

太陽光に対する植物生体電位応答

大藪 多可志* (金沢星稷大学), 新保 達也, 木村 春彦 (金沢大学)

沢田 史子 (金沢星稷大学), 広林 茂樹 (富山大学)

長谷川 有貴 (埼玉大学), 南戸 秀仁 (金沢工業大学)

Response Characteristics of Plant Bioelectric Potential under Sunlight

Takashi Oyabu* (Kanazawa Seiryō University), Tatsuya Shimbo, Haruhiko Kimura (Kanazawa University)

Ayako Sawada (Kanazawa Seiryō University), Shigeki Hirobayashi (Toyama University)

Yuki Hasegawa (Saitama University), Hidehito Nanto (Kanazawa Institute of Technology)

Plant is affected by environmental factors. These are temperature, humidity and light intensity. The light intensity affected strongly to the plant. The plant produces glucose and oxygen with photosynthesis according to the light intensity and its frequency. It also has a capability to purify the airborne chemicals in the atmosphere. In this study, it was examined how the plant is affected by the light intensity using bioelectric potential characteristics of the plant under sunlight. Plant bioelectric potential as a function of light intensity was measured. The results are shown in this paper as well as other sensor characteristics. The measurement was mainly carried out in outdoor. As the result, the plant bioelectric-potential characteristics in outdoor were largely differed with the ones in indoor. In the analysis, the integrated value of plant bioelectric potential for 1 minute (v_{m1}) was adopted. A high correlation was indicated between the v_{m1} and light intensity. The equation for the correlation was indicated as follows: $v_{m1} = a * \exp(l_m/b) + c$ where l_m means light intensity. In this study, $a=127$, $b=7353$ and $c=160.7$. The v_{m1} was also measured under red, green and blue lights. It also becomes obvious that the v_{m1} is affected by light frequency. In other words, the plant can understand the environmental factors like light intensity and frequency (red, green and blue). Some environmental factors, for example temperature, humidity, atmospheric pressure and wind will be understood by measuring the bioelectric potential. In the future, there is a high possibility that the plant can be deal as an environmental sensor.

キーワード: センサシステム, 植物, 生体電位, 環境センサ, 光合成

(Sensory System, Plant, Bioelectric Potential, Environmental sensor, Photosynthesis)

1. はじめに

経済の発展とともに人口が増加し、地球環境は様々な化学物質で汚染されつつある。その主なものに、空気、水、土壌汚染がある。これら多くの汚染物を吸収浄化しているのが植物である。また、植物は動物のように移動できないため環境適応能力に優れているといえる。植物は光や温度、湿度、気圧などの変化をとらえ気候をも認識している。これらの環境変化により植物生体電位が変化する⁽¹⁾。ある面では、人間より優れた環境センサともいえる。植物の生理現象を詳細に把握する事により、このセンシング能力を活用することが可能と思われる。一方、人間は太古の昔より植物とともに過ごしてきている。植物は様々な恩恵を人間にもたらしている。例えば、汚染物の浄化のみならず、食物、

エネルギー源、薬などである。さらに人間に対する癒し効果を有している。癒し効果は、大昔より人間が植物とともに過ごしてきたために生じるものと思われる。植物をオフィス環境に配置することにより労働効率が向上するとの報告もある^(2,3)。

本研究においては、屋外における太陽光などの照度変化に伴い生体電位が変化する様子を調べた。生体電位とは生命体が生命維持に関わる情報伝達によって生じる電気信号であり、植物の生命活動や環境変化による影響で電位変化が生じるものである。この環境変化と生体電位の関係を明らかにし、環境情報を抽出することができれば、植物をセンサとして用いることが可能となる⁽⁴⁾。これまで室内における実験において、生体電位は温度や土壤中水分、風量により影響を受けることが判明している^(5,6)。また、灌水時、葉

面への接触、測定している部屋への入室など人のふるまいに対しても生体電位の変動が認められている⁷⁾。本研究では、観葉植物を屋外に設置し、太陽光の照度変化に対する生体電位を測定した。一部、参考のために室内の蛍光灯下や窓越しの太陽光下での測定も行なった。その結果について報告する。

2. 実験方法

(2・1) 実験システム 実験では生体電位(V)の他に、大気中の温度(°C)、湿度(%), 照度(Lx), 大気圧(hPa)を同時に測定した。サンプリング間隔は生体電位が 0.1 秒, 温度, 湿度, 照度, 大気圧が 1 分である。実験で用いたセンサからの応答を A-D 変換器, データロガーを介してコンピュータに取り込んでいる。生体電位の測定ブロック図を図 1 に示す。被験植物の隣り合う 2 枚の葉面を導電性電極(材料: アルミニウム, 電極部: 3cm²)で挟み, そこから得られる電位を OP アンプで 1,000 倍に増幅し, 他のセンサと同様に A-D 変換器, データロガーを介しコンピュータに取り込む。なお, 本システムにおいては, 被験植物鉢の土壌をアースとした。解析においては, 生体電位の生データの絶対値の 1 分間の総和(積分値)を代表値として採用した^{5,7)}。1 分間の総和値(積分値: v_{m1})とは, 0.1 秒毎のセンサ信号 600 個の絶対値の総和である。この積分値を利用することで環境変化の概要を把握した。

(2・2) 実験環境 実験は 4 階建てのビルの屋上で行った。実験では, 太陽光照射および遮蔽時において生体電位を測定した。屋外実験では, 生体電位は自然の風の影響も受ける⁶⁾。そのため, シールドし風を遮蔽するようにした。被験植物としてシェフレラ(*Schefflera arboricola*)を採用した。シェフレラは生育温度範囲が 3~30°C(最適温度範囲は 20~25°C)と幅があり維持管理が容易である。この実験環境において, 太陽光照射時の生体電位を測定した。植物の葉の光吸収特性が光合成などに影響していることが知られている。このため, 被験植物の光吸収特性を調べた。結果を図 2 に示す。青色光の吸収率が高く, 赤色光も比較的高いが緑色光(550nm 付近)は相対的に低い。赤色光は茎や根を成長させ, 青色光は葉を发育させることが明らかとされている。これらの光吸収は葉に含まれるクロロフィルやカロチノイド, アントシアニンなどの植物色素量に依存する。緑色光は, クロロフィルにはほとんど吸収されないがカロチノイドに少し吸収される。特に, 葉の肉厚が厚いと葉内を反射したり散乱したりして吸収され光合成に幾分貢献する。シェフレラの葉厚は比較的厚い部類である。これらの特性により, 光合成などが活発に行われるか否かの判断が出来る。図に示された特性は比較的代表的なものといえる。

3. 照度と生体電位の関係

(3・1) 屋外実験 実験は 9 時~17 時までの 8 時間行い, 前後 2 時間を除きその中間の 4 時間分のデータを解析に用いた。これは植物の環境変化に対する影響を除く

ためである。屋外実験は温度や湿度などの変動があり, 各実験ともばらつきがある。実験結果の一例を図 3 に示す。生体電位は v_{m1} を採用した。図 3 には 4 つの図が示されている。すなわち, 温度, 湿度, 照度, 気圧特性である。各図中には生体電位が共通に示されている。太陽光の照度(I_m)は室内の数倍から数十倍を超える。そのため, 植物生体電位は室内より高くなる。屋外における照度と生体電位の平均値(ave)と標準偏差(sd)の値を求めた。暗黒下での特性を図 4 に示す。暗黒化では, 生体電位(v_{m1})の平均値が約 33 を示し, 標準偏差が 1.5~2.5 の範囲にある。図 3 の太陽光照射時には, 生体電位と照度の平均値が, $\text{ave}(v_{m1}) = 120 - 150$, $\text{ave}(I_m) = 10,000 - 16,000$ の範囲にある。標準偏差は, $\text{sd}(v_{m1}) = 30 - 60$, $\text{sd}(I_m) = 3,700 - 12,000$ であった。変動係数(cv: Coefficient of variation)としては, 生体電位の場合, $\text{cv}(v_{m1}) = 24 - 42\%$ 。照度の場合, $\text{cv}(I_m) = 36 - 75\%$ であった。生体電位に比べて照度の変化が大きくバラツキが大きいといえる。図 3 に比べて生体電位の変動が少ないことが分かる。

屋外の各実験結果に対する v_{m1} のヒストグラムを図 5 に示す。暗黒下では $v_{m1} = 34$ を中心とした分布が得られた。これに対して太陽光下では, $v_{m1} = 31 - 250$ と v_{m1} に幅があるヒストグラムが得られた。このことから, 光照射時の生体電位は大きく変動することが認められた。また, 屋外においては照度が高いと葉表面温度が気温よりも高くなる結果が得られており, 葉表面温度が生体電位に影響していると考えられる。図 6 に屋外における各実験の v_{m1} 平均値と照度の散布図を示す。図中において, 縦軸は v_{m1} の平均値, 横軸は 1

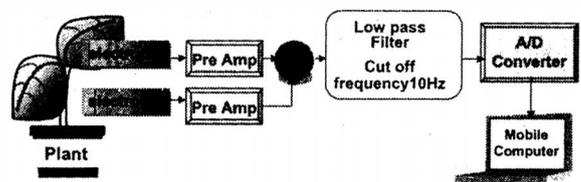


図 1 生体電位計測システム
Fig.1 Measurement system for bioelectric potential.

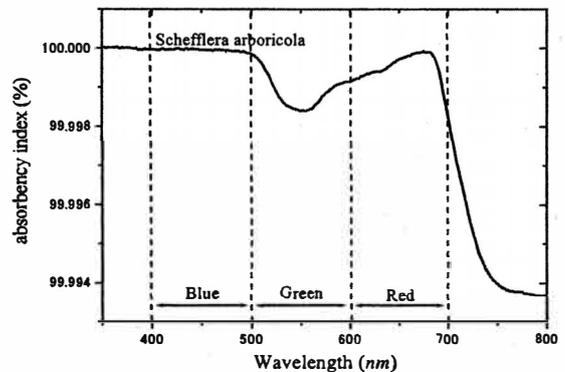


図 2 シェフレラ葉の分光特性
Fig.2 Light spectroscopic characterization.

分毎の照度 (I_m) の1時間の平均値を表している。暗黒下の v_{m1} 平均値 (v_{m1-ave}) は、別の実験で行なった室内実験と同じような値を示した。光下では、室内実験時と比べて太陽光照射時は v_{m1-ave} が高い。このことから、植物の生体電位は照度の影響を強く受けているといえる。

〈3・2〉 照度に対する生体電位の近似式 v_{m1} と照度の平均値の散布図を図 7 に示す。この図には、照度が低い室内

で測定したデータも含まれている。結果として、10,000lx 前後まで照度の増加とともに、急激に v_{m1} が高くなり、その後飽和する傾向がある。また、 I_m と v_{m1} の特性にシグモイド関数による近似を行った。その結果を式 (1) に示す。

$$v_{m1} = \frac{a_1 - a_2}{1 + e^{(I_m - x_0)/dx}} + a_2 \dots\dots\dots(1)$$

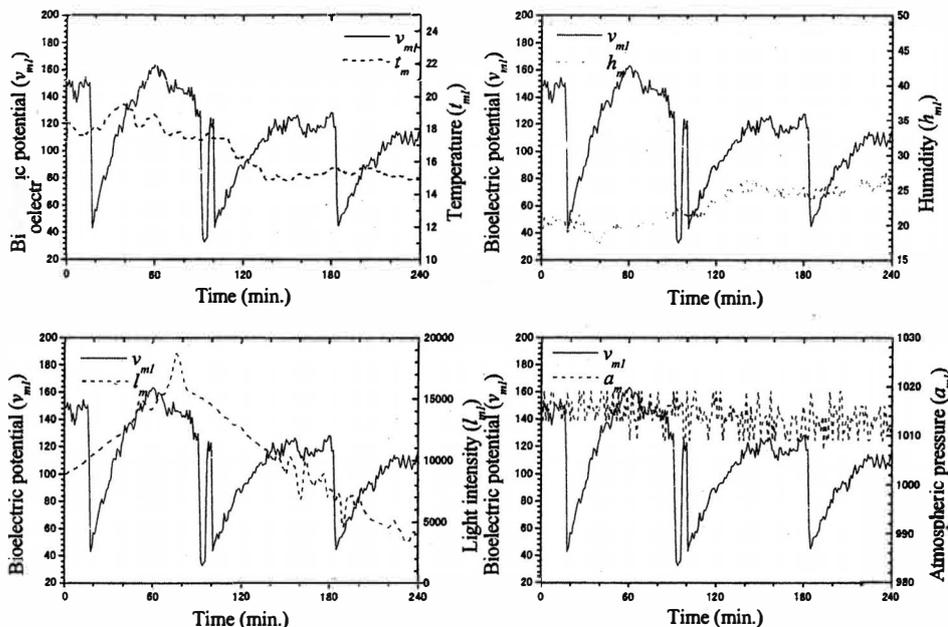


図3 太陽光下における生体電位と各センサの応答

Fig. 3 Relationship between bioelectric potential and other sensor outputs under sunlight.

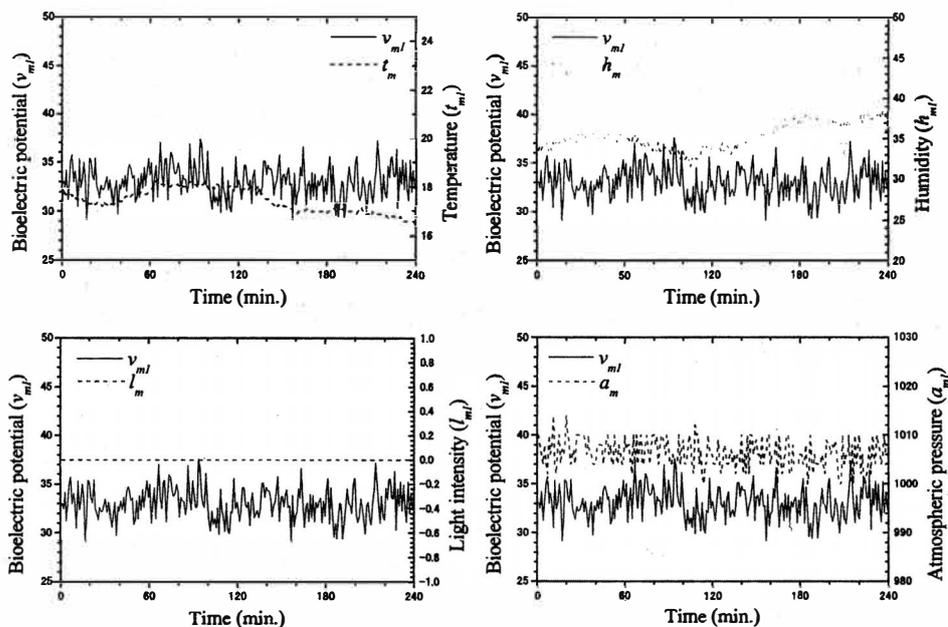


図4 屋外暗黒下における生体電位と各センサの応答

Fig. 4 Relationship between bioelectric potential and other sensor outputs in darkness of outside.

(1)式において $a_1 = 27.34$, $a_2 = 171.54$, $x_0 = 698.1$, $dx = 1908.3$ であった。(1)式を用いて I_m と v_{mI} の重相関係数 R^2 値を求めたところ 0.94 であった。相関の有無を判定するために、簡便法による検定がある。検定は $R^2 > 4 / (n+2)$ を満足するかで判断される。 n はデータ数である。簡便法を用いた検定の結果、十分に相関があるといえる。以上の事柄より、 v_{mI} 特性は照度の影響を受け、その関係はシグモイド関数で近似できる。図 6 のシグモイド関数は、植物の光合成曲線にも認められる⁽⁸⁾。光合成能力は照度に依存しており、照度を高くすると促進するが、ある照度に達すると飽和する^(8,9)。本実験で得られた(1)式より、植物生体電位は光合成機能に影響を受けていると考えられる。この点に関しては、さらに検証が必要である。

(3.3) 赤、緑、青色光に対する生体電位応答 生体電位 v_{mI} の赤、緑、青色光に対する応答を調べた。測定環境は図 3 と同様である。各色の生成については市販色付きゼロハンにより行った。結果を図 8 に示す。上部より、赤、緑、青に対する生体電位の変化である。赤では小刻みな変

動を示し、緑では緩やかな変動である。青ではインパルス的な変動が見受けられるが余り変動しないことが分かる。赤色光に対して時々刻々何らかの応答をしているものと思われる。図 8 の特性測定時の照度 (I_x) の値を表 1 に示す。赤色光の平均値が大きい、青色と緑色光の値はほぼ同程度であった。図 8 においては、青色光と緑色光の特性は大きく異なっており、図 8 の特性は照度により派生しているのではなく照射されている光周波数に依存しているものと考えられる。図 8 の図より各色の光に対する生体電位のヒストグラムを作成した。結果を図 9 に示す。ヒストグラムから見て生体電位の変動が大きいのは赤と緑色光である。赤色光では、平均が約 48.5 (V/min)、標準偏差が 15.2 程度である。緑色光に対しては、45.8 と 14.6 である。青色光に対しては、39.1 と 10.2 である。変動係数で表すと、赤は 31.31%、緑は 31.94%、青は 26.14% である。太陽光の青色光に対しては変化が少ないといえる。このように、生体電位から照射光の周波数を類推することが可能と考えられる。

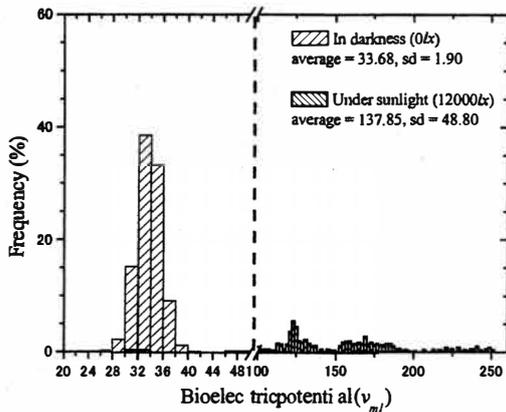


図 5 屋外実験結果に対する v_{mI} のヒストグラム
Fig. 5 Histogram of v_{mI} for the outdoor experiment.

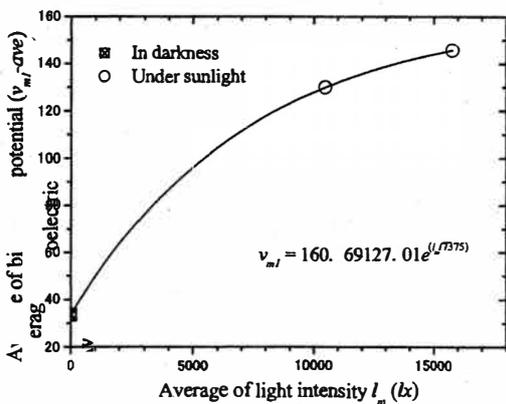


図 6 屋外実験における v_{mI} 平均値と照度の関係
Fig. 6 Relationship for average of v_{mI} and light intensity in the outdoor environment.

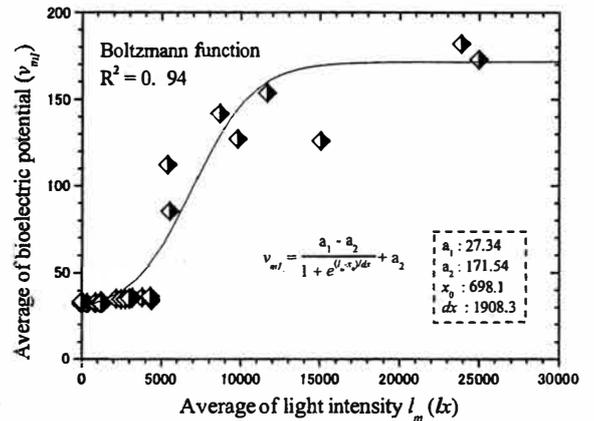


図 7 屋外における生体電位 (v_{mI}) と照度の平均値
Fig. 7 Relationship between average of v_{mI} and light intensity.

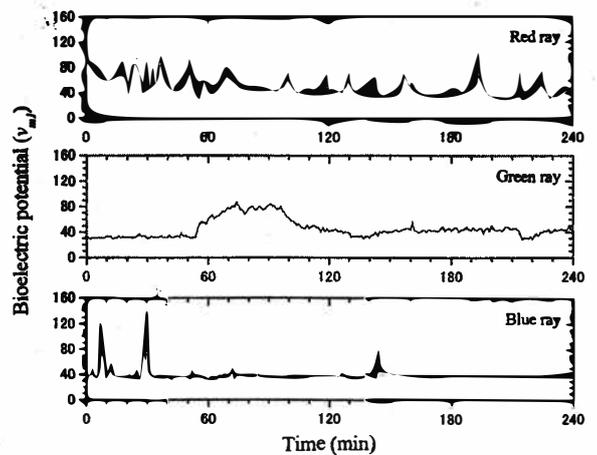


図 8 赤、緑、青色光に対する生体電位変化
Fig. 8 Bioelectric potential as a function of time under red, green and blue lights.

表1 赤, 緑, 青色光照射時の照度値

Table 1 Average, maximum and minimum values of light intensity (lux) when the characteristics in Fig.8 were measured.

	Blue	Green	Red
Average	2,597	2,423	4,458
Maximum	7,905	10,300	9,670
Minimum	553	335	857

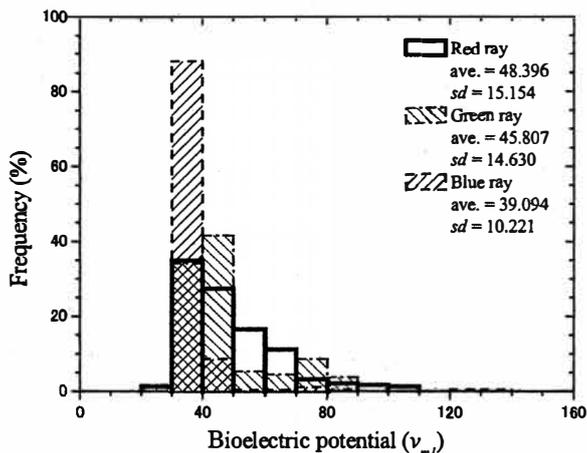


図9 赤, 緑, 青色光照射時の v_m ヒストグラム
Fig.9 Histogram of v_m for red, green and blue lights in sunlight.

4. まとめ

本研究では, 室内及び屋外で観葉植物(シェフレラ)の生体電位を測定した。このとき, 照度がどの程度生体電位に影響を与えているか調べた。解析では, 生体電位の1分間の積分値(v_m)を求め, それを代表値として採用した。照度により生体電位に差異が認められた。また, 太陽光は, v_m の標準偏差に影響を及ぼすことが明らかとなった。 v_m と照度(I_p)の近似関数をシグモイド関数を用いて求めた。測定データと近似式間の R^2 値は0.94であり, 検定により相関があることが認められた。また, 赤, 緑, 青色光に対する生体電位を調べた。赤や緑に対して生体電位の変動が大きいのが青色光に対しては変動が小さくなることが分かった。今回の実験においては, 照射される太陽光の光周波数に対して生体電位の変動を把握することが目的の一つであった。今後, 様々な環境要因が各積分生体電位にどの程度影響を与えるかを調べる予定である。特に, 光周波数による生体電位の変動と植物のどの部分の成長に寄与しているかの調べる予定である。また, 植物環境センサの可能性について検討を行い, 植物の生育管理に生体電位を応用する方法についても検討を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は平成18年度科学研究補助金基盤研究(B)18310062を得て行われたものである。ここに記して感謝申し上げる。

文 献

- (1) D. C. Wildon, J. F. Thain, P. E. H. Minchin, I. R. Gubb, A. J. Reilly, Y. D. Skipper, and D. J. Bowles, Electrical Signaling and Systemic Proteinase Inhibitor Induction in the Wounded Plant. *Nature*, 360, 62-65 (1992)
- (2) Takashi OYABU, Ayako SAWADA, Hiroyuki KURODA, Tomoaki HASHIMOTO and Takayuki YOSHIOKA: "Purification Capabilities of Golden Pothos and Peace Lily for Indoor Air Pollutants and Its Application to a Relaxation Space", *Journal of Agricultural Meteorology*, Vol.60, No.6, pp.1145-1148 (2005.8)
- (3) V. I. Lohr, C. H. Pearson-Mims, and G. K. Goodwin: "Interior Plants May Improve Worker Productivity and Reduce Stress in a Windowless Environment", *J. Environ. Hort.*, Vol.14, No.2, pp.97-100 (1996)
- (4) H. Matsuoka and M. Saito: "Development of The Environmental Sensor Function in A Plant Leaf", The Chemical Society of Japan, 1995, No.6, pp.415-425 (1995) (in Japanese)
松岡英明, 斉藤美佳子: "植物生葉の環境センサー機能の開発", *日本化学会誌*, 1995, No.6, pp.415-425 (1995)
- (5) Takashi Oyabu, Yuki Hasegawa, Teruaki Katsube and Hidehito Nanto: "Plant Bioelectric Characteristics and Profitable Merchandising", Vol.11, No.4 (August), pp.239-244, *An International Journal of Asia Pacific Management Review* (ISSN 1029-3132) (2006)
- (6) T. Shimbo, T. Higashino, T. Oyabu, H. Kimura, and H. Nanto: "Response of Plant Bioelectric Potential due to Wind Intensity", *IEEEJ Transactions on Sensor and Micromachines*, Vol.126-E, No.7, pp.370-375 (2006) (in Japanese)
新保達也, 東野翼, 大藪多可志, 木村春彦, 南戸秀仁: "風速変化に対する植物生体電位応答", *電気学会論文誌 E*, Vol.126-E, No.7, pp.370-375 (2006)
- (7) T. Shimbo, T. Oyabu, S. Hirobayashi, and K. Takenaka: "Statistical Analysis of Plant Bioelectric Potential for Communication with Humans", *IEEEJ Transactions on Sensor and Micromachines*,

Vol.124-E, No.12, pp.470-475 (2004) (in Japanese)
新保達也, 大藪多可志, 広林茂樹, 竹中幸三郎: "コミュニケーションを目的とした植物生体電位の環境認知", 電気学会論文誌 E, Vol.124-E, No.12, pp.470-475 (2004)

- (8) 田中格: "落葉広葉樹 7 種の陽葉と陰葉における光-光合成曲線の曲率", 日本生態学会誌, 52, pp.229-232 (2002) T. Tanaka: "Convexity index in photosynthetic light response curve of seven species of deciduous broad-leaved tree", Japanese Journal of Ecology, 52, pp.229-232 (2002) (in Japanese)
- (9) 桜井英博, 柴岡弘郎, 芦原坦, 高橋陽介: "植物生理学入門", 培風館 (2001)

原稿受付日	平成 19 年 10 月 17 日
-------	-------------------