

TDR 法を用いた 地中水モニタリングシステムの開発

Detecting Leak Location
Time Domain Reflectometry

坪谷 太郎*・田瀬 則雄**

Taro TSUBOYA and Norio TASE

I はじめに

わが国のゴミ問題は、きわめて深刻である。ゴミ問題、すなわちそれは、処分地不足の問題である。1995年までに現在の80%のゴミ地が埋め立てられ、2000年までには、90%が埋め立てられるといわれている(沖野, 1991)。しかし、ゴミ処分地の立地は、社会的、環境的に困難になってきており、ゴミ処分地の立地のためには、その安全性が新規建設のためのきわめて重要な条件となる。

現在最も安全性が高いゴミ処分地の型として、管理型ゴミ処分地がある。これは、浸出水が処分地から漏れることを防ぐため、ゴミの下に遮水シートを敷いてゴミの底の部分に設置された集水管から水を抜いて処理しているもので、将来は、この型の処分地が増えていくと考えられる。遮水シートには、水がたまらないことが管理の原則となっているが、実際は遮水シートに水がたまっていることが多い。そのため、遮水シートの破損による水漏れが、最近問題になっている。それにもかかわらず、その水漏れを検知するモニタリングシステムは、いまだ確立されていない。早急に水漏れを検知するモニタリングシステムを開発し、より安全なゴミ処分地を造る必要がある(Landreth, 1988)。

現在、水漏れを検知するモニタリングシステムの

方法として、電気探査法の応用(David *et al*, 1985)や、低周波の交流回路を応用する方法(山崎, 1992)、音波によって探知する方法(Robert E. Landreth, 1988)など、さまざまな方法が研究されている。

モニタリングシステムの条件としては、

- ①同一地点で長期的にモニタリングをおこなうことができる。
- ②容易に計測ができる。
- ③経済的である。

また、漏水検知を、遮水シート下の土壤水分の変化から観測しようとするとして、

- ④測定値が、電気伝導度などの水質に影響されにくい。

などが考えられる。この条件を満たす方法として、TDR 法があげられる。

TDR 法とは、土壤中の土粒子、空気、水の三要素のうち、水の比誘電率(20°Cで80)が土粒子、空気の比誘電率(土粒子: 3~5, 空気: 1)にくらべて、非常に大きいことを利用し、土壤中の比誘電率を電磁波によって測定することにより、土壤水分を計るものである。

Topp (1988) は、測定値が温度や電気伝導度に影響されにくく、媒体による影響も少ないことを報告している。このことから前述の④の『測定値が、電気伝導度などの水質に影響されにくい』という条件

*筑波大学大学院環境科学研究科(現 国立公衆衛生院・研究生) **筑波大学地球科学系

を満たしているといえる。さらに Topp (1988) は、電磁波の反射してくる電圧の値を読み取ることににより、電気伝導度も測定できることを報告した。

野外での観測は安原ほか (1990) によって行われており、また、Hemo Vaara (1990) は、コンピュータ制御による、36地点の連続観測を野外にて3ヶ月間行っている。このことから、①の『同一地点で長期的にモニタリングをおこなうことができる』という条件を満たしているといえる。さらに、中性子水分計などとくらべると、非常に経済的であることがあげられる。

これらの特徴から、TDR 法を用いたゴミ処分地の地中水モニタリングシステムが、有力な方法としてあげられる。

しかし、測定値である比誘電率と、体積含水率のキャリブレーションカーブは、報告ごとに違うものが発表されている。Topp (1980) は、6種類の媒体で実験しており、媒体による影響はなく、1本のキャリブレーションカーブによって説明できることを報告した。そしてその式は、次のような三次式で表された。

$$\theta = -0.053 + 0.0292K - 5.5 \times 10^{-4}K^2 + 4.3 \times 10^{-3}K^3$$

一本のキャリブレーションカーブで説明できるという点で、同じ立場をとったのが、安原 (1991) であり、4種類の媒体で実験をおこない、その式は次のような \sqrt{K} の二次式で表された。

$$\theta = -0.319 + 0.216\sqrt{K} - 0.00737K$$

これに対し、開発 (1990) は、キャリブレーションカーブは媒体によって違ったカーブを描くだけでなく、プローブの一本一本に対してキャリブレーションが必要であることを示唆した。つまり、TDR のキャリブレーションカーブについての報告は、一本でそれが表せるか、また何次式で近似するかで、それぞれ違った立場をとっており、一致した見解がないのが現状である。

そこで本研究では、測定値が、水質や媒体に影響を受けるかどうかを基礎実験により検討し、さらに、遮水シートの下での漏水検知が可能かどうかを実験

により検討した。

II 実験方法

TDR 本体はいわゆるケーブルテスタであり、Tektronix Model 1502B で、通産省工業技術院地質調査所から借用したものである。

TDR 法の出力例を第1図に示す。図中の(t)から(t')までの時間を読み取りこれを t とすると、比誘電率 K は、次式で表される。

$$K = (Ct/2L)^2$$

ここで C は真空中の電磁波の速度(3×10^8 m/s)である。 L は、プローブの長さであり、この式から比誘電率 K が求められる。

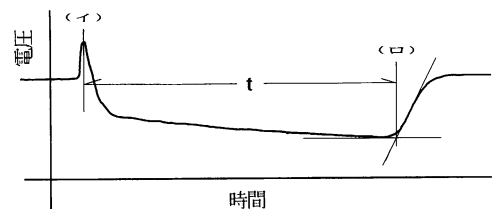
プローブは自作のもので、プローブのセンサー部分は、しんちゅうを用い、それを固定する基盤は、デルリン板を用いた。TDR 本体とプローブをつなぐのは、同軸ケーブルである。それぞれの実験で用いたプローブの仕様を第1表に示す。

1) 基礎実験

基礎的な実験では、温度、電気伝導度、そして媒質、これら三つの影響を検討した。

温度と電気伝導度の実験は、塩ビパイプの容器(外径31.5cm, 内径28.5cm, 深さ40cm)に水を注いで行った。温度の依存性をみる実験は、純水でおこなった。電気伝導度の依存性をみる実験は、温度を22°Cに保ちながらおこなった。20cmの5本のプローブ(第1表のNo.111~115)を用いておこなった。5本のプローブでおこなったのは、プローブごとのばらつきをみるためである。

媒体による影響を検討する実験は、二種類のガラスビーズ、砂、そしてゴミ処分地内での使用を考え、



第1図 電磁波式土壌水分計の出力例

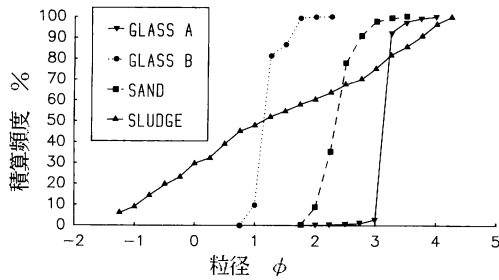
第1表 センサーの仕様

センターNo		三線平行プローブ		二線平行プローブ		
		111~115		501~505	601~604	605~606
長さ	L (cm)	20		124	123	122
幅	W (cm)	3		5	5	5
直径	D (cm)	0.3		1.2	1.2	1.2

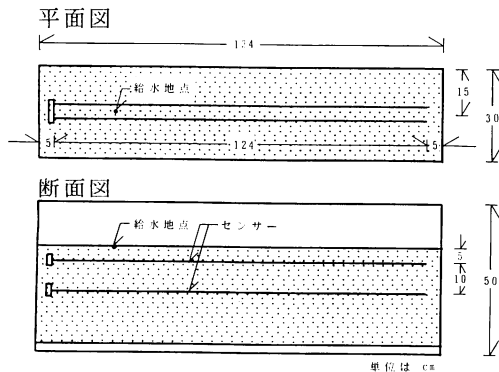
下水処理施設の汚泥を用いて行った。それぞれの粒度組成を第2図に示す。手順は、まず塩ビ容器（外径21.5cm、内径20cm、高さ25cm）に、試料を乾燥させ充填し、温度や電気伝導度の実験で用いた20cmのプローブ5本を、順番に媒体に差し込み比導電率を測定した。測定後にバットに媒体をあけて、適量の水を加えてよくまぜ、再び塩ビに媒体を充填し測定を繰り返した。水分量の測定は、加えた水の量と、媒体の体積から求めた。また同時に炉乾燥法でも水分量を求めた。

2) 水漏れ検知実験

室内での水漏れ検知実験は、第3図のように、箱



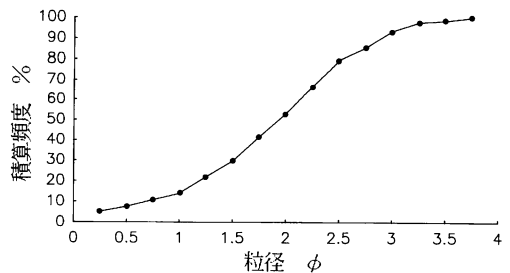
第2図 媒体の粒度組成 (基礎実験)



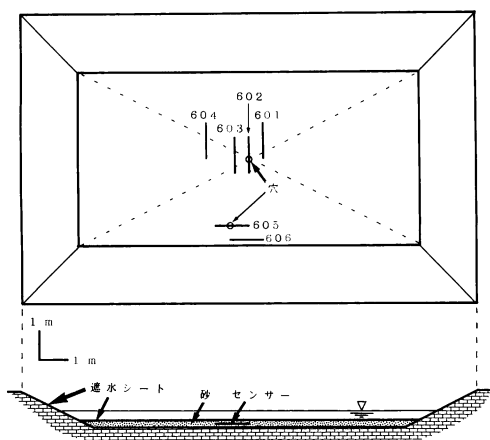
第3図 実験装置 (室内での水漏れ検知実験)

型の塩ビ容器 (35×50×135cm、厚さ0.5cm) に表面から5cm、15cmの深さに、1m24cmのプローブ503、501 (第1表参照) をそれぞれ水平に設置しながら、砂 (粒度組成を第4図に表示) を足で踏み固めながら充填した。初期状態の水分量を乾燥状態と湿潤状態の二つの状態において、第3図に示した給水地点から、200cc、500cc、1000cc、2000ccと給水量を変えて、実験を行った。

野外での水漏れ検知実験でも、室内実験と同様に、水漏れに対して反応するか、また水漏れの地点からの距離、水漏れ開始からの時間によって、どの様な反応を示すかを観測した。実験装置は、第5図の通りである。この実験装置は、実際のゴミ処分地の中に設置されており、砂の下は、十分に踏み固められたゴミ処分地の土壌である。砂は、遮水シートの下に25cmの厚さで敷いてあり、そこに1m22~23cmのプローブ601~606 (第1表参照) を設置した。プローブの埋設深度は、遮水シートより12.5cmの深さに設置した。実験は、二回おこない、一回目は、遮水シート上に水深35cmまで水を張り、第5図に示したプローブ602の真上に約1cm四方の穴をあけた。二回目は、一回目と同じ場所と、プローブ605の真上の二つの穴をあけた。



第4図 砂の粒度組成 (室内での水漏れ検知実験)



第5図 実験装置（野外での水漏れ検知実験）

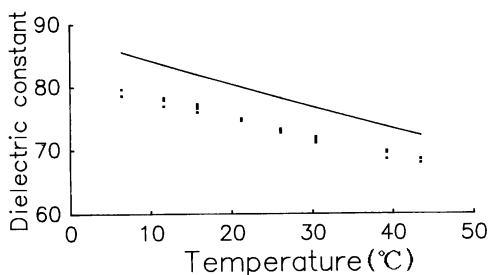
III 結果と考察

1) 基礎実験

(1) 水温の影響

第6図に水温と電気伝導度の関係を示す。水の比誘電率は、温度への依存性があることが知られている。これを理論値として図中に示す。TDRが測定した比計電率は、その傾向と一致していることがわかる。

ここで重要なのは、この温度の変化による比誘電率の変化が、計算される土壤水分に、どの程度影響を与えるかどうかである。つまり、温度補正が必要かどうかである。これを砂の場合で考える。たとえば、水温が10°Cから30°Cに変化すると、比誘電率は、図から読み取るとおよそ6変化する。水の影響がい



第6図 比誘電率と温度の関係

ちばん大きいのは飽和状態であり、基礎実験で使用した砂の、飽和状態での体積含水率は、およそ38%であるので、水の影響も、最大で38%と考えられる。そうすると6の変化は、0.38倍されて、2.28となる。これを第10図に示したキャリブレーションカーブで概算すると、2.28の比誘電率の変化は、体積含水率にして、1.3%のずれになる。この値は実際の測定では無視できるほど小さいといってよい。また、プローブを設置する、地下深度の深い地点での地温変化は、ほとんどないと考えられる。つまりこの実験から、温度の影響は無視してよいことがわかった。

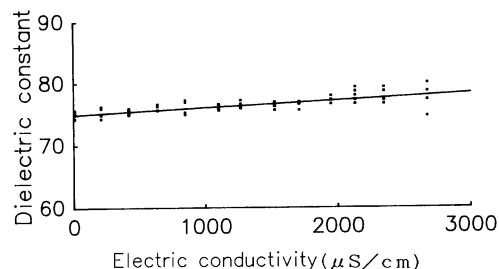
(2) 電気伝導度の影響

第7図に電気伝導度と比誘電率の関係を示す。電気伝導度の増加にともない、比誘電率もなだらかに増加していることがわかる。水温による影響を求めた時と同様の概算をした結果、数千 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度の電気伝導度の変化では、その影響は無視できることがわかった。

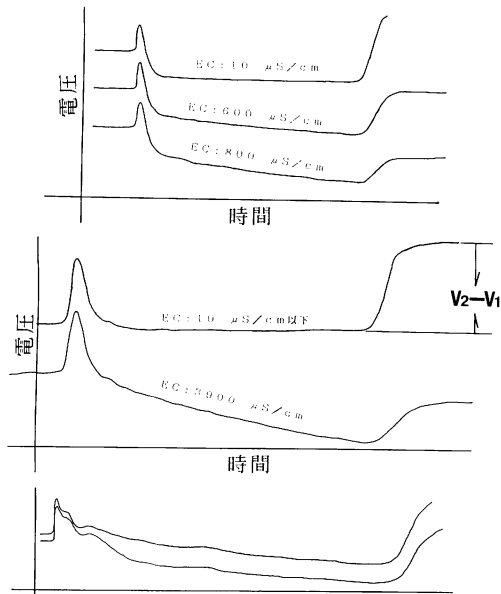
この実験で、非常に興味深いことは、電気伝導度の変化にともない第8図に示すように波形が変化することである。図中の $(v_2 - v_1)$ が電気伝導度の増加とともに減少するのである。そこで $\ln(v_2 - v_1)$ と電気伝導度の関係を第9図に示し、同時に回帰の結果を示す。これをみると、非常によい相関があることがわかる。今回は、水による実験だけであったが、土壤水でも同様の波形の変化がみられているので、さらに定量的な実験を進めていく予定である。

(3) 媒体による影響

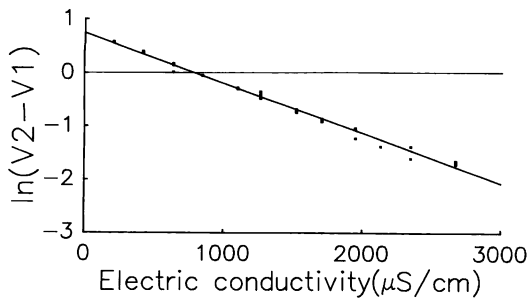
媒体ごとの、キャリブレーションカーブの作成は、 \sqrt{K} の一次式、二次式、 K の三次式の回帰でおこなったが、今回は、 \sqrt{K} の二次式がもっともよく測定



第7図 比誘電率と電気伝導度の関係



第8図 電気伝導度による出力波形の変化

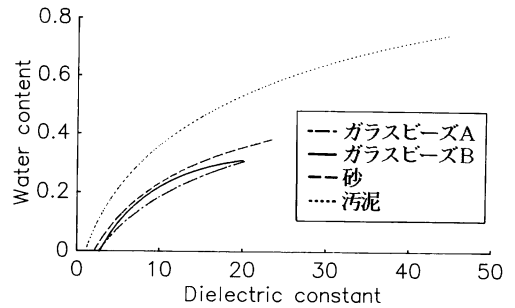


第9図 電気伝導度と $\ln(v_2-v_1)$ の関係

値と体積含水率の傾向を示していた。第10図にその結果を示す。これをみると、汚泥だけが異なる曲線であることがわかる。この原因は、有機物含量や、水の存在形態の違いなどが考えられるが、いまだにその原因は不明である。このことから、TDRで土壌水分を測定する際は、媒体ごとのキャリブレーションカーブを作成する必要があるといえる。

さらに、同じ体積含水率のもとで、同型の4本のプローブの測定値の中で、最も大きな測定値と最も小さな測定値との差をとり、同型のプローブの値のばらつきをみた。

その結果、汚泥では、体積含水率が26%より大き



第10図 媒体別のキャリブレーションカーブ

い場合、その差が体積含水率にして、1%をこえた。しかしそれ以外は、すべてにおいて、1%をこえることはなかった。つまり、同型のプローブであれば、ある媒体に対し、プローブごとにキャリブレーションカーブを作成する必要はないことが明かとなった。

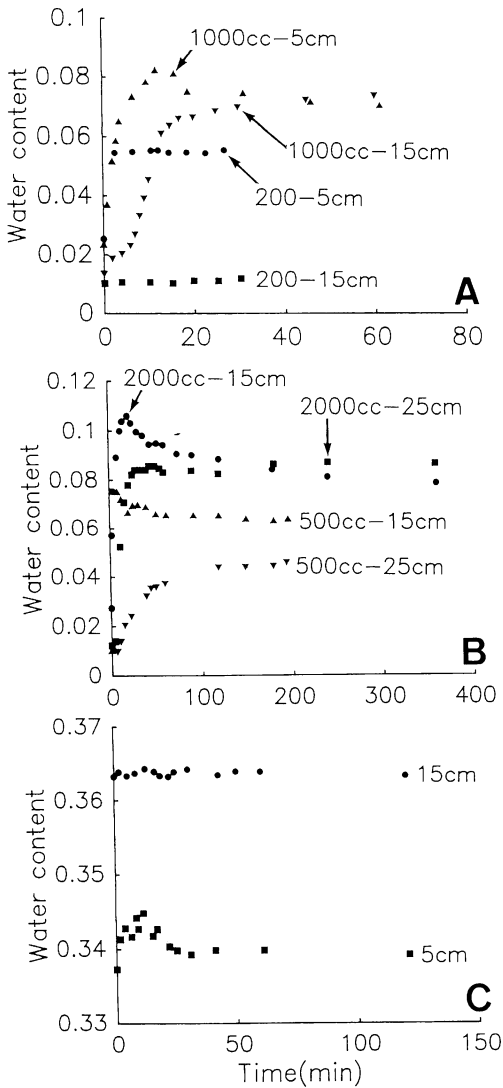
2) 水漏れ検知実験

(1) 室内実験

初期水分量が低い状態での、200cc、500cc、1000cc、2000ccの水を供給した場合の結果を、第11A、B図に示す。200ccの場合、5cm深のプローブは約1分で反応したが、その後値は増加せず、一定であった。15cm深のプローブは、開始から全く反応しなかった。実験後掘り起こしたところ、水の浸透は、5cmと15cmの深さの間で止まっていた。実験結果は、この水の浸透状態を裏付けたことになる。500cc以上の給水量では、15cm深のプローブも反応を示している。供給量が多くなるにつれて、5cm深のプローブの反応は、速く、そしてピークが鋭くなり、下方への水分移動が多くなるために、15cm深の水分量が、5cm深の水分量より大きくなる点がみられるようになった。

高水分状態では、給水量を1000ccでおこなったが、第11C図のようにほとんど顕著な反応はみられなかった。

室内での漏水検知実験から、乾燥状態では、少くとも200ccの水が、プローブ周辺に浸透すれば、水漏れを検知することがわかった。しかし、高水分状態では、その検知は、水分量からは、困難であること



第11図 室内での水漏れ検知実験の結果

- A 乾燥状態 (200cc, 1000cc)
- B 乾燥状態 (500cc, 2000cc)
- C 高水分状態 (1000cc)

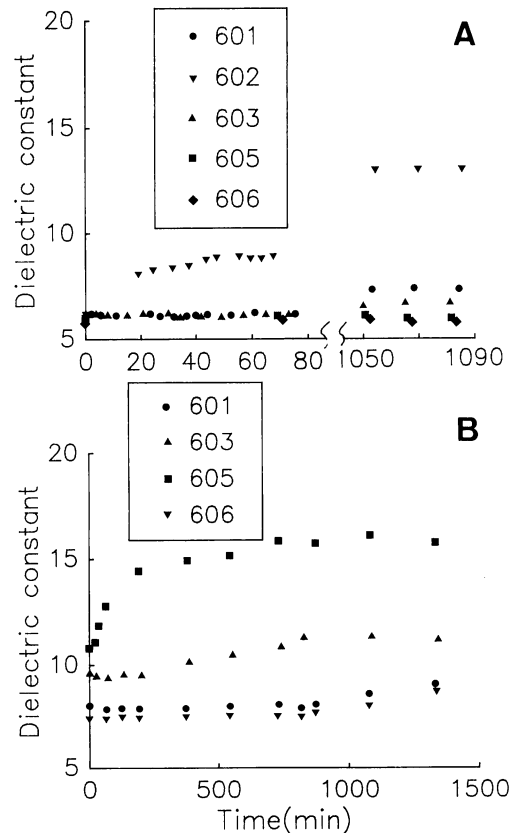
がわかった。高水分状態での検知の可能性としては、電気伝導度の違いによる、波形の変化があげられる。水だけによる実験では、第9図のように、電気伝導度と波形の変化は、非常によい相関をみせている。さらに、土壌中での電気伝導度の波形への影響は、

高水分状態での漏水検知実験でも、第8図のように定性的ではあるが、確認できた。

(2) 野外実験

野外実験の結果を第12図に示す。1回目は、開始直後にプローブ602が接触不良で、19分までデータがとれなかった。プローブ602は、19分後にはすでに水漏れを検知していた。しかし他のプローブは、まったく反応を示さなかった。野外モデルがあるゴミ処分場の都合により、16時間ほど中断した。17時間30分後に、観測を再開したとき、穴の真下のプローブ602の測定値は中断前の値よりもさらに大きな値を示していた。50cm離れたプローブも、水漏れを検知していた。

2回目は、プローブの602と604が故障して、デー



第12図 野外での水漏れ検知実験の結果

- A 一回目
- B 二回目

タがとれなかった。穴の直下のプローブ605の測定値は、すぐに増加した。急激に測定値を増加させたあとは、約3時間後からは、ほぼ安定した値をとった。50cm離れたプローブでも反応を始める時間はまちまちであったが、それぞれ、ゆるやかな増加傾向を示した。

野外実験の結果は、遮水シート下での使用の可能性を、十分支持するものであったが、今後耐久性のよいプローブの作成が必要である。

IV おわりに

以上の実験結果をまとめると次のようになる。

①測定値は、温度と電気伝導度の影響は、無視してよいが、媒体の影響は無視できない。つまり、第13図の処分地内のように、多様な媒体が含まれることが予想される場所での使用は、さらに検討が必要である。

②乾燥状態の砂に、少なくとも200ccの水がプローブ周辺に漏れた場合、これを検知することができる。つまり図14遮水シート下では、そこが乾燥していれば十分に水漏れを検知できる。

③高水分状態では、土壌水分から水漏れを検知することはできない。水だけの場合、電気伝導度と、波形の変化は、きれいな相関関係にある。そこで土壌水の電気伝導度の変化による、波形の変化が定量化できれば、高水分状態での水漏れ検知も可能である。

このシステムを実用化させるには、二つの課題があると考えられる。つまり、漏水を検知する技術と、その経済性である。漏水を検知する技術に関しては、

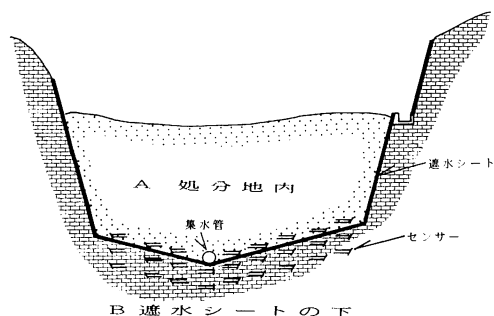
これらの実験から、十分に可能性があることが示されたが、経済性の検討は、まだまだ不十分である。今後、自記システムを造り、より長く、耐久性のよいプローブで、できるだけ大きなプローブの設置間隔を検討し、経済的なモニタリングシステムを開発することが課題である。

謝 辞

本研究の成果には平成2・3年度国立機関公害防止試験研究費「廃棄物の埋立処分における汚染物質の監視システムに関する研究」の援助を得て実施した研究の成果が含まれている。また、本研究を進めるにあたり、工業技術院地質調査所環境地質部 安原正也氏には、1年以上もの間、電磁波式土壌水分計を提供していただいた。また、野外実験に際して、大成建設株式会社 技術開発部資源リサイクル開発室 白井直人氏には、ご助力をいただいた。心から感謝いたします。

文 献

- 沖野外輝雄 (1991) : 生活と廃棄物。地球環境変動の科学, p61
- 開発一郎 (1990) : 土壌水分測定のための TDR 2 線平行プローブのキャリブレーションに関する問題。ハイドロロジー, 20, 141-150.
- 安原正也・安池慎治・丸井敦尚・鈴木裕一 (1990) : 電磁波式土壌水分計一中性子水分計に代わる新しい水分計一。地質ニュース430号, 17-27.
- 安原正也・丸井敦尚 (1991) : 電磁波式土壌水分計による筑波台地表面層部の土壌水分変化の測定。日本水科学会学術大会予稿集, 22-23.
- 山崎宣悦・波多野雅一郎・荒井 健・新井 斉 (1992) : 漏水発生位置検知システムの開発。地下水学会1992年度春季講演開講演要旨, 45-48.
- David W. Shultz, Bob M Duff, and Wendell R. Peters (1985) : Electrical Resistivity Technique to Assess the Integrity of Geomembrane Liners. U.S. Environmental Protection Agency (Cincinnati, Ohio, 1985)
- Hemovaara, T.J. and W. Bouten (1990) : A Computer-Controlled 36-channel Time Domain Reflectometry System for Monitoring Soil Water Contents.



第13図 ゴミ処分地の概念図

WATER Resour. Res., **26**, 2311-2316

Robert E.Landreth (1988) : LOCATING AND REPAIRING LEAKS IN LANDFILL/IMPOUNDMENT FLEXIBLE MEMBRANE LINERS. *U.S. Environmental Protection Agency*(Cincinnati, Ohio, 1988), NTIS No.PB 88-249651

Topp,G.C.,J.L.Davis and A.P.Annan (1980) : Electromagnetic Determination of Soil Water Content:

Mesurements in Coaxial Transmission Lines.

WATER Resour. Res., **16**, 574-582

Topp,G.C.,M.Yanuka,W.D.Zebchuk,and S.Zegelin (1988) : Determination of Electrical Conductivity Using Time Domain Reflectometry:Soil and Water Experiments in Coaxial Lines. *WATER Resour.Res.*, **24**. 945-952