

〈ノート〉

LED 光下における植物生体電位と空気浄化特性

柴田 慎一¹⁾, 邵 麗新²⁾, 木村 春彦¹⁾, 大藪 多可志²⁾¹⁾ 金沢大学大学院 自然科学研究科

(〒 920-1192 金沢市角間町 E-mail: shin-ichi_shibata@blitz.ec.t.kanazawa-u.ac.jp)

²⁾ 金沢星稜大学大学院 経営戦略研究科 (〒 920-8620 金沢市御所町 E-mail: oyabu@seiryu-u.ac.jp)

概 要

生育環境を制御し人工的に収穫を管理する植物工場が実用化されつつある。植物工場は閉鎖空間で生育環境を制御するため、農薬が不要であり計画的に栽培が可能である。安全安心な食料生産が可能であるが、効率的な生産方法は確立されていない。植物から直接生育に関する生理・環境情報を抽出し評価可能となれば生育環境維持に貢献が期待される。植物の生育には光が重要であり周波数により成長・生産量に差異が生じる。本研究では、基礎実験として植物の生体電位応答と空気浄化特性を内部情報として捉え、植物工場で使用されている LED 光下での実験を執り行った。

キーワード：センサ, 生体電位, 空気浄化特性, 植物工場, 発光ダイオード

原稿受付 2010.9.14 原稿受理 2011.1.11

EICA: 15(4) 65-71

1. はじめに

近年、人口増加や気候変動に伴う環境問題や食の安全に関する意識が高まってきている。環境問題と食の安全・自給率向上に植物工場が注目され、企業・研究機関が参入している。植物工場は、光、温度、二酸化炭素などの生育環境を制御し人工的に収穫の時期や生産量を制御が可能である。完全閉鎖環境で制御する植物工場では農薬がほとんど不要となり、安全・安心な生産が可能となる。従来、植物の生育評価として成長状態の観察や乾物量、二酸化炭素濃度測定が挙げられる^{1,2)}。実際の植物工場では3Dカメラによる生育モニタリングが行われているところもある。一方、植物は環境や成長に伴い多くの情報を発している³⁾。その情報の一つに生体電位がある。生体電位は細胞のイオン濃度の変化により発生し、そのイオン濃度は植物の生理活動を反映していると考えられる⁴⁻⁷⁾。植物自身が発する生体電位情報から、直接生育に関する生理・環境情報を抽出できれば、将来的に最適な生育環境を制御することができ収穫管理に大きな貢献ができると考えられる。光は葉菜や果菜植物の生育に重要な役割を果たしている。照射する光量や周波数により成長部位や収穫時期を細かく制御することができる。

生体電位とは様々な環境要因に応じて植物内部で発生する電気信号のことである。周囲の環境要因(光、温度、湿度、気圧 etc)により生体電位が変化することが明らかとなっている⁴⁻⁷⁾。光は植物にとって重要な環境要因の一つである。例えば、光環境下では照度が高くなるにつれ電位応答も高くなる。その傾向として

シグモイド関数により近似でき光合成曲線と同じ傾向が確認されている⁵⁾。また、Blue, Green, Red の LED 光下における植物細胞膜電位の応答が照射する波長によりそれぞれ異なることも報告されている⁶⁾。環境要因や成長過程と生体電位との関係を明らかにできれば、植物が自ら発する生体電位を介してモニタリングが可能と考えられる。それにより生育環境への応用の可能性が考えられる。本報告は、その前段階として生育管理の容易なポトスを用いて異なる波長の LED 光下における生体電位の関連を調べた。また、植物浄化機能の基礎実験として LED 光下における空気汚染物の浄化能力についても調べた。本研究では以下の2種類の実験を行った。

(1) LED 光下での生体電位特性

(2) LED 光下での空気浄化特性

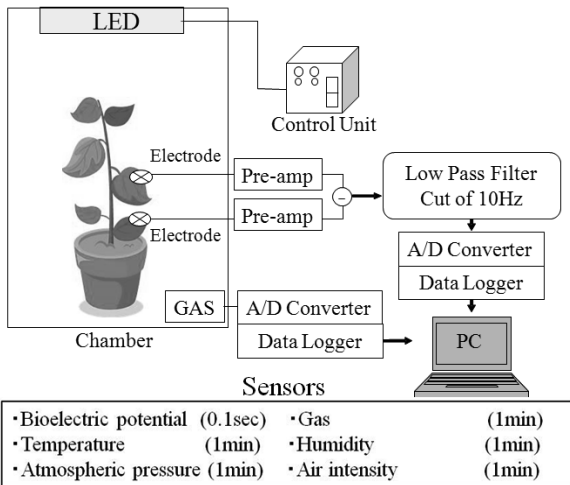
上記の2つ実験は毎回15時にセットし翌日9時まで生体電位を測定し環境要因との関連を調べた。各測定項目に対して同じ実験を3回以上行った。

2. 生体電位の測定条件

被験植物として生育管理が容易なポトス (pothos, 学名 *Epipremnum aureum*) を用いた。ポトスは、長期間にわたり生育が安定し温度など生育範囲も幅があり実験が執り行い易い被検体である。ポトスは、内径10 cm、高さ14 cmの鉢に生育しており、鉢底からの高さは約56 cmある。ポトス鉢をアクリル製チャンバー (575×510×1000 mm: 約300 liters) 内に設置し、LED光下における生体電位を計測した。実験シ



(a) Photograph of experimental system.



(b) Schematic diagram of the system.

Fig. 1 Experimental system

システムの写真と概略図を Fig. 1 に示す。計測システムとして LED パネル (ISL-150×150)、コントロールユニット (ISC-201-2)、環境要因計測センサ、生体電位計測電極、A/D コンバータ、コンピュータから構成されている。4 種類の LED パネル (Blue: 475 nm, Green: 525 nm, Red: 660 nm, White) を使用した。各 LED パネルの仕様を Table 1 に示す。センサとして生体電位センサ、空気汚染物計測のための酸化スズ系ガスセンサ (Figaro 社製, TGS#800)、温度・湿度・気圧センサ (T&D, TR-73U)、光センサ (T&D, PHR-51) を用いた。チャンバー内は外部からの光は

Table 1 Specification of LED panels

	μE	lux	w/m^2	nm
W	100	2835	23	
B	100	929	18	475
G	100	4755	21	525
R	100	394	25	660

Measured distance: 100 mm

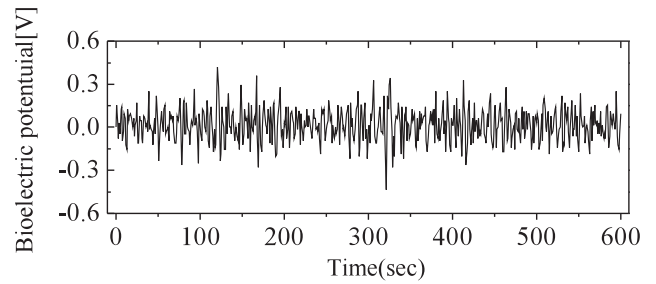


Fig. 2 Original characteristic of bioelectric potential for pothos

遮断されている。各センサのサンプリング時間は、生体電位が 0.1 sec, 他は 1 min である。生体電位は、隣り合う葉面に導電性電極 (材質: アルミニウム) を取り付け A/D 変換器, データロガーを介してパソコンに取り込んでいる。生体電位は数 mV と微弱なため OP アンプにより 100 倍に増幅している。なお、本システムでは植物鉢の土壌をアースとしている。1 分間の生体電位のオリジナルデータを Fig. 2 に示す。生体電位は時々刻々と変化しており環境要因との関連を導出することは困難である。そのため本研究では、1 時間に測定した生体電位の絶対値の総和値 v_{hl} を代表値に採用した。総和の導出式を(1)式に示す。

$$v_{hl} = \sum_{i=1}^N |S_i| \quad (1)$$

ここで、 S_i はサンプリングされた生体電位である。本研究では 1 時間毎の総和値を用いるので $N=36,000$ となる。これにより環境要因に対する生体電位の応答を 1 時間単位で把握できる。

3. LED 光下での生体電位特性

3.1 波長における生体電位の遅れ

LED パネルにより, Red, Green, Blue, White の中から任意の光を選択し植物に照射できる。光合成により, 全ての植物は様々な部位を形成し成長している²⁾。恒常的な状態(明期, 暗期)と異なるタイミングで光を照射することにより植物の概日リズム (Circadian rhythm) が狂い生理特性に時間差が生じることが予想される。また光合成速度にも日長時間が大きく関係している。以上のことから, 照射光の波長により概日リズムに変化が生じ, 生体電位応答に関しても時間差が生じると考えられる。

本実験では, まずコントロールとして暗黒下である Dark における生体電位を計測し, 各 LED 光下における生体電位を連続計測した。測定した Red 光下時の v_{hl-Red} と Dark 時の $v_{hl-Dark}$ を Fig. 3 に示す。生体電位の傾向が似ていることが認められた。この特性において, コントロールの $v_{hl-Dark}$ に対し各 LED 光下の

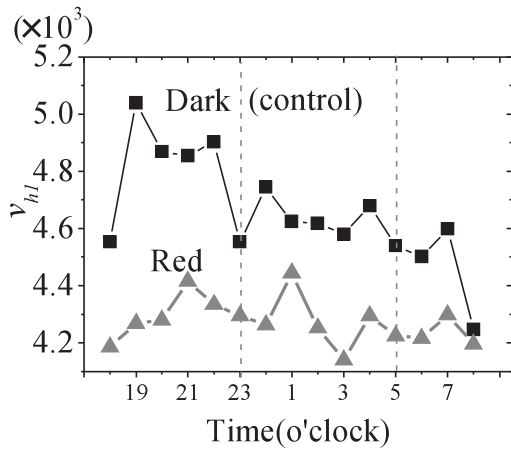


Fig. 3 Bioelectric characteristic (v_{hl}) in Red LED and under darkness

v_{hl} (White, Blue, Green, Red) を1時間単位で進め、それぞれの相互相関係数 (R_{xy} : Cross Correlation Function) を求めた。相互相関係数 (R_{xy}) とは2つの信号 $\{x(n), y(n)\}$ の類似性や時間差を表す際に使用される手法である。その導出式を(2)式に示す。また、 $R_{xy}=|1|$ の時に、最も類似性が高く、0に近づくほど低くなる。

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-k} x(n) \cdot y(n+k) \quad (2)$$

$\{n = 0, 1, 2, \dots, N-1\}$

(n : データ数, k : ずらしの時間)

各相互相関係数 (R_{xy}) を求めた結果、コントロール ($v_{hl-Dark}$) に対して3時間進めた Red 光照射時の $v_{hl-Redshifted3}$ との値が最も高くなることが認められた。このときの散布図を Fig. 4 に示す。コントロール ($v_{hl-Dark}$) に3時間の遅れがあると考えられる。同様に Blue, Green の R_{xy} を求めた。横軸に波長, 縦軸に v_{hl-LED} との相互相関係数の最大値を求め、まとめたものを Fig. 5 に示す。コントロール ($v_{hl-Dark}$) を進めると

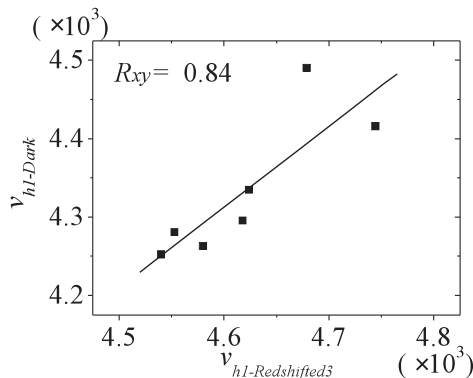


Fig. 4 Scattering Diagram ($v_{hlDark} - v_{hlRedshifted3}$) for the shifted characteristic for 3 hours in red light and the control characteristic

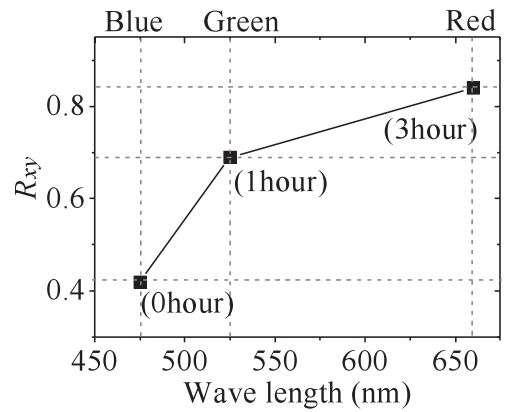
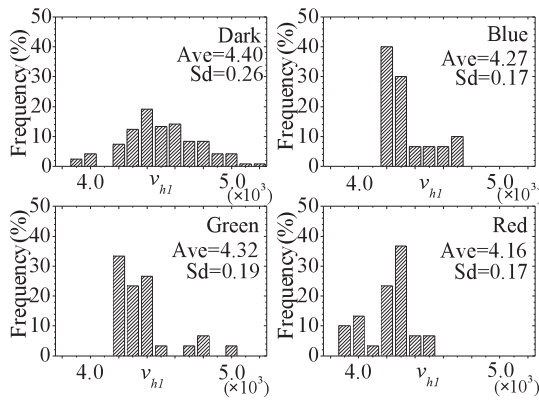
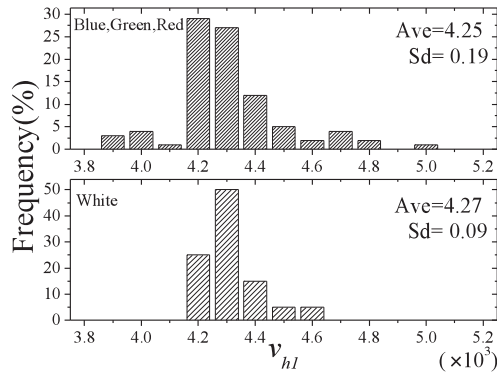


Fig. 5 Illuminated light frequency and the maximum cross correlation function

係数が高くなることが認められた。つまり、暗黒化にすることにより生体電位の概日リズムに遅れが生じている。Fig. 5 より、波長が長い光に対してコントロール ($v_{hl-Dark}$) 時の生体電位が遅れることが確認できた。

3.2 波長と生体電位の関係

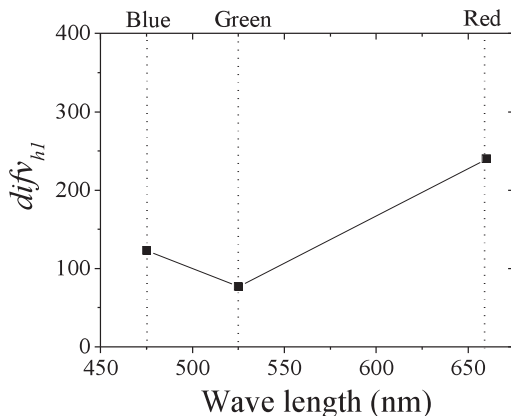
次に、コントロール ($v_{hl-Dark}$) だけでなく照射波長ごとの生体電位 (v_{hl-LED}) の変動を調べ比較した。このとき、対照特性であるコントロール ($v_{hl-Dark}$) と Red, Green, Blue の各 LED 光下の生体電位のヒストグラムを求めた。生体電位 (v_{hl}) の平均値による比較を行うとコントロール ($v_{hl-Dark}$) が最も高い。これは、光合成を行う植物にとって暗黒下は、糖などの光合成産物である供給物質が絶たれ、呼吸によって貯蔵物質の消費というエネルギーストレス状況下と考えられる⁸⁾。この各 LED 光下の v_{hl-LED} ヒストグラムを Fig. 6(a) に示す。コントロール ($v_{hl-Dark}$) のヒストグラムに対して Shapiro-Wilk の正規性の検定を行った。この検定は、データが正規分布に従うことを仮定した検定である。結果として 95% 水準で正規分布に従うと判明した。コントロール ($v_{hl-Dark}$) のデータは比較検証のため数多く測定した。各波長光下のヒストグラムは正規分布を構成していないが、今後多くの実験を行い確認する必要がある。生体電位 (v_{hl}) の平均 (Ave) としては、Green が最も高く、続いて Blue となっている。Red が最も小さいことが確認できた。生体電位の大小がストレスと関連しているかは明確ではないが、これらの結果を踏まえさらに調査をすること、具体的には必須栄養素 (多量・微量栄養素) や CO_2 欠乏状況下での実験を行うことにより生体電位とストレスの関係も明らかとなるものと考えられる。一般に、太陽光は様々な波長帯域の光を含んでいる。本研究で用いた White 光の LED パネルが太陽光に近く波長帯域が広い。この White 光と Blue, Green, Red 光のデータをまとめヒストグラムで表したグラフを Fig. 6(b) に

(a) Histograms of v_{h1} for Dark, Blue, Green and Red.

(b) Histograms for three lights and white.

Fig. 6 Histograms of v_{h1} for each LED panel

示す。平均 (Ave, 単位: 10^3 [V]) が, 4.27 (White) と 4.25 (Blue, Green, Red) であり, 同程度であった。**Fig. 6(a)**において, コントロール (Dark) を基準として, 各照射光に対する生体電位の平均値の差 ($difv_{h1}$) を求めプロットすると **Fig. 7** のようになる。 $difv_{h1}$ を式で示すと(3)式となる。図から明らかなように, Red 光に対する差が大きく, 暗黒下時に比べて生体電位が小さくなる。赤色光は光合成に最も貢献する光でもある。光合成は, 赤色光と青色光の割合が 10 対 1 の場合に最も光合成反応が高くなる^{9,10}。すなわち, **Fig. 6(a)**でも示したように暗黒下や緑色光の場

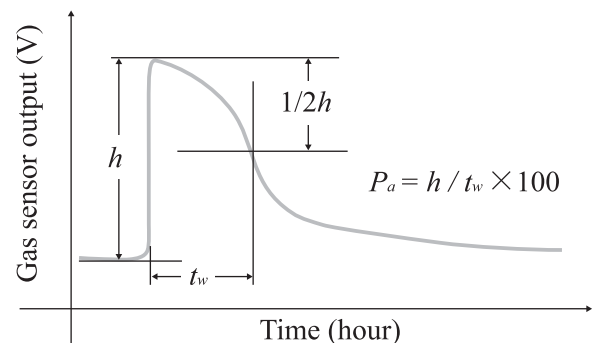
**Fig. 7** Relationship of light frequency and $difv_{h1}$

合は生体電位が高い。

$$difv_{h1} = \text{ave}(v_{h1-Dark}) - \text{ave}(v_{h1}) \quad (3)$$

4. 空気浄化の測定条件

ポトスなどの観葉植物は, 空気汚染物を吸着し生体組織内部で分解する能力を有している¹¹。特に室内では, シックハウス症候群の原因物質である揮発性有機化合物 (VOCs: Volatile Organic Compounds) を浄化する能力を有している¹¹。もちろん, 地球温暖化原因物質である二酸化炭素の植物組織内固定などは周知の事実である。これらの機能は光合成を介して植物内部にて行われる。照射される波長毎に植物の様々な機能あるいは成長に差が生じると考えられる。例えば, ホルムアルデヒドなどの毒性物質を無毒化し光合成によりエネルギーに変換し取り込んでいることが挙げられる¹¹。本実験では汚染物の浄化能力の評価の基礎実験として, 毒性が低く, 取り扱いの容易なエチルアルコール (Ethyl alcohol) を試料として用い実験を行った。前項の実験チャンバーの内に被験植物を設置後, エチルアルコールを注入しその濃度変化を調べる¹²。マイクロシリンジによりチャンバー内の濃度が 8 ppm (Ethyl alcohol: $6 \mu\text{l}$) になるよう注入し, 酸化スズ系ガスセンサの出力により浄化能力を評価した。汚染物注入前 3 時間をオフセットレベル (Offset level) として濃度変化の基準とした。汚染物質が注入されると, チャンバー内に拡散し濃度が均一になる。このとき, 濃度に応じてセンサ出力 (V) が上昇する。センサ出力がピーク値 (最高濃度) に達し, 植物の空気浄化能力によりセンサ出力値は減少する。最終的には汚染物質注入時のオフセットレベルまで低下する。このとき, オフセットレベルからピーク値の高さを h (V) とし, その値が半値になるまでの時間 (半値幅 t_w) を用いて空気浄化能力 P_a を規定した。すなわち, (4)式により P_a を示す。この P_a の概念図を **Fig. 8** に示す。また, ガスセンサの出力はガスの漏えいや土壌への吸着

**Fig. 8** Conceptual diagram for air purification capability P_a of plant

等の影響があると考えられる。本実験と同環境の対照実験では幾分ガスの漏えいや土壌吸着が確認されたが実験結果にほとんど影響がないものであった¹¹⁾。

$$P_a = h/t_w \times 100 \quad (4)$$

5. LED 光下での空気浄化特性

5.1 照射波長と空気浄化能力 P_a の関係

本実験では各照射波長による植物の浄化能力の影響を調べた。4種類の波長と暗黒下における浄化能力 P_a の値を Fig. 9 に示す。図から様々な波長成分を含む White 光が平均 15.8 と最も浄化が高く、暗黒下 (Dark) での能力が平均 9.9 と最も低いことが確認できた。これは、光がない状況下では光合成も行われず浄化作用も低下するためと考えられる。すなわち、汚染物質中の炭素成分の取り込みが低下すると同時に植物の持つ様々な機能も低下する。Red, Blue は White に次いで高い。3つの単色光下の中で Green は最も低い値を示した。Red, Blue, Green 光照射時の浄化能力が White と Dark の間に位置している。この浄化特性は光合成に有効な波長と一致する結果となった^{13,14)}。Fig. 7 と Fig. 9 の特性は酷似しており、“V” 字特性

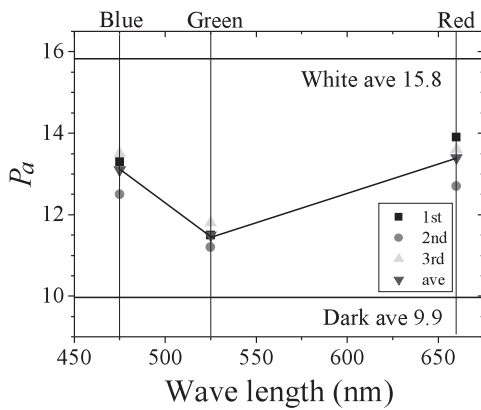


Fig. 9 P_a as a function of illuminating light

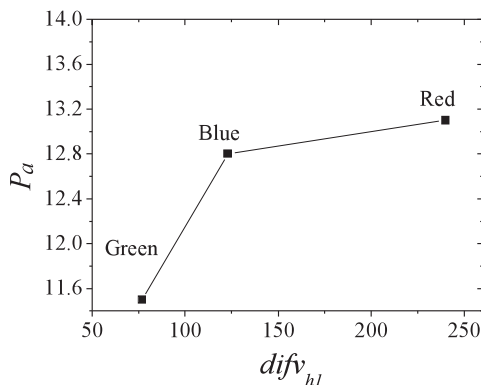


Fig. 10 P_a as a function of $difu_{h1}$

を示している。つまり、光合成に有効波長である Blue, Red 光下での $difu_{h1}$ と P_a は高い。Fig. 7 と Fig. 9 の対応するプロットの散布図を求めると Fig. 10 のようになる。光合成に有効な波長ほど空気浄化能力 P_a が高くなる。すなわち、生体電位差 $difu_{h1}$ が大きくなるほど空気浄化能力 P_a が高くなる。この結果から光合成機能との密接な関連性があると考えられる。光合成により植物は呼吸し体内で糖を生成し成長している。成長は浄化能力とも密接な関連があると考えられる。

5.2 重回帰分析による P_a の導出

植物工場などにおいて、植物の成長や収穫時期、収穫量を制御する必要がある。そのためには、最適な生育環境を把握或いは予測することが必要不可欠となる。本研究で行った実験データから環境要因を説明変数として浄化能力 P_a を求める重回帰式を導出した。波長ごとの P_a に与える度合いを統計的な検証から求めた。説明変数として、光の種類 (定性データ: 全て 0 時は Dark 状況下を指す)、温度、湿度、気圧の各平均値を用いた。求めた重回帰式を式(5)に示す。

$$y = 4.769W_{hite} + 2.960B_{lue} + 2.164R_{ed} + 0.783G_{reen} + 0.242T_{emp} - 0.022H_{umid} + 0.002A_{toms} + 4.446 \quad (5)$$

各説明変数に対する係数は White が最も大きく、次いで Blue, Red となっている。この3変数に関して、仮説検定を行うと White は 1% 水準、Blue, Red は 5% 水準で有意との結果であった。すなわち、この3つの光は浄化能力 P_a に大きな影響があるといえる。この結果より、所望する浄化能力を環境条件 (光の種類、温度、湿度、気圧) の制御による設定の可能性が考えられる。ただし、本実験は温度や湿度などを制御して行ったものではなく温度に対する係数が非常に小さいといえる。今後は、全ての環境要因を変えて実験を行い分析する必要がある。(4)式を用いて導出した浄化能力 P_a と実験から求めた浄化能力 P_a' との散布図を Fig. 11 に示す。その相関係数は 0.89 で非常に良い一

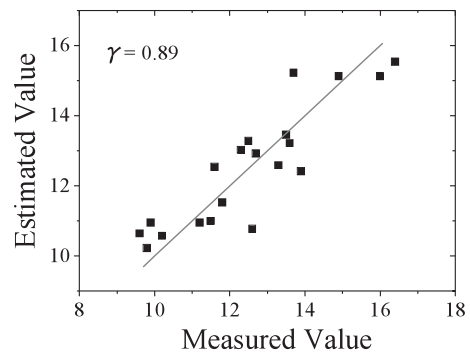


Fig. 11 Scattering diagram for P_a and P_a'

致が得られた。

6. ま と め

人口増加や環境問題に伴い食料問題が喫緊な課題となりつつある。植物工場がこれらの問題の解決の糸口となる可能性を秘めている。近年の新しい植物生育評価法として3Dカメラなど画像処理技術を応用した工学的なアプローチが多く研究されてきている。本研究では、植物の生理・環境応答の情報として内部情報である生体電位と空気浄化特性に着目した。将来、本研究で対象とした生体電位などの植物内部からの情報を基に生育評価してモニタリングそして管理することができれば、より正確な生育評価の可能性が考えられる。

本研究では、その基礎実験の一部として捉え、各波長光と生体電位そして空気汚染物浄化特性について調べた。結果として光合成有効光波長である Red, Blue 光下では $difu_{hl}$ と P_a 特性が高いことが明らかとなった。特に、植物の生育に単色光条件では最も効果が高いとされている Red 光下時の上記両特性が最も高かった。本研究で空気汚染物浄化特性は、植物の浄化能力の基礎実験として行ったものである。結果として、光合成に密接に関連する波長下で生体電位、空気浄化特性応答に特徴量の有無を確認できた。浄化特性に関しては光合成に寄与している光下では高い浄化指数が明らかとなった。

今後は、温度や湿度、間欠的光照射などの環境を変化させた状況下での実験をし、実際に植物工場で栽培されている植物（作物）を被験体とした実験を執り行っていく予定である。また、他の生育評価指標としてクロロフィル蛍光量との比較実験を行い、生体電位と比較検証する。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、埼玉大学大学院理工学研究科長谷川有貴氏に有意義な議論と示唆を頂いた。また、金沢星稜大学経済学部隅田和人氏には統計処理のご意見を頂いた。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 高辻正基：植物工場，講談社（1979）
- 2) 高辻正基：植物工場の基礎と実際，裳華房（2007）
- 3) 三輪敬之：情報システムとしての植物，日本機械学会誌，Vol. 90, No. 818, pp. 76-82（1987）
- 4) C. Backster：Primary Perception, White Rose Millennium Press, California（2003）
- 5) 新保達也，藤井正基，沢田史子，大藪多可志，木村春彦：光量変化に対する生体電位応答，電学論 E, 127-10（2007）
- 6) Ki Ando, Yuki Hasegawa, Hitoshi Maekawa and Teruaki Katsube：Analyzing Bioelectric Potential Response of Plants Related to Photosynthesis under Blinking Irradiation, IEICE TRANS. ELECTRON., Vol. E91-C, No. 12, pp. 1905-1909（2008）
- 7) 高橋末帆，前田譲治：植物葉表面の電位差変動と変色との関係，電子情報通信学会論文誌，Vol. J83-D-II, No. 9, pp. 1946-1951（2000）
- 8) Elena Baena-Gonzalez, Filip Rolland, Johan M. Thevelein and Jen Sheen：A central integrator of transcription networks in plant stress and energy signaling, Nature, Vol. 448, No. 7156, pp. 938-942（2007）
- 9) 高辻正基：完全制御型植物工場，オーム社（2007）
- 10) 高辻正基：完全制御型植物工場の現状，植物環境工学，Vol. 22, No. 1, pp. 2-7（2010）
- 11) 谷 真拓，沢田史子，上島浩二，野上耕作，大藪多可志：ポトス生育環境によるガス状空気汚染物浄化特性，EICA, Vol. 12, No. 1, pp. 29-34（2007）
- 12) K. Baosheng, S. Shibata, A. Sawada, T. Oyabu and H. Kimura：Air Purification Capability of Potted *Phoenix Roebelenii* and Its Installation Effect in Indoor Space, Sensors and Materials, Vol. 21, No. 8, pp. 445-455（2009）
- 13) 大藪多可志，勝部照明：植物生体電位とコミュニケーション，海文堂（2009）
- 14) F. Baluska, S. Mancuso and D. Volkman (Eds.)：Communication in Plants：Neuronal Aspects of Plant Life, Springer, pp. 291-320, 333-349（2006）

Characteristics of Plant Bioelectric Potential and Purification Function under LED Light

Shin-ichi Shibata^{1)†}, Lixin Shao²⁾, Haruhiko Kimura¹⁾ and Takashi Oyabu²⁾

¹⁾ Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University

²⁾ Graduate School of Strategic Management, Kanazawa Seiryō University

† Correspondence should be addressed to Shin-ichi Shibata :

(Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University

E-mail : shin-ichi_shibata@blitz.ec.t.kanazawa-u.ac.jp)

Abstract

Recently, plant factory has been establishing and takes off in world wide countries. In the plant factory, the growing environment can be controlled and the crop can also be controlled. The products are growing in an enclosed environment, therefore agricultural chemicals has no use. Secure and safe food producing system can be constructed. However, efficient production formula for the plant (for example vegetable) is not defined well. It is an effective way to control the growing environmental factors using physiology information which are directly obtained from the vegetable. Light plays a key role in plant growth. There is a difference in the amount of production due to light frequency. In this study, plant bioelectric potential and purification capability were examined under LED light which is used in plant factory as an environmental response. In future, plant physiological function and environmental response can be understood by directly monitoring the bioelectric potential.

Key words : sensor, bioelectric potential, air purification, plant factory, LED