

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(A)（一般）
研究期間：2018～2021
課題番号：18H03966
研究課題名（和文）自然光の分光分布の時間変動が個葉の光合成に及ぼす影響を室内実験により解明する

研究課題名（英文）Elucidating the effects of fluctuations in sunlight spectral distribution on leaf photosynthesis through laboratory experiments

研究代表者
富士原 和宏（FUJIWARA, Kazuhiro）

東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・教授

研究者番号：30211535
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、研究代表者らが開発し改良を進めてきたLED人工太陽光源システムを用いて、自然光の分光分布の時間変動が個葉の光合成に及ぼす影響を、再現性の担保された室内実験により解明することを目的とした。光源システムを改良し、そのシステムを用いて、自然光の分光分布の時間変動を実験室のチャンパー内に高精度で再現した。キュウリ個葉を用いた実験により、自然光のPPFD変動が純光合成速度に及ぼす影響を解析し、定常状態における純光合成速度との差異を定量的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

LED人工太陽光源システムの改良により、地表面での太陽光の分光分布を含む種々の分光分布を、高い精度で再現可能となり、かつ簡便に動的に制御可能となった。光生物学研究用の光源システムとして有用である。また、改良したLED人工太陽光源システムを用いて、太陽光下における個葉の純光合成速度の実態を定量的に明らかにした。圃場や温室における作物生産の効率化に資する知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to elucidate the effects of fluctuations in sunlight spectral distribution on leaf photosynthesis using an LED artificial sunlight source system, which we have developed and improved, through reproducible laboratory experiments. We further improved the light source system, and reproduced fluctuations in sunlight spectral distribution in a laboratory chamber with a high accuracy using the system. Using cucumber leaves, we analyzed the effects of sunlight PPFD fluctuations on the net photosynthetic rate and clarified quantitatively the difference from the net photosynthetic rate under steady-state conditions.

研究分野：生物環境工学

キーワード：LED 光合成 環境制御 分光分布 純光合成速度 自然光

1. 研究開始当初の背景

光合成有効光量子束密度 (以後、PPFD) などの環境要素に対する植物の応答を、高い再現性を担保しつつ調べようとする場合、各環境要素を制御できるグロースチャンバを用いることが多い。実際にそのような室内実験により、植物の環境応答やその機構に関する多くの有用な知見が得られてきた。しかし、グロースチャンバ内の環境と、野外や温室などの植物が実際に生育するフィールドの環境との間には、無視できない明確な差が存在する。その最も主要なものが、環境要素の時間的な変動である。例えば自然光では、葉面における分光分布、すなわち分光分布の波長積分値である放射照度 (または光量子束密度) と相対分光分布 (分光分布の曲線の形状) の両者が、太陽高度や雲量、また周囲の葉による光吸収などの影響により、1日の中で秒・分・時間のさまざまなスケールで変動する。フィールドにおいて、そのような環境要素変動に対する植物の応答を観察することは容易ではあるが、同じ環境要素変動を再現することも、ある1つの環境要素 (例えば、分光分布) の影響と他の環境要素 (例えば、気温など) の影響とを分離することも、極めて困難である。

近年、PPFDの秒～分スケールでの変動が、純光合成速度の応答遅れ (光合成誘導) や光化学系 I の光阻害による電子伝達速度の低下など、光合成に顕著な影響を及ぼすことが報告された (Kaiser et al. 2015, 2018; Yamori 2016; Violet-Chabrand et al. 2017a; Murchie et al. 2018; Slattery et al. 2018; Tanaka et al. 2019 の総説参照)。そのような影響は、これまでよく行われてきた、明期中の PPFD を一定とした条件での実験では観察されなかったものである。このことは、環境要素変動の影響を解明することが、フィールドでの植物の環境応答を理解し、より効率的な植物生産を実現する上で重要であることを示している。しかし、これらの研究でさえ、自然光に対する植物の応答の機構解明としては必ずしも十分でないと考えられる。その理由は主に2つある。第一に、多くの研究で、PPFDの変動パターンが、2水準の一定値 PPFD の光照射を交互に繰り返すといった、極めて単純化された条件に設定されていることである。第二に、相対分光分布の影響がまったく考慮されていないことである。光源として、1種類の単色 LED またはせいぜい数種類の単色 LED の組み合わせが用いられることが多く、その照射光の相対分光分布は自然光のそれとはまったく異なる。また、そもそも相対分光分布の情報が記載すらされていない文献も多い。植物が、周囲の光環境を認識するためのシグナルとして相対分光分布の情報を利用していることはよく知られており、分光分布が変動する場合でもその影響は小さくないと考えられる。

これらの問題点を解決し、再現性の担保された室内実験を行うためには、まず自然光の分光分布 (PPFD と相対分光分布の両者) の変動を再現できる人工光源が必須であるが、そのような光源は市販されていない。申請者らは、LED 人工太陽光光源システム (図1) を開発し (Fujiwara & Sawada 2006; Fujiwara et al. 2007)、改良を進めてきた (Fujiwara & Yano 2011)。本光源システムでは、植物の生理反応に影響を及ぼす主要な光の波長を含む 380–940 nm の範囲について、地表面での太陽光の分光分布を再現した光、およびそれに特定の波長範囲の光を加えたあるいは減じた光を作出でき、さらには分光分布を動的に制御できる。これをもってすれば、自然光の分光分布の変動を高い精度で再現し、他の環境要素を任意に制御しつつ、光環境の変動の影響を明らかにし得る。

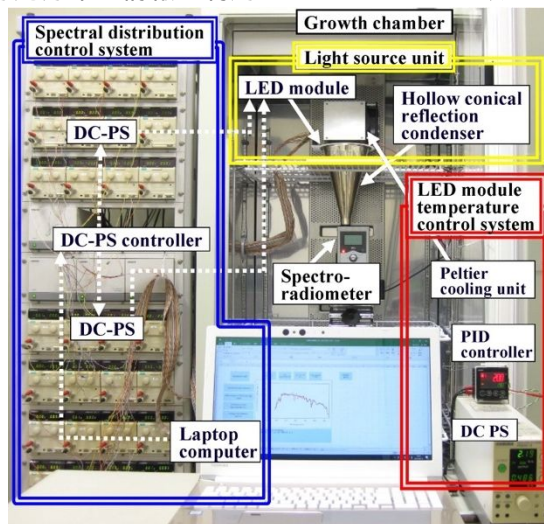


図1 LED人工太陽光光源システムの外観。DC-PS: 直流電流供給装置。Fujiwara et al. (2022) より抜粋。

2. 研究の目的

本研究では、LED 人工太陽光光源システムを用いて、自然光の分光分布の時間変動が個葉の光合成に及ぼす影響を、再現性の担保された室内実験により解明することを目的とした。また、研究の遂行過程で、栽培空間内に配置された LED の消灯時の開放電圧を利用することで、その空間の光環境の特徴を抽出でき、結果として栽培中の自然光の分光分布の時間変動の情報をより詳細に把握し得るのではないかとこの着想を得た。そこで、この点についても基礎的な検討を加えた。具体的には、以下の4つの研究課題を遂行した。

- (1) 自然光の分光分布変動を再現した照射光下におけるキュウリ個葉の純光合成速度 (Matsuda et al. 2021)
- (2) LED 人工太陽光光源システムの改良 (Fujiwara et al. 2022)
- (3) 自然光の明期 PPFD 変動パターンがキュウリ個葉の純光合成速度に及ぼす影響
- (4) LED 開放電圧を利用した光環境情報抽出の試み (Yano et al. 2022)

3. 研究の方法

(1) 自然光の分光分布変動を再現した照射光下におけるキュウリ個葉の純光合成速度

東京都文京区の建物屋上における 2017 年 10 月 12 日 11:10–14:30 の自然光の分光分布を、携帯型分光放射計 (MS-720; 英弘精機 (株) 製) を用いて 15 秒ごとに計測・記録した。その PPFD の時間変化を図 2 に示す。このデータに基づき、波長 380–940 nm の分光分布の時間変化を LED 人工太陽光光源システムを用いて実験室のグロースチャンバ内で再現し (図 2) 純光合成速度 (P_n) を連続測定した。供試植物にはキュウリ‘北進’を用い、播種後 2 週間グロースチャンバ内で育苗した 6 株の第 1 本葉を測定に供した。 P_n 測定には光合成測定装置 (LI-6400XT; 米国 LI-COR 社製) を用い、気温を $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度を $70 \pm 10\%$ 、 CO_2 濃度を $400 \pm 20 \mu\text{mol mol}^{-1}$ に制御した。12 株のうち 6 株では再現した自然光の照射前に、6 株では照射後に、それぞれの PPFD– P_n 曲線を求めた。このときの照射光の目標相対分光分布は IEC 60904-3:2019 に規定された基準太陽光スペクトルのそれとし、PPFD を $0\text{--}1,400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の範囲で $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ずつ段階的に変化させ、20 分間ずつ照射した。

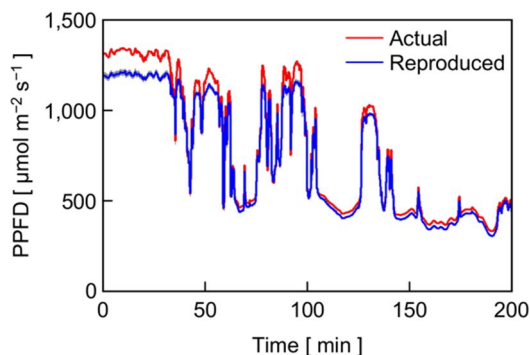


図 2 東京都文京区の建物屋上で測定された自然光の PPFD の時間変化 (赤) およびそれを LED 人工太陽光光源システムを用いて再現した照射光の PPFD の時間変化 (青)。Matsuda et al. (2021) より抜粋。

(2) LED 人工太陽光光源システムの改良

上記 (1) の遂行過程で、LED 人工太陽光光源システムの改良の必要性を認めた。具体的には、高放射照度の光照射中における分光分布の時間安定性の向上、および分光分布が時間変動する照射光を作出する際の操作性の向上、の 3 点である。これらを目的として、それぞれ主に以下の改良を加えた。

光照射口 (面積 7.1 cm^2) における放射照度の向上、高放射照度の光照射中における分光分布の時間安定性の向上、および分光分布が時間変動する照射光を作出する際の操作性の向上、の 3 点である。これらを目的として、それぞれ主に以下の改良を加えた。

光源ユニットの LED モジュール上に配置されている 32 種類のピーク波長 LED のうち、20 種類を出力の高いものに交換するとともに、9 種類の配置を交換した。

光源ユニットの冷却モジュールに用いるペルチェ冷却ユニットを、より冷却能力の高いものに交換した。

システム制御用ソフトウェアにおいて、複数の分光分布の照射光を連続的に照射する際の各 LED への印加電圧を簡易に設定可能な機能を追加した。

(3) 自然光の明期 PPFD 変動パターンがキュウリ個葉の純光合成速度に及ぼす影響

供試植物にはキュウリ‘北進’を用いた。育苗条件は (1) と同様とした。まず、PPFD– P_n 曲線のみを 7 回連続して取得した。総光照射時間は約 20 時間であった。次に、2019 年 9 月 19 日および 2020 年 4 月 10 日に北海道農業研究センター内の気象観測露場 (43.0°N , 141.4°E) で実測された、日中 (約 13 時間) の太陽光の PPFD 変動 (Murakami & Jishi 2022) を 10 秒ごとに再現した PPFD 変動光 2 パターンをそれぞれ個葉に照射し、5 秒ごとに P_n を測定した。PPFD 変動光の照射の後に、定常状態における PPFD– P_n 曲線を取得した。測定時の PPFD 以外の環境要素は (1) と同様とした。

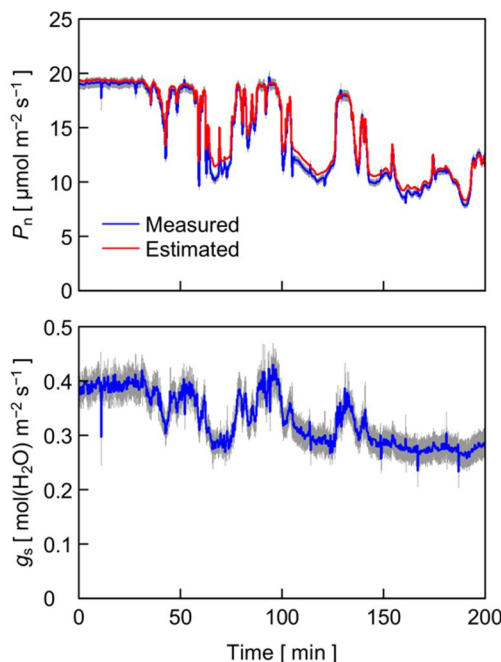


図 3 再現自然光照射下におけるキュウリ葉の純光合成速度 (上) および気孔コンダクタンス (下) の経時変化。Matsuda et al. (2021) より抜粋。

(4) LED 開放電圧を利用した光環境情報抽出の試み

4 種の単ピーク波長 LED (ピーク波長 464、501、634、および 849 nm) および蛍光体利用白色 LED (ピーク波長 455 および 574 nm) を実験に供した。これら 5 種の受光側 LED の消灯時に、これらとは異なる単ピーク波長を有する種々の LED 光を照射し、受光側 LED の開放電圧を計測した。また、その結果をショックレー方程式に従って解析した。さらに、5 種の受光側 LED の消灯時に、太陽光の直達光、散乱光、および葉の透過光を照射し、開放電圧を計測した。

4. 研究成果

(1) 自然光の分光分布変動を再現した照射光下におけるキュウリ個葉の純光合成速度

自然光の分光分布変動を再現した照射光 (以後、

再現自然光) 下で実測された P_n (以後、実測 P_n) は、再現自然光の照射前後に取得した PPFD- P_n 曲線から推定した同一 PPFD における P_n (以後、推定 P_n) と比較して、PPFD の低い場合を除いて、概ね一致した (図 3)。PPFD が低い場合には、実測 P_n は推定 P_n より若干低い傾向にあった。推定 P_n に対する実測 P_n の比 (実測 P_n /推定 P_n) は、PPFD 300–700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では 0.94–0.95 であったのに対し、PPFD 900–1,300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では 0.98–0.99 であり、再現自然光の照射時間全体での平均は 0.97 であった。

以上の結果から、自然光の PPFD と相対分光分布の両者を再現することにより、自然光下での個葉の P_n を定量的に見積もることができた。既往の研究では、実験 (Violet-Chabrand et al. 2017b) およびシミュレーション (Taylor & Long 2017; Tanaka et al. 2019) のいずれにおいても、実測 P_n /推定 P_n は 0.7–0.8 程度と報告されてきた。他方、より最近のシミュレーション研究 (Murakami & Jishi 2022) では、実測 P_n /推定 P_n は 0.94–0.97 程度との報告もある。本研究の結果は、後者に近いといえる。自然光の分光分布変動の下での個葉の P_n は、従来見積もられてきたほどには低くない可能性があるといえる。

(2) LED 人工太陽光光源システムの改良

システムを改良し、運転試験を実施した。第一段階の運転試験により、次の各分光分布を高い精度で再現可能となった。

東京都で実測された、2 時間ごとの太陽光の地表面分光分布

基準太陽光の分光分布を、1.33 倍、1.2 倍、1 倍、1/10 倍、1/100 倍、および 1/1,000 倍とした照射光の分光分布 (図 4)

長方形を除く、各種の幾何学的形状 (直角三角形形状、サイン波状、および二等辺三角形形状) の分光分布

第二段階の運転試験により、上述の各分光分布を 3 秒ごとに变化させた分光分布変動光を作出可能であることが、また第三段階の運転試験により、基準太陽光の分光分布を 30 分間にわたり安定して再現可能であることが、それぞれ示された。これらの結果から、改良された LED 人工太陽光光源システムは、太陽光下での植物の光合成や生育を含む、種々の光環境下での植物の光応答を調べる際に用い得る、有用な光源システムであるといえる。

(3) 自然光の明期 PPFD 変動パターンがキュウリ個葉の純光合成速度に及ぼす影響

明期中の P_n を同一 PPFD で比較すると、PPFD- P_n 曲線取得のための光照射パターンと野外の太陽光 PPFD 変動を再現した光照射パターンのいずれにおいても、光照射開始からの時間が経過するに伴って、 P_n は徐々に低下した。PPFD- P_n 曲線取得のための光照射パターンでは、7 回目に測定された PPFD- P_n 曲線における P_n は、1 回目に測定されたそれよりも 20% 程度低かった。この P_n の低下は、PPFD を一定に保った場合にも観察された。この P_n の低下の原因は未定であるが、気孔コンダクタンスの低下や葉内の炭水化物の蓄積等が推定される。この P_n の低下は PPFD 変動条件に特異的でなかったことから、この影響を除いた評価を行うため、7 回連続して取得した PPFD- P_n 曲線のデータを用いて、光照射開始からの時間経過による P_n の低下の影響をキャンセルし、2 つの PPFD 変動光の影響を解析した。PPFD 変動光下における実測 P_n /推定 P_n は 0.98–0.99 であった。この結果から、(1) で得られた結果と同様の傾向の結果が、約 13 時間の日中の太陽光の PPFD 変動パターンを再現した 2 種類の照射光でも得られることがわかった。

(4) LED 開放電圧を利用した光環境情報抽出の試み

5 種の受光側 LED の消灯時に、それぞれの LED 固有の臨界波長よりも短い波長の光が照射された際に、受光側 LED に開放電圧が誘起された。この臨界波長は、受光側 LED が点灯時に射出する光の長波長側の波長限界 (ただし、蛍光体利用白色 LED については、発光素子である青色 LED の射出する光の長波長側の波長限界) と概ね一致した。誘起される開放電圧は、ショックレー方程式から導出された近似式に従うことが実験的に示された。

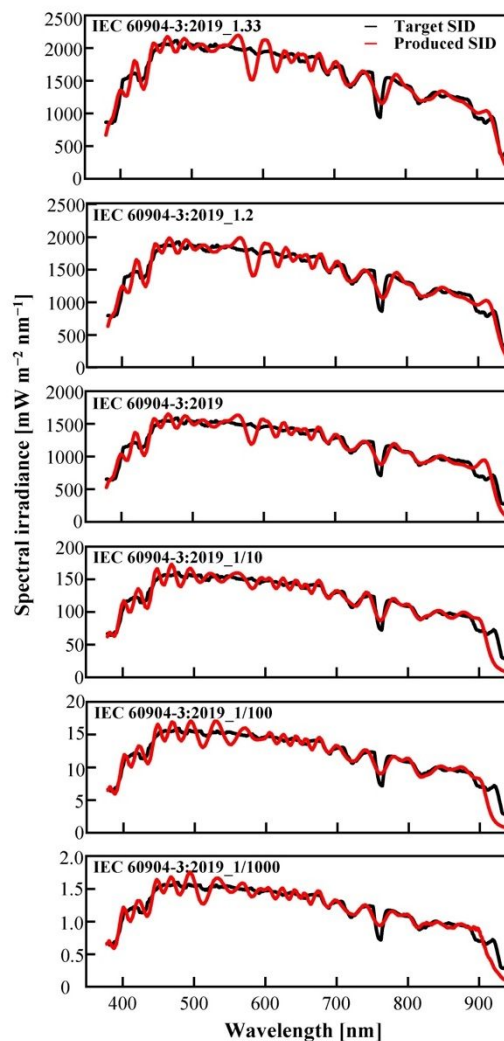


図 4 基準太陽光の分光分布を 1.33–1/1,000 倍とした、目標とする照射光の分光分布 (黒) および改良した LED 人工太陽光光源システムでそれらを再現した照射光の分光分布 (赤)。Fujiwara et al. (2022) より抜粋。

太陽光の直達光、散乱光、および葉の透過光下での計測により、ピーク波長 634 nm の LED の開放電圧は低い PPFd で飽和し、PPFD およそ $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下で速やかに低下したことから、この開放電圧を明暗の峻別に利用し得ると考えられた。また、青色（ピーク波長 464 nm）・緑色（ピーク波長 501 nm）LED と近赤外 LED（ピーク波長 849 nm）の臨界波長の差を利用して、これらの開放電圧を比較することにより、これらの受光側 LED と光源との間に植物葉が存在するかどうか、すなわち植物葉の陰になっているか否かを検出し得る可能性が示された。

<引用文献>

- Fujiwara, K., Kubo, S., Eijima, K., Matsuda, R., and Yano, A. (2022) Improved LED artificial sunlight source system available for sunlight-effect research in plant sciences. *J. Agric. Meteorol.* 78, in press.
- Fujiwara, K., and Sawada, T. (2006). Design and development of an LED-artificial sunlight source system prototype capable of controlling relative spectral power distribution. *J. Light Vis. Environ.* 30, 170–176.
- Fujiwara, K., Sawada, T., Goda, S., Ando, Y., and Yano, A. (2007). An LED-artificial sunlight source system available for light effects research in flower science. *Acta Hortic.* 755, 373–380.
- Fujiwara, K., and Yano, A. (2011). Controllable spectrum artificial sunlight source system using LEDs with 32 different peak wavelengths of 385–910 nm. *Bioelectromagnetics* 32, 243–252.
- Kaiser, E., Morales, A., and Harbinson, J. (2018). Fluctuating light takes crop photosynthesis on a rollercoaster ride. *Plant Physiol.* 176, 977–989.
- Kaiser, E., Morales, A., Harbinson, J., Kromdijk, J., Heuvelink, E., and Marcelis, L. F. M. (2015). Dynamic photosynthesis in different environmental conditions. *J. Exp. Bot.* 66, 2415–2426.
- Matsuda, R., Ito H., and Fujiwara, K. (2021) Effects of artificially reproduced fluctuations in sunlight spectral distribution on the net photosynthetic rate of cucumber leaves. *Front. Plant Sci.* 12, 675810.
- Murakami, K., and Jishi, T. (2022). Appropriate time interval of PPFd measurement to estimate daily photosynthetic gain. *Funct. Plant Biol.* 49, 452–473.
- Murchie, E. H., Kefauver, S., Araus, J. L., Muller, O., Rascher, U., Flood, P. J., et al. (2018). Measuring the dynamic photosynthome. *Ann. Bot.* 122, 207–220.
- Slattery, R. A., Walker, B. J., Weber, A. P. M., and Ort, D. R. (2018). The impacts of fluctuating light on crop performance. *Plant Physiol.* 176, 990–1003.
- Tanaka, Y., Adachi, S., and Yamori, W. (2019). Natural genetic variation of the photosynthetic induction response to fluctuating light environment. *Curr. Opin. Plant Biol.* 49, 52–59.
- Taylor, S. H., and Long, S. P. (2017). Slow induction of photosynthesis on shade to sun transitions in wheat may cost at least 21% of productivity. *Philos. Trans. R. Soc. B* 372, 20160543.
- Violet-Chabrand, S., Matthews, J. S. A., McAusland, L., Blatt, M. R., Griffiths, H., and Lawson, T. (2017a). Temporal dynamics of stomatal behavior: modeling and implications for photosynthesis and water use. *Plant Physiol.* 174, 603–613.
- Violet-Chabrand, S., Matthews, J. S. A., Simkin, A. J., Raines, C. A., and Lawson, T. (2017b). Importance of fluctuations in light on plant photosynthetic acclimation. *Plant Physiol.* 173, 2163–2179.
- Yamori, W. (2016). Photosynthetic response to fluctuating environments and photoprotective strategies under abiotic stress. *J. Plant Res.* 129, 379–395.
- Yano, A., Matsuda, R., and Fujiwara, K. (2022) Implications of open circuit voltage of light-emitting diodes installed for plant cultivation. *J. Agric. Meteorol.* 78, 31–40.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Ryo Matsuda, Hiroki Ito, Kazuhiro Fujiwara	4. 巻 12
2. 論文標題 Effects of artificially reproduced fluctuations in sunlight spectral distribution on the net photosynthetic rate of cucumber leaves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpls.2021.675810	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 Akira Yano, Ryo Matsuda, Kazuhiro Fujiwara	4. 巻 78
2. 論文標題 Implications of open circuit voltage of light-emitting diodes installed for plant cultivation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 31-40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2480/agrmet.D-21-00040	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 Yuanhao Chen, Ryo Matsuda, Kazuhiro Fujiwara	4. 巻 78
2. 論文標題 Rapid and semi-automated leaf net photosynthetic rate determination for numerous phosphor-converted white-LED lights of different spectral distributions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 8-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2480/agrmet.D-21-00038	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 Tomohiro Jishi, Kazuhiro Fujiwara	4. 巻 90
2. 論文標題 Time-varying photosynthetic photon flux density and relative spectral photon flux density distribution to improve plant growth and morphology in plant factories with artificial lighting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Horticulture Journal	6. 最初と最後の頁 147-153
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2503/hortj.UTD-R015	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 富士原和宏	4. 巻 5
2. 論文標題 LED植物工場と分光分布制御	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 アグリバイオ	6. 最初と最後の頁 6-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 村上貴一・地子智浩・松田 怜・富士原和宏	4. 巻 29
2. 論文標題 人工光植物栽培における光質と光合成	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 光合成研究	6. 最初と最後の頁 138-146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 荊木康臣	4. 巻 30
2. 論文標題 光合成と照明技術	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 植物環境工学	6. 最初と最後の頁 79-86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2525/shita.30.79	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 Kazuhiro Fujiwara, Shunsuke Kubo, Kensuke Eijima, Ryo Matsuda, Akira Yano	4. 巻 78
2. 論文標題 Improved LED artificial sunlight source system available for sunlight-effect research in plant sciences	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 久保俊介・富士原和宏・村上貴一・松田 怜
2. 発表標題 同化箱内に再現した太陽光の地表面PPFD時間変動がキュウリ葉の純光合成速度に及ぼす影響
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 馬越康平・荊木康臣・佐合悠貴・田代菜菜・植木朋実
2. 発表標題 投影葉面積モニタリングに基づくレタス生育モデルに関する研究
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 久保俊介・富士原和宏・松田 怜
2. 発表標題 光合成有効光量子束密度が変動する光環境における分光分布がキュウリ葉の純光合成速度に及ぼす影響
3. 学会等名 日本農業気象学会2021年全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuhiro Fujiwara
2. 発表標題 Introduction of a performance description sheet for plant cultivation LED luminaires
3. 学会等名 2019 International Symposium on Environment Control Technology for Value-added Plant Production (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Matsuda
2. 発表標題 Engineering, physiology, and biotechnology: research efforts toward next-generation controlled environment agriculture
3. 学会等名 American Society for Horticultural Science 2019 Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田 怜・伊藤寛基・富士原和宏
2. 発表標題 実験室内で再現した自然光の分光分布の時間変化がキュウリ葉の純光合成速度に及ぼす影響
3. 学会等名 園芸学会平成31年度春季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計5件

1. 著者名 Kazuhiro Fujiwara (分担執筆)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Academic Press	5. 総ページ数 462
3. 書名 Photonmetric quantities and their application (Chapter 5). In: Plant Factory Basics, Applications and Advances	

1. 著者名 Kazuhiro Fujiwara (分担執筆)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Academic Press	5. 総ページ数 462
3. 書名 LED product terminology and performance description of LED luminaires (Chapter 6). In: Plant Factory Basics, Applications and Advances	

1. 著者名 Kazuhiro Fujiwara (分担執筆)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Academic Press	5. 総ページ数 480
3. 書名 Light sources (Chapter 8). In: Plant Factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production, 2nd Edition	

1. 著者名 地子智浩・富士原和宏 (分担執筆)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 株式会社情報機構	5. 総ページ数 240
3. 書名 新時代に向けた植物工場ビジネス (第2節 植物の生育制御のための光照射法)	

1. 著者名 富士原和宏 (分担執筆)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 209
3. 書名 アグリフォトニクスIII (第15章 分光分布制御型LED人工太陽光光源システム)	

〔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	荊木 康臣 (IBARAKI Yasuomi) (50242160)	山口大学・大学院創成科学研究科 ・教授 (15501)	
研究分担者	谷野 章 (YANO Aki ra) (70292670)	島根大学・学術研究院環境システム科学系・教授 (15201)	

6. 研究組織（つづき）

	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	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)	

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