

大室農場の樹木における根の等価接地抵抗と 幹抵抗の測定

矢嶋 征雄*・鳴海 健司**・田中 京子**・中谷 修司**
増田 順一**・山浦 逸雄**

(* 信州大学繊維学部附属農場, ** 信州大学繊維学部機能機械学科電子機械学講座)

1. はじめに

樹木の根を一種の生物センサとして考え、これを利用することにより大地に関する情報を取得しようとする考えがある^(1,2)。たとえば、地電位差や地電流の検知、大地の歪みや震動および土壌の保水能力等に関する情報の取得である^(3,4)。生物の機能にはまだわれわれの解明し得ないものが多く、その機能により従来の測定器からは取得が困難であった新しい結果を得る可能性がある。樹木の根を大地(地中および地表面を含める)センサとして役立てるためには電気工学的基礎として、根や幹の電気的特性をまず知る必要がある。植物と電気についての研究は古くからあり現在も数多く研究されている⁽⁵⁻⁷⁾。電気生理学的な研究には、植物電気生理研究手法が確立されており、各種植物についての研究がある⁽⁸⁻¹⁰⁾。また、野菜や果物等の電気インピーダンスに関する研究もあるが⁽¹¹⁾、樹木の根については電気工学的特性がまだ明らかにされていない。当研究では、樹木の根を電気工学的に一種の接地と考え、根の等価的な接地抵抗を測定することを目的とする。この等価的な接地抵抗(以下、等価接地抵抗と表現する)は、センサの信号発生器としての内部抵抗を与えるが、この測定法についてはまだ確立されていなかった。最近、筆者らはセンサ研究の目的から、新たにマルチ電極法を考案し、根の等価接地抵抗と幹抵抗の両方の測定を可能とする方法を開発した^(12,13)。この方法を用いて、本学繊維学部キャンパス内に生育する何種類かの樹木について測定を行った。その結果、初めて樹木の根の等価接地抵抗値を知ることができた。これらの抵抗値は今後、樹木の根や幹に関する新しいパラメータになるであろうと考えられた。測定樹木数を増やし、測定データの集積を行うため、さらに繊維学部附属大室農場においても測定を行うこととした。

根の等価接地抵抗値は、地中における根の張り具合を反映するものと考えられる。一般に、等価接地抵抗値の大小は根と土との接触面積の大小によって左右され、根の表面積が大きい程抵抗値は小さくなると考えられるからである。また同じ場所で生育する同種類の樹木の場合、幹の太さが同じであっても、等価接地抵抗値の小さい方が根はよく発達していると考えられる。異なる場所に生育する対象間では、生育環境の違いが大きく作用するため、いちがいに比較することはできない。環境条件の違いについて、等価接地抵抗値に最も大きく作用する要素は大地の乾湿度である。水分が多いと電気抵抗は少なくなるので、根の張り具合が同じでも等価接地抵抗は必然的に小さくなる。大地の水分量の影響を除いて樹木間の比較を行うためには、あらかじめ水分量の目安になる物理量を測定しておく必要がある。簡単な方法としては、測定対象の近くに基準となる接地電極を打ち込みこの接地抵抗をモニタする。接地抵抗のモニタ値で根の等価接地抵抗値を割り基準化すれば、土壌の乾湿状態による影響を取り除くことができる。以上の理由から、異なる場所に生育する樹木間の比較を容易にするためこの測定も実施した。一方、同じ場所で生育する異なる種類の樹木については、樹木間の根の電気的特性そのものの違いを明確にし、この結果は園芸学的にも参考になるところが大と考えられる。

本報告では、附属大室農場に生育するクヌギ、クルミ、クワおよびネムについて、マルチ電極法によって等価接地抵抗と幹抵抗を測定した結果を示す。また、幹の太さと等価接地抵抗の関係について考察を試みたのでこれらについて報告する。

2. 根の等価接地抵抗と幹抵抗の測定原理

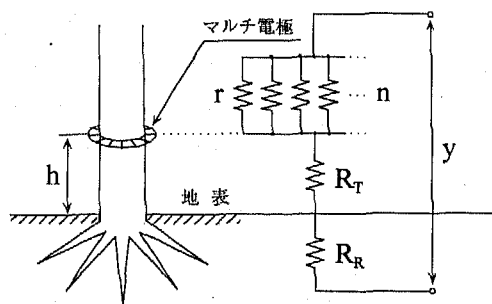
金属材料を地中に埋設する接地の接地抵抗測定法は電気工学的にすでに確立されており、JIS規格に

基づく接地抵抗計（アーステスタ）が市販されている⁽¹⁴⁾。しかしながら、樹木を対象とした場合、新たな問題が生じる。すなわち、木は金属ではないため測定用のリード線を直接木に接続することはできない。このため電極によって樹木との電気的な接続を図る。普通、生体との電極接続では接続抵抗が問題となる。本研究の目的のように等価接地抵抗を測定する場合、とくにこの抵抗の問題は無視できない。アーステスタの測定指示値は、根の等価接地抵抗と電極抵抗との和である。電極抵抗があらかじめ分かっているならば、根の等価接地抵抗を知ることができる。しかし、あらかじめ電極抵抗を知るのは困難であり、また、仮に電極抵抗が分かったとしても、等価接地抵抗が電極抵抗に比べかなり小さい場合、電極抵抗の誤差の中に接地抵抗が埋もれてしまい、測定は全く無意味となる。この問題を解決する方法がマルチ電極法である^(12,13)。

図1にマルチ電極法による等価接地抵抗の測定原理を示す。等価回路が図のように表せると仮定すると、この測定は地中の根に起因する等価接地抵抗 R_R を求める問題である。 R_R は地上の幹抵抗 R_T と直列に接続される。幹にはマルチ電極が、高さ h で n 個接続される。このとき各々の電極抵抗（幹との接続抵抗）は等しくなるように取り付けられる。この値を r で表す。 n 個の電極を並列接続して R_R と R_T および r/n の和を測定するが、 r は始めひとつで、つぎに2つ、そのつぎに3つとひとつずつ増やして並列接続したときの合成抵抗 y を測定する。この関係は次式で示される。

$$y = R_R + R_T + r \cdot n^{-1} \quad (1)$$

ここで、電極の数 n を限りなく大きくすると漸近線として $R_R + R_T$ が求まる。また、測定電極群の高さを地表レベル ($h = 0$) とすると、 R_T は0なので R_R が得られる。先の $R_R + R_T$ の結果から、 R_R を差



$$\text{合成抵抗値 } y = R_R + R_T + r \cdot n^{-1}$$

図1 等価接地抵抗の測定原理

し引くと R_T も分かり、幹の単位長当りの抵抗値 (R_T/h) が算出される。実際には、 n を無限大にすることはできないので、10数点の測定オリジナルデータを用いて式(1)を最もよく近似するカーブから未知数を決定する。したがって、 r は単独に測定しなくてもこの過程から知ることができる。マルチ電極法のメリットとしては、木の抵抗と電極抵抗の両方の値が未知であってもそれらを求めることができること、および電極抵抗が測定対象の抵抗より1桁以上大きくても誤差の少ない測定ができることである。

3. 実験材料および方法

実験に用いた樹木はすべて高木で、その種類と本数は附属大室農場内のクヌギ8本、シナノグルミ3本、クワ3本、ネム1本の合計4種類15本である。その生育場所を図2の農場地図内におおよその位置で示す。また、試料番号も併記した。等価接地抵抗と幹抵抗は幹の太さともっとも強い関係にあると考えられるので、他のパラメータ例えば、木の高さや樹齢などについては特に考慮しなかった。実験対象の幹の太さは胴回り寸法にして、30~180cmの間に分布している。シナノグルミについては、接ぎ木による材料があり、根と幹は同一種子から発生したものではないことに留意する必要がある。表1に実験材料3本のクルミについての接ぎ木の内訳を示す。

繊維学部常田キャンパスにおける測定では、1996年7月から8月にかけてケヤキの等価接地抵抗の時間的変化について簡単な調査を行った。その結果によれば、昼と夜とでは値が若干変化するが、数週間に渡る日中の測定では、降雨の影響によると考えられる抵抗の減少以外には特別な変化を認めなかった⁽¹²⁾。また、晴れと曇りによる違いもとくには認識できなかった。雨の降っているときや雨上がり直後は樹皮が濡れているため測定はできない。樹皮が十分乾いているときに測定が可能である。このことから、大室農場における測定は、晴天あるいは曇天のときに行い、時刻はとくに限定せず、日中とした。

表1 シナノグルミの接ぎ木

試料 No.	台 木
O-Jw-1	実 生
O-Jw-2	オニグルミ台
O-Jw-3	共 台

大室農場の樹木における根の等価接地抵抗と幹抵抗の測定

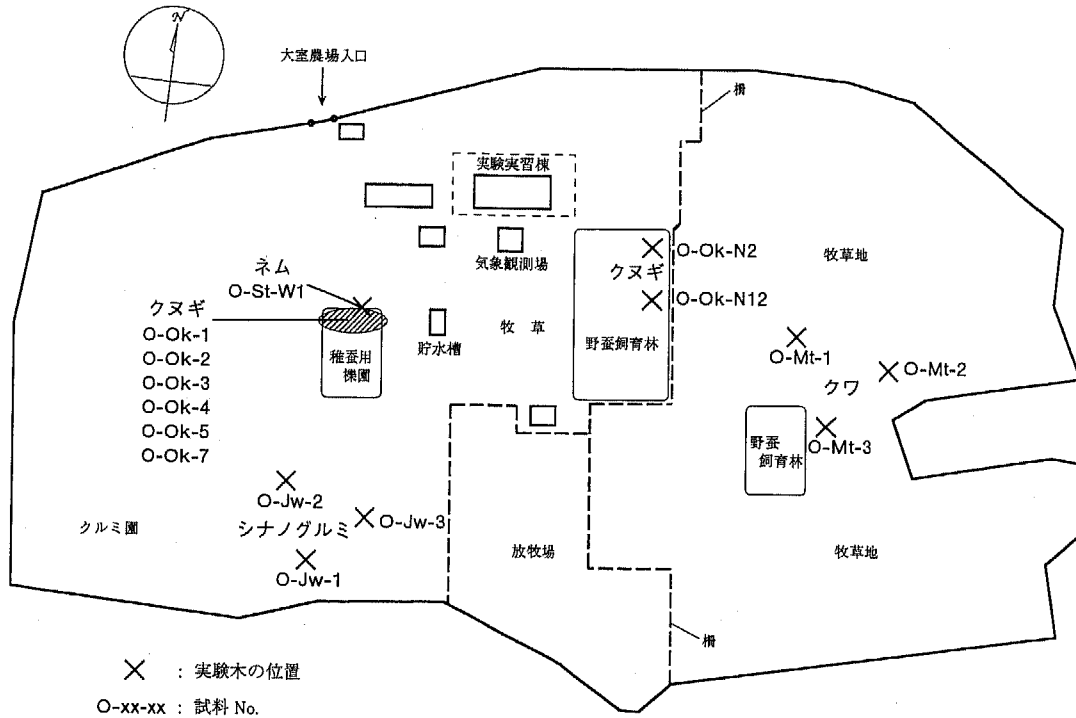


図2 大室農場における実験木の生育場所

実験は1996年10月～11月中旬にかけて、落葉以前に行われた。測定時には気温と地中温度（深さ7 cm）を記録した。気温は11～22°Cの範囲、地中温度は8.7～17.4°Cの範囲内で実験が行われた。

幹に取り付ける電極には、錆び防止の意味からステンレス製の釘を使用した。測定上電極抵抗を低くすることが望ましく、そのためにはなるべく大きな釘を使用する方がよい。しかし、幹の細い木に対しては太い釘を何本も打ち込むことはできないので、材料によって釘の種類を変えた。表2に、材料別に使用した釘の寸法を示す。これらの釘を高さhで10数本、幹の回りに等間隔かつ、一定の深さに打ち込む。このとき $R_R + R_T + r$ 値がほぼ等しくなるよう、アーステスタの指示値を確認しながら打ち込む深さを調整する。なお、釘電極は木本茎の最も水分の多い道管部を貫き年界部深くに到達している。電極抵

抗をなるべく小さくすることと電極の固定、保持を十分に行うという観点からは、このような打ち込みは実験に適した方法であると考えられる。電極打ち込み時の電極と木本茎組織との接触状態がそのまま長期間保たれるとは考え難い。この変化はr値の変化として表れる。ステンレス製の釘を電極として使用した場合、長期間に渡って錆びることはないので、再測定するとき電極抵抗を再調整すれば、ほとんど問題になることはなかった。

図3に、アーステスタを用いた樹木の測定構成図を示す。使用したアーステスタは三和電気計器社製PDR-200DGである。測定周波数は1 kHz、接地抵抗の測定範囲は0～2 kΩである。マルチ電極はアーステスタのターミナルEに接続される。抵抗測

表2 釘電極寸法

樹木の種類	釘電極寸法 (直径, 長さ)
クヌギ	2.0mm, 38.5mm
クルミ	3.0mm, 64.5mm
クワ	3.0mm, 64.5mm
ネム	3.0mm, 64.5mm

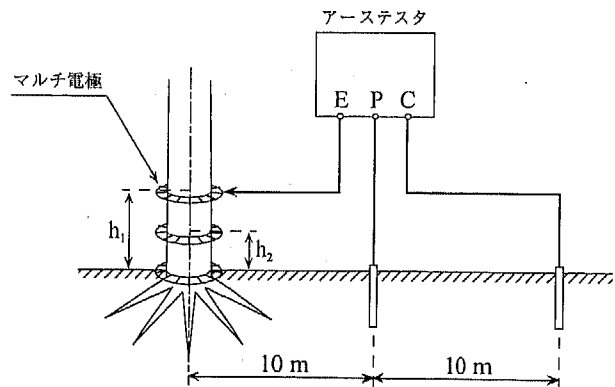


図3 等価接地抵抗測定のための構成

定用の交流を流す対向電極はターミナルCに接続される。樹木とこの電極間の距離は20mに設定した。この距離は接地抵抗測定の原理に基づき十分遠くなければならない。また、電位のピックアップ電極(ターミナルP)はEC電極間にあって、電位分布の平坦部の電位を捕捉しなければならない。実際に、EC間の電位分布を測定したところ樹木から5m以上離れていれば十分であることが分かったので、各電極間の距離は図3のように設定し、すべての測定を行った。C、P電極の設置する方向は、測定対象のEと直線をなすようにとり、測定現場の状況からリード線の張りやすい任意の向きとした。木の電極に関しては等価接地抵抗と幹抵抗の両方を得るために、ターミナルEの接続を高さ h_1 と地表レベル($h=0$)の2つにとり測定を行った。木の根元に大きな根が露出しているような場合はその部分を避けるため、マルチ電極の高さを h_2 として測定した。 h_1 と h_2 における測定値の差から幹抵抗を求めることができる。幹抵抗が求まれば、この値を用いて地表レベルでの値を計算できる。 h_1 をあまり高くすると幹抵抗 R_T が増えるので、アーステスタの最大指示値2k Ω を越え、測定不能となる。このため、測定可能な範囲となるように高さ h_1 を対象ごとに検討した。 h_1 が下の測定レベル h_2 に近接すると、幹抵抗の測定誤差が大きくなると考えられるので、この場合、幹抵抗の測定は断念した。

土壌の乾湿度合をモニタするため、基準用の接地

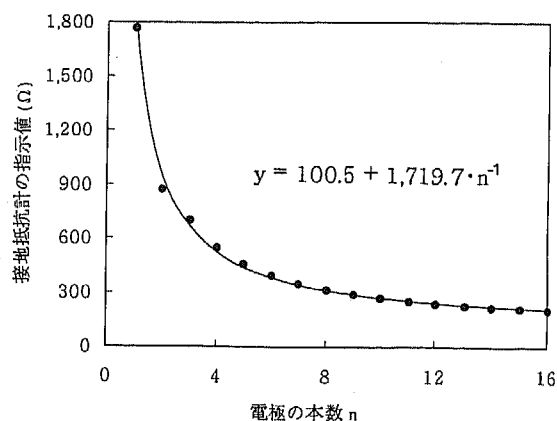


図4 ネムの測定例

棒を対象木から4m離れた地点に打ち込み、実験の都度接地抵抗を測定した。接地棒は鉄の心棒に銅パイプを被せたもので、直径7mm、長さ30cmである。これを打ち込み深さ25cmとし接地抵抗を測定した。これをモニタ値とし、この値で、実測した根の等価接地抵抗値を割ると、樹木間の等価接地抵抗値の違いを土壌の乾湿度合と切り離して議論することができるので、本報告ではこれを試みる。

4. 実験結果および考察

マルチ電極法によるネム(胴回り:89cm)の測定例を図4に示す。測定は地表からの高さ $h_2=20$ cmの場合である。高さ0cmの地表レベルでの測定が行えなかった理由は、根元から太い根が地表に

表3 測定結果

樹木の種類	試料		基準接地抵抗 モニタ値(Ω)	根の等価接地 抵抗値 R_R (Ω)	幹抵抗値 (Ω/m)	幹抵抗率 ($\Omega \cdot m$)
	No.	胴回り寸法(m)				
クヌギ	O-Ok-N2	0.431	542	907.4	-	-
	O-Ok-N12	0.490	385	502.7	4963	94.83
	O-Ok-1	0.766	351	198.0	2311	107.90
	O-Ok-2	0.565	472	405.2	-	-
	O-Ok-3	0.316	295	765.5	-	-
	O-Ok-4	0.720	270	258.5	-	-
	O-Ok-5	0.440	331	662.9	-	-
	O-Ok-7	0.298	258	1198.0	-	-
クルミ	O-Jw-1	1.80	1330	117.0	-	-
	O-Jw-2	1.51	866	130.0	-	-
	O-Jw-3	1.52	1282	125.0	-	-
クワ	O-Mt-1	0.640	1864	407.0	820	26.72
	O-Mt-2	0.830	1119	197.0	340	18.64
	O-Mt-3	0.654	494	184.0	605	38.12
ネム	O-St-W1	0.890	293	23.9	375	23.7

表4 測定条件

樹木の種類	試料 No.	胴回り寸法(m)	測定高さ h ₁ , h ₂ (m)	測定日(平成8年) 月/日	気温 (°C)	地中温(°C)
クヌギ	O-Ok-N2	0.431	0.07, 0	11/15	13	9.7
	O-Ok-N12	0.490	0.07, 0	11/15	13	12.2
	O-Ok-1	0.766	0.3, 0	10/03	16~17	16.2
	O-Ok-2	0.565	0	10/18	15	10.1
	O-Ok-3	0.316	0	10/18	15	10.5
	O-Ok-4	0.720	0	10/18	14	9.5
	O-Ok-5	0.440	0	10/18	15	10.2
	O-Ok-7	0.298	0	10/15	22	10.2
クルミ	O-Jw-1	1.80	0	10/22	19	8.7
	O-Jw-2	1.51	0	10/22	18	9.3
	O-Jw-3	1.52	0	10/22	20	10.7
クワ	O-Mt-1	0.640	1.0, 0.2	10/11	18	17.4
	O-Mt-2	0.830	1.0, 0.3	10/03	20	15.4~15.5
	O-Mt-3	0.654	1.0, 0.2	10/16	11	11.7~11.8
ネム	O-St-W1	0.890	1.0, 0.2	10/10	14	12.2

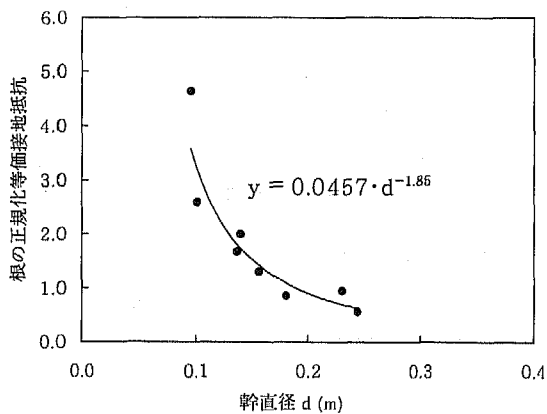


図5 クヌギ幹の太さに対する正規化等価接地抵抗

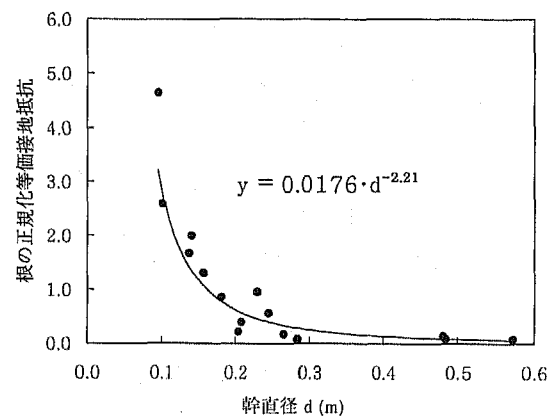


図6 全樹木における幹の太さに対する正規化等価接地抵抗

露出していたからである。図の横軸は並列に接続したマルチ電極の数を示す。並列に接続する順番は、木の上方からみて反時計回りの場合である。プロットはアーステスタの指示値を示す。実線は、プロットが式(1)に従うものと仮定して求めたカーブである。得られた式 y を図中に示した。これによれば、ネムの地表高さ20cmの $R_R + R_T$ は 100.5Ω である。また、釘電極1本当たりの電極抵抗 r は $1,719.7\Omega$ である。すべての電極について電極抵抗が等しくなるように調整したとはいえ、実際には、ある範囲内で抵抗値にばらつきがでる。この影響を調べるため、今度は電極の接続順を時計回りとしたときの結果を求めた。これによれば、 $R_R + R_T$ は 97.4Ω 、 r は $1,759.5\Omega$ であった。電極の接続順を変えることに

よって測定結果に違いが出るので、一応、反時計回りと時計回りの実験結果の平均値をもって測定結果とした。

次に、電極取り付け高さを $h_1=100\text{cm}$ としたときの $R_R + R_T$ は 399.1Ω であった。上の結果との比較から幹の単位長当りの抵抗は $375.2\Omega/\text{m}$ と求められる。さらに、地表レベルでの値を計算すると等価接地抵抗 R_R は 23.9Ω となる。幹の形状を円柱と仮定し、また内部の抵抗率分布を一様とみなすと、胴回り寸法から幹の抵抗率は $23.7\Omega \cdot \text{m}$ と評価される。この測定を行ったときの基準接地電極による接地抵抗のモニタ値は 293Ω であった。釘電極の打ち込みから測定完了まで約2時間かかった。

表3にすべての実験材料について測定した結果を

示す。表4には測定条件を示す。表3においてクヌギの大部分とクルミにおいて幹抵抗値と幹抵抗率が示されていないのは、図3における h_1 レベルでの抵抗値が高く、アーステスタの測定レンジオーバーのため計測できなかったことによる。表4において、測定高さ0 m（地表レベル）で測定できなかったクワ、ネムは h_1 と h_2 レベルの測定値から等価接地抵抗値を導出した。結果から、一般に幹が太くなるにつれて、根の等価接地抵抗は小さくなる傾向がみられる。しかし、大地の乾湿状態によって、その値は左右されると考えられるので、基準接地抵抗モニタ値で正規化を行い、幹の太さとの関係を調べた。幹の形状を円柱とみなし、幹直径 d に対してすべてのクヌギの正規化等価接地抵抗をプロットした結果を図5に示す。幹直径 d が大きくなるにつれ、正規化等価接地抵抗は小さくなるのが分かる。この変化が幹直径のべき関数に従うと仮定し、最小二乗法によってその式を求め、これを図中に示した。指数は約-1.9である。もしこの値がちょうど-2ならば、根の全表面積は幹直径の2乗に比例して増加することを意味する。これはちょうど円の直径（または半径）と面積の係数に類似する。次に、クヌギを含め実験木すべてについて同様な処理を行った結果を図6に示す。今度は指数が約-2.2であり、幹直径に対する幹断面積の増加以上に、根の表面積は増えることを意味する。先に、繊維学部常田キャンパス内の樹木6種類8本と大室農場の樹木2種類4本について同様な処理を行った結果、指数は-1であると報告した⁽¹³⁾。-1の場合は、根の表面積は直径に比例して増加することになり、ちょうど長軸の長さの変化しない円柱の表面積の増加と等価である。ただし、上下断面部の面積は除く。この指数は処理対象群によって、大幅に変化するが、木の種類に固有なものであるか否かについては、今後の実験に待たねばならない。

5. おわりに

附属大室農場に生育する樹木のうち4種類の高木を選び、合計15本において、根の等価接地抵抗と幹抵抗を測定した。幹半径に対する等価接地抵抗の変化を考察したところ、幹の太さの増大にともなう根

の表面積の変化の一端をうかがい知ることができた。しかし、まだ測定本数が少なく、さらにデータを集積する必要がある。当報告で示した結果やデータの処理法および考察は、園芸分野においても参考になると思われる。今後、測定本数を増やすとともに、樹木の根の大地センサとしての可能性も追及して行きたい。

本研究は、平成8年度文部省科学研究費（萌芽的研究 課題番号：08875083）によって行われた。最後に、農場使用に対しご理解賜った武井隆三農場長ならびに児玉徹農場主事に深謝するとともに、現場でいろいろとお世話いただいた附属大室農場の庄村茂、小山田真吾両技官に謝意を表す。

参考文献

- (1) 鳥山 (1995)：ネムの木は地震を予知する，ごま書房。
- (2) 三輪 (1994)：計測と制御，32，880-881。
- (3) 竹内，中鉢，成田 (1996)：電学論C，116，1064-1069。
- (4) 池谷 (1996)：科学，66，408-418。
- (5) 鈴木，大森 (1928)：日本学術会報告，4，424-429。
- (6) 渡部 (1958)：電力中央研究所技術研究所所報，7，674-682。
- (7) 松尾 (1995)：農業および園芸，70，1119-1205。
- (8) Bures J., Petran M., and Zachar J. (1967)：Electrophysiological methods in biological research, Academic Press.
- (9) Bronzino J. D. (Ed.) (1995)：The biomedical engineering handbook, IEEE Press.
- (10) 岡本，岸本，柴岡，千田，田沢 (編) (1983)：植物電気生理研究法，学会出版センター。
- (11) 中村，山本 (尚武)，宋，山本 (辰馬) (1992)：信学論 (D-II)，J75-D-II，1975-1977。
- (12) 山浦，鳴海，田中，矢嶋 (1996)：信学技報，MBE96-63，19-25。
- (13) 山浦，鳴海，田中，矢嶋 (1996)：計測自動制御学会中部支部第8回信州地区計測制御研究講演会講演論文集，33-36。
- (14) JIS C 1304-1995 (1995)：接地抵抗計，日本規格協会。