

[タイトル] 植物体の簡単な電氣的等価回路モデル I

Simple electrical equivalent circuit model of plants I

[抄録(要旨)] 細胞組織の電氣的等価回路3つを各々、葉に相当するソース部、果実に相当するシンク部、根に相当するルート部に見立てて、植物体全体を表す電氣的等価回路モデルを作成した。このモデルのソース部に1日サイクルの変動電位を与えることで、ソース-ルート間、ソース-シンク間で生じる電位変動をシミュレートした結果を報告する。

[著者名] 奥島 里美 (Okushima Limi)

[所属機関] 農研機構九州沖縄農業研究センター研究推進部

(Department of Research Promotion, Kyushu Okinawa Agricultural Research Center, NARO)

[責任著者と電子メールアドレス] 奥島里美, green@zy.sunnyday.jp

[キーワード] 電氣的等価回路モデル (electrical equivalent circuit model), 植物体 (plants)

[利益相反] 示すべき利益相反関連事項はありません。

[著者の貢献] 全部

植物体の簡単な電氣的等価回路モデル I

2022.3.23 奥島里美

[諸言] 植物の細胞膜や液胞膜等に形成される電位は浸透、イオン輸送、化学ポテンシャル、細胞の伸長などの生体活動と密接に関連している。高等植物の細胞内外では、イオン濃度差による“拡散電位”や H⁺ポンプによる“代謝依存性電位”が発生している。H⁺により形成された電気化学ポテンシャルの勾配がアミノ酸、糖などの有機物輸送へとつながる。また光、温度などの物理的刺激と大気中や地中の化学物質による刺激が細胞膜に“活動電位”を発生させる¹⁾。そのため、細胞膜のイオンチャンネルの活動などがこれらの電位から詳細に調べられてきた。

さらに、個々の細胞は原形質連絡によって互いに結ばれているため、細胞組織全体が電氣的に一つの巨大な細胞のようにふるまうことが知られている。そのため、細胞組織の電氣的特性についてモデルが提案されている。その中で Hayden の電氣的等価回路モデルが有名である。Hayden モデルでは、巨大な細胞の細胞膜に相当する部分の電氣的構造は電気容量と抵抗の並列回路とみなされる。この細胞膜回路に細胞組織内部の抵抗と外部の抵抗がそれぞれ直列と並列につながっている(図1)。この回路のインピーダンス(電気容量と抵抗)は、それ自体が組織の活性度の指標として果実の熟度や鮮度、腐敗の判定あるいは根の成育監視などに利用できることから、盛んに測定されている¹⁾。

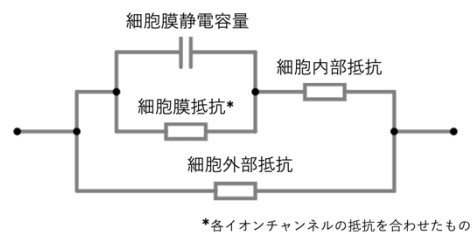


図1. Hayden Model

本稿では、細胞組織の電氣的等価回路3つを各々、葉に相当するソース部、果実に相当するシンク部、根に相当するルート部に見立てて、植物体全体を表す電氣的等価回路モデルを作成した。このモデルのソース部に1日サイクルの変動電位を与えることで、ソース-ルート間、ソース-シンク間で生じる電位変動をシミュレートしたのでその結果を報告する。

[方法] 作成したモデル(図2)のシンク部はガルトオレンジの果実の等価回路として提唱されたモデル²⁾を採用した。オレンジの果肉が中皮、外皮に包まれているのを表現するかのように入子構造の回路になっている。ソース部はキャベツの単一葉の等価回路モデル³⁾を利用した。これは double shell model と呼ばれ、R1 が細胞外抵抗、R2 が細胞質抵抗、R4 が液胞内部抵抗、C3 が原形質膜の静電容量、C5 が液胞膜静電容量を意味する。ルート部は極めて単純に根の通水機能のアナロジーから細胞間経路とアポプラスト経路の2抵抗を並列に配置した。

抵抗値、静電容量値は組織の活性度を表す指標なので、条件によって変化するが、一般に細胞膜の抵抗は $100 \sim 100 \text{ k} \Omega / \text{cm}^2$ 、電気容量は $1 \sim 10 \mu \text{F} / \text{cm}^2$ とされる¹⁾。ここではその範囲内で適当な仮定値を設定することとした。

この植物体モデルに、外部環境等からもたらされる日周期の起電力として、24時間を1サイクルとするサイン波形の電圧源部を設けた。トランジスターを介することで、

ソース部の細胞質の活性に応じてこの起電力が供給される仕組みとした。計算には電子回路シミュレーションソフトウェアを用いた。

[結果] 電圧源(図 3(a)) の 1 周期を昼夜で 24 時間とみなすと、ルート-ソース間(b)の電圧は日の出から上昇し、約 3 時間後にピークになる。その後夕方にマイナスまで低下した後、夜間は正の低電圧を維持した。ソース-シンク間(c)の電圧は日中マイナスで、午後上昇し始め日没後に最大となる。夜間は徐々に低下しながら正電圧を維持した。図 4 はオレンジ果 (クレメンタイン) の相対成長速度 (RGR) を湿度 (VPD)、日射 (PAR) とともに実測した例である⁴⁾。この RGR と(c)のパターンに類似性があるように思われ、細胞組織の電気的特性だけから植物体での成長速度を予測できる可能性を示唆しているのかもしれない。今後、検証を要する。

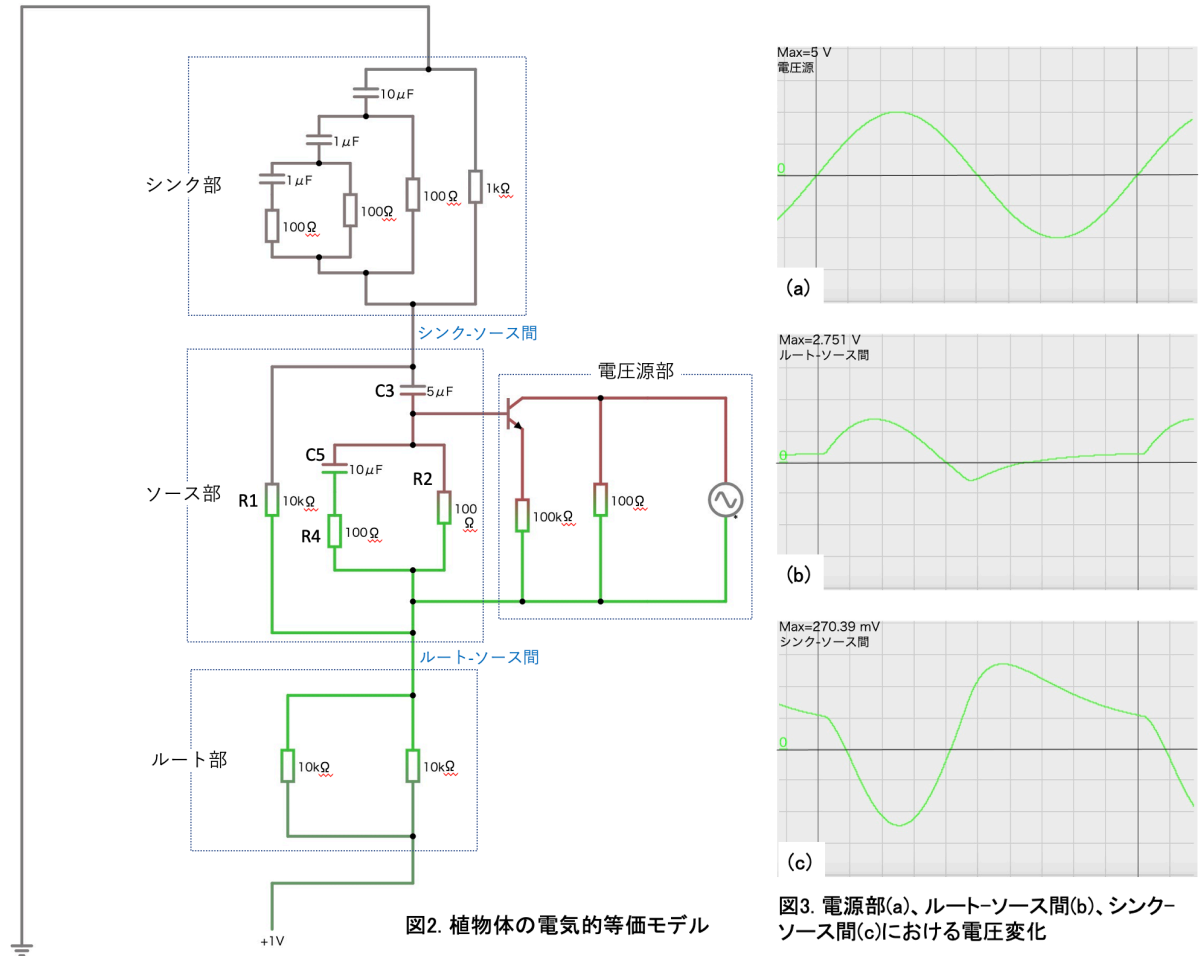


図2. 植物体の電氣的等価モデル

図3. 電源部(a)、ルート-ソース間(b)、シンク-ソース間(c)における電圧変化

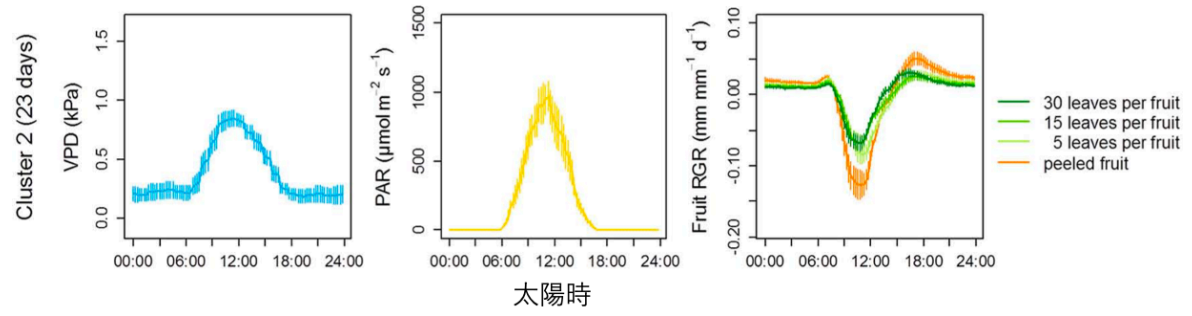


図4. 湿度 (VPD), 日射 (PAR), クレメンタイン果の相対成長速度 (RGR) (文献4)のFIGURE 7より抜粋)

引用文献：

- 1) 大藪多可志・勝部昭明（編）（2009）植物生体電位とコミュニケーション，pp.156，海文堂出版（株）。
- 2) J. Juansah *et al.* (2012) Electrical Behavior of Garut Citrus Fruits During Ripening Changes in Resistance and Capacitance Models of Internal Fruits. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol:12. No:04., p.1-8.
- 3) M. I. N. ZHANG and J. H. M. WILLISON (1993) Electrical Impedance Analysis in Plant Tissues: Impedance Measurement in Leaves. Journal of Experimental Botany, Vol. 44, No. 265, pp. 1369-1375.
- 4) F. Pantin *et al.* (2013) Buffering growth variation against water deficits through timely carbon usage. Frontiers in PLANT SCIENCE, Vol. 4, Article 483, pp. 1-11.