

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2016

課題番号：25660026

研究課題名(和文)植物栽培用省エネLED光源による極短い明滅パルス照射法の開発と有効利用

研究課題名(英文)Development of the efficient pulsed lighting system with energy-saving LEDs for cultivating plants

研究代表者

金地 通生 (KANECHI, MICHIO)

神戸大学・農学研究科・准教授

研究者番号：90211854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：LEDsを施設園芸生産での栽培用省エネルギーランプとして実用化することを最終的な目的として、新たな効率的照射栽培方法の開発に繋げるための植物成長生理学的に新規な基礎知見を得た。植物工場栽培の主要野菜であるリーフレタスをLEDsパルス光照射下(周期:20～2kHz, 点灯期間/周期:0.5)で栽培し、地上部成長は連続光下に比べて最大増加率で約20%まで有意に増加した。葉形質(形態や成分含量)に影響はなく、葉の光合成(CO₂取込速度および光化学反応特性)は光利用効率上がる適応が見られた。LEDs光源を用いた新たな省エネルギーパルス光照射栽培法としての実用化が期待できることを示唆した。

研究成果の概要(英文)：The effects of pulsed irradiation based-LEDs (light-emitting diodes, red and blue wavelengths, 660:455nm=4:1) on the growth and photosynthetic light utilization efficiency of lettuce leaves were studied in order to develop the efficient energy-saving radiation system for cultivating plants. Plants were hydroponically grown at 22 °C under different pulse-cycled irradiances (0.5-500Hz, and 1-20kHz frequencies with half period of illuminated duration/cycle). The growth and the photosynthetic rate were not decreased under pulsed lighting. The similar quantum yield and electron transport rate of Photosystem II measured by chlorophyll fluorescence technique were obtained in wide range of frequency of pulsed light. Flashing irradiation did not significantly change the growth and nutrient contents of leaf vegetables that were richly cultivated in a closed type plant factory with the possibility of saving electricity by using intermittent illumination system with LEDs.

研究分野：園芸科学

キーワード：植物工場栽培 発光ダイオード LED パルス照射 光合成 光利用効率

1. 研究開始当初の背景

(1) 植物栽培用人工光源の利用特性

近代化 ICT 農業(ハイテク農業)を目指した農業法人化の推進や企業農業の展開において、施設園芸は周年生産、効率的生産、自動水耕栽培の導入による省力化が求められている。完全閉鎖型植物工場では無農薬栽培による清浄野菜の生産が人工光源のみを用いて実用化の段階に至っており、産学官連携でその拡大が推進されている。しかし問題点として、ランプや空調システムにかかるイニシャルコストが生産物価格に見合わず高過ぎること、栽培を通じたエネルギー消費が多過ぎることが挙げられ、より省エネルギーで効率的な栽培システムの研究開発が求められている。

植物工場栽培では成育時の光合成は人工光源のみに完全に依存している。成育促進のためのランプ光量の増加には発熱量や電力量を考慮して、植物育成用に適した波長構成と高輝度化を目指した発光ダイオード(LEDs)光源の開発研究と利用拡大が検討されており、現状でのイニシャルコスト高を除けば、その有効利用が大いに期待されている。LEDsはon-off応答性が極めて早いことより(200nsで全灯点灯が可能)、極短周期パルス明滅照射($\mu\text{s}\sim\text{ms}$ 周期)が可能で、明滅による基盤の冷却効果によって連続点灯に比べてランプ寿命がさらに延び、維持経費の節約が期待できる。

(2) 植物の新たな光環境応答

光合成反応に関しては、光量の増加に着目した成育量との関連性が主に研究されてきた。LEDs光源の開発によって、波長応答特性にも知見の集積はあるが、いずれも連続照射下での研究ばかりで、LEDsの特性である極短周期パルス明滅照射下での研究はほとんどない。自然界では林床の植物は晴天時には強光の散乱光($\text{ms}\sim\text{min}$ の強光/弱光)を受光して、総受光量は弱光下であるにもかかわらず明るく短周期散乱光を光合成的に効率よく受光利用していると考えられている。光合成の明反応系における電子伝達と光リン酸化は暗反応系における CO_2 固定速度に比べて非常に早く進行するため、連続受光で生成されるエネルギー中間産物の過剰蓄積は、暗反応系が律速する条件下では光障害等の引き金にもなることが明らかになっている。すなわち連続光下での成育や光合成応答に比べて短周期の明滅(パルス)光への応答に関する知見は非常に少ない。

(3) 植物栽培用人工光源の新たな照射法

植物工場栽培を含む施設園芸生産の現場ではランプ照射は連続光としてのみ実用化されており、今後は省エネルギー化と低価格化による普及が益々促進するLEDsを用いたパルス明滅照射法の実用化を目指した本研究の新規性は高い。

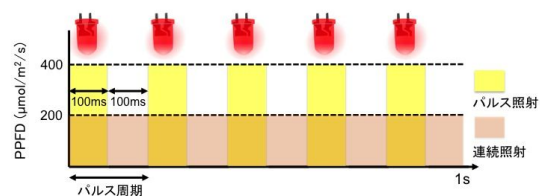
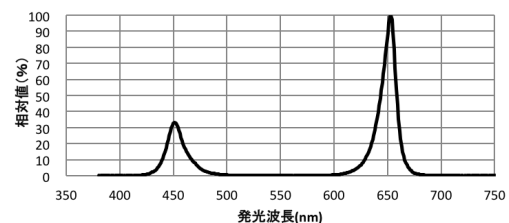
2. 研究の目的

植物栽培用人工光源としてLEDsによる極短パルス明滅照射($\mu\text{s}\sim\text{ms}$ 周期)が工場栽培野菜として最も多く栽培されているリーフレタスを始めとする数種の葉菜類の成長と光合成に及ぼす成長生理学的な影響を光応答科学的に解明することを試みた。植物工場野菜養液栽培における実用化を目指して、省エネルギー光源(LEDs)の特徴を活かした省エネルギー効率的な極短パルス明滅照射法の開発と実証栽培試験を目的とし、成果として、施設園芸葉菜類の栽培法改善の基礎知見となる人工光源の新たな有効照射法の提言と、実用化への見通しも含めて検討することとした。

3. 研究の方法

植物工場栽培のモデル野菜として、リーフレタス(*Lactuca sativa* L. var. capitata 'パイオ・サラダ')の種子を9cm径ポットにベルムライト支持培地を入れて播種し、大塚液肥(EC 1.3dS/m, pH6.0)を底面吸水して、屋内空調(22℃), 16時間日長で約20日間栽培した。LEDs光源として、赤色チップ:青色チップ=4:1に組み合わせた管状ランプを調光機で明滅(パルス照射, 周波数: 20kHz~0.5Hz, 明滅割合[Duty比]: 1:3[25%], 1:1[50%], 3:1[75%])制御した(図1)。光強度(PPFD)はオシロスコープと光量子計(LI-190S)で測定した。成長量および葉形態(地上部と根部の新鮮重と乾物重, 葉面積, 成長解析法), 葉分析(クロロフィル, 全可溶性タンパク質, 無機養分の含量), 成熟葉の光合成測定として、パルス光照射下での着生個葉の CO_2 交換速度(ガス交換法, LI-6400), クロロフィル蛍光反応(FluorPen FP100)を測定した。数種の葉菜類(コマツナ, サラダほうレンソウ)の養液栽培における再現性についても同様の実験を行った。

分光分布図



例) 光強度 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
パルス周期200ms, Duty比(明期/周期)50%

図1 LEDs(波長分光分布)パルス光照射の例

4. 研究成果

(1) 成長量および葉形質 (図2)

葉菜類の可食部である地上部の成長は極短パルス光照射下 (20~2kHz) で連続光下と比べて有意に促進した。成長促進の要因として、葉厚には変化が見られないことより、葉面積の有意な拡大と、葉数の増加 (RGR: 相対成長速度の増加) であると考えられる。根の成長はパルス光照射の影響を受けていない。

葉形並びにクロロフィル、全可溶性タンパク質、無機成分含量にも変化はなく、可食部としての質的栄養価も連続光下での栽培と有意差は見られなかった。

パルス光周期が長くなると連続暗期も長くなり、成長は抑制されると考えられる。パルス光照射条件は明滅間隔が同等で (Duty 比 50%), 周期中の半分が消灯している。赤外線熱放射がない植物栽培用 LEDs の発光基盤は省電力ではあるが、連続点灯では基盤が蓄熱するため冷却システムが別途必要である。特に閉鎖系植物工場内での基盤放熱は空調システムに負荷を及ぼす。成長量の低下を生じない光量でのパルス光照射法は基盤蓄熱を抑制し、それからの放熱量も減少することで LEDs 自体の長寿命化にも貢献できるメリットは大きいと考えるが、その長寿命化の程度や空調システムの省エネルギー性に関しては、実際の閉鎖栽培空間での実用化モデルによる更なる検証が必要と考える。

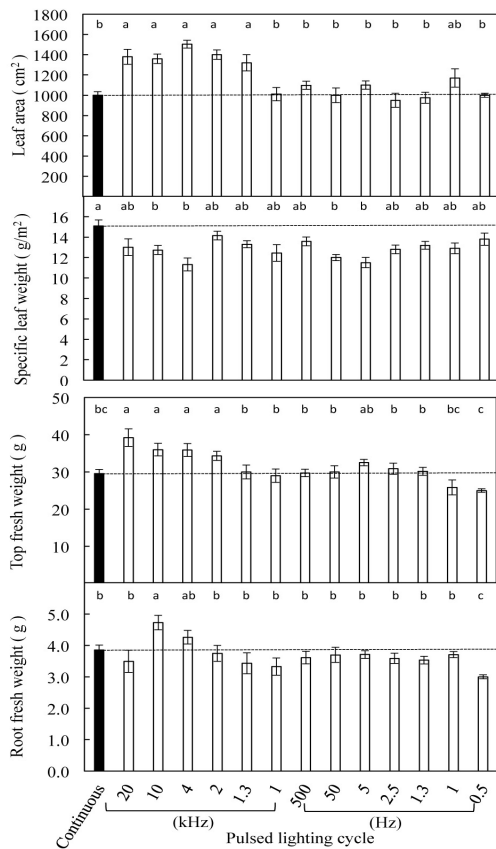


図2 パルス光照射下でのリーフレタスの成長量

(2) 着生葉の光合成応答

植物の成長は栽培環境の光条件に大きく依存している。特に葉菜類の栽培では収穫物量 (可食部の大きさや重さ) は播種後の栄養成長速度に左右され、その主な要因は光合成速度である。光合成速度は光強度に対して変化することが詳細に研究されているが、いずれも連続光下での応答であり、本研究が着目するパルス明滅光への生理学的な応答に関する知見はほとんどない。そこで成育時のパルス光下での着生葉による光合成応答をガス代謝測定法 (CO_2 同化速度) とクロロフィル蛍光測定法 (光化学反応系) により検討した。

CO_2 同化速度

通常葉 (連続光下で形成) のパルス測定光下での光合成 (光飽和下, PPFD $200 \mu\text{mol}$) は 10Hz 以下の周期では低下した。弱光下 (PPFD $80 \mu\text{mol}$) ではパルス測定光下で周期の影響を受けなかった (図 3-1 の上図)。光強度-光合成速度曲線 (図 3-2) から弱光下での見かけの量子収量 (光利用効率) に有意な差異は見られず、測定光 (連続光あるいはパルス光) の影響は見られなかった。

パルス光下で形成した葉の光合成 (光飽和下, PPFD $200 \mu\text{mol}$) は連続光下と比べてパルス光下で測定した場合に有意に高くなったことより、パルス光への機能的な適応機作の可能性が示唆される。弱光下では測定光 (連続光あるいはパルス光) の影響は見られない (図 3-1 の下図)。

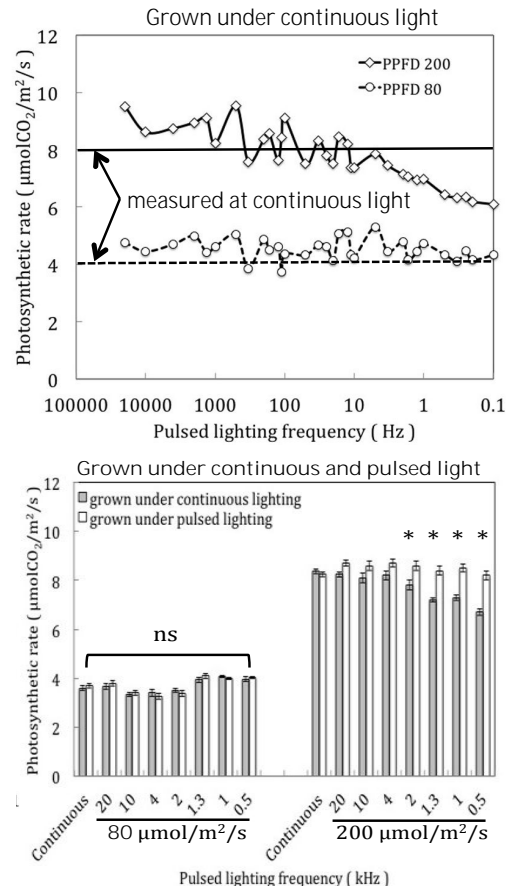


図3-1 パルス光照射下でのリーフレタスの光合成速度

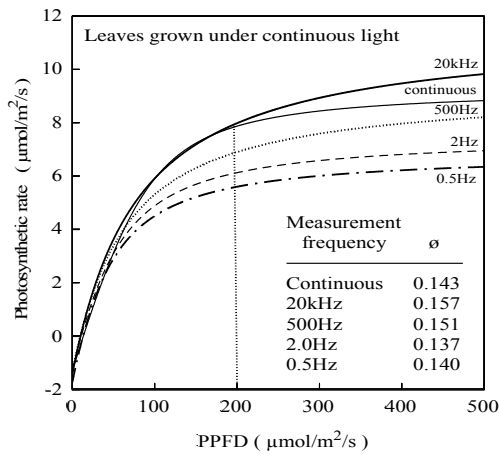


図3-2 パルス光強度-光合成速度応答

クロロフィル蛍光（光化学反応系）

受光環境に対する葉の光合成応答において、集光・化学エネルギー生成を担う光化学反応系の応答は光環境への順応を含めて重要な検討要素である。着生葉のクロロフィル蛍光を測定することにより、非常に短時間レベル（パルス光下）で変化する光環境への応答を非破壊的に検討することができる。

Fv/Fm（最大量子収率：受光量の最大利用効率を表し、葉の光障害の指標）、Fv' /Fm'（栽培時の PPFD 200 μmol の量子収率）、qP（光化学消光：光化学反応系での利用率）にパルス光の影響はほとんど見られなかったが、短いパルス光周期 10Hz では非光化学消光（光化学反応系には利用されないキサントフィル熱放散系での利用率）が減少したことより、それに伴った PS（実効量子収率）および ETR（電子伝達速度）の増加傾向が見られた。

林床植物が受光環境での不規則周期の散乱光に光合成的に適応（葉の光利用効率の変化）する機作も未解明であり、パルス光への光合成応答の解明は今後も重要な課題である。（図4）

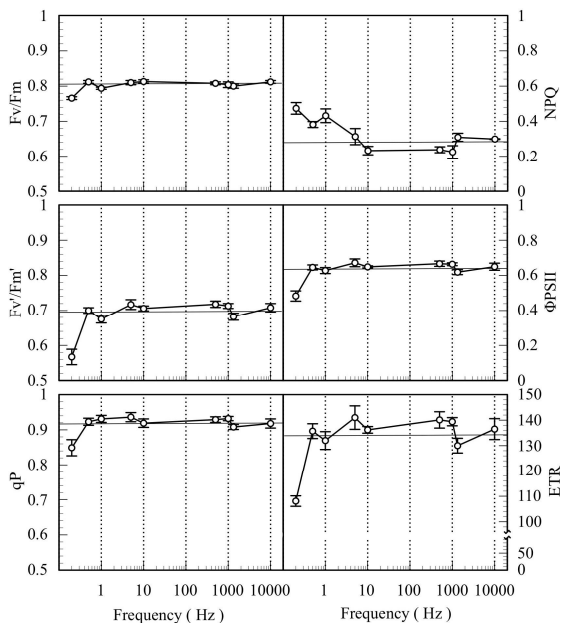


図4 パルス光照射下でのクロロフィル蛍光要素

光合成過程における明反応系（光化学反応系：PS）での電子伝達速度は暗反応系における CO₂ 固定反応速度に比べても著しく早いと考えられている。定周期で明滅するパルス光下で定常光合成中に PS で生成する還元力（NADPH）とエネルギー物質（ATP）のプールサイズを *in situ* 定量することは困難で、明期に生成したこれらの PS 生成物が蓄積され、続く暗期に暗反応系に使用されることで、消灯直後の暗期に数秒間に亘って僅かながら CO₂ 固定が継続する（Post-illumination CO₂ uptake）ことが知られている。この場合、パルス光周期が長くなるにつれて連続暗期も長くなると CO₂ 固定は減少し、暗呼吸が増加することで見かけの光合成は低下すると考えられる。

（3）成果のまとめ

清浄野菜生産を目的とする植物工場栽培が注目され、その普及拡大が推進されているが、電力コストの大部分を占める照明コストと空調コストの低減が重要な解決課題である。

本研究成果は、我が国の技術開発レベルが世界をリードしている LEDs を農業における施設園芸生産の領域で植物栽培用省エネルギーランプとして実用化を推し進めるために行ったもので、新たな効率的照射栽培方法の開発に繋げるための基礎研究として植物成長生理学的に重要な新規知見を集積した。

植物工場栽培の主要野菜であるリーフレタスの成長と光合成に及ぼすパルス光照射の影響に関して、明滅周期と Duty 比に着目して検討した結果、地上部の成長は極短パルス光照射下（20~2kHz）で連続光下に比べて最大増加率で約 20%まで有意に促進された。葉形質（形態や成分含量）にパルス光照射の影響は見られなかった。パルス光下で育成した葉の光合成 CO₂ 取込速度および光化学反応特性は、パルス光に光利用効率的に適応する可能性が示唆された。PPFD 50 μmol の極短（μs）周期パルス光下で光合成が促進した既報があるが、Duty 比が著しく小さいパルス光下での効果であり、植物の生産栽培には実用的ではない。

本研究は室内完全人工光利用型野菜工場で実用的な PPFD 200 μmol/m²/s での極短パルス光照射法が、連続光下での成長量と同等もしくは若干上回る光照射栽培法として生産栽培に実用化が期待できることを示唆している。パルス光照射法により LEDs 素子の冷却効果が高まり、より長寿命化が期待できることに加え、LEDs 素子基盤からの放熱も抑制できることは、空調コストの低減にも寄与できると考えられる。今後はさらにパルス光周期、Duty 比、光強度、波長を組み合わせた果菜類および根菜類の LEDs パルス光栽培への応用研究へと進めることで、省エネルギー照射装置の開発に貢献できると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Michio Kanechi, Akane Maekawa, Yasuko Nishida, Eriko Miyashita, Effects of pulsed lighting based light-emitting diodes on the growth and photosynthesis of lettuce leaves, Acta Horticulturae, 査読有, 1134, 2016, 207-214
DOI:10.17660/ActaHortic.2016.1134.28

〔学会発表〕(計5件)

前川 茜, 西田 康子, 金地 通生, LEDs パルス照射下におけるリーフレタスの成長および光合成特性, 園芸学会近畿支部兵庫大会, 2016.8.31, 神戸大学(兵庫県)

金地 通生, 前川 茜, 西田 康子, 宮下 英理子, リーフレタスの成長および光合成に及ぼす LEDs 極短パルス照射法の影響, 8th 光と園芸国際シンポジウム, 2016.5.22-26, イースト・ランシング(アメリカ)

金地 通生, LEDs 光源を用いた極短周期パルス明滅照射法が野菜の成長および光合成に及ぼす影響, 日本生物環境工学会, 2015.9.8-11, シーガイアコンベンションセンター(宮崎県)

金地 通生, 宮下 英理子, 河野 あずさ, LEDs 光源を用いた極短周期パルス明滅照射法がリーフレタスの成長および光合成に及ぼす影響, 園芸学会近畿支部和歌山大会, 2015.8.25, 和歌山ビッグ愛(和歌山県)

金地 通生, LEDs 光源による極短明滅照射法がリーフレタスの成長および光合成に及ぼす影響, 光合成学会, 2015.5.22-23, 岡山国際交流センター(岡山県)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 植物の栽培法
発明者: 金地 通生
権利者: 神戸大学, (株)アグリカルシステム
種類: 特許
番号: 特願 2014-033632
出願年月日: 平成 26 年 2 月 22 日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

金地 通生 (KANECHI Michio)
神戸大学・大学院農学研究科・准教授
研究者番号: 90211854

(2)研究協力者

前川 茜 (MAEKAWA Akane)
西田 康子 (NISHIDA Yasuko)
宮下 英理子 (MIYASHITA Eriko)
河野 あずさ (KOUNO Azusa)