

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：36102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14657

研究課題名(和文)パルス光照射による光合成反応効率化の研究

研究課題名(英文)Study on the photosynthesis efficiency by pulsed light irradiation

研究代表者

梶山 博司 (Kajiyama, Hiroshi)

徳島文理大学・理工学部・教授

研究者番号：80422434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：植物の光合成光量子利用効率が最大になる光照射条件を特定しました。夜間にこの光を照射することで、植物の生育速度が最大で2倍になることを実証しました。この方法は、植物が睡眠している夜間に、睡眠を妨げない光環境で、昼間と同等の光合成をおこさせるのが特徴です。本技術を、LEDや蛍光灯を光源としている植物工場に応用したところ、レタスの栽培重量は、従来法にくらべて最大で2倍になりました。本技術を近年収穫量が激減しているスジアオノリに適用したところ、生育速度が従来比2倍になることを確認しました。

研究成果の概要(英文)：We specified the optimal light conditions that maximize the utilization efficiency of photosynthetic photons of plants. By irradiating this light at night, we confirmed that the growth rate of plant was doubled at maximum. This method features photosynthesis equivalent to a daytime light environment that does not disturb sleep at night when plants are sleeping. When applying this technology to a plant factory that uses LED or fluorescent light as a light source, we confirmed that the cultivation weight of lettuce was doubled compared to the conventional method. When applying this technology to greenlaver which the harvest volume has drastically decreased in recent years, we also confirmed that the growth rate doubled as compared to conventional methods.

研究分野：非平衡ナノ材料物性、プラズマ合成、光合成

キーワード：光合成 光合成光量子束密度 生育速度 植物工場 レタス スジアオノリ

1. 研究開始当初の背景

植物工場とは、「野菜や苗を中にした作物を施設内で、光、温湿度、二酸化炭素濃度、培養液等の環境条件を人工的に制御し、季節や場所にあまりとらわれずに自動的に連続生産するシステム」と定義されている(高辻正基、「よくわかる植物工場」、日刊工業新聞社)。植物工場は太陽光を主体に人工光を補助活用する方式でスタートし、その後徐々に人工光源の比率が高まり、現在では100%人工光源を用いた完全制御型植物工場が稼働している。人工光源に着目すると、初期には蛍光灯、高圧ナトリウムランプが主に活用されていたが、最近では発光ダイオード(LED)が大きな割合を占めている。

LEDは光合成反応においてクロロフィルが効率よく吸収する青色(470nm)、赤色(660nm)の発光強度が強いという特長があり、多くの植物工場で採用されている。LEDは設備費、空調経費、保守費が高価という点も指摘されている。

より少ない光子照射で十分な光合成が実現できることは、高辻らによりパルス光照射の実験によって明らかにされている(高辻正基、「よくわかる植物工場」、日刊工業新聞社)。すなわち、光照射のON、OFF時間を変えた場合、ON-OFF周期400 μ s(照射時間200 μ s)の時、単位光量あたりの光合成度は連続照射に比べて増大するという結果を報告している。このような結果が得られたのは、光合成反応がスタートから完了までの1サイクル時間が200 μ s程度必要なので、不必要なタイミングの光照射が減ったからだと解釈されている。

本研究では、周波数100kHz以下、すなわちパルス間隔 $\Delta t > 10\mu$ s)の青色、赤色光源を開発し、それを用いて、単位光量当りの光合成度のパルス間隔依存性を明らかにする。この光源の利点は、1パルスの発光時間を数 μ s程度に保ちながら、休止時間を10 μ sから1msまで選択できるという点である。さらに、青色、赤色それぞれのパルス照射間隔、強度も可変であるので、植物ごとに光利用効率の最適化が容易になる。

本研究は、パルス光照射による光利用効率向上だけでなく、光合成の反応制御も目標に掲げて、植物生理学、薬理学の分野とも連携して、食用・薬用植物栽培の質および量的向上を可能とする次世代植物工場に発展させたい。

2. 研究の目的

本研究の目的は、光合成の光化学反応の進行過程と光照射タイミングを合致させることで、無効となる光量子数を低減し、植物工場の省エネルギー化を促進することである。そのため、クロロフィルaの吸収率が高い青色(400-480nm)、赤色(600-700nm)のパルス光源を開発し、赤色、青色のパルス照射タイミングを独立制御することで、光化学反応促進に必要な光照条件を明らかにする。本研究で得

られた成果を、栄養価の高い食用植物、薬効が大きい薬草の植物工場栽培に展開する。

植物は昼間蓄積された糖を、暗期に転流させることで成長している。本研究では、暗期に微弱なパルス光を照射して糖の総転流量を増やすことで、生育が促進されるかどうかを明らかにする。

3. 研究の方法

植物は、光合成がおきない暗期に細胞分裂することで、細胞損傷を緩和している。このため、正常な生育のために、暗期の光強度をできるだけ弱くする必要がある。一方、水菜で試験したところ、光合成光量子効率パルス間隔が200~250 μ sのときに最大であった。このことは、パルス光にすれば、小さなPPFD光でも光合成がおきることを意味している。以上の結果に基づいて、暗期照射光の光質を、パルス間隔 $< 250\mu$ s、PPFD < 0.1 、デューティー比 < 0.2 に規定した。

(1)パルス光の光合成利用効率試験

赤色、青色の2色のパルス光を照射して、土壌栽培による水菜の生育に及ぼすパルス間隔と光合成光量子密度(PPFD)の影響を調べた。栽培環境は、温度22℃、湿度40~50%に保った。パルス光は、発芽してから30日間照射した。

実験では、580nmから730nmに複数の発光ピークがある赤色と、450nmに発光ピークがある青色を照射した。照射光のパルス間隔 t は6.6, 250, 500 μ sの3通りに設定した。光合成有効量子束密度(PPFD)は、それぞれ27, 0.9, 0.5であった。いずれのPPFDにおいても、1パルスあたりの光子数は同じ値に設定した。

(2)暗期パルス光合成によるレタス生育促進効果の試験

レタスを対象に、明期に赤色と青色LEDを同時照射し、暗期に青色パルス光を照射した。レタスの葉面積、総重量、茎の数に及ぼす青色パルスの光合成光量子束密度(PPFD)とデューティー比の影響を調べた。

LEDの赤色と青色の中心波長はそれぞれ450nmと660nmであった。レタス葉面でのPPFDは、LED赤色を48.3に固定し、LED青色は8.3と1.5とした。LEDの青色と赤色は同時照射した。青色パルス光は、中心波長は450nm、デューティー比は0.05、レタス葉面でのPPFDは0.01に設定した。照射プロファイルは次の4通りであった(括弧内数字は青色のPPFD)。

LED(8.3)=4時~16時、
LED(8.3)=4時~16時、青色パルス光=4時~16時、
青色LED(1.5)=4時~16時、青色パルス光=4時~16時、
青色LED(1.5)=4時~16時、青色パルス光=16時~4時。生育中は、温度22℃、湿度40~50%に保った。生育は定植後28日間観察した。

(3)暗期パルス光合成によるスジアオノリの生育促進効果の試験

塩分濃度25~30psuで、栄養成分を添加していない人工海水にスジアオノリをいれ、太

陽が直接あたる場所に置いた。試験中の水温は-0.5~7.4 であった。PPFDが0.05-0.10、デューティー比が5%の光を日没から8時間照射した。生育日数は15日であった。太陽光のみ、太陽光+暗期パルス光照射の2条件で栽培した。それぞれの湿重量から生育比をもとめた。

4. 研究成果

(1)パルス光の光合成利用効率試験

茎の長さは、 $t=250\mu s$ で7cmであった。それに比べて、 $500\mu s$ 、 $6.6\mu s$ では約30%減になっていた。連続光照射飽和強度以下ではPPFDと生育は比例する。このことは、パルス光照射では生育速度の光強度には比例関係が成り立たないことを示している。この原因については、後で考察する。水菜の光合成利用効率に及ぼすパルス間隔の影響を示す。縦軸のGrowth Efficiencyは、茎の長さをPPFDで割った値である。光利用効率は、 $t=500\mu s$ で最大で、 $250\mu s$ 、 $6.6\mu s$ の順で小さくなっていった。光合成は光化学反応と光非依存性反応の2つの経路で構成されている。本研究は光照射と生育に関するものなので、以後、光化学反応に限定して考察する。光化学反応は、光化学系とからなり、それぞれの反応のトリガーはクロロフィルによる光吸収である。光化学系の反応中心で励起された電子は、光化学系の反応中心に到達して、再度光を吸収することで光化学系が進行する。反応が、光化学系から進むためには有限の時間がかかることは知られている。

上述した結果から、光化学系からまでの反応時間は $250\mu s$ から $500\mu s$ の範囲にあると推定できる。 $t=500\mu s$ で生育速度が減少したのは、光励起の機会損失によるものと考えられる。 $t=500\mu s$ でも生育していることから、光化学系の基底状態の寿命は $250\mu s$ より長いことがわかる。

一方、もっとも光強度が強い $t=6.6\mu s$ での生育速度の低下は、電子伝達鎖での反応が完了する前に同じ反応中心で電子が励起されても、電子伝達鎖には供給されないことを示唆している。

(2)暗期パルス光合成によるレタス生育促進効果の試験

葉面積は、 177cm^2 、 182cm^2 、 123cm^2 、 220cm^2 であった。この結果より、暗期に青色パルス光を照射することで、葉面積はLEDのみのに対して、最大で1.25倍になることがわかった。葉の形状は、暗期青色パルス光照射により、葉幅が広がったが、葉は茎の根元にまで拡大していた。さらに、暗期青色パルス光には、総重量を増やし、茎の数を増やす効果があった。

光合成でつくられた糖は、暗期に生命維持と成長のために消費される。暗期のパルス光合成により、糖が断続的に補充されたので、転流総量が増加したと推定できる。光合成の光化学系からへの反応時間は $200\mu s$ 程

度であるので、デューティー比をさらに小さくしても、同様の生育促進効果が期待できる。

上述したように、光合成の光利用効率は $t=500\mu s$ の時が一番大きかった。これにより、光化学系からへの反応が完了した後に、再び光化学系の反応中心で電子が励起されたことがわかる。 $t=250\mu s$ での光利用効率が $t=500\mu s$ よりも20%ほど小さいことから、光化学系からへの反応時間が $200\sim 250\mu s$ の間にあると推定できる。

ここで、本報告と関係が深い白色LEDの間欠照射について、光量子有効利用の観点から議論する。明暗比率1、周期 $2\mu s\sim 10ms$ の白色LED間欠光をサラダ菜に照射した結果、光合成速度は周期 $400\mu s$ の時に最大になったと報告されている。この時、白色LED光を $200\mu s$ 照射し、残りの $200\mu s$ は光がない暗期になっている。本報告の結果に基づけば、暗期時間を $200\sim 250\mu s$ に保ちながら、明暗比率を1からずっと小さくしていけば、光量子の光合成効率をさらに高めて、生育速度を向上できる可能性がある。

パルス光照射による生育制御については、レーザー走査、白色LEDの間欠照射の報告がある。また、高速栽培を目的にしたLEDの赤色と青色の交互照射技術も開発されている。今後は、これらの既存技術との類似点、相違点を明確にして、生育速度に及ぼす光照射の影響を細胞レベルで明らかにすることが必要である。

次に、明期では蛍光灯のみを使用し、その後の暗期光合成の有無が生育に及ぼす影響を調べた。蛍光灯は、葉面におけるPPFDを200に設定し、12時連続照射した。定植から4週間後の重量は、暗期光合成法では蛍光灯のみに比べて約2倍であった。また、顕著な徒長抑制効果も確認された。以上の結果は、暗期光合成法は有意な生育促進効果があることを示している。

(3)暗期パルス光合成によるスジアオノリの生育促進効果の試験

試料と¹の湿重量は、それぞれ1.1倍、2.3倍に変化していた。試料¹の生育速度は10日ほどで飽和した。

植物は、明期には光合成と呼吸をおこなうが、光合成が優勢なので糖が蓄積される。植物は暗期に睡眠するが、この期間は呼吸のみをおこなっている。明期に蓄えられた糖は、生命維持のための解糖と成長のための転流に消費される。本研究によって、暗期パルス光合成は、スジアオノリの生育促進効果があることが明らかになった。暗期におけるパルス青色光照射が植物に及ぼす生理学的な影響については不明な点が多い。今後は、パルス光による呼吸と光合成の比率変化を、海水中の酸素濃度あるいは CO_2 濃度測定により定量化して、暗期における糖生産量と生育速度の関係を明らかにしたい。

生育速度が10日程度で飽和した原因として、人工海水に栄養が含まれていないこと、

あるいはフラスコが有限の大きさであることが考えられる。この点については、栄養成分を添加した人工海水で栽培試験をすることで確認する予定である。

以上の成果を総括する。植物が睡眠している時間に微弱なパルス光を照射することが植物の生育にどのような影響があるかを調べた。本方法の特徴は、暗期の糖の転流量を増やすために、植物の睡眠時に、睡眠を妨げないパルス光を照射することである。試験では、植物の生育過程に及ぼす光照射強度とパルス間隔の影響を定量化して、生育速度向上に適した光質を探索した。その結果、生育速度は、明期の1万分の1程度の微弱なパルス光を暗期に照射することで、レタスやスジアオノリの生育速度が最大で2倍（従来比較）になることを実証した。これらの結果に基づいて、次世代の高速栽培技術としての暗期パルス光合成法を提案した。

植物の高速栽培技術は、食料増産だけでなく、省エネルギーの観点からも今後ますます重要になるであろう。そのためには、生育に及ぼす光質の影響を、光合成効率、細胞に及ぼすストレス、機能成分などを定量化して、パルス光による生育技術を体系化していく必要がある。

植物工場の安定普及には、省電力と生産性向上が必須である。LED光源をもちいると生産性は向上するが、初期投資額が大きい。蛍光灯はLEDに比べると安価であるが、生産効率はLEDの水準には達してない。暗期光合成法は、双方の植物工場にパルス光機能を付加するだけで高速栽培が実現できるので、汎用性が高い。暗期だけでなく、光補償点以下であれば同様の栽培効果があるので、太陽光利用型の植物工場でも有効である。今後は、葉物野菜だけでなく、果樹、海草、微細藻類などに応用が可能である。

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0件)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称：植物栽培方法
発明者：梶山博司
権利者：同上
種類：
番号：特願 2017-153544
出願年：2017年
国内外の別：国内

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梶山 博司 (KAJIYAMA Hiroshi)
徳島文理大学・理工学部・教授
研究者番号：80422434

(2) 研究分担者

前田 淳 (MAEDA Atsushi)
徳島文理大学・理工学部・講師
研究者番号：10389174

(3) 研究協力者

()