

LED 光下におけるナスの生体電位とエチルアルコール浄化能力

大藪 多可志 (国際ビジネス学院, oyabu24@gmail.com)

梶原 祐輔 (立命館大学 情報理工学部, kajiwara@de.is.ritsumeikan.ac.jp)

河内 雅典 (金沢機工株式会社, kh358days_2@yahoo.co.jp)

木村 春彦 (金沢大学 大学院自然科学研究科, kimura@ec.t.kanazawa-u.ac.jp)

Bioelectric potential of egg-plant and its purification capability to ethyl alcohol under LED light

Takashi Oyabu (Kokusai Business Gakuin College, Japan)

Yusuke Kajiwara (College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University, Japan)

Masanori Kawauchi (Kanazawa Kiko Co. Ltd, Japan)

Haruhiko Kimura (Graduate school of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Japan)

要約

植物生体電位は植物から発信される有力な情報といえる。この生体電位と環境要因や成長率などとの関係が明らかになれば応用範囲が広く人間社会に大きな貢献となる。特に野菜工場へ応用することができれば生産管理にも応用でき、高効率で安全・安心な野菜生産が可能となる。本研究においては、野菜工場における主環境要因の一つである照射光周波数と生体電位との関係を調べた。養分としてガス状エチルアルコールを採用し、その雰囲気に対する浄化能力について調べた。被験植物は代表的な果菜類であるナスを採用した。結果として、様々な周波数の混合光である白色光下における生体電位が大きく浄化能力も高いことが明らかとなった。本実験の浄化能力は、ナスの当該ガスの摂取・分解能と考えられる。酸化スズ系ガスセンサを用いて実験容器内の濃度変化を調べることで被験植物の浄化能力特性を導出した。ガスセンサ出力が、ナスのエチルアルコール吸収・分解とともに濃度が減少する。その特性のピーク値を半値幅で除することにより浄化能力を導出した。

キーワード

野菜, 生体電位, 浄化能力, LED光, 植物工場

1. はじめに

日本の食料自給率は、カロリーベースで約40%、生産額ベースで約70%と報告されている(農林水産省, 2014)。最近では、一つの指標として食料自給力も用いられつつある。これらの値は、先進諸国の中でも著しく低く、食の安全・安心を目指し向上させることが急務といわれている。特に、地方における耕作放棄地の活用や植物工場の積極的な運用が求められる(Dyer and Jones, 2010)。東北地方においては、東日本大震災により広範囲な放射能汚染に見舞われ、長期に亘り農産物の出荷が不可能な状況にある。この解決策の一つとして植物工場が有力視されている(高辻, 2007)。植物工場においては、外界からの影響(放射能、温湿度、細菌etc.)を遮断し安全・安心な野菜を産出することができる。また、季節に影響されることなく高効率生産が可能であり、状況に応じて出荷時期や量を需要に合わせて決定することもできる。日本のものづくりのノウハウを応用し高効率生産の可能性がある。効率的生産を達成するには、環境要因を制御するとともに植物自身から発せられる信号を検知し、植物の状態を把握し育成要因にフィードバックするシステムが必要である。これまでは、植物から発せられる情報として、野菜などの色や艶などの視覚的情報が主であった。この他に電気的情報として生体電位がある。植物生体電位は、植物細胞内でイオン濃度差が生じることにより発生する。人間の心電図と相対するものであり、生育環境や生理的条件により変化する(杉, 2006)。

将来、植物生体電位を用いて植物成長度などを数値で示

し、水不足や病気などの異常状態検知に応用できると考えられる。これまで植物からの情報を取り扱うものとしてSPA (Speaking Plant Approach) 技術がある(日本学術会議農業情報システム学分科会, 2011)。これは、先に述べた視覚情報であり、画像により植物の健康状態などを判断するものである。生体電位を用いて生育野菜の状態(生理、成長、健康)を把握することができれば、新しいSPA技術の一つになる。また、植物の地震予知や環境を認識する能力についても研究されている(柴田他, 2011; Chamovitz, 2012)。これも植物の人間社会への強力な貢献となる可能性がある。

本研究においては、被験植物としてナスを採用し照射光や空気汚染物と植物生体電位間の関係を調べた。環境要因に対する生体電位特性を調べることで、生理的な反応を解明する糸口にもなる。ナスは果菜類の一つであり、日本においては古くから食され夏野菜の代表である。実験においては、ナスをエチルアルコール雰囲気中に設置し、生体電位の変化を調べた。この時、LED光の周波数を変えて実験をおこなった。結果として、白色光などの複合光照射時の生体電位は単色光の場合に比較して高く、エタノール浄化能力も大きい。単色光の場合、生体電位が大きくなるほど浄化能力が低くなり負の相関がある。二種類の複合光の場合は無相関であった。これらの結果は、野菜の高効率生産の一つの条件を示していると考えられる。

2. 実験方法

我々が日常的に食する野菜を大きく分類すると、果菜類、葉茎類、根菜類に分けることができる。この他に椎茸などの菌茸(キノコ)類もある。これまで著者らは、葉茎類と根

菜類野菜について実験を行った（大藪, 2013 ; Oyabu et al., 2014）。今回、代表的な果菜類としてナスを選び実験を行った。ナスは古くからインドで栽培されていた。日本では一般に漬物や煮物、焼きなすにして食されている。その性能として、強い抗酸化力がありガンや生活習慣病のもとになる活性酸素を抑える強い力がある。コレステロールの吸収を抑える作用もある。

一般に植物は様々な環境要因に適合し成長する。すなわち、これらの要因を制御することが出来れば、成長をかなり制御（管理）できる。その主な要因として5つが挙げられる。これを図1に示す。これらの要因を変数として成長関数 f を導出できれば管理が容易となり、植物工場の管理システムが構築できる。実験は、内容積が約300 literの亚克力チャンパー内で行った。チャンパーは、外部からの光が遮断されている。マイクロシリンジを用いて、実験チャンパーに規定濃度になるようにエチルアルコールを注入する。エチルアルコールは、消毒用など身近に使用されており、ガスセンサ感度も高く比較的精度よく検知できる。また、実験を遂行するにあたり安全（人体許容雰囲気濃度1,000 ppm）でもある。本来ならば植物の栄養源となる硫酸化物や窒素酸化物、二酸化炭素を用いるとよい。実験システムの概略を図2に示す。採用したナ



図3：実験に供したナス

スの写真を図3に示す。予備を含め2個の鉢を準備した。チャンパー内には、次のようなセンサが設置されている。生体電位は、隣り合う葉面に電極を取り付けアースからの電位差を0.1秒毎に差動アンプに入力する。その信号（数mV）を100倍に増幅しローパスフィルターを介しPCに入力する。この信号の絶対値の1分間の総和値を v_{m1} とする。同様に、30分間の総和値（ v_{m30} ）や1時間総和値（ v_{m1} ）も解析に用いた（徳田他, 2012）。

温湿度と気圧（T&D, TR-73U）、照度（T&D, PHR-51）、生体電位、エチルアルコール濃度（GAS: Figaro TGS # 800）、光源としてLEDパネルを採用している。パネルとして、青（Blue, 475 nm）、緑（Green, 525 nm）、赤（Red, 660 nm）、昼白色（White）の4種類のLEDパネルを用いた。全く光照射がない暗黒下（Black）でも実験を行っている。光周波数により植物の生長

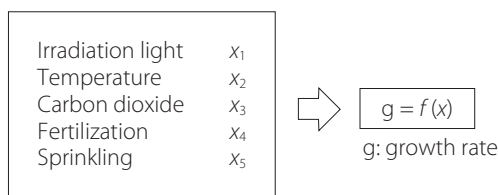


図1：基本的な制御要因と植物の成長速度 g

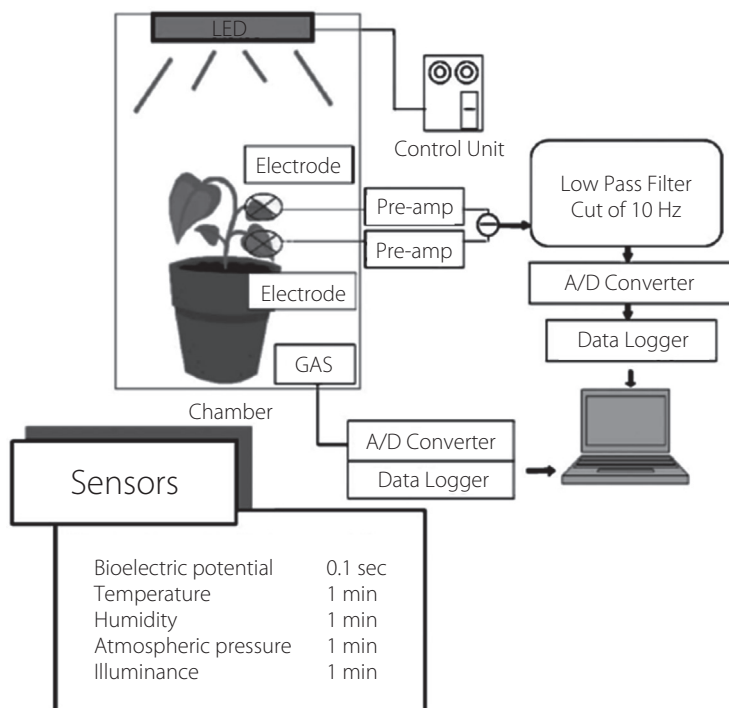


図2：実験システム

部位が異なるといわれている。赤は葉、青は茎、緑は病害などの抑制に効果があるといわれている。LED パネルはチャンパー上部（鉢底から高さ約90 cm）に取り付けてある。ナスのエチルアルコール浄化能力 (P_a) は以下のように求めた。エチルアルコールをチャンパーに注入する前のセンサ (GAS) の出力レベルをオフセット電位とする。エチルアルコールを規定濃度になるように注入した時の出力レベルのピーク値を求める。この時、ピーク値とオフセットレベルの差を h (濃度に相当) とする。ナスの浄化能力により次第に出力値が減少する。 h が半値になる時間を t_w とする。このとき、式(1)により P_a を規定する。実験プロセスは次の通りである。15時に被験植物鉢をセットし、18時に規定量のエチルアルコールを注入する。翌日の6時まで各センサからのデータを収集した。

$$P_a = h / t_w \times 100 (\%) \quad (1)$$

3. 実験結果

実験においては、照射光周波数を変えることによる生体電位の変化とエチルアルコール浄化能力を調べた。エチルアルコール濃度として、8、12、15 ppmを採用した。

3.1 ガスセンサ出力と生体電位

エチルアルコールの濃度を測定するためにガスセンサを用いている。濃度とガスセンサ出力との関係を調べた。結果を図4に示す。測定は5～15 ppmまで測定した。縦軸は h (V) である。測定範囲において直線的に変化している。30 ppmを超えると特性は少しずつ飽和する傾向がある。これはセンサの特徴でもある。20 ppm以下の低濃度範囲においては補完データを採用することができる。生体電位のオリジナル特性を図5に示す。0.1秒毎に入力されるナスの生体電位変化を1分間示している。これは、暗黒下で濃度が15ppmになるようにエチルアルコール注入した時の特性である。特性は振動が激しくパラメータに対する特徴を抽出することは難しい。このため、入力される生体電位の1分間 (v_{m1}) や1時間 (v_{h1}) の絶対値の総和値を代表値として採用することとした。また、その平均値 (v_{m1-ave} , v_{h1-ave}) を解析に用いた。 v_{m1-ave} と v_{h1-ave} は、

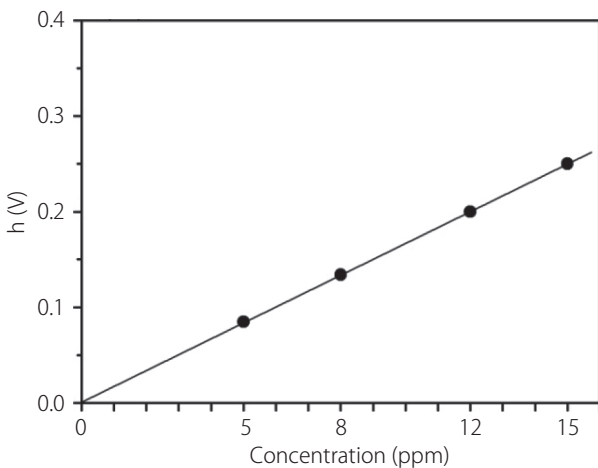


図4：エチルアルコール濃度に対するガスセンサ出力 (h)

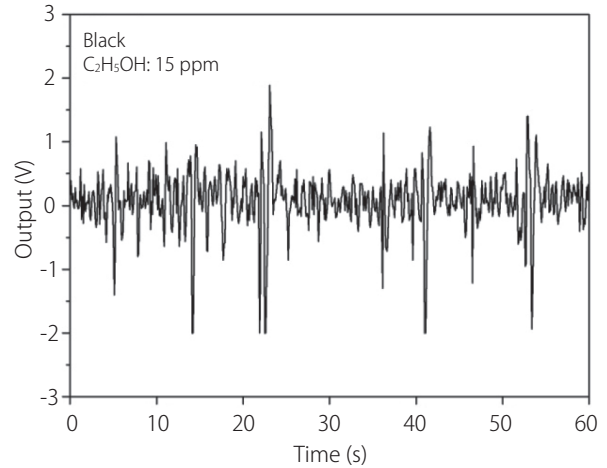


図5：エチルアルコール濃度 15 ppm に対するナスのオリジナル生体電位特性

ガスセンサ出力が h の半値になる時間 (t_w) の前後1時間の平均値を採用している。

3.2 照射光に対する v_{m1-ave} 特性

エチルアルコール注入後、ナスの吸収分解能力によりチャンパー内のエチルアルコール濃度が減少する。 h が半値になる時刻 (t_w) の前後1時間の v_{m1} の平均値を v_{m1-ave} 値としている。生体電位のオリジナル特性から照射光に対する特徴を抽出することは難しいため v_{m1-ave} を用いて解析を行った。単色光と暗黒下における特性を図6に示す。単色光や暗黒下において殆ど変動しないといえる。RはRed、BはBlue、GはGreenを意味する。Blackは暗黒下である。果菜類においては、葉菜類などと異なる生理反応があるものと考えられる。同様に、複合光に対する実験を行った。結果を図7に示す。低濃度側ではwhite光に対する値が高く、単色光の約2倍の値を示している。この濃度におけるエチルアルコールの吸収・分解能力が高いといえる。濃度が増加するとともに他の複合光に対する v_{m1-ave} も増加する。特に赤色光と青色光の複合光に対する

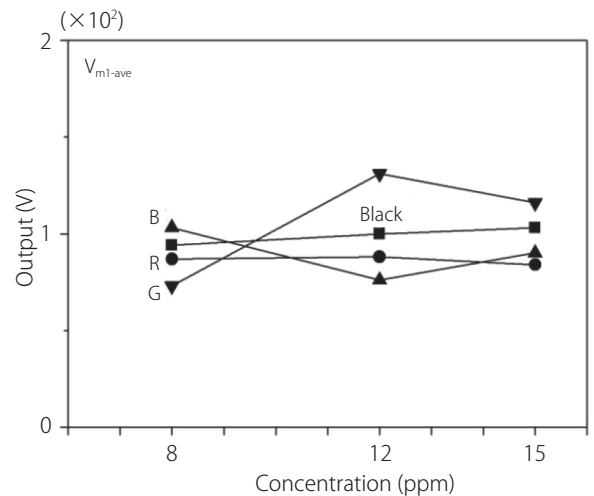


図6：単色光下でエチルアルコール濃度を変化させたときのナスの生体電位総和値 v_{m1-ave}

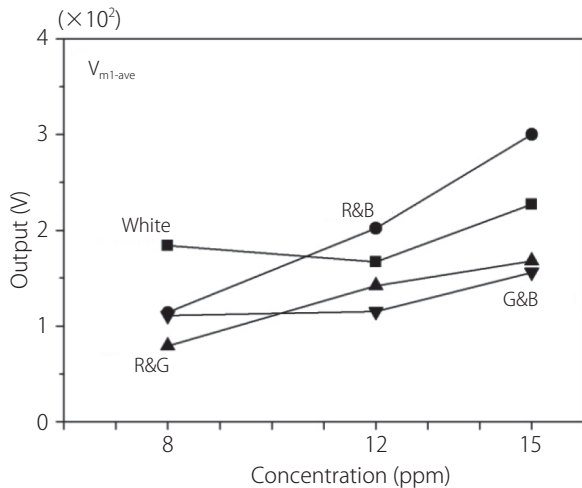


図7：複合光下でエチルアルコール濃度を変化させたときのナスの生体電位総和値 V_{m1-ave}

値が大きい。この2色は光合成に大きく貢献する光周波数である。単色光の3倍にもなり、生体電位は光合成と何らかの関係があるといえる。当然のことであるが、 V_{m1-ave} を60倍すると V_{h1-ave} の値になる。長期のデータでの解析が必要な時に V_{h1-ave} で比較する。

3.3 浄化能力特性

光照射時における各エチルアルコール濃度に対する浄化能力(P_a)を調べた。単色光に対する P_a 値を求めた。 P_a は(1)式から求めた。結果を図8に示す。濃度が高くなるほど減少傾向にある。光合成が起こらない暗黒下においても浄化能力がある。これは、暗黒下でもいくつかの気孔が開いており、エチルアルコールが植物内部に取り込まれる可能性があることと、鉢土壤中に吸収されることも考えられる。鉢土壤中には様々な土壌菌が生息しておりエチルアルコールを分解する可能性がある。総じて光周波数による差が認められない。

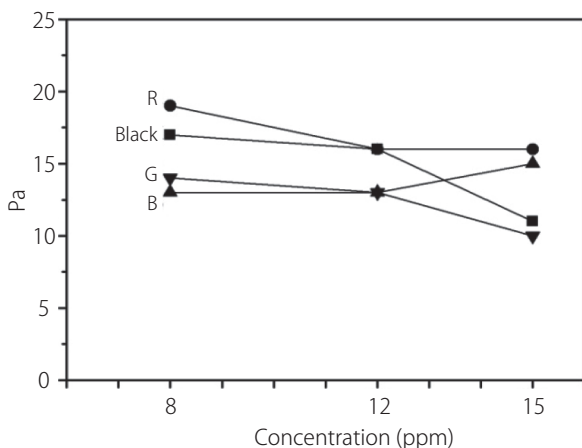


図8：単色光下におけるエチルアルコール濃度に対するナスの浄化能力(P_a)

混合光に対する P_a 特性を求めた。結果を図9に示す。White光に対する P_a が最も高い。RedとBlueの混合光下の値

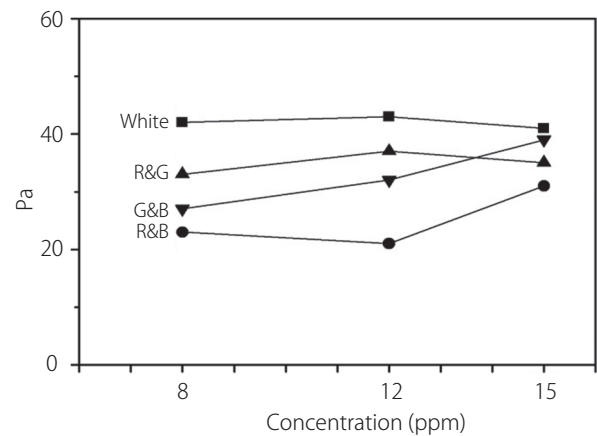


図9：複合光下におけるエチルアルコール濃度に対するナスの浄化能力(P_a)

は低い。

3.4 浄化能力特性生体電位と浄化能力の関係

生体電位と浄化能力の関係を明らかにすることができれば幾つかの応用が可能となる。浄化能力は、空気中の汚染物を吸収する能力といえる。これは、植物にとって一種の養分といえる。浄化能力が高いということは成長度に寄与するともいえる。実験で求めた P_a と V_{h1-ave} の関係を調べるために散布図を求めた。結果を図10に示す。図においては、各単色照射光のプロットをまとめている。相関係数として $r = -0.44$ が得られ、これらのパラメータ間には弱い負の相関があるといえる。

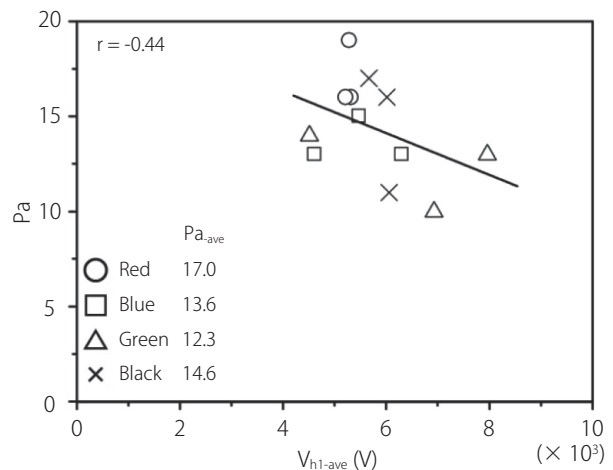


図10：単色光に対するエチルアルコール存在下の P_a と V_{h1-ave} の散布図

同様に、複合光に対する散布図も求めた。結果を図11に示す。White光に対する $P_a = 42$ (3値の平均値)が高いがRed&Blue光に対する $P_a (= 26.6)$ は低い。この光は、光合成に大きく寄与する光周波数でもある。浄化作用には、他の光周波数成分が貢献しているものと考えられる。両者間に相関関係はない。単色光に比して概ね2倍の浄化機能があるといえる。

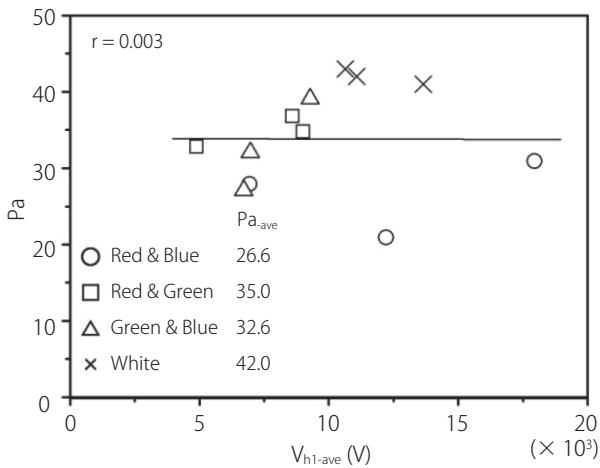


図11：複合光に対するエチルアルコール存在下のPaと V_{h1-ave} の散布図

ナスなど果菜類を用いて空気中の汚染物を浄化する場合、白色光がもっとも高い機能を発揮する。

3.5 生体電位の平均値

本研究においては、半値幅前後1時間の生体電位平均値を用いて解析を行ってきた。エチルアルコール注入後の生体電位データは12時間収集している。この12時間に亘る生体電位の平均値と半値幅前後1時間の各平均値との相関を求めた。この相関が認められれば、12時間に亘る生体電位を測定する必要がなくなり、時間的コストの減少に繋がる。求めた相関関係を図12に示す。図中の縦軸は $V_{ave-hw(60)}$ (60)と記してあるが、これまで採用してきた V_{m1-ave} 、 $V_{m30-ave}$ 、 V_{h1-ave} を意味する。横軸は12時間に亘る生体電位の平均値である。これを V_{ave} と記している。結果として、相関係数 $r = 0.98$ が得られ、高い相関があることが明らかとなった。この結果より、全体の生体電位値はガスセンサから求められた浄化特性の半値幅前後の生体電位の平均値を用いることできる。ただし、浄化特性においてエチルアルコール注入により濃度がピーク値となる時

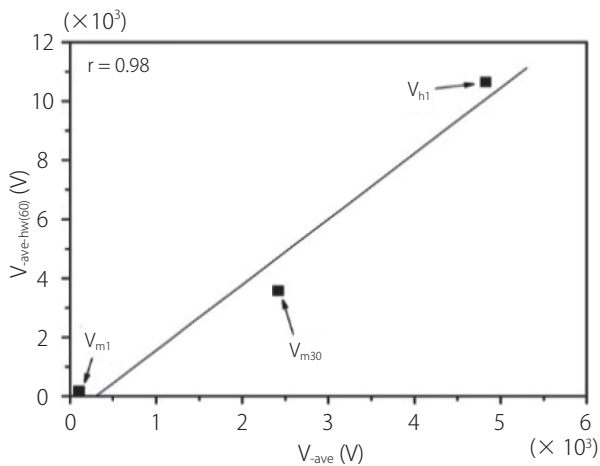


図12：エチルアルコール12 ppm注入後の昼白色光下の $V_{ave-hw(60)}$ と V_{ave} の相関図

刻から半値になる間の生体電位が高い。このため、 V_{h1} において2倍程度の差異が認められる。すなわち、濃度が高いほど生体電位が高くなる。

4. まとめ

植物から発信される情報の一つとして生体電位がある。植物生体電位と植物状態（環境認知、健康、成長）との関係を明らかにすることができれば応用範囲が著しく広がるとともに、人類にとっても大きな貢献となる。特に、地球環境の変遷や地震などの予知にも応用可能となる。室内で野菜などを生育する植物工場への応用は可能性が高い。植物工場は室内で管理されるため生体電位の変動要因を把握することが容易といえる。生体電位により環境要因を把握したり施肥の時期を認識したりする可能性が高い。特に、野菜などの成長を促進することが出来れば食料自給力向上にも貢献できる。

本研究においては、植物工場で生育環境の主要因となる光周波数に対する生体電位を調べた。このとき、空気中のエチルアルコール濃度を変えて実験をおこなった。エチルアルコールには炭素も含まれており、植物成長の栄養源となる可能性が高い。植物生体電位は大きく変動するため、解析に用いる代表値として1分間など単位時間総和値を用いた。結果として、複合光を照射すると生体電位が高く浄化能力も高くなる。いずれも2倍程度になることが明らかとなった。単色光照射時の生体電位と浄化能力間には負の相関があるが、複合光の場合は無相関である。様々な周波数の複合光である白色光を照射することにより浄化能力が最も高くなる。

今後は生体電位と植物生理との関係を詳細に調べる必要がある。また、植物のセンサ機能についても検討し植物の活用を促進していく必要がある。

引用文献

- Daniel Chamovitz (2012). What a Plant Knows. Oneworld Publications.
- Dyer, C. and Jones, R. (2010). *Deserted Villages Revisited*. University of Hertfordshire Press.
- 日本学術会議農業情報システム学分科会 (2011). 知能的太陽光植物工場の新展開. 日本学術会議報告.
- 農林水産省 (2014). 平成26年版 食料・農業・農村白書. 農林統計協会.
- 大藪多可志・伴浩美・南戸秀仁 (2013). LED光照射によるキンジソウの生体電位と空気浄化能力. 日本設備管理学会誌, Vol. 25, No. 3, 132-138.
- Oyabu, T., Kawauchi, M., Ban, H. and Nanto, H. (2014). Purification capability of white radish for gaseous ethyl alcohol and bioelectric potential under LED light. *Sensors and Materials*, Vol. 26, No. 7, 495-504.
- 柴田慎一・佐藤文起・木村春彦・大藪多可志 (2012). 除草剤散布時におけるクロロフィル蛍光パラメータ (Fv/Fm) と植物生体電位の周波数成分との関連性. 電気学会論文誌E, Vol. 132, No. 6, 154-158.

杉晴夫 (2006). 生体電気信号とは何か. 講談社ブルーバック
ス.
高辻正基 (2007). 完全制御型植物工場. オーム社.
徳田真行・邵麗新・大藪多可志・南戸秀仁 (2012). 光周波数
に対する葉の堅いキャベツの生体電位変化. 電気学会論文
誌E, Vol. 132, No. 6, 143-148.

(受稿：2015年4月8日 受理：2015年4月27日)