kleaf) of cucumber seedlings acclimatized to light with different proportions of FR. Kleaf tended to increase with decreasing FR light. Kleaf and leaf vein length density were significantly positively correlated, indicating that increased Kleaf caused by low FR light may have been caused by changes in leaf vein structure. To clarify whether acclimatization to low-FR light improved tolerance to high evaporative demand, we evaluated changes in g_s and photosynthesis when seedlings that had been acclimatized to different proportions of FR light were transferred to a high vapor-pressure deficit (VPD) condition. After transfer to high VPD, g_s and leaf water potential of the seedlings decreased in all treatment groups, but the decrease was smaller in the low FR seedlings. After transfer to high VPD, the quantum yield of photosystem II decreased significantly in the high FR seedlings, but not in the low FR seedlings.

研究分野：生物環境調節学

キーワード：通水コンダクタンス 環境制御 ストレス応答 ガス交換 フィトクロム 光質

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

植物のストレス影響がグロースチャンバーとフィールドで異なることが知られている。この課題について、表現型データのメタ解析や実験的手法によるバイオマス分配の解析によって、チャンバーとフィールドでの差異をもたらす要因を見つけ出そうとする試みが行われている。しかし、植物の成長過程は複雑であり、現時点ではその差異をもたらす複合要因は十分に解明されていない。このようなチャンバーとフィールドでのストレス影響の違いは、植物生産においても重要な意味を持つ。両者のストレス影響の差異をもたらす複合要因を解明することによって、生産過程で生じるストレスを緩和できる可能性がある。本研究は、グロースチャンバーとフィールドでのストレス影響の違いには、光源の光質の違いによる葉の通水コンダクタンスの違いが影響していると仮説を立てた。

2. 研究の目的

植物は遠赤色光 (FR) の割合が多い光照射下では、自身が他の植物に覆われていることを感知し、その環境から逃れるように、またはその環境に順応するように形態や生理的特性を変化させる。これは活性型フィトクロムの割合の減少に伴って生じる避陰反応である。逆に植物は、活性型フィトクロムの増大から自身がオープンな場所に存在すると感知し、葉を厚くする、気孔コンダクタンス (g_s) を大きくすることで、強い光強度において有利な性質に自身を変化させる。この現象は、自然ではほとんど生じない自然光よりも FR が少ない光照射下でも生じる。このことから、蛍光灯などの FR の少ない光照射下では、植物葉は強い光を受けたような光合成特性をみせる。

もし FR の少ない照射光を過剰に強い光と感知しているのであれば、その状況に有利になるように葉内通水コンダクタンス (K_{leaf}) を増大させる可能性がある。強光下において植物は、強光下での光合成を最適化するために、気孔コンダクタンスや最大光合成速度と共に K_{leaf} を増大させる。 g_s の増大は葉内外の CO_2 拡散の増大をもたらすと共に、水蒸気拡散の増大による水損失を増大させる。このとき、葉内の水分状態を保ちながら高い g_s を維持するためには、葉への水供給が効率的に行われる必要があることから、強光下において K_{leaf} を増大させることは合理的である。本研究では、照射光中の FR の割合の低下が K_{leaf} を減少させ、それにともなって高い蒸散要求によるストレスを軽減できると仮説を立てた。

本研究では、自然環境ではほとんど存在しない太陽光よりも FR の少ない光照射に焦点を当てる。FR の少ない光照射下での K_{leaf} を明らかにすることは、2つの意味がある。ひとつ目の意味は植物実験における光源の選択をどのように行うべきかの指針である。グロースチャンバーでは白色蛍光灯や白色 LED など FR を含まない光源が用いられていることが多い。そのような光照射下で増大する活性型フィトクロムは、植物の乾燥に対するストレス影響を小さくすることが知られている。その原因は完全に明らかになっていないが、もし FR の少ない照射光下で K_{leaf} が大きくなっていけば、それにともなって水輸送が促進され、水ストレスが軽減される可能性がある。光源によるストレス応答の違いに K_{leaf} の違いが関与するのであれば、そのことはグロースチャンバーにおける光源の選択において考慮すべきである。

ふたつ目の意味は、園芸生産において、FR の少ない光照射下で植物を育成することで、生産過程で生じる蒸散要求の変化によるストレスを軽減できる可能性があることである。FR の少ない光照射下で育成した苗は太陽光と同じ割合の FR の光源下に比べて、移植後の純同化速度が大きくなることが知られている。その理由として、FR の少ない光照射下で K_{leaf} が大きいことが、移植後のストレスを軽減した可能性がある。このことは、従来の水ストレスを与えることで移植後のストレスを軽減するハードニング技術とは異なる、光質を用いたハードニング技術の可能性を示唆するものである。

本研究では、照射光中の FR が K_{leaf} に及ぼす影響を調べるために、FR の割合の異なる LED 光照射下で順化したキュウリ実生の K_{leaf} を評価した (実験 1)。さらに、照射光中の FR の制御によってストレス応答特性が変化するかを明らかにするために、それらの実生が高 VPD 環境に移されたときの気孔コンダクタンスおよび光合成活性の変化を調べた (実験 2)。

3. 研究の方法

3.1 遠赤色光が通水コンダクタンスに及ぼす影響 (実験 1)

キュウリ (*Cucumis sativus* L., '北進') をパーミキュライト培地の入ったプラスチックポットに播種し、人工気象室で育成した。キュウリ実生を、FR を3段階に変えた LED 照射下で第2本葉展開まで育成した。照射光の青、緑、赤の比率は、30%、35%、35%とした。FR の水準は、FR を太陽光と同じ割合で含む光 (R/FR 比 = 1.2, FR+)、FR を太陽光の割合の約 50% 含む光 (FR₅₀)、FR を含まない光 (FR-) の3段階とした。それぞれのフィトクロム光平衡状態は 0.72、0.79 および 0.86 と推定された。照射光の光合成有効光子束密度は $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とした。気温は 28°C 、VPD は 1.9 kPa した。

第2本葉展開時に第1本葉の葉柄を切断した。その葉の K_{leaf} を減圧チャンバー法で計測した。耐

圧アクリルボックスに個葉を入れた。葉柄は KCl 溶液の入ったビーカーとシリコンチューブで繋げた。アクリルボックスに空けた穴からシリコンチューブを出した。KCl 容器の入ったビーカーの重さは、電子天秤で連続的に測定した。ポンプを用いてアクリルボックス内のゲージ圧が 0.04 MPa になるように減圧した。減圧後の KCl 溶液の減少量を天秤で計測し、吸水速度を求めた。計測後求めた葉面積 (A), 吸水速度 (F), 減圧チャンパー内外の圧力差 (ΔP) から、 K_{leaf} を算定した。

$$K_{leaf} = F / (A \cdot \Delta P)$$

ここで、 K_{leaf} は葉の通水コンダクタンス ($g\ m^{-2}\ s^{-1}\ Pa^{-1}$), A は葉面積 (m^2), F は通水速度 ($mol\ s^{-1}$), ΔP は減圧チャンパー内の圧力差 (Pa) である。

K_{leaf} の計測後に一部のサンプルの葉脈密度および葉面積あたりの乾物重を計測した。葉脈密度は、スキャンした葉画像から目視で葉脈を判別し、その長さを画像解析ソフトで計測することで求めた。

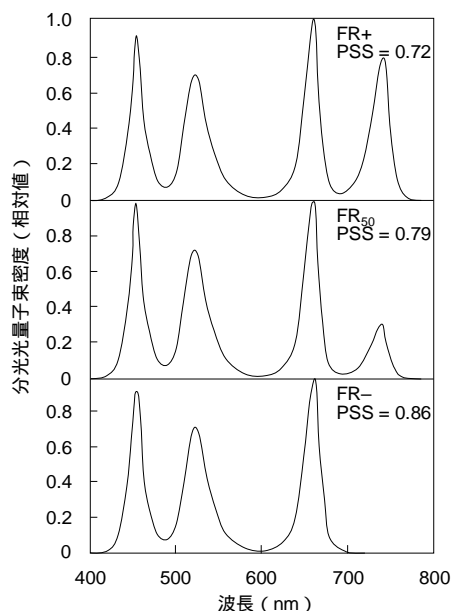


図1 光源の分光光子束密度

3. 2 遠赤色光の割合の異なる照射光下に順化した植物の高飽差への応答 (実験 2)

キュウリ実生をグロースチャンパー内で育成した。光照射条件は、FR+およびFR-の2水準とした。照射光のPPFDは $300\ \mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ とした。気温は $28^\circ C$, VPDは $0.8\ kPa$ とした。第1本葉展開後、高VPD環境に制御したグロースチャンパー内に移動させ2日間育成を行った。移動後のPPFDは $300\ \mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$, 気温は $28^\circ C$, VPDは $2.3\ kPa$ とした。光源にはメタルハライドランプを用いた。キュウリ実生を移動後2時間は10~30分おきに、その後は1日おきに fluorometer/porometer (LI-600, LI-COR Inc.) を用いて第1本葉の g_s と光化学系 II における実効量子収率 (Φ_{PSII}) を計測した。移動時、120分後および2日後に5個体をサンプリングして、サイクロメータを用いて第1本葉の Ψ_{leaf} を計測した。

4. 研究成果

4. 1 遠赤色光が通水コンダクタンスに及ぼす影響 (実験 1)

K_{leaf} は、FRの割合の低下 (PSSの増加) にともなって増加する傾向が見られた (図2)。太陽光と同じFRの割合 (PSS = 0.72) から遠赤色光なし (PSS = 0.86) に遠赤色光を減らすと、 K_{leaf} は2.57倍になった。葉脈密度もFRの割合の低下 (PSSの増加) にともなって増加する傾向が見られた (図2)。太陽光と同じFRの割合から遠赤色光なしに遠赤色光を減らすと、葉脈密度は1.23倍になった。葉脈密度と K_{leaf} との間には正の相関がみられた ($r = 0.846$)。 K_{leaf} は、木部内と木部外の両方の水輸送効率を反映している。葉脈密度と K_{leaf} との正の相関がみられたことから、遠赤色光が少ないことで K_{leaf} が増大したのは、葉脈構造の変化が関与した可能性がある。光強度による葉脈密度や道管サイズの変化は、植物の水利用の最適化のための生態的な戦略である。キュウリ実生がFRの割合から光強度を感知することで、これと同様の反応が生じたのかもしれない。

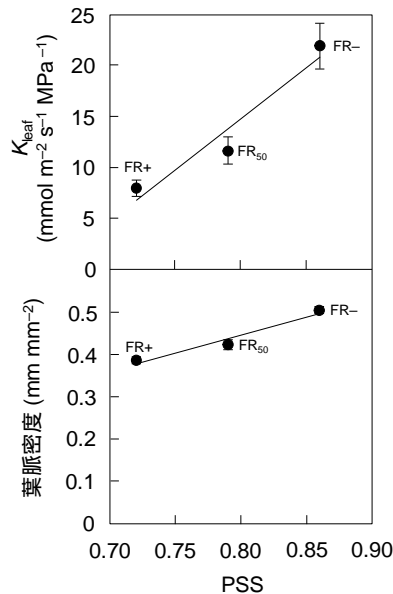


図2 フィトクロム光平衡状態 (PSS) が葉内通水コンダクタンス (K_{leaf}) および葉脈密度に及ぼす影響 (実験1)

4.2 遠赤色光の割合の異なる照射光下に順化した植物の高飽差への応答 (実験2)

高 VPD に移す直前の g_s は FR-において FR+よりも大きかった。高 VPD に移動後に、 g_s はどちらの光処理を受けた実生でも低下したが、FR-に順化した実生の方が FR+に順化した実生よりも低下が小さかった (図3)。高 VPD 移動2時間後、24時間後および48時間後における g_s は、FR-に順化した実生において FR+に順化した実生のそれぞれ3.08倍、2.09倍および1.58倍であった。

高 VPD に移す直前の Ψ_{leaf} は、両光処理間で有意差はなかった (図3)。高 VPD に移動後に、 Ψ_{leaf} はどちらの光処理を受けた実生でも低下したが、FR-に順化した実生の方が FR+に順化した実生よりも低下が小さかった。高 VPD 移動後24時間および48時間における Ψ_{leaf} は、FR-に順化した実生において FR+に順化した実生のそれぞれ1.57倍および1.29倍であった。

高 VPD に移す直前の Φ_{PSII} は、両光処理間で有意差はなかった (図3)。高 VPD 移動後に、 Φ_{PSII} は FR-に順化した実生では低下しなかったが、FR+に順化した実生ではすぐに低下した。高 VPD 移動2時間後、24時間後および48時間後における Φ_{PSII} は、FR-に順化した実生において FR+に順化した実生のそれぞれ1.13倍、1.15倍および1.22倍であった。

遠赤色光の割合の低下が K_{leaf} を増大させる生態的な意味は次の通りである。遠赤色光の少ない照射光下では、活性型フィトクロムの増大から自身がオープンな場所に存在すると感知し、葉を厚くする、気孔を発達させて g_s を大きくすることで、強光での光合成効率を高める。強い光により CO_2 固定効率を高めるために g_s を増大させることは、同時により多くの水損失を生じさせるため、水分供給効率を高めるように K_{leaf} を増大させることは合理的である。実験2において、FR-で順化したキュウリ実生の気孔コンダクタンスが FR+よりも高いにもかかわらず、水ポテンシャルがほぼ同じであった事実は、FR-に順化した植物の水供給効率が高かったことを意味する。

高 VPD に移動後、FR+において気孔コンダクタンスが大きく低下したのは、水供給の不足による水ポテンシャルの低下によるものと考えられる。このことは、 Ψ_{leaf} と g_s の正の相関 (図4) から支持される。FR-に順化した実生において水ポテンシャルの低下が比較的小さいにもかかわらず、 g_s が低下したのは湿度の気孔への直接的な影響かもしれない。FR-に順化した実生において、FR+に順化した実生に比べて高 VPD に移動後の g_s が大きい (すなわち水分損失が大きい) にもかかわらず、 K_{leaf} が比較的高いレベルで維持されたのは、植物の水輸送効率が高かったことを意味する。 K_{leaf} は植物の水輸送において重要な要素であり、多くの研究において K_{leaf} と g_s との正の相関が確認されている。したがって、FR が根圏の通水コンダクタンスを変化させた可能性もあるが、本研究において、FR-における K_{leaf} の増大が、高 VPD 移動後の g_s の低下を抑制した一因と考えられる。高 VPD 移動後において、FR+に順化した実生で Φ_{PSII} が低下したのは、 Ψ_{leaf} の過度な低下が光合成機能にダメージを与えたことを示唆する。このことは、 Ψ_{leaf} と Φ_{PSII} の正の相関 (図4) から支持される。

高い蒸散要求によるストレスを FR-に順化させることで回避できたことは、光源によって植物のストレス応答が違う可能性を示唆する。FR の少ない照射光下では強風による g_s の低下が抑制され、それにとまなう純同化速度の低下が抑制されることが知られている。この結果は FR の少ない照射光下では、より高い g_s でも葉に水分供給が円滑に行われていたことを示唆する。さらに FR の少ない光源で育成することで水分損失によるストレス影響を小さくできることは、

園芸生産におけるストレス緩和技術として期待できる。人工光源を用いた苗生産における光源選択に本研究の知見は有益であろう。FRの少ない光源下では光合成能力やストレス耐性を高めることができる一方で、強固な構造をつくるためのコストがかかることから、成長速度が低下する不利益が生じる。しかし、苗生産など植物を厳しい環境に移すことが前提であるならば、そのコストに見合うベネフィットが得られる可能性がある。

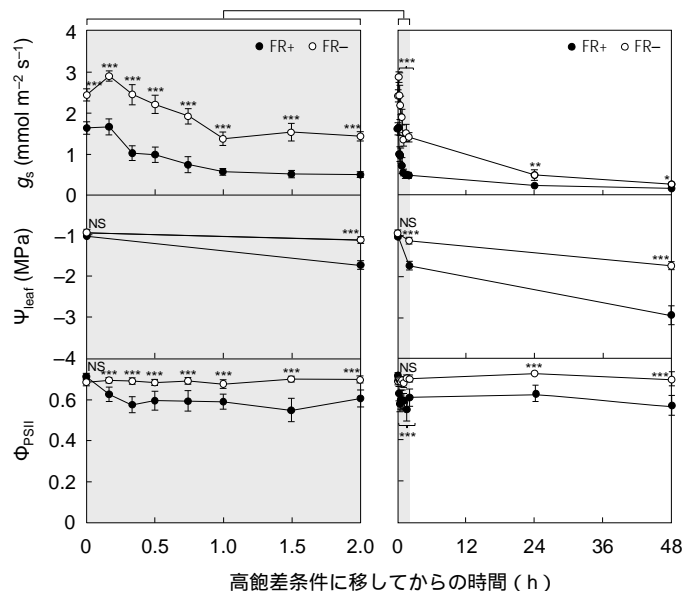


図3 遠赤色光の異なる照射光下に順化したキュウリ実生を高飽差条件に移した後の気孔コンダクタンス (g_s), 葉内水ポテンシャル (Ψ_{leaf}) および光化学系 II における実効量子収率 (Φ_{PSII}) の変化 (実験 2)

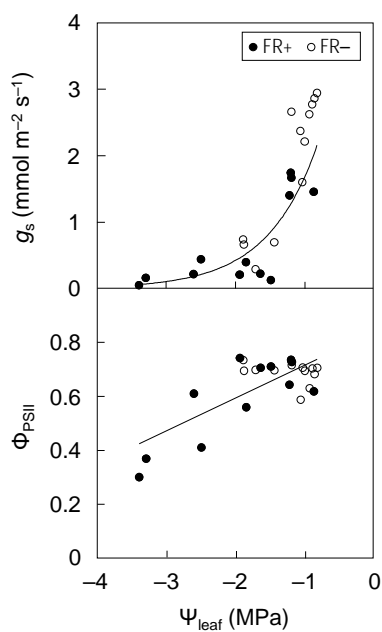


図4 葉内水ポテンシャル (Ψ_{leaf}) と気孔コンダクタンス (g_s) および光化学系 II における実効量子収率 (Φ_{PSII}) の関係 (実験 2)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shibuya, T., Kataoka, C., Nishio, K., Endo, R., Kitaya, Y., Shinto, Y., Mishiba, K., Iwata, Y.	4. 巻 67
2. 論文標題 Cucumber leaf necrosis caused by abrupt change to light with a high far-red component	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biologia Plantarum	6. 最初と最後の頁 28-35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.32615/bp.2022.039	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 Shibuya, T., Nagata, A., Endo, R.	4. 巻 99
2. 論文標題 Far-red light interacts with salinity stress in Cucumis sativus seedlings partly through changes in photosynthate allocation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plant Growth Regulation	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10725-023-00978-2	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 -
1. 著者名 Tsuruyama J., Shibuya, T.	4. 巻 317
2. 論文標題 Effects of far-red light and photoperiod during early growth stages on flower bud development of seed-propagated strawberry seedlings	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientia Horticulturae	6. 最初と最後の頁 112051
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.scienta.2023.112051	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 -
1. 著者名 Shibuya, T., Izumi, M., Endo, R.	4. 巻 324
2. 論文標題 Effects of end-of-day far-red light and relative humidity on flowering and stem elongation of petunia (<i>Petunia × hybrida</i>) seedlings	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Scientia Horticulturae	6. 最初と最後の頁 112600
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.scienta.2023.112600	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13件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 前田悠貴, 渋谷俊夫, 遠藤良輔
2. 発表標題 変動する風速下におけるキュウリ実生の成長特性
3. 学会等名 日本農業気象学会2023年全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高山果鈴, 渋谷俊夫, 遠藤良輔
2. 発表標題 照射光に含まれる遠赤色光の割合の増加がキュウリ実生の胚軸伸長に及ぼす影響
3. 学会等名 日本農業気象学会2023年全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渋谷俊夫
2. 発表標題 植物生産における光環境応答とトレードオフ
3. 学会等名 第70回日本生態学会大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shibuya T., Nagata, A., Endo, R., Kitaya, Y.
2. 発表標題 Interaction between far-red light and salinity on early growth of cucumber seedlings
3. 学会等名 IX International Symposium on Light in Horticulture (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渋谷俊夫, 神藤慶紀, 遠藤良輔, 北宅善昭
2. 発表標題 強風による植物へのストレス影響は遠赤色光と複合的に作用する
3. 学会等名 日本農業気象学会2022年全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西尾奏栄, 渋谷俊夫, 遠藤良輔
2. 発表標題 照射光に含まれる遠赤色光の割合の急な増加がもたらすキュウリ子葉の可視障害
3. 学会等名 日本農業気象学会2022年全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鍛冶川紗奈, 渋谷俊夫, 遠藤良輔
2. 発表標題 遠赤色光の割合が異なる照射光に順化したキュウリ葉の通水コンダクタンス
3. 学会等名 日本農業気象学会2022年全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田菜花, 渋谷俊夫, 遠藤良輔
2. 発表標題 遠赤色光および相対湿度がキュウリ葉の光合成特性に及ぼす複合影響
3. 学会等名 日本農業気象学会2024年全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 渋谷俊夫
2. 発表標題 植物の成長戦略と光環境制御
3. 学会等名 日本農業気象学会2024年全国大会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shibuya, T., Kajikawa, S., Endo, R.
2. 発表標題 Leaf hydraulic conductance of cucumber seedlings acclimatized to light with different promotions of far-red light
3. 学会等名 X International Symposium on Light in Horticulture (LightSym 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Wada, N., Shibuya, T., Endo, R.
2. 発表標題 Interaction between far-red light and humidity on gas exchange characteristics of cucumber leaves
3. 学会等名 X International Symposium on Light in Horticulture (LightSym 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takayama, K., Shibuya, T., Endo, R.
2. 発表標題 Effects of the sudden increase in far red light on extension growth of cucumber seedlings.
3. 学会等名 X International Symposium on Light in Horticulture (LightSym 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Matsuda, R., Yu, L., Kubo, S., Lee, J.Y., Fujiwara, K.
2. 発表標題 Effects of diurnal and day-to-day fluctuations in photosynthetic photon flux density on leaf photosynthesis and plant growth of cucumber seedlings
3. 学会等名 X International Symposium on Light in Horticulture (LightSym 2024) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 後藤英司, 富士原和宏, 松田 怜, 渋谷俊夫, 彦坂晶子, 小峰正史, 石神靖弘, 高山弘太郎, 荊木康臣, 安武大輔, 嶋津光鑑, 深山陽子, 星 岳彦, 藤内直道	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 188
3. 書名 施設園芸学 - 植物環境工学入門 - (担当: 形態形成, 環境応答)	

〔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
研究分担者	遠藤 良輔 (Endo Ryosuke) (10409146)	大阪公立大学・大学院農学研究科 ・講師 (24405)	
研究分担者	松田 怜 (Matsuda Ryo) (20547228)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	地子 智浩 (Jishi Tomohiro) (60816479)	一般財団法人電力中央研究所・グリッドイノベーション研究本部・主任研究員 (82641)	

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
---------	---------