

樹木の葉組織の簡易な装置によるインピーダンス測定

川端自人・山城竜哉・大谷内久憲・鍛代邦夫・本江一郎(日大生物資源)

要旨: 生体のインピーダンスは、細胞の活性度や生体内の含水量をあらわすとされている。市販されている積水化学工業(株)製の体脂肪計 MLT-30 を使用して、簡易的に数日~1週間連続したインピーダンス測定し、樹木の活性度とその時間変化を調べた。マテバシイの葉の測定を行なった結果、安定した測定ができ、葉の定常状態や乾燥過程を観察することができた。インピーダンスの解釈に必要な等価回路を元に、葉組織のモデル化を行い、測定条件を変えたときのインピーダンス値の変化を解釈してみた。インピーダンス値の変化から、樹木の葉の生理活性状態を推定できることが分かった。今後、いろいろな条件で葉の測定データを蓄積することで、森林管理、果樹管理、樹勢回復の現場で活用できると考える。

キーワード: 生体インピーダンス、膜容量、内液抵抗、外液抵抗、活性度

I. はじめに

生物組織の電気的測定に、インピーダンスを用いる方法は、これまでの多くは食品の品質検査や、木材の含水率の分析のために行われている(1,5)。植物組織の活性度を知る目的での測定は、樹幹細胞での測定例(4)はあるが、葉組織での例はまだ無い。

インピーダンスの測定には、通常は工業用のインピーダンスアナライザーが使われる。これは汎用目的に作られているため、測定できる周波数帯域が $\mu\text{Hz} \sim \text{MHz}$ 、測定インピーダンス範囲も $\text{m}\Omega \sim \text{M}\Omega$ と幅広く、かつ高精度を実現しているため数百万円もする高額なものが多い。

積水化学工業(株)製の体脂肪計 MLT-30 は、1台十数万と低価格で、人体組織のインピーダンスを測定できる。この装置を使用して樹木の葉組織のインピーダンスを測定することを試みた(2)。

植物の葉に交流電流を流すと、図-1のような葉の組織構造から、細胞表面あるいは導管中の水分を通過する電流(A)と細胞内を通過する電流(B)とが生じる。

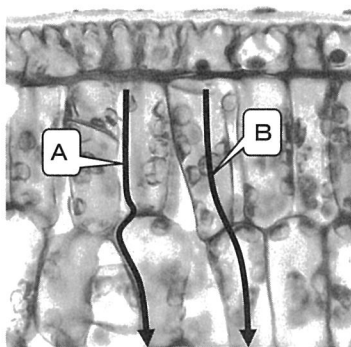


図-1 葉の柵状組織

モデルとなる電気的等価回路を想定すると図-2 のようになる。この中では、R1を細胞内液抵抗、Cを細胞膜容量、R2を細胞外液抵抗と呼ぶことができる(1,3,4)。

周波数 f を変えながら交流電流 I を流し、測定対象に生じ

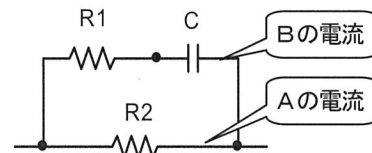


図-2 葉組織の電気的等価回路

る電圧 E を測定することで、インピーダンス値や等価回路における C 、 $R1$ 、 $R2$ を計算で求める。これらの値は定性的には次のような性質を持つとされる(1,3)。

C : 細胞膜の健全度。細胞膜の劣化、損傷により減少する。

$R1$: 細胞内液の乾燥やイオン濃度の変化により増減する。

$R2$: 細胞外液の乾燥やイオン濃度の変化により増減する。

樹木の葉のインピーダンスを、より簡易な方法で測定することで、葉の細胞の劣化状態や水ストレスの状態を推定することを試みた。

II. 測定方法

MLT-30 は、2.5KHz~350KHz の帯域について、140ポイントの周波数でインピーダンスを測定する。1回の測定時間は10秒程度であり、電池で動作し、コンパクトなので野外での使用も可能である。また内蔵メモリを使用することで、2分間隔で約3日間の連続測定が可能である。

測定対象は、事前に試行した結果、安定して測定でき、入手しやすいマテバシイの葉を選んだ。電極数は、葉の表裏の両面に電極を1つずつ付ける二電極法で行った。電極には人体測定用のゲル付き専用電極(直径10mm)を使用した(図-3)。

試行時に、葉の両面に電極を貼りつけただけでは測定エラーとなることが分かった。表面のクチクラ層の抵抗が大き過ぎるためと考え、紙やすりでクチクラ層を取り除いて測定した。

Yorihito KAWABATA, Tatuya YAMASIRO, Hisanori OYACHI, Kunio KITAI, Ichirou HONGO (College of Bioresources Science Nihon Univ., 1866 Kameino Hujisawasi Kanagawaken 252-8510) The impedance measurement with a simple device of the tree leaf organization



図-3 MLT-30 での測定状況

測定条件としては、通常の生理活動をしている状態、枝から切り離すことで乾燥により生理活動を停止するまでの状態、枝から切り離し生理活動を停止するまでだが、日照などの環境変化を無くした状態の3条件とした。

III. 結果

1. 枝についたままの葉の測定

屋外で、枝についたままの葉(「枝つき葉」と呼ぶ)をビ



図-4 屋外での測定

ニールシートで雨よけをし、直射日光が当たらない状態で3日間測定した(図-4)。

図-5 に測定したインピーダンスを複素平面上に表した ColeCole プロットを示す。ColeCole プロットは、1つの静電容量を持つ回路の特徴を示す半円の一部の形状となり、モデルとした等価回路が妥当であると判断できる。

ColeCole プロットでは、初めの3時間でインピーダンス値が大きく変化し、その後は大きく変化していないことが分かる。

内液抵抗、外液抵抗、膜容量の変化を図-6 に示す。このグラフでも各値は、開始直後からの数時間で大きく変化している。測定開始2日目からは外液抵抗と膜容量とに、日次の変動のような変化が現れた。内液抵抗は変化が少なく安定している。また、データの PC への転送前後のデータ

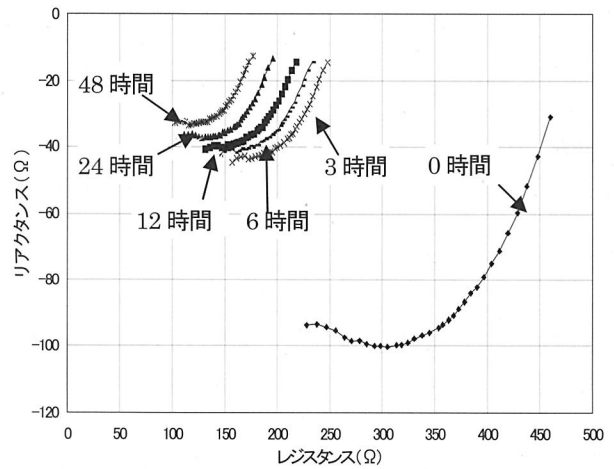


図-5 枝つき葉の ColeCole プロット

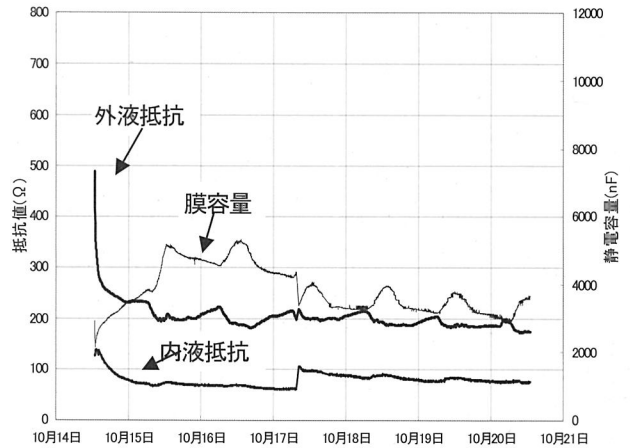


図-6 枝つき葉の変化

に不連続部が生じている。

2. 暗室での葉の測定

枝から切り離し、1時間ほど置いたマテバシイの葉を1枚(一枚葉と呼ぶ)、暗室に置き環境変化がないようにした状態で5日間連続測定した。測定終了時の葉裏は、全体的には緑が濃い、ゲル接触部分と葉脈を中心に褐変が進んでいた(図-7)。

図-8 は、内液抵抗、外液抵抗、膜容量の変化である。

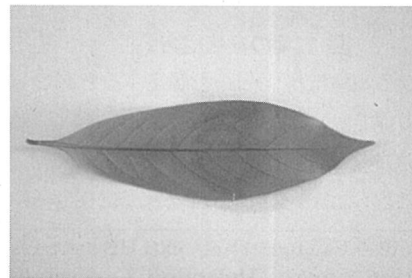


図-7 測定後の葉裏

膜容量は初めの 12 時間ほどは急激な増加を示し、その後は漸的に増加している。山本らによる樹木の幹の測定では、伐採後の膜容量値は大きく減少する(4)が、今回の葉の測定では反対の結果となった。

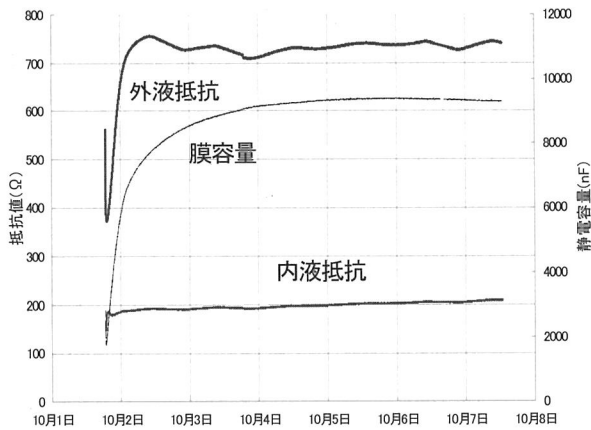


図-8 暗室での一枚葉の変化

内液、外液の抵抗値はそれぞれ測定開始直後に大きく変化した後、数時間で安定した値となった。特に外液抵抗は、開始当初は減少し約 30 分後に上昇に転じている。

外液抵抗が大きく反転するまでの 30 分を除外した ColeCole プロットを図-9 に示す。グラフ上の円弧は、リアクタンス、レジスタンスが共に大きくなる方向に変化し、6~12 時間を経過後は安定した。

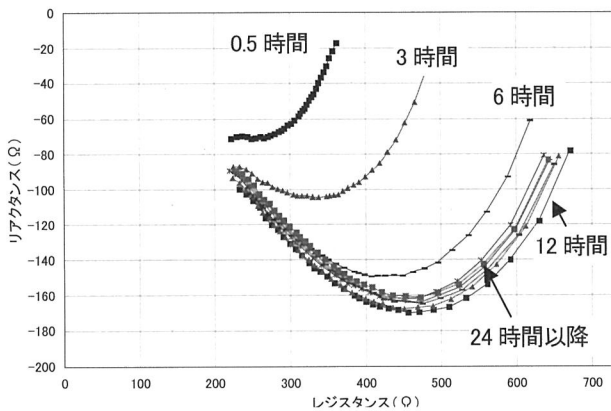


図-9 暗室での一枚葉の ColeCole プロット

3. 通常室内での一枚葉の測定

枝から切り離したマテバシイの葉を、空調のきいた室内に置き環境変化が少ないようにした状態で測定した。同時に葉の質量の変化も測定した。

図-10、11、12 に外液、内液抵抗、膜容量の変化、ColeCole プロット、葉の質量変化を示す。各測定値は、暗室での値

と異なるが、6~12 時間を経過すると一定の値の範囲に安定する。質量は初め大きく減少後、ほぼ一定速度になる。

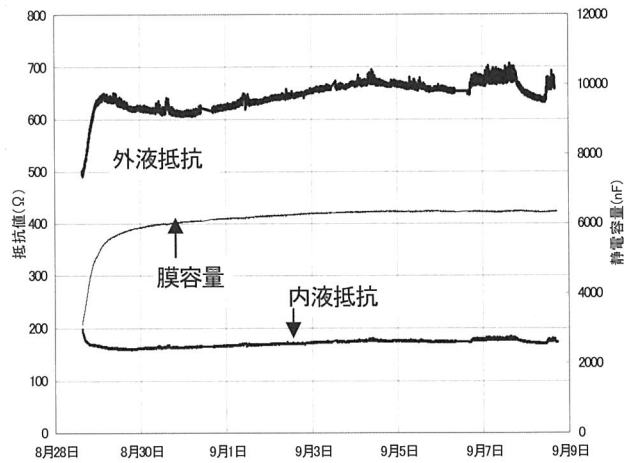


図-10 室内での一枚葉の変化

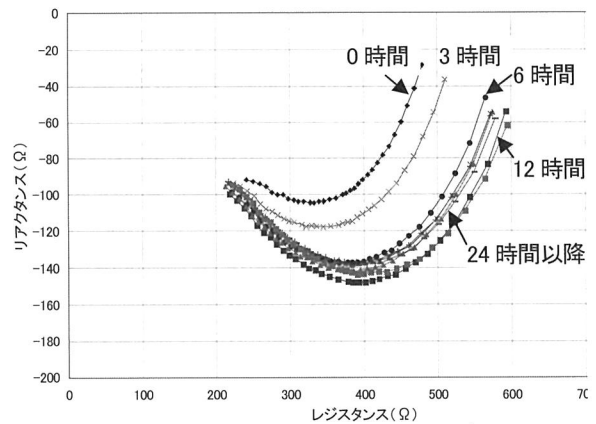


図-11 室内での一枚葉の ColeCole プロット

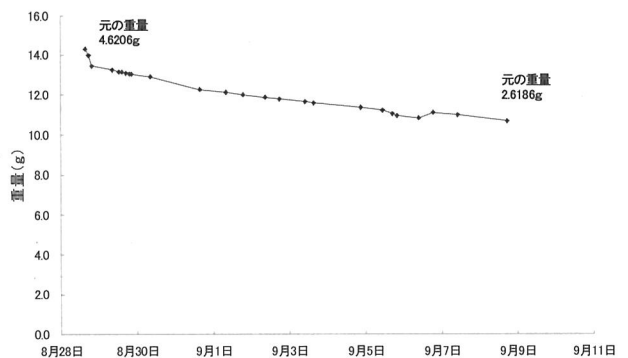


図-12 一枚葉の質量変化

IV. 考察

1. 枝つき葉のインピーダンス変化

電極部分のクチクラ層を削り取ってはいるが、枝についたままの葉は生命活動を続けていると考えられる。

測定初めから約 3 時間以降に安定した状態になることから、使用した電極では設置後、一定時間をおいてからのデータを取る方が望ましいと言える。

初めの 3 時間のインピーダンス変化の理由はまだ未調査だが、電極の試料表面との馴染み、およびクチクラ層の剥ぎ取りや電極ゲルによる試料の変化が影響していると考えられる。

初期変化の現象は、特に外液抵抗値に影響する。暗室での測定の際の、外液抵抗の初めの大きな減少も、この電極の馴染み現象と考えられる。測定結果から電極の馴染み現象の影響は、初めの 30 分前後までが大きいと言える。

外液抵抗と膜容量は大きく、内液抵抗も微弱だが日次変化を示している。昼と夜の差で表現すると以下のように分かることが分かった。

- ・外液抵抗: 明け方に増大のピークがあり、昼間は下がる。減少ピークは不明。
- ・内液抵抗: 全体的に変化は小さいが、昼過ぎに増大の小さいピークを示す。
- ・膜容量: 明け方に減少のピーク、昼過ぎに増大のピークがある。

2. 一枚葉のインピーダンス変化

枝つき葉とは異なり、一枚葉は枝から離れたときから乾燥が継続的に続く。従ってインピーダンスの変化は、葉の乾燥過程の変化と見ることが出来る。

測定の初めに電極の馴染み現象が現れる場合と現れない場合があった。測定開始直後に、外液抵抗の大きな減少が現れたらその部分を除外して考察した。

葉の乾燥により、室内での質量の変化は 5 日間ほぼ一定速度で減少している。葉の乾燥が進むことにより細胞表面の水分が乾燥、つまり外液がまず減少し、細胞内液が追って減少すると考えられる。外液抵抗値は初めに急激に増大した後は、微妙に増減しながら増加する傾向にある。内液抵抗値は、初めに増加あるいは減少はあるが、後は非常に安定したまま増加している。

従って ColeCole プロットにおける測定開始から 6~12 時間までのインピーダンス変化は、葉肉細胞表面の乾燥に

よる外液抵抗の増加が大きく寄与していると言える。その後も乾燥による質量減少は同様の速度で継続するが、インピーダンスは変化が少なくなる、あるいは一定方向の変化ではなくなると言える。

一般に動物細胞のインピーダンス測定では、生命の死後は細胞膜が劣化しリアクタンス(X)は減少し、抵抗(R)成分だけになる(I)。しかし樹木の葉の場合は、膜容量は逆に増大しリアクタンス成分も大きくなるという結果になった。これは葉組織の構造に原因があると考えている。

またリアクタンス(X)が最大となる測定点の周波数を特性周波数(fc)と呼び、動物細胞の場合は組織の劣化により fc は増加すると言われる。

枝つき葉の複数回の測定では fc は常に 110KHz 以上で、測定の都度 40~60KHz の範囲での変動はあるが、減少や増加などの傾向は見られない。一枚葉の測定では、測定当初に大きな減少があり 10~40KHz で減少傾向の安定状態になった。この原因も、乾燥による膜容量の増加が原因と考えられる。

ポータブルで安価な MLT-30 で、樹木の葉組織のインピーダンス測定が、野外で簡易に行えることが分かった。今後、個々の葉の活性度と、樹幹や根の水ポテンシャルの変化との関係などを調べることで、樹木全体の健全度合いの測定が可能と考える。今後データを蓄積し、樹木の健康管理の面に役立てていきたい。

引用文献

- (1) 河野澄夫, 電気インピーダンスによる農水産物の品質評価, 食品の非破壊計測ハンドブック (2003)
- (2) 坂本いつきほか, 多周波数方式体脂肪計 MLT-30 を用いた樹木のインピーダンス測定例, 日本森林学会関東支部論文集 59
- (3) 山浦逸雄, 人と植物の新世紀“電気で植物を測る”と言う試み (中編) 菊水 SAWS. Vol12 (2000)
- (4) 山本尚武ほか, 生体インピーダンスを用いた植物の活性評価に関する研究, バイオシステムにおける計測・制御シンポジウム論文集 21/26 (1997)
- (5) 羅維国ほか, 植物電気インピーダンスの自動測定装置, 電子情報通信学会技術研究報告, 92-146, 23/28 (1992)