照射光による植物の空気汚染物浄化能力

大 藪 多可志^{*1}

Purification Capability of Plant to Gaseous Air Contaminant Due to Irradiation Light

Takashi OYABU^{*1}^{*1}Strategic Management, Kanazawa Seiryo University, 10-1 Ushi, Gosyo-machi, Kanazawa city, Ishikawa 920-8620, Japan

(Received March 2, 2012, Accepted April 18, 2012)

Plant has various kinds of functions. One of them is a purifying function of gaseous contaminants including carbon dioxide. It is a noticeable function from the standpoint of protection of global environment. Plant can purify not only carbon dioxide but also nitrogen oxide and sulfur oxide, and the chemicals are used as source of energy after broken-down in the plant. And plant puts out a bioelectric potential which changes depending on the environment and growing condition. In this study, the relationship between the potential and purification capability of a plant is examined. Broccoli is adopted as a subjective plant and the experiment is carried out in five kinds of light frequencies including darkness. As a result, the capability becomes higher and the potential also becomes larger in blue light. A positive correlation is recognized in the relationship between the potential and the capability. A specific gaseous chemical could be purified in particular light-frequency by applying the result of this study.

1. はじめに

植物は様々な機能を有しており、人間社会に多大な貢献を与えてきている。陸上植物の起源は数億年前といわれている。一方、ヒトはホモ・サピエンス (homo sapience) と呼ばれ、20万年前から現れたとする説が有力である¹⁾。人間が存在する遙か以前から陸上植物は生息しており、食料、燃料、光合成による空気浄化、薬など多大な貢献を人間に与えている。地球温暖化問題が叫ばれる昨今においては、植物の光合成機能をシミュレートできないかなど温暖化物質浄化機能が脚光を浴びている。植物の空気汚染物分解能力を活用し二酸化炭素など温暖化物質を低減することができれば地球環境に大きく貢献できる。室内においても、観葉植物を設置することにより空気浄化のみならず癒し効果も享受している²⁾。癒し効果は、歴史的に植物が人間に様々な恩恵を与えてきたことによるものと思われる。

最近、日本の食料自給率向上を目的に野菜工場が設立されている³⁻⁹⁾。工場で生産される野菜が食料となり空気浄化までも行うことができれば大きな魅力である。大気中の二酸化炭素を圧縮し野菜工場で利用し野菜の成長を促進できれば大きな効果が得られる。浄化機能や野菜の成長には、二酸化炭素のみならず照射光の周波数が大きな役割を果たしていることが明らかである¹⁰⁾。このとき、照射光周波数と植物生体電位 (plant bioelectric potential) に相関関係があることが明らかとなった。植物生体電位は、植物自身の生命活動により内部にイオン流が生じることにより発生し人間の心電図と同様なものと考えられている¹¹⁾。当該電位は植物生理作用や環境により変化する。これらの情報を活用することにより、野菜工場での生育管理を制御できる可能性がある。篤農家は野菜などの生育状況を観察しただけで病気や成長度合い、収穫時期などを瞬時に判断する。これは長い間の経験に

より培われた知見から判断されるものである。このような植物の状態を植物自身から発する情報により判断することができれば、野菜生産に関わったことがない素人でも効果的な生育・収穫管理ができる。植物自身が発する情報の一つが植物生体電位である。本研究においては、将来、野菜などの生産管理に応用する目的で照射光周波数を変化させたときの植物生体電位特性を調べた¹²⁾。また、空気汚染物を吸収・分解する能力との関係について調べた¹³⁾。

本報告では、光周波数を変え植物に照射したときの生体電位変化と空気浄化機能について調べた結果を報告する。被験植物としては、食料にもなる身近なブロッコリーを採用した。空気汚染物として、一般に消毒に用いられるエチルアルコールを用いた。

2. 植物生体電位の測定と汚染物浄化能力の導出

照射光による植物生体電位特性の測定実験はアクリルチャンバー (575×510×1000 mm, 約300 liter) 内で行った。実験中は外部からの光を遮断している。実験システムを **Fig. 1** に示す。被験植物としてブロッコリー (Broccoli) を用いた。ブロッコリーは緑黄色野菜の一つでキャベツの変種でもある。キャベツの生体電位変化は調べられ既に報告されている¹⁰⁾。実験に採用したブロッコリーの写真を **Fig. 2** に示す。ブロッコリーの葉は堅く、手軽にクリップ式生体電位測定用電極などを取り付けることができる。被験植物の隣り合う葉面にクリップ式アルミ電極 (電極部0.3 cm²) を取り付けて生体電位計測を行った。アースは鉢土壌である。

植物は雰囲気中のガス状汚染物を吸収・分解する。その一部は栄養源とし摂取しているといわれている¹⁴⁾。空気汚染物としてエチルアルコール (C₂H₅OH) を採用した。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安全 (人体許容雰囲気濃度1,000 ppm) である。本来ならば硫酸化物や窒素酸化物、二酸化炭素を用いるとよい。差動アンプにより生体電位 (オリジナル信号は数 mV) を100倍に増幅している。差動アンプを採用しているため

^{*1} 金沢星稜大学経営戦略研究科 (〒920-8620 石川県金沢市御所町丑10-1)

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system.

Fig. 2 Photograph of the subjective plant (broccoli).

ロレベルを中心に正負に信号が振れる。その信号をローパスフィルター（10Hz）に入力し高周波ノイズを除去しA-Dコンバータ、データロガーを介しコンピュータに入力する。差動アンプから出力される生体電位を直接解析しても特徴を抽出することは難しい。このため、0.1秒毎にサンプリングしている生体電位の絶対値の1分間の総和値（ v_{m1} ）を用いて解析を行った。実験チャンバー内の環境要因を計測するセンサとして、ガスセンサ（GAS; Figaro TGS#800）、温湿度・気圧（T&D, TR-73U）、照度計（T&D, PHR-51）が設置されている。生体電位以外のサンプリング間隔は1分である。照射光として、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。暗黒下（Black）でも実験を行っている。LEDパネルはチャンバー上部（鉢底からの高さ約90 cm）に取り付けてある。温湿度、気圧、照度、エチルアルコール濃度は鉢底の位置で計測している¹⁰⁾。

各光周波数下でのブロッコリーの汚染物浄化能力をガスセ

Fig. 3 Purification capability of the subjective plant using gas sensor characteristic.

ンサ出力から導出した。すなわち、予め汚染物を注入しない時のセンサ出力をオフセットレベル（ v_{off} ）とし、エチルアルコール注入時のセンサ出力（ v_s ）の最大値（ v_{s-max} ）との差（ h ）を求める。エチルアルコールの場合数秒で最大値となる。エチルアルコール注入時から、 $h = v_{s-max} - v_{off}$ の半値になるまでの時間を t_w とし、 h/t_w を浄化能力（ P_a ）として規定した。 P_a は式(1)のように示される¹⁵⁾。 P_a の概要をFig. 3に示す。図には後で用いる v_{off} の領域(a)部と汚染物注入後の領域(b)部も記されている。汚染物注入により v_{m1} は増加する傾向がある。解析には、 v_{m1} のヒストグラムや v_{m1} の平均（ v_{m1-ave} ）値を用いた。ヒストグラムは頻度（frequency, 単位%）により示す。

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

3. 植物生体電位と光下における染物浄化機能

植物生体電位は環境要因や生育状況により変化するのは明らかである。未だ、その詳細は明確になってはいない。本研究においては、光周波数による汚染物浄化（摂取、分解）機能の傾向を明らかにすることを目的にしている¹⁶⁾。

3.1 オリジナルデータと v_{m1} 特性

ブロッコリーのオリジナル生体電位特性とガスセンサ出力特性をFig. 4に示す。上図はオリジナル生体電位特性である。Blue光を2,177 lxで照射したときの60秒間の特性である。汚染物は注入していない。下図は夕方18時にエチルアルコールを注入し翌日の朝6時までのガスセンサ特性を示している。注入と同時にセンサ出力が最大値（約0.5 V）になり、ブロッコリーの浄化能力により出力が徐々に減少し注入前の値（約0.1 V）に戻っている。 h は約0.4 V（エチルアルコール濃度8 ppmに相当）となる。この特性から P_a を求める。実際の植物（野菜）工場では夜間の安い電力料金を活用することが多い。さらに、夜間は日中と比較し外乱も少ないため実験は夜間に行った。同時に測定した温湿度と気圧のデータをFig. 5に示す。温度はほぼ20℃一定である。湿度は植物の蒸散機能により60%RHから緩やかに増加している。気圧は1007~1009 hPaと僅かであるが変化している。

生体電位のオリジナルデータ（Fig. 4）から特徴を抽出することは難しい。このため、1分間の絶対値の総和値（ v_{m1} ）の変動から種々検討を行った。コントロールとして汚染物を注入しないときの各光周波数下の v_{m1} 特性を求めた。その結

Fig. 4 Original characteristic of the broccoli bioelectric potential (a) and the gas-sensor characteristic (b) to 8 ppm of ethyl alcohol as an air contaminant.

Fig. 7 Histogram of v_{m1} under blue light. Average of v_{m1} (v_{m1-ave}) is 291.4 and the standard deviation is 129.9.

Fig. 5 Characteristics of temperature, humidity and atmospheric pressure for 15 to 6 o'clock.

Fig. 6 Summation value (v_{m1}) of bioelectric potential to each irradiation light frequency for one minute.

果を **Fig. 6** に示す. Blue と White の特性が大きいことがわかる. この特性から特徴を抽出することは難しいため v_{m1} を求める. Fig. 6 の Blue 光に対する v_{m1} の分布を **Fig. 7** に示す. 平均 (ave , v_{m1-ave}) が 291.4 で標準偏差 $\sigma = 129.9$ である. 変動係数 ($cv = \sigma / ave$) は 0.446 である. 各照射光に対する v_{m1-ave} の値を図式化すると **Fig. 8** のようになる. Blue 光に対する値が高く続いて White 光に対する値である. 光を照射した場合の何らかの植物生理作用に対する特性を示していると考えられる. 変動係数に対する同様の特性を導出すると

Fig. 8 Relationship between irradiation lights and average of v_{m1} (v_{m1-ave}).

Fig. 9 Relationship between irradiation lights and coefficient of variation (cv) of v_{m1} .

Fig. 9 になる. Red 光の cv は 0.288, Green は 0.495, White は 0.627, Dark は 0.564 である. 周波数が大きくなると変動係数が大きくなる傾向がある. 暗黒下 (Dark) と様々な周波数が混合している White の cv が大きい. Dark と White に対する cv が大きくなることはキャベツの場合も同様である¹⁰⁾.

植物にとって暗黒下は光合成を行うことができないため, ある種のストレスと考えられる. ただし, 生体電位が植物ストレスを示しているという報告はなく, また植物ストレスの定

義もなされていないが、文献上で使用されているため、ここで用いた¹⁷⁾。

3.2 光周波数による浄化能力

光照射時の植物生理作用の詳細は明らかになっていない。光を照射し、汚染物を注入しない場合の生体電位 (v_{m1}) は照射光周波数により変動しその平均値 (v_{m1-ave}) も変わることが前節にて示した。この変動は植物生理作用から生ずるとの感触を得ている。空気汚染物の有無によっても v_{m1} が変化することが予想される。光照射下における汚染物の存在と生体電位との関係が明らかになれば効率的な環境浄化が見込める。二酸化炭素などの効率的な除去が可能となれば植物利用が大きく進展する。本研究では、空気汚染物としてエチルアルコールを用いた。エチルアルコールの存在と v_{m1} との関係が明らかになれば植物生理作用の解明にも貢献できる。植物は、空気汚染物としてのエチルアルコールを養分として取り込んでいると思われる¹⁴⁾。このとき、光合成作用が重要な役割を果たしている。実際、暗黒下と光下での浄化能力 (P_a) は大きく異なる¹⁸⁾。光合成には水素分子が重要な役割を果たす¹⁹⁾。エチルアルコールが分解すると水素分子が生成するがその機能は未だ不明な点が多い。

汚染物がある場合とない場合では生体電位の分布特性が異なる。特に変動係数が増加する傾向にある。実験した光照射時（暗黒下を含め5つの場合）における結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10(a)は汚染物がない場合であり、(b)は12 ppm の場合である。Green と Red の場合の増加が著しい。他の

Fig. 10 Relationship between coefficient of variance and irradiation light. (a) cv in clean air. (b) cv in 12 ppm of gaseous ethyl alcohol.

場合は 0 ppm 時の値も大きいので大幅な増加が認められない。このように、Red 光と Blue 光を照射すると葉面付近などで特異な反応があるものと推察される。

汚染物が存在するときの被験植物の浄化能力 (P_a) と平均生体電位 (v_{m1-ave}) の関係を求めると Fig. 11 のようになる。これは、先の図と同様エチルアルコール12 ppm の場合に対する結果である。図中には各照射光時のプロットが混在している。相関係数として0.65が得られたことから、相関関係が示された。概して、生体電位が大きくなると P_a も大きくなるといえる。この傾向は他の植物にもいえる¹⁰⁾。植物は汚染濃度が高くなると平常環境に戻そうとする力を発揮する傾

Fig. 11 Relationship between P_a and v_{m1-ave} .

Fig. 12 Relationship between P_a and each concentration of ethyl alcohol under blue light.

Fig. 13 Relationship between P_a and each concentration of ethyl alcohol under red light.

向があり、高濃度な環境ほど P_a が大きくなる。Blue 光照射時の濃度に対する P_a 特性を **Fig. 12** に示す。同様に Red 光の場合の結果を **Fig. 13** に示す。Blue 光照射時と同様に濃度の増加と共に P_a も増加するが、いずれも飽和する傾向にある。すなわち、10 ppm あたりを超えると植物の浄化機能を誘引する生理機能の限界に近づくのではと考えられる。Red 光と Blue 光は植物の光合成作用に深く関わっている²⁰⁾。二種類の単色光を同時に照射すると個々に照射するよりも光合成速度が速くなるというエマーソン効果 (Emerson effect) がある。その強度の比が Red : Blue = 10 : 1 の場合が最も有効である等の報告がある⁴⁾。空气中汚染物の吸収量や根から吸収する肥料の量などの関数とし生体電位を表すことができれば植物の成長を把握することが可能となる。すなわち、植物の成長を工学的に制御することができる。このようなことが可能になれば野菜工場における生産ラインのより精確な管理が可能となり植物工場企業化に弾みがつくことになる。

4. ま と め

人間に比べて植物の起源は古く環境により進化した様々な機能を有してきている。最も重要な機能は光合成である。それに関連する機能として空気浄化や蒸散がある。空気浄化機能を詳細に明らかにしていくためには、進化過程を研究する必要がある。以前より植物が空気浄化機能を有し、種により能力が異なることを明らかにしている²¹⁾。植物進化の過程で浄化機能の優劣が生じる原因についても研究を行うべきである。そのことが地球環境を維持する糸口を得る知見となる。本研究では、照射光と植物生体電位との関係について研究を行ってきた。生体電位は温湿度や気圧などの環境条件によっても変化する²²⁾。すなわち、汚染物の有無や照射光により変化する。生体電位のオリジナル特性は時々刻々変化しており、それから直接特徴を抽出することは難しい。このため、1 分間の絶対値の総和値を代表値として採用した。空気汚染物として馴染みのあるエチルアルコールを採用した。植物から発せられる生体電位を用いて高効率に植物浄化機能を導出することができれば、地球環境を改善する有効な手段の一つとなる。被験植物としてブロッコリーを選び実験を行った。結果として、照射光によりブロッコリーの生体電位は変化し浄化機能も大きく異なることが明らかとなった。特に注目すべき点として、光周波数が高くなると生体電位が大きくなりエチルアルコールの除去効果も高くなる。生体電位と浄化能

力間には正の相関関係があることが明らかとなった。将来、これらの知見が野菜工場などに応用され、野菜生産の工学的管理に繋がるものと思われる。

本研究においては光と生体電位間の大雑把な関係のみを調べたものである。これらの関係が植物内のどのような生理作用の起因なのかについては不十分なため、照射光周波数を混合した場合の植物種、汚染物種などについて浄化効果をマトリクス状に調べる必要がある。さらに、植物進化過程からこれらの機能が派生する要因も明らかにする必要がある。

〔文 献〕

- 1) 伏見謙編：生命の起源と進化の物理学（共立出版，東京，2002）。
- 2) A. Sawada and T. Oyabu: *Sensors and Materials*, **22** (2010) 387.
- 3) 高辻正基：図解よくわかる植物工場（日刊工業新聞社，東京，2010）。
- 4) 高辻正基：完全制御型植物工場（オーム社，東京，2010）。
- 5) 古在豊樹：太陽光型植物工場（オーム社，東京，2009）。
- 6) 池田英男：植物工場ビジネス（日本経済新聞出版社，東京，2010）。
- 7) 高辻正基，森康裕：LED 植物工場（日刊工業新聞社，東京，2011）。
- 8) 木島龍吉，加藤勇太，下野誠通：電気学会誌，**131** (2011) 764.
- 9) 野口 伸：計測と自動制御，**50** (2011) 1025.
- 10) 徳田真行，邵 麗新，大藪多可志，南戸秀仁：電気学会論文誌 E，**132** (2012) 143.
- 11) 杉 晴夫：生体電気信号とはなにか，（講談社，東京，2006）。
- 12) 柴田慎一，邵 麗新，木村春彦，大藪多可志：EICA，**15** (2011) 65.
- 13) K. Baosheng, S. Shibata, A. Sawada, T. Oyabu and H. Kimura: *Sensors and Materials*, **21** (2009) 445.
- 14) H. H. Tabak, S. A. Quave, C. I. Mashini and E. F. Barth: *Journal WPCF*, **53** (1981) 1503.
- 15) T. Oyabu, T. Onodera, H. Kimura and Y. Sadaoka: *Journal of Japan Society for Atmospheric Environment*, **34** (2001) 319.
- 16) 安藤 毅，長谷川有貴，谷 治 環，内田秀和：電気学会論文誌 E，**131** (2011) 337.
- 17) A. H. Fitter, R. K. M. Hay: *Environmental Physiology of Plants*, (Academic Press, 1981).
- 18) 藤井正基，谷 真拓，沢田史子，上島浩二，野上耕作，大藪多可志：EICA，**12** (2007) 29.
- 19) 増田芳雄：植物生理学（培風館，東京，1999）。
- 20) 高辻正基：植物工場の基礎と実際（裳華房，東京，2007）。
- 21) 神阪盛一郎，西谷和彦，桜井直樹，谷本英一，上田純一，渡辺 仁：植物の生命科学入門（培風館，東京，2000）。
- 22) 新保達也，大藪多可志，長谷川有貴，広林茂樹，竹中幸三郎：電気学会論文誌 E，**125** (2005) 253.