

# インピーダンス測定法による一定温度下での カラム内水分物質移動の実時間測定

米田稔<sup>1</sup>・酒向健<sup>2</sup>・井上頼輝<sup>3</sup>・森澤眞輔<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学助手 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>大阪府環境保健部環境局 (〒540 大阪市中央区谷町 2-2-20)

<sup>3</sup>正会員 工博 福井工業大学教授 工学部建設工学科 (〒910 福井市学園 3-6-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 京都大学教授 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

地下水汚染機構の研究などのため、よく土壌カラムを用いた実験が行われる。このとき土壌カラム中の水分と物質の移動を実時間で追跡する方法として、インピーダンスを測定する方法の有効性を検討した。このため測定システム全体をコンピューター制御した土壌カラムのインピーダンス測定システムを構成し、一定温度下において不飽和土壌カラム中の水分物質移動の測定実験を行った。その結果、サセプタンス/角周波数を測定することにより、土壌粒径や濃度に関係なく含水率の測定が可能であることが、加えてコンダクタンスを測定することにより、イオン濃度に比例する土壌溶液の導電率の測定が可能であることがわかった。また検量線の簡便な作製方法も提案した。本研究で開発した方法は不飽和浸透現象の実時間追跡などにおいて極めて有効である。

**Key Words :** impedance, water content, electric conductivity, soil column, real time measurement

## 1. 序論

地下水汚染制御の研究のため、地下水や汚染物質の挙動を捉える方法として、近年、比抵抗や誘電率など、土壌の持つ電気的特性を利用する手法が有望視されている。このような電気的手法による測定には、測定対象土壌を乱すことなく、不飽和浸透などの土壌中の水分及び物質の移動をリアルタイムで追跡できるという利点がある。電気的手法による土壌中水分量の測定には、比抵抗法、誘電率法、TDR法等が用いられている。

単位体積の示す抵抗である比抵抗を測定する比抵抗法は、古くから多くの研究が行われており、最近では不飽和浸透計測に用いた西田らの研究<sup>1)</sup>や地下水位モニタリングを行った高倉の研究<sup>2)</sup>などがある。しかし比抵抗は間隙水の存在形態やイオン濃度などによって大きく変化するため、水分量を正確に捉えるには必ずしも適していない。

誘電率法は、純粋な水が、乾燥した土壌粒子よりはるかに大きな比誘電率を示すという性質を利用する。また誘電率は数百 kHz 以上の比較的高い測定周波数に対しては、イオン濃度の影響や土中水の存在形態の影響をあまり受けず、水分量のみを測定するのに適している<sup>3)</sup>。この誘電率法の一つとして最近よく用いられてい

る方法に TDR 法<sup>4)</sup>がある。この方法は、ケーブルにつながる2本のロッドを地中に埋め込み、そのロッドに電磁波のパルスを送り、ロッド間をパルスが往復するのに要する時間を測定し、その所要時間から土壌全体の比誘電率を算出しこの比誘電率を土壌水分に変換する方法である。TDR法は野外での土壌水分測定法として、既に測定装置が市場に出回っている。溶質濃度については誘電率法による測定例は少ないが、TDR法を用いた例では、電磁波のパルスの減衰から求めた導電率と、土中水の導電率との間に直線的な好ましい結果が得られたという報告<sup>5)</sup>もある。

このように、主として誘電率は土壌水分量のみを、比抵抗、あるいは導電率は水分量とその存在形態、そしてイオン濃度を反映した量である。近年、測定器の発達により、物質のインピーダンスが比較的簡単に測定できるようになってきたが、このインピーダンスは物質の導電率と誘電率の両方を反映した物理量である。よって、インピーダンスの誘電率の成分から水分量が、求められた水分量とインピーダンスの導電率の成分から水分のイオン濃度が測定できる可能性がある。またインピーダンス測定法では後述するガード電流を利用することにより、誘電率法に比べ測定対象範囲の限定が容易であること、また TDR 法では測定が困難な実験カラ

ムのような比較的小さな測定対象に対して有効である、などの利点もある。また交流信号を用いてインピーダンスを測定する場合には、長時間の測定においても分極作用による測定値の変化が生じない。このため本研究ではインピーダンスを測定することにより、不飽和土壌カラム中の水分と物質の同時移動を追跡するシステムの構築を考え、以下のような研究を行う。

- (1) 土壌カラムの水分および物質移動を追跡するシステムをコンピューターにオンライン化することにより、測定したデータをリアルタイムでモニター可能なシステムを構築する。
- (2) 従来の土壌の誘電率、導電率に関する研究では、温度変化を考慮に入れたものは少なく、測定対象の温度も明示されていない場合がほとんどである。しかし、溶液の導電率、誘電率は温度によりその値が変化する。従って、土壌中における溶液も温度影響を受けて、その溶液の導電率、誘電率の変化がインピーダンスの測定値に影響を与えたと考えられる。そこで、本研究では土壌カラムやカラムに流す溶液の温度を一定に保つ装置系を構成し、温度変化がインピーダンスに与える影響を排除した条件下で実験を行う。
- (3) 土壌の粒径などの違いがインピーダンスの測定値に及ぼす影響を解析することにより、土壌特性の違いがインピーダンスに及ぼす影響をとらえる。
- (4) 土壌の持つインピーダンス特性の定量的モデル化に基づく、簡便な検量線作成方法について検討する。
- (5) 本研究で求めた検量線を用いて、本研究のシステムを実際に不飽和浸透実験に適用し、水分及び物質移動のリアルタイムでの追跡を行い、実現象を把握する上での、本システムの有効性について検討する。

## 2. 土壌のモデル化

土壌のような水を含んだ物質の電気的等価回路については、従来から、図-1に示すようなコンデンサーと抵抗の並列回路が提案されている<sup>6)</sup>。この等価回路においては、インピーダンスの逆数の実数成分であるコンダクタンス (G) と、虚数成分であるサセプタンス (B) は次のような関係式で表される。

$$G = 1/R \quad (1)$$

$$B = C \omega \quad (2)$$

ここでRは抵抗の値、Cはコンデンサーの静電容量、 $\omega$ は角周波数である。また、Cの値は次式で表される。

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \alpha \quad (3)$$

ただし、 $\epsilon_0$ : 真空の誘電率、 $\epsilon_r$ : 比誘電率、 $\alpha$ : コン

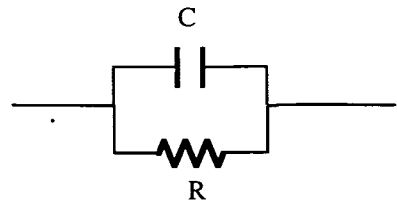


図-1 土壌の電気的等価回路

デンサーの幾何学的特性に依存する定数。

よって土壌が図-1のような等価回路で表現できる場合には、コンダクタンスとサセプタンス/角周波数の値は周波数によらず一定となる。しかし実際の土壌では、土壌粒子表面での分極現象や電気的寄生成分のためこのような傾向からはずれてくる。本研究では式(1)、(2)から、コンダクタンスが土壌の比抵抗を反映した量、サセプタンス/角周波数が土壌の比誘電率を反映した量と考え、この2つの量を測定することで、含水率と土中水のイオン濃度を測定することを試みる。

## 3. 本研究で用いた測定システム

### (1) インピーダンスの測定方法

インピーダンスの測定は、インピーダンスメーターを用いて行う。インピーダンスは抵抗とリアクタンスで表される複素量であるが、インピーダンスメーターは、このインピーダンスベクトルの実数部と虚数部を測定し、次にそれをコンダクタンスやサセプタンスなどに変換して表示する。測定自体は簡単であるが、現実には部品や回路などに含まれる寄生成分のため、特に高周波数での測定では細心の注意を要する。寄生成分の例としては回路の持つ浮遊容量、抵抗やケーブルに含まれる導線インダクタンス、コンデンサ内の漏れ電流などがあり、測定においてはこれらの影響を最小に押さえる工夫が必要となる。その他、温度、湿度、環境電磁界などの影響にも注意する必要がある。

### (2) 測定装置の構成

本研究では、土壌カラムのインピーダンスを複数の周波数で連続的に測定するために、不飽和状態の土壌で多段カラムを用いた実験装置を構成した。実験装置を図-2に示す。

実験装置は、実際にインピーダンスの測定を行うインピーダンスメーター、インピーダンスメーターの制御と測定データの保存解析を行うGP-IB制御部、測定する電極を制御コンピューターからの命令で切り替えるリレー制御部、土壌試料の入っているカラム部、土壌試料と実際に接触する電極部、各電気信号が通過するケー

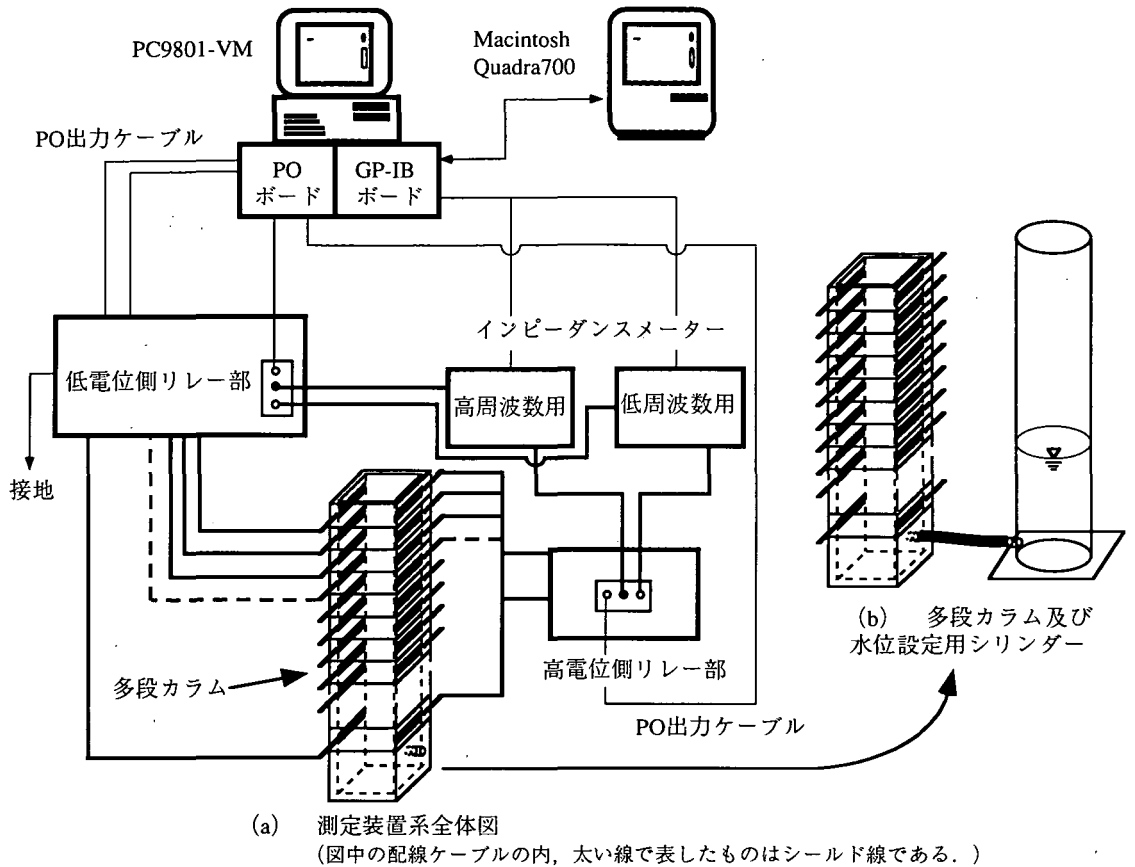


図-2 実験装置

ブル部などに分類できる。

本研究で作成したシステムでは、14個の電極におけるインピーダンスを約5秒で測定し、これを後述する方法で含水率などに変換して直ちにそれらのカラム深さ方向の分布を画面上に表示することができる。また、これらの操作は、初期プログラムに従って自動的に指定した時間毎に行うことができるようになっている。以下各部の構成を詳しく述べる。

#### a) GP-IB 制御部

GP-IB 制御部は、パーソナルコンピュータ (Apple Macintosh Quadra700 及び、NEC PC9801-VM)、GP-IB バスインターフェースボード、低周波数用インピーダンスメーター (エヌエフ回路設計ブロック社、2322LCZメーター)、高周波数用インピーダンスメーター (横河ヒューレット・パッカード社、HP 4285A プレジジョン LCR メーター) から構成される。この部分では、Quadra700 をシステムコントローラーとし、PC9801VM をシステムコントローラーと測定機器の媒介役である機器制御用コンピュータとして、GP-IB バスインター

フェースボードを介して、設定した任意の時間間隔で連続的に測定周波数を変えながらインピーダンスメーターで測定を行う。測定データは、後述する方法で、サセプタンスから体積含水率、そしてコンダクタンスと体積含水率から導電率を計算し、システムコントローラー上で表示する。このような計算で用いる検量線は、後述する方法で予め求めておく必要がある。

#### b) 測定カラム部

本研究で使用したカラムはアクリル製である。カラムの図を図-3 (a), (b) に示す。内側に測定電極を取り付けた電極用カラム (図-3 (a)) は、水平断面の内側の形状が一辺 5cm の正方形、接続したときの高さが 2cm である。測定電極はカラム内の測定部分が縦 1cm 横 5cm の薄いステンレス板である。これを図-3 (a) に示すようにカラムの内側の対辺の中央の高さに水平に張り、このステンレス板にとりつけたステンレス線をカラム外部に出して、これにシールド線の内部導体を接続している。このとき浮遊容量の発生を少しでも少なくするため、それぞれの電極につないだ 2 本のステ

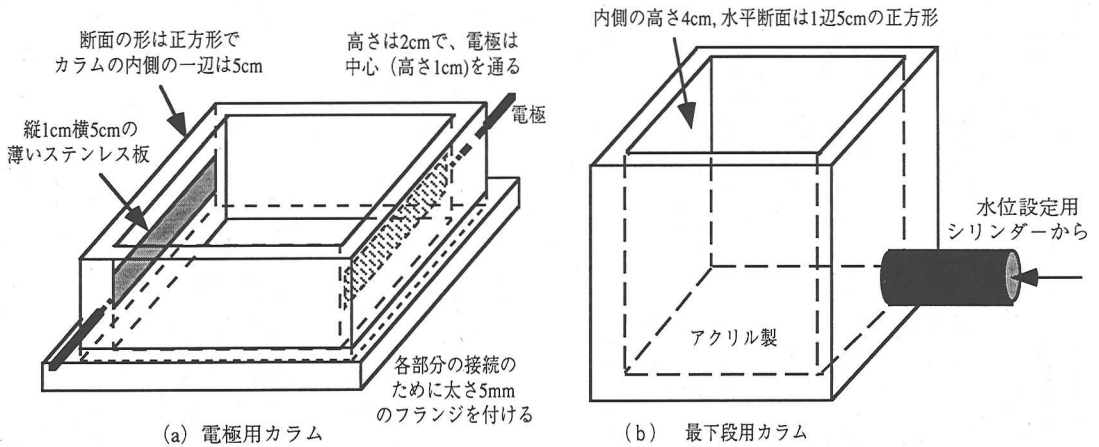


図-3 カラムの構造

ンレス線は、カラムに対し逆方法に出している。また最下段用カラムとして、水平断面の内側の形状が一辺5cmの正方形、接続したときの内部空間の高さ4cm、底面をアクリル板でふさいだカラム (図-3 (b)) を用いた。この最下段用カラムはチューブが接続してあり、図-2 (b) に示すように水位設定用シリンダーにつながっている。このチューブを通じて、カラムへの給水やカラムからの排水ができるようになっている。

c) 電極・ケーブル・インピーダンスメーター部

本研究では、測定ケーブルの接続方法として土壤試料のような高インピーダンス測定に適しているシールドド2端子法<sup>7)</sup>を用いた。シールドド2端子法はインピーダンスメーターの測定端子から測定電極までを、その両側でシールド導体をガード端子に接続したシールド線を用いてつなぐことで、浮遊容量の影響を減らす方法である。なお本研究で用いたシールド線は同軸ケーブルのように特性インピーダンスを管理したものではない。測定電極から出ているステンレス線と測定ケーブルの接続には、取り付け取り外しが容易なようにワニ口クリップを用いた。

実験では、高周波数用インピーダンスメーターと低周波数用インピーダンスメーターを、GP-IB制御部でリレー回路部を制御することにより切り替えることができるようにした。接続に用いたシールド線は、シールド線のもつ導線インダクタンスを軽減するためにできるだけ短くし、測定端子のHigh側とLow側のシールド線が対になるように捫りあわせた。

なおインピーダンスメーターの測定信号レベルは1Vとした。

d) リレー回路部

多段カラムの測定において、短い時間の間に複数の

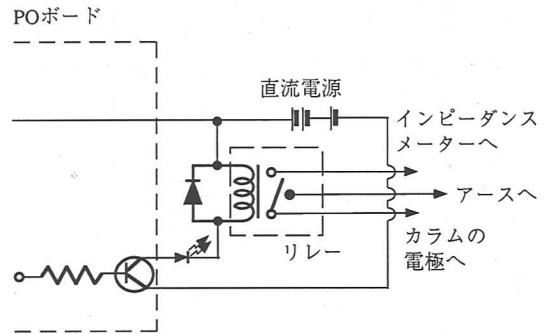


図-4 リレー回路図

周波数で複数のカラムのインピーダンスを測定しなければならないので、測定電極の切り替えはリレーを駆動することで行った。リレーの駆動はパラレル出力ボード (POボード) を介してコンピューターで行った。リレーには機械式ミニチュアリレーを用いた。リレーに関する回路を、図-4 に示す。POボードからの出力がONのときは、測定電極の一方とインピーダンスメーターのLow側とが接続され、POボードからの出力がOFFのときは測定電極の一方はアースに接続されるようになっている。また、測定電極のもう一方は常にインピーダンスメーターのHigh側に接続されている。こうすることによって、POボードからの出力がONになっていない電極、つまりインピーダンスメーターでの測定を行っていない電極間にも、常に測定を行っている電極間と同じ電圧 (本研究の場合1V) をかけることができ、後述するガード電流を流すことができる。なお、図-4中、各リレーに並列に接続してあるダイオード

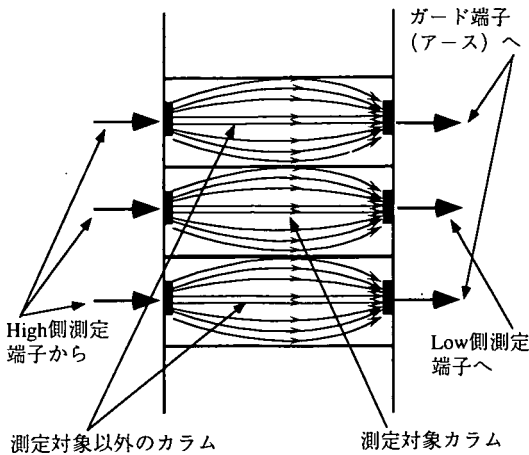


図-5 ガード電流

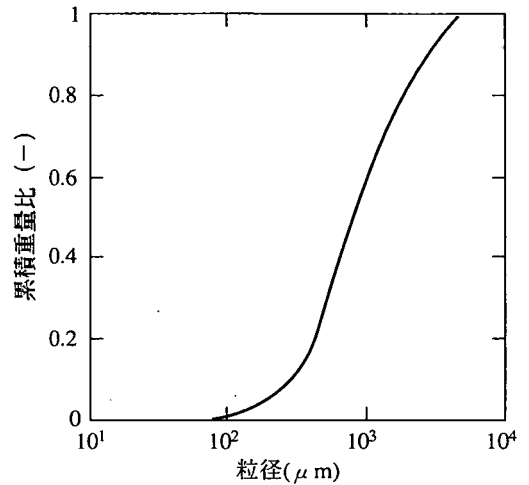


図-6 実験に用いた山砂の粒径分布

の目的は、サージ電圧によるPOボードの破損を防ぐためである。リレー回路部も浮遊容量が測定部に及ぼす影響を軽減するために、リレー回路の配線を施した配線板は、高電位側と低電位側を、アースを施したそれぞれ別のアルミケースに収納した。高周波数測定用インピーダンスメーターと低周波数測定用インピーダンスメーターの切り替えは、High側端子につながる高電位側リレー部とLow側端子につながる低電位側リレー部の2箇所で行った。これは、高周波数での測定では、回路中に完全に接続されていないケーブルなどの発生を避ける必要があるためである。

### (3) ガード電流

多段カラムにおいて1つのカラムだけに電流を流すと、測定電極間の中心部の電流が電極付近の電流の密度に比べて幅が広くなり、必要以上に広い範囲を測定してしまい測定対象範囲を特定することができない。この現象を防ぐため、図-5のように測定カラム以外の電極にガード電流を流す。ガード電流を流すことにより、測定電流は測定カラムの幅程度にしか測定電流が拡がらない。よって、ガード電流を流すことによりインピーダンスメーターによる測定対象がほぼカラム1つ分に限られ、測定値がカラムの代表値であると言えることになる。

また、交流電場においては、測定電極の近くに電流の流れしていない電極が存在すると、交流電場全体に大きな影響を及ぼしてしまいが、測定電極以外の電極全てにガード電流を流すことにより、この現象も防ぐことができる。

なお、最下段と最上段の電極カラムはガード電流が片側しか流れず、測定対象範囲をカラム1つ分に限定で

きない。このためこれらの電極は測定電極として用いず、ガード電極としてのみ用いている。

## 4. 土壌のインピーダンス特性の測定

### (1) 実験方法

本研究では温度変化がインピーダンスの測定値に与える影響を避けるため、定温ポンプと断熱材を用いて小さな定温室を作製し、土壌カラム、水位設定用カラム、通水前の試料水を貯留するタンク、温度測定用カラム等をここに収納し、測定対象である土壌カラムやカラムに流す溶液を一定温度20℃に保った。

図-3に示した電極用カラムを14段、最上段に土壌からオーバーフローした試料溶液を保持し、ポンプでくみ出すための水位を確保するための電極のないカラムを1段、最下段に給排水用のカラムを接続し、図-2に示した多段カラムを構成した。各カラムはフリンジの付いている側を下面とし、接続部には水漏れを防ぐためシリコングリスを塗りつけ、プラスチックコードを用いて全カラムを強い圧力で縛り、水洩れを防いだ。実験に用いた山砂の粒径分布を図-6に示す。多段カラム内に均一になるように注意しながら山砂を入れた後、一旦カラムに試料溶液をオーバーフローするまで与え続け、オーバーフローしてくる溶液の電導度が一定になったら設定水位を下げて排水を行い、不飽和の水形態をつくった。測定には、NaCl溶液を使用し、溶液の濃度を0.0001mol/L, 0.0002mol/L, 0.0005mol/L, 0.001mol/L, 0.002mol/L, 0.005mol/Lに変えて実験を行った。測定はどの濃度においても排水開始3時間後に行った。また、インピーダンス測定終了後、迅速に多段カラムを分解し、重量法を用いてカラム一段毎の体積含水率を測

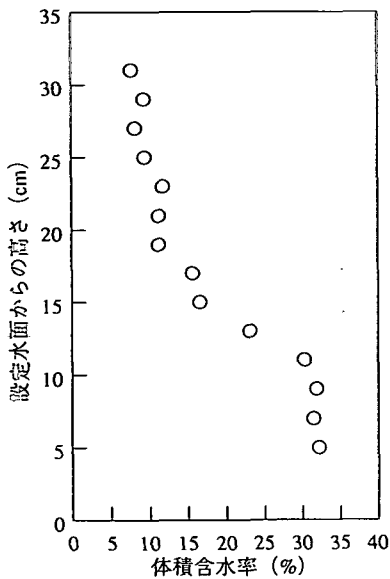


図-7 体積含水率の分布

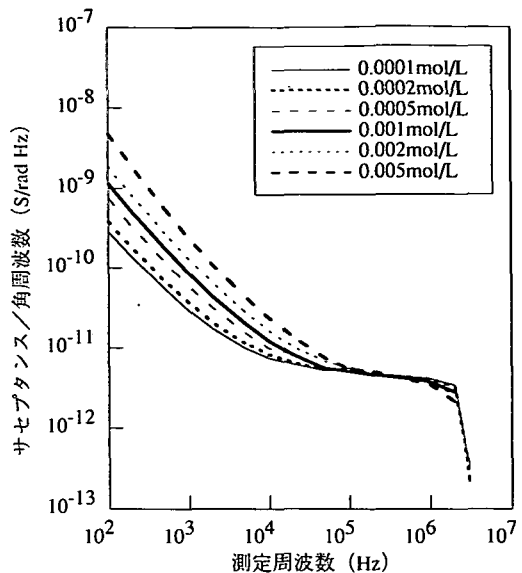


図-8 サセプタンス/角周波数の周波数変化

定した。測定周波数としては、低周波数測定用のインピーダンスメーターでは、100Hz, 200Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 5kHz, 10kHz, 20kHz, 50kHz, 100kHz, 高周波測定用のインピーダンスメーターでは、200kHz, 500kHz, 700kHz, 1MHz, 2MHz, 3MHz, 4MHz, 5MHz, 7MHz, 10MHzを用いた。

## (2) 実験結果および考察

### a) 測定値の周波数特性

重量法で求めた排水後3時間後のカラム内の体積含水率分布を図-7に示す。また、図-8と図-9に下から2段目のカラムでのサセプタンス/角周波数とコンダクタンスの測定周波数に対する変化を示す。このとき下から2段目のカラムは含水率31%ではほぼ飽和状態に近い。図-8より、周波数の低いとき、サセプタンス/角周波数は土中水のイオン濃度が高いほど大きい。周波数が高くなり100kHz付近では特に低濃度の時、濃度によらずほぼ一定の値となることがわかる。これは低周波数では土中水のイオンが分極現象を起こすため土壌の示す静電容量がイオン濃度が高いほど大きい。ある程度周波数が高くなるとイオンの移動距離が小さくなり分極現象の効果が小さくなるためと考えられる。また低濃度では1MHz付近から、高濃度では数百kHz付近からサセプタンス/角周波数の値が急に下がり始めるが、これは主として導線インダクタンスなどの測定回路の寄生成分や試料自体の持つインダクタンスのためと考えられる。図-8では3MHzまでしか測定値を示していないが、これ以上の周波数では、測定値が容量性

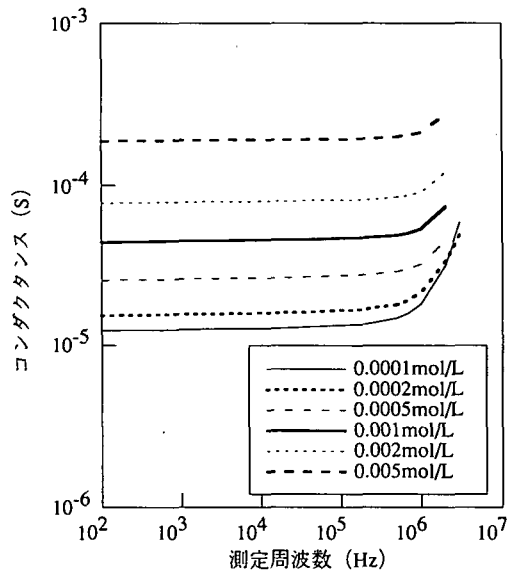
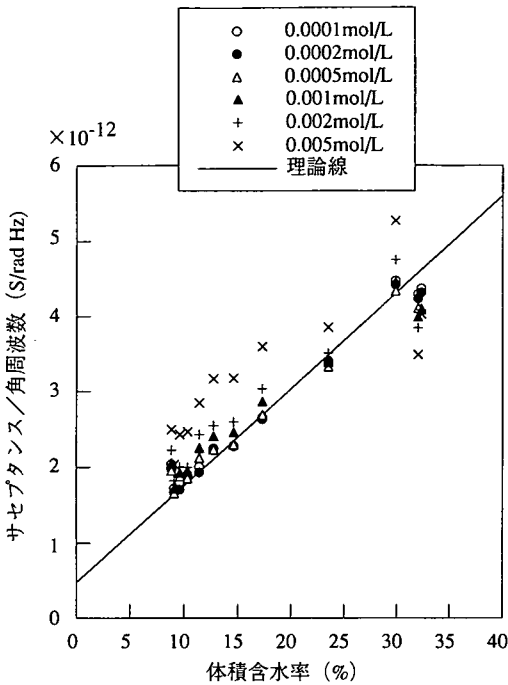


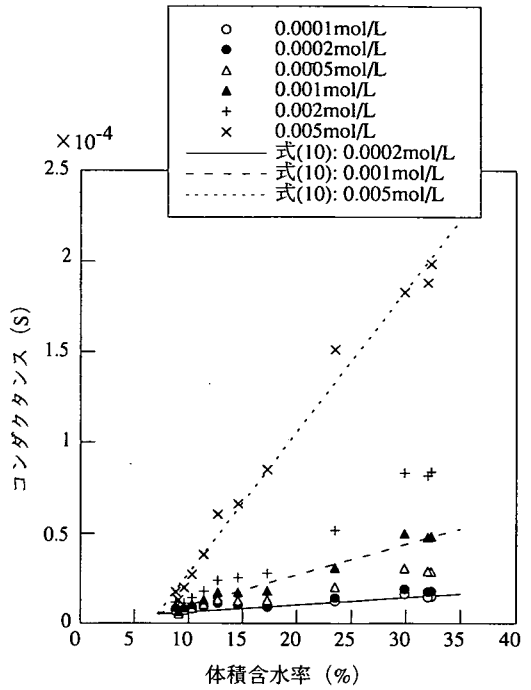
図-9 コンダクタンスの周波数変化

から誘導性になってしまう。また、適切な測定値が得られなくなったためである。なお、サセプタンス/角周波数は容量性の場合、負の値であるが、本研究中ではこれを全て正の値で表示している。

図-9を見ると、コンダクタンスは周波数の低いとき、周波数とともにわずかに上昇する傾向を見せるが、数百kHz付近まではほぼ一定値に近い。しかし低濃度では数百kHz付近から、高濃度では1MHz付近からはコ



図—1 0 体積含水率とサセプタンス/角周波数の関係



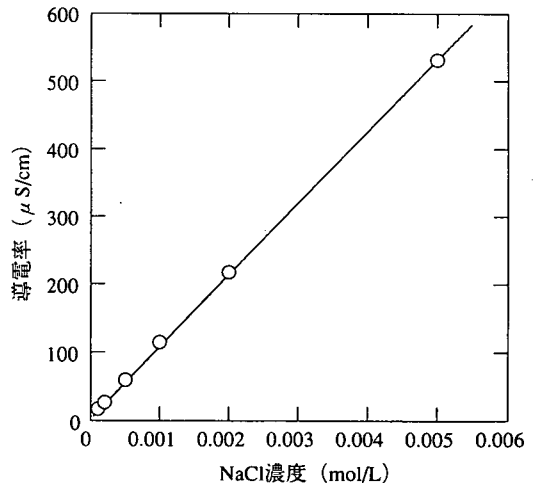
図—1 1 体積含水率とコンダクタンスの関係

ンダクタンスが急激に上昇していく。これはサセプタンス/角周波数の場合同様、導線インダクタンスなどの寄生成分や試料の持つインダクタンスの影響であると考えられる。なお、一般的傾向としてイオン濃度が高いほどコンダクタンスの値は大きい。

以上のことから本研究で用いた測定系では、高周波数では導線インダクタンスなどの影響が大きくなるため、土壌のインピーダンス特性を図—1に示すような等価回路で表現することは不可能になると考えられる。なお、より複雑なモデルと実測された周波数特性を用いてインダクタンスなどの寄生成分の影響を除こうと試みたが、集中定数系によるモデル化に無理があるためか、計算による測定値の補正は困難であった。よって本研究では、サセプタンス/角周波数への濃度の影響が十分小さく、サセプタンス/角周波数の値が一定値を示す周波数範囲で、かつ電気的寄生成分の影響がそれほど大きくない測定周波数として、500kHzを解析に用いる測定周波数とした。

b) インピーダンス測定値と含水率およびイオン濃度との対応

インピーダンスメーターでは実際はインピーダンスの絶対値と位相角を測定し、これをコンダクタンスとサセプタンスに分離した。図—1 0に体積含水率とサセプタンス/角周波数の関係を、全ての測定濃度について示す。図—1 1に、体積含水率とコンダクタンスの関



図—1 2 NaCl 溶液の導電率 (20℃)

係を全濃度について示す。また、測定に用いたNaCl溶液の20℃における導電率と溶液濃度の関係を図—1 2に示す。図—1 2に示すように溶液のNaCl濃度と導電率の間にはきれいな直線関係があるから、土中水の導電率がわかれば土中水のNaCl濃度がわかることになる。

図—1 0から、体積含水率とサセプタンス/角周波数の間には特に低濃度の時、正の相関関係が成り立つことが分かる。濃度が高くなるとサセプタンス/角周波

数の値が、高含水率の場合を除いて上方へずれていく傾向が見られるが、これは500kHzという測定周波数が土壤の誘電率の濃度依存性が無くなるためには不十分で、特に高濃度で土中水中イオンの誘電率への影響が強く残っているためではないかと考えられる。特に低含水率では、土壤粒子表面の土壤溶液の厚さが薄くなるため土壤溶液中イオンの移動可能距離が短くなり、土壤粒子表面にイオンが集中する分極現象が現れやすくなって濃度依存性が現れやすくなると考えられる。図—10に示すようにサセプタンス/角周波数と体積含水率の間に正の相関関係が見られたことから、本研究では以下のような関係を仮定した。

土壤の静電容量 (C [F]) は、土壤の見かけの比誘電率 ( $\epsilon_a$  [-]) に比例し、 $\epsilon_a$  は体積含水率 ( $\theta$  [%]) とその温度における水の比誘電率 ( $\epsilon_{water}$  [-]) の積と、土壤粒子の示す比誘電率 ( $\epsilon_{soil}$  [-]) の和で表されると仮定した。式で表すと、

$$\epsilon_a = \epsilon_{soil} + \epsilon_{water} \cdot (\theta / 100) \quad (4)$$

$$C = \epsilon_a \cdot A \quad (5)$$

ただし、Aを形状係数(電極の幾何学的関係で決まる定数と真空の誘電率の積)とする。

$\epsilon_{water}$ には純水の比誘電率を援用することとした。すなわち、

$$\epsilon_{water} = 87.740 - 0.40008 t + 9.398 \times 10^{-4} t^2 - 1.410 \times 10^{-6} t^3 \quad (6)$$

ただし、tは温度 [°C] である<sup>8)</sup>。また、 $\epsilon_{soil}$ としては、乾燥土の比誘電率が20°C、1MHzで3.0程度であることが知られている<sup>9)</sup>ので、 $\epsilon_{soil} = 3.0$ をあてはめてみた。

Aを求めるためには、カラムに純水のみを入れてインピーダンスの測定を行った。式(2)で示したように、図—1のような土壤の電気的等価回路を仮定すると、

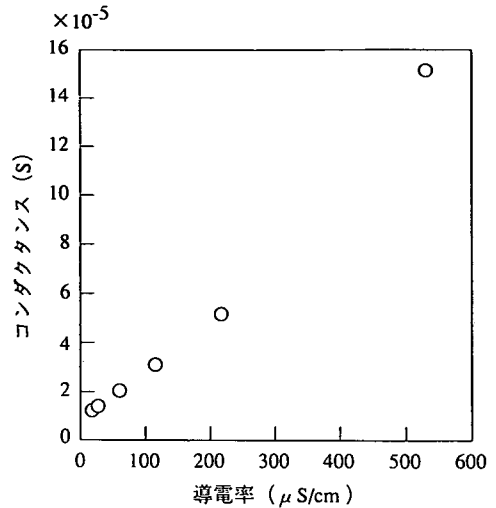
$$C = B / \omega \quad (7)$$

カラム内を純水で満たした場合は、 $\theta = 100$ で $\epsilon_{soil} = 0$ であるから、式(4)、(5)に各数値を代入すると、

$$A = C / \epsilon_{water} = (B / \omega) / \epsilon_{water} \quad (8)$$

よりAの値が定まる。本研究の条件下では、実際に測定を行った結果、 $A = 1.6 \times 10^{-13}$  [F] という値を得た。

以上のように定めたAと $\epsilon_a$ を式(5)に代入して $C = B / \omega$ を求め、含水率に対して、サセプタンス/角周波数の実測値とともにプロットしたのが図—10の実線である。ただし、Aは各段のカラム毎でも求まるが、ここではその平均値を採用している。図—10から、計算値と低濃度での実測値が比較的よく一致していることが分かる。この結果、土壤の静電容量(サセプタンス/角周波数に相当)と体積含水率の関係は、式(4)及び(5)で仮定した関係で近似できるといえる。また、これらの式が成り立つならば、上で示したような形状係数の求め方が可能であるため、例えば、一旦土壤カラム



図—13 導電率とコンダクタンス (体積含水率 23%)

を土壤を入れず純水だけで満たし、その時のサセプタンスを実測すれば、簡単にサセプタンス/角周波数から体積含水率を求めるための検量線が得られることになる。

コンダクタンスに関しては、図—11より土中水の導電率と体積含水率の両者に依存する量であることが予想される。特に体積含水率の増加に対してコンダクタンスはほぼ直線的に値を増加させている。また、図—11からは導電率が体積含水率とコンダクタンスの関係の勾配を決定していることが推定される。そこで、下から5段目のカラム(含水率23%)での導電率とコンダクタンスの関係をプロットすると図—13に示すように、導電率とコンダクタンスの関係もほぼ直線な関係を持っていることがわかった。そこで、コンダクタンスと導電率及び体積含水率との関係を次のように仮定した。

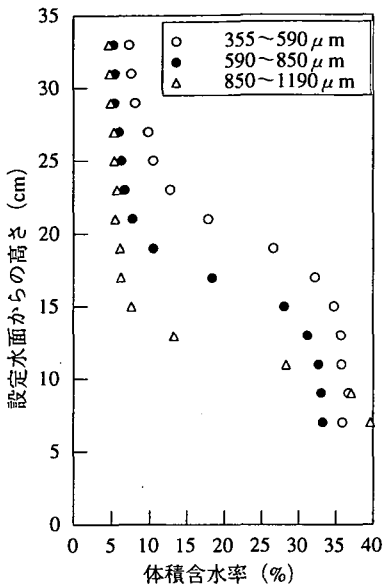
$$G = a \sigma (\theta - \theta_1) + b \quad (9)$$

ただし、G:コンダクタンス [S], a, b:定数、 $\sigma$ :導電率 [ $\mu$ S/cm],  $\theta$ :体積含水率 [%],  $\theta_1$ :体積含水率の内、濃度変化しない水分量(残留不動水分量) [%]。図—11の結果からa, b,  $\theta_1$ を決定するため、まず、導電率毎に体積含水率とコンダクタンスの回帰直線を求めた。さらにこれらの回帰直線の傾きと導電率 $\sigma$ との回帰直線 ( $y = a \sigma$ ) と、y切片と導電率 $\sigma$ との回帰直線 ( $y = b - a \sigma \theta_1$ ) を求めて定数a, b,  $\theta_1$ を決定し、次式を得た。

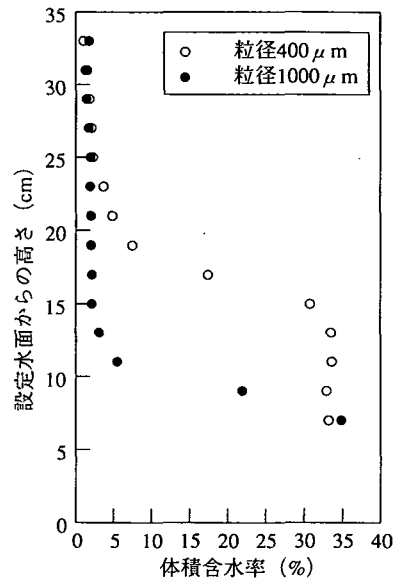
$$G = 1.47 \times 10^{-8} \cdot \sigma \cdot (\theta - 7.13) + 5.10 \times 10^{-6} \quad (10)$$

この式から求まる直線を図—11に3つの濃度(0.0002, 0.001, 0.005mol/L)について示す。これらの直線は実データとよく一致している。





図一 1 4 各粒径の山砂における体積含水率の分布



図一 1 5 ガラスビーズの体積含水率の分布

式(9)では、本実験のような浸透実験において濃度  
が変化してコンダクタンスの変化に寄与する水分量は、  
体積含水率  $\theta$  から土壤空隙中における結合水などから  
成る残留不動水分の体積含水率  $\theta_r$  を除いた、真に移動  
可能な水分量(有効含水率)であると考えてモデル化を  
行った。そして式(9)中のbの値は、土壤粒子そのもの  
と、残留不動水分のコンダクタンスへの寄与を表す  
と考えられる。つまりコンダクタンスは、通常の水の移  
動では不変な部分bと、残留不動水分を除いた真に移動  
可能な水分の効果  $a\sigma(\theta - \theta_r)$  の和の形で表すことが  
できると考えられる。

## 5. 粒径変化の影響

### (1) 実験手順

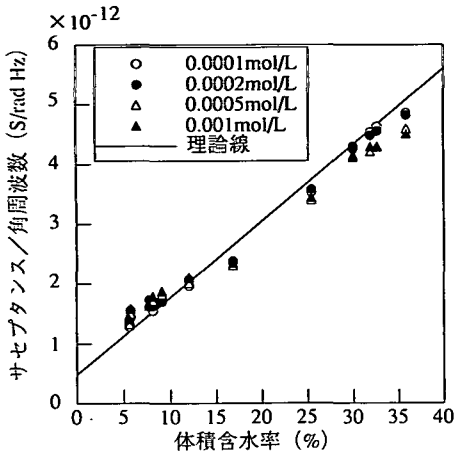
測定対象の土壤の粒径変化が、インピーダンスの測  
定値に与える影響について検討するため、以下の実験  
を行った。実験手順は4.の(1)と同じで、試料溶液  
濃度を6段階変化させて測定が終了したら、土壤カラム  
に詰める土壤の粒径を変化させ、次の測定を行った。粒  
径としては、4.の実験で用いたものと同じ山砂をふる  
いにかけて、355~590  $\mu\text{m}$ 、590~850  $\mu\text{m}$ 、850~1190  
 $\mu\text{m}$ の3段階に分けたものについて実験を行った。また山砂との比較として粒径400  $\mu\text{m}$ と1000  $\mu\text{m}$ の2種  
類のガラスビーズについても実験を行った。ただしガ  
ラスビーズを用いた実験では、試料溶液の濃度は  
0.005mol/Lと0.002mol/Lの2段階のみについて行った。

なお、定温室の設定温度は、いずれの粒径においても20  
 $^{\circ}\text{C}$ とし、土壤カラム内および試料溶液の温度も一定値  
20 $^{\circ}\text{C}$ になったことを確認してから各実験を行った。

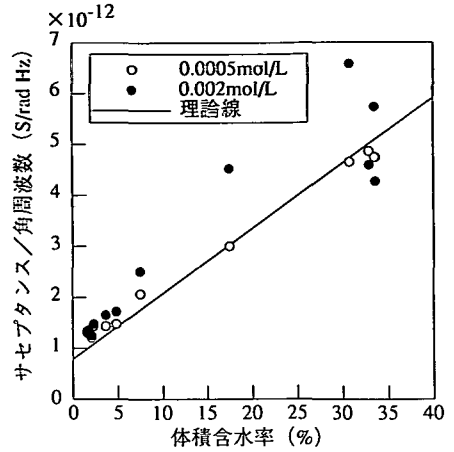
### (2) 実験結果

山砂の粒径毎の高さ方向の体積含水率の分布を図一  
14に、ガラスビーズの高さ方向の体積含水率の分布  
を図一15に示す。

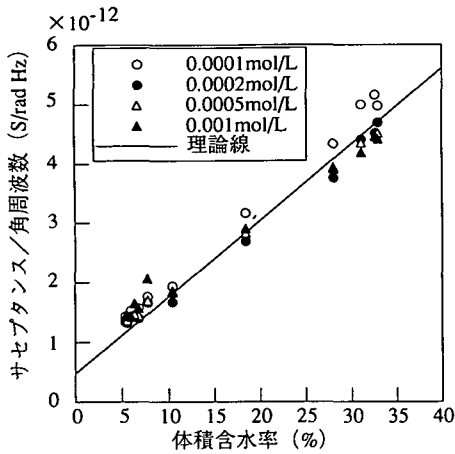
山砂を用いた実験で得られた測定周波数500kHzにお  
ける体積含水率とサセプタンス/角周波数の関係を図一  
16から図一18に粒径毎に示す。ただし濃度が高濃  
度の場合、電気的寄生成分の影響がかなり強くみられ  
たので、ここでは濃度0.001mol/L以下について解析し、  
結果を示した。各図中には図一10中に示した直線と  
同じ直線を示している。粒径に関係なく、どの図にお  
いてもサセプタンスと含水率の関係は式(4)、(5)か  
ら求めた直線に図一10と同じ程度には一致しており、  
サセプタンスと含水率の関係が粒径に関係なく、ほぼ  
水分量だけで決定されることを示している。ガラス  
ビーズを用いた実験で得られた測定周波数500kHzにお  
ける体積含水率とサセプタンス/角周波数の関係を図一  
19と図一20に示す。また両図中にも式(4)、(5)  
から求めた直線を示した。ただし式(4)中の  $\epsilon_{\text{soil}}$   
としては、ソーダガラスの比誘電率が7.5程度である<sup>8)</sup>  
ことから、ガラスビーズカラム中の空隙率を0.35程度と  
して、 $\epsilon_{\text{soil}} = (1 - 0.35) \times 7.5 = 4.9$ をあてはめてみた。両  
図からわかるようにガラスビーズについても式(4)、  
(5)の関係がほぼ成立することがわかる。



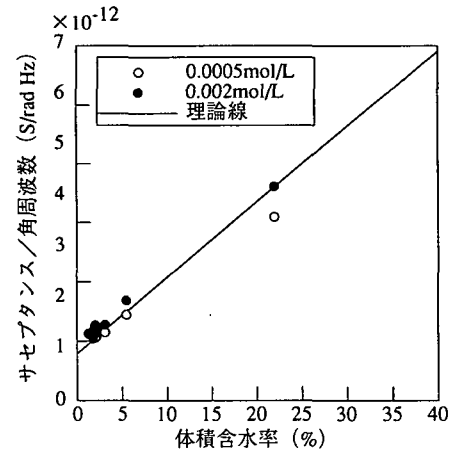
図一 16 サセプタンス/角周波数と体積含水率の関係  
(山砂, 粒径 355 ~ 590  $\mu$  m)



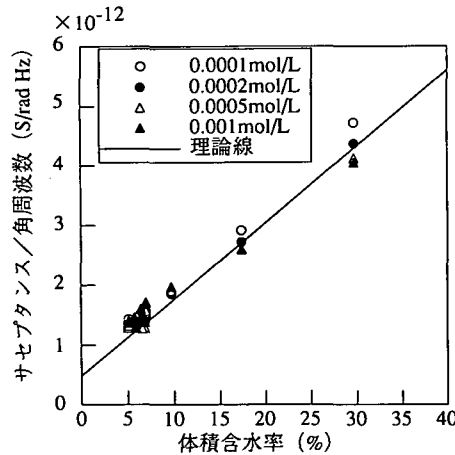
図一 19 サセプタンス/角周波数と体積含水率の関係  
(ガラスビーズ, 粒径 400  $\mu$  m)



図一 17 サセプタンス/角周波数と体積含水率の関係  
(山砂, 粒径 590 ~ 850  $\mu$  m)



図一 20 サセプタンス/角周波数と体積含水率の関係  
(ガラスビーズ, 粒径 1000  $\mu$  m)



図一 18 サセプタンス/角周波数と体積含水率の関係  
(山砂, 粒径 850 ~ 1190  $\mu$  m)

コンダクタンスと含水率の関係を山砂について図— 2 1 から図— 2 3 に, ガラスビーズについて図— 2 4 と図— 2 5 に示す. また各図中には式 (1 0) を求めたと同じ方法で求めた, コンダクタンスと含水率および導電率の関係を表す直線を, 山砂については 0.0002 mol/L と 0.001 mol/L について, ガラスビーズについては 0.0005 mol/L と 0.002 mol/L について示す. 各図中の直線を表す式を以下に示す.

山砂, 粒径 355 ~ 590  $\mu$  m

$$G = 1.64 \times 10^{-8} \sigma(\theta - 5.60) + 6.77 \times 10^{-6} \quad (1 1)$$

山砂, 粒径 590 ~ 850  $\mu$  m

$$G = 1.67 \times 10^{-8} \sigma(\theta - 4.64) + 4.92 \times 10^{-6} \quad (1 2)$$

山砂, 粒径 850 ~ 1190  $\mu$  m

$$G = 1.90 \times 10^{-8} \sigma(\theta - 4.22) + 3.09 \times 10^{-6} \quad (1 3)$$

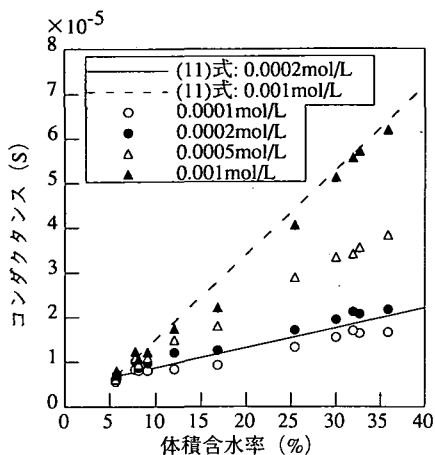


図-2 1 コンダクタンスと体積含水率の関係  
(山砂, 粒径 355 ~ 590  $\mu\text{m}$ )

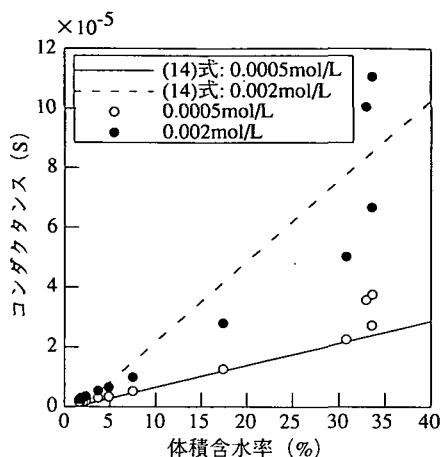


図-2 4 コンダクタンスと体積含水率の関係  
(ガラスビーズ, 粒径 400  $\mu\text{m}$ )

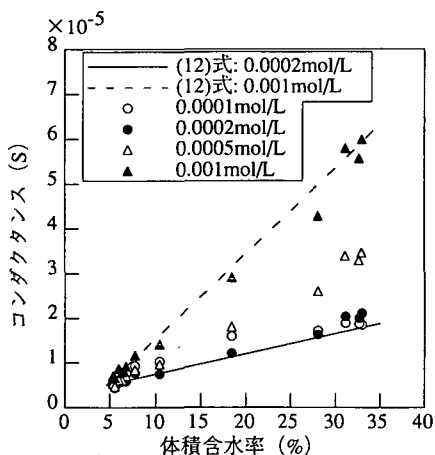


図-2 2 コンダクタンスと体積含水率の関係  
(山砂, 粒径 590 ~ 850  $\mu\text{m}$ )

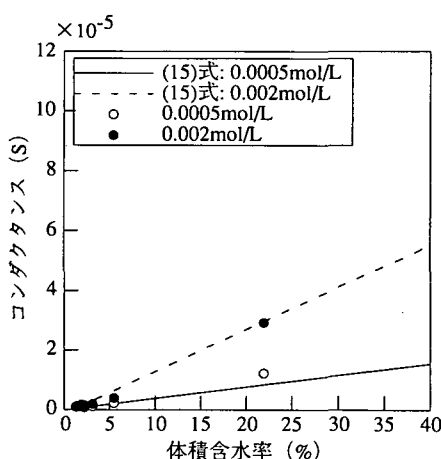


図-2 5 コンダクタンスと体積含水率の関係  
(ガラスビーズ, 粒径 1000  $\mu\text{m}$ )

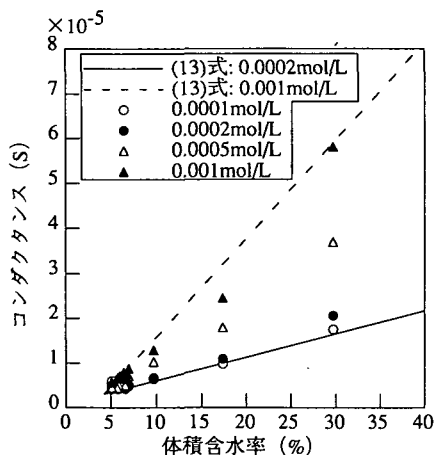


図-2 3 コンダクタンスと体積含水率の関係  
(山砂, 粒径 850 ~ 1190  $\mu\text{m}$ )

ガラスビーズ, 粒径 400  $\mu\text{m}$

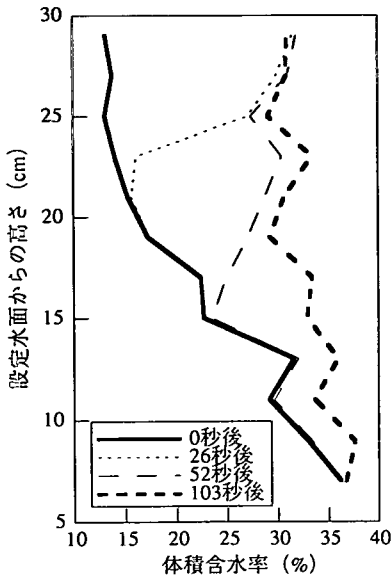
$$G = 1.24 \times 10^{-8} \sigma (\theta - 2.22) + 8.30 \times 10^{-7} \quad (14)$$

ガラスビーズ, 粒径 1000  $\mu\text{m}$

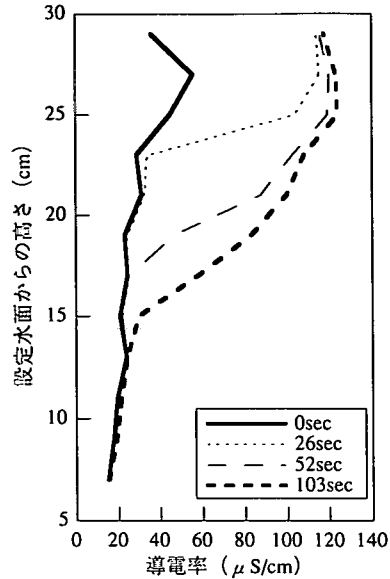
$$G = 6.54 \times 10^{-9} \sigma (\theta - 1.34) + 4.33 \times 10^{-7} \quad (15)$$

各式中で残留不動水分量  $\theta$  と考えた値は山砂の小粒径から大粒径へ、そしてガラスビーズの小粒径から大粒径へと順に小さくなっており、定性的には妥当な結果だと考えられる。また各式中右辺定数項は、土壌粒子そのものと残留不動水分量からのコンダクタンスへの寄与と考えたが、これも  $\theta$  と同様な変化をしており、定性的に妥当な結果が得られている。これらのことは式(9)の関係式の妥当性を示している。

なお、粒径 1000  $\mu\text{m}$  のガラスビーズでの実験結果は高含水率でのデータが少なく、はっきりしたことは言



図一26 体積含水率分布の時間変化



図一27 導電率分布の時間変化

えないが、粒径 $400\mu\text{m}$ のガラスビーズでの実験結果では、図一19のサセプタンス/各周波数と含水率の関係、図一24のコンダクタンスと含水率の関係共に、直線の周りでのばらつきが山砂の場合に比べ大きい。これはガラスビーズを用いた実験での高濃度での測定値が、電気的寄生成分の影響を比較的強く受けていた、あるいはガラスビーズでの含水率の測定精度が山砂より悪かったなどの原因が考えられる。実際、ガラスビーズの方が土壌よりも粒子についての水分が移動しやすく、カラムを分解して行う重量法での含水率の測定は、土壌の場合よりも困難であった。

## 6. 不飽和水分物質移動の実時間測定例

### (1) 実験内容

ここでは、4.の実験結果を用いて、 $20^{\circ}\text{C}$ における検量線を作成し、その検量線を利用して土壌カラム内の物質移動を追跡した。実験では、4.で用いた山砂を入れたカラムを一旦精製水で飽和させた後、排水を行い、3時間静置後、カラムの最上段の土壌表面にNaCl溶液を湛水し、 $20^{\circ}\text{C}$ での浸透の様子を追跡した。

### (2) 実験結果及び考察

実験に用いたNaCl溶液は、導電率 $124\mu\text{S/cm}$  ( $20^{\circ}\text{C}$ )であり、ほぼ濃度 $0.001\text{mol/L}$ に相当する。実験結果を図一26及び図一27にそれぞれ体積含水率及び導電率が経時的に変化する様子として示す。

図一26、図一27においては、カラムの最上段にNaCl溶液を湛水し、浸透を始めた時刻を0秒としている。封入空気逃げ道の無い土壤中に表層から水分の浸透がある場合、内部空気圧の上昇によって地下水面が降下し、それによって下方に向かう浸透流が生起するため、土壌の下部において含水率が高まる現象が考えられる。図一26と図一27の52秒後の結果を比べると、図一27では導電率の上昇が高さ17cmに達しているが、図一26では含水率の上昇は15cmにまで達している。また、カラム全体がほぼ飽和した103秒後においては導電率の上昇は高さ13cmまでしか達していないが、含水率の上昇は高さ7cmにまで達している。このことは、間隙空気押し出し効果により、浸透水の移動よりも含水率の上昇の方が若干速く進行する現象を示していると考えられる。こうした連続的な含水率と導電率の変化の様子が把握できる、つまり水分と物質移動の様子が実時間で把握できるのは、電気的手法の利点であり、今後さらに精度を上げることで、土壌内部の物質移動メカニズム解明の大きな助けとなると考えられる。なお、図一26で上部が飽和に達しないのは、間隙空气が103秒程度では完全に抜けきらないためと考えられる。また図一26の水分分布は図一14、15に比べばらついているが、この原因としては特に設定水面からの高さ13cmにある電極における接触インピーダンスの値が、なんらかの原因で他の電極と異なり、他の電極の値に比べ特異な値になったのではないかと考えられる。

## 7. 簡便な検量線の作成方法について

最後に本研究の結果から考えられる、インピーダンス測定法における簡便な検量線の作製方法についてまとめておく。

体積含水率：

式(4)、(5)、(7)から、サセプタンス/角周波数  $B/\omega$  は次式で表される。

$$B/\omega = A(\epsilon_{\text{soil}} + \epsilon_{\text{water}} \theta / 100) \quad (16)$$

ここで形状係数  $A$  の値は4. の(2)のb)で述べた方法で求められる。また  $\epsilon_{\text{soil}}$  の値としては4. の(2)のb)で仮定した値をそのまま用いても大きな誤差にはならないと考えられる。しかし実際にこの値を測定するには、 $A$  の値を求めた後、カラムに乾燥した土壌を入れ、この土壌を純水で飽和させるのに必要な水分量を求め、これを  $\theta$  とすると、このときの  $B/\omega$  の値を測定すれば、式(16)中の  $\epsilon_{\text{soil}}$  以外の変数は全て既知となるから  $\epsilon_{\text{soil}}$  の値が求まる。

土中水の導電率：

導電率については、コンダクタンス  $G$  と、有効含水率  $\theta - \theta_p$ 、可動水分の導電率  $\sigma$  の関係を示した式(9)を提案した。式(9)を用いると、未知定数  $a, b, \theta_p$  を求めて検量線を作成する方法は以下ようになる。

まず、含水率はサセプタンスの測定値から求められるから、次式のような、ある濃度  $\sigma_1$  での含水率とコンダクタンスの関係式を実験により求める。

$$G = p\theta + q \quad (17)$$

このとき

$$p = a\sigma_1 \quad (18)$$

から  $a$  が求まる。また

$$q = b - a\sigma_1\theta_p \quad (19)$$

だから、このような関係式を別の濃度  $\sigma_2$  についても求めれば  $b$  と  $\theta_p$  の値を決定でき、溶液濃度に関する検量線が求まる。

ただし以上の方法で含水率および土中水の導電率を求めるための検量線を作製するには、図-8、図-9のような測定対象のサセプタンス/角周波数およびコンダクタンスの周波数変化を測定することにより、電気的寄生成分の影響が十分小さいことを確認する必要がある。

## 8. まとめと結論

本研究では、土壌の含水率や土中水の溶液濃度を測定する方法としてのインピーダンス測定法の有効性を検討するため、測定システム全体をコンピューター制御した土壌カラムのインピーダンス測定システムを構

成し、一定温度下において不飽和土壌カラム測定実験を行った。土壌の電気的等価回路としてコンデンサーと抵抗の並列回路を採用し、まず、本実験で使用した山砂が示すインピーダンスの周波数特性を測定することにより、このモデル化の妥当性を検討した。次に、含水率や土中水の導電率と、インピーダンスの測定値との関係を求めるため、多段カラムにおいて様々な含水率、様々な土中水中NaCl濃度でのインピーダンスを測定した。また粒径の変化が測定値に与える影響についても実験的に検討し、最後にNaCl溶液の不飽和浸透を実際に追跡することにより、本測定システムの有効性を検討した。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) 本研究で仮定した土壌の電気的等価回路に基づく、土壌のインピーダンスの測定値から求めたサセプタンス/角周波数はコンデンサーの静電容量を、コンダクタンスは抵抗の逆数を示し、一定値を示すことになる。実際には、コンダクタンスはほぼ一定値を示したが、分極現象の影響のため、サセプタンス/角周波数は測定周波数の上昇とともに減少し、100kHz付近になって土中水の濃度によらず一定値を示す特性を示した。しかし本研究で用いた測定系では、数百kHzより高周波数では導線インダクタンスなどの電気的寄生成分の影響が大きくなるため、サセプタンス/角周波数とコンダクタンスは周波数とともに大きな変化を示し、土壌インピーダンスの測定結果をこのような等価回路で表現することは不可能であった。このため本研究では、サセプタンス/角周波数への濃度の影響が十分小さく、サセプタンス/角周波数の値が一定値を示す周波数範囲で、かつ電気的寄生成分の影響がさほど大きくない測定周波数として、500kHzを解析に用いる測定周波数とした。
- (2) 一定温度20℃でのインピーダンスの測定値と含水率や誘電率との関係を求めることにより、土壌のサセプタンスが含水率と線形関係にあること、土壌のコンダクタンスが土壌溶液の導電率と含水率それぞれと線形関係にあることを示した。またこの結果に基づき、土壌のインピーダンスの値を表す理論式を導き、実験データによく一致することを示した。
- (3) 土壌特性の違いがインピーダンスの測定値に及ぼす影響を見るため、砂の粒径を変えた場合と、ガラスビーズを用いた場合について実験を行った。その結果、山砂を用いた実験では、サセプタンス/角周波数の値は砂の粒径に関係なく、ほぼ含水率のみで決まり、仮定した理論式が成立することがわかった。またガラスビーズを用いた実験では、砂の誘電率をガラスの誘電率に変更する、わずか

な修正で理論式と実験結果とのよい一致を見た。

- (4) 本研究で求めた検量線と本研究で開発したシステムを、実際の不飽和カラム内水分物質同時移動の追跡に使用した。その結果、溶液が不飽和層に浸透する際に、溶液の浸透よりも含水率の上昇が速く移動していく現象を捉えることができた。よって本研究で開発した方法は不飽和浸透現象の実時間追跡などにおいて極めて有効であると考えられる。
- (5) 最後に、土壌の持つインピーダンス特性の定量的モデル化に基づいた、簡便な検量線作成方法を提案した。ただし本研究の方法で含水率および土中水の導電率を求めるための検量線を作製するには、測定対象のサセプタンス/角周波数およびコンダクタンスの周波数変化を測定することにより、電氣的寄生成分の影響が十分小さいことを確認する必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 西田一彦, 青山千彰: 不飽和土壌の電気比抵抗特性と不飽和浸透計測への電氣的探査の応用, 土木学会論文集, No.475/III -24, pp.1-9, 1993.
- 2) 高倉伸一: 比抵抗法による地下水位変化のモニタリングの試み, 物理探査, 44巻, 4号, pp.227-231, 1989.
- 3) 岡本敬一: 誘電率探査法(その1) -地下水調査に対する有効性について-, 物理探査, 33巻, 4号, pp.19-30, 1980.
- 4) Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P.: Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines, *Water Resour. Resear.*, Vol.16, pp.574-582, 1980.
- 5) Dasberg, S. and Dalton, F.N.: Time domain reflectometry field measurements of soil water content and electrical conductivity, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.49, pp.293-297, 1985.
- 6) 蓑輪善蔵: 最新の湿度計と水分計 - その原理と構造・使用法 -, 日本計量新報社, 1991.
- 7) 本田信, 柳川洋: インピーダンス測定ハンドブック - インピーダンス測定とその応用 -, 横河ヒューレット・パッカード社, 1991.
- 8) Eisenberg, P. and Kauzman, W.: *The Structure and Properties of Water*, Oxford Univ. Press, Oxford, 1969.
- 9) 理科年表・昭和64年, 国立天文台編, 丸善株式会社, 1988.

(1996. 9. 17 受付)

## REAL TIME MEASUREMENT OF WATER CONTENT AND CONCENTRATION IN A SOIL COLUMN AT CONSTANT TEMPERATURE USING IMPEDANCE MEASUREMENT METHOD

Minoru YONEDA, Ken SAKO, Yoriteru INOUE and Shinsuke MORISAWA

We studied the effectiveness of measuring impedance of soil in the experiments as the method of real time measurement of water content and ion concentration of soil water. We composed an impedance measurement system of a soil column controlled by computers, and made experiments for measuring them at a constant temperature. We concluded that susceptance divided by the angular frequency indicated a water content independent from ion concentration or a soil particle size, and that the further measurement of conductance made it possible to trace the change of ion concentration. We also proposed a simple method to make calibration curves. We think that the measurement method developed in this study is very effective in tracing unsaturated phenomena in a soil column.