

## 論文の内容の要旨

生物・環境工学専攻  
平成 25 年度博士課程進学  
地子智浩  
指導教員 富士原和宏

### 分光光量子束密度の時間変化パターンがコスレタスの 純光合成速度、形状および成長速度に及ぼす影響

#### 1. 緒言

人工光型植物工場における LED 光照射法の選択のために、光照射法が植物に及ぼす影響に関する研究が行われてきた。しかし、それらの研究の多くは光照射中の分光光量子束密度を一定としたものであった。LED は点滅を繰り返しても寿命が短くならないため、PPFD を時間変化させる場合の光照射には適した光源といえる。また、LED は狭波長帯の光を照射可能なため、複数種の LED の点灯時間を独立に制御することで時間帯ごとに照射光の相対分光光量子束密度を変化させることが可能である。光照射中に分光光量子束密度が変化する光照射法を用いることで、そうでない光照射法と比較して植物の成長をよりいっそう促進できる可能性がある。しかし、光照射法が植物の純光合成速度、形状および成長に及ぼす影響を調査した例は著しく少ない。

本論文では、パルス光（本論文では、1 分以下の周期で点滅を繰り返す矩形パルス光）が、純光合成速度に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、パルス光下純光合成速度推定モデルの作成およびパルス光下のコスレタス葉純光合成速度の測定を行った。パルス光下での光合成中間代謝産物蓄積量変化をシミュレートするモデルを、既往のモデルを利用して作成し、パルス光が連続光と比較して純光合成速度を高めることが可能であるか検討した。さらに、パルス光パラメータである平均 PPFD、明期 PPFD、周波数およびデューティ比がコスレタス葉の純光合成速度に及ぼす影響およびそれらの相互作用を実測により調査した。

また、青および赤色光を用いて一日の中で分光光量子束密度を変化させることで植物の成長が促進されたという既往の報告に基づき、これらの報告における成長促進の機構解明を試みた。青および赤色光単独照射時間の有無、青色光単独照射時間および青色光照射時間の長さ、および青・赤色光交互照射の周期がコスレタスの形状および成長に及ぼす影響を栽培実験により調査した。

## 2. パルス光照射がコスレタス葉の純光合成速度に及ぼす影響

パルス光は、平均 PPFD、周波数およびデューティ比の 3 パラメータによって、その PPFD 時間変化パターンが決定される。明期 PPFD = 平均 PPFD/デューティ比で表される明期 PPFD がパラメータの一つとして扱われる場合もある。これらのパラメータは純光合成速度に影響を及ぼすことが知られている。一部の報告では、特定の周波数のパルス光下の純光合成速度が平均 PPFD の等しい連続光下のそれと比較して高くなることがあるとされている。しかし多くの報告では、パルス光下の純光合成速度が、平均 PPFD の等しい連続光下のそれを上回ることにはなかったと報告されている。本論文では既往の研究に基づき、明期に蓄積した光合成中間代謝産物を利用して暗期にも光合成反応の一部が進行していることをシミュレートするモデルを作成し、パルス光下の純光合成速度を推定した。結果、光合成中間代謝産物の蓄積を考慮したモデルでは、パラメータの組合せにかかわらず、パルス光下の純光合成速度が連続光下のそれと比較して高くなることはないとは推定された。

次に、平均 PPFD、明期 PPFD、周波数およびデューティ比がコスレタス葉の純光合成速度に及ぼす影響およびそれらの相互作用を調査した。平均 PPFD が 100 または 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  の 2 水準、周波数が 0.1、1、10、100 または 1000 Hz の 5 水準、デューティ比が 25 または 50% の 2 水準を組み合わせた、計 20 種類のパルス光下の純光合成速度を測定した。結果、周波数低下に伴う純光合成速度低下の度合いは明期 PPFD が高いほど大きいこと、デューティ比低下に伴う純光合成速度低下の度合いは平均 PPFD が高いほど大きいこと等が明らかになった。また、平均 PPFD が 100、200、300、400 または 500  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  の 5 水準、明期 PPFD が 500 または 1000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  の 2 水準、周波数が 1、10 または 100 Hz の 3 水準を組み合わせたパルス光または連続光下で純光合成速度を測定した。この結果から平均 PPFD 増加に伴う純光合成速度上昇は周波数が低いほど線形に近づき、また、上昇の度合いは明期 PPFD が高いほど小さいことが明らかになった。結果として、すべてのパラメータは純光合成速度に影響を及ぼし、それらの影響には相互作用が存在した。そして、これらのパラメータの影響およびそれらの相互作用は、作成したモデルによる推定結果と定性的に一致していた。

## 3. 時間帯によって分光光量子束密度が異なる光照射法がコスレタスの形状および成長に及ぼす影響

青および赤色光を用いた葉菜類栽培において、青色光照射時間帯と赤色光照射時間帯の

時間差が大きいほど成長が促進されたとする報告があり、成長促進の一因は、葉を薄く広げる形状になったことが栽培中の受光量を大きくしたためであると示唆されていた。しかし、分光光量子束密度変化パターンが栽培中に葉菜類の形状に影響を及ぼした機構は不明であった。この機構が明らかになれば、光照射法選択によるさらなる成長促進が可能となる可能性がある。本論文ではまず、青および赤色光単独照射時間の有無がコスレタスの形状および成長に及ぼす影響を調査するために、一日の中で、青および赤色光を 24 時間照射する BR 区、青色光を 24 時間と赤色光を 12 時間照射する B/BR 区、青色光を 12 時間と赤色光を 24 時間照射する R/BR 区および青色光を 12 時間と赤色光を 12 時間交互に照射する B/R 区でコスレタスを栽培した。これを青および赤色光の日平均 PPFD の合計が 50 (P50)、100 (P100) および 200 (P200)  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  の 3 水準で行った。結果は日平均 PPFD にかかわらず、青色光単独照射時間が 12 時間存在した B/BR 区および B/R 区で、他の 2 試験区と比較して葉の伸長が促進された。P200 条件では、B/BR 区および B/R 区で、葉面積、地上部生体重および地上部乾物重が有意に大きく、P100 条件でも同様の傾向にあった。青色光単独照射により葉の伸長が促進され栽培中の受光量が大きくなったことで成長が促進されたと考えられる。他方、P50 条件では B/BR 区および B/R 区で株が倒伏しており、試験区の間で、地上部生体重および地上部乾物重に有意な差はなかった。葉が過度に伸長したために倒伏し、受光量が大きくならなかったと考えられる。また、青色光単独照射時間の存在がコスレタス葉の伸長を促進した機構について、フィトクロム反応によるものと考察した。

次に、青色光単独照射時間の長さがコスレタスの形態に及ぼす影響を明らかにするために、青色光を PPFD 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  で 24 時間照射し、赤色光を添加しない区、および 8、16 または 24 時間添加した 4 試験区でコスレタスを栽培した。結果、青色光単独照射時間が長いほど葉長が長い傾向にあった。すなわち、青色光単独照射時間の長さを調節することで葉の伸長の程度を制御できる可能性が示唆された。

青色光単独照射時間が形態に影響を及ぼす機構はフィトクロム反応によるものであると考えられるが、青色光は青色光受容体を介しても植物の形態に影響を及ぼすことが知られている。そこで、青色光照射時間の長さがコスレタスの形態に及ぼす影響を調べるため赤色光を PPFD 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  で 24 時間照射し、青色光を添加しない区、および 8、16 または 24 時間添加した 4 試験区でコスレタスを栽培した。結果、青色光を添加しない区で、他の 3 試験区と比較して葉長が有意に大きく、葉は振れた形状であった。青色光を照射した 3 試験区では、青色光照射時間が長いほど葉面の凹凸が小さく、葉が丸まらない平坦な形状であり、地上部生体重が大きい傾向にあった。青色光照射時間が長いほど葉が平坦化され、葉面積あたりの受光量が大きかったために成長が促進されたと考えられる。

最後に、青・赤色光交互照射の周期がコスレタスの形状および成長に及ぼす影響を調査した。フィトクロムの状態変化は分光光量子束密度の変化に対して時間遅れがあるため、青・赤色光交互照射の周期がフィトクロムの状態変化パターンに影響を及ぼすと予想できる。そのため、青・赤色光交互照射の周期を調節することでも葉の伸長の程度を制御でき

る可能性があると考えたためである。周期 2 s、1 min、10 min、2 h、24 h および 48 h の青・赤色光交互照射下および青・赤色光同時照射下でコスレタスを栽培した結果、周期が 1 分以下の交互照射下では同時照射下と同様の形状となった。また、1 分より長い周期では、周期が長いほど葉長が大きい傾向にあった。パルス光下純光合成速度推定モデルを応用してフィトクロム光平衡 (phytochrome photostationary state; PSS) の状態変化を推定した結果、青・赤色光交互照射の周期が葉長に及ぼす影響は、PSS の時間平均値に影響を受けたものとして説明することができた。

#### 4. 結語

連続光照射と比較してパルス光照射が純光合成速度を増大させないことを、光合成中間代謝産物蓄積量の時間変化をシミュレートするモデルおよびコスレタス葉を用いた実測により示した。また、パルス光のすべてのパラメータが純光合成速度に及ぼす影響およびそれらの相互作用を明らかにした。

株が倒伏しない程度に葉の伸長を促進させるように形状を制御することで、栽培中の受光量を大きくし、成長を促進できると示唆した。また、一日の中で青色光単独照射時間が長いほどコスレタス葉の伸長が促進されることを明らかにし、青色光単独照射時間の長さを調節することで、葉の伸長の程度を制御できる可能性を示した。また、青色光照射時間が長いほど葉を平坦化し、葉面積あたり受光量を大きくすることで成長を促進できる可能性を示した。さらに、青・赤色光交互照射の周期が長いほど葉の伸長が促進されることを明らかにし、この周期調節により葉の伸長の程度を制御できる可能性を示した。