

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

荒井 健¹・新井 齊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 東京工業大学教授 開発システム工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

廃棄物処分場に敷設されたしゃ水シートからの漏水位置検知には、鉈体流電法(流電電位法)¹⁾など地盤探査技術の応用が試みられてきた。これらの手法は、等電位線の乱れや低抵抗ゾーンから漏水を検知するため、処分場の形状などの影響が測定結果に生じデータの解釈がむずかしい。筆者らは、印加電極とシート反対側の線電極間に電圧をかけた状態で、印加電極から等距離にある2本の電極間の電位差を差動回路で測定することにより、処分場の形状に左右されにくい漏水周辺の電位異常を検出する測定システムを考案した。本論文は、その測定システムの原理とその有効性について述べるものである。

Key Words: landfill site, leak detection, phase sensitive detector, electric potential

1. はじめに

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。このような事故が発生した場合、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。

したがって、廃棄物処分場に敷設されたしゃ水工の水密性について日常的な監視を行い、異常が確認された場合には迅速かつ適切な処置を講ずることが重要である。廃棄物の埋立作業に伴ってシートしゃ水工に破損が認められた場合には、損傷周辺の廃棄物を除去してシートの損傷部分にパッチをあてることが現状では最も確実な補修方法であるが、廃棄物の除去作業には非常に困難がともなう。こうした廃棄物の除去作業を低減するために、漏水位置検知方法に損傷部分について十分な位置的精度が求められる。

現状における主なシートの漏水位置検知方法に、2重シート間に流入してくる浸出水を検知する^{2),3)}方法と、処分場内外に電圧を印加した状態における処分場内各点の電位測定もしくは電気抵抗測定により漏水位置を検知する電気的手法など⁴⁾⁻¹¹⁾が知られている。

これらの方法のうち2重シートによる漏水位置検知方法では、漏水位置がゾーンでしか把握できない欠点があるが、周辺環境への直接の脅威となる浸出水の有無を判断できる利点がある。一方電気的手法は、技術革新により精度向上が十分可能であり今後の発展性に優れると思われるが、原理的に浸出水の有無を確認することはできない。

電気的漏水位置検知方法のうち、しゃ水シートが絶縁体であることを利用し処分場内外に電圧を印加した状態で漏水近傍に発生する電位異常を検出する鉈体流電法を応用した漏水位置検知システムや、処分場内に設置した電極と処分場外の電極間の電気抵抗を測定することにより漏水部分周辺に生じる低抵抗ゾーンを検出することによって漏水を検知する測定システムなどが代表的なものである。

これらの測定システムの測定結果には、漏水がない状態であっても、処分場の形状や廃棄物の種類や電極における接触抵抗のばらつきなどによると考えられる処分場固有の等電位線の微妙なゆがみなどの電気的性状が観察される⁶⁾⁻¹¹⁾。こうした処分場の固有な電気的特性と漏水の影響が識別することは非常に困難がともなうと考えられる。したがって、しゃ水シートの漏水位置検知にあたっては、処分場の電気的特性に影響されにくく、漏水部など電気的に特

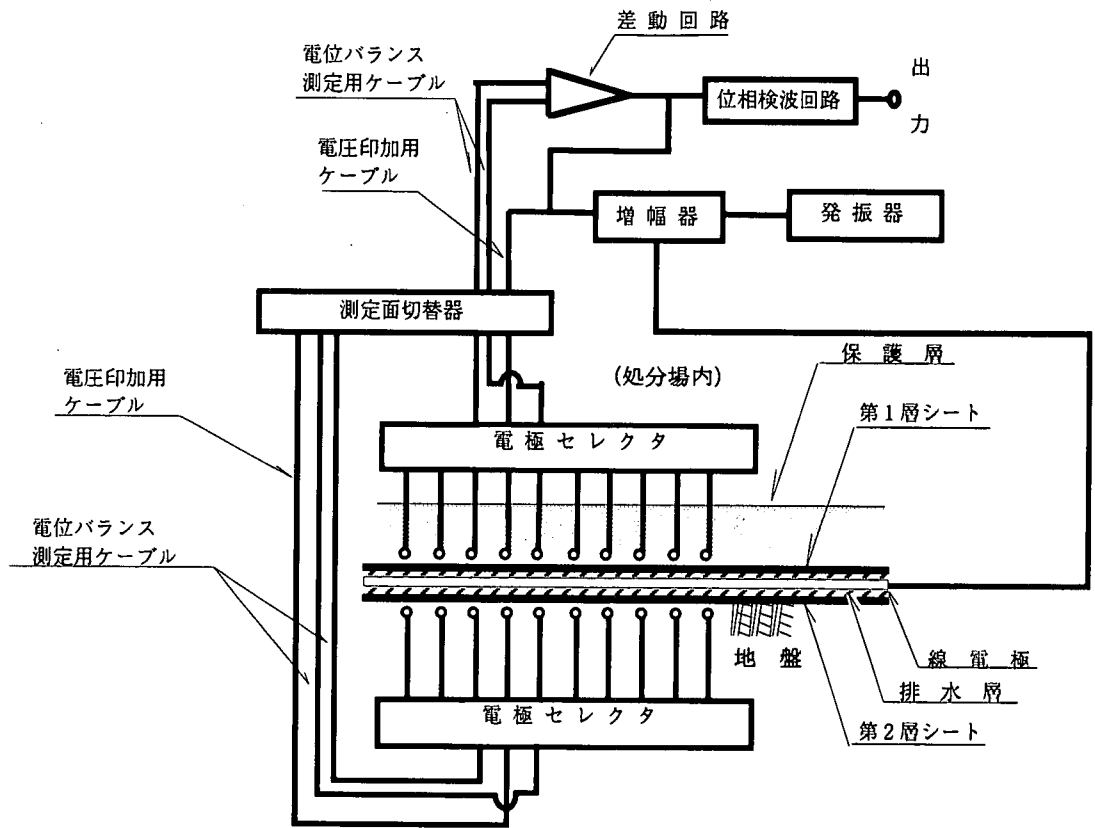


図-1 測定システムの構成

異なる部分により大きく反応する測定システムが求められる。こうした問題に対し、種々の改良や2重シートの排水層内に電極を設置する測定手法^{12)・14)}が開発されているが、排水層内の浸出水による測定障害や測定作業量の面に課題があり、万全な対策ではない。

筆者らは、処分場の形状や廃棄物の質に影響されにくい新たな測定原理に基づく測定システムを考案した。本論文は、筆者らが考案したしゃ水シートの漏水位置検知システムの測定原理とその有効性について述べるものである。

2. 新しい漏水位置検知システム

筆者らが開発した検知システムのブロック回路図を図-1に示す。本測定システムは、印加電圧の波形に発振器で作った正弦波を使用し、差動回路で印加電極から等距離の電位差を、位相検波回路

で印加電圧の位相と異なる電磁波の影響で発生する高調波ノイズや自然電位の影響を除去して高精度に測定する。電極は、二重シートの排水層の電位を一樣にすることと漏水部分に電流が流れやすくすることを目的とする等間隔に設置された線電極と、排水層上下のシート面近傍の保護層と地盤に設置された点電極で構成されている。点電極からのリード線を電極セレクタに結線し、測定面切替器を介して測定機器に接続する。測定にあたっては、測定面切替器により上下のシートのどちらかを選択する。図-2は、排水層から上の点電極の構成を示したもので、点電極は電極間隔 r を等間隔としてシート上に碁盤目状に設置されている。これらのセレクタに結線された電極のうち隣り合う3本の点電極のうち中央の点電極と排水層の線電極間に電圧を印加し、印加電極の両隣の点電極を使用して電位差を測定し漏水部を検知する。さらに測定面切替器を切り替えて未測定シートについて同様の測定をすることにより二重シートが敷設されている処分場に対応する。

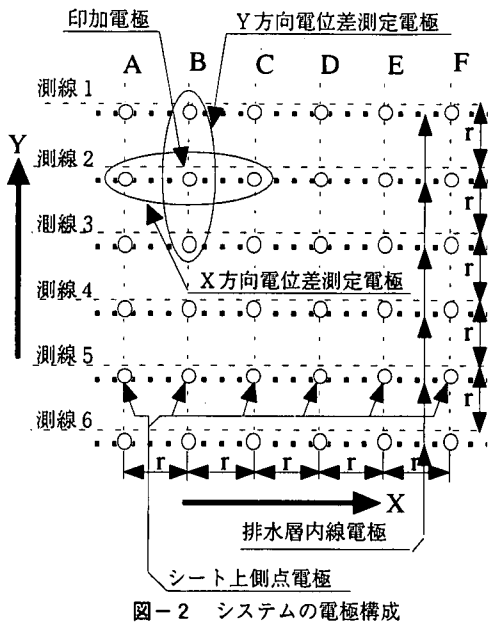
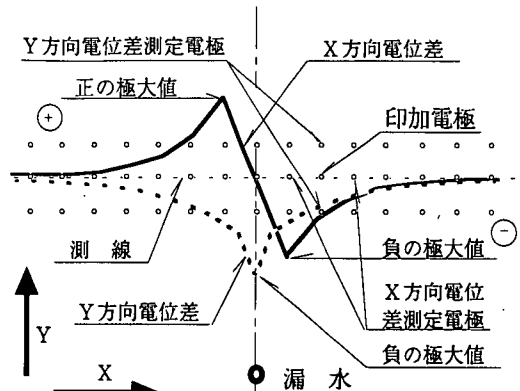


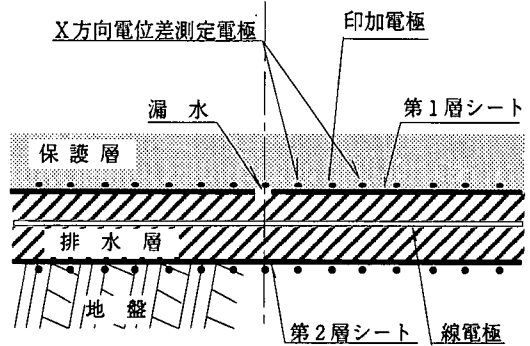
図-2 システムの電極構成

具体的な漏水位置検知方法は、以下のとおりである。図-2に示すように、等間隔に設置された点電極の列をそれぞれ測線とする。ここで、測線の方向をXとし、それに対して直交方向をYとする。計測は、測定対象の測線上の1本の点電極を印加電極とし、図中の縦長と横長の楕円で示した印加電極周辺の4本の点電極を電位差測定電極として実施する。図-2は、測線2のBを印加電極とした場合の電位差測定電極の配置を示したもので、測線上の印加電極に隣り合う点電極(測線2の電極A, C)をX方向電位差測定電極とし、両隣の測線上の点電極(測線1の電極B, 測線3の電極B)をY方向電位差測定電極とする。排水層の線電極と測線2の電極B間に電圧を印加した状態で、X方向電位差測定電極とY方向電位差測定電極について電位差を差動回路でとり、位相検波回路でノイズ成分を除去し、これらの測定結果を測線2の電極BにおけるX方向電位差およびY方向電位差とする。さらに印加電極を測線沿いに測線2の電極Cに切り替え、測線2の電極C周辺の電極(測線2の電極B, Dおよび測線1の電極Cと測線3の電極C)を電位差測定電極としてX方向電位差とY方向電位差の測定を行い、こうした測定を順次全測線について実施する。

図-3の平面図は、第1層シートの漏水と測線および電極の位置関係とX方向電位差とY方向電位差の測定結果を測線に沿って示したものである。X方向電位差とY方向電位差は、電位の特異点となるシート上下を短絡する損傷や施工不良等から十分離れた位置で0となる。一方、電位の特異点である漏水



【平面図：測線と漏水の位置関係と測定結果】



【断面図：測線と漏水の位置関係】

図-3 漏水位置検知方法

が近くに存在すると、X方向電位差は、漏水の近傍で非常に大きな正と負の極大値を示す。これらの正および負の極大値の間で電位差が0となる位置が漏水の存在位置に相当する。また、Y方向電位差は、図-3の位置関係の場合、漏水位置に最も近い点において負の極大値をとる。これらの測定結果を総合して、漏水位置を特定することができる。さらに測線に対して印加電極から $\pm 45^\circ$ にある電極を使用し、測定データを既設の測線に対して 45° 方向にみれば、新たに既設の測線に対して 45° 方向に測線を設定したこととなり、種々の漏水に関するデータが得られ、これらのデータを考慮することによりさらに高精度の測定ができる。

3. 漏水位置検知の原理

(1) 電位差測定

筆者らが考案した漏水位置検知システムでは、図-1に示したシステムの構成からわかるように、排

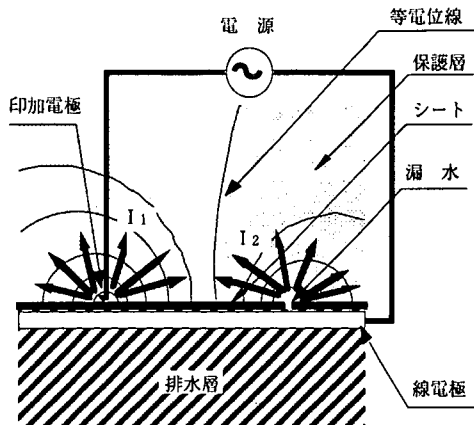


図-4 電極と漏水周辺の電界の広がり

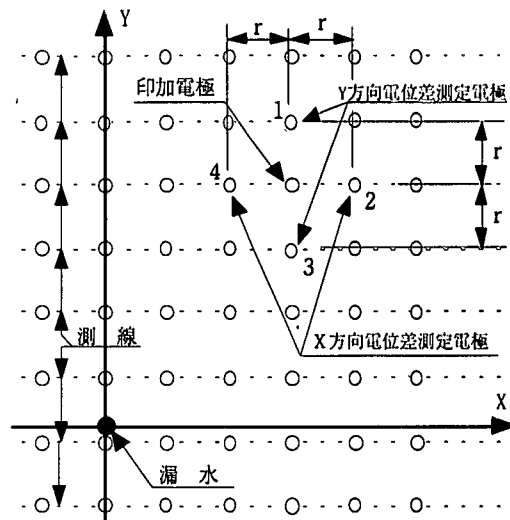


図-5 漏水位置に対する測線と電極配置

水層を一定電位とし、処分場内および地盤側に配置した各点電極を印加電極および電位差測定電極として測定を行うところに特徴がある。2重シートの上下について電極構成は全く同じであるため、2重シートの排水層から上の電極構成について説明する。

図-4のようにシートに1箇所漏水がある処分場の内外に電圧が印加された場合、印加電極から電流 I_1 が流れ、漏水部に電流 I_2 が流れ、それらの周辺に等電位線で示される電界が形成される。ここで言う漏水とは、実際に浸出水が漏れているシートの損傷や施工不良部だけでなく、浸出水が漏れていなくともシートの表裏が電気的につながり損傷や施工不良部をも含むものとする。図-4の印加電極と漏水部を、半無限の場に設けられた2つの電源と仮定する。ここで、電気伝導度が均一な半無限の広がりを持つ場に設置された点電極に電圧を印加すると、点電極から半径 r の位置における電位 V は、電流 I と地盤の比抵抗 ρ を用いて式(1)に示される¹⁵⁾。式(1)からわかるように、印加電極から流れる電流が微量であれば電界の広がり小さく、電極周辺の廃棄物の比抵抗の違いによって生ずる影響は小さいと考えられる。

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (1)$$

ここで、図-5に示すように等間隔に設置した複数の平行な電極列をそれぞれ測線とし、漏水位置をとり測線に平行にX軸をとり、X軸と直交するようにY軸をとる。印加電極周辺のX方向電位差測定電極とY方向電位差測定電極を用いて、測線沿いに

印加電極を順次切り替えて電位差を測定する。印加電極周辺の電位差測定電極の番号を図-5のように時計方向に1~4とし、印加電極から各電位差測定電極間の距離を r とする。ところで、点電源が複数存在する条件下における任意点の電位は、それぞれの電源の影響を重ね合わせることにより得られる¹⁵⁾。したがって、Y方向電位差測定電極1と3における電位 V_1 と V_3 の差分 $\Delta V_{1,3}$ およびX方向電位差測定電極2と4における電位 V_2 と V_4 の差分 $\Delta V_{2,4}$ は、印加電極の座標 (x, y) を用いてそれぞれ式(2)と式(3)に示すとおりとなる。なお電位差は、線電極側が高電位として差動回路で測定すると、2つの電位差測定電極のうちどちらがどれだけ高いか簡単に知ることができる。

$$\begin{aligned} \Delta V_{1,3} &= V_1 - V_3 \\ &= \frac{\rho I_2}{2\pi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{x^2 + (y+r)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + (y-r)^2}} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_{2,4} &= V_2 - V_4 \\ &= \frac{\rho I_2}{2\pi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{(x+r)^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-r)^2 + y^2}} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、式(2)と式(3)に示される漏水部に流れる電流 (I_2) は、測定のために処分場内の印加電極の設置位置が異なるため、漏水に近ければ大きく、漏

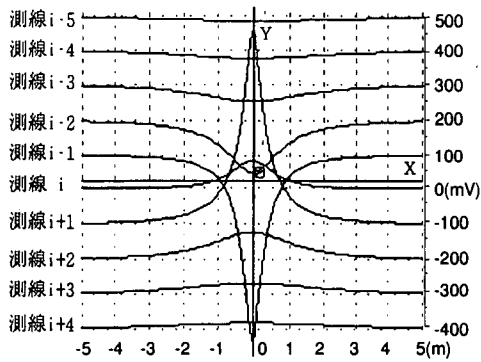


図-6 $\Delta V_{1,3}$ の特性

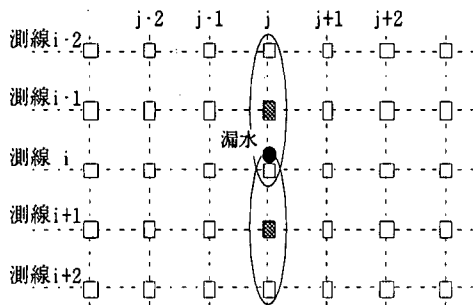


図-8 $\Delta V_{1,3}$ に極大値が生ずる条件

水に遠ければ小さくなる。したがって、実際と少し異なるが、漏水部に流れる電流 (I_2) を一定値 10mA と仮定し、その他の条件すなわち地盤の比抵抗 (ρ) を $100 \Omega m$ 、各々の点電極間距離 (r) と測線間隔を $1 m$ とし、漏水と測線までの最短距離が $25 cm$ の場合について各測線上に $10 cm$ 間隔に電極があるとして電位差 $\Delta V_{1,3}$ と $\Delta V_{2,4}$ を測線沿いに計算すると図-6 と図-9 に示すとおりとなる。これらの図の右側のスケールは、測線 i の計算結果について示している。また、それぞれの測線についての計算結果は、点線で示したそれぞれの測線に沿って示している。

a) 電位差 $\Delta V_{1,3}$ の特性

図-6 から、各測線から漏水までの距離が最も短い位置すなわち印加電極が Y 軸上にある場合に電位差 $\Delta V_{1,3}$ が極大値を示すことと、X 軸を境として各測線の電位差 $\Delta V_{1,3}$ の符号が正負逆転することがわかる。ところで、漏水から生ずる電界は、式 (1) からわかるように漏水を中心として同心円状に広がり、電界の強さは漏水からの距離に反比例し、模式的に図-7 に示すようになる。この図-7 から、Y 軸方向の各電極列の電位の変化は、Y 軸において最も大

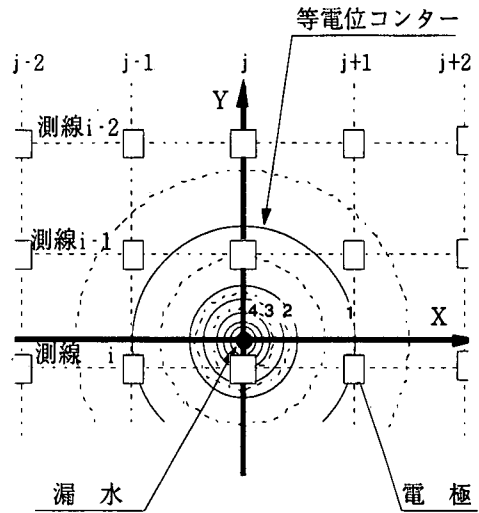


図-7 等電位コンターと測定電極

きいため、電位差 $\Delta V_{1,3}$ も大きくなるのがわかる。したがって、図-8 の漏水と測線の位置関係においては、2 つの楕円で囲んだ組電極のうち測線 $i+1$ の電極 j を印加電極として測定した電位差 $\Delta V_{1,3}$ が絶対値として最も大きくなり、測線 $i-1$ の電極 j を印加電極として測定した電位差 $\Delta V_{1,3}$ が絶対値として 2 番目に大きくなる。一方、測線 i の電極 j を印加電極として測定した場合、電位が最も高い漏水から $75 cm$ 離れた測線 $i-1$ の電極 j と $125 cm$ 離れた測線 $i+1$ の電極 j の電位は、測線 $i+1$ の電極 j を印加電極とした場合と比較してそれほど大きな電位差は生じない。ここで、任意の測線 m における任意の電極 n を印加電極として測定される電位差 $\Delta V_{1,3}$ は、測線 $m-1$ の電極 n の電位から測線 $m+1$ の電極 n の電位を差し引いたものである。したがって、測線 $m-1$ の電極 n の電位が測線 $m+1$ の電極 n の電位より低ければ負となり、高ければ正となる。すなわち、図-7 の電位状態であれば、測線 $i-1$ において電位差 $\Delta V_{1,3}$ は負となり、測線 i においては電位差 $\Delta V_{1,3}$ は正となり、それらの測線にはさまれた部分に漏水が存在することがわかる。測線 m 上に漏水がある場合には、電位差 $\Delta V_{1,3}$ は完全に 0 となり、測線 $m-1$ で負の値、測線 $m+1$ で正の値をとる。ここで、電位差のデータの解釈において、測定された最大の極大値は、その近傍に漏水が存在していることを示しているだけで、漏水の位置を示しているわけではないことに注意する必要がある。

したがって、電位差 $\Delta V_{1,3}$ の特性は、以下のよう

- 1) 各測線上において電位差測定電極と漏水が最も近接した条件で電位差 $\Delta V_{1,3}$ は極大値を示す。

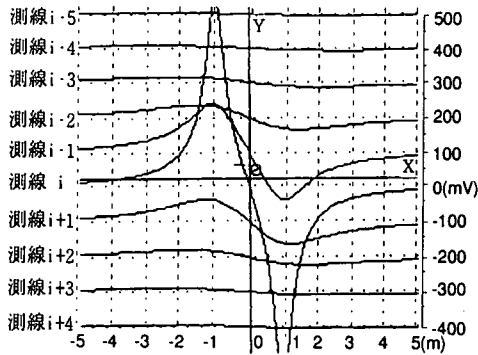


図-9 $\Delta V_{2,4}$ の特性

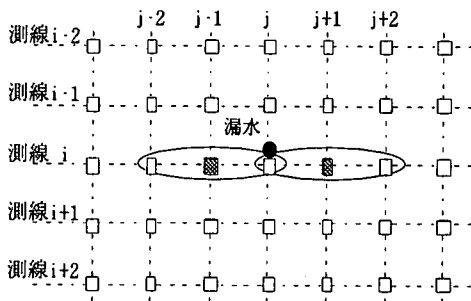


図-10 $\Delta V_{2,4}$ に極大値が生ずる条件

- 2) 電位差測定電極が漏水から最も近い位置にある場合、漏水位置を示す極大値の絶対値が最大となる。また、漏水が完全に測線上にある場合、測線上のどこでも電位差 $\Delta V_{1,3}$ の値は0となる。
- 3) 電位差 $\Delta V_{1,3}$ の正負の符号によって漏水の測線に対する位置関係が判断できる。

b) 電位差 $\Delta V_{2,4}$ の特性

図-9から、電位差 $\Delta V_{2,4}$ は各測線において印加電極が漏水に最も近い位置すなわちY軸上で0となり、これを境にして $\Delta V_{2,4}$ の正負の符号が逆転することがわかる。また、各測線の $X = \pm 1$ m の位置、すなわち電位差測定電極の片方が漏水位置に最も近い場合に、電位差 $\Delta V_{2,4}$ が極大値を示すことがわかる。これは、図-7の等電位コンターからわかるように、各測線の最高電位はY軸上であり、その周辺の電位はそれよりも低い値となっているためである。前述のように、電位差 $\Delta V_{2,4}$ は印加電極の右側の電極の電位から左側の電極の電位を差し引くことにより得られるから、印加電極がY軸の位置になるまで測定値は正となり、これを境とし測定値は負に逆転

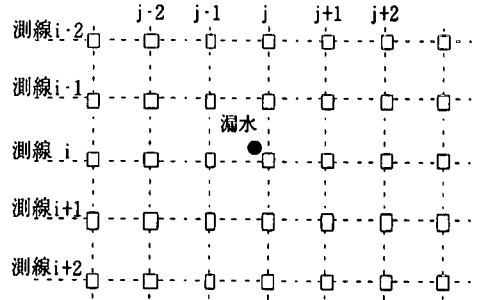


図-11 測定電極と漏水の一般的な位置関係

する。また、図-7のように各測線の電極 j を印加電極とし、電極 $j-1$ と電極 $j+1$ を電位差測定電極として測定すると、それぞれの電位は同一となるため電位差 $\Delta V_{2,4}$ は0となる。一方、各測線において絶対値が最も大きくなるのは、図-10に示すように2つの楕円で囲んだ組電極を用いて測定した場合である。図-10の漏水位置の左側の楕円で囲んだ組電極を使用した場合、電位の高い漏水寄りの電位から漏水から離れた位置の低い電位を差し引くこととなるため正の極大値をとり、右側の楕円で囲んだ組電極を使用する場合、逆に負の極大値をとる。このように測定データのうち正の極大値と負の極大値には含まれた電位差 $\Delta V_{2,4}$ が0となる部分に漏水が存在することがわかる。

したがって、式(3)に示す電位差 $\Delta V_{2,4}$ の特性は、以下のようにまとめることができる。

- 1) 各測線において、印加電極が漏水に最も近い位置で電位差 $\Delta V_{2,4}$ は0となり、これを境にして正から負に符号が逆転する。
- 2) 測線が漏水に近い条件において、電位差測定電極のうちどちらかが漏水の近傍にある場合、電位差 $\Delta V_{2,4}$ は正もしくは負の明瞭な2つの極大値を示す。

ここで、電位差 $\Delta V_{2,4}$ の正負極大値はこの近傍における漏水の存在を示しているだけで、漏水は正負の極大値には含まれた電位差 $\Delta V_{2,4}$ が0の位置であることに注意すべきである。

ところで、漏水と測線の位置関係は、図-11に示すようにX軸Y軸とズレがあったり、点電極の間隔も開いているのが普通である。このような場合、電位差 $\Delta V_{1,3}$ と電位差 $\Delta V_{2,4}$ はそれぞれの測線について、測定データの極大値の正負の変化や極大値の絶対値の大きさを相互に比較するだけでなく、相隣り合う測定点の測定結果を直線もしくは曲線で内挿することにより漏水位置を特定する。

また、相隣り合う測線の同じ順番の電極について

電位差 $\Delta V_{1,3}$ の測定結果を Y 軸方向にみると、設定した測線に対して直交方向に新たに測線を設定して電位差 $\Delta V_{2,4}$ を測定したのと同じと解釈できる。同様に電位差 $\Delta V_{2,4}$ を各測線の同一順番の電極について Y 軸方向にみると、測線に対して直交方向に新たに測線を設定して電位差 $\Delta V_{1,3}$ を測定したのと同じと解釈できる。電位差 $\Delta V_{1,3}$ と電位差 $\Delta V_{2,4}$ を測線に直交方向にみる場合の測定結果の評価方法は、それぞれ通常の測線についての電位差 $\Delta V_{2,4}$ と電位差 $\Delta V_{1,3}$ の評価方法と全く同じである。

以上に示した式 (2) と式 (3) の漏水周辺における特性を踏まえることにより、漏水位置を把握することが可能となる。

(2) 位相検波

電位差測定において自然電位や電磁波の影響で発生する高調波ノイズが測定精度を低下させる。これらの不必要なノイズを除去するために採用した位相検波回路について述べる。

ここで、被検波信号である電位差 $V(t)$ は自然電位などによるノイズ $f(t)$ と信号の振幅 A 、時間 t および角周波数 ω を用いて式 (4) で示すことができる。

$$V(t) = A \sin \omega t + f(t) \quad (4)$$

ここで、印加電圧と同周期かつ振幅が 1 の矩形波は、フーリエ級数展開により式 (5) で示される¹⁶⁾。

$$S(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{(2i-1)\pi} \sin((2i-1)\omega t) \quad (5)$$

式 (4) と式 (5) の積を $V_0(t)$ とすると、式 (6) に示すとおりとなる。

$$V_0(t) = V(t) S(t)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{2A}{\pi} - \frac{2A \cos 2\omega t}{\pi} \\ &+ \sum_{i=2}^{\infty} \frac{4}{(2i-1)\pi} A \sin((2i-1)\omega t) \sin \omega t \\ &+ \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{(2i-1)\pi} \sin((2i-1)\omega t) f(t) \end{aligned} \quad (6)$$

式 (6) において、第 1 項は定数項であり、第 2 項～第 4 項はすべて周期関数である。この式の時間平均を算出すると、第 2 項、第 3 項ならびに自然電位による直流成分や電磁波の影響などにより発生する高

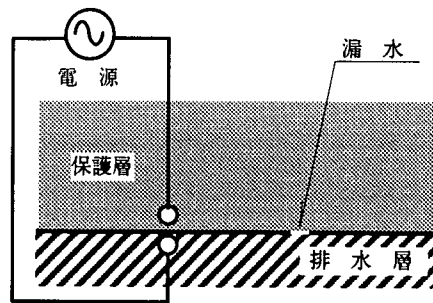


図-12 シートの漏水と電源

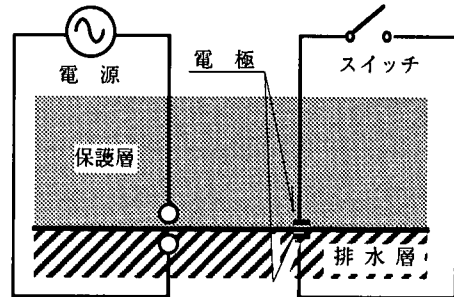


図-13 電極で生成したダミー漏水

調波を含む第 4 項がすべて周期関数であることから 0 となり、第 1 項の値のみ直流電圧として得ることができる。したがって、式 (6) の時間平均値 ($V_{0,av}$) は式 (7) に示すとおりである。

$$V_{0,av} = \frac{2A}{\pi} \quad (7)$$

この位相検波の出力に $(\pi/2)$ をかけることにより電位差の測定値中に含まれるノイズ成分を除去し、電位差の値 A を高精度に得ることができる^{17), 18)}。

(3) ダミー漏水

しゃ水シートの破損箇所や施工不良箇所は、図-12 に示すように絶縁体で遮断されたシートの上下を短絡する電氣的経路として考えることができる。すなわち、図-12 の漏水位置における電位は、シートの上下において同一である。そこで、図-13 に示すようにシートの上下に金属板の電極を設置し、この間を結ぶリード線をスイッチで切ったりつないだりすることにより、電極を設置した位置に電氣的に等価なダミー漏水を発生させることができる。また、シート上下に複数の同一面積の電極を配置し、それぞれを結ぶリード線の接続をスイッチ操作で制御することにより任意の大きさの漏水を電氣的に発生させることができる。

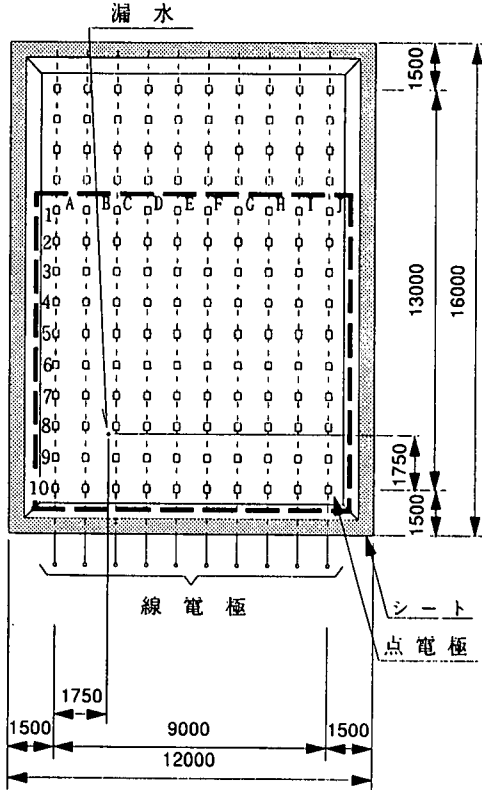


図-14 実験用土槽

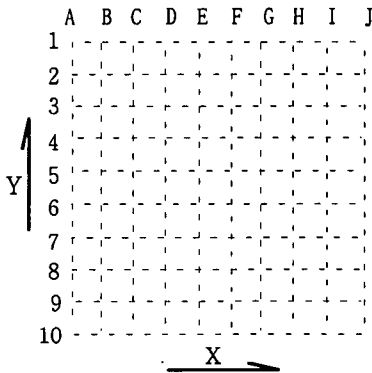


図-15 電極の配置番号

4. 実験

本実験は、筆者らが考案した測定システムの測定原理とその効果について確認することを目的として実施した。

実験に使用した土槽は図-14に示すとおりで、12 m×16 mの1 mm厚の塩化ビニル製（PVC）シートを敷設しその上に 11.2 m×15.2 m×0.3 m の形

表-1 測定器および実験材料の諸元

機材・材料	外形および寸法	諸元
測定器	220×105×220	印加電圧 5V 周波数 20Hz
測定電極 (mm)	200×250×0.5	ステンレス鋼板
アース電極 (mm)	φ 3.2mm	錫メッキ銅線
リード線	1.25sq	ビニール被覆
端子台	300×500	20端子×5列×2台
シート	1 mm厚 12m×16m	ポリ塩化ビニル製 C=1.1nF/120cm ² R=10MΩ以上/120cm ²

表-2 実験ケース

CASE	漏水 (cm ³)	備考
1	なし	
2	16	漏水位置 図-14に図示
3	8	漏水位置 図-14に図示
4	4	漏水位置 図-14に図示
5	2	漏水位置 図-14に図示
6	1	漏水位置 図-14に図示
7	なし	
8	なし	
9	16+16	漏水間隔 Y方向 1 m
10	16+16	漏水間隔 斜め方向1.4m
11	1+16	漏水間隔 Y方向 2 m
12	なし	
13	16×4ヶ	漏水位置 図-19に図示
14	なし	

状の砂（含水比7.42%）の盛土により造成した。使用したPVCシートの電気特性はLCRメータを用い、80 mm×150 mmの金属板2枚で供試体を挟み込み、100 Hzの周波数で測定した。表-1に示すように静電容量1.1nF/120 cm²、電気抵抗10MΩ以上/120 cm²の特性であった。一般廃棄物処分場に敷設されるシートには、最近までエチレンプロピレンジエンモノマー（EPDM）が主流を占め、最近では高密度ポリエチレン（HDPE）が広く使用されるようになっている。また、厚みも1.5 mm以上の製品がほとんどである。本実験において1 mm厚のPVCシートを利用した理由は、以下のとおりである。

- 1) EPDMシートのカーボン含有量は30%程度あるため、絶縁体とはいえず漏水位置検知の障害となる。
- 2) HDPEシートはPVCシートと比較して非常に硬くシート表面と地盤の間に空隙ができ、実験条件が均一とならないおそれがある。
- 3) 薄いシートは方が静電容量が大きく、交流電流の場合シートを介して流れる電流が大きくなる。す

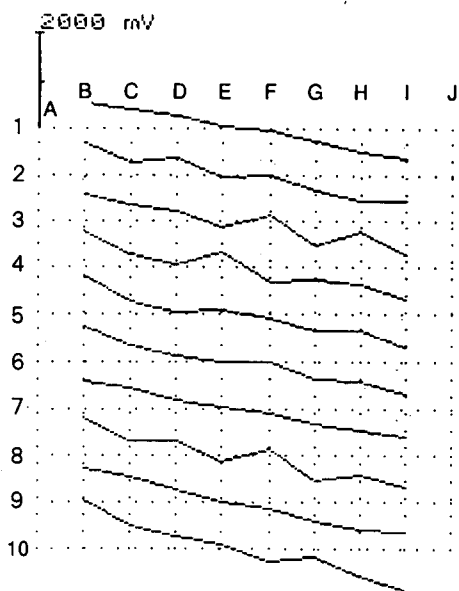


図-16 漏水がない条件の測定結果 ($\Delta V_{2,4}$)

なわち、実際の処分場よりも薄いシートを実験に利用した方が実験条件が過酷となるため、測定システムの性能を確認するためにはよい。しかし、1 mmより薄いシートを使用すると、重機を使用した実験用土槽の造成過程で破損する危険がある。土槽の造成にあたっては、シート敷設の前にシートの下側には1 m間隔に線電極（錫メッキ銅線 ϕ 3.2 mm）を設置し、シートの上側には1 m間隔に10ケ×14列＝140ケの点電極を配置した。実験においては、図-14の破線で囲んだ部分について電極10ケ×10列の測線を設定した。土槽に設置した点電極の位置および番号については、図-15に示すとおりである。本実験においては16 cm²、8 cm²、4 cm²、2 cm²、1 cm²のダミー漏水の大きさに関する測定と複数のダミー漏水についての測定した。

土槽に設置したそれぞれの点電極は、ビニール被覆のリード線で端子台に結線し、印加電極と電位差測定電極の切替は端子台で手動で行った。

なお、実験に使用した測定器および材料の諸元を表-1に、実験ケースの内訳を表-2に示す。

(1) 土槽の特性と測定誤差

測定誤差には、土槽内に設置した測定電極個々の周辺との接触抵抗のばらつきと土槽が小さく有限の大きさであることによって生ずる測定への影響の他に土槽内の水分の移動などによって生ずる経時的な誤差が考えられる。

表-3 土槽の初期状態の測定結果 (単位: mV)

		測 点									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
測 線	1	-	542	392	241	15	-66	-300	-507	-654	-
	2	-	652	248	342	-28	-20	-313	-550	-548	-
	3	-	595	361	209	-112	135	-536	-234	-700	-
	4	-	790	282	40	345	-283	-275	-346	-683	-
	5	-	826	277	45	120	-63	-350	-324	-723	-
	6	-	765	343	129	-7	-6	-362	-408	-702	-
	7	-	573	424	182	21	-90	-317	-482	-576	-
	8	-	786	329	328	-123	126	-543	-407	-673	-
	9	-	745	523	262	-8	-126	-386	-568	-616	-
	10	-	1038	485	260	104	-265	-191	-572	-906	-

a) 電極と土槽の大きさによる誤差

漏水がない条件における測定結果を図-16と表-3に示す。このグラフは、各測線に沿って電位差 $\Delta V_{2,4}$ の値を直線で結んだものである。電位差 $\Delta V_{2,4}$ は、測定原理にしたがえば測線に沿ってほとんど測定値が0となると考えられるが、実験結果では実験土槽の中央部分において0となっているが、左端に寄るにしたがって正の値をとり、右端に寄るにしたがって負の値をとることがわかる。すなわち、土槽の端部側に電流が広がることのできないため、電位勾配が大きくなっていると考えられる。また、各測線の端部から同じ距離にある各測定点の値同士を比較すると値にばらつきがあることがわかる。したがって、この実験土槽での測定は、①土槽の大きさ、②各電極の接触抵抗のばらつき、の影響を受けていると考えられる。

そこで、今回の実験に使用した電極を使用して、砂と電極間の接触抵抗について室内実験を行った。実験には定電流交流電源を使用し、砂を入れた40 lのポリバケツに2枚の電極を一定間隔を保持して挿入し、砂の条件を種々変えて抵抗測定を実施した。

ところで、筆者らの調査では平地にある2つの管理型一般廃棄物処分場の浸出水の電気伝導度は約3 mS/cmであった。そこで、実験条件を、①含水比6.6%の砂、②砂に水道水を添加、③②の条件に食塩を添加し電気伝導度3 mS/cm以下、④さらに食塩を添加して電気伝導度3 mS/cm以上の4種で、電極間隔は23 cmに設定した。水溶液の電気伝導度は、抵抗測定前後に電気伝導度計を使用して測定した。

表-4に示すように、砂だけの場合、電極間の電気抵抗は、水道水を添加した条件の場合と比較して約10倍大きく、ばらつきも大きいことがわかる。水道水を添加した場合、電極間抵抗は小さくなるが、ばらつきは砂の締め具合によって変わっていることがわかる。一方、食塩を添加して電気伝導度が1.735 mS/cmの場合、砂の締め具合による電極間抵抗のばらつきが小さくなり、電気伝導度4.74 mS/cm

表-4 電極周辺の条件の違いによる抵抗の変化

実験条件	電気伝導度 (mS/cm)	電極間抵抗 (Ω)	備 考
砂	—	3.91	
含水比 6.6%	—	3.29	
	—	2.41	締まった砂
砂+水道水	0.232	0.333	
		0.301	締まった砂
砂+水道水		0.053	
+食塩 (1)	1.735	0.052	
		0.053	締まった砂
砂+水道水		0.020	
+食塩 (2)	4.74	0.020	
		0.020	締まった砂

の場合、砂の締まり具合による電極間抵抗のばらつきが生じないことがわかる。前述の平地にある2つの管理型一般廃棄物処分場について調査では、降雨の少ない季節においても排水管から離れた保護砂の下のシート面上には水深約2cmの浸出水が存在していた。すなわち、実際の処分場における電極抵抗は、実験用土槽の電極抵抗と比較して、浸出水の電気伝導度が高いことや実際の処分場の方が廃棄物の重量が長時間かかっているために接触状態が良いため非常に小さく、ばらつきも小さいと考えられる。

しかしながら、本実験の模型が半無限の条件を満たしていないことや点電極ごとの電氣的に不均一の条件では、測定原理の検証にならないので、各実験パラメータについての測定結果から無損傷の状態の測定結果を差し引き、これらの影響を除外して評価する。

b) 水分移動などにもなる誤差

表-5に、同一測定日の最初と最後に測定した漏水を設置しない条件における測定結果CASE1とCASE7の差を示す。表からわかるとおり、測定された電位差 $\Delta V_{2,4}$ は、表中のA側に大きく、J側に小さいことがわかる。これは、土槽内の砂の水分が変化して抵抗もそれにつれて変化したため、印加電極から生ずる電界の広がり方が変化し、それぞれの電位差測定電極に電位差として生じたものと考えられる。測定器自身の持つ特性を固定抵抗を接続して確認したところ、測定値は全く変動せず安定した特性であった。したがって、測定結果から今回の実験における測定誤差は、同一日においては最大28mV程度生じており、測定データを相互に比較する場合には土槽の外周に近い部分に誤差が生じていると考えられる。しかし、この誤差は測定開始から終了までの約8時間で発生したものであり、各ケースの測定結果の評

表-5 同一測定日における測定値の差 ($\Delta V_{2,4}$)

		測 点									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
測	1	-	22	14	8	4	2	-11	-14	-16	-
	2	-	22	3	18	2	3	-11	-22	-8	-
	3	-	16	21	9	-2	2	-12	-4	-15	-
	4	-	20	7	0	12	-8	-2	-5	-13	-
	5	-	22	8	2	0	7	-2	-7	-23	-
線	6	-	25	13	11	-13	10	-14	-4	-22	-
	7	-	10	14	15	1	0	-7	-16	-16	-
	8	-	26	9	20	-11	14	-20	-2	-18	-
	9	-	25	13	12	7	-6	-6	-8	-16	-
	10	-	28	13	4	4	5	-1	-12	-19	-

(単位: mV)

価するにあたって影響は無視しうると考えられる。

5. 測定原理の検証

1 cm²~16 cm²の漏水のうち1 cm², 4 cm², 16 cm²について、電位差 $\Delta V_{1,3}$ および $\Delta V_{2,4}$ の測定結果を表-6~表-11に示す。

漏水の位置は、図-14に示したように図-15の電極配置番号で8Cの近傍である。16 cm²の漏水について電位差 $\Delta V_{2,4}$ の測定結果を示した表-6の中で、 \square で囲んだ部分を見ると、8Bで正の極大値600mV、8Dで負の極大値-932mVを示してしており、8Bと8Cの間で測定値の正負が逆転している。3.において述べたように、正および負の極大値の周辺に漏水が存在し、この8の測線の正負の極大値の間にある電位差 $\Delta V_{2,4}$ が0となる部分近傍が最も可能性が高い。一方表-7に示した電位差 $\Delta V_{1,3}$ の測定結果では、表中に \square で囲んだように、7Cで負の最大の極大値-1078mVを示し、9Cで正の最大の極大値741mVを示していることがわかる。したがって、表-6と同様にこの周辺に漏水が存在することがわかる。表-7中の \square で囲んだそれぞれの測線の極大値の符号をみると、測線7と測線8はそれぞれ測線9側に漏水の存在を示す負の値となっているのに対し、測線9では測線8側に漏水の存在を示す正の値となっている。したがって、表-6と表-7から漏水は8Bと8Cの間かつ8Cと9Cの間に存在することがわかる。この位置は、図-14の漏水位置に相当することがわかる。漏水の大きさが4 cm²から1 cm²となっても、それぞれの表中に \square で囲んだ部分で、絶対値として最大となっている極大値が集中していること、電位差 $\Delta V_{2,4}$ が測線8のBとCの間で符号が逆転していること、電位差 $\Delta V_{1,3}$ で測線8と9で測定値の正負が逆転していることから漏水の存在を捉えていると考えられ、3.で述べた原理どおりに漏水

表-6 16cm³の漏水の場合の測定結果 ($\Delta V_{2,4}$)

		測 点									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
測	1	-	-61	-48	-39	-23	-17	20	47	56	-
	2	-	-60	-37	-62	-32	-26	17	47	38	-
	3	-	-48	-61	-63	-41	-42	15	-2	51	-
	4	-	-53	-69	-73	-102	-47	-29	-4	41	-
	5	-	-22	-77	-114	-132	-119	-53	-18	41	-
	6	-	-43	-97	-255	-229	-190	-81	-37	28	-
	7	-	158	-185	-432	-351	-218	-121	-38	-2	-
線	8	-	600	-472	-932	-503	-293	-143	-76	-9	-
	9	-	408	-251	-681	-471	-302	-176	-82	-22	-
	10	-	91	-152	-312	-346	-259	-149	-68	-6	-

(単位: mV)

表-8 4 cm³の漏水の場合の測定結果 ($\Delta V_{2,4}$)

		測 点									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
測	1	-	-55	-38	-30	-15	-15	22	39	48	-
	2	-	-51	-25	-46	-20	-23	20	42	33	-
	3	-	-43	-47	-47	-26	-40	20	-4	44	-
	4	-	-50	-49	-50	-85	-30	-23	-1	33	-
	5	-	-26	-59	-80	-100	-89	-41	-8	36	-
	6	-	-25	-75	-189	-172	-140	-51	-28	223	-
	7	-	106	-141	-40	-259	-164	-92	-23	5	-
線	8	-	542	-350	-683	-362	-229	-94	-58	3	-
	9	-	290	-193	-499	-342	-227	-116	-62	-7	-
	10	-	58	-122	-234	-256	-197	-105	-48	3	-

(単位: mV)

表-10 1 cm³の漏水の場合の測定結果 ($\Delta V_{2,4}$)

		測 点									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
測	1	-	-37	-24	-17	-7	-8	18	29	30	-
	2	-	-38	-18	-28	-8	-15	20	23	20	-
	3	-	-28	-32	-21	-7	-27	19	-7	30	-
	4	-	-34	-28	-21	-55	-9	-11	3	20	-
	5	-	-17	-33	-42	-60	-49	-19	-4	24	-
	6	-	-11	-44	-102	-100	-85	-20	-18	21	-
	7	-	-58	-81	-188	-148	-91	-44	-9	5	-
線	8	-	302	-197	-389	-200	-137	-41	-30	5	-
	9	-	153	-104	-282	-196	-134	-61	-30	0	-
	10	-	22	-73	-131	-141	-114	-54	-23	15	-

(単位: mV)

表-7 16cm³の漏水の場合の測定結果 ($\Delta V_{1,3}$)

		測 点										
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
測	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	-	-11	-49	-52	-35	-8	22	15	23	22	15
	3	-	-95	-117	-115	-97	-70	-39	-31	-4	2	21
	4	-	-169	-201	-210	-195	-144	-92	-44	-52	-27	-29
	5	-	-253	-310	-337	-275	-192	-110	-67	-39	-33	-18
	6	-	-318	-423	-499	-357	-231	-128	-84	-60	-51	-39
	7	-	-405	-741	-1078	-524	-245	-132	-69	-64	-45	-38
線	8	-	-162	-266	-503	-215	-138	-95	-79	-59	-65	-53
	9	-	81	366	741	137	-15	-24	-57	-64	-50	-47
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(単位: mV)

表-9 4 cm³の漏水の場合の測定結果 ($\Delta V_{1,3}$)

		測 点										
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
測	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	-	-2	-32	-34	-23	-3	22	14	23	18	13
	3	-	-73	-89	-82	-75	-56	-33	-28	-7	2	19
	4	-	-129	-153	-158	-139	-111	-74	-33	-40	-21	-21
	5	-	-190	-228	-247	-208	-146	-74	-51	-26	-28	-17
	6	-	-237	-315	-378	-268	-180	-102	-68	-46	-41	-31
	7	-	-300	-543	-772	-374	-175	-82	-45	-51	-34	-28
線	8	-	-123	-197	-355	-165	-112	-75	-58	-44	-55	-45
	9	-	47	265	512	95	-10	-18	-45	-63	-43	-46
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(単位: mV)

表-11 1 cm³の漏水の場合の測定結果 ($\Delta V_{1,3}$)

		測 点										
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
測	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	-	9	-17	-18	-9	2	18	12	15	12	8
	3	-	-38	-48	-46	-37	-30	-18	-17	-4	4	13
	4	-	-77	-86	-89	-81	-56	-51	-21	-30	-11	-9
	5	-	-110	-132	-139	-116	-88	-34	-25	-10	-18	-10
	6	-	-135	-182	-223	-161	-103	-66	-40	-25	-26	-16
	7	-	-169	-309	-442	-212	-94	-27	-19	-32	-17	-14
線	8	-	-74	-107	-189	-95	-72	-49	-28	-22	-34	-33
	9	-	22	149	281	55	-8	-5	-22	-46	-30	-32
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(単位: mV)

位置周辺で生ずる電位異常を本測定システムはとらえていると考えられる。

6. 漏水が1箇所の場合の測定精度

(1) 位置的精度

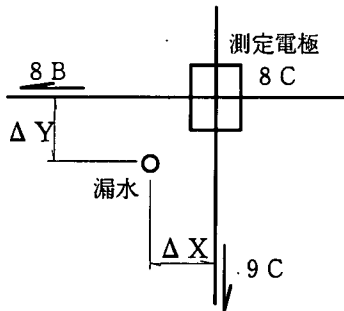
電位差 $\Delta V_{2,4}$ は、漏水位置に最も近い点電極を電位差測定電極として使用した場合に正負の極大値が測定される。この正負の極大値の間にある電位差

が0となる位置が漏水の位置となる。本実験のように電極間隔が1 mの場合には、正負それぞれの極大値とその間の測定値を直線補間し、電位差 $\Delta V_{2,4}$ が0となる位置を計算することによりX方向の漏水位置を推定することができる。また、電位差 $\Delta V_{1,3}$ も同一の電極番号について測線2から測線9方向を見ると、電位差 $\Delta V_{2,4}$ と同じように漏水の近傍で正負の極大値を示し、正負極大値の中間付近で0となる場所が漏水の存在位置である。したがって、電位差 $\Delta V_{2,4}$ の正負極大値とその中間の測定値を直線補

表-12 測定値による漏水の推定位置

漏水のサイズ	ΔX (cm)	ΔY (cm)
16cm ²	44	40
8cm ²	42	41
4 cm ²	39	41
2cm ²	38	40
1 cm ²	40	40
平均	40.6	40.4
設置位置	25	25
差	15.6	15.4

(凡 例)



間し、Y方向の漏水位置を推定することができる。以上の方法により漏水位置をX-Y座標として推定することができる。この計算方法による漏水の推定位置と実際の漏水位置を比較すると表-12に示すようになる。この表から、漏水の大きさによらず設置位置に対する誤差はほぼ一定で約15cmであることがわかる。

(2) 電極間隔の影響

本実験は、電極間隔と測線間隔を1mとして実施したが、ここで電極間隔の影響について検討する。電極間隔を拡げることによる測定への影響について考えると、電位差測定電極から漏水が離れているため位置的精度が低下するデメリットがあるが、測定電位差が大きくなるメリットもある。すなわち、2本の電位差測定電極のうち1本の電極から漏水までの距離が同じ条件で、電極間隔が1mで有意な電位差を識別できれば、それよりも電極間隔が広い場合測定される電位差が大きくなり漏水を確認しやすくなると考えられる。ここで、4.において示したように、本実験に使用した土槽では28mV程度の誤差が発生すると考えられるため、電位差が5割増以上の50mVあれば測定誤差があっても漏水を確認できると考えられる。表-7において、2Cを印加電極として測定した電位差が52mVとなっている。この測定において、漏水寄りの電位差測定電極は3Cであるから、漏水から約5.25m離れている。したがって、

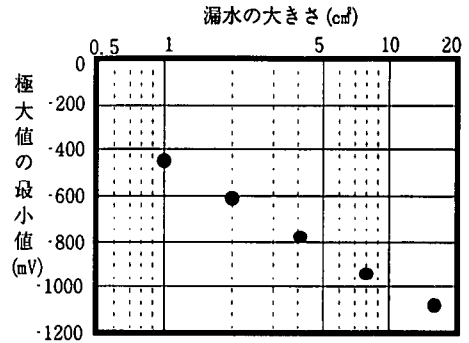


図-17 漏水の大きさと電位差の関係

漏水から5.25mの位置に電位差測定電極を設置すれば十分漏水位置を検知できると考えられる。ところで、漏水から生ずる電界は同心円状に広がっているから、漏水をはさんでこの電位差測定電極の反対側に電極を設置すれば、漏水に対して同一の電位測定条件となる。すなわち、5.25m×2=10.50mの電極間隔であれば、16cm²の漏水を十分に検知しうると考えられる。一方、1cm²の漏水の場合について考えてみると、表-11より50mV以上の電位差が測定されているのは4Cを印加電極とした場合の-89mVであるから、電位差測定電極から漏水までの距離4.25mの2倍の電極間隔8.5mであれば、1cm²の漏水を十分に検知し得ると考えられる。

7. 漏水の大きさ

ここで表-7、表-9、表-11において絶対値として最大の電位差 $\Delta V_{1,3}$ が測定された7Cに注目すると、16cm²の漏水の場合-1078mV、4cm²の漏水の場合-772mV、1cm²の漏水の場合-442mVとなっており、漏水の面積が大きいほど測定される電位差が大きくなる。ここで、処分場内の比抵抗 ρ を一定とすると、式(2)からわかるように電位差 $\Delta V_{1,3}$ は漏水と電極との位置関係と漏水部に流れる電流 I_2 に支配されている。電流は、本測定システムの場合測定面の裏面側が同一電位になるよう線電極が設置されているため、ほぼ漏水の面積に応じて決まると考えられる。16cm²の漏水、4cm²の漏水、1cm²の漏水の条件で測定された最大電位差の他に、8cm²の漏水の場合と2cm²の漏水の場合に測定されたそれぞれの最大の電位差-941mVと-611mVを用いて漏水の大きさと最大の測定電位差の関係は図-17に示すとおりとなる。このグラフは、縦軸に電位差をとり、横軸に漏水の大きさを対数でプロットしたものである。こ

表-13 2ヶの漏水に関する測定結果 ($\Delta V_{2,4}$)

		測 点									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
測 線	1	-	-70	-36	-25	-38	-33	23	30	57	-
	2	-	-37	-3	-39	-25	-74	11	18	33	-
	3	-	17	15	27	-38	-108	-41	-70	28	-
	4	-	48	136	164	-34	-230	-214	-115	17	-
	5	-	175	350	642	91	-849	-438	-163	-20	-
	6	-	218	817	547	-647	-646	-347	-162	-34	-
	7	-	208	473	506	-403	-364	-271	-113	-39	-
	8	-	96	108	13	-104	-229	-112	-99	-12	-
	9	-	25	25	-41	-97	-131	-73	-60	-2	-
	10	-	-18	-20	-34	-75	-70	-59	-29	22	-

(単位：mV)

のグラフから、漏水の近傍で測定される最大の電位差は、漏水の面積の対数に比例することがわかる。漏水近傍の極大値の大きさは、シートがしゃ水機能を喪失している部分の面積だけではなく、電位差測定電極までの距離によって決定される。漏水と電位差測定電極までの距離については、本測定システムでは点電極を等間隔に設置するため、漏水と電位差測定電極の間隔が大きく異なることはないと考えられる。したがって、本実験のように、複数の金属板で構成された電極を処分場の要所要所に設置しておけば、漏水の大きさについて推定することが可能と考えられる。

ところで、しゃ水機能が損なわれた部分の補修の緊急性は、しゃ水機能が失われた部分の大きさだけでなく、その部分の浸出水の有無によって左右される。本測定システムのように電氣的に漏水位置を検知する方法では、しゃ水機能が損なわれた部分の大きさだけでなく、漏水の周辺条件も重要な要因である。すなわち、シートのしゃ水機能が損なわれた部分の標高が低く、常時浸出水が存在する場合には、損傷が小規模であっても周辺環境への影響は非常に大きなものとなるし、標高が高い場所であっても排水路に相当する場所では、降雨時には浸出水が周辺環境へ流出すると考えられる。したがって、漏水位置検知システムを導入するにあたっては、処分場各部分についてシートの補修の緊急性に応じてあらかじめ補修計画を立案しておくことが重要と考えられる。

8. 複数の漏水の位置

(1) 2箇所の漏水

図-18に示すように、5 Eと6 Dの電極に隣接する位置に漏水がある場合の測定結果を表-13と表-14に示す。それぞれの漏水の点電極からの距離は

表-14 2ヶの漏水に関する測定結果 ($\Delta V_{1,3}$)

		測 点										
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
測 線	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	-	-4	-78	-114	-126	-120	-85	-51	-25	-8	-6
	3	-	102	-143	-204	-299	-341	-278	-163	-72	-30	-5
	4	-	-111	-175	-296	-494	-866	-453	-136	-87	-59	-37
	5	-	-106	-140	-272	-769	-650	-243	-122	-46	-35	-25
	6	-	-58	-68	-68	-150	521	192	28	-24	-37	-31
	7	-	13	39	202	863	624	284	83	20	0	-19
	8	-	10	77	213	439	347	587	73	7	-35	-35
	9	-	-10	56	122	156	172	112	22	28	-33	-38
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(単位：mV)

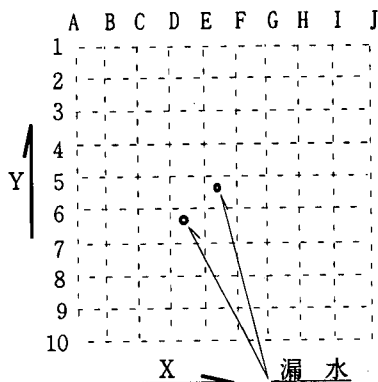


図-18 漏水位置

X方向およびY方向にそれぞれ25 cmで、サイズは両方とも16 cm²である。

表-13の実線の枠で囲んだ部分とその周辺に注目すると、電位差 $\Delta V_{2,4}$ の正および負の絶対値の大きな測定値が集中しており、枠内に漏水が存在していることがわかる。また、測線5についてみると、電位差 $\Delta V_{2,4}$ は5 Dで正の極大値をとり5 Fで負の極大値を示しており、さらに5 Eと5 Fの間で正負の符号が逆転しており、この間に漏水が存在していると判断できる。測線6についてみると、電位差 $\Delta V_{2,4}$ は6 Cで正の極大値をとり6 Eで負の極大値を示しており、さらに6 Dと6 Eの間で正負の変化が生じており、この間に漏水が存在していると判断できる。同様に表-14の電位差 $\Delta V_{1,3}$ についてみると、表中の実線枠で囲んだ部分に絶対値が大きい測定値が集中していることから、枠内に漏水が存在していることがわかる。表-14の各測線についてみると、測線4と5において全て電位差 $\Delta V_{1,3}$ が負になっており、漏水は測線5よりも測線6側にあり、漏水が存在すると考えられる実線枠の周辺の測線7と測線8では測定値が正となっていることから測線7よりも測線6側に漏水が存在することがわかる。次に測線6について詳細にみると、6 Eで電位差 $\Delta V_{1,3}$ が

表-15 2ヶ以上の漏水に関するの測定結果 ($\Delta V_{2,4}$)

		測 点									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
測 線	1	-509	155	-706	-470	255	-144	-54	1	-	-
	2	-146	42	-360	-406	248	-152	-63	-13	-	-
	3	-115	-14	-203	-294	260	-186	-100	-17	-	-
	4	-224	53	-156	-256	406	-288	-137	-42	-	-
	5	549	328	-224	-167	-969	493	-187	-59	-	-
	6	-509	252	-296	-479	-614	-415	-185	-55	-	-
	7	762	376	-894	-649	-442	299	-155	-53	-	-
	8	-365	81	-373	-459	-327	232	-112	-37	-	-
	9	-133	0	-217	-301	-271	-191	-92	-34	-	-
	10	-55	-45	-141	-209	-197	-137	-72	-15	-	-

(単位: mV)

正の極大値になっていることから6 Eと5 Eの間に漏水が存在することがわかる。測線7についてみると、7 Dにおいて正の極大値を示しており、測線6 Dの電位差 $\Delta V_{1,3}$ が負となっていることから、6 Dと7 Dの間に別の漏水が存在することがわかる。以上の結果を判断することにより、電極5 E, 5 F, 6 Eで囲まれた部分と電極6 D, 6 E, 7 Dに囲まれた部分に漏水が存在することがわかる。

したがって、図-18に示すように4ヶの電極に囲まれた別々のゾーンに漏水が存在する場合には確実に漏水の存在を把握することができると考えられる。しかしながら、同一のゾーン内に複数の漏水がある場合には、測定に利用できる電位差測定電極が共通であるため情報量に限界があり、それぞれの漏水の存在を分離して把握することは非常に困難と考えられる。

(2) 2箇所以上の漏水

図-19のように4ヶの漏水を設置した場合の測定結果を表-15と表-16に示す。表-15の電位差 $\Delta V_{2,4}$ をみると、表中の実線の枠で示すように正負の絶対値が大きい箇所が複数確認でき、これらの枠内に漏水が複数存在すると考えられる。測線1についてみると、1 Bと1 Dに正負の極大値が確認でき、1 Cと1 Dの間で正負が逆転していることから、この間に漏水が存在すると考えられる。また、測線5, 6, 7, 8についてみると、電位差 $\Delta V_{2,4}$ の明確な正負極大値が5 B, 5 F, 7 B, 7 Dにみられ、測線5と測線7に漏水が存在すると考えられる。さらに測線5に注目すると、5 Bの正の極大値と5 Fの負の極大値が明瞭であるが、この間隔が広いことから測線5の近傍に複数の漏水が存在すると判断される。正および負の極大値が測定される条件は、電位差測定電極の片方が漏水に最も近い場合であるから、5 Cと5 Eの周辺に漏水が存在すると判断できる。測線7についてみると正の極大値7 Bと負の極大値

表-16 2ヶ以上の漏水に関するの測定結果 ($\Delta V_{1,3}$)

		測 点									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
測 線	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-64	7	436	123	-67	-65	-34	20	4	1
	3	-112	-111	-62	-134	-256	-189	-105	-56	-27	2
	4	-155	-245	-735	-548	-780	-385	-152	-79	-48	-52
	5	-151	-265	-538	-432	-452	246	-99	-53	-50	-31
	6	-80	-129	-70	25	627	232	-8	-33	-43	-44
	7	-26	10	87	104	282	138	32	-23	-37	-37
	8	166	376	675	523	277	115	21	-26	-39	-46
	9	145	262	431	339	180	107	8	20	-40	-46
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(単位: mV)

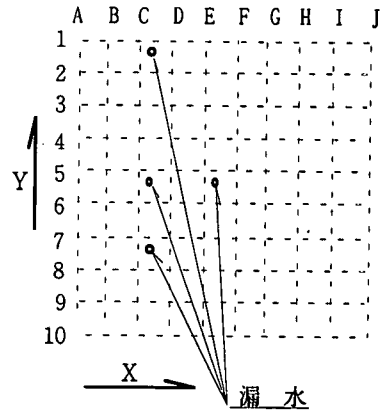


図-19 漏水位置

7 Dの間すなわち7 Cと7 Dの間で正負逆転していることから、この部分に漏水が存在すると判断できる。次に、電位差 $\Delta V_{1,3}$ を示した表-16中の実線枠で囲んだ部分に正負の絶対値が大きい箇所が複数確認でき、この範囲に漏水が存在すると考えられる。測線2の2 Cにおいて測線1側に漏水の存在を示す正の極大値が生じており1 Cと2 Cの間に漏水が存在すると判断される。測線4の4 Eと測線5の5 Eで測線6側に漏水の存在を示す負の極大値を示し、同様に測線6の6 Eにおいて測線5側に漏水の存在を示す正の極大値が生じており、5 Eと6 Eの間に漏水が存在することがわかる。4 Cから8 Cの実線枠で囲んだ部分に、4 Cと8 Cに正負の極大値がみられる。しかし、4 Cと8 Cの間隔が離れすぎていることから、この間に複数の漏水が存在していると考えられる。前述のように、電位差 $\Delta V_{1,3}$ の極大値は、電位差測定電極の片方が漏水の近くにある場合に測定されるから、5 Cと7 Cの周辺に漏水が存在すると判断できる。

以上のデータの検討により、図-19の漏水設定位置と同様に、1 C, 5 C, 7 C, 5 Eの点電極周辺に

表-17 本測定システムと電位傾度法の比較

測定方法	電位傾度法による漏水検知	差動回路で測定した電位差による漏水検知
概要	印加電極を処分場内外に設置し、この間に電圧をかけた状態で、処分場内に設けた測線上を電極間隔を一定とした電位差計を用いて電位異常を検出する。印加電極の設置位置は固定。	測定対象のシート面上に点電極を設置し、裏面側に線電極を設置し、点電極の1本と線電極間に電圧を印加し、印加電極に隣り合う電極を電位測定電極として電位差を測定する。
電源	直流電源	交流電源（発振器、増幅器使用）
印加電圧	24V～320V	5V
計測器	絶縁増幅器	差動回路、位相検波回路
印加電極	処分場内外ともに固定された点電極	シートの測定対象面：点電極（順次切替） 測定対象面の裏面側：線電極
電位測定電極	点電極（移動式）	点電極（順次切替）

漏水が存在すると考えられ、図-19に示した漏水位置と一致する。

9. 既往の研究との比較

図-20に示すように処分場内の印加電極と処分場外の遠電極間に電圧を印加し、処分場内を同一電極間隔で電位差を測定して漏水周辺の電位異常を検出する漏水位置検知方法の研究（電位傾度法）が Darilek らによりなされている^{19), 20)}。筆者らの開発した方法と電位傾度法の比較を表-17に示す。電位傾度法による漏水周辺の電位特性は、筆者らが開発した測定方法の電位差 $\Delta V_{2,4}$ の特性と同様の傾向を示す。これは、漏水位置の座標を原点とし、電位差測定電極の間隔を $2r$ 、電位差測定電極の中心の座標を (x, y) 、漏水に流れる電流を I_2 、処分場内の比抵抗を ρ を式(1)に適用すると、電位傾度法による電位差は、式(3)と完全に同じ式となるためである。したがって、測定精度面について比較すれば筆者らの方法も電位傾度法の精度も原理的にはほぼ同水準と考えられる。ここで、式(2)および式(3)をみると、処分場内の廃棄物や地盤の比抵抗 ρ は処分場固有のものであるから、測定精度を向上させるためには、漏水に流れる電流 I_2 を増大させることが重要であることがわかる。漏水に流れる電流を増大させる方法として、高電圧を印加する方法もあるが、漏水の位置における処分場内外の電位差を大きくし、より大きな電流が流れるようにする方が効果的である。このため、本測定システムでは、測定対象のシート裏面に線電極を等間隔に設置するとともに処分場内に

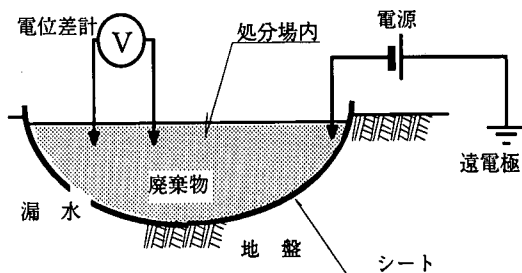


図-20 電位傾度法による漏水位置検知

設置した点電極を印加電極として使用する電極構成を採用した。このシート裏面に配置した等間隔の線電極により、漏水を通るシート表裏に設置した電極間の電気抵抗が低減されるだけでなく、処分場内に設置した各点電極を順次印加電極として使用するため、漏水の近傍の測定の場合には漏水までの電気抵抗がさらに小さくなり、漏水に流れる電流が大きくなる。また、電位傾度法は、処分場内の印加電極から離れた位置で電位差を測定する場合には漏水の影響による電位異常を明確に識別しやすいが、印加電極の周辺においては印加電極の電界の影響が測定電位差に生じ、同一の判断基準で測定結果を評価することがむずかしいと考えられる。本研究の手法では、印加電極と電位差測定電極の位置関係を同一にして順次切り替え、印加電極から広がる電界のゆがみを測定対象としているため、測定結果を同一の判断基準で評価することが可能である。本測定システムの電極に印加される電圧は、Darilekの研究と比較して非常に低いため、電極から生ずる電界の広がり是非常に部分的であり、電気的特性が複雑な処分場であっても影響を比較的受けにくいと考えられる。また、Darilekらの研究では利用されていない電位差 $\Delta V_{1,3}$ を併用して、漏水位置について多面的な判断

が下せる。特に、8. で述べたような複数の漏水が存在する条件において有利となる。

Darilek の研究では直流電源を測定に使用すると、シートを介して流れる電流がなく漏水部に電流が流れるだけとなるため有利と述べている。しかし、電位傾度法の測定を精密な行う場合には、直流電流といわれている自然電位の影響を測定値から除去するために、別途自然電位の影響について測定する必要が生ずる²¹⁾。一般に電気探査を行う場合に、完全な直流電圧を地盤に印加するよりも周期数秒～10 秒程度の方波交流を用いることが多い²²⁾。これは、電極での分極作用を低減するためと言われている。交流電圧を処分場に印加した場合、電流の一部はシートを介して流れる。電流は、印加電極からシートへ流れるが、電極から周辺の地盤や廃棄物を經由して流れる電流によって生ずる電界は、電極を中心として対称に広がると考えられるため、印加電極から等距離にある2本の電位差測定電極を用いて測定した電位差には影響が生じない。また、シートを介して流れる電流の位相は、漏水に流れる電流と位相が異なるため、前述の位相検波回路により印加電圧と異なる位相の電流は除去可能である。このように、自然電位の影響などを、交流電源と位相検波回路を使用して除去する点も大きく異なる。

10. 結 論

今回開発したシートの漏水位置検知システムについて、実験により以下の事項が明らかとなった。

- 1) 電極間隔1 mで漏水が1箇所の場合、漏水位置の検知精度は約15 cmで、1 cm²～16 cm²の漏水でほとんど変わらない。
- 2) 本測定システムは、電極間隔8.5 m以下で4本の電極に囲まれていれば、1箇所の1 cm²の大きさの漏水を検知できる。
- 3) 4つの測定電極に囲まれるブロックにそれぞれ漏水が1つであれば、複数の漏水でも別々に検知しうる。
- 4) 複数(4ヶ)の漏水が存在する場合、電位差 $\Delta V_{2,4}$ だけでは漏水位置を特定することは困難であるが、電位差 $\Delta V_{2,4}$ の他に $\Delta V_{1,3}$ についての詳細に検討すれば、それぞれの位置を特定することが可能である。

本測定システムは、処分場の形状などによる測定結果への影響を低減するために開発したものである。本論文は、測定システムの理論的原理について述べ、さらに基礎的な実験によりその有効性について述べたものである。本測定システムは、原理的に処分場

内の廃棄物の比抵抗のばらつきや処分場の形状に影響されにくいはずである。しかし、その効果の確認や電極の接触抵抗の影響や処分場の大きさの影響の把握など残された課題も多い。測定システムは、実際に処分場において運用して初めて意味がある。今後は土槽実験では検証できなかった課題についての研究を進めていく予定である。

謝辞：本測定システムの開発にあたっては、(株)レイディック坂田所長から多大なご協力を頂くとともに、論文を作成するにあたり東京工業大学 開発システム工学科助手 久田 真 氏のご指導を頂き、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.361，pp.105 - 106，1979.
- 2) Gross, B. A., Bonaparte, R. and Giroud, J. P. : Evaluation of flow from landfill leakage detection layers, *Proc. of the 4th International Conference on Geotextiles Geomembranes and Related Products*, Vol. 2, pp. 481 - 486, 1990.
- 3) Koener, R. M. : *Design with Geosynthetics*, 3rd ed., Prentice-Hall Inc., pp. 529 - 542, 1994.
- 4) 荒井健，新井齊，山崎宣悦，波多野雅一郎：廃棄物処分場の漏水位置検出装置，第3回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp. 371 - 374，1992.
- 5) 古川雅宣，荒井健，新井齊，遠藤勝久：電流法と電位バランス法による漏水位置検知方法，第5回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp. 376 - 378，1994.
- 6) Schultz, D. W., M. Duff, B. and Peters, W. R. : Performance of an Electrical Resistivity Technique for Detecting and Locating Geomembrane Failures, Report No. EPA-600/D-84-123, 1984.
- 7) 野口康治，押方利郎，川上純，白井直人，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.
- 8) Meerleer, F. de : Accurate Detection and Location of Effluent Leaks Beneath Lined Waste Disposal Sites, *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembrane and Related Products*, Vol. 3, pp. 913 - 918, 1994.
- 9) Cadwallader, M. W. and Baker, P. W. : Post Installation Leak Testing of Geomembranes, *Proc. of the 5th International Conference on*

- Geotextiles, Geomembrane and Related Products*, Vol.3, pp.919 - 922, 1994.
- 10) Nosko, V. and Andrezal, T. : Damage Detection System for Testing the Integrity of Geomembranes , *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembrane and Related Products*, Vol.3, pp.953 - 956, 1994.
 - 11) 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.
 - 12) 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.
 - 13) 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位置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.
 - 14) 大野文良, 佐々木潤治, 桜井仁: 最終処分場における漏水位置検知システム(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.
 - 15) 物理探査学会編: 図解 物理探査, 物理探査学会, pp.194 - 195, 1989.
 - 16) 大石進一: フーリエ解析, 岩波書店, 1989.
 - 17) 阿部善右衛門, 木下敏夫: 計測回路, pp.188 - 190, 朝倉書店, 1980.
 - 18) 荒井健, 新井斉, 山崎直悦, 波多野雅一郎: E L L 2システムにおける位相検波の効果, 物理探査学会第87回学術講演会講演論文集, pp.171 - 176, 1992.
 - 19) Landreth, R.E. : Locating and Repairing Leaks in Landfill/ Impoundment Flexible Membrane Liners, Report No. EPA/600/D-88/183, Aug. 1988.
 - 20) Darilek, G.T. and Para, J.O. : The Electrical Leak Location Method for Geomembrane Liners, Report No. EPA/600/2-88/035, Jun. 1988.
 - 21) 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.
 - 22) 物理探査学会編: 図解 物理探査, 物理探査学会, pp.54, 1989.

(1996.10.24 受付)

A LEAK DETECTION SYSTEM FOR LANDFILL SITE
ON DIFFERENCE OF ELECTRIC POTENTIAL,
MEASURED BY THE DIFFERENTIAL AMPLIFIER

Ken ARAI, Hitoshi ARAI, Nobuyoshi YAMAZAKI and Nobuaki OTSUKI

The electrical prospecting methods like the charged potential method have been applied for leak detection of landfill geomembrane liner. In these methods, leakpoints of liner are detected and located by the distortion of electric potential or resistivity contour lines. But, it is very difficult to detect the leakpoints, because the contour lines are distorted by the shape of the landfill sites and the quality of waste. Authors developed a new method to search the leakpoints without affection of the shape of landfill sites, on measured the difference of electric potential of 2 electrodes at same distance from the current electrode by the differential amplifier. This paper presents the principle of the method and effectiveness of the measuring system.