

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07664

研究課題名(和文) 光化学系IIの量子収率を指標にした植物工場におけるLED照射の標準化

研究課題名(英文) Standardization of LED irradiation based on quantum yield of photosystem II in a plant factory with artificial lighting

研究代表者

野末 雅之 (Nozue, Masayuki)

信州大学・学術研究院繊維学系・特任教授

研究者番号：30135165

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：人工光型植物工場における効率的なLED光環境を構築するために、光合成環境を総合的に評価する指標としてのPSII量子収率(II)の有用性について調査した。また、種々の広域分光スペクトルをもつ白色LEDを用いて光質と消費電力量との関係を調査した。その結果、効率的な野菜生産には赤、青、遠赤色光に適正な光強度比が存在すること、赤色光強光照射で生じる光阻害が遠赤色光補光によって軽減されること(Fv/FmとIIの回復)がわかった。本研究により、光質と光強度の最適化が効率的な野菜生産に必須であること、その光合成環境がIIによって総合的に評価できることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The availability of the quantum yield of PSII (II) as an index for the evaluation of photosynthetic environment was validated in a plant factory with LED lighting. The relationship between light quality and power consumption in vegetable production was also investigated using various white LEDs that have a broad spectrum. It was shown the existence of the appropriate ratios between the light intensity of blue, red and far-red for the efficient production of vegetables. The photoinhibition caused by high intensity of the red light was alleviated by light supplement with far-red. The present studies suggested that the optimization of both light quality and intensity is essential and the measurement of II makes it possible to evaluate the photosynthetic environment needed for the efficient vegetable production.

研究分野：植物環境工学

キーワード：人工光型植物工場 光化学系II 量子収率 光質 光強度 遠赤色光 消費電力 白色LED

1. 研究開始当初の背景

(1) 蛍光灯を主体とする従来の人工光型植物工場では生産コストの大半を照明の消費電力が占める。そのため、植物工場ではエネルギー効率の良い野菜生産が求められてきた。

(2) 植物は光合成で固定される二酸化炭素量以上には成長できない。光は植物工場にとって最も重要な環境要因といえる。したがって、効率的な野菜生産には、高い光合成効率を達成するための光環境の最適化が必須である。

(3) 蛍光灯の製造、販売が間もなく停止されることから、蛍光灯に変わる新たな光源として発光ダイオード (LED) が注目されている。植物育成用 LED の条件として、蛍光灯と同等以上の植物育成効果と省エネルギー効果があげられる。しかし、そのような LED 照明法は必ずしも確立されていない。

(4) 人工光型植物工場での光環境要因として光質と光強度があげられるが、温度、湿度、二酸化炭素濃度などの環境要因によって最適な光環境は変動する。また栽培する品目によっても最適な光環境は異なる。全ての要因を考慮して光合成環境を総合的に評価し、人工光型植物工場での最適な光環境を構築するのは容易ではない。

(5) 人工光型植物工場では、ある程度の光合成効率が保持されかつ高い光合成速度が得られる光強度の設定が重要となる。しかし、様々な光合成環境下で適正な光強度を設定するための標準化された方法は確立されていない。

2. 研究の目的

本研究では人工光型植物工場における効率的な野菜生産のための光環境を構築するために以下の検討を行った。

(1) PAM クロロフィル蛍光測定により得られる光合成パラメータから光合成効率と光合成速度を推定することができる。それらのパラメータのうち、光化学系 II (PSII) の量子収率 (Φ_{II}) を指標にして光合成環境を評価し適正な光強度を設定する方法について検討した。

(2) 光質により光合成効率は大きく異なる。そこで、光質 (特に遠赤色光) が適正な光強度にどのように影響するか、光阻害に着目して検討した。

(3) 効率的な野菜生産は最終的には消費電力量に反映される。そこで、白色 LED を用いて、光質 (青、赤、遠赤色光の光量子束比) が生産量と消費電力量にどのように影響するかを実証試験した。

3. 研究の方法

(1) Φ_{II} と電子伝達速度 (ETR) の測定と野菜成育

異なる LED 光強度下でロメインレタス ($80 \sim 200 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$) とコマツナ ($120 \sim 300 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$) を水耕栽培し、それぞれ生産量 (新鮮および乾燥重量)、 Φ_{II} 、電子伝達速度 (ETR)、消費電力量を測定した。また、LI6400 (LI-COR) を用いて Φ_{II} と ETR の light-curve を測定した。

(2) 光質と光阻害

ワサビ葉を用いて光阻害を指標とした光環境 (光質と光強度) の評価を行った。植物は強光を吸収して生じた過剰な光エネルギーが安全に消去されないとき光障害を引き起こす。陰生植物であるワサビは強光感受性が高いと考え、本実験に供試した。青単色光、赤単色光および白色光 (青、緑、赤単色光混合) の各 LED 下でワサビを栽培し、経時的に PAM クロロフィル蛍光測定を行った。Fv/Fm の低下を光阻害の指標とした。

(3) 白色 LED の分光スペクトルと生産性

光質の生産性に対する影響を検証するために、広域分光スペクトルを持つ種々の白色 LED 素子を用いて灯具を作製し、ロメインレタスを水耕栽培した。光質を青色光 (B)、赤色光 (R) および遠赤色光 (FR) の 3 領域に分類した。R/B 比と R/FR 比 (光量子束比) に注目し、生産量と消費電力量との関係調べた。

4. 研究成果

(1) Φ_{II} による光環境評価

ロメインレタス、コマツナともに栽培時の光強度の増加に伴い Φ_{II} が顕著に低下するが、成長量は増加した。これは、光合成効率が低下しても光合成速度が光飽和に達するまでは成育が進むためと思われる。 Φ_{II} と光強度 (PAR) の両方のパラメータを含む ETR は両品目とも光強度の増加とともに上昇した。ETR は光合成効率と光合成速度の両者を考慮したパラメータとして有効と思われる。

Φ_{II} と ETR の関係をより詳細に検証するために、両者の Light-curve を求めた (図 1)。

Φ_{II} と ETR は明確に相反する関係を示す。 Φ_{II} は光強度の増加と逆に直ちに低下する。一方、ETR は光強度が増加する初期は直線的に上昇し、やがて上昇率は減少する。ETR と光強度の増加が直線関係を示す最大の光強度付近で、成長量あたりの消費電力量が最も低く、この成育環境下での最適な光強度と判断できる。

Φ_{II} および ETR は栽培環境の光強度を総合的に評価するのに有効と思われる。

(2) 光阻害に対する光質の影響

光強度の増加とともに Φ_{II} が減少する。過剰な光は光合成効率を低下させるだけでなく生産量の減少に直結する光阻害を引き起こす。

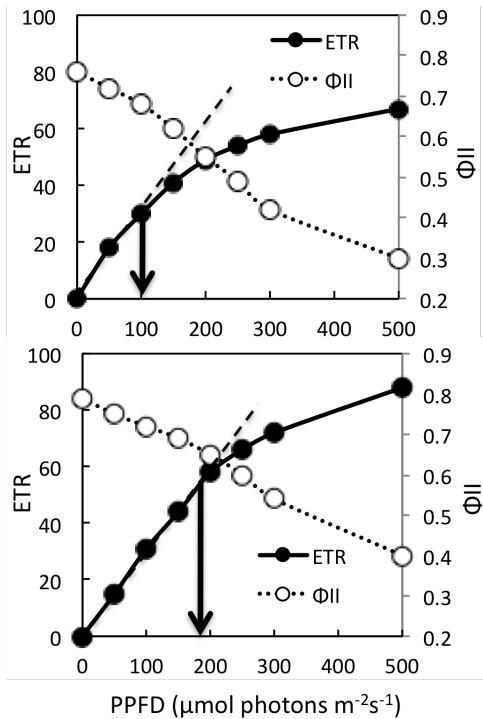


図1: PSIIの実効量子収率(Φ_{II})と電子伝達速度(ETR)のLight-curve (引用文献①)

ロメインレタス(A)およびコマツナ(B)をLED照明下で水耕栽培し、LI6400(LI-COR)を用いて Φ_{II} およびETRを測定した。 Φ_{II} とETRは相反する関係を示す。下向きの矢印はETRと光強度の直線関係(破線)が成立する最大光強度を示す。

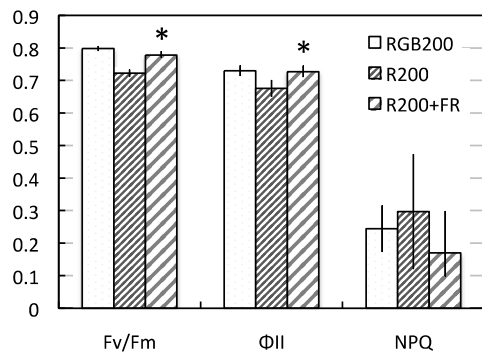


図2: ワサビ葉の光阻害と遠赤色光による緩和効果(引用文献②)

ワサビ葉に白色光(RGB200), 赤色光(R200), 赤色光に遠赤色光を補光したLED(R200+FR)をそれぞれ $200 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で10日間連続照射した。赤色光照射で低下した F_v/F_m および Φ_{II} が遠赤色光補光で回復した。NPQは非光化学消光。

*はR200に対する有意差を示す($p < 0.01$, t -test, mean \pm SD, $n=6$)。

こし、照明エネルギーコストの多大な浪費となる。しかし、光合成速度は光飽和に達するまで増大するため、可能な限り光強度を上げて成育を促進させたい。そこで、光阻害に対する光質の影響について調査した。

陰生植物のワサビ葉に各種光質のLEDを $200 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で連続照射すると、赤色光照射により F_v/F_m が低下し、 Φ_{II} も同様に減少した。この時、赤色光に遠赤色光

(730 nm)を補光すると F_v/F_m の低下と Φ_{II} の減少がともに軽減された(図2)。

遠赤色光の光合成効率に対する影響が調べられている(引用文献③)。赤色光(638 nm)と青色光(453 nm)LEDで栽培されたレタスに遠赤色光(735 nm)を補光すると、 Φ_{II} が直ちに増大し、しばらくして熱放散の指標となるNPQが減少、光合成速度の増加が観察される。この遠赤色光効果に対して、次のような理由が考えられる。赤や青色光照射ではPSIよりもPSIIが優先して励起されるため、両光化学系間で励起アンバランスが生ずる。遠赤色光補光するとPSI励起が促進されるので励起アンバランスが解消され、電子伝達全体が円滑に進み、PSIIの量子収率が向上すると考えられる。

太陽光放射には700 nm以上の遠赤色光が豊富に含まれるが、遠赤色光含まない光源を用いた人工光型植物工場ではPSIの恒常的励起不足が懸念される。ワサビ葉における赤色光照射下での Φ_{II} が低下し、光阻害が生ずる一因として、PSIの励起不足の関与が考えられる。本研究から、人工光型植物工場における遠赤色光の重要性が示唆された。

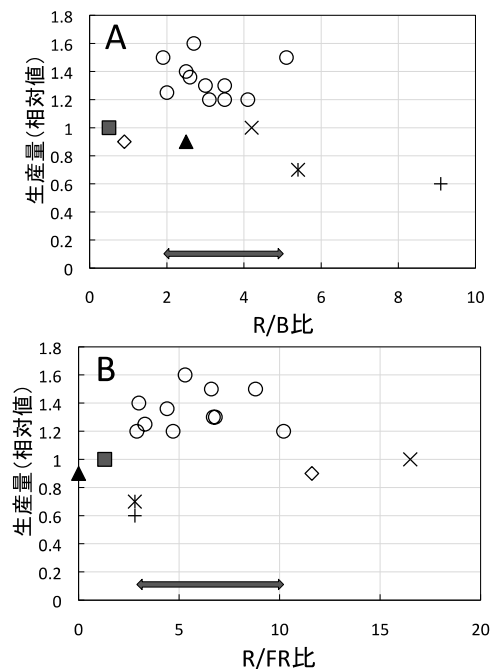


図3: 白色LEDのR/B比およびR/FR比とレタス生産量との関係(引用文献④)

15種類の白色LEDの赤色光領域(R, 600~700 nm)と青色光領域(B, 400~500 nm)の光子束比(A)および赤色光領域と遠赤色光領域(FR, 700~800 nm)の光子束比(B)を求め、ロメインレタス生産量との関係を示した。生産量は収穫時の可食部新鮮重量の相対値(蛍光灯を1)で表示した。蛍光灯(■)、赤・青単色光LED(▲)、蛍光灯より生育が促進された白色LED(O)、蛍光灯よりも生育が遅延した白色LED(◇、×、+、※)。両方向の矢印は蛍光灯よりも生育が良好であった適性範囲を示す。

(3) 光質と省エネルギー栽培の実証

R/B 比および R/FR 比が異なる 15 種類の白色 LED を用いてロメインレタスを水耕栽培し、収穫時の生産量と栽培に要した積算消費電力量を測定した。その結果、R/B 比が 2~5、かつ R/FR 比が 3~10 の範囲内であれば、蛍光灯よりも成育が促進されることがわかった（蛍光灯の R/B 比は 0.5、R/FR 比は 1.3）（図 3）。上記の範囲からどちらか一つでも外れると、成育は遅延した。

本調査により、植物育成には青色光、赤色光および遠赤色光各領域の光質適性比が存在することが明らかになった。

また、上記の白色 LED 栽培における消費電力量はいずれも蛍光灯の約 1/3 に軽減された。

人工光型植物工場における効率的な野菜生産は、最終的には消費電力量の低減として認識される。その要因として、光質と光強度の最適化が重要であり、その程度は II を測定することにより総合的に評価できる可能性が示された。

<引用文献>

野末雅之, 人工光型植物工場における LED 光環境の最適化とその評価の試み, アグリバイオ, 1 巻, 2017, 49-51

野末雅之, 野末はつみ, 五味正男, 人工光型植物工場における LED 光環境の最適化と白色 LED の可能性, アグリバイオ, 12 巻, 2017, 76-80

Zhen, S., and van Iersel, M. W., Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis, Journal of Plant Physiology, 209, 2017, 115-122

野末雅之, 野末はつみ, 野菜栽培における白色 LED の効果と可能性, 施設と園芸, 181 巻, 2018, 19-23

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

野末雅之, 野末はつみ, 野菜栽培における白色 LED の効果と可能性, 施設と園芸, 181 巻, 19-23, 2018, 査読無, ISSN 0912-666X

野末雅之, 野末はつみ, 五味正男, 人工光型植物工場における LED 光環境の最適化と白色 LED の可能性, アグリバイオ, 12 巻, 76-80, 2017, 査読無, <http://www.hokuryukan-ns.co.jp/magazines/agri.html>

野末雅之, 人工光型植物工場における LED 光環境の最適化とその評価の試み, アグリバイオ, 1 巻, 49-51, 2017, 査読無, <http://www.hokuryukan-ns.co.jp/magazines/agri.html>

Nozue, H., Oono, K., Ichikawa, Y., Tanimura, S., Shirai, K., Sonoike, K., Nozue, M. and Hayashida, N., Significance of structural variation in thylakoid membranes in maintaining functional photosystems during reproductive growth, Physiologia Plantarum, 160, 111-123, 2017, 査読有, ISSN 0031-9317

野末雅之, 高橋伸英, 野末はつみ, コンテナ植物工場開発の現状と課題, 計測技術, 44 巻, 11-16, 2016, 査読無, ISSN0385-9886

〔学会発表〕(計 13 件)

野末はつみ, 白井花菜, 野末雅之, 遠赤色・緑色光から考える植物育成における広域スペクトル白色 LED の可能性, 日本生物環境工学会 2017 年松山大会, オーガナイズドセッション I, 2017

久保勇人, 野口諒太, 岡本千晶, 野末はつみ, 野末雅之, ワサビ植物における養液濃度の違いが生育および光合成特性に及ぼす影響, 日本生物環境工学会 2017 年松山大会, 2017

Nozue, H., Shirai, K., Kajikawa, K., Gomi, M. and Nozue, M., White LED light with wide wavelength spectrum promotes high-yielding and energy-saving indoor vegetable production, International Society for Horticultural Science GREENSYS 2017, 2017

Tanimura, S., Nozue, H., Shirai, K., Kumazaki, S. and Nozue, M., Changes in PSI/II ratio of *Arabidopsis thaliana* induced by long term acclimation to red, green and blue LEDs, 第 58 回日本植物生理学会年会, 2017

種五勇氣, 佐藤翔, 白井花菜, 岡本千晶, 野末はつみ, 野末雅之, 陰生植物の赤色光 LED による光阻害と遠赤色光 LED 補光によるその緩和, 第 58 回日本植物生理学会年会, 2017

谷村駿, 野末はつみ, 野末雅之, 単色光 LED 長期投与が光合成システムに与える影響, 日本生物環境工学会 2016 年金沢大会, 2016

関拓弥, 野末はつみ, 野末雅之, 遠赤色光の光合成活性、形態および生産性への影響, 日本生物環境工学会 2016 年金沢大会, 2016

種五勇氣, 久保勇人, 岡本千晶, 野末はつみ, 野末雅之, ワサビ植物の光阻害に対する遠赤色光の影響, 日本生物環境工学会 2016 年金沢大会, 2016

野末はつみ, 白井花菜, 梶川幸治, 五味正男, 野末雅之, 植物育成における

白色 LED の適性光量, 日本生物環境工学会 2016 年金沢大会, 2016

白井花菜, 梶川幸治, 野末はつみ, 五味正男, 野末雅之, 分光分布の異なる白色 LED の植物育成効果, 日本生物環境工学会 2016 年金沢大会, 2016

Sruta, R., Fukuda, S., Nozue, H., Kumazaki, S. and Nozue, M. The characteristics of functional photosystems in mature leaves that support leaf longevity in *Arabidopsis thaliana*, 第 57 回日本植物生理学会年会, 2016

野末雅之, 佐藤翔, 岡本千晶, 野末はつみ, ワサビ苗の光阻害に対する光質の影響, 日本生物環境工学会 2015 年宮崎大会, 2015

野末はつみ, 白井花菜, 中野里香, 岡本千晶, 野末雅之, 植物育成における LED 光環境適正化への光化学系 II 量子収率の利用, 日本生物環境工学会 2015 年宮崎大会, 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野末 雅之 (NOZUE, Masayuki)

信州大学・学術研究院繊維学系・特任教授
研究者番号: 30135165

(2) 研究協力者

野末 はつみ (NOZUE, Hatsumi)

信州大学・繊維学部・特任准教授
研究者番号: 30218325