

# 人と植物の 新世紀

【前編】

～“電気で植物を測る”という試み～

山浦 逸雄 *Itsuo Yamaura*

植物は何億年も前から地上に生育しているが、人類が電気を自由に操れるようになったのはほんのここ1～2世紀のことである。その電気で植物の何を測り、何が分かるかについては興味のあるところであろう。人にとっての植物は主に「食物」、「素材」であったわけだが、おそらく新世紀には「情報」としての活用を見いだされることになる。そこで電気で知る植物の側面を生体電位、電気生理学、組織のインピーダンス、樹木の接地抵抗などをテーマとして前後2回にわたり紹介する。

一般に植物／樹木は大地に根を張り、地上には葉を茂らせ生命を営んでいる。動物などとは異なり大地と密に接触し、地中から生命の営みに必要な水や養分を直接吸収している。したがって、植物は大地のことに關しては動物より詳しいかもしれない。また、植物の生きているという生理的機能は、現代の技術では検知し得ない地中の情報をキャッチできる能力を潜在的に備えているかもしれない。このような期待から、大地に根ざした植物を一種の生物センサあるいは大地センサとみても、自然災害の防止などに役買わせることができないかという考えも生じる<sup>(1)</sup>。

1995年1月17日未明、阪神・淡路大震

(\*1) 鳥山：ネムの木は地震を予知する、ごま書房、1992。

(\*2) <http://www.pisco.ous.ac.jp/>

災が発生し、近年未曾有の大惨事となったことはまだ記憶に新しいところである。あれほど巨大な地震が私達の身近で起こるのに予知できなかったことは、予知がいかにも難しいかを物語る現実と考えられる。その後、地震の前兆と思われた多くの異常現象（「宏観現象」という）が報告された<sup>(2)</sup>。大地の変化、空と大気の異常、電磁波異常、動物の異常行動、植物の異常等1519件が挙げられている。植物に関するものは全体の1%と数は少ないが、大地の変化は11%もあり間接的には植物にも関係しよう。阪神・淡路大震災後、住民観察による前兆的な地震情報システム、PISCO (Precursory quake-Information System by Citizen's Observation)<sup>(2)</sup>が発足した。オンライン・データベースによる24時間の宏観異常情報の自動受け入れを行っており、インターネットで閲覧できる。この中で、植

物に関する観測もしばしば現れる。それは樹木の生体電位の「異常」というものである。以前から植物の生体電位測定はあったが、阪神・淡路大震災を契機として定番となった感がする。地震や火山活動の予知に決め手がないだけに宏観異常への関心が高まっている折から、「電気で植物を測る」の入り口はまず樹木の生体電位の測定からとしよう。

## 樹木の生体電位の測定

<図1>に測定概念図を示す。樹木の幹や枝に電極を取り付け、大地にはアース電極をもうけ、アースに対する幹や枝の電位変化を測定するものである。電位測定回路と樹木との結合は電極によって行うため、電極には特に考慮が必要である。樹木の内部には樹液や細胞液がある。これらは



電解質溶液である。これと電極が接触することによって電気伝導性が得られる。通常、電極には金属を用いるが、電解液との接触を行うので、電気化学的に安定な(錆びない)材料を用いなければならない。白金は電極として大変優れているが、高価である。白金より性能は劣るが、ステンレスでも十分である。幹への固定という観点からは木工用の釘製品が適している(図のA)。また、少量の白金ならばコストはそれほどかからない。細い白金線を形成層に数cm刺入する方法もある(図のC)。樹木を傷つけない方法としては貼付け電極による方法がある(図のB)。大変望ましい方法ではあるが、野外の長期測定には不向きである。ゼロ電位の基準とするアースは樹木から数メートル離れた大地にとる。アースの接地抵抗は一般に低いほうがよい。高くても500Ω以下にはしたいところである。

電位測定には高入力インピーダンスの直流増幅器を用意する。生体電位の測定は毎日の変化が重要なので、チャート式記録計で長期間記録するかパソコンによるデータ取得システムを準備する。アース電極に対する樹木の電位は、最大で数百ミリボルト以下である。電極取り付けによって植物組織が損傷すると損傷面に損傷電位が発生するので注意を要する。電極が樹

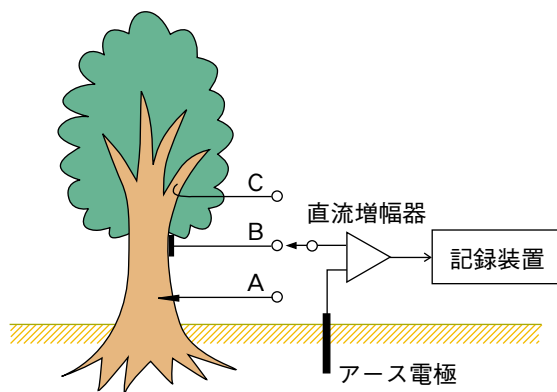
木組織に馴染むと毎日一定の電位パターンが得られるようになる。筆者が行った測定例を<図2>に示す。信州大学繊維学部附属大室農場(標高950m)に生育する天蚕飼育用クスギの木の幹に釘電極を打ち込んで測定した。1998年7月3日から6日までの電位と気温が示されている。気温は正午を過ぎて午後1時頃から2時過ぎにかけて最高となり、夜明け前には最低を示す。生体電位の変化も気温とほぼ同じパターンを示す。この傾向は他の種類の木でも同じであることが知られている。したがって、このパターンは気温とともに変化する樹木の活動状態や活性度を表しているのだ、とする説(定説?)がある。しかし、筆者の最近の観測によれば、必ずしもすべてがそうではないということが分かったので次に紹介する。

### 電位の日周変化パターン

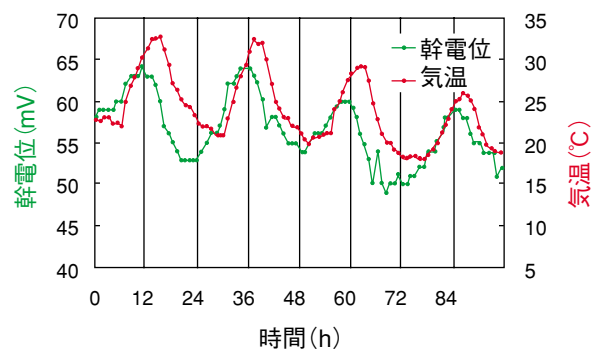
電気化学領域において、金属を電解液に浸すと金属表面と溶液の界面には電極反応とよばれる電気化学的現象の生じることが知られている。分極によってある種の電池が電極板と溶液の間に形成されるのである。溶液中に異種金属の対向電極を置き、浸した金属電極との間の電圧を測る

と起電力の生じていることが分かる。この起電力は電気化学の理論から $RT/F$ に比例する項をもつ。ここで、 $R$ は気体定数、 $T$ は絶対温度、 $F$ はファラデー定数である。したがって、樹木に金属電極を取り付けても上と同じことが起こるはずである。先に数百ミリボルト以下と述べた生体電位は実はこの電池としての起電力が主である。その大きさはアース電極と樹木電極の材質や、樹木および大地の電解質としての性質によって異なった値となる。しかも、この起電力は $T$ による温度依存性をもつ。つまり、生体電位(幹電位)の日周変化は樹木の生きていることによる活動によって生じたとは限らない。単なる電極部の電気化学的現象に基づくものと考えても何の不思議はない。このことをさらに確かめるため、水を含ませた単なる木片についても実験したが電位変化は温度変化にピッタリ追従した。したがって、本来樹木の活動状態を表すと考えられてきた電位変化の日周パターンは、電極部の電気化学的現象の温度依存性によるものがかかなり大きいと考えられるのである。

それでは、電位変化の意味するものはそれだけであろうか。既出<図2>の電位と気温の変化をよく比較すると、幹電位の方が気温より数時間先行していることが分かる。これは上の議論と矛盾する。当測定



<図1>



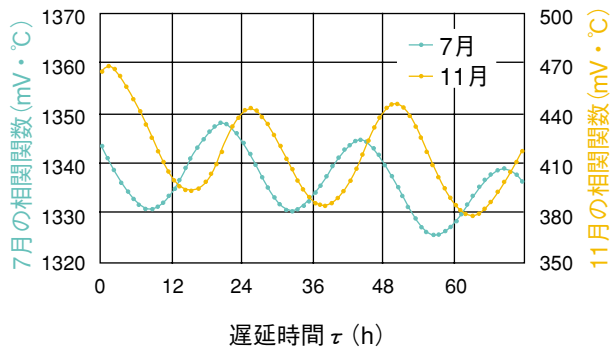
<図2>

を続けているといつか秋になり、多くの樹木は落葉の季節を迎えた。クヌギの葉も枯れ褐色となるが、その年の内には葉は落ちず、散るのは次の年の春である。すっかり葉の枯れた11月に幹電位と気温の変化を比較した。すると、今度は逆に幹電位が気温変化より2~3時間遅れて変化するようになった。気温と幹電位変化の時間的ずれを詳しく検討するため気温との相互相関関数を求めた。この結果を<図3>に示す。

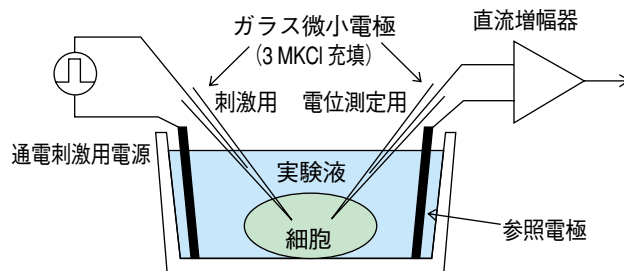
2つの曲線は、葉の茂っている7月と枯れた11月の計算結果である。横軸には3日間にわたる遅延時間  $\tau$  が示されている。 $\tau$  が0のときをみると、11月の場合曲線のピークが2~3時間遅れて現れるのに対して、7月の場合にはすでに数時間前にピークが過ぎている。一般に、気温変化に追従して樹木の温度も変化すると考えられるので、11月の場合は特に問題はない。一方、7月の緑の最盛期はどうだろう。気温が上がる数時間前に幹電位が上昇し始めるのは理解できない。先の議論によれば、電位変化は樹木の温度に追従こそすれ先行することはあり得ないはずだからである。植物と温度に関する文献等によっていろいろ検討したところ、葉が繁っているときは光合成などによって起こるエネルギー収支から葉の温度が上昇し、これによって樹木の温度が気温より早く上昇する可能性のあることが分かった。しかし、日中はともかく日の出以前からも電位の上昇が見られるので、これが一種の生物リズムによるものなのか、今後さらに検討を要するところである。

### 電位変化に期待されるもの

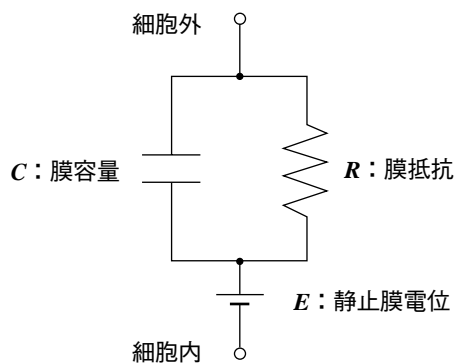
樹木から採取した電位にはその他に何の変化も見られないのだろうか。否、単なる物理系としての電位変化は観測される。たとえば、オシロスコープで電位を観測すると、商用電源による地電圧はもちろんのこと、近くのAM放送局からの電波も入る。さらに、高感度受信機のアンテナ端子に幹電極からのリード線を接続すると遠くの放送局からの電波も受信できる。つまり、樹木は地中に対しても空間に対しても一種の物理的なアンテナとして作用しているのである。通常、生体電位に期待されているのは



<図3>



<図4>



<図5>

このような物理的信号ではない。数秒から数時間オーダで現れるスパイク状あるいは振幅が大きく緩やかに変化する生体特有の電位異常といわれている。温度による基本パターンにこのような電位が重畳して現れると、しばしば樹木が何か大地に関する重要情報(地震の前兆現象?)をキャッチしたのだといわれるが、よく分かっていない。気を付けねばならないことは、フィールド測定の場合ノイズの混入する可能性は十分あることである。たとえば、樹木に機械的振動が加わる、特に風などで枝が揺れるとしっかり電極を固定したとしても電位変動は避けられない。また、電極近傍を小動物が移動してもノイズは入る。近くに電車が走っている、近くの工場で大電力を使っているというような環境ではノイズの混入は避けられない。さらに、雨などによって電極部が濡れると大幅な電位変動が起こりもはや測定は全く意味をなさないのである。これらに関する十分な知識があらかじめ必要である。

ともあれ、樹木生体電位の測定は私達には簡単に知りえない大地に関する情報が比較的手軽に得られそうな期待から注目を集めている。一方、宏観異常のみならず農業研究分野でも植物自身の生理的状态を知る一つの方法となり得ないか、さらには、樹木群のコミュニケーションの研究手段に生体電位変化パターンを利用するということも行われている。生体電位の測定は研究機関から市民レベルに至るものまで数多くあるが、まだまだ分からないことが多く今後の展開に待ちたい。

## 電気生理学

上述の生体電位の測定は生体とその生育環境を含めたグローバルな測定である。これに対し、微小電極を用いて細胞レベルの電気現象を専門的に扱う学問領域を特に電気生理学という<sup>(3)</sup>。

<図4>に電気生理研究用実験システムの概念図を示す。先端の直径が1 μm以下のガラス微小電極を細胞に刺し、

(\*3) 岡本ほか:植物電気生理研究法, 学会出版センター,1983.

細胞内の電位を測定する。ガラス微小電極は毛細管からなっており先端部は貫通している。管の中には導電体として3 MKClの強電解質溶液が充填される。もう1本の電極は刺激用で通電用電源に接続される。細胞内電位は膜電位とよばれる。ガラス微小電極のインピーダンスが20 MΩ前後と高いことから、膜電位測定用増幅器には入力インピーダンスの極めて高いものが要求される(10<sup>12</sup> Ω)。細胞を浸す実験液は測定対象によって適切なものを準備する。

神経細胞の膜電位は細胞外液に対して約-70 mVある。この状態に対しても一方の電極で通電刺激を行うと、膜電位は上昇し、ある一定の値(閾値)を超えると一過性的に電位は急上昇して+40 mVにも達するが直ちにもとに戻る。現象は約1ミリ秒で終わる。この電位変化を活動電位ということはよく知られている。また、電圧・電流クランプ法といって膜電位および膜に流れる電流をフィードバックの原理により一定に固定し、膜の電圧・電流特性を測定する方法もある。これら特性や刺激と応答波形から膜の電気的等価回路を求めることができる。さらに、以上の研究は膜の構造やNa、K、Caなど各種イオンの挙動とも結びつけられ膜の機能解明に役立っている。

膜は細胞の内と外とを分離する境界であり、外界とある種のコミュニケーションを保ちながら自己の生命活動を維持するための重要な障壁である。したがって、膜の研究は生命に関する研究といっても過言ではない。植物細胞に対しても同じことで、同様な電気生理的研究が行われている。むしろ、膜電位測定法の開発は、植物(ジャジクモ(車軸藻):藻類)によって始められ、これが神経に応用されたのである。ジャジクモの節間細胞は円筒形で種類によっても異なるが、大きいものでは直径0.1 cm、長さ20~30 cmにもなることがある。神経の研究でもイカの巨大繊維がまず対象とされたのはその大きさからいって無理もないことである。一般に植物は動物に比べると静的であるので、活動電位は発生しないかといと、そうではない。多くの植物細胞においても活動電

位の発生することが分かっている。またそれが細胞間の情報伝達に一役担っていることが次第に明らかにされている。

上のような機能を発揮する生体膜の、静止状態における一般的な電気的等価回路を<図5>に示す。静止膜電位をEとして表しているが、これは細胞の内と外とのNaやKイオンの濃度差によって発生する起電力である。細胞膜の大部分は脂質の2分子層からなり、厚さが薄い(約5 nm)うえに絶縁性が高く、容量が特徴的にあらわれる。通常の細胞膜では1平方センチメートル当たり換算すると1~10 μFである。膜容量の低下は膜機能の低下、すなわち細胞の活性度低下に通じる。膜には脂質層のほかチャンネルという外界とコミュニケーションする部位があり、ここからイオンや分子の輸送が行われていると考えられている。活動電位の発生時にはチャンネルよりイオンの流入出があり膜抵抗は変化する。また、細胞膜に伸展刺激が加わるとチャンネルの開閉が活性化されるものも報告されている。これはSAチャンネル(Stretch Activated Channel)とよばれ細胞の成長や分裂など細胞の生命維持の調節に重要なかわりをもつと推定されている<sup>(4)</sup>。これらの研究には刺激と電位の測定による方法がとられ、電気生理学的手法がフルに活用されているのである。

電気で植物を測るものうち最もマクロなものとして最もミクロなものについて述べてきた。今回は細胞の集合体である組織の電気的特性や根の接地インピーダンスの測定法について紹介したい。

(\*4) 野方:植物細胞の力学検知能力と自己最適モデリング, までりあ, Vol. 35, pp. 886-892, 1996.

### 著者略歴

山浦 逸雄(やまうら いつお)

昭和42年 東北大学工学部通信工学科卒業

昭和47年 北海道大学大学院工学研究科

博士課程電子工学専攻修了

工学博士

同年 通産省工業技術院電子技術総合研究所

電波電子部勤務

昭和61年 信州大学教授

繊維学部機能機械学科電子機械学講座

著書: 電磁気と生体(共著)、

バイオ電磁工学とその応用(共著)

など

前回は、「電気で植物を測る」のうち最もグローバルな測定である樹木の生体電位と最もマイクロなレベルである細胞の測定について述べた。今回は細胞の集合体である組織の電気インピーダンスとその測定法について述べる。

※お断り:当特集記事は当初、前・後編(2回)の予定でしたが、都合により前・中・後編(3回)とさせていただきます。(編集担当)

【中編】

# 人と植物の 新世紀

～“電気で植物を測る”という試み～

山浦 逸雄 *Itsuo Yamaura*

植物組織の電気インピーダンスの測定から一体どんな情報が得られるのだろうか。一般に、植物組織の電気インピーダンスは、特に果物や野菜などにおいて、熟度や鮮度、腐敗などの程度を示すと言われている。組織が生きていることの証はそれを構成する個々の細胞が生命活動を維持していることにある。前回紹介したように、この機能は細胞膜とそれに密着している細胞壁が細胞の内外を隔絶する障壁として有効に働いていることによって創出されるのである。電氣的にみれば膜は高い絶縁性を持ち、かつ大きな電気容量を持つ。これらの細胞の集合体としての電氣的特性が組織のインピーダンスとして観測できる。組織が腐敗すると、細胞膜や壁が壊れ、細胞内液と外液が混ざり、生体特有の組織構造が失われる。このことは電気容量の喪失と抵抗値の変化によって現れる。

すなわち、電気インピーダンスの測定からこれら組織の変化の度合いが分かるのである。まず、正常な組織は電氣的にどのような性質を示すのだろうか。

## 植物組織の電氣的等価回路

細胞組織の電氣的等価回路の例を<図1>に示す。これはHaydenのモデルとしてよく知られているものである。回路定数と細胞組織との対応を<図2>に示す。組織は細胞の集合で細胞は空間的に構築されているが、ここでは簡単のため平面的、かつ模式的に示す。電流の流れる方向に対して垂直な細胞膜は膜容量 $C_m$ と膜抵抗 $R_m$ の並列回路として作用する。また細胞内を流れる電流に対して細胞内液は抵抗 $R_i$ として膜回路に直列に入る。細胞外を流れる電流に対して細胞外液は抵抗 $R_e$

として表され、細胞回路と並列回路を構成する。細胞が無数にあってもこれらの要素は集積され、組織全体の等価回路もおおむねこのような回路として扱える。なお、等価回路の考え方については数多くのモデルがあり、単純化および修正されたものもあるが、基本的には上の要素を考えれば十分である。上から分かるように、植物組織の電氣的特性には動物組織同様インダクティブな要素はないということである。

## 植物組織の Cole-Coleプロット

さて、このような電氣的特性をもった組織を評価するため、しばしば組織のインピーダンスについて周波数特性が論じられる。単一周波数の測定では組織特性の全貌を捕らえることができないこと、また等価

回路の妥当性もチェックする必要があることから周波数特性の測定が行われる。さらにこの周波数特性から植物の活性に関する情報が得られないか、そもそも植物の健全な状態とは何かなど、普遍的な法則がこの周波数特性の中から見出せないか等いろいろ研究されている。周波数特性はいわゆるCole-Coleプロットと呼ばれる表示法によってグラフに表される。元来Cole-Coleプロットは誘電体材料の電気的特性を示すのに古くから用いられてきた方法であるが、植物組織も一種の誘電体であることには間違いないので、これが用いられる。〈図3〉に植物組織の等価回路のCole-Coleプロットを示す。横軸はインピーダンスの実数部を示し、縦軸は負のリアクタンスを示す。円弧で示されるカーブは組織インピーダンス $Z$ の周波数軌跡である。通常、膜抵抗 $R_m$ は非常に高いので、単純化したモデルでは〈図4〉のように $R_m$ を省略する。〈図3〉はこの回路のCole-

Coleプロットを示したものである。円弧を描く周波数軌跡の中心は実軸上にないが、周波数を直流から無限大まで変化させたときの軌跡が示されている。実際の測定では周波数は数Hzから数MHzまで変化させる。一番重要な周波数はカーブが最大値を示すところである。このときの角周波数 $\omega_0$ の値が図中に示されているが、膜容量 $C_m$ と細胞内外の抵抗 $R_i$ 、 $R_e$ による簡単な式となっている。この $\omega_0$ とそこのインピーダンス値 $Z_0$ をもって組織の活性度を電気的に評価する指標にできないかと検討されている。

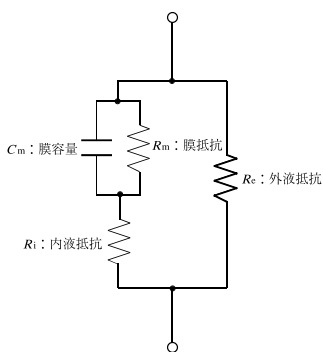
植物組織の生理的状态が変われば、当然Cole-Coleプロットの様子にも変化が現れる。活性が低下すれば膜容量が下がるため、円弧は平坦化する。組織が乾燥してくれば、円弧は平坦化とともに右へシフトする。熟度に関しては、たとえば熟するにつれ酸っぱいものから甘くなるものなら、電気伝導度は次第に低下するので、円

弧はそのまま右へ移動しよう。組織細胞が死んだり、腐敗すると、もはや膜容量による円弧形成効果は見られないので円弧は点に収束する。

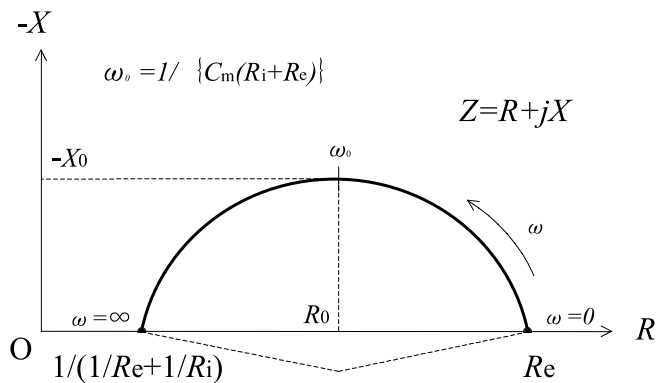
以上のように、Cole-Coleプロットから得られる植物組織に関する情報は多い。しかし、植物にはいろいろな種類やいろいろな状態があり、すべてに有効な統一的理解を行うのは困難であるが、特化すれば実用も十分可能である。それでは、実際に植物組織のインピーダンスを測定するにはどのようにしたらよいのだろうか。

## 2電極法による組織のインピーダンス測定法

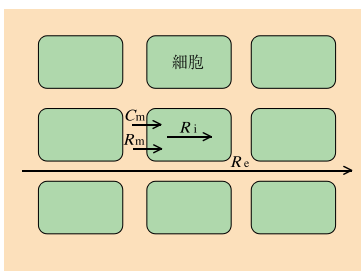
〈図5〉に最も簡単な植物組織のインピーダンス測定法を示す。これは2枚の電極板の間に植物組織を挟み、電極間に電流を流す方法である。2つの電極を用いて測定することから2電極法と呼ばれる。



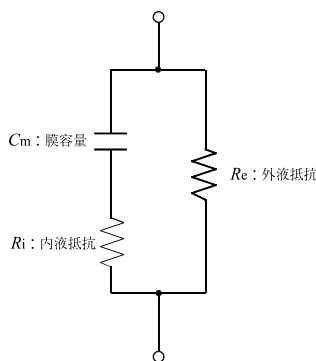
〈図1〉



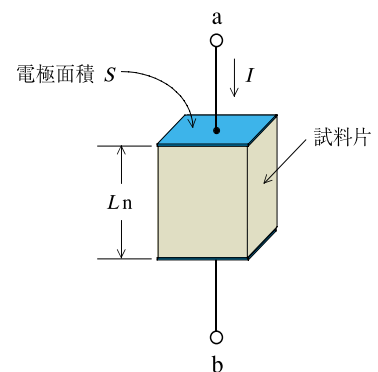
〈図3〉



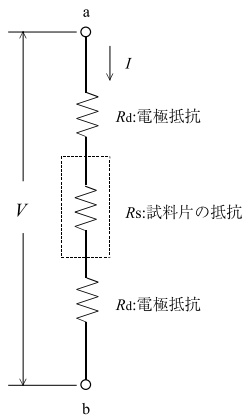
〈図2〉



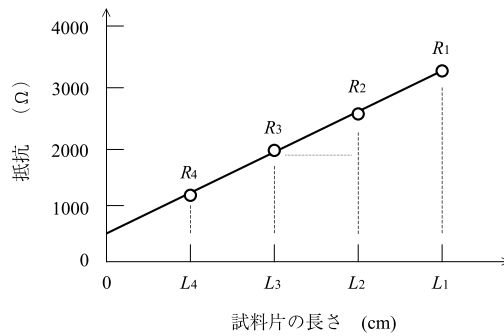
〈図4〉



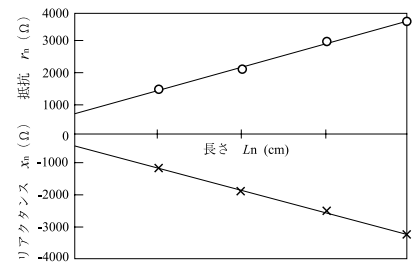
〈図5〉



<図6>



<図7>



<図8>

話を簡単にするため、始めは組織のインピーダンスを純抵抗成分のみとし、組織を単なる抵抗体として考える。<図6>にその等価回路を示す。端子a、b間に交流電流を流し、そのときa、b間に生じた電圧をVとすると、a、b間の抵抗Rはオームの法則から $R=V/I$ として求まる。ここで、測定上やっかいな問題が生じる。つまり、このRが組織の抵抗そのものであるかという点、図の等価回路から分かるように、2枚の電極による電極抵抗が直列に入っているのである。すなわち、この測定では電極抵抗を含めて測定しているため、組織の抵抗そのものを求めているわけではない。電極抵抗が組織の抵抗に比べて無視し得るほど小さければ問題ないが、通常生体組織の測定においては無視できないほど大きいことが分かっている。したがって、2電極法ではいかにこの電極抵抗の影響を除き、植物体自身の抵抗を測定するかがテーマとなる。

電極抵抗は金属と植物組織との接触界面で生じる一種の接触抵抗であり、この存在を無視することはできない。また、この界面では界面現象として電気2重層が生じ、一種の電池を形成するため、一般には直流による測定は困難である。このため交流による測定が常識となっている。

<図6>の測定回路において電極抵抗を除いて組織の抵抗そのものを抽出する方法を述べよう。2枚の電極の間に挟まれた植物体の試料片の長さ $L_n$ を変えて端子a、b間の電圧電流測定を行い、それぞれに対する抵抗値 $R_n$ を求める。 $R_n$ を $L_n$ に対応してプロットすると<図7>に示すような直線関係が得られる。この直線の勾配から試料片(組織)の単位長当たりの抵抗値 $R_u$ を知ることができる。物性値としての体積抵抗率 $\rho$ は断面積 $S$ と $R_u$ から、 $\rho = R_u \cdot S$ として与えられる。一方、直線と縦軸との交点は2枚の電極の電極抵抗の和を与える。電極抵抗を求める観点からは補外法によって求めたことになる。以上によって、組織の抵抗と抵抗率および電極抵抗が同時に求められる。ただし、組織内の抵抗率は一様であることを仮定している。

次に、測定対象が複素インピーダンスで表される場合を考えよう。<図6>の回路において、今度は電流 $I$ と電圧 $V$ の間の位相差 $\theta$ も測定する。すると、端子a、b間のインピーダンス $Z$ は次のように表される。

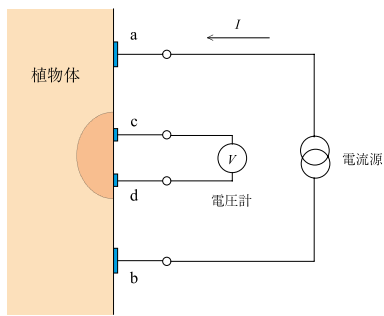
$$Z = \frac{|V|}{|I|} (\cos \theta + j \sin \theta) = r + jx$$

ここで、 $r$ は回路の純抵抗成分、 $x$ はリアクタンス成分である。上述した方法と同じ

ように試料片の長さ $L_n$ を変えてその都度 $Z_n$ を測定する。計算によって得られた $r_n$ と $x_n$ を<図8>のようにプロットするとグラフからそれぞれの勾配と切片が求まる。これらの値から組織の単位長当たりのインピーダンスと電極のインピーダンスが決定される。2電極法そのままでは、対象物のインピーダンスのみを測定することはできないが、上の工夫を行うことにより、電極インピーダンスと組織のインピーダンスを分離して測定することが可能となる。しかし、試料片として植物体を切り出し、さらに長さを変えてカットしなければならないなどの煩雑さがある。だが、測りたい部分のバルクそのもののインピーダンスが測れるところにメリットがある。ダイコンやニンジン、イモなど比較的内部的組織の様な植物や部位の測定に適している。しかし、2電極法の一番の欠点は破壊測定であることである。いろいろな目的を考えると、非破壊的に測定できる方法が望まれる。

#### 4電極法による測定

非破壊測定を可能とするものに4電極法の応用がある。電極数は多くなるが2電極法で問題となった電極インピーダンスの問題を解決して測定することができる。<図



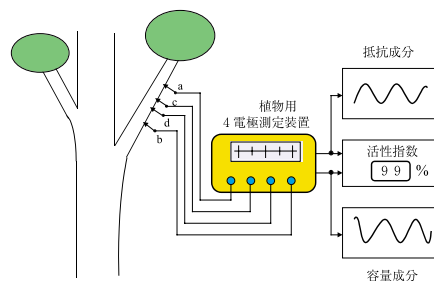
<図9>

9>にその測定原理を示す。被測定体の表面に通電用電極a、bを接触させ電流Iを流す。2つの通電用電極の間で測りたい部位に電圧測定用の電極c、dを同じく接触させる。これらの電極と被測定体との電気的結合度が弱い場合は、電極と組織表面の間に電気伝導性のゼリーを塗布する必要がある。電極a、b間に流した電流によって電極c、d間に発生した電圧Vを割ると(IとVの間のθも測定する)測定部位のインピーダンスが近似的に得られる。近似的というのは、図のような測定系の電極配置だと流れた電流のすべてが電圧Vの発生に寄与するとは限らないからである。しかし、大まかな目安は得られ、特にインピーダンスの経時変化等を知るには便利である。組織のインピーダンスをより正確に知るためには、電極a、bを2電極法のように取り付けなければならないため、破壊的測定となる。あるいは、電極a、bを带状にして被測定体の周りに巻きつけ、この部分の断面が等電位になるような工夫を施せば非破壊測定ができる。測定用電源の周波数を変え、インピーダンス軌跡を描けば、前述のCole-Coleプロットが得られる。もちろん、電極インピーダンスの周波数特性は入ってこない。ところで、この方法は電極インピーダンスの影響を除いて、測定したいものが測定

できるところに大きな特徴がある。その理由は次による。電極a、bの役割は被測定体に電流を流すだけなので、電極インピーダンスが存在していても流した電流Iさえわかっていたらよい。一方、電極c、dにおいては単に電位を正確に測定できればよく、電圧測定回路に電流を流す必要はない。そのため、電極c、dにかなりの電極インピーダンスが存在していても電流が流れないので、電圧降下が起こらないからである。とはいえ、皆無とは言えないので、電圧測定回路の入力インピーダンスは極めて高くしておくことが重要である。このように電極を用いるインピーダンス測定には4電極法が優れているが、工業分野でもこの原理に基づいた測定法は必要で種々の電気材料や部品のインピーダンス測定に用いられている。装置名はLCRメータとかインピーダンスアナライザとして市販されているが、応用分野により仕様が微妙に異なるので、これら装置を準備すれば、すぐ植物を正確に測れるかというところでもないので注意を要する。4電極法に基づく植物専用の安価な測定装置の開発が望まれる。

### 活性度のモニタ

さて、4電極法による測定で草本や樹木の活性度、あるいは日々の生き生きとした活動状態が電氣的にモニタすることができないだろうか。<図10>にその例を示す。



<図10>

たとえば、ある枝の活動度を知らうとする。夏の暑い日中には葉における光合成、水分の蒸散によって木は水をどんどん吸い上げる。日が陰るとこの活動は穏やかになる。そんな様子が枝のインピーダンス測定で可視化されるのである。植物が生き生

きていると細胞はパンパンに膨れ水分に富み、膜の障壁機能も盛んなため、膜容量も大きくなる。この様子が組織のインピーダンスとして反映されるのである。インピーダンスを抵抗と容量成分に分解して表すと水分の増加は抵抗値の減少として、膜機能の上昇はコンデンサ値の増大として変化する。また、周波数特性から活性指数なるものが算出できれば面白い。植物においてこれらの日変化を観測することは楽しい。2電極によるモニタでも変化の傾向はつかめるとはいうものの電極インピーダンスの変化が必然的に混入するので、リアルタイム測定では結局何が示されているのか分からない。これに対し、4電極法ではもともと電極の影響が除かれているので安定して組織インピーダンスの状態変化をモニタすることができる。「4電極法こそ素晴らしい」である。枝でなくて、幹でも、草本の茎でも同じようにモニタできる。

21世紀、人類は生物生存環境保全のため地球温暖化防止にいまだかつてない最大の試練の場に立たされる。エネルギーの節約は当然のことだが、唯一大気中の炭素(CO<sub>2</sub>)を最も安価にしかも自然に固定化する能力をもつ植物をいままで以上によく知る必要性がますます高まるだろう。

細胞の集合体としての組織について、電気インピーダンスの特性とその測定法について述べてきた。この組織の大きさはちょうど私達の視覚と手で扱える範囲内にあったが、次回最終回は再びディメンションを大きくして、樹木に話を及ぼせる。今度は樹木の根の接地抵抗測定とその意義や現在著者が行っている研究について紹介したい。

### 著者略歴

山浦 逸雄(やまうら いつお)  
 昭和42年 東北大学工学部通信工学科卒業  
 昭和47年 北海道大学大学院工学研究科  
 博士課程電子工学専攻修了  
 工学博士  
 同年 通産省工業技術院電子技術総合研究所  
 電波電子部勤務  
 昭和61年 信州大学教授  
 繊維学部機能機械学科電子機械学講座  
 著書: 電磁気と生体(共著)、  
 バイオ電磁工学とその応用(共著)  
 など

# 人と植物の【後編】 新世紀

～“電気で植物を測る”という試み～

山浦 逸雄 *Itsuo Yamaura*



今回は大地に根を張り、生育する植物という観点から植物と大地とのインターフェイスである根の測定について述べる。一般に植物は根から水分と養分を取り込み、地上の葉では大気よりCO<sub>2</sub>を吸収し太陽光によって光合成を行い、生命を営んでいる。植物の成長は根の発達と共にあり、地下における根の発達状態が気になるところである。その様子を、土を掘り返さずして、非破壊的に知ることができれば好都合である。筆者は最近、そのひとつの試みとして、植物の根を電気工学的に一種の接地と考え、この接地抵抗を測れば、その値の大小によって根の発達状態に関する何らかの情報が得られるのではないかと考えた。すなわち根がよく発達していればいるほど、根と大地との接触面積も大きく接地抵抗は未発達のものより当然低くなるはずである。このようにして土を掘らずに根の発達状態をモニタできれば、樹木医の診断道具としてはもちろんのこと、地球温暖化防止のための乾燥地植林の研究にも役立つことができるのではないかと考えた。また、樹木の接地抵抗を知るとは、落雷時の樹木周辺の電磁界解析にも役立つ、近傍のヒトの安全性について議論することができる。特にゴルフ場では問題になっている。さらに、地盤の変化によっても樹木の接地抵抗は影響を受けるのではないかと考えられ、自然災害防止にも一役買うことができるかもしれない。つまり根の接地抵抗は地中の情報を補足する大地センサとも考えられるのである。だが、植物の根を電氣的な接地としてみる考えは従来なかった。電気設備における実用的な接地として利用することができないので当然の

ことではあるが、電磁気学的には植物の根に対しても接地抵抗が定義できるのである。当シリーズ後編では、植物/樹木の接地抵抗測定について考える。

## 接地抵抗の定義

接地抵抗の定義を<図1>に示す。大地に埋設した金属電極に接地電流を流すと、この電極には無限遠に対してVの電位上昇が見られる。電極に流れ込む電流IでVを割ったものが接地電極の接地抵抗Rとして定義される。この値は、大地比抵抗 $\rho$ と接地電極の形状と寸法で定まる関数fの積で表される<sup>(1)</sup>。すなわち、 $R = \rho \cdot f$ (形状、寸法)である。したがって、接地抵抗の測定と同時に大地比抵抗 $\rho$ も測定すれば関数fが分かり、形状と寸法に関する情報が得られる。円板や半球など単純な形状の電極については半径の簡単な関数として表される。樹木の根のような複雑な形状となると、もはや簡単な関数として記述することはできない。この場合関数値のみが意味をもつので、この値を円板や半球状の電極の値と等しいとおき、これらと等価な半径で評価することを考える。

## 根の接地抵抗の測定方法

市販の接地抵抗計(アーステスタ)を用いれば根の接地抵抗をすぐ測れるかというところというわけにはいかない。測定法の原理を<図2>に示す<sup>(2)</sup>。接地抵抗は抵抗測定法の中でも特殊なものに分類されているが、従来の測定法の原理と中編で述べた4電極法との組み合わせによって初めて

可能になるものである。まず、電源によって樹木と大地間に電流を流す。通電用補助電極Cが樹木より十分遠方であれば、樹木と電極Cの間の地表電位分布は赤線で示したようになる。中央部には電磁気学的根拠から電位のフラットな部分が生じる。接地抵抗は、無限遠大地間の電位差をその電極に流れ込む電流で割ったものである。中央平坦部は無限遠の電位分布を近似していると考えることができる。この電位を補助電極Pでピックアップし、樹木の地表レベルとの電位差V<sub>EP</sub>を測定する。回路全体を流れる電流IでV<sub>EP</sub>を割れば根の接地抵抗R<sub>r</sub>が求まる。IとV<sub>EP</sub>の位相差を測ればインピーダンスとして求めることができる。樹木と補助電極Cとの間の距離は実際には20 mもあれば十分であり、補助電極Pは中央部にセットされる。使用する電源の周波数は数10Hzから2kHz程度までである。

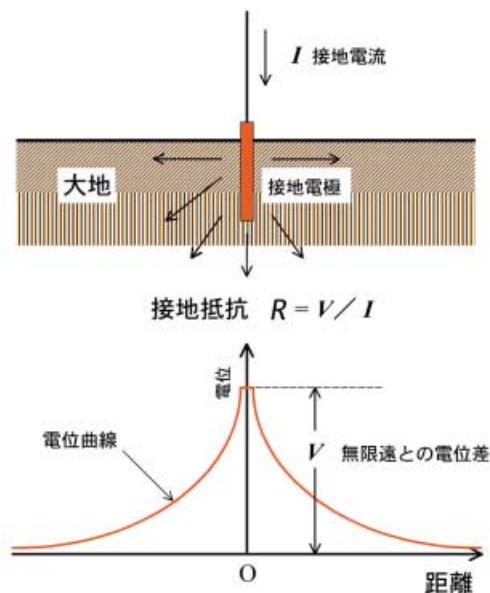
従来から行われている電気設備の接地抵抗測定法とどこが異なるかという、従来の方法は3電極法ともいえるべきもので、<図2>において、E電極とT電極が結線されたものである。すなわち、通電回路と電圧測定回路の各々に2つある端子の一方が共通となっている。樹木と測定回路との接続には一般に金属電極が用いられるが、これと樹木のあいだには電極抵抗(一般的には電極インピーダンス)といわれるものが発生する。この大きさは通常数kΩ以上あり、3電極法による測定ではこの値が根の接地抵抗と直列に入って観測されるため、接地抵抗を単独に測定することはできない。4電極法によってはじめて、分離して測定することができる。実際の測定に用い

る機器としては、原理的には4電極法によればよいのであるから、LCRメータやインピーダンスアナライザ、または従来のアーステスタを4電極法に改造したものなどを利用できる。ただし、植物の測定に当たっては電子部品などの測定とは勝手の違う点があるのでそれなりの注意が必要である。

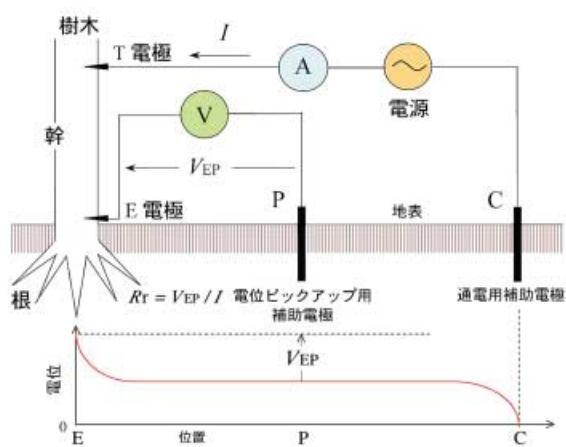
ところで、測定を正確に行うためにはまた工夫が必要である。これを<図3>に示す。樹木と電気回路の接続にはステンレス製の木工用釘を電極として幹に数cm打ち込む。太い幹にT電極を1本打ち込むと(a)のように地表部における幹内等電位面が傾く。すると、E電極でピックアップする電位は幹の回りで同一とならず、電極位置によって接地抵抗は異なった値をとる。この問題を解決するために(b)のようにT電極を4本として幹の回りに打ち込む。これらを短絡接続すると、等電位面は地表レベルで地表とほぼ平行になり、E電極の位置によらず一定の抵抗値が得られる。地表レベルでの等電位面の平坦性は、幹の太さ、T電極取付け高さ $T_h$ 、T電極の本数、相互の関係によって決まる。測定の正確さを確認するためには、地表レベルでE電極位置を移動し、測定値にそれほどの差異のないことを調べることが必要である。

### なぜ接地抵抗か？

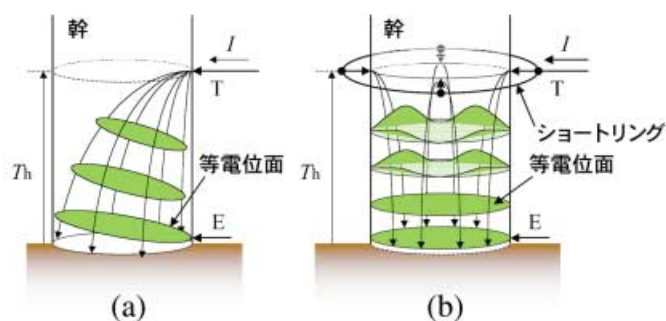
植物の根と大地との間の電気抵抗をなぜ、<図1>の定義に基づいた接地抵抗という形で求める必要があるのかという疑問が湧く。図の定義によらなくても、樹木と大地に電極を適当に設け4電極法によってその間の抵抗を測定すれば、それはそれなりに根と大地間の抵抗が求まる。しかし、この方法だと根を含めて電極間の抵抗を測っているので、距離によって抵抗値が変化する。測定距離によって値が異なるのでは他の樹木との比較が容易ではない。したがって、この方法では科学することが困難なのである。これに代わって、無限遠方に対する抵抗という概念でとらえれば、その値は唯一無二に決まる。これが接地抵抗の概念である。実際には無限遠方を対象にして測定はできないので、<図2>に示した近似的な方法が採ら



<図1>



<図2>



<図3>

れる。つまり、根と大地間の抵抗を接地抵抗という普遍定数の形で表現すれば、全世界の植物を同じ土俵で評価することができるのである。

## 測定例

身近にある樹木の測定例を<表1>に示す。大地比抵抗が100 Ω・m以下の同じ場所に生えており、いずれも樹令が40年以上の大木といってもよいものである。接地抵抗値(表中絶対値に相当)は数10Ωから100Ω程度の値が得られた。電圧と電流の位相差は余りなく、数度以内であった。一般に幹が細いほど抵抗値は高く、直径(幹の横断面形状を円形と近似)が数cmのケヤキでは1kΩ程度の値をもつが、表のように数10cmともなると1桁以下に下がっている。幹が太い異種樹木間では幹の太さと接地抵抗値の大小は対応していない。表中ネムの木は幹径が一番小さいので、接地抵抗値が一番高いかというところではなく一番低い値を示している。しかし、これらの値は日を変えて測定すると、大幅には変わらないが確かな変化がみられる。降雨などによる地中の水分量の変化による影響が大きいと考えられる。ともあれ、植物の根にも接地抵抗が存在し、実験的に測定できることが証明された。

ところで、幹径が数10cmの樹木の接地抵抗値は100Ω以下と大分低く、電子レンジ等家電製品の接地に使える値であるが、実際には使用できないことをここで述べておく。もし、これら樹木の根を電気設備の接地として使用するにはアース線を樹木に結線する必要がある。これにはやはり電極を用いなければならない。釘電極1本の電極抵抗は数kΩ以上ある。この抵抗が樹木の接地抵抗と直列に入るので、樹木自身の値は低くても、アース回路全体としては抵抗が高くなるからである。そもそも、樹木の接地抵抗の存在は、人為的な電気接地のためにあるのではない。

## 等価半径

根の発達状態が同じであっても、比抵抗の異なる土地に生えている樹木の接地

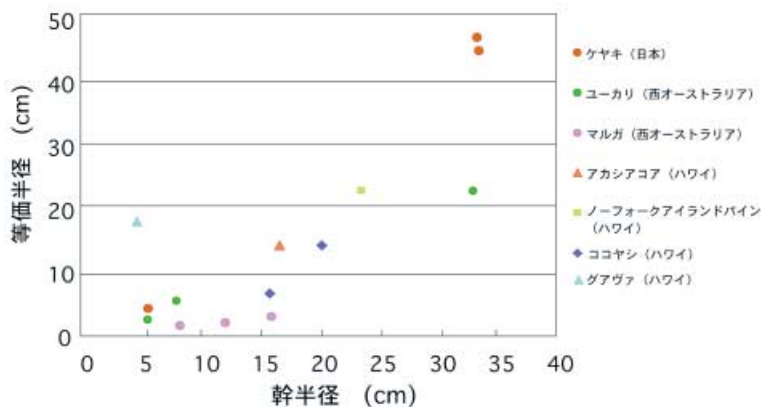
抵抗は異なる。このため接地抵抗値から大地比抵抗の寄与を除かねば、本来の根の発達状態を比較、あるいは単独評価することはできない。先述したように接地抵抗は  $R = \rho \cdot f(\text{形状, 寸法})$  であるから、大地比

抵抗  $\rho$  をその場所で別途測定し、 $f$  の値を求める。 $\rho$  の測定には通常 Wenner の4電極法が用いられる<sup>(1)</sup>。  $f$  は形状と寸法によってある値をもつ関数であるが、単に数値だけでは、大小の比較はできて単独評価

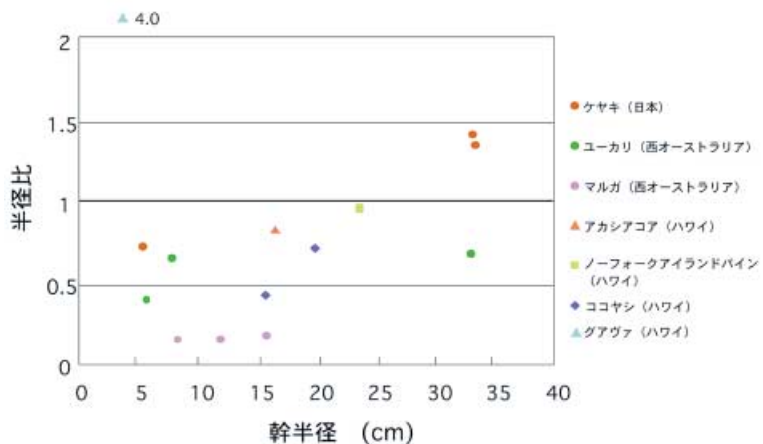
<表1>

樹木の種類	サクラ	ケヤキ	ネム
インピーダンス $Z_r$ (Ω)	103.4 - j7.0	71.7 - j3.5	58.4 - j2.8
絶対値 $ Z_r $ (Ω)	103.6	71.8	58.5
測定日 (年/月/日)	98/11/03	98/12/23	98/11/6
測定時の天候	晴れ	曇り	晴れ
気温 (°C)	17.4	3.8	13.2
幹直径 (cm)	58.6	63.7	54.1
高さ (m)	10	13	11
樹齢 (年)	>40	>90	>40

測定周波数: 1 kHz



<図4>



<図5>

● ハワイ島にてグア  
ヴァの木の接地抵  
抗を測定する筆者



のための物理的イメージが湧かない。そこで、地表に接する金属円板を接地電極と見立て、この電極半径に換算することを考える。一方、半球金属電極の半径にも換算でき、これを本来等価半径と呼ぶが、ここでは円板電極の半径を指すものとする。

半径 $r$ の円板電極の接地抵抗は $\rho / (4r)$ で与えられるから、これが樹木の接地抵抗と等しいとすると、 $Rr = \rho / (4r)$ 。したがって、等価半径は $r_e = \rho / (4Rr)$ となる。つまり、根がどんな形状とサイズを有していても、この等価半径一つで評価できるのである。大きくよく発達している根ほど等価半径は大きい。たとえば、樹木の生長とともに等価半径がどのように変化するかは、まさに根の生長度合いをモニタしているといつてよい。

等価半径を幹半径と比較することにも意味がある。幹半径が大きくなれば、根もそれだけの成長をしているので等価半径は大きくなるはずである。一種類の樹木について生長とともにこれら2者の関係はどのように変化するか、興味のあるところであるが、まだ確固たるデータはない。今後の研究によってこれら2者間の法則を知れば根と生長のメカニズムの一端を知ることができるかもしれない。一方、多くの種類の樹木について、また様々な太さの樹木について等価半径を測定することは今すぐ可能なので、早速試みた。これをその幹径に対してプロットした結果を<図4>に示す。測定対象は、特色ある地域として西オーストラリアの半乾燥地帯に生育するマルガ、ユーカリ、またハワイの溶岩台地に生育する幾種類かの樹木について得たデータである。参考として筆者の大学キャンパス内にあるケヤキについても示した。データ処理によって2者間の関係を求めると幹径の増加に対する等価半径の増加は約1.5乗であることが分かった。この値が何を意味するかは、まだ断片的なデータなのでよく分からないが、幹が太くなることに対する根の発達度合いを示す一つの指標ではないかと考えられる。海外の樹木については文部科学省の科学研究費補助金によって現地へ赴きデータを取得したものである。筆者は現在世界各地の特徴ある地域において、特徴ある樹木についてのデータ収集を考え

ている。ハワイオアフ島モアナルアガーデンパークにある、あの「気になる木」モンキーポッド(和名:アメリカネム)やアフリカマダガスカル島のバオブバなども視野に入れている。このようなデータ収集の中から、地球温暖化防止策としての緑化研究に役立つヒントが見つければ幸いである。右の写真は、今年3月ハワイ島South KonaのManuka State Park内で筆者がグアヴァの測定を行っているところである。

### 等価半径と樹木半径の比

<図3>に示したように樹木内地表面の電位分布をフラットにすると、これは樹木径に等しい金属円板電極が置かれているのと等価である。その円板の下には、大地比抵抗より抵抗率の小さい根の組織が地中に発達しているので、接地抵抗は円板電極単体より小さくなる。したがって、樹木の接地抵抗の等価半径は根の分だけ樹木半径より大きくなるはずである。等価半径 $r_e$ と実際の樹木半径 $r$ との比 $r_e / r$ 、これをここで半径比と呼ぶが、この値は1より大きくなる。<図4>のデータから半径比を求め、これを幹径に対してプロットしたものが<図5>である。ハワイのグアヴァが4.0という非常に大きい値を示す他は、日本の幹径の大きいケヤキを除いてほとんどが予測に反し1以下となっている。特に西オーストラリア乾燥地に生育するマルガはその値が極めて小さい。理由はいろいろ考えられるが、そのうちのひとつとして、根の組織と土が単純に接触しているのではなくて、根の表皮組織が両者の隔絶を図っているためではないかと考えられる。つまり、根は回りの土から植物体内に水分を吸収するが、逆に水分を土に放出しないバリア機構があるので、この仕組みが電気的にはインピーダンスを高くしているからであろう。乾燥地帯でも特に乾燥に強いマルガの半径比が最低値を示したことはうなずける。全体的に見ると幹半径に対して半径比の増大傾向がうかがえる。これは幹が太くなるほどよく根が発達しているか、あるいは根の内と外との隔絶機構が緩和傾向にな

るからであろうか。

ここで紹介した研究はまだ緒についたばかりで、結果の解釈は多くの場合推測の域を出ないが、我が国はもちろんのこと、今後世界各地の種々の樹木についてデータを集積し、植物/樹木の根が環境に対しどのような法則をもって地中に発達しているのかについて考察を進めたいと考えている。また、接地抵抗はこのシリーズ前編で述べた樹木の生体電位に比べるとはるかに安定に測定でき、根拠の分かっているものである。長い時間をかけての測定は、はじめに述べた大地センサとしての可能性を与えるかもしれない。そのためには、“電気で植物を測る”ための電子計測技術の洗練についてもさらに検討を行い、「人と植物の新世紀」に対応したいと考えている。

最後に、本記事掲載の機会を与えて下さいました菊水電子工業株式会社技術顧問加藤吉彦氏ならびに広告宣伝課長藤川貴記氏に感謝申し上げます。

- (\*1) 川瀬太郎:接地技術と接地システム、オーム社(1997)
- (\*2) 山浦逸雄他4名:樹木の接地インピーダンス測定法、電気学会論文誌C、Vol.120-C、No.3、pp. 434-439 (2000)

#### 著者略歴

山浦 逸雄(やまうら いつお)

昭和42年 東北大学工学部通信工学科卒業  
昭和47年 北海道大学大学院工学研究科  
博士課程電子工学専攻修了  
工学博士  
同年 通産省工業技術院電子技術総合研究所  
電波電子部勤務  
昭和61年 信州大学教授  
繊維学部機能機械学科電子機械学講座  
著書: 電磁気と生体(共著)、  
バイオ電磁工学とその応用(共著)  
など