栽培環境制御のための植物生体電位計測に関する研究 (第1報)

ホウレンソウの葉面電位計測

内 田 徹・中西 美一・浦田 真紀

株式会社四国総合研究所

Studies on Measurement of Bioelectric Potential of Intact Plant
for the Environmental Control (Part 1)Measurement of Bioelectric Potential on the Surface of *Spinach lamina*

Toru UCHIDA, Yoshikazu NAKANISHI and Maki URATA

Shikoku Research Institute Inc., Takamatsu 761-01, Japan

In order to develop the environmental control system based on plant responses, the bioelectric potential transition patterns on *Spinach lamina* in response to light-on were measured as an useful plant physiological information.

The obtained results are summarized as follows;

- 1) This bioelectric potential transition patterns when light on were changed by air temperature, relative humidity, CO₂ concentration, light intensity, plant growth and dying process.
- 2) One specific peak of this pattern was related with the rate of photosynthesis.
- 3) This peak related with photosynthesis was similar to photoelectric potential pattern on spinach chlorophyll in response to CO₂ concentration.
- 4) A vibration of the bioelectric potential appeared in photoperiod, and the amplitude and cycle time of this vibration were increased by decrease of CO₂ concentration or increase of light intensity.
- 5) Therefore, it is possible to hypothesize that the bioelectric potential on lamina is superposition of bioelectric potentials on chlorophyll due to the photosynthesis and respiration.

(Received May 7, 1990)

1990年5月7日受付

緒 言

植物の生体情報の一つとして、生体電位は植物の成長、光合成、物質代謝など生命活動と密接に関わっていると考えられる。

従来、植物生体電位計測の研究は、微小電極を用いて細胞レベルの電気現象をとらえることを中心に発展してきたが、最近、栽培状態のまま非破壊的、マクロ的に電気現象を把握する研究¹⁻⁹⁾が行われはじめ、長期間安定に計測するシステム¹⁾、あるいは非接触で計測するシステム^{8,9)}も開発されつつある。そして、植物の生体情報

を栽培システムに取り込み、より高度な栽培環境制御システムの構築をめざす SPAEC (speaking plant approach to the environmental control) の研究^{10,11)}が行われはじめた。

本研究では、植物工場等で高度集約栽培の研究が進められていながら、生体電位についてはほとんど計測されていない軟弱野菜類を計測対象とし、栽培環境制御へ適用するためのパターン化の試みとして、光の点灯に伴うホウレンソウの葉の表面電位 (葉面電位) の過度変化の波形に着目して、波形の各ピークと栽培環境条件、生育状態との定性的関係を調べた。

材料および方法

1. 供試植物

植物の葉面電位計測にはハウレンソウ“リード”(*Spinacia oleacea* × *hybrida* “Lead”) の養液栽培のものを供試した。なお、供試用植物の育苗、生育は当社の植物工場研究設備においてほぼ一定の環境条件のもとで行い、播種後3週間目に計測装置内へ移植した。

実験に際しては、供試用植物を計測装置内に移して、3日以上その環境に順応させた後に電位計測を開始した。

2. 計測システム

葉面電位の測定は、Fig. 1 に示すとおり生体-信号増幅回路-記録計の系で行い、植物体葉面と根圏培養液との間の電位差を測定した。なお、信号増幅回路には高精度計装用増幅器 AD 524 (Analog Devices 社製) を用いた。

実験の環境設定には、地上部の気温、湿度、CO₂ 濃度を制御できるチャンバー、地下部の培養液の温度、水位を制御できる養液制御装置および人工照明設備から成る養液栽培試験装置 (島津製作所製) を用いた。なお、人工照明はメタルハライドランプ (三菱電機製 BOC ランプ) を用いた。

また、本装置には、地上部のチャンバーの出入口のCO₂ 濃度差および温湿度差から、光合成、蒸散速度を計測するシステムを設置している。

3. 葉面電位計測用電極

立毛状態の植物の葉面電位を非破壊的、マクロ的に、しかも長期間安定して測定するために、生体表面から電位を導出する表面電極を用いた。

試作した表面電極は平尾、荒井¹⁾ の開発したフェルト電極と同様の構造のもので、Fig. 2 に示すとおり生体-電解質溶液-銀線 (Ag-AgCl)-信号増幅回路の系により生体表面電位を導出するものであり、電解質は KCl とし、電極の保水性を高めて使用時間を長くするために、含水性高分子材 (日本光電工業製、P-150 型電極用) を加えている。

なお、比較電極 (銀板 Ag-AgCl) は根圏部の養液中に設置した。

本方法は微小電極を用いた細胞膜電位測定に比べ、植物体への設置が簡単 (たんに葉を挟むだけでよい)、植物体の固定が不用、植物体の電磁シールドが不用 (電極から信号増幅回路までのシールドのみでよい)、計測系が簡易、1 カ月以上の長期間連続計測が可能という利点がある。

Fig. 1 Block diagram of measurement system. a: Lamp, b: Plant, c: Shoot chamber, d: Shading panel, e: Root chamber, f: Nutrient solution control system, g: Air control system, h: Measurement system of CO₂ uptake and transpiration, i: Amplifier, j: Recorder, k: Bubbler, l: Electrode for measurement, m: Reference electrode.

Fig. 2 Construction of the measurement electrode on the surface of plant.

a: Supporting plate of sample, b: Plastic box, c: Felt, d: Fulcrum, e: Spring, f: Electric wire (Ag-AgCl), g: Sample, h: Electric shield, i: Gel included solution (KCl).

4. 計測試験方法

計測試験は、環境条件 (気温、湿度、炭酸ガス濃度、光強度、液温など) がある一定のもとで、人工光源 (ノ

タルハライドランプ) を点灯および消灯したときの葉面電位の過渡的变化を計測するもので、明暗周期は葉面電位、光合成、蒸散の過渡的变化が十分安定する時間として明期 4 時間、暗期 4 時間を設定した。

なお、培養液の更新は暗期の中間ごとに行い、培養液の処方は大塚ハウス肥料の 1 号と 2 号を 3:2 の比率で混合し電気伝導度を 1.8 mS/cm としたものである。

結果と考察

1. 葉面電位の計測例

1) 同一個体の 3 カ所の同時計測例

同一個体の本葉の第 1～第 3 葉位 (最初に展開した本葉を第 1 葉位とした) の葉面電位の同時計測例を Fig. 3 に示す。人工光の点灯時および消灯時の過渡変化波形は計測点による差が若干あるものの、かなり類似したパターンを示した。

ここで、平尾・荒井¹⁾に準じて、点灯時の各ピークを Fig. 4 に示すとおり時系列順に、n-1, n-2, n-3, n-4 と名づけ、これらピークの高さや位置により波形を特徴づけることとした。

2) 生育段階の異なる個体の計測例

生育段階の異なる個体の葉面電位計測例を Fig. 5 に示す。生育段階による差は、ピーク n-4 の高さに顕著に現れ、生育段階が早いほど n-4 のピークが高くなった。

3) 気温を変化させた場合の計測例

気温 (チャンバー入口) を 25°C → 20°C → 25°C と変化させた場合の計測例を Fig. 6 に示す。気温の変化により各ピーク位置に顕著な差が現れ、気温が高いほどパターンの変化速度が速くなり、シャープな波形が得られた。

4) 相対湿度を変化させた場合の計測例

相対湿度 (チャンバー入口) を 40, 50, 60, 70% と変化させた場合の計測例を Fig. 7 に示す。

相対湿度の変化によりピーク n-2 および n-4 の高さに差が現れ、相対湿度が高いほど n-2 および n-4 のピークが高くなる傾向が認められた。

5) 葉が枯死する過程の計測例

葉が枯死する過程の計測例を Fig. 8 に示す。

枯死過程において、ピーク n-1 には変化が現れなかったのに対し、ピーク n-2, n-3, n-4 は枯死にしたがってしだいにピークが低くなった。

6) 炭酸ガス濃度を変化させた場合の計測例

炭酸ガス濃度 (チャンバー入口) を 50, 100, 400, 600 ppm と変化させた場合の計測例を Fig. 9 に示す。炭酸ガス濃度の変化によりピーク n-3 の高さに顕著な差が現

Fig. 3 Comparison of bioelectric responses on three *Spinach laminae*.

Air temperature : 20°C,
Relative humidity : 60%,
CO₂ concentration : 600 ppm,
Water temperature : 20°C,
Light intensity : 190 $\mu\text{E}/\text{m}^2\cdot\text{sec}$.

Fig. 4 Bioelectric potential transition pattern on the surface of *Spinach lamina*.

n-1 ~ n-4: Four characteristic peak when light on.

Fig. 5 Effect of growth on the bioelectric response of *Spinach lamina*.

Air temperature : 20°C,
Relative humidity : 60%,
CO₂ concentration : 600 ppm,
Water temperature : 20°C,
Light intensity : 190 $\mu\text{E}/\text{m}^2\cdot\text{sec}$.

Fig. 6 Effect of air temperature on the bioelectric response of *Spinach lamina*.
Relative humidity: 60%, CO₂ concentration: 600 ppm, Water temperature: 20°C,
Light intensity: 190 $\mu\text{E}/\text{m}^2\cdot\text{sec}$.

Fig. 7 Effect of relative humidity on the bioelectric response of *Spinach lamina*.
Air temperature: 20°C, CO₂ concentration: 600 ppm, Water temperature: 20°C, Light
intensity: 190 $\mu\text{E}/\text{m}^2\cdot\text{sec}$.

Fig. 8 The bioelectric potential patterns on *Spinach lamina* during process of dying.
Air temperature: 20°C, Relative humidity: 60%, CO₂ concentration: 600 ppm, Water
temperature: 20°C, Light intensity: 190 $\mu\text{E}/\text{m}^2\cdot\text{sec}$.

れ、炭酸ガス濃度が高いほど n-3 のピークが深くなった。また、明期の葉面電位の振動現象は、炭酸ガス濃度が低くなるほど振幅が大きく、周期が長くなる傾向がみられた。

7) 光強度を変化させた場合の計測例

光強度を 110, 190, 340 $\mu\text{E}/\text{m}^2\cdot\text{sec}$ と変化させた場合

の計測例を Fig. 10 に示す。

光強度の変化による差は炭酸ガスと同様にピーク n-3 の高さに顕著に現れ、光強度が強いほど n-3 のピークが深くなった。また、光強度が強くなるにつれて明期の葉面電位の振動現象が顕著になった。

Fig. 9 Effect of CO_2 concentration on the bioelectric response of *Spinach lamina*.
Air temperature: 20°C , Relative humidity: 60%, Water temperature: 20°C , Light intensity: $340 \mu\text{E}/\text{m}^2\cdot\text{sec}$.

Fig. 10 Effect of light intensity on the bioelectric response of *Spinach lamina*.
Air temperature: 20°C , Relative humidity: 60%, CO_2 concentration: 600 ppm, Water temperature: 20°C .

2. 光合成と葉面電位との関係

葉の枯死過程の計測例から、点灯時のピークのうち $n-1$ は植物の生命活動と関係ない受動的な変化であるのに対し、ピーク $n-2$, $n-3$, $n-4$ は生命活動と関係した能動的な変化であると考えられた。

しかも、炭酸ガス濃度、光強度を変化させた計測例により、ピーク $n-3$ は光合成との関連が、また、湿度を変化させた計測例により、ピーク $n-2$ および $n-4$ は植物の水分生理との関連が推定される。

Fig. 11 は、栽培環境条件のうち光強度を 110, 190, $340 \mu\text{E}/\text{m}^2\cdot\text{sec}$ 、相対湿度を 45~70% の範囲で変動させた場合の葉面電位のピーク $n-3$ の高さと言光合成速度との関係を示したものであり、両者の間には強い相関がみられた。

しかしながら、この試験では葉面電位のピーク $n-2$ および $n-4$ の高さに関しては、湿度や蒸散速度との相関が得られず両者の関係は単純ではないと考えられ、また、ピーク $n-3$ と光合成速度との関係にもばらつきがみられ

Fig. 11 Relation between whole plant's CO_2 uptake and the height of peak $n-3$ on the bioelectric response.

Air temperature : 20°C ,
 CO_2 concentration : 600 ppm,
Water temperature : 20°C .

ることから、たんにピーク高さをパラメータにとるよりもむしろ葉面電位の過渡変化波形のモデル化を行って、そのモデルのパラメータ解析を行うべきであると考えら

れる。

3. 葉面電位の光に対する過渡変化モデル

宮武・島田¹²⁾は、ハウレンソウの葉緑体溶液に対し炭酸ガスを暴露させた場合、明期にのみ負方向の生体電位変化が生じ、また、酸素ガスを暴露させた場合には、明期、暗期のいずれにおいても正方向の生体電位変化が生じると報告している。

葉緑体のこれらの生体電位変化はそれぞれ光合成および呼吸作用に関連したものと思われるが、本計測において、光合成速度と相関がみられたピーク n-3 は、葉緑体の炭酸ガスに対する過渡変化波形とかなり類似している。

このことから、本計測で得られた葉面電位の過渡的な変化の波形は、個々の葉緑体の光合成および呼吸作用による生体電位の重ね合わせであるというモデルが考えられる。

今後、これらの関係について逐次検討を進め、モデル化を試みたいと考えている。

結 言

本研究において、栽培状態のハウレンソウの葉面電位について、点灯時の過渡変化波形に着目して計測した結果、気温、湿度、炭酸ガス濃度、光強度、生育段階、枯死など栽培環境条件や生育状態により波形が特異的に変化することがわかった。

さらに、過渡変化波形のうちのピーク n-3 の高さは光合成速度との相関がみられた。

また、このような葉面電位の過渡変化について、葉緑体の光合成作用、呼吸作用による生体電位の過渡変化の重ね合わせとしてのモデル化の可能性を見いだした。

また、栽培への応用に関しては、本研究で用いた葉面電位計測の系は、計測用電極-信号増幅回路というセンサーとしては簡易なもの（材料費1万円程度）であり、また、特に電磁シールドを施す必要がないため実際の栽培施設への適用が可能である。また、本研究で行った点灯時（消灯時）の葉面電位の過渡変化に着目した解析については、葉面電位計測データのパターン化が容易に行えるという利点があり、植物工場など補光ランプを用い

た栽培施設において栽培支援システム¹³⁾に組み込むことにより、ランプ点灯時や消灯時の栽培環境条件、生育状態などの自動評価や栽培環境制御に適用できるものと考えられる。

なお、本論文の作成にあたり愛媛大学農学部 橋本 康教授より貴重なご助言をいただきました。ここに、深く感謝いたします。また、本研究の推進にあたりご助言をいただいた農業生物資源研究所 荒井成彦博士、平尾常男博士、東京農工大学工学部 鹿野快男教授、電力中央研究所 関山哲雄博士をはじめ関係各位に厚くお礼を申し上げます。

文 献

- 1) 平尾常男・荒井成彦. 1988. 植物生体電位計測システムの開発. 農業生物資源研究所研究報告 4: 65-92.
- 2) 関山哲雄・羽生広道・岡部勝美. 1982. 環境ストレスに対する植物生体反応の連続測定法の開発. 電力中央研究所研究報告 481016: 1-33.
- 3) 関山哲雄・羽生広道. 1985. 植物生体の電気特性測定法 (1). 電力中央研究所研究報告 484002: 1-19.
- 4) 関山哲雄・羽生広道・斉木 裕. 1989. 植物生体の電気特性測定法 (3) 水耕液 pH 調整への適用. 電力中央研究所研究報告 U89023: 1-19.
- 5) 三輪敬之. 1984. 植物生体情報システム. 精密機械 50: 12-18.
- 6) 三輪敬之・楠橋康博・町田浩章. 1987. カボックの葉表面における生体電位変化について. 生物環境調節 25: 123-125.
- 7) 笹川雅幸・楠橋康博・三輪敬之. 1988. 植物の音刺激に対する応答挙動に関する研究. 昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集: 543-544.
- 8) 鹿野快男・長谷部信也・大政謙次. 1988. 二重電極による植物表面電位計測. 生物環境調節 26: 79-82.
- 9) 鹿野快男・長谷部信也・川口 泉. 1989. MOSFET のチャンネルチョッピングによる表面電位計測器. 第28回計測自動制御学会学術講演会予稿集: 577-578.
- 10) 橋本 康. 1986. 施設を用いた植物生産 (1). [1] 施設生産とは. 遺伝 40(1): 80-84.
- 11) 橋本 康・森本哲夫・船田 周・杉 二郎. 1981. 植物生育のプロセス同定とその最適制御 (XI). 葉温をモニターとする植物生育の最適制御. 生物環境調節 19: 103-111.
- 12) 宮武直樹・島田道彦. 1989. 葉緑素に関する生体電位の計測. 第28回計測自動制御学会学術講演会予稿集: 349-350.
- 13) 中西美一・内田 徹. 1989. 実用型栽培支援システムの開発. 生物環境調節 27: 145-147.