

令和元年6月18日現在

機関番号：32657

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18116

研究課題名(和文)植物生体電位の点滅光刺激への応答を利用したアクティブな光合成速度評価と最適化制御

研究課題名(英文)Active evaluation of photosynthetic rate and environmental optimization by using plant bioelectric potential response to stimulus from blinking illumination

研究代表者

安藤 毅 (ANDO, Ki)

東京電機大学・工学部・助教

研究者番号：00712431

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、LEDの点滅光刺激に対する植物生体電位の応答特性を解析し、それを指標とする光合成速度の評価手法を確立することを目的として研究を行った。提案手法は、光合成の反応時間にもとづく周期の点滅光を、植物生体電位の応答を誘引する外部刺激として用いる、アクティブかつ選択性が高い測定が可能であることが特徴である。

点滅光に誘引された生体電位応答と光合成速度の相関を検討した結果、相関係数0.9を越えた。点滅光によって、光合成に起因する応答のみが誘引された結果である。点滅光は光合成を促進する効果が知られており、本提案手法での光合成の評価と栽培現場での栽培促進が両立可能であると結論付けられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

当初、光合成反応に起因する生体電位応答を誘引する点滅周期は、光合成の反応時間とされる20 msや200 μsが最適であると予想していたが、点滅の高速化によるS/N比低下の影響と、光合成以外に起因する生体電位は応答が遅いことから、実際に最も光合成の評価性能が良かった点滅周期は1s～0.1sの点滅周期であった。

結果として、点滅光に誘引された光合成反応に起因する生体電位応答のみを精度よく観測できたことから、生体電位応答と光合成速度の相関係数は0.9を越えた。点滅光は光合成を促進する効果が知られており、本提案手法での光合成の評価と栽培現場での栽培促進が両立可能であると結論付けられた。

研究成果の概要(英文)：In this study, I investigated characteristics of plant bioelectric potential response to stimulus from blinking LED illumination, and I aimed to establish the evaluation method of photosynthetic rate by using those characteristics. The proposed method was an active method and has high selectivity because this method was applied blinking period based on reaction time of photosynthesis as external stimulus triggering plant bioelectric potential response.

In the result, the correlation coefficient between bioelectric potential response triggered by blinking illumination and photosynthetic rate showed more than 0.9 due to triggered only the response from photosynthesis by blinking. Blinking illumination was well-known for acceleration effect of photosynthesis, and I concluded this method was available to both evaluation of photosynthesis and growth acceleration in cultivate scenes.

研究分野：電子計測

キーワード：植物生体電位 点滅光 光合成 植物工場

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人工的に栽培環境を制御し、システム化された栽培工程を行う植物工場は、その期待とはうらはらに採算性が低く普及が進まない。投入した人工栽培光源の電力のうち数%しか実際の収穫量に結びつかず、残りは熱などのロスとなることが原因の一つとして挙げられている。植物工場の第一人者である高辻、古在らが著書などにおいて、「光の最適制御で植物工場は採算に乗る」と繰り返し述べているように、光、つまり光合成の最適化が急務である。

育成光源の制御では、LEDの点滅光照射による光合成促進が着目されている。葉緑素が行う光合成反応の1サイクル中には、光を利用できない無効時間がある。連続した光照射下で無効時間中に受けた光は、光合成に使えずロスになるだけでなく、熱害の原因となる。一方、20 ms や 200 μ s 周期の点滅光照射を用いて光の無効時間を点滅の暗期とすることにより、ロスと熱害が無くなり、光合成速度は変わらないどころか向上する場合もある。そのため、LED点滅光の利用によって電力効率が改善することが期待されているものの、実用上では、最適な点滅光の条件が、植物ごと、その時々で様々に異なるため、光源の最適化は容易ではない。

そのため、育成光の最適化を行うためには、光合成速度のリアルタイムモニタリングが必須となる。しかし、現在実用化されている光合成の評価機器のほとんどは、植物生理学の研究を目的としているため高価かつ取り扱いが難しく、栽培現場で利用されることを想定していない。そのため、実際の栽培現場で光合成速度の評価と育成光源へのフィードバックは、栽培者の経験や統計、勘による判断に頼らざるを得ないのが実情である。しかし、植物工場においては、栽培者とはシステム管理者であって、農業熟練者ではないため、光合成の評価と育成光の最適化が困難である場合が多い。

そこで、植物工場で利用可能な光合成速度の評価手法として、植物が持つ生体電位を利用した手法に着目した。植物生体電位は、植物細胞内外のイオン濃度差によって発生する電位差を測定するもので、他の蛍光、ガス、生成物などを解析する従来の植物生理評価手法と比べ非常にシンプルなシステム構成となる。

しかし、一般に生体電位応答は、様々な生理活動による電位変動とノイズが一斉に畳み込まれて観測されている。そのため、これまでに報告されている定常状態の栽培環境に置いた植物生体電位を測定する手法では、植物の生理状態が活発であることは分かるものの、どの反応が活発であるか、反応の大きさはどのくらいかといった、情報の選択性と精度に問題があった。例えば、光合成が活発であるときはその周波数スペクトルが大きい、気温が高いときもまた、周波数スペクトルが大きいのである。また、植物の生体はインピーダンスが数 M Ω になることもあって、生体電位の測定結果がノイズの影響を受けやすく、実用を考える上では電極、アンプ、評価、解析手法など、計測システムの改良も必要不可欠であった。

2. 研究の目的

暗状態に置いた植物に対し光を照射すると、葉緑素は一斉に光合成を開始する。連続光照射時の植物では次第に葉緑素ごとの光合成反応サイクルがずれてゆくが、点滅光照射時では、点滅の明期開始時にすべての葉緑素で光合成反応のサイクルが揃う。また、光合成の反応サイクルは、植物内の他の生理反応と比べても極端に早い。そのため、光合成の反応サイクルと同じ周期の点滅光刺激を用いることにより、光合成のみに起因する植物生体電位応答を誘引できると考えた。

そこで本研究では、1:ヒトの生体電位計測でノイズ対策に用いられてきたアクティブ電極を植物生体電位測定に応用し、高精度な植物生体電位測定手法を確立すること、2:光合成反応サイクルである 20 ms と 200 μ s を中心に、光合成速度と最もよく相関する生体電位応答を誘引する点滅光刺激の周期を検討し、他の植物生理活動による電位変動の重畳のない光合成に起因する植物生体電位応答の測定と、光合成速度との関連の評価、を目的として研究を行った。

3. 研究の方法

植物生体電位測定用電極には、葉の表面に設置する脳波用皿電極を転用した。検討予定の点滅周期は最短で 200 μ s であるが、点滅周期を短くしてゆくとそれに誘引される電位応答も小さくなり観測が困難となる。また、LEDが点灯・消灯する際の静電ノイズの侵入は深刻であった。そのため本研究ではまず、ヒトの生体電位計測でノイズ対策に用いられてきたアクティブ電極を植物生体電位測定に応用し、微小生体電位の高感度測定を可能とするために、その適用方法の検討と有効性の検証を行った。その際、ヒトと本研究では測定に用いる周波数成分が異なるため、従来のアクティブ電極およびアンプに付属するバンドパスフィルタが、植物生体電位に対して十分なフィルタ特性を持つかの検討もあわせて行った。

次に、光合成反応サイクルである 20 ms と 200 μ s を中心に、光合成速度と最もよく相関する生体電位応答を誘引する点滅光刺激の周期を検討した。光合成速度は、密閉容器に入れた植物が消費する CO₂ の濃度測定や、光合成に使われなかった光が蛍光として放出されることを利用するクロロフィル蛍光測定 (PAM) によって評価する。生体電位応答は MATLAB による FFT を用いた、点滅周期およびその高調波のスペクトルピークの大きさを評価に用いる。実験対象植物は、長期の安定した実験が可能な観葉植物を対象として行った。

研究の過程において、栽培環境の温度などの影響を考慮したほうが、より高精度な光合成速度の推定が可能である事が示唆されたため、ニューラルネットワークを用いて生体電位応答と

光合成速度の関係について補正を行うことを試みた。

4. 研究成果

第一に、アクティブ電極を応用した微小生体電位応答の高感度測定法の検討を行った結果について述べる。まず、暗幕、LED光源パネル、密閉容器、アクティブ電極、アンプ、ロガー、および光合成評価のためのCO₂アナライザによる植物生体電位測定システムを、図1のように構築した。この測定系に導入したアクティブ電極によって、ハムフィルタとともに、0.08Hz～点滅光の周期のバンドパスフィルタを設定すると、図2に示すように、外来ノイズを大幅に低減できることが明らかになり、ヒトの生体電位計測でノイズ対策に用いられてきたアクティブ電極を植物生体電位測定に応用し、微小生体電位の高感度測定が可能であることを示した。一方で、点滅光の周期を短くしてゆくとそれに誘引される電位応答も小さくなり観測が困難となり、アクティブ電極とアンプを導入したとしてもS/N比が大幅に低下してゆくことも明らかになった。

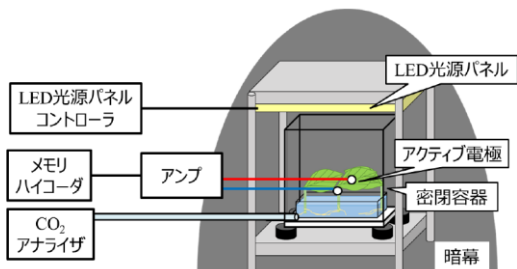


図1 作成した植物生体電位測定システム

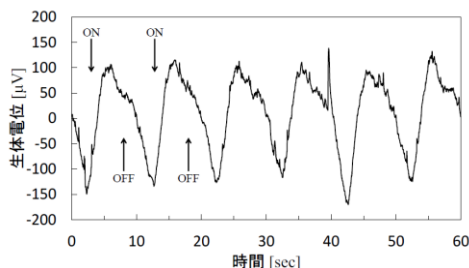


図2 測定した生体電位応答例

第二に、光合成速度評価のための最適な光刺激点滅周期の検討を行った結果について述べる。提案手法の原理からすると、点滅周期が光合成の反応時間である20msや200μsに近くなるほど、誘引された生体電位応答と光合成速度の相関が最も高くなることを予想していたが、最も光合成の評価性能が良かった点滅周期は10s～0.1s(0.1Hz～10Hz)の点滅周期であった。これは、点滅の高速化によるS/N比の低下に影響されていることと、植物生体電位応答のへ重畳する光合成以外の応答は時定数が遅く、上記の点滅周期であっても、点滅光に誘引された光合成反応に起因する生体電位応答のみを精度よく観測できることが明らかになったためである。

第三に、点滅光に誘引された生体電位応答と光合成速度の相関を検討した結果について述べる。植物生体電位応答の評価はFFTを用いて周波数解析を行い、点滅周波数に現れる植物生体電位のスペクトルピーク強度と光合成速度の相関を検討した。点滅LED光源は、様々な強さの赤青LED混合色を用いた。図3は点滅周期が0.1Hzの場合のスペクトル解析の結果、図4はその光合成速度との相関である。本検討の結果、植物生体電位のスペクトルピークと光合成速度の相関が強く見られ、相関係数は0.91となった。これより短い点滅周期では、光強度が弱い場合に十分なS/N比が得られない場合もあったため、様々な条件下で最もよい結果を得られたものは0.1Hzの点滅周期であった。この点滅周期では他の植物生理からの生体電位変動の重畳が避けられていないと考えられたため、点滅周期の倍の周波数に現れるスペクトルピーク強度を合算したもので検討を行った結果、光合成評価精度が向上する傾向も見られた。また、ニューラルネットワークを用いて温度条件などの補正を試みたところ、これも様々な温度条件を混合した実験環境下において光合成評価精度が向上する傾向が見られた。

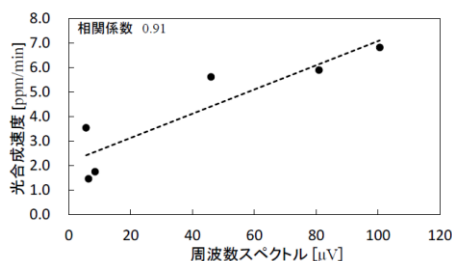
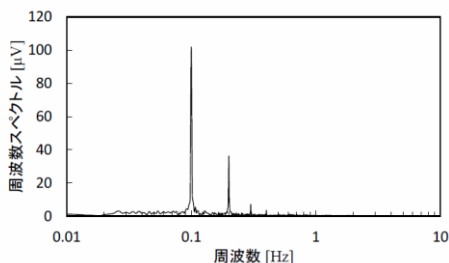


図3 生体電位応答のスペクトル解析例 図4 スペクトルピークと光合成速度の関係

点滅光は光合成を促進する効果が知られており、本提案手法での光合成の評価と栽培現場での栽培促進が両立可能であると結論付けられた。一方で、点滅光の波長条件を様々な組み合わせると植物の光受容体の応答感度の関係から相関が低下することも明らかになっており、より多岐にわたる栽培光環境下での精度向上が課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計2件）

1. 植物生体電位の光応答解析による光合成評価と果菜類のLED光栽培への応用, 2017年11月, アグリバイオ1(11), 北隆館, 安藤 毅, pp.91-95
2. 植物生体電位の光応答の解析と光合成評価の試み, 2017年1月, アグリバイオ1(1), 北隆館, 安藤 毅, pp.64-67

〔学会発表〕（計2件）

1. Applying neural network to photosynthesis evaluation using plant bioelectricity, 2017年3月, The 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, Ki Ando, Yuto Kimura, Hiroshi Igarashi, Yuki Hasegawa, Hiroyuki Shinoda, Nobuki Mutsukura
2. ニューラルネットワークによる植物生体電位を用いた光合成速度推定の精度改善, 2016年10月, 第33回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 25am2-PS-087, 安藤 毅, 長谷川 有貴, 五十嵐 洋, 篠田 宏之, 六倉 信喜

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。