

病虫害評価のための樹体内電位分布測定に関する基礎研究

佐藤栄一*, 村上 肇**, 角山正博***

Fundamental Study on Measuring Electrical Potential Distribution in Trunk of Tree to evaluate the Damage caused by Nematode

Eiichi SATO*, Hajime MURAKAMI**, Masahiro TSUNOYAMA***

We have studied the method of measuring and analyzing the electrical potential distribution in the trunk of a tree in order to estimate the location and the degree of the damage caused by nematode. When a branch of the tree was cut, its location was identified by the potential distribution map on the section of the tree analyzed by the proposed method. Moreover, the potential distribution on the section of the tree was compared with that on the section of a phantom (agar). Both distribution have shown the high correlation factor, and we can say that the method can be used to estimate the damage in the trunk of a tree.

Key words : pine wilt disease, biological engineering, potential distribution map, Finite Element Method

1. はじめに

我が国でマツは古くから親しまれている樹木であり、特に「白砂青松」という言葉が生まれるほどに定着している海岸のマツ林は、日本の伝統的な景観として我々の目を楽しませてきていた。しかし最近、マツが集団的に枯れて赤茶けた状態となる、いわゆる「マツ枯れ」の被害が増えており、周辺の環境破壊とも相まって、美しい海岸風景が失われつつある。マツ枯れは、正しくは「マツ材線虫病」と呼ばれ、直接的には「マツノザイセンチュウ」が病原であるが、その伝播には「マツノマダラカミキリ」が深く関わっている¹⁾。マツ枯れの対策としては、媒介昆虫であるカミキリを駆除するための薬剤散布、殺線虫剤の樹幹注入、感染源を絶つための枯死木の焼却などがある²⁾。これらのうち、現在実施されている防除法の代表的なものは薬剤散布であり、広い面積のマツ林にはヘリコプターからの空中散布、住宅や魚介類に飛散の恐れがある場合には地上からの散布が行われている。但し、自然環境や生活環境の保全に配慮しつつ効果的な薬剤散布を実行するためには、そ

*情報電子工学科 助手
**情報電子工学科 助教授
***情報電子工学科 教授

それぞれの樹木において病虫害の程度や部位を的確に判定することが望ましいものと思われる。本研究の目的は、生体情報工学的な手法を用いて樹木からの信号を検出し、それを処理して病虫害の程度や部位を判定することである。

植物からの情報計測の方法としては、まず、植物自体が発している情報を対象とするものが考えられる。植物からの電気信号の検出例としては、加える外的刺激（光・温度・直流磁界）の種類や強度を変えることで葉面の電位変動の様相が変化すること³、種々の音響的刺激により葉表面電位の高周波成分が変化すること⁴、根の成長過程で障害物に接近すると根軸周辺の電界を能動的に変化させて生長方向を変えること⁵が報告されている。これらと同様に、植物の情報処理機構そのものを利用して樹体内部の病虫害情報を電気信号として検出するのは非常に興味深い方法であるが、植物の情報処理のメカニズムは動物の神経系に比べて未解明な部分が多く、現時点ではこの方法に基づいて解析を行うのは困難である。

そこで我々は、外部から電気信号を加えてその応答信号を検出し、そこから樹木内部の状態を推定する方法を採用する。電気抵抗やインピーダンスによる植物の特性の測定例としては、収穫後の穀類の水分計が実用化されており、また、他の農産物の熟度、鮮度との関連が調べられている⁶。その他、材木の含水率の測定⁷、苗のリン栄養状態の診断⁸が報告されている。「マツ枯れ」の生じた樹木は、侵入した線虫の存在と組織の破壊とにより、被害のないものに比べて樹体内のインピーダンスに変化が生じることが予想される。そこで、内部インピーダンスの変化を検出するために、まず樹木の表面電極から電流を加え、それとは異なる電極において樹木表面の電位を測定する。次に樹木表面の電位から内部の電位分布を推定することで、樹木内部で生じたインピーダンスの変化が電位変化として示され、線虫による侵害部位の特定とその程度の評価が可能になるものと思われる。よって本研究は、樹木の病虫害判定のために樹木内部の電位分布を簡便に測定する方法を確立することを目的とする。今回は、病虫害を模擬する侵害として樹木の枝を切断し、その時の電位分布の変化により侵害部位の特定ができたので、その結果について報告する。

2. 方法

2.1 樹幹表面電位の計測

樹木内部の電位分布を推定するために樹幹表面電位を計測する。Fig. 1 に計測システムの構成を示す。電流源としてはファンクションジェネレータを使用し、1V_{p-p}、10Hz 正弦波を電流電極より加える。同時に樹幹表面の電位検出電極より検出された信号波形はサンプリング周波数 5kHz で A/D 変換され、パーソナルコンピュータに取込まれる。

樹木内部の解析には、樹心を含む縦断面（以下、透心断面）及び横断面を設定する。Fig. 2 に電流電極及び電位検出電極の配置を示す。各電極にはステンレス製針（長さ 30mm、直径 0.5mm）を使用し、刺入深さは 5mm とする。電位検出電極の間隔は、透心断面解析時で 5mm、

横断面解析時は約 10mm とする。電流電極は、電位検出電極から上方下方それぞれ 50mm の位置に取付ける。

実験にはマツ科のトウヒ(樹高 70cm)を使用し、病虫害を模擬する侵害として枝を切断する。透心断面解析時には電位検出電極 6 より 15mm 左側面の枝を切断し、横断面解析時では電位検出電極 1 及び 2 より 10mm 上部の枝を切断する。

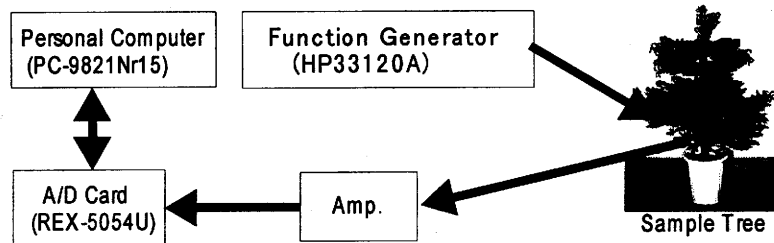
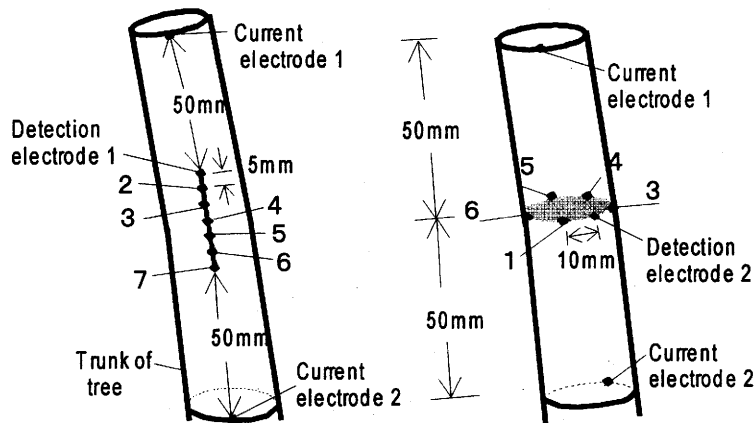


Fig.1 Block diagram of measurement system configuration⁹⁾



a)Analysis on longitudinal section b)Analysis on cross section

Fig.2 Position of electrodes⁹⁾

2.2 樹体内電位分布の推定

樹幹表面電位から樹体内電位分布を推定する方法として有限要素法を用いる。透心断面の解析には、電極を配置した測線 30mm を一辺とする正三角形領域を 36 の要素(節点 28)に分割し推定する (Fig. 3-a)。横断面の解析には、隣接する電位検出電極間を一辺とする正六角形領域を 18 の要素(節点 13)に分割する (Fig. 3-b)。内部節点電位の導出には、式(1)のエネルギー汎関数¹⁰⁾を用いて汎関数が最小となるよう各節点の電位 ϕ を求める。さらに各節点電位から解析断面に対する電位分布を推定し、その分布図をもとに侵害の判定を行う。

$$x = \iint_s \frac{1}{2} \left\{ \sigma_x \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \sigma_y \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right\} dS \quad (1)$$

(σ : Conductivity, ϕ : Node potential)

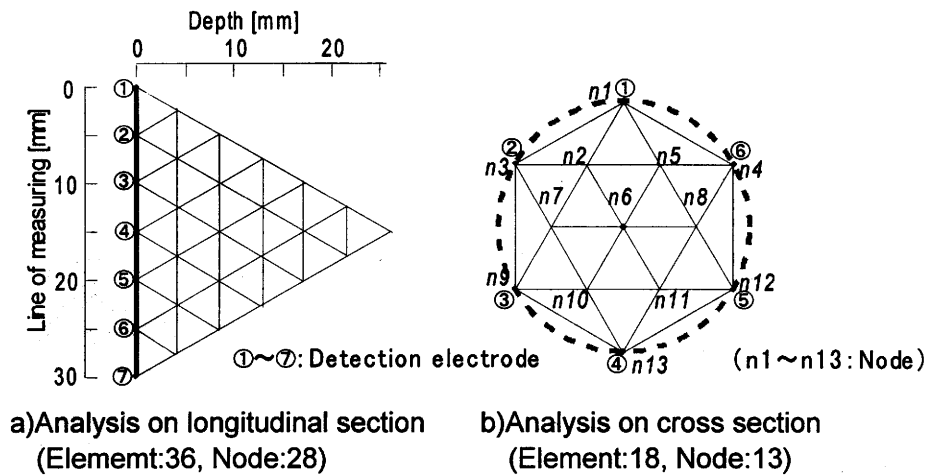


Fig. 3 Division of the region

2.3 疑似試料による評価実験

横断面に対する内部電位の推定方法を評価するため、疑似試料を用いた実験を行う。試料には寒天を使用し、内部の抵抗率を均一な状態にする。また、形状は円筒(半径 15mm, 高さ 30mm)にする。電位検出電極には樹木の場合と同じステンレス製針を使用し、側面の高さ 15mm 円周上に等間隔で 6 本取付ける (Fig. 4-a)。電位検出電極の刺入深さは 5mm とする。さらに内部電位検出のためには、先端部 3mm のみ被覆を剥いだエナメル線(直径 0.5mm)を試料中央部へ 15mm 挿入する。電流電極にはアルミ平板を使用して両底面に固定する。試料側面の検出電位から内部電位を推定する方法としては、樹木の横断面解析の場合と同一の方法を用いる。また、測定条件としては、①初期状態、②電位検出電極 3 より 10mm 上部の箇所へゴム製チューブ(直径 7mm)を中心に向かって水平に 1cm 挿入後 (Fig. 4-b)、③2cm 挿入後、④チューブ除去後 を設定し、各々の条件で内部節点 n6 に対する推定値と電位検出電極 7 により実測した値を比較する。

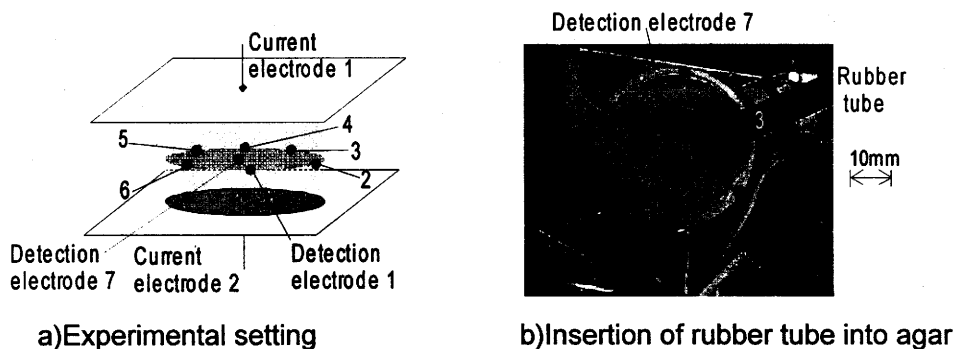


Fig. 4 Experiment by using agar

3. 結果

3.1 樹木における内部電位分布の推定

透心断面における電位分布の推定結果を Fig. 5 に示す. a) 枝を切断する前と b) 枝を切断した後の電位分布では, それぞれに上方から下方への電位降下が観察された. c) 枝を切断する前と後の電位差では, 測線 25mm 付近(電位検出電極 6)の電位変化が最も大きく, 電位が 0.024V 上昇した. また, 枝を切断した後にこの電位検出電極 6 では, 樹脂の滲出が観察された.

横断面における各節点電位の導出結果を Fig. 6, 電位分布図を Fig. 7 に示す. 枝を切断する前では, 検出した中での最大電位差が 0.01V の均一な分布を示した. 電位検出電極 1 より 10mm 上部の枝を切断した場合には電極 1 付近の電位が下がり, 最大電位差は 0.079V となった. 次に電位検出電極 2 より 10mm 上部の枝を切断した場合には電極 2 の電位が下がり, 最大電位差は 0.055V となった.

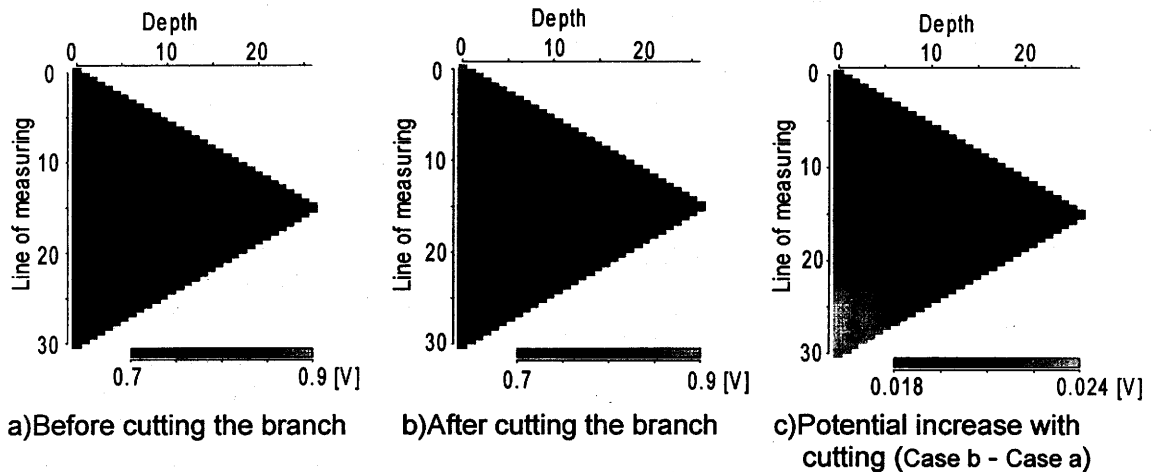


Fig.5 Potential distribution maps on the longitudinal section

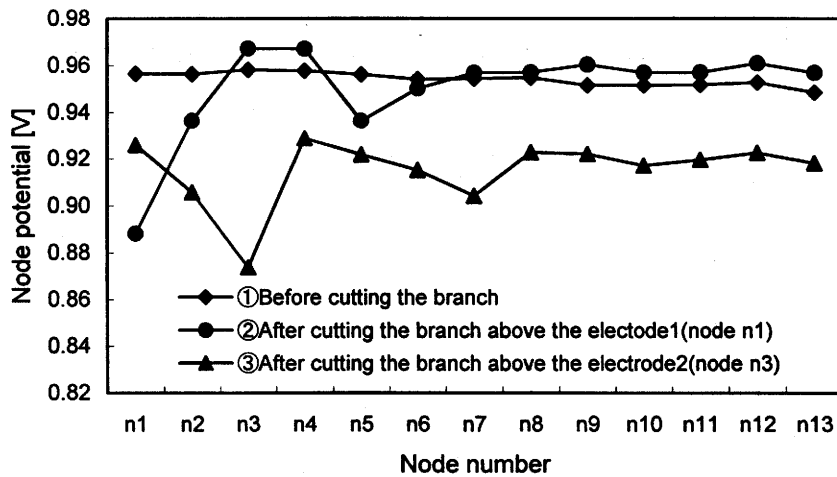


Fig.6 Node potential on the cross section

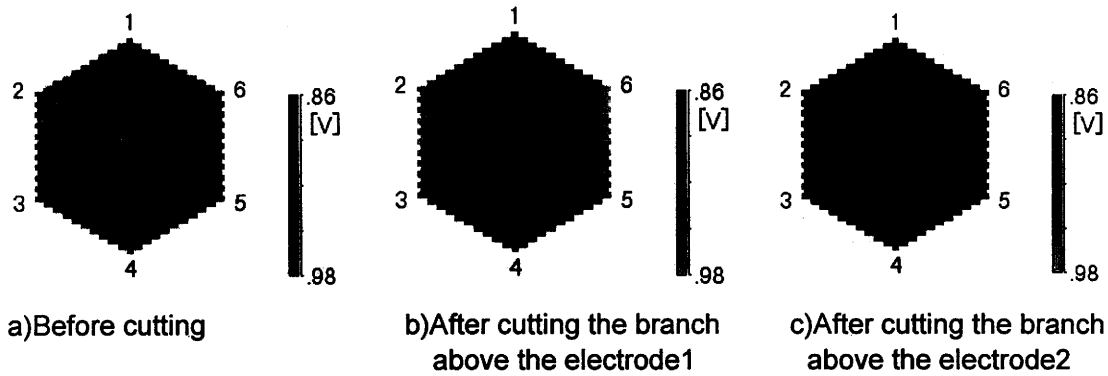


Fig.7 Potential distribution maps on the cross section⁹⁾

3.2 疑似試料における内部電位分布の推定

疑似試料における実験結果を Fig. 8 に示す. 検出電極 3 上部よりチューブを 1cm 挿入した後, その近傍での電位変化が最も大きく 0.017V 下がった. 試料中心部の電位について電極 7 より実測した値と Fig. 3(b) の節点 n6 における推定値を比較した. その結果を Fig. 9 に示す. ①チューブ挿入前, ②1cm 挿入後, ③2cm 挿入後, ④チューブ除去後の条件で比較を行った結果, 両者の相関係数は, 0.99915 となった.

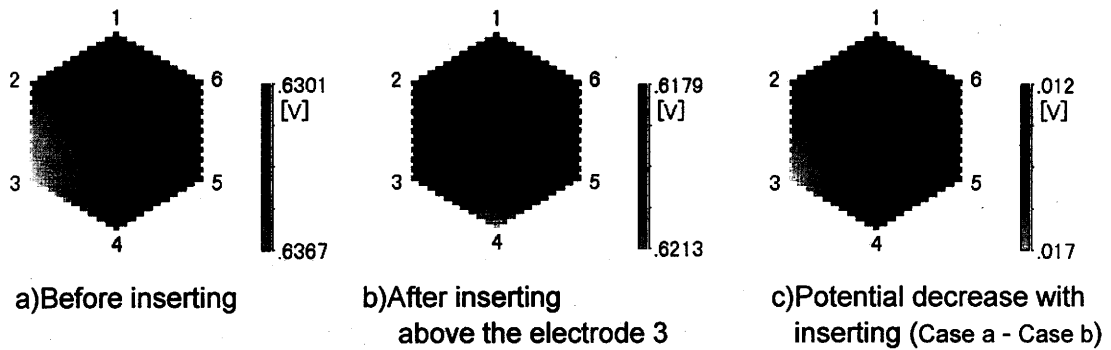


Fig.8 Experimental results of agar

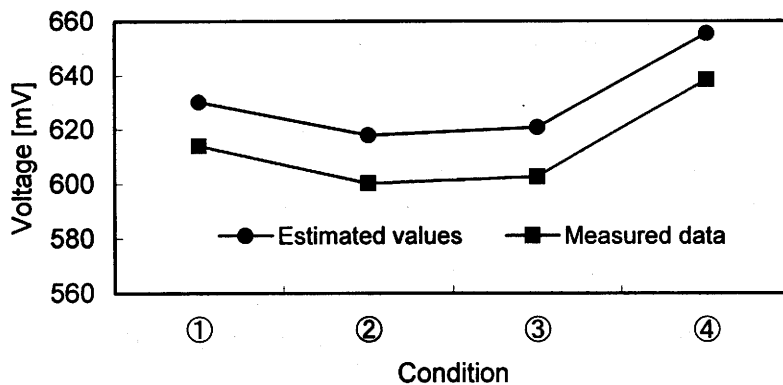


Fig.9 Potential at the center of the agar

(Condition ①: Before inserting the tube, ②: After inserting the tube (depth=1cm), ③: After inserting the tube (depth=2cm), ④: After extracting the tube)

4. 考察

本研究では、病虫害を模擬する侵害として樹木の枝を切断し、その前後の内部電位分布を推定した。透心断面の場合には、切断した枝に近い電位検出電極で最も電位が上昇した。まず侵害部位では、組織の切断によって癒傷組織の形成がなされ¹⁰⁾、電気インピーダンスが増加すると考えられる。これによって非侵害部位への電流分流量が増え、特に枝を切断した同じ高さでの電位検出電極近傍の電位が上昇したと考えられる。また、電位変化が距離的には近いにもかかわらず深いところに観られない原因としては、樹幹内部における樹心方向の電気抵抗が接線方向(年輪に沿う方向)に対して高い⁷⁾ためと思われる。次に横断面の場合には、切断した枝の近傍で最も電位が下がった。この電位降下は、侵害部位のインピーダンスが増加したことにより、電位検出電極において分圧比が減少したためと考えられる。さらに前述した樹幹内部の電気的特性に加え、縦方向の電気抵抗が接線方向に比べ低い⁷⁾ため、枝を切断するという侵害に対しては横断面解析の方が透心断面に比べ電位変化が大きく、侵害部位の特定は容易であると思われる。

疑似試料における評価実験では、電位検出電極の上部にゴム製チューブを挿入した。その結果、検出電極近傍の電位が下がり、樹木の枝を切断した場合と同様な電位変化が確認された。これは、絶縁体であるチューブの挿入によって、検出電極上部のインピーダンスが増加したためであり、枝を切断した場合にはその周囲で同様なインピーダンスの変化が生じていると考えられる。さらに試料内部の電位推定値と実測した中心部の値を比較した結果、両者に高い相関を得た。

以上の結果により、内部電位の推定方法が正しいことが確認され、本方法によって樹木における侵害部位の特定が可能であることが示された。

5. まとめ

樹木の病虫害評価のために樹体内電位の計測及び推定法に関する基礎的な検討を行った。樹木を用いた実験では、模擬する侵害として枝を切断し、その前後の内部電位変化を観察した。その結果、横断面の測定において侵害の部位の特定が可能であることが示された。また、疑似試料による実験では、絶縁体挿入による電位変化を観察し、さらに内部電位の推定値と実測値との比較により、推定方法が正しいことを確認した。今後は、この推定方法を基に複素インピーダンスの推定方法について開発を進めていくと共に、自生するマツを対象として樹体内電位分布と樹木の状態との関係について検討を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、平成9年度佐々木環境技術振興財団の助成により行われました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1)大木理：植物と病気，東京化学同人，東京，1994
- 2)マツ枯れのしくみと防除，森林総合研究所九州支所，研究成果普及シリーズ No.1,1990
- 3)宮本紀男，深見正：植物が示す神秘的な電磁気現象，電気学会雑誌，Vol.113，No.6，pp.469-472，1993
- 4)櫛橋康博：植物に耳はあるか，言語，Vol.24，No.8，pp.70-77，1995
- 5)三輪敬之：樹木群の場所的コミュニケーション，言語，Vol.24，No.8，pp.54-61，1995
- 6)杉山純一：先端計測技術の植物への応用—ポストハーベストにおける事例—，計測と制御，Vol.33，No.10，pp.823-828，1994
- 7)北原覺一：木材の物理，東北出版，東京，1967
- 8)藤井義晴，林徹，安田環：植物体の電氣的インピーダンス測定によるリンの栄養診断，日本土壤肥料学会誌，Vol.55，No.4，pp.305-310，1984
- 9)佐藤栄一，村上肇，角山正博：侵害刺激に対する樹体内電位の変化，電子情報通信学会信越支部大会論文集，pp.73-74，1997
- 10)小貫天，中田高義，根本佐久良雄：電気系有限要素法，オーム社，東京，1983
- 11)増田芳雄：植物生理学[改定版]，培風館，東京，1996