

電氣的漏水位置検知にしゃ水シートの 電氣特性が与える影響

荒井 健¹・新井 斉²・山崎 宣悦³・大即 信明⁴

¹正会員 前田建設工業株式会社 土木設計部 (〒179-8903 東京都練馬区高松 5 丁目 8 番 J. CITY)

²光が丘興産株式会社 営業部 (〒179-0075 東京都練馬区高松 5 丁目 8 番 J. CITY)

³株式会社レイディック (〒202-0022 東京都保谷市柳沢 2-17-20)

⁴正会員 工学博士 東京工業大学 開発システム工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

管理型廃棄物最終処分場に敷設された合成樹脂や合成ゴムのしゃ水シートの電氣的漏水検知システムの研究が広く行われるようになった。これらの電氣的漏水検知システムは、電位差や電流および電氣抵抗の測定で漏水の周辺に生ずる電氣的な異常をとらえることによっている。こうした測定システムのすべては、しゃ水シートの有する高い絶縁抵抗を前提としている。しかしながら、各種しゃ水シートの電氣特性を調べてみると、絶縁体とはいえないものもあり、測定の前提条件が必ずしも成立していない。本論文は、管理型廃棄物処分場の電氣特性を踏まえた上で、各種しゃ水シートの電氣特性を検証し、電氣的漏水位置検知システムの測定結果に与える影響について述べる。

Key Words: landfill site, geomembrane, leak detection, resistivity, phase

1. はじめに

廃棄物処分場の建設計画を立案する場合、廃棄物処分場が周辺住民にとって迷惑施設の性格が強いため、人口密度の低い山間部立地となることが多い。こうした廃棄物処分場建設が計画される山間部は、飲料水や農業用水の水源地と重なることも多い。このような立地条件における管理型廃棄物処分場でしゃ水シートに損傷する事故が生じた場合、廃棄物中の有害物質が溶出した浸出水が地下水に漏洩し飲料水や農業用水が汚染される危険がある。従来から、処分場のモニタリング施設として観測井戸の設置が義務づけられているが、地下水の水質検査により浸出水の漏洩が確認された段階では、汚染が広範囲に拡がり、環境の修復に多くの経費や時間が必要となる。したがって、このような周辺環境に汚染が拡散する前に、破損したしゃ水シートの漏水発生位置を早期に特定し早急に補修しなければならない。

現状におけるしゃ水シートの漏水位置検知方法の主なものに、2重化したしゃ水シート間に流入してくる浸出水や2重化したしゃ水シートの気密性から漏水を検知する方法^{1)~3)}と電位異常や低比

抵抗ゾーンなどから漏水を検知する^{4)~16)}電氣的手法がよく知られている。これらの方法のうち、2重化したしゃ水シートを利用して漏水を検知する方法は、しゃ水シートから流出する浸出水を直接検知するため、漏水の規模や緊急性を直接判断できる利点があるが、漏水位置をゾーンでしか判断できない欠点がある。

一方、電氣的手法の場合、漏水位置を座標として知ることができるが、実際の漏水の規模は処分場の降水量に処分場からの浸出水流出量と蒸発による損失量や処分場内の貯留量の収支計算から間接的にしか知ることができない。しかし、廃棄物の埋立作業などともなう事故で生じたしゃ水シートの損傷や施工不良部分を検知して、早急に対策がとれる電氣的手法のメリットは非常に大きく、技術革新により精度向上や経済性の向上が十分可能であり今後の発展性に優れると判断される。こうした電氣的手法のメリットから、種々の電氣的漏水位置検知システムが開発されている。

それらの電氣的漏水位置検知システムは、すべてしゃ水シートの有する高い電氣抵抗を利用して漏水位置を検知している。しかしながら、処分場に敷設されるしゃ水シートの電氣特性を踏まえた

漏水位置検知システムの研究はほとんどみられない。そこで、本論文は廃棄物処分場の電気的モデルと、各種しゃ水シートの電気特性ならびにそれに付随して発生する測定障害について述べるものである。

2. 既往の電気的漏水位置検知方法の研究

高導電率の板状鉍体の探査に、鉍体に直接電流を流し、鉍体の賦存状況を反映した電位分布のひずみから鉍体の規模、深度、広がりを知る鉍体流電法¹⁷⁾が用いられている。この手法を応用して、処分場内外に電圧を印加し、処分場内に多数設置した電位測定電極で測定した電位分布の乱れから漏水位置を検知する漏水位置検知方法の研究が古くから実施されている⁴⁾。日本においても鉍体流電法による漏水位置検知方法^{8),9)}とこの改良技術について研究されている。鉍体流電法は、非常に簡便な装置を使用するだけで、漏水位置を検知できる利点があるが、地盤や廃棄物の電気的特性により等電位線の間隔が乱れたり、精密な測定を行う場合には自然電位を別個に測定して、その結果を鉍体流電法の測定結果から差し引く操作が必要となる。

こうした鉍体流電法単独で使用した場合の不具合に対して、島らは、処分場内の比抵抗分布を別個に測定することにより、漏水部分から流れる電流の大きさを評価する手法を提案している⁷⁾。しかし、この方法は、電位分布の他に比抵抗分布を別個に測定する必要があるため、計測に要する時間が非常に長くなる欠点がある。

このほか、廃棄物の影響を受けない2重化したしゃ水シートの排水層に線電極を格子状に設置し、電位を測定する手法⁸⁾も提案されているが、2重化したしゃ水シートの排水層内が浸出で水で満たした場合に測定が困難となる。このような2重化したしゃ水シートの排水層という電気的にばらつきの少ない部分に電極を配置する方法は、鉍体流電法だけでなく低比抵抗ゾーンを検出することにより漏水を検知する方法^{9),10)}にもみられるが、流入した浸出で排水層内が水で満たした場合に同様の測定上の問題がある。

これらの他に、電位傾度法¹⁸⁾を応用した方法も開発されている¹¹⁾⁻¹³⁾。これらの測定システムのうち電位測定電極だけでなく印加電極も同時にスキャンしていく測定方法¹³⁾は、印加電圧を低く抑えることにより電極からの電界の広がりを小さく

し、埋め立てられる廃棄物の電気特性の影響を受けにくいことと、測定電極の設置面の裏面側に線電極を等間隔に設置して電流が流れやすく低電圧で十分測定が可能としている点に新規性がある。さらにしゃ水シート裏面側の電位を均一にするためにアルミ箔を用いた面電極を設置し、しゃ水シートの表面側に設けた点電極間と面電極間のインピーダンス分布から漏水を検知する方法¹⁴⁾も研究されている。

その他に、電流を測定することにより漏水を検知する方法として、しゃ水シートの上下に線電極を直交するように配置することで少数の測定電極で漏水位置を検知する方法¹⁵⁾や、印加電極から等距離の位置に流れる電流の大きさを比較することにより漏水位置を検知する測定方法¹⁶⁾も開発されている。

このように電気的漏水位置検知に関する種々の研究がなされているが、処分場の電気的特性を支配するしゃ水シートの電気特性を踏まえた実験¹³⁾はわずかである。

3. 処分場の電気特性

信号処理の精度向上技術として、特性が明確な信号を発信し、ノイズが混入した受信側の入力信号から発信信号の特性に基づいて有用な情報のみ抽出する手法が広く用いられている¹⁹⁾。処分場の電気的漏水位置検知においても、処分場やしゃ水シートの電気特性を十分把握した上で、前述の信号処理技術を用いれば高精度の漏水位置検知が期待できる。筆者らは、このような測定精度向上技術をふまえると、周期や位相が明確な交流電源が電気的漏水位置検知に有利と判断する。以下に処分場に交流電圧を印加した場合の電流の特性と、処分場の電気特性を左右するしゃ水シートの特性について述べる。

(1) 処分場の等価回路モデル

図-1のように、最近では廃棄物処分場にしゃ水シートが2重に敷設されるようになった。こうした処分場の廃棄物側の第1層しゃ水シートに漏水があり、処分場の第1層しゃ水シート上の電極と排水層内の電極間に交流電圧を印加した場合について考える。

電気的漏水位置検知システムでは、既往の電気的漏水位置検知方法の研究において示したように、電気抵抗の大きいしゃ水シートに生じた損傷や施

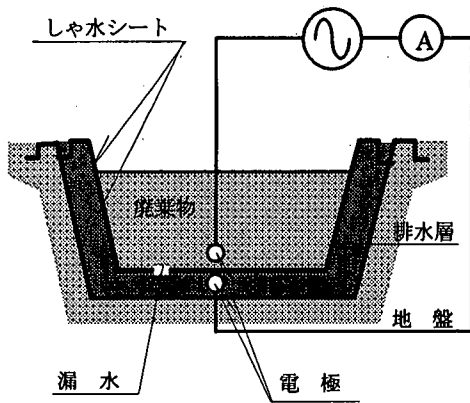


図-1 第1層しゃ水シートに漏水がある処分場

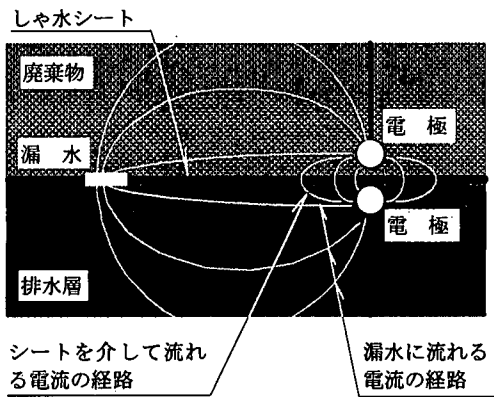


図-2 処分場に流れる電流の経路

工不良部周辺に生ずる電気的な異常を検知することによっており、検知される漏水箇所には必然的に浸出水が漏れていないものも含まれる。

第1層のしゃ水シートの漏水と電極周辺の電気の流れは、図-2に示すようにしゃ水シートを介して流れる電流と廃棄物と漏水箇所と排水層を經由して流れる電流に大別できる。しゃ水シートを介して流れる電流は、電流が廃棄物や排水層に流れる過程で電圧降下をきたすため、それぞれの電極の近傍で流れる割合が最も大きいと考えられる。一方、しゃ水シートの漏水部分を流れる電流も、電極から大きく広がる電気の経路のうち最も電気抵抗が小さい経路を主に流れるものと考えられる。

ここで、しゃ水シートを介して流れる電流の経路のうち、廃棄物の電気抵抗を R_{ws} とし、排水層の電気抵抗を R_{ds} とし、しゃ水シートの静電容量を C とする。また、漏水を經由して流れる電流の経路のうち、漏水の大きさに相当する電気抵抗を

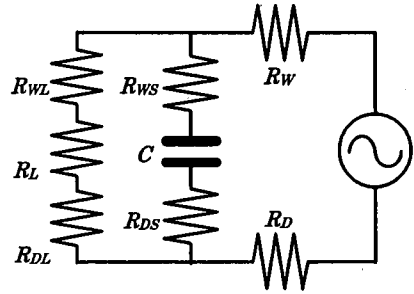


図-3 漏水のある処分場の等価回路

R_L とし、廃棄物の電気抵抗を R_{wL} とし、排水層の電気抵抗を R_{DL} とする。さらに、漏水を經由して流れる電流としゃ水シートを介して流れる電流の廃棄物と排水層における共通の電流経路の電気抵抗を R_w と R_D で表記する。以上のパラメータを用いて、処分場の電気的特性は模式的に図-3の等価回路に示される²⁰⁾。この等価回路において、それぞれのパラメータの値は、電極と漏水までの距離や埋め立てられた廃棄物の種類や覆土ならびに排水層の比抵抗によって処分場内の各位置で異なると考えられる。こうした埋め立てられる廃棄物や覆土の電気特性の影響をなるべく受けないように、既往の電気的漏水位置検知方法では、しゃ水シートの近傍に測定電極を配置したり、比抵抗分布が均一な材料を敷設した排水層内に測定電極を配置して対処している。

ところで、図-3の等価回路は、交流電源を使用した場合について示したが、図-3の等価回路は、電源に完全な直流電源を使用した場合にも普遍的に成り立つ。すなわち、漏水位置検知に完全な直流電圧を処分場に印加した場合には、しゃ水シートの静電容量限界まで帯電する過渡現象時以降は、しゃ水シートの電気特性は完全な絶縁体であるから、この部分の回路を無視して考えればよく、電気回路の考え方として非常に単純となる。しかし、一般に電気探査において、完全な直流電圧が印加されることは少なく、交替直流と称する矩形波電圧を印加しており、厳密な意味での直流電圧を使用していない。ここで、波高が1で、角周波数 ω の矩形波 $f(t)$ は、時間を t としてフーリエ級数展開で式(1)で示される²¹⁾。

$$f(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{(2i-1)\pi} \sin((2i-1)\omega t) \quad (1)$$

式(1)からわかるように、矩形波は各種角周波数の交流電圧の重ね合わせである。ここで、波高

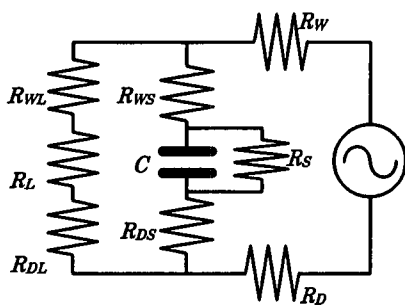


図-4 漏水が困難な処分場の等価回路

が1の矩形波電圧 $v (=f(t))$ が印加されたしゃ水シート面に帯電する電荷 q は、しゃ水シートの静電容量 C を用いて式(2)で示される。

$$q = Cv = C \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{(2i-1)\pi} \sin((2i-1)\omega t) \quad (2)$$

しゃ水シートを介して流れる電流 i は、式(2)に示すしゃ水シートに帯電する電荷 q の時間微分値となる。

$$i = \frac{dq}{dt} = C \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4\omega}{\pi} \cos((2i-1)\omega t) \quad (3)$$

式(3)から、しゃ水シートを介して流れる電流成分が発生することがわかる。

こうした種々の電氣的漏水位置検知方法において、図-4に示すようにしゃ水シート自体に無視できない大きさの電流が流れる電氣抵抗成分 R_S があると、しゃ水シートの漏水部分に流れる電流と区別不能な電流が流れ、漏水位置検知に大きな障害となることがわかる。

(2) しゃ水シートの厚みと角周波数

ところで、図-3の等価回路のしゃ水シートを介して流れる回路と漏水を經由して流れる回路が並列になっている部分において、しゃ水シートを介して流れる回路のインピーダンス (Z_S) は、複素記号 j を用いて式(4)となり、その大きさ ($|Z_S|$) は、式(5)に示すとおりとなる。一方、漏水を流れる回路のインピーダンス (Z_L) は、式(6)に示すとおりとなる。

$$Z_S = R_{WS} + R_{DS} - j \frac{1}{\omega C} \quad (4)$$

$$|Z_S| = \sqrt{(R_{WS} + R_{DS})^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (5)$$

$$Z_L = R_{WL} + R_L + R_{DL} \quad (6)$$

式(5)において、廃棄物と排水層の電氣抵抗は、電極位置が固定されていれば一定値であるから、しゃ水シートを介して流れる電流は、静電容量 (C) と角周波数 (ω) の積 (ωC) の大きさによって決まることがわかる。したがって、しゃ水シートを介して流れる電流を最低限におさえるためには、静電容量 (C) と角周波数 (ω) をできるだけ小さくすればよいことがわかる。しかし、直流電源を使用した場合が角周波数の最小値 0 (rad/sec) に相当するが、前述のように測定値に自然電位の影響で誤差が混入し、自然電位の影響を別個に測定し差し引く操作が必要となる²²⁾。また、漏水を流れる回路のインピーダンスは、式(6)に示すように抵抗成分により構成されており、漏水に流れる電流としゃ水シートを介して流れる電流は位相が異なることがわかる。

ここで、静電容量 (C) は、しゃ水シート敷設面積 (S)、しゃ水シートの厚み (d)、真空の誘電率 (ϵ_0)、絶縁体の比誘電率 (ϵ) を用いて式(7)に示される。

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d} \quad (7)$$

式(7)により、しゃ水シートを介して流れる電流は、廃棄物でおおわれた面積が広くかつしゃ水シートが薄い程大きく、またしゃ水シート材料の比誘電率が高い程大きくなることがわかる。しかし、式(5)からしゃ水シートを介して流れる電流は、(ωC) の大きさに支配されているから、しゃ水シートの厚みが薄く静電容量 C が大きい場合には、角周波数を小さくしてしゃ水シートを介して流れる電流を制御できることがわかる。

4. 各種しゃ水シートの電氣特性

処分場に交流電圧を印加した場合、しゃ水シートの静電容量に応じて流れる電流成分が生ずることは前章で述べたとおりである。こうしたしゃ水シートの静電容量に応じて流れる電流は、漏水を經由して流れる電流の位相と異なるため、位相検

表-1 各種しゃ水シートの電気的特性

種類	電気抵抗 (MΩ/120cm ²)	静電容量 (nF/120cm ²)	電極 状態
EPDM (A社)	8.5×10 ⁻²	20.71	乾燥
	5.4×10 ⁻⁴	3150.	湿潤
EPDM (B社)	1.54	8.22	乾燥
	1.1×10 ⁻²	1270.	湿潤
EPDM (C社)	0.60	7.89	乾燥
	3.44×10 ⁻³	1200.	湿潤
HDPE (D社)	10以上	1.58	乾燥
	10以上	1.91	湿潤
HDPE (E社)	10以上	2.76	乾燥
	10以上	3.30	湿潤
PVC (F社)	10以上	1.28	乾燥
	10以上	1.55	湿潤
融着ゴム (G社)	10以上	0.97	乾燥
	10以上	1.15	湿潤
融着ゴム (H社)	10以上	2.39	乾燥
	10以上	2.66	湿潤
融着ゴム (I社)	10以上	1.47	乾燥
	10以上	1.70	湿潤
導電性HDPE (J社)	10以上	1.87	乾燥
	10以上	2.05	湿潤
非加硫ゴム接 着材(A社)	10以上	1.51	乾燥
	10以上	1.70	湿潤

波回路¹⁸⁾などを使用することにより分離可能である。しかし、図-4のR_sに相当するしゃ水シートの電気抵抗成分に流れる電流の位相は、漏水を經由して流れる電流の位相と同相となるため、これを分離することはできない。したがって、本章ではしゃ水シートの電気抵抗を中心に議論を進めることとする。

(1) しゃ水シートの電気抵抗

従来から一般廃棄物処分場向けとしてEPDM(エチレン・プロピレン・ディエンモノマー)しゃ水シートが一般的なしゃ水材料として使用され、最近ではHDPE(高密度ポリエチレン)しゃ水シートなど熱融着が可能な各種しゃ水シートが使用されるようになってきた。一方、産業廃棄物処分場向けのしゃ水シートとして、PVC(ポリビニルクロライド=塩化ビニル)しゃ水シートも広く使用されてきた。しゃ水シートの厚みも一般に1.5mm以上のものが普通である。EPDMしゃ水シートには、し

ゃ水シートの接合に接着によるものと熱融着によるものがある。ここではEPDMしゃ水シートとは、PVCやHDPEしゃ水シートのように熱融着ができず、接着剤などでしか接合できない製品のみ限定する。また、熱融着が可能なタイプのEPDMしゃ水シートを融着ゴムとして分類する。

各種しゃ水シートの電気特性は、2枚の厚さ2mmで8cm×15cmの銅板の間にサンプルを挟み込み、15kgのウェイトが均等にかかるようにした状態で、100Hzの交流電圧を印加することによりもとめた。この実験において、供試体のしゃ水シートと銅板の電極間の接触状態を改善するために電極表面を水道水で湿潤状態にした測定と、電極の表面を乾燥状態にした測定を実施した。試験に使用したしゃ水シートの厚みは、すべて1.5mmの製品である。

表-1に各種しゃ水シートの電気特性を示す。表-1から、EPDM、HDPEおよびPVCしゃ水シートをそれぞれ比較すると、EPDMしゃ水シートの電気抵抗がそれ以外のしゃ水シートと比較して非常に小さいことがわかる。また、EPDMしゃ水シートの静電容量は、電極表面を湿潤状態にした場合、桁違いに大きいことがわかる。特にA社のEPDMしゃ水シートの電気特性は、電極表面が乾燥した条件で電気抵抗が8.5×10⁻²MΩ/120cm²、静電容量が20.71nF/120cm²であった。

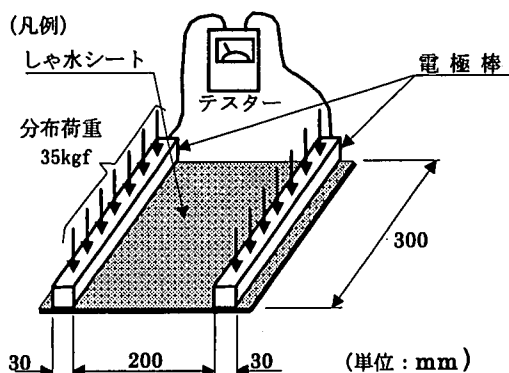
これに対し、PVCやHDPEしゃ水シートの電気特性は電気抵抗が10MΩ/120cm²以上(直流のテスターで計測した結果では、280~200MΩ/120cm²以上)であり、静電容量が約1.5nF/120cm²である。

PVCやHDPEのしゃ水シートは、電極としゃ水シートの接触状態が湿潤であっても電気抵抗の特性はテスターの測定限界を超える大きな電気抵抗であるが、EPDMしゃ水シートの場合には5.4×10⁻⁴MΩ/120cm²と電気抵抗が非常に小さくなる。すなわち、処分場のしゃ水シートの保護砂が湿潤状態にある場合にはA社のEPDMしゃ水シートの有する電気抵抗は大きめに見積もってもPVCやHDPEしゃ水シートの1万分の1程度と考えられる。

こうしたしゃ水シートの電気抵抗の違いは、しゃ水シート素材に含有されているカーボンブラックの多寡が影響しているものと考えられる。すなわち、PVCやHDPEのカーボンブラック含有量は一般に2%程度であるのに対し、EPDMのカーボンブラックの含有量は約30%であり、これがしゃ水シートの電気抵抗に関与しているものと

表-2 導電性 HDPE しゃ水シートの電気抵抗

しゃ水シートの種類	電気抵抗 (MΩ/30cm)	電極状態
導電性 HDPE (導電性側)	5.9×10^{-3}	乾燥
	5.8×10^{-3}	湿潤
導電性 HDPE (非導電性側)	10 以上	乾燥
	10 以上	湿潤
EPDM (A社)	37×10^{-3}	乾燥
	34×10^{-3}	湿潤
融着ゴム (H社)	10 以上	乾燥
	10 以上	湿潤



考えられる。

一方、融着ゴム製しゃ水シートの電気特性は、PVCしゃ水シートやHDPEしゃ水シートの電気特性と比較してほぼ同等の特性を示す。この理由は、融着ゴム製しゃ水シートは、ポリエチレンやポリプロピレンの混合物（カーボンブラック含有量約2%）にEPDMの粒子が分散した構造になっているためと考えられる。したがって、各社の融着ゴム製しゃ水シートは、一般にEPDMと称して販売されているが、電気的特性からみると、HDPEやPVCなどのプラスチックのしゃ水シートと同様な特性を有していることがわかる。

しかし、電気抵抗が大きい合成樹脂系のしゃ水シートであっても、配合される材料中に導電性の高いカーボンブラックなどの材料が多く含まれていれば、電気抵抗は非常に小さくなる。表-1の導電性HDPEの欄に示したしゃ水シートは、積層構造をなしており、廃棄物が埋め立てられる側の表層を白色の顔料により着色して太陽熱の吸収を低減し、地盤側の表層のカーボンブラック含有量を約20%に増やして、電気抵抗を小さくした製品である。このしゃ水シートの敷設工事において、しゃ水シートの電気抵抗が小さい面とワイヤーブ

ラシ間に高電圧を印加し、白色のしゃ水シート表面をワイヤーブラシでなで、スパークが飛ぶ箇所から施工不良部やしゃ水シートのピンホール部分を検知し、しゃ水シート敷設工事時の品質管理に使用されている。

この製品のしゃ水シート表裏間の電気抵抗は、表-1に示すように通常のHDPEやPVCしゃ水シートのように非常に大きい。しかし、表-2の凡例の図に示すようにカーボンブラック含有量を増やした側の表面に2本の棒状電極（長さ300mm）の間隔を200mmにして電気抵抗を測定すると、 $5.8 \times 10^{-3} \text{M}\Omega/30\text{cm}$ となる。一方、同様の測定をEPDMしゃ水シートについて行くと、 $34 \times 10^{-3} \text{M}\Omega/30\text{cm}$ となり、導電性HDPEしゃ水シートの電気抵抗は、EPDMしゃ水シートの約1/6にすぎないことがわかる。同様の測定を、融着ゴムや導電性HDPEしゃ水シートの白色に着色された電気抵抗の大きいしゃ水シート面について行くと、測定器の限界以上である $10 \text{M}\Omega/30\text{cm}$ 以上の値を示す。

以上の測定結果から、しゃ水シートに含まれるカーボンブラックの含有量によって電気抵抗は大きく変わることがわかる。

(2) しゃ水シートと地盤の電気抵抗の比較

地盤とA社のEPDMしゃ水シートの電気抵抗について、図-5に示す土槽を用いて検討した。土槽の大きさは、 $19\text{m} \times 9\text{m}$ の平面形状で、しゃ水シート上下に $\phi 3.2\text{mm}$ の裸鋼線を2m間隔で設置し、しゃ水シート上には厚さ25cm~50cmの砂層を設けたものである。この形状の土槽をそれぞれ隣接させて2つ造成し、1つの土槽にはA社製1.5mm厚のEPDMしゃ水シートを敷設し、他の1つの土槽にはF社製1.5mm厚のPVCしゃ水シートを敷設した。砂は、同一の種類を使用し、含水比は表-3に示すように5.75%と5.74%で、それぞれの土槽ともほぼ同一であった。

土槽に設置したしゃ水シート上下それぞれの電極間電気抵抗を表-4に示す。この表-4の電極間電気抵抗は、しゃ水シート上下の電極の長さが、しゃ水シートの上側と下側で9mと19mと異なるため、電極10mあたりに換算した電気抵抗である。EPDMおよびPVCしゃ水シートを敷設した土槽の電極間電気抵抗を比較すると、EPDMしゃ水シートを敷設した土槽の電極間電気抵抗がPVCしゃ水シートを敷設した土槽の電極間電気抵抗よりもいずれも小さいことがわかる。特にしゃ水シート下側の電極間電気抵抗の差が顕著である。

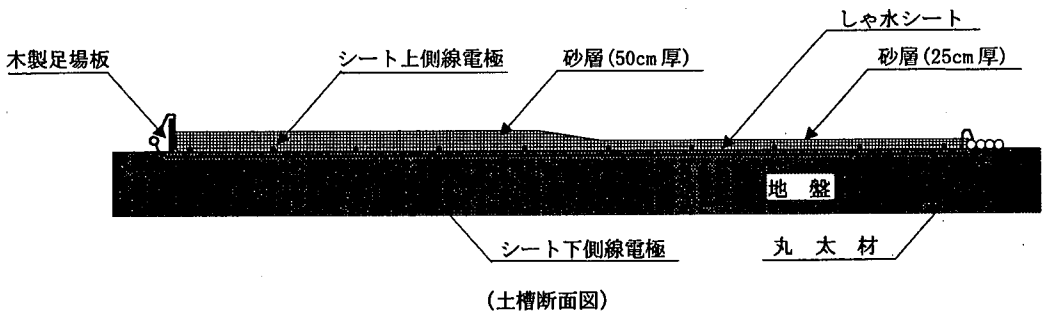
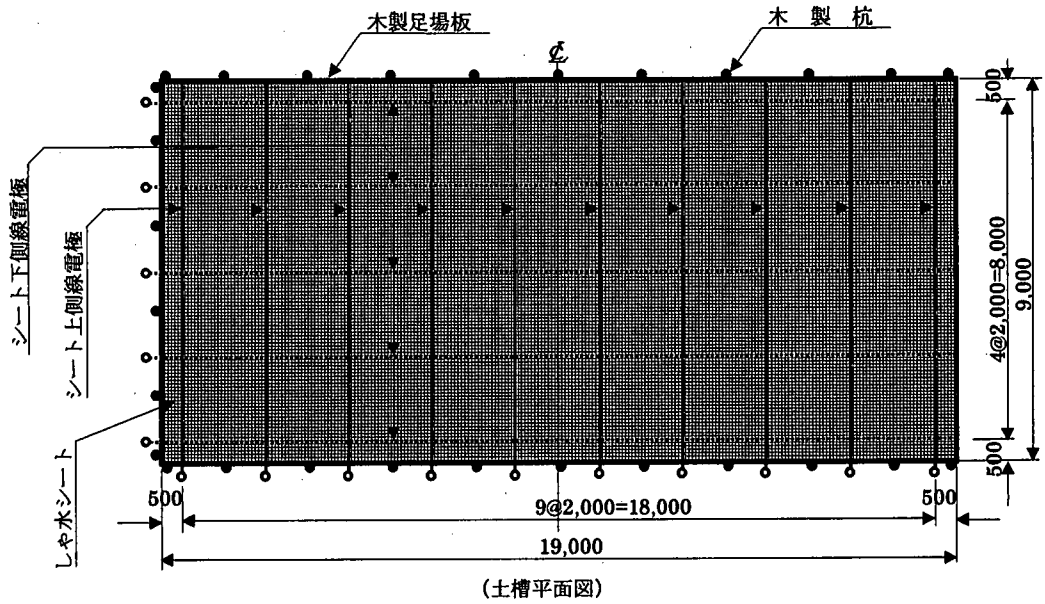


図-5 実験用土槽

表-3 土槽の砂層の含水比

試料	EPDM (%)	PVC (%)
1	5.50	5.57
2	5.91	5.68
3	5.85	5.98
平均	5.75	5.74

表-4 しゃ水シート上下の電極間電気抵抗

シートの種類	EPDM ($\Omega/10m$)	PVC ($\Omega/10m$)
シート上側	142	162
シート下側	194	620

ところで、PVCしゃ水シートの電気抵抗は、前述のように非常に高く、ほぼ無限大と仮定してよいと考えられる。この仮定に基づくと、PVCしゃ水シートを敷設した土槽に設置したしゃ水シート上下の線電極間の電気抵抗は、砂層の電気抵抗が $162 \Omega/10m$ および地盤の電気抵抗が $620 \Omega/10m$ と見なせる。

すなわち、PVCしゃ水シートを敷設した土槽とEPDMしゃ水シートを敷設した土槽において、

しゃ水シート上下の電極間抵抗の違いは敷設されたしゃ水シートの電気抵抗の違いによって生じたものと考えられる。ここで、EPDMしゃ水シートの地盤側と砂層側の $10m$ 幅あたりの電気抵抗をそれぞれ r_b 、 r_s とする。電極間電気抵抗は、地盤もしくは砂層の電気抵抗としゃ水シートの電気抵抗との合成電気抵抗であるから、以下の式(8)と式(9)が成り立つ。それぞれの式を解くことにより、EPDMしゃ水シートの $10m$ 幅当たり電気抵

表-5 シート接合部周辺の電極間電気抵抗

測定条件	電気抵抗 (MΩ / 4 cm)
接合部に平行 ※ 1	0.6
接合部に垂直 ※ 2	3.0
接合部 ※3	120

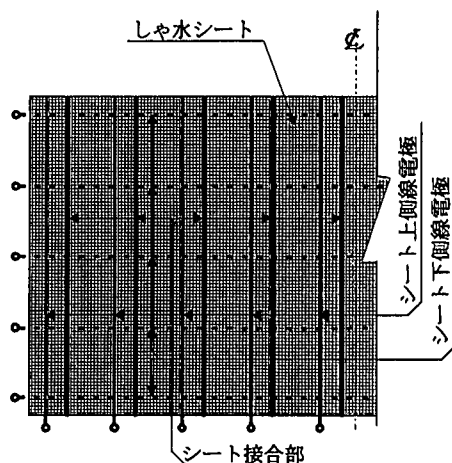
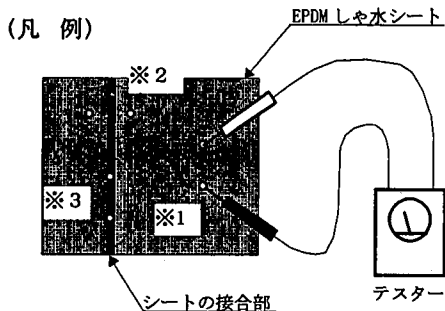


図-6 測定電極とシート接合部の位置関係

抗は、地盤側が 282Ω/10m, 土槽の砂層側が 1150Ω/10m の値が得られる。

(しゃ水シート地盤側の電気抵抗)

$$\frac{1}{\frac{1}{r_D} + \frac{1}{162}} = \frac{1}{142} \quad (8)$$

$$r_D = 1150\Omega/10m$$

(しゃ水シート砂層側の電気抵抗)

$$\frac{1}{\frac{1}{r_G} + \frac{1}{620}} = \frac{1}{194} \quad (9)$$

$$r_G = 282\Omega/10m$$

以上の実験から、A社のEPDMしゃ水シートの電気抵抗は、しゃ水シート接合方向に地盤の電気抵抗の 45% (=100×282/620) しかなく、しゃ水シートの接合部の直交方向に地盤の電気抵抗の約 1.9 倍 (=1150/620) でしかないことがわかる。

(3) EPDMしゃ水シートの電気抵抗の特性

(2) で述べたように、しゃ水シートの地盤側と土槽側ではしゃ水シートの 10m 幅当たりの電気抵抗が異なる。この理由は、EPDMしゃ水シートの製造方法に起因すると考えられる。

すなわち、土槽に敷設したしゃ水シートは、電気的特性が均一な 1 枚ものとして製造されてい

るわけではなく、図-6 に示すように土槽の短手方向に約 2 m 幅のしゃ水シート反物の重ね合わせ部に非加硫ゴム接着材(ブチルゴム)を挿入して熱加硫により接合して製造されている。

このしゃ水シート接合部周辺の電気抵抗を直流テスターで計測すると、EPDMしゃ水シートは、表-5 に示すようにしゃ水シート接合部の方向に電気抵抗が小さく、接合部に対して直交方向に電気抵抗が大きい性質を有していることがわかる。さらに接着材として使用されている非加硫ゴム(ブチルゴム)の特性を調べるため、非加硫ゴムをしゃ水シート状に加工し、しゃ水シートの電気特性を試験したところ、表-1の接着材の項に示すように非常に高い絶縁性を有しており、これによってしゃ水シートを構成している反物の方向に電気が通りやすく、接合部の直交方向に電気が通りにくくなっていると考えられる。

5. しゃ水シートによる測定障害例

A社のEPDMしゃ水シートを敷設した土槽において観察された電氣的漏水位置検知の測定障害の例を示す。実験は、図-5 に示す土槽を使用し、電流測定と線電極を特徴とする電氣的漏水位置検知システムにより行った。この実験に使用した電氣的漏水位置検知システム¹⁶⁾の測定原理と性能は、大型模型実験結果により実証されている。

前述のように、土槽は隣接した位置に2つ造成し、それぞれの土槽に 1.5mm 厚のEPDMしゃ水シートとPVCしゃ水シートを敷設し、しゃ水シ

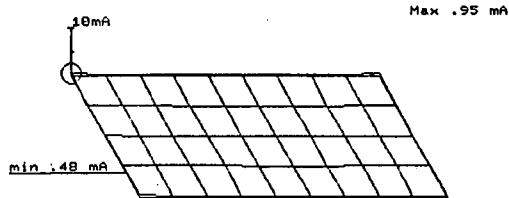


図-7 実験開始前の測定結果 (PVC)

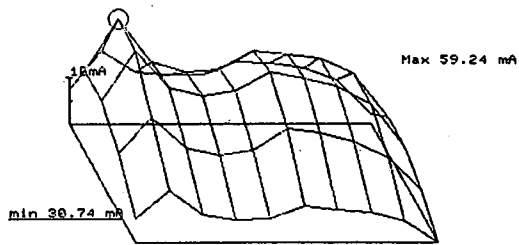


図-8 実験開始前の測定結果 (EPDM)

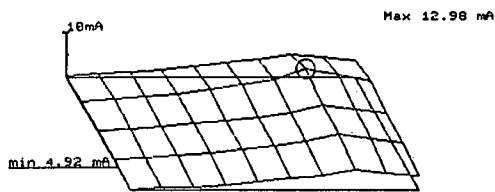


図-9 シート破損後の測定結果 (PVC)

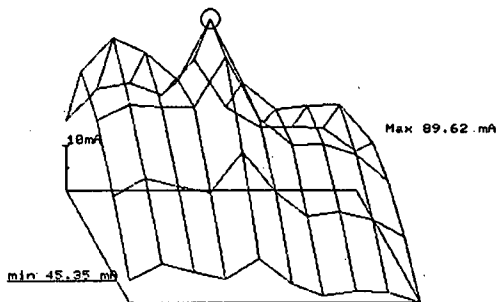


図-10 シート破損後の測定結果 (EPDM)

ート上には 25cm と 50cm 厚の砂層を設けた。この砂層上で 23t 級ブルドーザの走行および方向転換を実施し、その前後で漏水検知システムによる測定を行った。

図-7～図-10 に示す測定結果は、図-5 の実験土槽のしゃ水シート上下の線電極が交差する点について、印加電圧と同じ位相をもつ電流について 3次元で図示したもので、大きな電流が流れている箇所が漏水位置を示す。図-7 と図-8 は、ブルドーザ走行前の各土槽の測定結果を示したものである。図-7 は、PVCしゃ水シートを敷設した土槽の測定結果であるが、最大でも 0.95mA の電流しか流れない非常に均一な測定結果となっている。それに対して、図-8 に示す EPDMしゃ水シートを敷設した土槽の測定結果は、しゃ水シートに損傷がない状態であるにもかかわらず、最大 59.24mA 最小 30.74mA の電流が流れており、電流の大きさも説明不能な傾向がみられる。この最大電流が測定された部分について砂層を除去してしゃ水シートの状態を調査したが、しゃ水シートの損傷とみられる箇所はまったく発見できなかった。一方、PVCしゃ水シートが破損した直後の測定結果は、図-9 中の○印に示すように損傷が生じた部分で最大電流 12.98mA の明確なピークが認められる。また、EPDMしゃ水シートを敷設した土槽の場合、図-8 の初期状態と比較する

と新たな明確なピーク 89.62mA が認められるが、この箇所の相当部分に損傷は存在したが、この他にも多くの損傷が砂層の撤去後確認でき、この測定から得られた結果を論理的に説明することはできない。

測定障害が認められた EPDMしゃ水シートを敷設した土槽と良好な測定結果が得られた PVCしゃ水シートを敷設した土槽において、損傷の発生の前後で確認された電流の最大値の変化を比較すると、PVCしゃ水シートの場合 13.7 倍 ($=12.98/0.95$) であるのに対して、EPDMしゃ水シートの場合 1.51 倍 ($=89.62/59.24$) にすぎない。これは、PVCしゃ水シートと EPDMしゃ水シートの電気抵抗の違いによって生じた現象と考えられる。すなわち、PVCしゃ水シートの電気抵抗は、表-1 に示したように 120cm^2 あたり $10\text{M}\Omega$ 以上と非常に大きい。これに対して、EPDMしゃ水シートの電気抵抗は PVCしゃ水シートの電気抵抗と比較して、測定電極表面が乾燥した状態にあっても、 120cm^2 あたり $8.5 \times 10^{-2}\text{M}\Omega$ と非常に小さい。したがって、EPDMしゃ水シートが敷設された土槽において、図-4 に示したようにしゃ水シートを流れる回路の電気抵抗がもともと小さいため、しゃ水シートを介して流れる電流が損傷発生前から大きく、損傷の発生による電流増加の比率が小さいものと判断される。一

方、電気抵抗が大きいPVCしゃ水シートを敷設した土槽の測定では、しゃ水シートの損傷発生後、はじめて図-3に示す漏水を経由する回路ができ、漏水発生前後における電流変化の比率が大きくなるものと考えられる。

6. 考 察

前章までに述べたしゃ水シートの電気特性に関する実験と土槽を使用して行った実験で生じた測定障害から、各種電氣的漏水検知方法のしゃ水シートの電気抵抗から受ける影響について考察する。

(1) 測定原理への影響

既往の電氣的漏水位置検知方法の研究において述べたように、電位を測定する方法と電流を測定する方法と電気抵抗の分布を測定する方法に大別できる。

前述の測定障害は、電流測定による漏水位置検知方法の測定結果に生じた。こうした測定障害は、電位測定や電気抵抗測定による漏水位置検知方法においても生ずると考えられる。

すなわち、電位差測定による漏水位置検知方法では^{4)~8)}、処分場内に設置した測定電極を使用して電位測定を行い、処分場内の電位分布をもとめ、電位分布の異常から漏水位置を特定する。しかし、この測定方法が成功する前提として、処分場内外が大きな電気抵抗のしゃ水シートで電氣的にしゃ断された条件でなければならない。しゃ水シートがこの条件を満たせば、漏水の周辺に大きな電位異常が生じ、容易に漏水位置を特定することができる。しかし、しゃ水シートの電気抵抗が小さい場合、しゃ水シートを介して流れる電流により生ずる電界で、漏水周辺に生ずる電位異常の検知が困難となる。特に、しゃ水シートの電気抵抗が地盤の電気抵抗よりも小さい場合には、漏水位置を検知することは不可能と考えられる。

また、EPDMしゃ水シートのように、反物の接合部分の電気抵抗が大きくシート素材自体の電気抵抗が小さい場合、接合部の方向とその直交方向の電気抵抗の特性が完全に異なる。したがって、このような特性のしゃ水シートが敷設された処分場の場合、処分場内に設置した印加電極周辺の電界がしゃ水シートの特性により大きくゆがめられ、漏水による電位異常かしゃ水シートの特性によるものか判別が非常に困難となると考えられる。

同様の理由により、電位傾度法を応用した漏水

位置検知方法^{11)~13)}に置いても、検知不能になると考えられる。

一方、電気抵抗測定による漏水位置検知方法には、しゃ水シート上下に設置した電極間の電気抵抗(インピーダンス)を測定する方法¹⁴⁾と、2重しゃ水シートの排水層内に設置した2本の裸電線間の電気抵抗を測定する方法^{9),10)}がある。しゃ水シート上下に設置した電極間の電気抵抗を測定する方法では、前述の電流測定による方法と同様にしゃ水シートを経由する回路が生じ、漏水を経由する回路の電気抵抗だけ取り出して計測できず、漏水位置の検知が非常に困難もしくは不可能となる。

したがって、地盤よりもしゃ水シートの電気抵抗の方が小さい場合、いずれの電氣的漏水位置検知方法も、漏水の位置検知は不可能となると考えられる。

筆者らが実施した一連の実験は、しゃ水シートを非常に乾燥した地盤面に敷設して実施されたものあり、特殊な条件とも考えられる。しかし、実際の処分場においても、地下水位が低く空隙が多い砂礫層地盤では、雨水の浸透がしゃ水シートのために抑制され、しゃ水シートの電気抵抗が地盤よりも小さくなる可能性が十分考えられる。

ところで、しゃ水シートを介して流れる電流は、電氣的漏水位置検知において実際の漏水とは無関係のノイズでしかなく、漏水を経由して流れる電流と分離することはできない。したがって、処分場に敷設するしゃ水シートの電気抵抗は、できるだけ大きい(120cm²あたり10MΩ以上)方が測定精度望ましいと考えられる。

(2) 電極方式への影響

現在までに開発された電氣的漏水位置検知方法のうち、処分場内に点電極を多数設置する方法が多いが、裸電線を配置することにより少数の電極で広い面積をカバーできる線電極の利用が研究されている。

電位測定、電流測定、電気抵抗測定を測定原理とするそれぞれの方法とも、EPDMしゃ水シートのようにしゃ水シート表裏間の電気抵抗が低いしゃ水シートが敷設された処分場では、測定原理上漏水位置検知が非常に困難となることは既に表示した。

一方、表-1と表-2に示した導電性HDPEのようにしゃ水シートの片面のみ電気抵抗が小さい場合、しゃ水シート表裏間の電気抵抗はPVCしゃ水シートや通常のHDPEしゃ水シートなら

びに融着ゴムしゃ水シートのように、非常に電気抵抗が大きい。したがって、しゃ水シート接合部分を電氣的に十分絶縁すれば、漏水位置検知は処分場内部だけに点電極を配置する検知方法であれば十分可能と考えられる。

しかし、2重しゃ水シート内に配置された2本の線電極間の抵抗を測定することにより漏水位置を特定する方法^{9),10)}では、しゃ水シートの電気抵抗が大きい場合には漏水から流入した浸出水で濡れた排水層によって形成される2本の線電極間をつなぐ回路が限定され、漏水位置が検知できると考えられるが、しゃ水シートの電気抵抗が小さい場合には電極から電極までの電気回路が不織布など排水層だけでなく、しゃ水シート全体に広がるため、漏水位置は検知できないと考えられる。

また、線電極を使用する電位測定による漏水位置検知方法⁹⁾でも、導電性を有する側に配置した電極がすべて同電位となるため、漏水位置は検知できないと考えられる。

線電極を用いる漏水位置検知方法は、点電極を使用する漏水位置検知方法と比較して、少数の電極で広い面積をカバーできるため、広大な処分場の場合測定システムの建設コストで比較して非常に有利な面が多い。しかし、片面の電気抵抗を小さくしたしゃ水シートに線電極の適用は不可能と考えられる。

7. 結 論

以上の実験結果から、本研究で判明した結論を述べる。

- 1) EPDMしゃ水シートの製品の中には、非常に電気抵抗が小さくかつ静電容量が大きいものがあり、電極としゃ水シート表面が湿潤状態となって電氣的接触条件が改善されると、さらに電気抵抗が小さく静電容量も大きくなる。
- 2) 一般にPVCしゃ水シートやHDPEしゃ水シートおよび融着ゴム製しゃ水シートの電気抵抗は非常に高く、静電容量もEPDMしゃ水シートと比較すると1/1000程度で、しゃ水シート試験片表面に接触させた電極面が湿潤状態もしくは乾燥状態であっても電気特性の変化は小さい。
- 3) 電気抵抗が大きいHDPEであっても、カーボンブラック含有量により電気抵抗が小さいしゃ水シートも存在する。しゃ水シートの片面のみ電気抵抗を小さくしたHDPEしゃ水シートは、

しゃ水シート表裏間の電気抵抗が一般のしゃ水シートと同様に非常に大きく、接合部の絶縁処理が完全であれば、点電極の漏水位置検知方法が適用できる。

- 4) 導電性の高いしゃ水シートの接合に電気抵抗が大きい接着剤が使用された場合、しゃ水シートの接合部方向に電気抵抗が小さく、接合部の直交方向に電気抵抗が大きい特性が加わる。
- 5) 地盤よりも電気抵抗が小さいしゃ水シートが敷設されると、点電極ならびに線電極を使用する電氣的漏水位置検知システムとも漏水を検知できない。
- 6) 線電極を使用する電氣的漏水位置検知方法では、電気抵抗が小さいしゃ水シートや片面のみ電気抵抗を小さくしたしゃ水シートが敷設された条件では適用できない。

最近になって、電氣的漏水位置検知システムを処分場に導入するケースが増えている。こうした、電氣的漏水位置検知システムを導入する場合、事前にしゃ水シートの電気特性の検討が不可欠である。しゃ水シートの電気抵抗が小さい場合、しゃ水シートの漏水位置検知が非常に困難となる。本論文では、EPDMしゃ水シートが有する小さな電気抵抗によって生じた測定障害例を示したが、このようなしゃ水シートの特性に関連した測定障害は、事前のしゃ水シートの電気特性について詳細な検討により防止できるはずである。

電氣的漏水位置検知システムの原理面や実用化の研究は今後とも重要であるが、しゃ水シートの詳細な電気特性の把握も重要と考えられる。

謝辞：本研究にあたっては、(株)レイディック坂田所長にご協力を頂き、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Gross, B.A., Bonaparte, R. and Giroud, J.P.: Evaluation of flow from landfill leakage detention layers, *Proc. of the 4th International Conference on Geotextiles Geomembranes and Related Products*, Vol. 2, pp.481 - 486, 1990.
- 2) Koener, R.M.: *Design with Geosynthetics*, 3rd ed., Prentice-Hall Inc., pp.529 - 542, 1994.
- 3) 小谷克己, 串間正敏, 峠和夫, 黒岩正夫, 前田章, 緒方浩基: しゃ水シートの真空管理システムの実験報告, 第4回廃棄物研究発表会講演論文集, pp.491 - 494, 1993.
- 4) Schultz, D.W., Duff, B.M. and Peters, W.R.: Performance of an Electrical Resistivity

- Technique for Detecting and Locating Geomembrane Failures, Report No. EPA-600/D-84-123, 1984.
- 5) 野口康治, 押方利郎, 川上純, 臼井直人, 金子伯男: 電気探査を用いた管理型最終処分場の漏水位置検知方法—モデル実験結果, 物理探査学会第79回学術講演会講演論文集, pp. 211 - 212, 1988.
 - 6) 古市徹, 田中勝, 押方利郎, 海老原正明: 埋立処分場監視システムの開発要因に関する考察, 第5回廃棄物研究発表会講演論文集, pp. 369 - 372, 1994.
 - 7) 島裕雅, 奥村興平, 大橋英隆, 本徳修三, 福岡晃一郎: 管理型廃棄物処分場における漏洩電流評価法による高精度漏水探査, 第5回廃棄物研究発表会講演論文集, pp. 383 - 385, 1994.
 - 8) 土弘道夫, 瀬尾昭治, 末吉隆信, 浦満彦, 若林秀樹, 広野進: 廃棄物処分場におけるしゃ水シートの漏水検知システムの開発, 第5回廃棄物研究発表会講演論文集, pp. 605 - 607, 1995.
 - 9) Meerleer, F. de : Accurate Detection and Location of Effluent Leaks Beneath Lined Waste Disposal Sites, *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol.3, pp.913 - 918, 1994.
 - 10) 大野文良, 佐々木潤治, 桜井仁: 最終処分場における漏水検知システム(パルス法)の開発, 第7回廃棄物研究発表会講演論文集, pp. 656 - 657, 1996.
 - 11) Landreth, R.E. : Locating and Repairing Leaks in Landfill/ Impoundment Flexible Membrane Liners, Report No. EPA/600/D-88/183, Aug. 1988.
 - 12) Darilek, G.T. and Para, J.O.: The Electrical Leak Location Method for Geomembrane Liners, Report No. EPA/600/2-88/035, Jun. 1988.
 - 13) 荒井健, 新井斉, 山崎宜悦, 大即信明: 差動回路で測定した電位差による廃棄物処分場の漏水位置検知方法, 土木学会論文集, No. 602/VI-40, pp. 75 - 91, 1998.
 - 14) 西山勝栄, 伊藤洋, 木内幸則, 近藤三樹郎: 面電極法によるしゃ水シートの漏水位置検知システムの開発, 第7回廃棄物研究発表会講演論文集, pp. 648 - 650, 1996.
 - 15) 荒井健, 新井斉, 山崎宜悦, 波多野雅一郎: 廃棄物処分場の漏水位置検出方法, 物理探査学会第86回学術講演会講演論文集, pp. 390 - 395, 1992.
 - 16) 荒井健: 管理型最終処理場の漏水位置検知方法の開発, 物理探査学会第81回学術講演会講演論文集, pp. 236 - 241, 1989.
 - 17) 物理探査技術協会編: 物理探査用語辞典, 物理探査技術協会, pp. 105 - 106, 1979.
 - 18) 物理探査技術協会編: 物理探査用語辞典, 物理探査技術協会, pp. 244, 1979.
 - 19) 阿部善右衛門, 木下敏夫: 計測回路, pp. 188 - 190, 朝倉書店, 1980.
 - 20) 西巻正郎: 電気学, 森北出版, pp. 78-92, 1975
 - 21) 大石進一: フーリエ解析, 岩波書店, 1989.
 - 22) 物理探査技術協会編: 物理探査用語辞典, 物理探査技術協会, pp. 233 - 234, 1979.

(1998. 5. 1 受付)

THE INFLUENCE OF ELECTRIC PROPERTIES OF GEOMEMBRANE ON ELECTRICAL LEAK DETECTION FOR LANDFILL SITES

Ken ARAI, Hitoshi ARAI, Nobuyoshi YAMAZAKI and Nobuaki OTSUKI

Many electrical leak detection methods have been researched and developed, in many laboratories, for landfill site lined with geomembrane such as synthetic rubber and plastics. The methods assume that the geomembrane has a high electrical resistance and the points of leakage are searched out and detected by measuring differences in electrical potential, current or electrical resistivity. The authors of this paper have investigated the electrical properties of various membranes, and have found that some geomembranes are not electrical insulators and therefore the traditional theory that they should be insulators no longer holds good. This paper presents the electrical structure within a landfill site, the electrical properties of various geomembranes and the influence of geomembranes with a low electrical resistivity on electrical leak detection.