

非接触型電極を用いた土壌カラム内 水分物質移動の実時間測定

京都大学工学部 正 会 員 米田 稔
京都大学工学部 フェロー 森澤眞輔
荏原製作所 龍井智彦

1. はじめに

米田ら¹⁾は土壌に直接接触するタイプの電極を用いてインピーダンスを測定することにより、土壌カラム中の水分と物質の実時間測定が可能であることを示した。しかし直接接触型電極は実験用カラムの作成が困難なこと、電極が破損劣化しやすいことなどの欠点を持つ。このため本研究では米田らの電極とほぼ同じ電極をカラムの外部に配置する非接触型電極を用いてインピーダンスを測定することにより、土壌カラム内の水分物質同時移動の実時間測定を試みた。

2. 測定システム

コンピュータにより自動で測定・データ解析を行わせるため、GP-IBを用いて測定装置を制御した。また一定温度で測定を行うため、溶液やカラムをインキュベーターに入れて管理した。図1に使用した装置の模式図を示す。

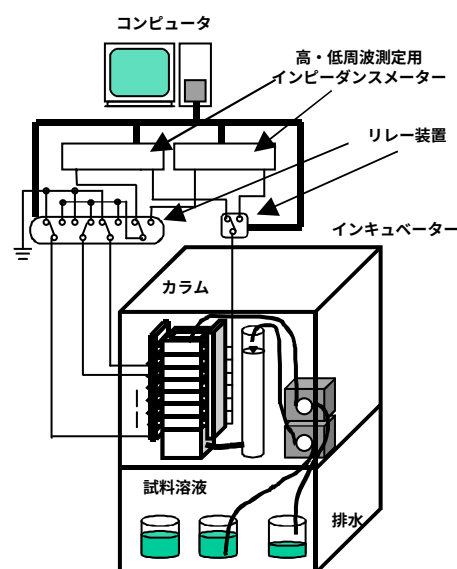


図1 土壌インピーダンス測定システム

3. 電気的等価回路モデル

電極の物理的形狀や交流回路に関する理論から、カラム内で起こっている電気的な現象について考察した。その結果、荷電粒子が電圧に伴って自由に運動する現象を電流に、荷電粒子の運動がカラム壁や土壌に妨げられて電気容量が発生する現象をコンデンサーに見立て、集中並列等価CG回路として近似した。また、実際に解析に利用する電気的特性としては、比誘電率 ϵ_r [-]と導電率 κ [S/cm]を用いることにした。

インピーダンスメーターの表示値には、カラムのインピーダンス以外にケーブルのインダクタンスや抵抗、漂遊容量、およびカラムの段ごとの誤差などの雑成分が含まれているため、これらを適宜補正した。

4. 含水率および濃度と電気特性の相関

0, 0.0001, 0.0002, 0.0005, 0.0010, 0.0020, 0.0050, 0.0100, 0.0200, 0.0500 [N] の10段階の濃度のNaCl溶液をカラムに通水し、それぞれ飽和時と排水開始1時間後においてインピーダンスの測定を行った。また、周波数を変化させた場合の測定値への影響についても検討した。

比誘電率 ϵ_r の測定周波数に対する応答の例を図2に示す。電磁気学において、測定周波数が大きくなると比誘電率が減少し、導電率は逆に増加するという、誘電緩和と呼ばれる現象がある²⁾。本実験においては100kHzから1MHzにおいて、理想的な誘電緩和現象が観察されたため、この周波数領域においては安定した測定を行うことができると判断した。

また、実際の測定は100Hzから10MHzの広範囲において行ったが、20kHz未満ではインピーダンスが測定限界を

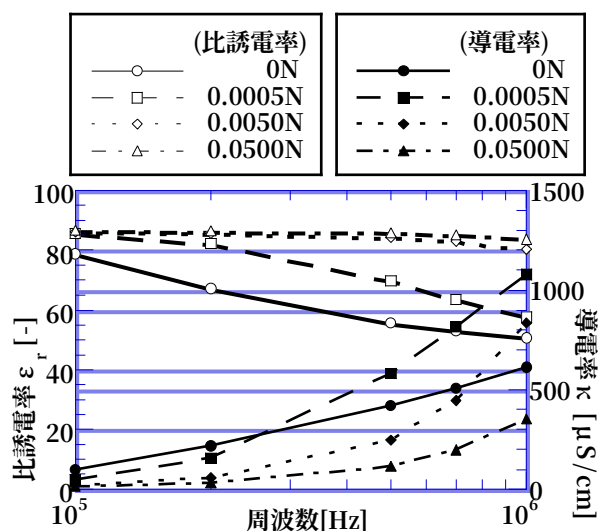


図2 比誘電率の周波数変化（含水率23.76%）

キーワード：非接触電極、インピーダンス、土壌カラム、含水率、電解質濃度

連絡先（京都市左京区吉田本町京都大学工学研究科環境地球工学専攻、Tel.075-753-5154, Fax.075-753-5066）

超えたため、また、2MHz以上では雑成分の影響が大きかったため、測定不能と判断した。

図3に、1MHzにおける含水率 θ と比誘電率 ϵ_r の対応関係を示す。比誘電率 ϵ_r は、含水率 θ の増加に伴い、ほぼ直線的に増加する傾向がある。よって、比誘電率 ϵ_r は含水率推定の良い指標であると言える。また、高含水率の時や高濃度で低含水率の時、他の測定値の傾向からの乱れが見られるが、このことは電極自体の誤差による可能性が高い。

図4に、1MHzにおける溶液濃度と比誘電率 ϵ_r の対応関係を示す。比誘電率 ϵ_r は、溶液濃度の増加に伴ってある値へと漸近的に増加する傾向を持つ。すなわち溶液の濃度が高くなると、濃度に対する変動が小さくなり、濃度の測定誤差が増大することを意味している。

5. 評価関数の決定

未知の土壌の含水率および溶液濃度を推定するため、100kHz, 200kHz, 500kHz, 700kHz, 1MHzの各周波数で、飽和時および排水開始1時間後において比誘電率 ϵ_r の値を段ごとに測定し、内挿によってその段における未測定の含水率 θ や濃度 n に対応する比誘電率 ϵ_r の値を算出して $\epsilon_{rf}'(\theta, n)$ とおく。未知の土壌で測定された比誘電率 ϵ_r に対して、 $\epsilon_{rf}'(\theta, n)$ との差の2乗を全周波数について合計し、それが最小となる θ 、 n を最適な推定値とした。

しかし、比誘電率のみでは分別能力が不十分な場合が認められたので、導電率 κ についても同じく内挿を行って評価関数に組み込むことにした。ただし導電率は比誘電率に比べて誤差による変動が大きいため、比較の数値が安定していた1MHzの導電率のみを追加し、比誘電率とオーダーを合わせるために1000で除した。評価関数 Y は、次式で表される。

$$Y = \sum_i (e_{rf} - e_{rf}'(q, n))^2 + \frac{1}{1000} \{k_{1\text{MHz}} - k_{1\text{MHz}}'(q, n)\}^2$$

6. 評価関数を用いた測定

作成した評価関数の実用性を確かめるため、脱イオン水がカラム内に不飽和分布している状態にNaCl 0.0030N溶液を上から湛水させ流した時の様子を連続的に測定した結果を図5(a)、(b)に示す。含水率、NaCl濃度ともに浸透前線が形成され、0、26、51秒と時間とともに下降する様子が分かる。

7. 結論

本研究では土壌非接触型の電極を用いて土壌カラムのインピーダンスを測定し、土壌中含水率および溶液濃度を推定するための評価関数を作成した。また、この評価関数を用いて電解質溶液の不飽和浸透を追跡した結果、実用性が確認できた。

参考文献

- 1) 米田稔, 酒向健, 井上頼輝, 森澤眞輔: 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 (土木学会論文集 No.579/2-41, 1-14, 1997)
- 2) 実験化学講座9 電気・磁気、日本化学会編、丸善 (1991)

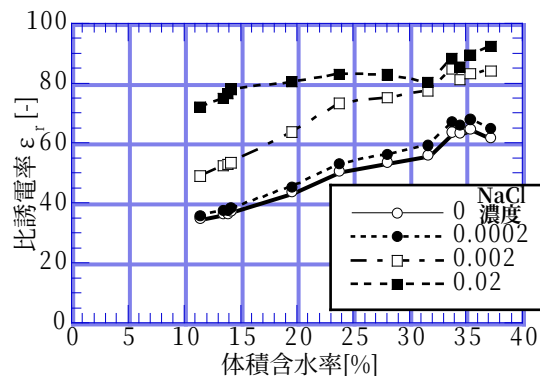


図3 比誘電率への含水率の影響 (1MHz)

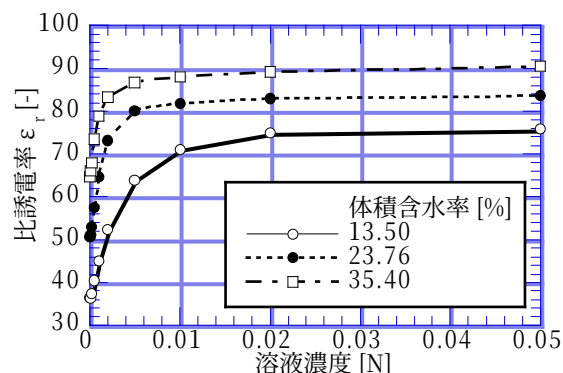


図4 比誘電率への溶液濃度の影響 (1MHz)

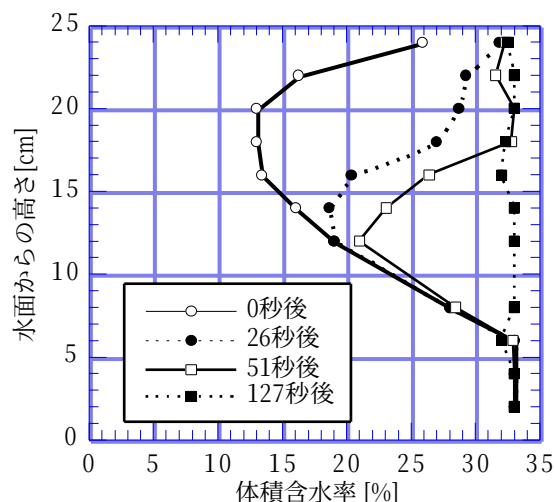


図5 (a) NaCl溶液の浸透過程 (含水率)

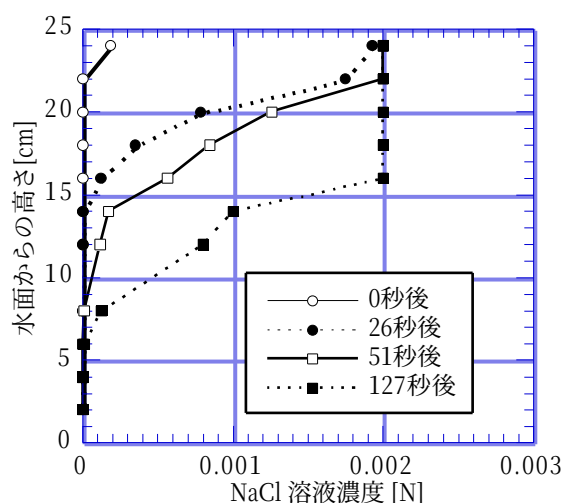


図5 (b) NaCl溶液の浸透過程 (NaCl濃度)