

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：52101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450376

研究課題名(和文)形態形成に及ぼす花き植物の光環境対応力の研究

研究課題名(英文)Flowering plant morphogenesis response to photoenvironment

研究代表者

田辺 隆也 (TANABE, Takaya)

茨城工業高等専門学校・電気電子システム工学科・教授

研究者番号：70390408

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、発光波長の異なるLEDを用いて光の波長、照射時間および照射方法が植物の開花特性および花の品質に与える影響を測定・評価し、LED光による成長促進と、花き植物の花の色を濃くする方法を明らかにした。また、花き植物毎の形態形成を把握するために非接触で花き植物の状態を検出できる方法を明らかにするとともに、検出信号に対する新規な信号処理方法の開発を開発して、植物の状態を検出しながら、高品質な花き植物栽培を自動化する基礎技術を開発することができた。

研究成果の概要(英文)：This study, using LEDs emitting light of different wavelengths, measured and evaluated the influences of wavelength, light irradiation time, and irradiation method on flowering properties and flower quality. Also a method of growth stimulation was clarified using LED light and a method to enhance flower color. To assess flowering plant morphogenesis, the author explains methods for detecting the plant state. A new signal enhancement method using a convolution function is also proposed to emphasize the induction curve of the chlorophyll fluorescence. Results show that this study developed a basic technology providing an automated plant cultivation method for high-quality flower production.

研究分野：農業工学

キーワード：花き植物 蛍光特性 分光反射率 伝達関数 光環境

1. 研究開始当初の背景

農業の機械化およびハウス栽培の進展に伴い、閉空間による栽培が進展してきている。しかし、閉空間による植物栽培は、エネルギーの観点から、短期に効率よく栽培できる葉物野菜または収益性の良いトマトなどの野菜が中心に栽培されている。したがって、植物工場の対象としては野菜栽培等を中心として研究開発が行われている。一方、花き植物の栽培においては、害虫対策とした黄色光を点滅照射したものが研究・開発されている。また、緑色光を夜間に2時間程度照射すると、植物病害への防除効果、ハダニ抑圧効果、生育促進効果があると注目されてきている。さらに、花の栽培については夕方赤色灯照射による生長促進あるいはLED光による影響については詳細な研究がなされ始めている。

しかし、これらの研究においては特定の光を均一に照射するときの効果が主であり、LED光源の集光あるいは一部の期間だけ光を当てるなどの光を質と光強度とに分離した効果についてはほとんど検討されていない。したがって、品質の良い花を生産するための光の波長、集光方法に関する基礎的検討が不足していた。

2. 研究の目的

本研究では、特定の波長の光を必要な部分に必要な期間だけ照射して、高品質な花き植物栽培における光の利用効率向上を狙ったものである。まず、発光波長の異なるLEDを用いて光の波長、照射時間および照射方法が植物の開花特性および花の品質に与える影響を人工気象器およびフィールドで測定・評価する。同時に、植物の状態を非接触で測定する手法を明らかにして、それらの測定値と花の色艶、形との関係から、花き植物が持つ開花に対する光環境対応力を明らかにする。これらの解明した植物と光との相互関係を用いて、花の栽培に関する効率的な方法を導出することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 花き植物について、各色(赤色、青色、緑色、白色)LED光の照射時間および集光照射による影響を、照射強度を変えながら、花の形成特性から光環境対応力の分析を行う。まず、カーネーション、サルビアなどの花について、その開花特性を、測定分析するとともに、紫外線等の光を照射して、その蛍光特性から開花時の植物の状態を検出する。さらに、花の形、大きさ、色彩、観賞期間を分析し、花の品質の観点から評価を行う。

(2) 花き植物に光を集中して照射する発光装置の光学的、熱的設計を行い、試作を行って発光装置の設計法を確立し、人工環境器だけでなくハウス栽培にも適用できるようにする。

(3) 植物の状態検出のために植物の開花に関する各波長の光受容特性の伝達関数とその光環境対応力の基本特性を明らかにしたモデルを作成し、実験との比較により植物の開花時の特性を定量的に明確化する。

4. 研究成果

(1) 使用した人工気象器では、LED光の強度、LED光の色、LEDの点灯時間、気温を設定することが可能であるが、花き植物の栽培用としては、光強度が不足していた。そこで、表面実装型LEDと放熱性の良い絶縁性アルミ基板を組み合わせた光照射装置を製作した。また、抵抗による電圧降下を利用した定電流方式では電力ロスが大きいので、降圧回路を応用した定電流回路を用いてパルス幅変調(PWM)で光強度を変調する装置を実現し、省電力化を図った。これによって、花き植物栽培に必要な光量をローコストで確保できるようにした。

また、この回路を複数台並列に構成することで、ハウス栽培に適用できる光照射装置を実現した。ハウス栽培用の光照射装置では、光センサからの信号を基に制御コントローラに必要な光量を算出することで、曇り等による太陽光の光量不足分を自動的に補償する光照射を実現している。なお、タイマー機能との組み合わせにより、必要な時間のみに照射できる装置を開発でき、冬季期間におけるハウス栽培においも十分な光量を植物に照射できるシステムをローコストで実現できるようにした。

人工気象器を使用して、各色(赤色、青色、緑色、白色)LED光栽培でカーネーションを栽培すると、緑色LED光で栽培したカーネーションは赤色LED光、白色LED光で栽培したものより色づきが悪く、青色LED光で栽培したカーネーションは他の色のLED光で栽培したものより花の数が少なかった。花の数の変化を見てみても、青色LED光で栽培したカーネーションが、他の色のLED光で栽培したときよりも花の数が少ないという結果となった。また、シクラメンの栽培においては、赤色LED光で栽培したシクラメンは他の色のLED光で栽培したものより、花がまっすぐ上に伸びており、花の色も濃い結果となった。さらに、青色の花を付けるサルビアの花において、青色LED光、自然光で栽培したサルビアの花の方が、赤色LED光、緑色LED光で栽培したときより花の色が濃い結果となった。つまり、赤色LED光で花き植物を大きく育て、栽培光に花の色を含ませて花の色をより濃く鮮やかにできる可能性を明らかにすることができた。

(2) 植物の状態検出のためには、光による非接触測定が重要であり、新しい植物の状態検出方法を開発した。基本的な状態測定装置として、光を花き植物の葉に照射した時の蛍光特性から分析する装置を開発した。蛍光とは

植物の葉などに光を当てたときに、葉のクロロフィルが反応し発生する光のことである。開発した装置は、単一波長の複数種の LED（赤色、青色、緑色、紫外線（UV-LED））を蛍光発生光源として切り替えて使用することが出来る。プローブには入射光照射と反射光測定が1本で行える同軸プローブを使用し、簡単に測定できるようにした。

この装置を用いてシクラメンの生育光環境と蛍光特性の関係を測定した。赤色 LED 光を照射してシクラメンを生育する第 1 区と青色の LED 光を照射して生育する第 2 区とともに、シクラメンを自然光によって生育する第 3 区の 3 つの生育環境を用いて実験を行った。どの光源で栽培した場合でも 680nm 付近と 730nm 付近に蛍光のピークが現れている。また、3 つの生育光環境区により蛍光強度およびその分布が変化することが分かる。UV-LED 光と赤色 LED 光とで励起した蛍光波長(680nm)での蛍光強度の生育光環境別と生育する光波長を変化させた後 14 日後に測定した蛍光強度を比較した結果を図 1 に示す。生育光環境を変化させる前の蛍光強度分布が、生育光環境を変化させた後で反時計回りに変位していることが分かる。すなわち、UV-LED 光と赤色 LED 光とを励起光に用いた蛍光特性により、植物の生育光環境を知ることができ、植物がどのような光環境で生育されたのかが判別できることを明らかにした。

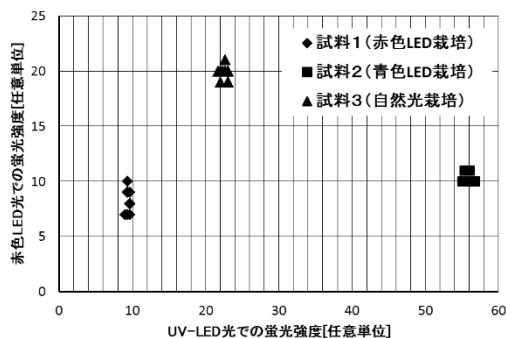


図 1 栽培環境による UV-LED 光と赤色 LED 光での蛍光強度の分布

(3) 暗処理をした葉に光を当てるとクロロフィル蛍光強度が時間的に変化する特性を示し、この蛍光強度の変化を時間的にプロットしたときに現れる曲線をインダクション蛍光特性と呼ぶ。インダクション蛍光特性は葉の光合成状態などの影響を受けるため、植物の状態を知ることが可能である。しかし、クロロフィル蛍光のインダクション特性は変化が微小であり、様々な影響が絡んでいるため複雑である。そこで、伝達関数を用いて蛍光特性を簡易的に近似し、相互相関関数によって蛍光特性の変化を検出しやすくなることができた。蛍光の伝達関数モデルの第 1

項は入射光に比例する蛍光、第 2 項は入射光を吸収するプラストキノン等の変化に比例する蛍光、第 3 項はチラコイド膜内での変化に比例する蛍光を表している。インパルス光を入力し、これら 3 つの項を足し合わせることでインダクション蛍光特性を関数近似した。しかし、植物の状態検出に重要な第 3 項は振幅が小さく、その特性を検出することが難しいため、相互相関関数を用いて信号処理的に増幅することを実現した。

実験では、赤色 LED 光、青色 LED 光、混色光[赤:青=9:1]の LED 光を照射して育成したペチュニアを試料として用いた。図 2 に示すように、どの生育環境においても蛍光の第 3 項が 10 倍以上に強調されていることがわかり、蛍光検出のための信号処理方法を開発することが出来た。

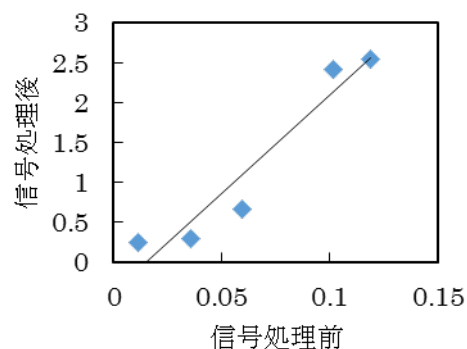


図 2 相互相関関数による第 3 項の強調

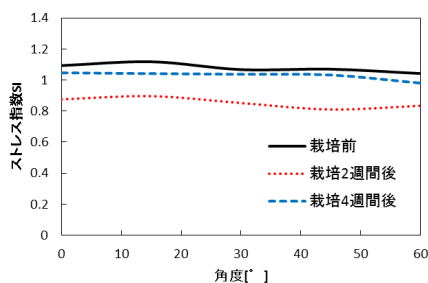
(4) 植物の基本状態であるストレスを検出するための分光反射測定装置の開発を行った。製作した反射光測定系では、ハロゲンランプを光源とし、光ファイバから集光レンズを通しサンプルに光を照射する。そして反射光をレンズによって集光し、光ファイバを通して分光器に導き、波長成分に分ける。測定結果は、PC にスペクトラムデータとして保存した。入射光と反射光の角度を調節する回転機構を同一軸を回転中心として二つ搭載し、入射角の入射角度と反射光の測定角度を変更できるようにした。

葉の分光反射率の測定にはペチュニアを使用した。評価方法として、葉の分光反射率から算出されるクロロフィル量 ND705 およびストレス指数 SI の分析を行った。反射光測定装置で測定したペチュニアの葉の分光反射率から、波長が 550nm 付近と 680nm 以上で反射率が上昇していることが分かる。また、測定角が大きくなると反射率が低下していることが分かる。これらことから、ペチュニアの葉では鏡面反射成分が見られず、散乱反射光が支配的といえる。

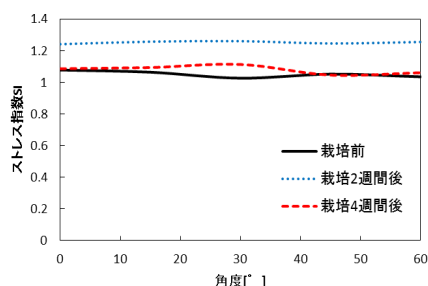
赤色 LED 光で 2 週間栽培するといずれの測定角でも ND705 が上昇し、その後に青色 LED 光で 2 週間栽培すると初期の ND705 に戻ることが分かる。最初に青色 LED 光で 2 週間栽培すると ND705 が少し減少し、その

後に赤色 LED 光で2週間栽培すると初期の ND705 に戻ることが分かる。栽培環境が赤色 LED 光の場合はクロロフィル濃度指数が上昇し、青色 LED 光の場合はクロロフィル濃度指数が少し減少する結果となった。これは赤色 LED 光で栽培した方が、活発に光合成が行われ、クロロフィルが活性化したことが原因と考えられる。

ストレス指数 SI の栽培前と栽培2週間後、栽培環境を入れ替えた4週間後の変化を測定した結果を図3に示す。図3(a)が2週間赤色 LED 光で栽培し、その後青色 LED 光に変えた場合であり、図3(b)が2週間青色 LED 光で栽培し、その後赤色 LED 光に変えた場合である。ストレス指数 SI から赤色 LED 光で栽培したときは、ストレスが減少し、青色 LED 光で栽培したときはストレスが増加する傾向が見られた。測定角による違いは小さく安定した特性となっている。クロロフィル濃度指数では、測定角によりばらつきが発生しているが、ストレス指数では誤差が小さいことがわかる。すなわち、測定角による誤差は、クロロフィル濃度指数に比べストレス指数の方が小さいと言える。



(a) 2週間赤色 LED 光で栽培し、その後青色 LED 光に変えた場合



(b) 2週間青色 LED 光で栽培し、その後赤色 LED 光に変えた場合

図3 栽培に使用した LED 光によるストレス指数 SI の変化

これらの測定から、赤色 LED 光の場合クロロフィル濃度は増加し、ストレスが軽減する傾向があり、青色 LED 光の場合クロロフィル濃度は減少し、ストレスが増加する傾向が見られた。また、分光反射による成長特性

の分析はクロロフィル濃度指数 ND705 よりストレス指数 SI の方がパラメータの変化が顕著であり、よりストレス測定に適していることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計10件)

向井勇人, 岡島慶弥, 田辺隆也, 植物用環境制御装置の製作と評価、電気学会茨城支所研究発表会、2015年11月28日(日立市、茨城県)

檜山剛士, 田辺隆也、分光反射特性による植物のストレス分析、電気学会茨城支所研究発表会、2015年11月28日(日立市、茨城県)

T. Tanabe, T. Tsunoda, T. Hiyama, and M. Fukuda, Slow phase signal enhancement method using convolution for chlorophyll fluorescence, International Conference Photosynthesis Research for Sustainability, 2015年9月22日(ハニア、ギリシャ)

檜山剛士, 田辺隆也、花き植物の分光反射特性の分析、日本生物環境工学会、2015年9月9日(宮崎市、宮城県)

檜山剛士, 岡島慶弥, 角田智寛, 田辺隆也、人工気象器のLED光および温湿度制御法、電気学会茨城支所研究発表会、2014年11月22日(日立市、茨城県)

角田智寛, 檜山剛士, 田辺隆也, 福田光男、伝達関数を用いた蛍光特性の簡易近似法、電気学会茨城支所研究発表会、2014年11月22日(日立市、茨城県)

角田智寛, 檜山剛士, 田辺隆也, 福田光男、相関関数を用いた植物の蛍光特性の分析、日本生物環境工学会、2014年9月11日(明治大学、東京都)

檜山剛士, 角田智寛, 田辺隆也, 福田光男、カーネーションの栽培環境と蛍光特性との関連性分析、電気学会茨城支所研究発表会、2013年11月24日(日立市、茨城県)

角田智寛, 檜山剛士, 田辺隆也, 福田光男、LED光による可変励起波長を利用した小型蛍光測定装置の開発、電気学会茨城支所研究発表会、2013年11月24日(日立市、茨城県)

角田智寛, 笹島良太, 田辺隆也, 福田光男、生育光環境がシクラメンの蛍光特性に及ぼす影響、日本生物環境工学会、2013年9月5日(香川大学、香川県)

6. 研究組織

(1)研究代表者

田辺 隆也 (TANABE, Takaya)

茨城工業高等専門学校・電気電子システム工学科・教授

研究者番号： 70390408