

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	廃棄物最終処分場に敷設された遮水シートの電氣的漏水検知システムに関する研究
Title(English)	
著者(和文)	荒井健
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第3631号, 授与年月日:2002年10月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第3631号, Conferred date:2002/10/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

廃棄物最終処分場に敷設された遮水シートの
電氣的漏水検知システムに関する研究

荒 井 健

目 次

	ページ
1. 序 論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	4
1.3 本研究の意義	5
1.4 本研究の構成	6
2. 廃棄物処分場の漏水検知システムの問題点	9
2.1 従来の漏水検知方法	9
2.1.1 ドレーン式漏水検知システム	10
(1) 一般的なドレーン式	10
(2) 真空管理法	12
2.1.2 電氣的漏水検知システム	15
(1) 鉍体流電法の応用手法	17
(2) 電位傾度法の応用手法	20
(3) 電流法	22
(4) パルス法, 電圧比率法	26
2.1.3 その他の方法 (アコースティックエミッション法など)	28
2.2 従来の漏水検知方法の評価	29
2.3 漏水検知システムに求められる特性	31
(1) 漏水量から要求される精度	31
(2) 漏水検知の位置的精度	32
(3) 漏水検知システムの分解能	32
(4) 感電事故防止から受ける制限	33
2.4 電氣的漏水検知システムの必要性能	34

3. 廃棄物処分場の電気特性	37
3.1 等価回路	37
3.1.1 遮水シートを経由する回路	41
(1) 交流電源の場合	41
(2) 直流電源の場合	42
3.1.2 保護層を経由する回路	44
3.2 遮水シートの電気特性	46
3.2.1 遮水シートの電気抵抗と静電容量	46
3.2.2 遮水シート表面の電気抵抗	49
3.2.3 遮水シートと地盤の電気抵抗の比較	50
3.2.4 EPDM 遮水シートの電気抵抗の特性	52
3.2.5 導電性遮水シートによって生ずる測定障害	53
3.2.6 電極方式への影響	54
3.3 廃棄物処分場の電気特性のまとめ	56
4. 点電極式電場制御電流測定による漏水位置検知	58
4.1 電場制御電流測定の測定原理	58
4.1.1 交流電源	58
4.1.2 電流測定と位相検波回路	61
4.1.3 遮水シート上下の電場制御	63
4.1.4 保護層に流れる電流の補正方法	65
4.2 水槽実験	69
4.2.1 実験条件および実験方法	69
(1) 水 槽	69
(2) 実験条件および実験手順	73
(3) 測定装置	73
4.2.2 水槽実験結果	74
(1) 電圧印加/電場制御電極の効果	74
(2) 電場制御専用電極の効果	79
(3) 補正電極の効果	83
(4) 漏水の位置的精度の検証	89
(5) 測定原理の普遍性	93
(6) 鉋体流電法を応用したシステムとの比較	96
4.3 点電極式電場制御電流測定のまとめ	100

5. 線電極式電場制御電流測定による漏水位置検知システム	102
5.1 電場制御電流測定の測定原理	102
5.1.1 線電極	102
5.1.2 線電極式電場制御電流測定	103
5.2 土槽実験	106
5.2.1 実験条件および実験方法	106
(1) 実験用土槽	106
(2) 実験条件および実験手順	106
5.2.2 土槽実験結果	111
5.3 処分場実験	118
5.3.1 実験条件および実験方法	118
(1) 様似町の廃棄物処分場	118
(2) 漏水位置検知方法	124
5.3.1 処分場実験結果	126
(1) 線電極式電流測定による漏水検知	126
(2) 線電極式電場制御電流測定による漏水検知	130
(3) 線電極式電場制御電流測定の測定精度	136
5.4 線電極式電場制御電流測定まとめ	140
(1) 土槽実験	140
(2) 処分場実験	140
6. 本研究の結論	142
6.1 各章で得られた結論	142
(1) 2章の結論	142
(2) 3章の結論	142
(3) 4章の結論	143
(4) 5章の結論	143
6.2 全体としての結論	145
6.3 今後の課題	149
謝辞	150

1. 序 論

1.1 本研究の背景

管理型廃棄物最終処分場に敷設された遮水シートは、埋め立てられる廃棄物から出る有害物質の周辺環境への漏洩を防止する重要な機能を有している。廃棄物処分場に敷設される遮水シートは、透水係数がほぼ 0 m/s と見なせる材料である。処分場からの浸出水には、重金属やダイオキシンや環境ホルモンなどの有害物質¹⁾³⁾が含まれている。遮水シートが所期の機能を十分発揮すれば、有害物質が含まれる浸出水は、従来からの凝集沈殿法や最新の逆浸透膜法などの水処理プラントで水質基準⁴⁾以下に浄化されるため、周辺環境への悪影響は小さいと考えられる。

総理府・厚生省令⁵⁾は、管理型廃棄物最終処分場の遮水工を以下のように定めている。

- ①厚さ 5m 以上かつ透水係数 $100 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 以下の地盤もしくは、ルジオン試験値 1 以下の岩盤には、遮水シートなしで処分場を設けることができる。
- ②遮水シートを 2 重に敷設し、2 重シートの間に、遮水シートが同時に損傷することを防止するために十分な厚さおよび強度を有する不織布その他の物を設ける。
- ③厚さ 50cm 以上かつ透水係数 $10 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 以下になるよう粘土やその他の材料で地盤を改良し、この表面に遮水シートを敷設する。
- ④厚さ 5cm 以上かつ透水係数 $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 以下のアスファルトコンクリート表面に遮水シートを敷設する。

上記の中で、①に示した地盤および岩盤の条件は、日本の複雑な地盤や岩盤条件ではまず望めない。総理府・厚生省の定める廃棄物処分場の遮水工の構造は、②～④からわかるように、遮水シートを遮水性能確保の最大の支柱と位置付けている。しかし、遮水シートは、接合部を施工不良なしに、完全な水密性を持たせるのはむずかしい。また、粘土やアスファルトを用いて地盤の透水性を小さくしようとしても限度があるため、有害物質を含む浸出水が処分場外に漏洩することとなる。

さらに、入念な施工により高水密性のシート遮水工を施工しても、遮水シートの漏水に以下に示す問題点がある。

- a) 遮水シートは、1.5mm と土木材料として非常に薄く、強度も低いため、重機の接触で簡単に破損する。発生した損傷は、廃棄物に埋まり見つからない。
- b) 地盤の不同沈下や陥没によって生ずる損傷は、埋立て開始から長時間経過

- し、廃棄物に深く埋まった条件で生ずる。
- c) 遮水シートの損傷は、自然に塞がらない。
 - d) 観測井戸の水質検査で漏水が確認された段階では、汚染範囲が広がっている。

廃棄物処分場の漏水原因は、a)と b)に示した重機による事故と地盤の不同沈下などによる破損が主なもので、その他は接合忘れなど施工不良である。

a)の重機による事故についてみると、材料の強度と遮水シートが廃棄物や保護土に隠れて視認できないところに問題がある。廃棄物処分場の遮水シートは、1.5mm 以上の製品が一般的に用いられていると指針⁶⁾に示されているだけで、遮水シートの厚みは特に定められた規定値ではない。しかし、遮水シートの厚みを10 倍の15mm にしても、この程度の厚みでは重機の接触による損傷を完全に防止できない。遮水シートの厚みを増すことは、材料費や人件費など経済性の問題だけでなく、遮水シートが重く硬くなるため、複雑な地形に合わせた遮水シートの敷設や遮水シートの接合をむずかしくする。このため、世界各国の廃棄物処分場は、1.5mm 以上の厚さを持つ遮水シートを敷設し、損傷を予防する方向で処分場を運用している。

遮水シートの損傷防止対策や紫外線や熱による材質劣化防止対策として、最近斜面部に層状に打設したコンクリート⁷⁾や繊維が絡み合うように整形した合成樹脂部材に砂を挿入した保護材⁸⁾を使用する例がある。日本の処分場の斜面部は、材質劣化防止するための不織布等を敷設するよう先に示した共同命令⁹⁾で定めている。コンクリートや砂を用いた保護材は、対損傷性と耐久性の高さから今後広く使用される可能性が高いが、漏水が検知された場合には、撤去が困難であることから漏水位置確認や補修など早急な漏水対策の障害となる。

b)に挙げた地盤の不同沈下や陥没によって生ずる遮水シートの損傷は、重機によって生ずる損傷と比較して大規模なことが多い。本来、廃棄物処分場に敷設される遮水シートは、柔軟性に富み伸び変形が大きい材料である。この特性により、地盤に一樣な変形が生じた場合には、遮水シートの変形性能で追従できるが、地割れや陥没など局所的な変形が生じた場合には、深く埋め立てられた廃棄物の重量で変形が拘束されるため、大きく破損することになる。

埋立てにともなう損傷や地盤の不同沈下などによって生ずる損傷は、保護層や廃棄物によって隠れているため、いざ探そうとしても保護層や埋立てられた廃棄物全体を除去しなければ発見できない。

また、遮水シートの漏水を放置しておいても自然に塞がらない。遮水シートの補修方法として、ウレタン樹脂注入¹⁰⁾やセメントミルク注入¹¹⁾などが研究されているが、現状では同一材質の遮水シートのパッチ当てが最も信頼される方法である。

一方、地下水の観測井戸を用いた水質検査が法律で設置が義務付けられている。しかし、処分場からの漏水が水質検査で確認された段階で、処分場からの漏水により広範囲に地下水汚染や土壌汚染が広がっている。

以上の問題点があるため、遮水シートの2重化や下地地盤の透水係数を改良しても、周辺環境への汚染に対して根本的な防止策とならない。

環境汚染を防止するためには、遮水シートに生じた損傷を一刻も早く補修しなければならないが、まず廃棄物に埋もれた漏水発生位置を正確に検知しなければならない。

すなわち、廃棄物最終処分場が原因となる地下水汚染や土壌汚染を防止するためには、遮水シートの漏水検知システムを開発することが最重要課題であることがわかる。

これを目的として、種々の漏水検知システムの研究が、建設会社、地質探査会社などによって進められている。これらの漏水位置検知システムは、測定原理がそれぞれ異なっており、測定精度や耐久性ならびに経済性も異なっている。これらの漏水検知システムの主な問題点は、以下に示すとおりである。

- 1) 測定精度と経済性が両立した測定システムとなっていない。
- 2) 測定システムの供用期間最長 20 年を確保できない。

1) に示した測定精度と経済性の両立について考えてみると、測定精度は処分場内に測定電極を狭い間隔で多数設置しなければ確保できない。しかし、測定電極数は、測定システムの建設コスト増に直結するため、不完全かつ高価な製品となっている。

2) の測定システムの供用年数について考えると、廃棄物処分場の供用年数は、10 年～15 年が一般的であるが、漏水検知システムの供用期間は、処分場の供用期間よりも長い 20 年近くになることも考えられる。これは、処分場から排出される浸出水の有害性が環境基準よりも高い場合には、廃棄物埋立終了後も水処理を続けるとともに処分場からの漏水を防がねばならないからである。

高信頼性の測定データを、約 20 年の長期にわたって得るためには、測定システムの不良部分に対する維持管理作業にも配慮した漏水位置検知システムでなければならない。たとえば、廃棄物中に油脂などが捨てられた場合には、処分場内に設置した電極を接続する測定ケーブルの被覆が溶解し、測定データの信頼性が著しく低下する。このような事態が生じた場合、廃棄物に埋まったケーブルの交換は、ほとんど不可能である。こうした状況をかえりみると、測定精度と経済性を両立させ、適切な維持管理作業にまで配慮した測定システムは、現状では開発されているとは言えない。

これらの問題を解決するためには、電気探査の延長である測定原理や点電極を用いるシステム構成から離れて、少数の電極で処分場全体をカバーでき、処分場の供用期間中十分な維持管理作業が可能な漏水検知システムを開発する必要がある。このためには、測定原理と電極構成に新たな概念と発想を漏水検知システムに導入する必要がある。

1.2 本研究の目的

1.1 節に、廃棄物処分場に従来の漏水検知システムより優れたシステムが求められる背景を述べた。実用的な廃棄物処分場の漏水検知システムを開発するためには、従来の電気探査を単純に流用するだけでは不十分で、廃棄物処分場の電氣的構造を解明した上で、新たな概念を導入する必要がある。本研究の過程で、筆者は、「電流測定」、「電場制御」、「線電極」などを開発した。これらの技術の効果を実証するためには、模型実験など小規模な実験だけでなく、実規模実験が必要である。

本研究は、以下の2つを研究の目的とする。

- ①廃棄物処分場の電氣的構造について検討し、電氣的構造の支配要因の1つである遮水シートの電気特性を解明する。また、他の1つの支配要因である廃棄物処分場に敷設された土質材料やコンクリートの保護層の影響についても考察する。
- ②種々の廃棄物処分場において、十分要求性能を満たす漏水検知システムを開発する。その内容は、以下の2つに分けられる。
 - ②-1 遮水シートの上に保護層が設置された条件においても、保護層を經由して流れる電流の影響を除去して漏水位置を検知できる補正方法を示し、これらを実験により評価する。
 - ②-2 広大な処分場を少数の電極でカバーできる線電極を採用した漏水検知システムを開発し、これらを実験により評価する。

1.3 本研究の意義

廃棄物処分場に敷設された遮水シートの漏水検知システムに関する研究は、今までにも数多くなされている。これらの研究を、本研究の背景を踏まえて改めて検討してみると、廃棄物処分場の電氣的構造を踏まえた上でなされた研究は少なく、測定精度について比較可能なデータを提供する研究も少ない。また、測定システムの経済性や維持管理に着目した研究もほとんどない。このような研究水準において、実用化されている種々の漏水検知システムは、測定精度やコストならびに維持管理の面で多くの改善すべき点が見られる。

本研究の意義は、以下の3項目に集約できる。

- ①新技術に基づいた漏水検知システムを開発するために、遮水シートの上に設置された土質材料やコンクリートの保護層や遮水シートの電気特性などで構成される処分場の電氣的構造を解明する。
- ②土質材料やコンクリートなどの漏水検知システムの測定障害に対処して測定精度を確保するための新技術を開発する。
- ③10,000m²以上の広さがある廃棄物処分場全体を少数の電極でカバーできる経済性に優れる新技術と20年以上におよぶ供用期間にわたり機能を保証できる新技術を開発する。

筆者の研究は、廃棄物処分場の電氣的構造を支配する遮水シートの電気特性を明らかにし、それぞれの処分場の条件に応じて測定精度、維持管理、経済性をすべて満足する真に実用的な廃棄物処分場の電氣的漏水検知システムを提示するものである。

1.4 本研究の構成

本研究の構成を図－1.1 のとおりで、それぞれの章の内容を以下に示す。

第1章では、本研究の背景を述べるとともに、研究の目的と意義ならびに研究の構成について示す。

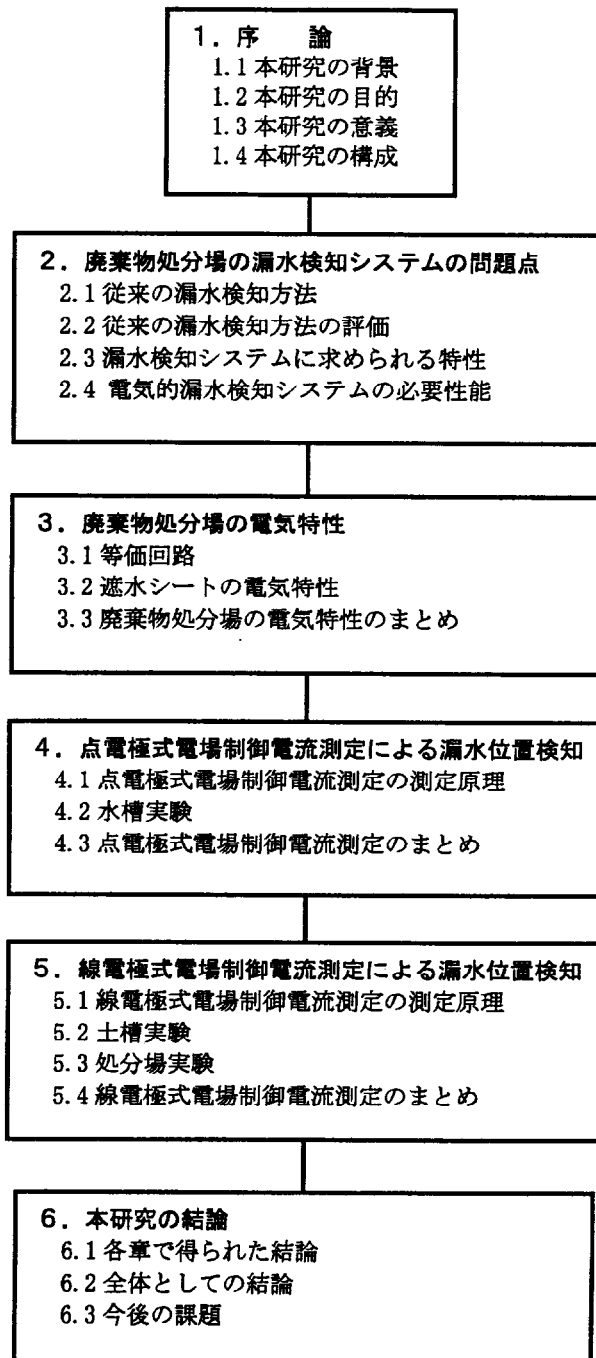
第2章では、既往の研究である種々の漏水検知システムの問題点を、測定原理やシステムの構築コストならびに維持管理を明らかにし、実用的な漏水検知システムに求められる特性と性能について示す。

第3章では、廃棄物処分場の電気特性を等価回路に示し、廃棄物処分場の電氣的構造を支配する遮水シートと保護層の影響を示し、遮水シートの電気特性について実験により明らかにするとともに、電氣的漏水検知システムの測定結果に与える影響について示す。

第4章では、筆者らが開発した電場制御電流測定による漏水検知システムの研究成果のうち最も重要な成果の1つである「保護層を経由して流れる電流の補正方法」を含む点電極式電場制御電流測定による漏水検知の測定原理について示す。これを、水槽実験に適用し本測定方法の効果を実証した。また、筆者の研究成果である電場制御電流測定と既往の研究について比較検討するとともに、第2章において示した廃棄物処分場の漏水検知システムに求められる性能に対して、本研究成果の達成度合いについても示す。

第5章では、処分場全体を少数の電極でカバーできる線電極を併用した電場制御電流測定による漏水検知の測定原理について示す。これは、筆者らの研究成果のうち、他の重要な成果の1つである。この漏水検知システムを、土槽および実際の処分場に適用し、線電極式電場制御電流測定の効果を示した。特に処分場に適用した実験において重機によって発生した遮水シートの損傷を検知しており、実用に十分耐える水準にあることを示す。

第6章は、本研究の結論で、各章で得られた研究成果を示すとともに、本研究の成果を総括する。さらに、本研究の成果を踏まえた上で、改めて研究の意義と重要性について述べるとともに、今後に残された課題について触れる。



図－1.1 本研究の構成

(参考文献)

- 1) (社)全国都市清掃会議：廃棄物最終処分場指針解説, pp.151 - 154, 1988.
- 2) 堀井安雄, 田中信寿：焼却残渣埋立率の高いごみ埋立地の浸出水処理における最近の技術課題, 廃棄物学会誌, Vol.8, No.1, pp.64-75, 1997.
- 3) 村松勇一, 野馬幸生, 西川淳一, 西原力：埋立処分場浸出水中のない分泌攪乱化学物質と水処理工程における挙動, 第 10 回廃棄物学会研究発表解講演論文集Ⅱ, pp.931-933, 1999.
- 4) 中杉修身：水質環境基準の見直しと埋立処分, 廃棄物学会誌, Vol.8, No.1, pp.128-137, 1997.
- 5) 厚生省, 総理府：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係わる技術上の基準を定める命令の一部を改正する命令, 官報 号外第 121 号, 1998.
- 6) (社)全国都市清掃会議：廃棄物最終処分場指針解説, pp.79-80, 1988.
- 7) Kirschner, R., Kreit, V.: Innovative, Protective Mattresses for Landfill Geomembranes, *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles Geomembranes and Related Products*, Vol. 3, pp.1015 - 1018, 1994.
- 8) Saathoff, F.: Indicators for Selection of Protection Layers for Geomembranes, *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles Geomembranes and Related Products*, Vol. 3, pp.1019 - 1022, 1994.
- 9) 厚生省, 総理府：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係わる技術上の基準を定める命令の一部を改正する命令, 官報 号外第 121 号, 1998.
- 10) 細川茂生, 村田繁, 早川智, 中島徹哉, 押方利郎, 海老原正明：遮水シートの無人ウレタン補修広報に関する実用化研究, 第 11 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.979-984, 2000.
- 11) 黒岩正夫, 十河潔司, 前田章, 河口武志：真空管理システムでのしゃ水シートの補修実験結果, 第 6 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.617-619, 1995.

2. 廃棄物処分場の漏水検知システム問題点

2.1 従来の漏水検知方法

漏水検知システムには、図-2.1 に示すように、処分場に2重に遮水シートを敷設し、2重シート間の気密性や流れ込む浸出水を感知して漏水を検知するシステム^{1),2)}と、遮水シートの高い電気抵抗を利用し、漏水近傍に生ずる電氣的異常から漏水位置を検知する電氣的システムがある。その他に漏水周辺で発生する音によって漏水位置を検知するアコースティックエミッション³⁾の応用などがある。

日本国内において、これらの漏水検知システムのうち電氣的漏水検知システムが多数派を占めているが、世界的に見ると電氣的漏水検知システムは少数派で、ドレーン式漏水検知システムが多数派を形成しているようである。それぞれの施工実績についてみると、ドレーン式と電氣式には、それぞれ数多くの実績があるが、その他の方法にはほとんどない。

それぞれの特徴は、簡単に説明すると以下のとおりとなる。

ドレーン式は、損傷から流出する浸出水を直接検知するため、漏水量や毒性を確認できる特徴がある。しかし、ドレーン式は、漏水が発生している遮水シートの損傷位置を正確に特長することができない。一方、電氣的漏水検知システムは、遮水シートの損傷を、損傷の周辺に生ずる電氣的異常により検知するため、損傷位置を明確に特定することができる特長がある。しかし、損傷から生じている漏水量や、浸出水の毒性などについて知ることができない。その他の方法は、漏水が生ずることにより発生する音や揮発成分などを検知することにより漏水の存在を確認する。このため、音や揮発成分がわずかな場合には、漏水の存在を確認できない。

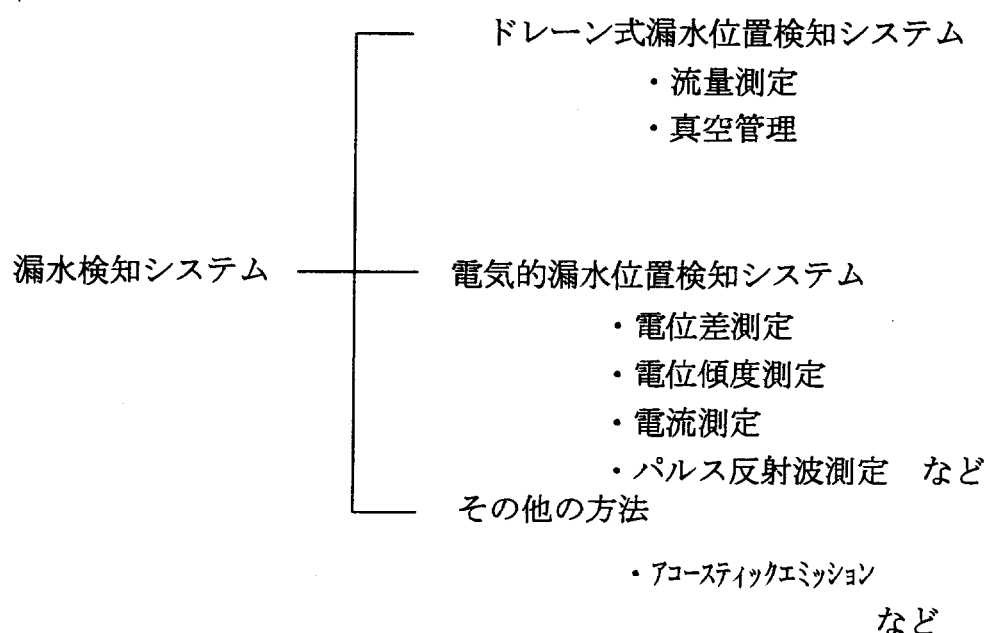


図-2.1 漏水位置検知システムのおおまかな分類

2.1.1 ドレーン式漏水検知システム

ドレーン法は、遮水シートを2重にし、この間に流入する浸出水の有無と水量で漏水の有無もしくは規模を判断する方法である。この方法は、2重シートの間層の透水係数を高めるとともに、遮水シートをブロック分けすることにより、遮水シートの漏水位置を大まかに検知できる。

世界的には、この方法が非常にポピュラーであるが、日本においては、この方法以外に袋状にした2重シートの間層に負圧をかけ、この気密性から漏水位置を検知する真空管理法と称する方法が開発されている。

(1) 一般的なドレーン式漏水位置検知方法

ドレーン式漏水位置検知方法には、図-2.2 に示すように2重シート間に流入する浸出水を検知する方法である。

この方法共通の長所および短所は、以下の4項目にまとめることができる。

- ①漏水の有無と浸出水漏洩による対策の緊急性を直接判断できる利点がある。
- ②2重シートが敷設された処分場以外では適用できない。
- ③漏水の正確な位置を検知できず、補修のための掘削調査に時間とコストがかかる。
- ④ドレーンホースの閉塞状態をチェックすることが困難である。

①に上げたように、廃棄物処分場からの漏水を直接パイプやホースで排出される浸出水の水量と水質を検査することで、廃棄物処分場からの漏水部分について補修の緊急性を直接判断できる。

しかし、ドレーン式漏水検知システムは、②に示すように、2重シートを採用した処分場には適用できるが、それ以外の遮水シートと改良地盤もしくはアスファルト層を併用した処分場には適用できない。これは、袋状に加工した2重シートの間層からホースで処分場下の監査廊に全量流入させる必要があるためである。特に、遮水シートと改良地盤の組合せの場合には、遮水シートからの漏水が改良地盤に吸収され、効率的に監査廊内に集水できない。

また、③に示すように、漏水位置は、袋状にした2重シートの範囲に存在することがわかるだけで、座標として漏水位置を検知できない。このため、補修に際しては、異常が生じている袋状にした遮水シートの範囲全体に埋立てられた廃棄物や保護層を全量撤去して漏水位置を確認しなければならない。遮水シートの漏水位置を実際に確認するためには、大量の廃棄物を移動させるだけでなく、遮水シートの近くまで掘削した後は人力で廃棄物を除去せねばならず、調査に時間とコストがかかる。

このため、漏水補修の緊急性を判断できても、ドレーン法は、漏水の正確な位置を検知できず、掘削調査に時間とコストがかかり、利点を生かすことができない。

また、処分場が供用されている10年～15年の間に、ドレーンホースやドレーンパイプ

材料の樹脂や金属の劣化や腐食によって、ひび割れや腐食孔が発生する事態が考えられる。その他にも、ドレーンホースやドレーンパイプに土粒子やカルシウムイオンなど溶解物質を含む浸出水が流入すると、長期使用の過程で沈殿や結晶析出によってホースやパイプを閉塞することとなる。

このような事態が生じると、吸引ホースやパイプの破損部分や閉塞位置を特定するのは困難である。これらのホースやパイプは、遮水シートの下に埋設されているため、ホースやパイプの交換などの維持管理も不可能である。

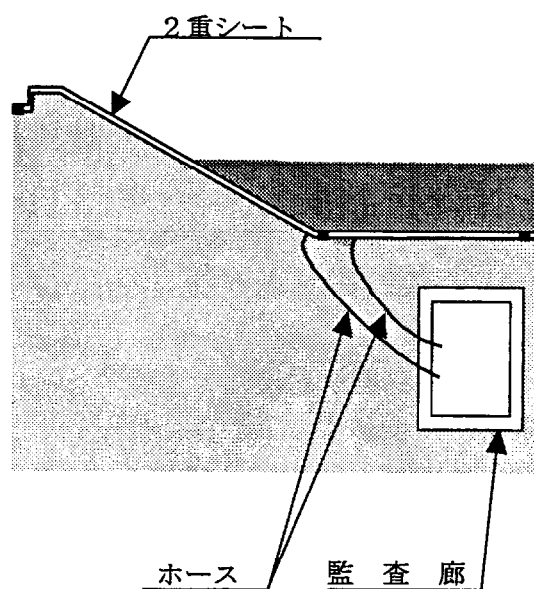


図-2.2 従来型ドレーン式

(2) 真空管理法

真空管理法は、図-2.3 に示すように2重シート間の気密性から漏水を検知する方法である。

この方法共通の長所および短所は、以下の4項目である。

- ①漏水の有無と浸出水漏洩による対策の緊急性を直接判断できる利点がある。
- ②2重シートが敷設された処分場以外では適用できない。
- ③漏水の正確な位置を検知できず、補修のための掘削調査に時間とコストがかかる。
- ④ドレーンホースの閉塞状態をチェックすることが困難である。

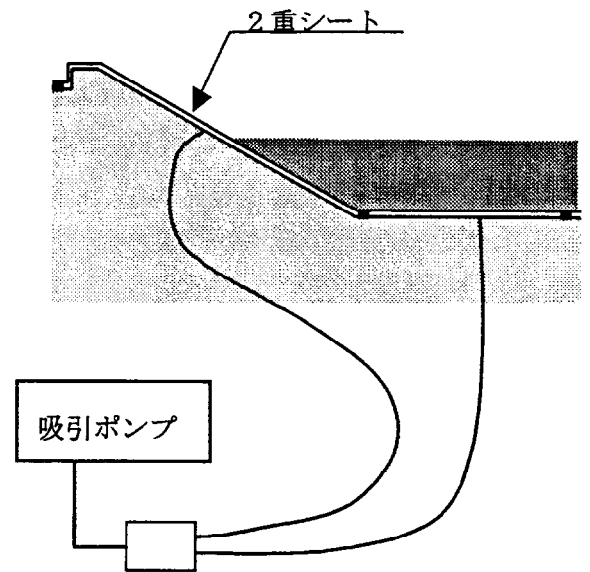


図-2.3 真空管理法

この他、真空管理法独特の長所と短所がある。

- ⑤一般的なドレーン式よりも微小な漏水も検知できる。
- ⑥漏水を吸引ホースからの注入により補修できる。
- ⑦遮水シートに漏気がないよう施工することがむずかしい。
- ⑧真空ポンプ、圧力計、ホースの切替器など、計測設備が必要である。

真空管理法の測定原理は、ブロック分けした2重シート間の気密性の保持である。このため、遮水シートを高気密性の袋状に加工しなければならず、遮水シートの接合部に微細なピンホールが存在しても、漏水検知は困難となる。袋状に加工した2重シートの気密性が確保できれば、通常のドレーン式と比較して微小な漏水の存在も検知できる。

また、真空管理法は、⑥に示したように漏水の存在が判明した場合、吸引ホースからセメントミルクなどの注入による補修方法を提案している。この補修方法については、模型実験において注入効果を確認しているが、処分場において実際に補修した実績がない。

真空管理法の遮水シートのブロック分けは、およそ10m×10mの大きさと考えられる。施工順序から考えて、地盤側のシート遮水工の施工後、施工不良部分をチェックし、気密性を確認し、中間層の不織布などを敷設した後、表層のシート遮水工を施工することとなる。表層の遮水シートの施工後、2重シート間に負圧をかけ、気密性を最終確認することになるが、表層のシートに漏気部分がなければ、当然地盤側の遮水シートに漏気部分が存在すると判断される。このシートの大きさと処分場の形状に合わせて加工されているため、2重シートを裏返すこともできず、地盤側の遮水シートの漏気部分を探し出して補修するのは簡単にできない。

さらに、処分場底部であれば、表層の遮水シートの上に50cm厚の砂の保護層を設置す

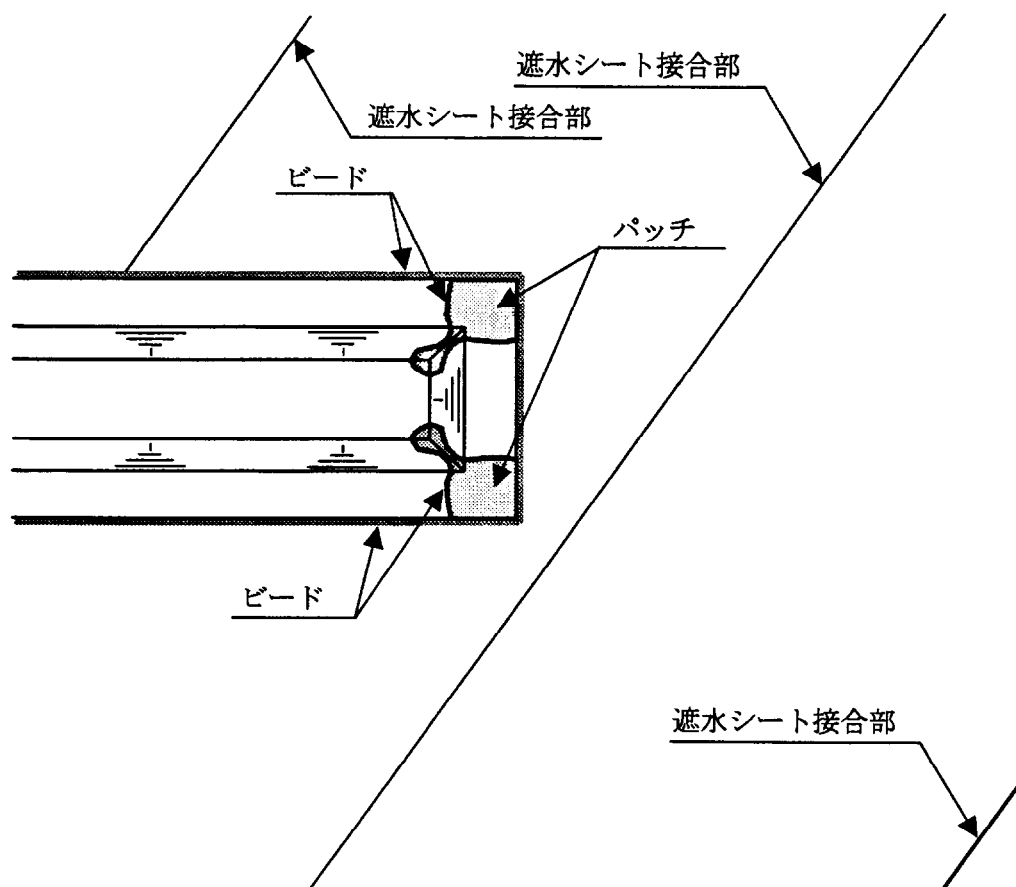


図-2.4 排水管周辺の遮水シート接合状況

る。遮水シート上に砂の保護層が撒きだされると、遮水シートの接合部分に引張や折り曲げの力が作用する。

現在日本において広く使用されている遮水シートは、従来の遮水シート（EPDM など）と比較すると硬い 1.5mm 厚の HDPE や TPO で、基礎地盤の形状に合わせた加工がむずかしい。図-2.4 に示す浸出水排水管が設置される水路端部や集水枡部分では、切込みを入れたりパッチを当てることにより複雑な形状の部分に遮水シートを敷設する。

たとえば HDPE 遮水シートの施工は、水路端部を図-2.4 に示すようにパッチ当てとエクストルーダー（押出し融着器）で地盤形状に合わせる。しかし、遮水シートが硬いため、地盤に密着させた遮水シートの施工は無理で、保護層設置後シート接合部に力が作用することとなる。

HDPE シートのパッチ端部は、鉄板の溶接のように、エクストルーダーでシート母材と同質の融けた通常ビードと呼ばれる樹脂を盛り上げ、接合するシート母材をビードの熱で融着される⁴⁾。遮水シートの融着部分の水密性は、作業員の技量によるところが大きい。事実、我々の調査で、シート接合部の融着部分に多数のピンホールや融着忘れ箇所⁵⁾が発見されている。

真空管理法では、砂の保護層が設置された条件において、2 重シートの気密性が確保されていなければならない。この条件で、接合部に剥離などが生ずると、保護層を撤去し漏

気箇所をあらためて調べなければならず、さらに補修のための施工手間がかかる。

真空管理法は、ドレーン式漏水検知方法よりも微小なピンホールの有無も検知できることや注入補修の可能性を有していることなど長所があるが、その問題以前に⑦に示すように、2重シートを漏水ならびに漏気がないように現場加工できるか大いに疑問である。

真空管理法は、2重シートに負圧をかけるための真空ポンプや圧力計や圧力の切替器などの設備が必要で、⑧に示すように通常のドレーン式漏水検知方法よりも設備が高価になる。

以上に示した、発表された論文や筆者の遮水シートの施工経験から、このシステムは、計測が可能となる状態にまで処分場の2重シートの気密性を高める施工の困難なことで、20年以上機能を保持するためのチェック方法や保守方法に問題を抱えているように考えられる。

2.1.2 電氣的漏水検知システム

電氣的漏水検知システムは、処分場内外に電圧を印加した条件で、遮水シートの漏水部周辺に生ずる電氣的異常を検知することにより漏水位置を検知する。したがって、電氣的漏水検知システムには、2章において述べたように、処分場の電氣的構造が測定結果に影響を与える。以下に、既往の電氣的漏水検知システムについて共通の評価を示す。

- ①遮水シートの漏水位置を座標として捉えることができる。しかし、浸出水の水量や毒性を直接判断することができない。
- ②EPDMなど電気抵抗が小さい遮水シートが敷設された処分場に適用できない。
- ③土質材料やコンクリートを遮水シートの保護層として使用されている処分場に適用できない。
- ④廃棄物処分場の内部は、必ずしも比抵抗が一律ではないと考えられるため、電極間隔を狭くしないと、測定精度を保証できない。
- ⑤交替直流を電源として使用する漏水検知システムは、測定結果に自然電流や高調波電流の影響が混入し、測定精度が低下する。
- ⑥既往の電氣的漏水検知方法は、一般に点電極を使用しているため、システムの設置コストが高い。また、ケーブルが廃棄物に埋まってしまうため、傷んだケーブルの交換ができない。

電氣的漏水検知システムの最大の長所は、①に示すように、遮水シートの漏水位置を座標として検知できる点にある。測定原理上、電位、電気抵抗、電流などを測定するため、浸出水の漏水量や毒性を知ることはできない。

電氣的漏水検知システムが十分機能するためには、電氣的漏水検知システムの基礎となっている種々の測定原理が、種々の廃棄物処分場の電氣的構造に対しても有効でなければならない。

②と③は、廃棄物処分場の電氣的構造に由来する測定障害である。3章において詳しく述べるが、遮水シートの保護層や遮水シートの電気抵抗が小さいと、漏水を経由する電流のが小さくなり、漏水検知をむずかしくする。従来の電氣的漏水検知システムは、遮水シートが高絶縁性の素材であることを前提とし、処分場内外を短絡する土質材料やコンクリートの保護層が存在しない条件で機能する。しかし、廃棄物処分場の電氣的構造は、これらの前提や条件を必ずしも満足するとは限らない。

従来の電氣的漏水検知システムは、漏水周辺に発生する電位分布の電位異常を検知する方法が多い。これらの方法は、全てポテンシャル理論に支配されている。ポテンシャル理論にしたがえば、漏水周辺に生ずる電位分布は、漏水を経由して流れる電流の大きさによって決定される⁶⁾。こうした処分場内の電位分布を測定する漏水検知システムでは、④に提起したように、埋め立てられる廃棄物の比抵抗にバラツキがあると、電位分布に大きな歪みが生じる。この影響を低減し、微小な漏水を検知するためには、電位測定電極を狭い間隔で処分場全体に満遍なく配置しなければならない。

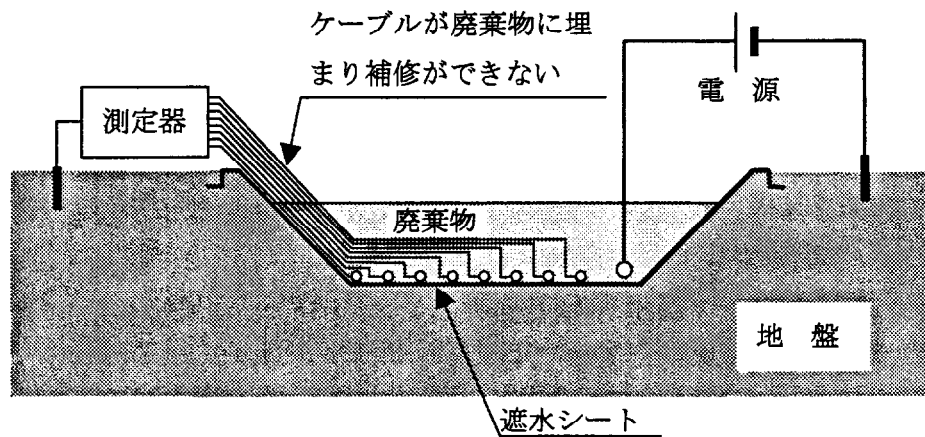


図-2.5 補修ができない点電極の測定ケーブル

その他にも、⑤に示すように、従来の電気探査では交替直流といわれる矩形波電源が電源に使用されている。しかし、この電源を用いる測定方法は、基本的に直流電圧と同様の測定方法をとるため、自然電流⁷⁾や高調波電流の影響が測定結果に混入する。高精度の測定結果を得るためには、電源から流れる電流の安定性だけでなく、これらの精度阻害要因の影響を除去できなければならない。しかし、従来の電気探査に用いられてきた電位差計では、漏水検知を阻害する要因を除去できない。

従来の電気探査を応用した漏水検知システムは、通常点電極が用いられている。漏水検知システムの測定精度を確保するためには、④で述べたように、処分場内に狭い電極間隔で満遍なく電極を配置しなければならないが、⑥に示すように、各電極それぞれ測定ケーブルを配線し、測定器の1チャンネル割当てするため、測定システムは非常に高価なものとなる。

こうした電極とケーブルの構成は、経済性の面だけでなく、廃棄物処分場の供用期間約20年間機能を維持する上で種々の問題がある。たとえば、測定ケーブルには、合成樹脂や合成ゴム製被覆材は、廃棄物に埋まるまでに風雨や紫外線にさらされて劣化する可能性がある。また、ケーブルが廃棄物に埋まった状態では、浸出水中にケーブルが常時浸漬する条件となるだけでなく、油脂類が廃棄された場合には被覆が溶解する可能性がある。

どのような条件であっても、ケーブル被覆の状況を確認でき、ケーブルを交換できれば、10年～20年の供用期間中漏水検知システムの機能を保証できる。しかし、図-2.5に示すように、廃棄物が埋立てられた条件では、測定ケーブルの状況を確認できないばかりでなく、当然劣化の生じたケーブルを交換することもできない。

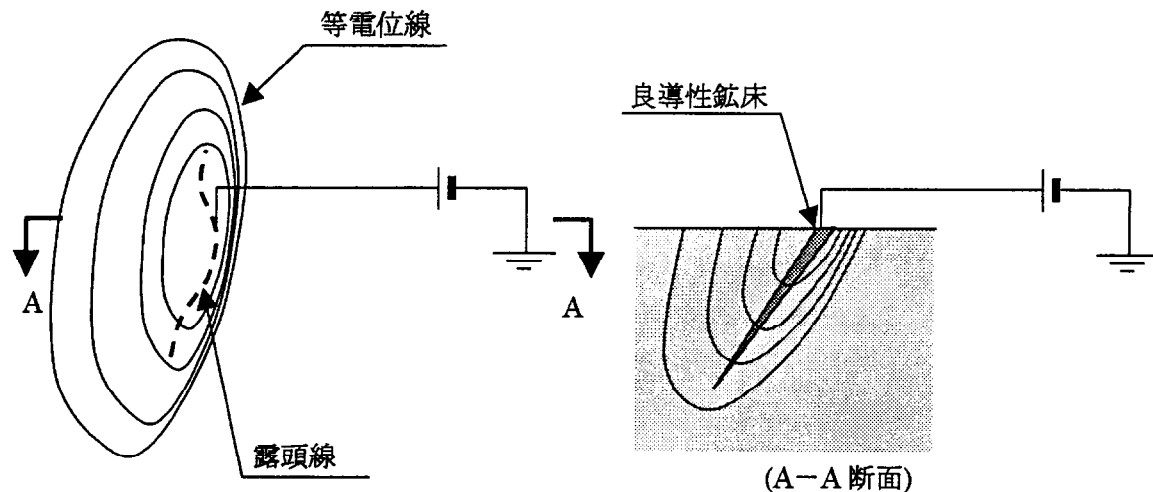


図-2.6 鉱体流電法の測定原理

(1) 鉱体流電法の応用手法

鉱体流電法⁸⁾は、図-2.6 に示すように、良導性鉱床の探査において、電源の一端を鉱床中に設置し、鉱体に直接電流を流すことから名付けられた電気探査法である。この方法は、電気伝導度の高い板状鉱体を対象として使用される方法で、鉱体の賦存状況を反映した電位分布の歪みから鉱体の規模、深度、広がりを探査する方法である。

この手法を応用して、処分場内外に電圧を印加した条件で、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1984年に米国人 Schultz, D.W.らによって最初に発表されている⁹⁾。日本における最初の漏水検知システムに関する押方らの研究^{10),11)}も、Schultz, D.W.らの研究と全く同じ原理による漏水検知システムであった。

これらの鉱体流電法を応用した漏水検知システムの電位測定用電極は、電気探査のように作業員が持ち歩く移動式電極ではなく、図-2.7 および図-2.8 に示すように、遮水シートの上もしくは下にあらかじめ設置されている。漏水は、処分場内外に電圧を印加した状態で、遮水シート上もしくは下に設置した電極により電位分布を測定し、漏水周辺に発生する電位異常により検知される。

鉱体流電法を応用した漏水検知システムの特徴を以下に示す。

- ①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。
- ②交替直流電圧を印加し、測定を直流電圧として行うため、直流電圧といわれる自然電流の影響を受ける¹²⁾。また、電位測定だけでは、高調波電流の影響を除去できない。
- ③処分場内の廃棄物によって生ずる比抵抗分布に対して、ダイポール・ダイポール測定¹³⁾によって測定した比抵抗を利用することにより、この影響を除去できる¹⁴⁾。ただし、測定時間が非常に長い。
- ④廃棄物の電気特性を受けない2重シートの間層に線電極を配置する方法¹⁵⁾

は、中間層に浸出水が充満すると測定電極同士が短絡状態となるため、測定不能となる。

- ⑤廃棄物の比抵抗分布を受けない2重シートの中間層や地盤に点電極を配置する方法¹⁶⁾は、印加電極の影響や廃棄物が有する比抵抗のバラツキの影響も受けず、鉱体流電法を応用した電氣的漏水検知システムの中で最も優れている。

鉱体流電法を応用した電氣的漏水検知システムは、①に示すように、地盤に電圧をかける装置と電位差測定装置だけの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。しかし、②に示すように、精密な測定を行う場合には自然電位を別個に測定し、その結果を鉱体流電法の測定結果から差し引く操作が必要となる¹⁷⁾。さらに、鉱体流電法の応用手法は、矩形波形電圧（交替直流電圧）を印加し、直流電圧を印加するのと同様の手法で電位分布を測定するため、測定電位差に高調波電流の影響によるノイズが混入することとなる。したがって、鉱体流電法を応用した漏水検知システムは、安定した測定結果が得にくいと判断される。

廃棄物処分場に埋め立てられる処分場内部の浸出水は、電気伝導度が $3\text{mS/cm} \sim 10\text{mS/cm}$ と一般の貯水池水の電気伝導度 $50\mu\text{S/cm}$ と比較して60倍も大きく、処分場内の電位分布が均一化しやすい傾向がある。しかし、図-2.7に示すように処分場内に電極を設置する方法では、処分場内の電位分布が均一化しやすいとはいえ、廃棄物中の金属片の含有量や廃棄物の含水比により等電位線の間隔が乱れると考えられる。また、遮水シートの上側に印加電極と電位測定電極が設置されており、印加電極の近傍に漏水がある場合、周辺の電位変化が大きすぎて漏水周辺に生ずる電位異常が検知しにくい。

こうした鉱体流電法単独で使用情况の不具合に対して、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¹⁸⁾。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、③に示したように、計測に要する時間が非常に長くなる欠点がある。

この他、廃棄物の影響を受けない2重化した遮水シートの中間層に線電極を格子状に設置し、電位を測定する手法¹⁹⁾も土弘らによって提案されているが、④に示すように、2重化した遮水シートの中間層内が浸出水で充満した場合に、測定電極が全て短絡状態となるため測定が困難となる。

ここで、鉱体流電法の測定原理に戻って考察すると、浸出水の高い電気伝導度によって処分場内は電位が一様になりやすい傾向があるから、処分場全体を図-2.6に示した良導性鉱床と見なせる。この考えにしたがえば、電気伝導度が低い地盤側で電位分布を測定する方が鉱体流電法に近い。図-2.8に示す処分場外に電極を設置する方法であれば、処分場内外に大電圧をかけても印加電極周辺の電位分布に影響されず漏水周辺の電位異常を検出できるから、漏水位置を検知しやすいと考えられる。したがって、遮水シートの下側に電位測定電極を設置する方法²⁰⁾は、⑤に示すように、処分場内に設置した印加電極位置に左右されることがなく、原理面と利用しやすさから評価できる。

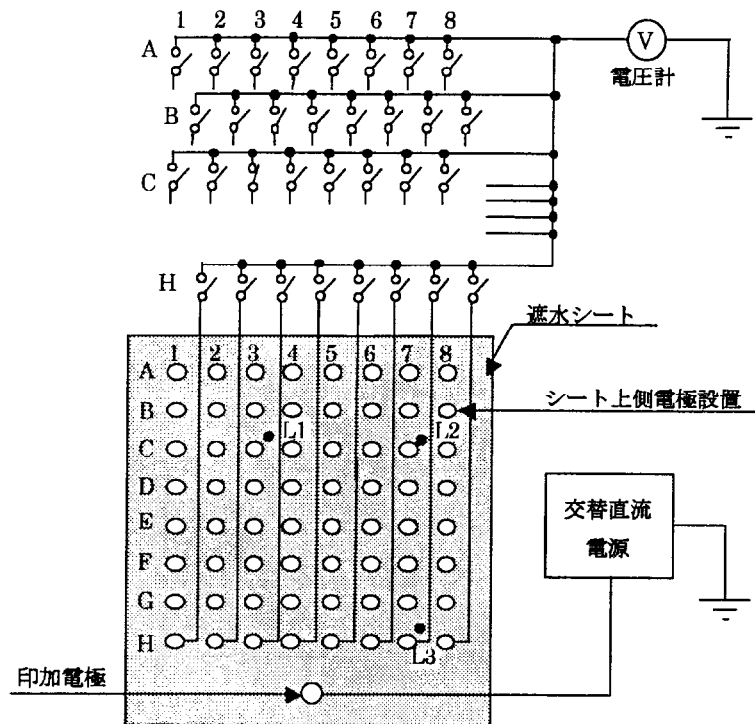


図-2.7 鉍体流電法の応用手法
(シート上側電位測定電極配置)

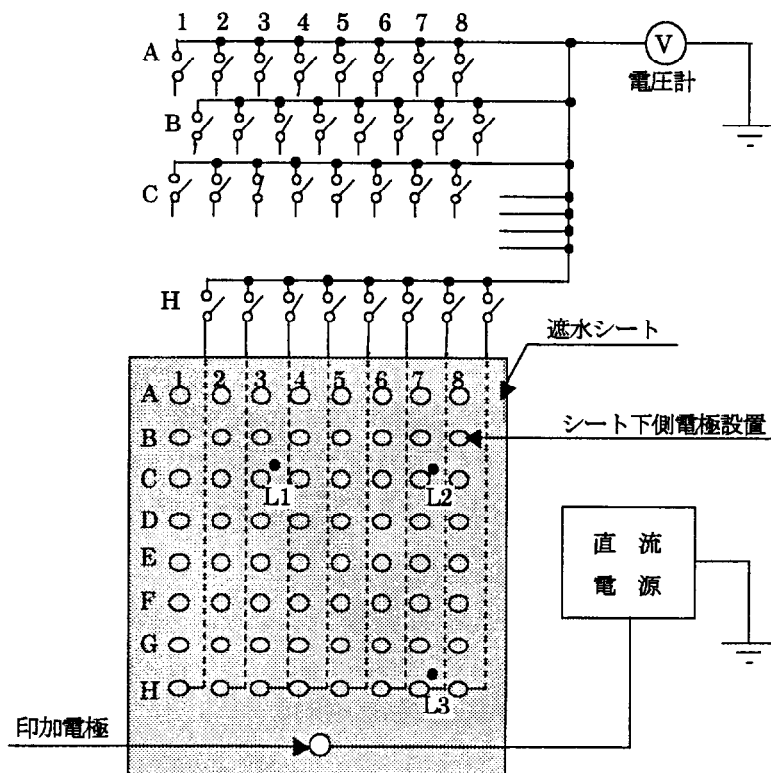


図-2.8 鉍体流電法の応用手法
(シート下側電位測定電極配置)

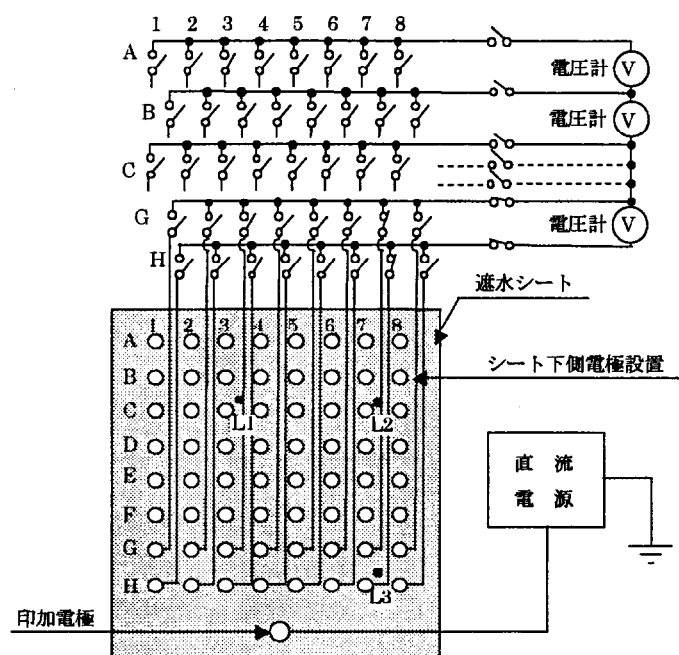


図-2.9 電位傾度法の応用手法
(シート下側電位測定電極配置)

(2) 電位傾度法の応用手法

電位傾度法は、地盤に設置した 2 本の電極間に電圧を印加した状態で、2 本の電位差測定電極間距離を一定に保って順次移動させて電位差を測定し、地下の水平方向の比抵抗分布を測定する方法である。この方法は、測定される電位差が微小であるため、印加電圧を大きくしなければならず、大出力電源が最近容易に入手できるようになり、あらためて使用されるようになってきた。電位傾度法は、本来地盤の水平方向の比抵抗分布を測定するために開発されたものであるが、遮水シートの漏水周辺に生ずる電位異常を検知するためにも有用な方法である。

漏水検知方法に対する応用として、Darilek, G.T. による電位傾度法²¹⁾の適用に関する研究が上げられる。この方法は、処分場内外に電圧を印加し、処分場内を 2 本の移動電極で電位差を測定し、漏水部分周辺に生ずる電位異常から漏水位置を検知する方法である^{22),23)}。

処分場における具体的な漏水検知の方法は、処分場内もしくは外に等間隔に電位差測定用電極を等間隔に設置し、処分場内外に電圧を印加し、漏水周辺に生ずる電位異常を検知する。図-2.9 は、遮水シート上側に電位差測定電極を設置した例で、電極 G7 と H7 について電位差測定している。

この方法の特徴は、以下に示すとおりである。

- ①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。
- ②遮水シートに生じた漏水周辺に生ずる電位異常を測定対象とするため、鉱体流電法を測定原理とする漏水検知システムより精度が高い。

③微小な電位差を測定するため、印加電圧を 350V と高電圧を使用しなければならない。

電位傾度法は、鉍体流電法を応用した漏水検知システムと同様に、処分場に電圧を印加する電源と電位を測定する電位差計だけで漏水位置を検知する。したがって、①に示したように、高度の回路技術を用いた測定機器を必要としない。

電位傾度法は、漏水周辺に生ずる電位異常を測定対象とするため、②に示すように、鉍体流電法の応用手法と比較して S/N 比が高くなると考えられる。特に、種々の電気特性の廃棄物が埋め立てられる廃棄物処分場ではなく、地盤側に電位差測定電極を設置すれば、廃棄物の電気特性のバラツキに影響されず、精度の高いデータが得られるものと考えられる。

しかし、電位傾度法の応用手法では、③に示すように、測定感度を上げるために処分場に大電圧を印加するため、感電事故など危険がともなう可能性が高い。事実、米国 Darilek の研究例では、350V の高電圧を印加しており、感電事故防止への注意を喚起している。

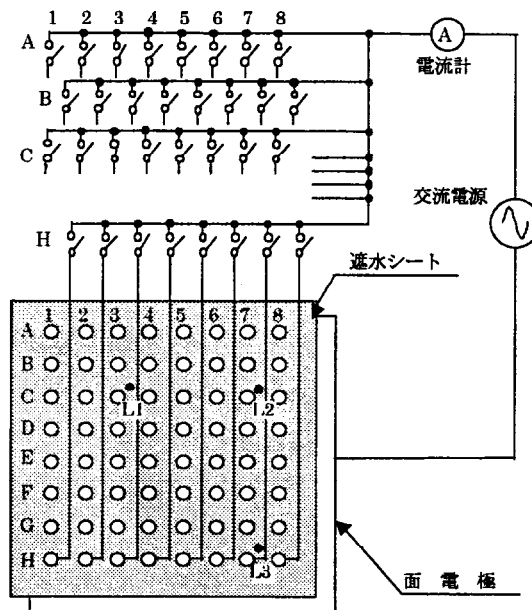


図-2.10 点電極式電流法の一例

(3) 電流法

オーム則の電圧，電流，電気抵抗は，それぞれ別個に測定できる測定対象である．しかし，電気探査において，電圧しか測定対象としていない．この点において，電流測定を原理とする探査方法は，従来の電気探査から見ると斬新である．従来の電気探査において，電流測定と電気抵抗を用いてこなかった理由は，地盤に流れる電流の大きさは電極の接触抵抗で決まることと，地盤全体の抵抗が地球全体の電界の広がりによって非常に小さい値となるため，地盤の内部構造を探査する方法として不適切な方法だからである．

電流測定による漏水検知システムとして，図-2.10 に示すように，遮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，遮水シートの表面側に設けた多数の点電極間から選択した1本の電極と面電極間に電圧を印加し，電流の大きさからインピーダンス分布を算出して漏水を検知する方法²⁴⁾が西山らによって研究されている．この方法は，インピーダンス分布により漏水位置を検知するとしているが，実際には交流電圧を処分場内外に印加し，電極間に流れる電流の測定値と印加電圧値をオームの法則に代入してインピーダンスを算出しており，電流測定による漏水位置検知方法と考えられる．

西山らの研究の他に，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²⁵⁾も荒井によって開発されている．この方法は，印加電極の周辺に放射状に電流計を4本設け，どの方向に電流が多く流れているか検出することにより漏水位置を検知する方法である．この方法は，電流測定によって印加電極から漏水が存在する方向を見つける方法であるから，印加電極周辺の電位傾度を測定しても同じ効果をあげると判断できる．したがって，ここでは西山らの方法について評価する．

- ①遮水シートの静電容量成分に流れる電流や自然電流および高調波電流を位相検波回路など回路技術によって除去できる．

- ②測定機器の価格が電位測定を測定原理とする漏水検知システムと比較して高価である。
- ③電流測定だけを測定原理とする漏水検知システムは、漏水を常時検知できる保障がない。

地盤や廃棄物に安定的に電流を流すためには、交替直流電圧や交流電圧のように、正負が定期的に逆転する電源を使用しなければならない。しかし、静電容量を有する遮水シートは表面の帯電と放電によって、遮水シートを介して流れる電流成分が発生し測定精度が低くなる。遮水シートの静電容量に流れる電流や自然電流および高調波電流は、印加電圧の位相もしくは波長が異なる。鉍体流電法を応用した漏水検知システムは、電圧を測定するため、これらの測定上のノイズを除去できない。しかし、電流法の場合、①に示したように、位相検波回路²⁶⁾など回路技術を用いることにより、除去することが可能である。しかし、西山らの研究では、位相検波回路など回路技術が用いられていない。

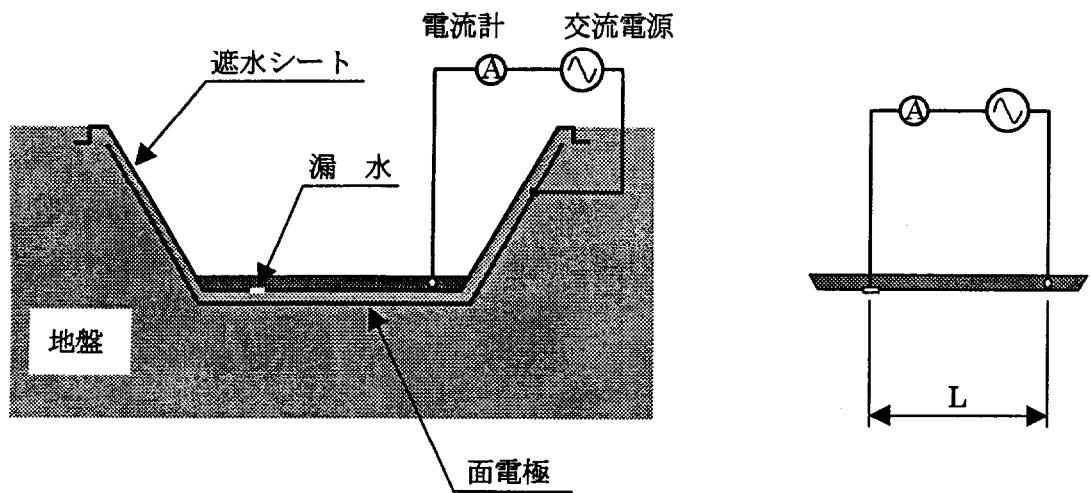
また、電流法に用いる測定機器は、電位測定による漏水検知システムと比較して、測定機器の内部抵抗を低くしなければならない。測定機器の内部抵抗を下げるためには、回路上の工夫や高価な部品を使用せねばならず、②に示すように、測定機器の価格は割高になる。

この漏水検知システムの最大の問題点は、③に挙げたように、原理的に漏水位置検知が常時保証されるか非常に疑わしいところにある。

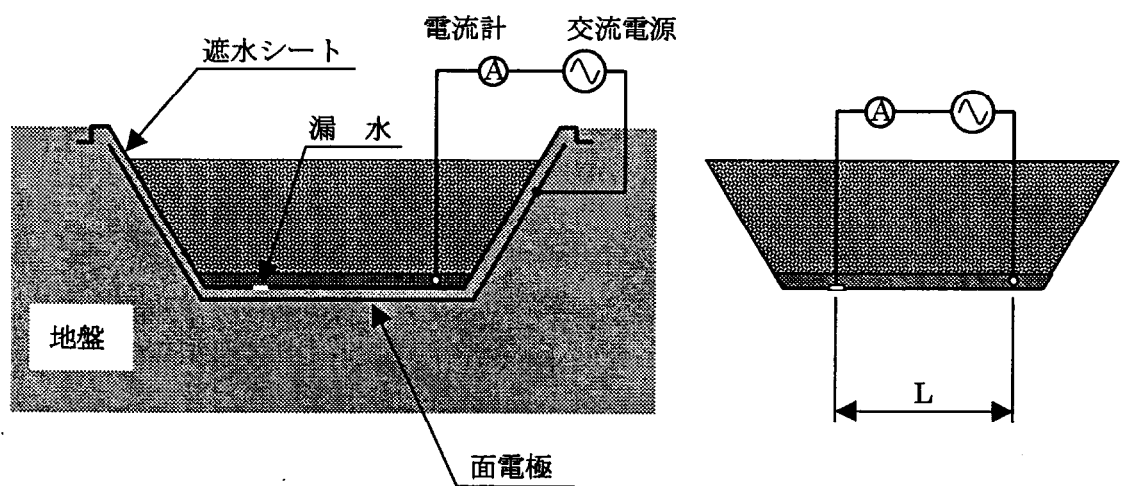
図-2.11 に示すような処分場内に測定電極を配置する方法を例にとると、完成直後の廃棄物処分場は、図-2.11(A)に示すように、遮水シート上に砂の保護層が設けられているだけで、電極が形成する電界も狭く、漏水と電極間距離に応じて電流の大きさが変化し、漏水位置が検知できると考えられる。しかし、図-2.11(B)に示すように、廃棄物に含まれる塩分による電気伝導度の上昇と埋め立てられる廃棄物が深くなることによる電界の拡大により、漏水と印加電極間の電気抵抗が小さくなり、漏水と印加電極間距離 L によって生ずる電流の大きさに差異がなくなる。すなわち、電流法は、処分場の埋立て状況によって測定精度が低下し、最悪の場合漏水検知は不可能となる。

一般に、漏水検知システムは、測定原理上遮水シートの上側と下側の電極構成を逆にしても基本的性能は変化しないと考えられる。それは、前述の鉍体流電法を応用した漏水検知システムの項において既に示したとおりである。そこで、電流法の電極構成を遮水シート上下で逆にした条件について考える。図-2.12 に示すように、遮水シートの上側に面電極を配置し、遮水シートの下側に点電極を配置する電極構成は、鉍体流電法や電位傾度法の場合と同様に、廃棄物の有する電気伝導度のバラツキの影響を受けず、精度が向上すると考えられる。そこで、遮水シートの下側に点電極を設置すると、図-2.12(B)に示すように、電流が流れる媒体は地盤となる。

ここで、図-2.12(C)に示すように、漏水および電極をそれぞれ半径 a , b の半球状の電極と仮定し、地盤の比抵抗を ρ とし、漏水と電極間距離を L とすると、地盤と電極間の電気抵抗 R は、式(2.1)で示される²⁷⁾。

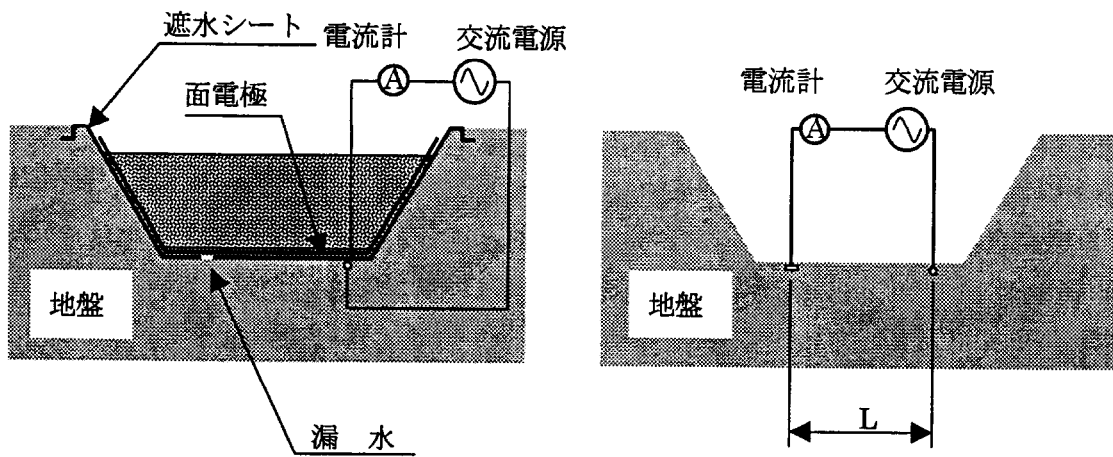


(A) 遮水シート上に保護層だけがある条件



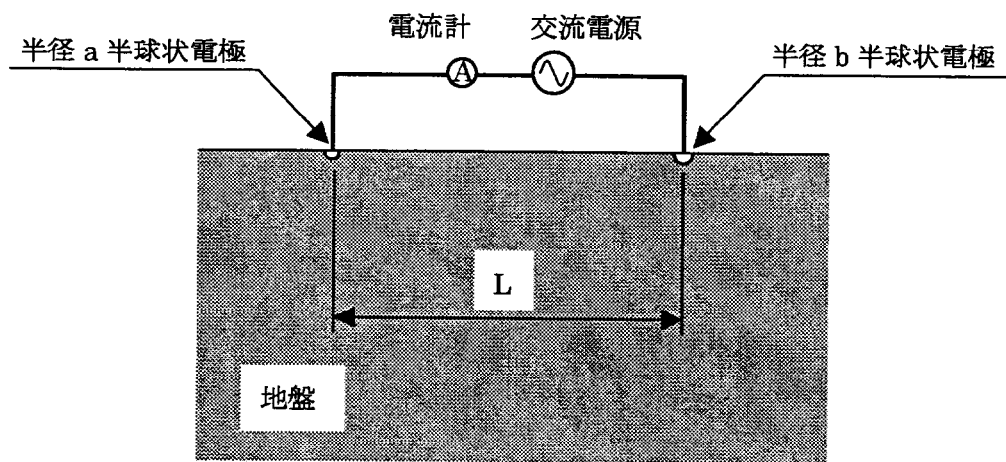
(B) 遮水シート上に廃棄物が埋立られた条件

図-2.11 廃棄物が埋立られた処分場の電氣的条件



(A) 遮水シート下側に電極を設置した条件

(B) 漏水と電極の電氣的境界条件



(C) 半球状電極間の電気抵抗

図-2.12 遮水シートの下側に測定電極を配置した電流法

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (2.1)$$

ここで、 π ：円周率、 a 、 b ：半球状の電極の半径、 ρ ：地盤の比抵抗

この式(2.1)から、漏水と印加電極の距離 L に関係なく、電気抵抗 R は、電極と漏水の大きさと地盤の比抵抗の値で決定することがわかる。すなわち、電流測定による漏水位置検知方法は、点電極を処分場の内外に設置するにせよ、何らかの改善を加えない限り、機能しないと結論づけられる。

この電流測定だけを測定原理とする漏水検知システムの利点は、他の電氣的漏水検知システムと比較して少なく、原理上漏水検知が保障されないなど欠点が多く見られる。

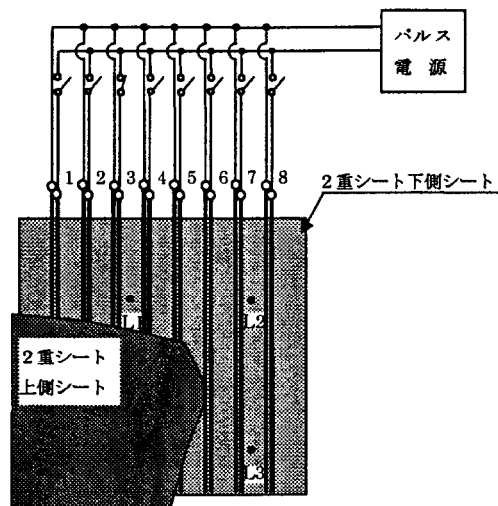


図-2.13 パルス法

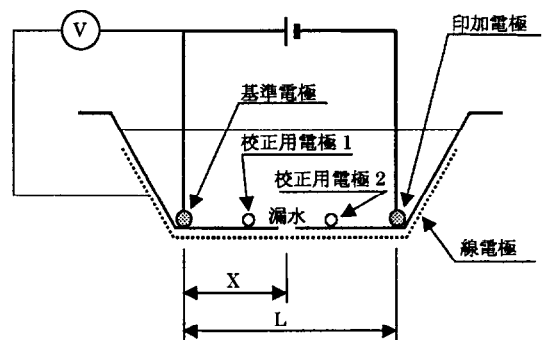


図-2.14 電圧比率法

(4) パルス法、電圧比率法

これまでに述べた電氣的漏水検知システムは、高い電気抵抗を有する遮水シートの漏水周辺において生ずる電位異常、電流異常などから漏水位置を検知する。一方で、遮水シートから漏れてくる浸出水によって変化する電気状態を監視することにより漏水を検知する方法などがある。

遮水シートからの漏水を検出する方法に、それぞれの研究者が種々の方法を適用している。たとえば、図-2.13 に示すように、遮水シートの下に敷設した不織布に織り込んだ平行金属線にパルス電圧をかけ、不織布の静電容量が変化する部分で生ずる反射波の正負と反射波の到達時間から漏水位置を検出するパルス法²⁰⁾と呼ばれる手法がある。

パルス法と同様に、2重シート内に X 方向と Y 方向に等間隔に配置した線電極を、不織布を介して交差させ、それぞれの電極から 1 本ずつ電極を選択し、この間の電気抵抗や静電容量を計測することによって漏水位置を検知する方法²⁸⁾も de Meerleer らによって開発されている。

この他、図-2.14 に示すように、処分場内に設置した 2 本の電極間に電圧を印加することにより、電位勾配を発生させ、シートの地盤側に設けた線電極の電位と 2 本の校正用電極の電位から漏水位置を検知する電圧比率法²⁹⁾が大野らによって開発されている。

この方法の特徴は、以下に示すとおりである。

- ①遮水シートの上に土質材料やコンクリートの保護層が設けられても、漏水検知が可能なものがある。
- ②遮水シートに漏水が発生して、はじめて遮水シートの電気特性が変化するよう管理することがむずかしい。
- ③測定器が他の方法に比較して一般に高価である。

パルス法や de Meerleer らの方法は、先の鉱体流電法や電位傾度法ならびに電流法のよ
うに、高絶縁性の遮水シートに生じた漏水という処分場内外を接続する電気経路を検知す
る方法とは異なり、遮水シートの漏水から漏れる浸出水を検知する方法である。これらの
方法は、測定電極間の不織布に浸透する浸出水を検知して漏水位置を把握するため、遮水
シートの表面に土質材料など処分場内外を接続する保護層が存在しても、不織布が濡れた
部分で反射する反射波や電気抵抗もしくは静電容量の変化を測定できる。したがって、①
に示すように、これらの方法は、原理面的に保護層を経由する電気回路に影響されずに漏
水位置を検知できる利点がある。

しかし、遮水シートに生じた損傷から浸出水が流出し不織布の電極に浸透するまで、②
に示すように、不織布が常に乾燥状態に管理されていないと漏水位置を確認できない。こ
れらの漏水検知システムは、遮水シートが1重でも2重でも測定原理から適用可能と考え
られるが、どこから水分が浸透してくるかわからない1重遮水シートの処分場の条件では、
実現性に疑問がある。しかし、発表論文などに見る限り、この問題に対する研究はなされ
ていない。

電圧比率法は、原理的に漏水が1箇所に限定されていれば漏水を検知できる可能性があ
る。しかし、複数の漏水が存在する条件では、地盤側に設けた電極の電位が、複数の漏水
それぞれの大きさや電位の影響を受けた一定電位となるため、漏水と無関係な位置を漏水
として検知する。また、電圧比率法は、土質材料などの保護層があると、処分場内外が接
地された条件すなわち接地電位となるため、漏水を検知できない。

電氣的漏水検知システムの中で、浸出水の浸入を電氣的に確認する方法は、前述のよう
に保護層の影響を受けにくいことが利点であるが、測定システムとしてみると非常に不完
全で、完成されたシステムとは言えない。

2.1.3 その他の方法（アコースティックエミッション法など）

ドレーン式漏水検知システムと電氣的漏水検知システムの他のシステムには、先に紹介したアコースティックエミッション法や浸出水の揮発成分を検知する方法などがある。これらの方法は、浸出水が存在して初めてセンサーが機能するように考えられている。したがって、ドレーン式漏水検知システムと非常に似た特性であるが、浸出水量を把握することはできない。これらに共通の長所と短所は、以下に示すとおりである。

- ①遮水シートから漏洩する浸出水を間接的に検知するため、浸出水量から補修の緊急性を判断できない。
- ②浸出水の流速が遅かったり、浸出水中に揮発成分がない条件や、浸出水が存在しない乾燥した条件で、漏水を検知できない。
- ③微小な漏水を検知するためには、センサーを遮水シート周辺に多数設置しなければならない。

アコースティックエミッションを利用した漏水検知システムがある。粗い砂や砂利層に10mm/s以上の流速で浸出水が流れれば、漏水が検知できるレベルの音が発生し、遮水シートの下側にφ10mm～φ20mmの金属棒の音波ガイドを設置するとともに、音波ガイドの両端にジオマイクロフォンを設けることで、漏水位置が検知できる³⁰⁾としている。

しかし、アコースティックエミッションを利用した方法は、検知対象が音であるため、周辺からの雑音など阻害要因の影響を除去しにくいと考えられる。また、この方法は、遮水シートの下側に粗い砂や砂利層を設ける必要があるため、日本の処分場においては、2重シートの中間層への適用のみ期待できるが、遮水シートが1重の場合には適用できない。また、流速が10mm/s以下となる微小な漏水や浸出水の水頭が低い条件では、漏水を検知できないと考えられる。

その他、遮水シートに光ファイバーを取り付けて、遮水シートに生ずるひずみを検知して漏水位置を検知する漏水検知システム³¹⁾や地盤の含水比や浸出水に含まれる揮発成分を、遮水シートの下側に静電容量の変化を検知するセンサー³²⁾を設けたり、吸引ホースを設置することによりとらえて³³⁾漏水位置を検知する方法ある。しかし、これらの方法も、漏水から流れる浸出水中に揮発成分がないと、検知システムが漏水を検知できず、微小な漏水に対処するために遮水シートの近傍にセンサーを多数設置しなければならないなど、実用上の問題が多数残されていると考えられる。

これらの方法は、米国環境保護庁の調査で報告されているが、アコースティックエミッションなどは論文発表から10年以上たっても、その後の研究成果が報告されていない。また、最近2～3年に発表されたものは、性能・機能についてまだ認知されていない。

2.2 従来の漏水検知方法の評価

従来の漏水検知システムの中で、ドレーン式漏水検知システムと電氣的漏水検知システムが主要なものである。アコースティックエミッションなどの漏水検知システムは、現状では研究が進んでいるこれらの方法と比較して実用性の面で評価の対象とならない。廃棄物処分場に漏水検知システムの設置を計画する場合には、ドレーン式もしくは電氣的漏水検知システムを選択することとなると考えられる。

ドレーン式漏水検知システムは、先に述べたように、漏水量と浸出水の毒性について判断できる利点があるが、漏水位置がブロックでしかわからないため、補修のための作業量が多く補修コストがかかる。また、排水パイプやホースの閉塞を確認できないばかりでなく、閉塞が生じたパイプ交換ができないため、供用期間 20 年を保証できるか疑問である。また、ドレーン式漏水検知システムは、原理的に非常に単純であるが、それゆえ技術的進歩の余地が少ないと考えられる。

一方、電氣的漏水検知システムは、ドレーン式漏水検知システムと比較して、漏水量や浸出水の毒性が検知できない欠点はあるが、最新の計測技術を導入すれば測定精度、コスト、適用条件の拡大に対する技術革新が期待できる。

電氣的漏水位置検知方法は、ドレーン式漏水検知システムと比較して技術的發展性に優れているが、廃棄物処分場の電氣的構造に影響を受ける。後程、3 章で述べるが、廃棄物処分場の電氣的構造は、遮水シートの電気抵抗や静電容量と、遮水シート上に設置される保護層によって構成されている。処分場に電氣的漏水検知システムを設置する場合、敷設される遮水シートを電気抵抗が大きく静電容量が小さい製品を用いれば、遮水シートの電気特性に起因する測定障害を予防できる。しかし、処分場の電氣的構造に起因する他の 1 つの測定障害となる土質材料やコンクリート製など導電性の保護層が設置された場合の対処方法など以下の問題点が残されている。

- ①土質材料やコンクリートを用いた保護層を経由する電流の影響を受ける。
- ②測定精度を確保するためには、多数の点電極を狭い間隔で処分場全体に配置せねばならず、システム構築コストが割高になる。
- ③点電極にそれぞれ測定ケーブルを接続する方法では、システムの保守点検ができず、検知システムの供用年数約 20 年を保証できない。

従来の電氣的漏水検知システムの中にも、土質材料を用いた保護層に流れる電流の影響を受けずに計測できるものもある。たとえば、パルス法は、遮水シートから漏れてきた浸出水で不織布が濡れることによって生ずる電気特性の変化を測定対象としており、導電性の保護層の存在は測定障害とならない。しかし、この方法は、不織布を常時乾燥状態に管理せねば機能しないため、電気技術だけで対処できない面倒な課題を抱えている。

従来の漏水検知システムでは、測定精度を確保するために廃棄物処分場内外に点電極を狭い間隔で多数配置する必要がある。この方法では、それぞれの電極ごとに測定ケーブ

ルを接続せねばならないことと、電極ごとに1チャンネル割当てねばならず、システム構築コストが割高になる。また、点電極に測定ケーブルを接続する方法では、廃棄物の埋立てに伴って、測定ケーブルが廃棄物に埋まるため、測定ケーブルの維持管理ができず、漏水検知システムの供用期間約20年を保証できない。

以上に述べたように、従来のドレーン式漏水検知システムも電氣的漏水検知システムも、現状のままでは十分な精度で供用年数20年を保証することができないと判断される。

しかし、技術的發展性に乏しいドレーン式漏水検知システムと比較すると、電氣的漏水検知システムは、①～③に挙げたそれぞれの課題に対して、個々にもしくは全てを電気回路技術で十分対処できる可能性があると考えられる。

2.3 漏水検知システムに求められる特性

電氣的漏水検知システムは、漏水位置の検知精度ばかりでなく、電気を処分場内に印加するため、感電事故など安全についての配慮が欠かせない。また、漏水位置の検知精度と検知限界である漏水のサイズについても、補修作業や補修を終了するまでの周辺への浸出水漏洩量を規制するために、検知すべき漏水の大きさが規定される。

(1) 漏水量から要求される精度

漏水位置の検知精度と検知限界である漏水のサイズは、浸出水に含まれる有害物質の毒性の強さなどについて十分調査結果が得られていないため、浸出水の許容漏洩量がどの程度かわからないため、単純計算で設定することができない。

ところで、総理府と厚生省の命令で、処分場の構造を遮水 2 重シートにするか、1 重の遮水シートに不透水性の下地層を設けるよう定めている。遮水シートの下地として、厚さ 50cm かつ透水係数 1.0×10^{-6} cm/sec ($=10 \times 10^{-9}$ m/sec) 以下に施工した粘土層か、厚さ 5cm かつ透水係数 0.1×10^{-6} cm/sec ($=1 \times 10^{-9}$ m/sec) 以下に施工したアスファルト層などをあげている。

このような処分場の構造で、遮水シートの損傷から漏れる浸出水が最大となる条件は、処分場の基礎地盤が高透水性の砂層で、2 重シートが同時に破損したときにと考えられる。

重機による廃棄物埋立てによる遮水シートの損傷は、埋立て初期に起こると考えられるから、損傷に作用する浸出水の水頭は、遮水シートの上に設けられた砂の保護層厚 50cm とする。ところで、廃棄物最終処分場の構造指針において、遮水シートに揚圧力が作用しないよう定められている³⁴⁾。また、地下水位面は、遮水シートの近傍付近にある場合も考えられるが、ここでは、遮水シートから 1 m 下に地下水位面があると仮定する。

処分場の地盤である砂層の透水係数 k を 1.0×10^{-2} cm/sec とし、浸出水の水頭が砂の保護層厚 50cm が作用し、遮水シートの損傷から 1m ($=100$ cm) 下の地下水面に流入する浸出水について検討する。

地下水位面が浸出水の流入によって変化しないと考えれば、動水勾配 i は 0.5 ($=50/100$) となるから、遮水シートにあいた 100cm^2 ($=10\text{cm} \times 10\text{cm}$) の漏水から流出する浸出水の流速 v は、 $v=ki$ から 0.5×10^{-2} cm/sec と計算できる。漏水検知システムを常時計測していれば、2 時間あれば遮水シートの掘削調査と応急処置が可能と考えられる。この間における周辺への浸出水漏水量 Q が、5 l ($=2500\text{cm}^3/\text{hour}=0.694\text{cm}^3/\text{sec}$) 程度である。浸出水の毒性の強さについてどの程度リスクを考慮するかにもよるが、この程度の流出量であれば処分場周辺への影響を最小に抑えられると考えられる。

この漏水量に相当する遮水シートの損傷の大きさは、 $139\text{ cm}^2(=0.694 / 0.5 \times 10^{-2})$ と大雑把に計算できる。したがって、本研究においては、 $100\text{ cm}^2(=10\text{cm} \times 10\text{cm})$ の大きさまで検知できる精度を目標とする。

(2) 漏水検知の位置的精度

廃棄物処分場における遮水シートに生じた漏水の掘削調査は、廃棄物が埋立前の状態でも、保護層が 50cm 設けられているためバックホーなどの重機の使用が欠かせない。

たとえば、遮水シートの漏水箇所の具体的な掘削調査方法は、埋め立てられた廃棄物が浅い場合には、バックホーによっておおよそその漏水箇所を機械掘削し、遮水シートの近くは遮水シートを傷つけないよう人力掘削で調査する。また、埋め立てられた廃棄物が深い場合には、遮水シートの漏水は深礎掘削によって調査する。一般的な建設工事に広く使用されている深礎の直径は、2.5m～3.0m である。

遮水シートの損傷が浅い場合と深い場合の掘削調査方法から、漏水位置の検知精度は、バックホーのバケット幅約 1m よりも小さい精度であってもあまり意味がないし、深礎の直径よりも精度が低くては問題とならない。

したがって、漏水位置に対して±1m の精度であれば、十分深礎内に漏水部をとらえることが可能となるから、漏水の位置的な測定精度は、±1m が必要と考えられる。

(3) 電氣的漏水検知システムの分解能

電氣的漏水検知システムの複数の漏水に対する分解能は、処分場内に設置する電極間隔と測定原理に深く関係している。電極間隔は、漏水位置精度や漏水規模を推定する場合重要なファクターで、電極間隔が狭いほど精度が向上する。しかし、既往の研究において主流となっている処分場内に点電極を等間隔に満遍なく配置する方式では、電極間隔を狭めると、処分場全体カバーに要する電極数が多くなる。各電極には、それぞれ 1 本のケーブルが接続されるため、ケーブル配線量が増大するし、それぞれのケーブルを接続する電極切替器の数もそれに応じて多くなる。したがって、施工に要するケーブルなどの材料費や配線に要する人件費ばかりでなく、測定機材のコストも上昇し実用化が困難となる。

電位測定を測定原理とする漏水検知システムの場合、複数の漏水それぞれを經由して流れる電流がある程度大きければ、それぞれの漏水周辺に生ずる電位異常を狭い間隔で設置した測定電極によって別個に検知しうると考えられる。しかし、点電極を狭い間隔で設置するのは、前述のとおり経済的な理由により採用できないため、複数の漏水を經由する電流によって生ずる電位異常の影響が重なった測定電位から漏水位置を推定することとなる。

こうした従来の漏水検知システムの測定原理では、複数の漏水に対して分解能を上げることは非常に困難である。

したがって、電氣的漏水検知システムの開発にあたっては、点電極を採用した従来の測定システムの延長ではなく線電極などの新たな電極構成を採用し、複数の漏水を經由して流れる電流の影響が重なり合わず個々の漏水を經由して流れる電流を測定する新しい測定原理を開発する必要がある。

(4) 感電事故防止から受ける制限

電氣的漏水検知システムのほとんどは、電位差測定もしくは電流測定を測定原理としている。電位差もしくは電流を計測するにせよ、計測器の感度の限界以下であれば、漏水の位置を検知できないばかりでなく、漏水の存在自体確認できない。そこで、測定対象を経由する電気経路に流れる電流を増大させるために、印加電圧を大きくする方法が電気探査で古くから行われてきた。これと同様に、漏水検知システムの場合も、測定器の限界よりも漏水周辺に生ずる電位異常や電流異常が大きくなるよう、ある程度大きな電圧を印加する必要がある。

ここで、廃棄物処分場の埋立て作業の性格について考えてみると、業務時間中常時バックホーやブルドーザーなどの重機が稼働している。このため、処分場に敷設された遮水シートに損傷が発生する危険が常にあるため、漏水検知システムの測定は常に可能でなければならない。また、遮水シートに生じた損傷の掘削調査において、損傷を発見するまで何度も計測する必要があるため、掘削調査中ならびに補修作業中であっても常時測定できなければならない。

したがって、漏水検知システムの測定中に処分場内に作業員がいても、感電事故が生じないように、印加電圧を 10V 以下に制限する必要がある。

2.4 電氣的漏水検知システムの必要性能

前述の2章および本章から、既往の電氣的漏水検知システムに欠けている性能と実用的な漏水検知システムとして必要とされる特性を勘案すると、電氣的漏水検知システムは、以下に示す①～⑧の必要性能を満たすことが求められる。

- ① 100 cm²(=10cm×10cm) の漏水個所が見つけられ、誤差範囲が±1m である。
- ② 複数の漏水でも別々に検知できる。
- ③ 斜面部にも土質材料やコンクリートなどの保護層が設けられても漏水を検知できる。
- ④ 自然電流や高調波ノイズの影響を受けない。
- ⑤ 埋め立てられる廃棄物の電気特性によらず、漏水検知が可能である。
- ⑥ 測定に危険が伴わない。(感電事故などが発生しない。)
- ⑦ 測定システムのメンテナンスが容易にでき、20年間機能を保持できる。
- ⑧ 測定システムの構築コストが低廉である。

これらの必要性能のうち、廃棄物処分場の電気構造に起因する③に対処できる実用的な電氣的漏水検知システムは、既往の研究の中には存在しない。また、①、②、④～⑧を同時に満足する漏水検知システムも既往の研究の中には存在しない。

(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) 中村隆浩, 佐藤文俊, 松下清一, 西牧均: 廃棄物最終処分場における漏水検知修復システムの開発, 第7回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.661-664, 1996.
- 3) U.S.EPA: Leak Detection for Landfill Liners,
<http://www.epa.gov/swertio1/products/intern/leakInfl.htm>, pp.13, 1998.
- 4) Koener, R.M.: *Design with Geosynthetics*, 3rd ed., Prentice-Hall Inc., pp.578 - 594, 1994.
- 5) 山崎宣悦: 電流測定方式による漏水検出システムの検出限界, 第11回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.991-993, 2000.
- 6) 物理探査学会編: 図解 物理探査, 物理探査学会, pp.194-195, 1989.
- 7) 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.141-142, 1979.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 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回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.369-372, 1994.
- 12) 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.141, 1979.
- 13) 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.204, 1979.
- 14) 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.
- 15) 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遮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.
- 16) Nosko, V., 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.
- 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.233 - 234, 1979.
- 18) 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.
- 19) 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

- 遮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.
- 20) Nosko, V., 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.
 - 21) 物理探査学会編:図解 物理探査, 物理探査学会, pp.216, 1989.
 - 22) Darilek,G.T. and Para,J.O.: The Electrical Leak Location Method for Geomembrane Liners, Report No. EPA/600/2-88/035, Jun. 1988.
 - 23) Darilek, G.T. and Miller,L.V.: Comparison of Dye Testing and Electrical Leak Location Testing of a Solid Waste Liner System, *Proc. of the 5th International Conference on Geosynthetics* , Vol.1, pp.273-276, 1998.
 - 24) 西山勝栄, 伊藤洋, 木内幸則, 古谷野直行: 処分場遮水シート機能管理システムの検知精度について, 土木学会第 52 回年次学術講演会論文集, pp.448-449, 1997.
 - 25) 荒井健: 管理型終末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.
 - 26) 阿部善右衛門, 木下敏夫:計測回路, 朝倉書店, pp.188-190, 1980.
 - 27) 後藤憲一, 山崎修一郎: 詳解電磁気学演習, 共立出版株式会社, pp.172, 1973.
 - 28) de Meerleer, F.: 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.
 - 29) 岡村康弘, 有松年治, 佐々木潤治, 大野文良, : 廃棄物最終処分場における漏水検知用しゃ水シート及び漏水検知システム(電圧比率法)の開発, 第7回廃棄物研究発表会講演論文集, pp.651-653, 1996
 - 30) Stammeler, M. and Bol, J. :Evaluation of methods for monitoring landfill barriers, *International TNO Conference on Contaminated Soil*, pp.477-500, 1985.
 - 31) Borns, D. J. :Geomembrane with incorporated optical fiber sensors for geotechnical and environmental applications., *Proceedings of the International Containment Technology Conference*, pp.1067-1073, 1997.
 - 32) Troxler Electronic Laboratories, Inc. :The Troxler Sentry 200 Environmental Moisture Monitor System Page. <<http://troxlerlabs.com>>, 1998
 - 33) Rumer, Ralph R. and Mitchell, James K. August: Assessment of barrier containment technologies., *International Containment Technology Workshop, Baltimore, Maryland*, pp. 355-394, 1995.
 - 34) (社)全国都市清掃会議: 廃棄物最終処分場指針解説, pp.75-90, 1988.

3. 廃棄物処分場の電気特性

管理型廃棄物最終処分場は、基本的に遮水シートを敷設して建設されることは先に述べたとおりである。既往の研究において、遮水シートは完全な電氣的絶縁体と仮定して、種々の電氣的漏水検知システムが開発されている。しかし、個々の研究論文を参照する限り、遮水シートの電気特性を把握した上で研究がなされていないように思える。また、遮水シート上に設けられる保護層や搬入道路などが、廃棄物処分場の電氣的構造にどのような影響を与えているか十分な考察がなされていないと考えられる。

本章は、これらの要因が廃棄物処分場の電気特性に与える影響について検討し、次章以降の新たな漏水検知システムを開発する上での電気学上の基礎を示す。

3.1 等価回路

図-3.1 のように、2重に敷設された遮水シートか、図-3.2 のように、不透水性の粘土層と遮水シートを組み合わせが最近では一般的な廃棄物処分場の遮水工である。図-3.1 と図-3.2 に示した保護層として、現状では遮光マットが敷設するよう定められている¹⁾。しかし、遮光マットは、土質材料やコンクリートを用いた保護層と比較して、耐久性が劣ると考えられる。この対策として、遮水シートの保護層として土質材料やコンクリートが、今後遮光マットの代わりに広く利用されると予想される。また、見落とされがちであるが、廃棄物搬入道路は、特別な絶縁処理をほどこさないと、電氣的に遮水シート上下を接続する経路を形成する。

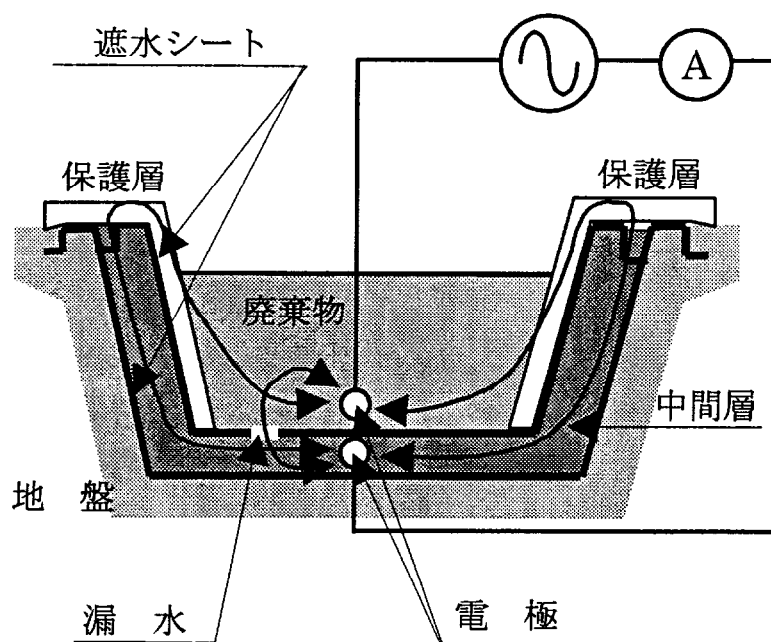


図-3.1 2重シートの処分場

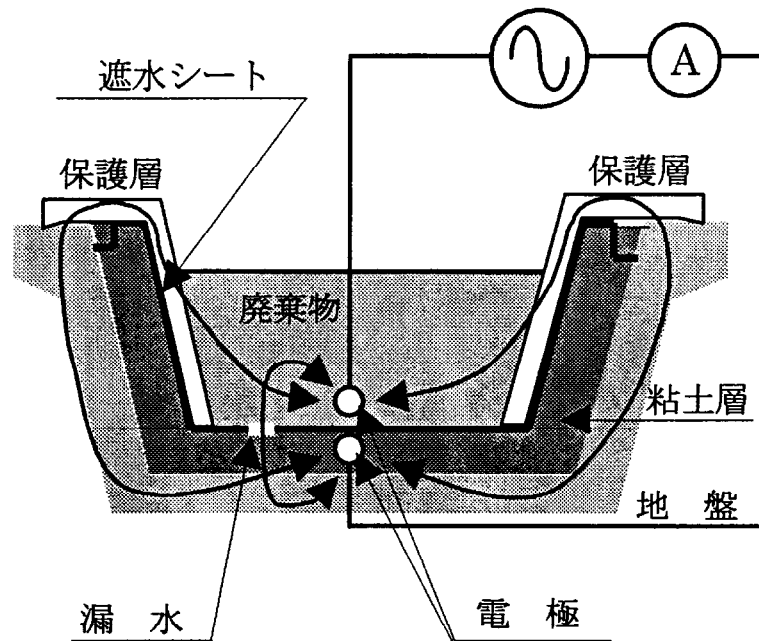


図-3.2 粘土層とシートを組合せた処分場

ここで、図-3.1 に示した遮水シートが 2 重に敷設された処分場の廃棄物側の第 1 層遮水シートに漏水がある場合と、図-3.2 に示した遮水シートに漏水がある場合について考える。電圧を印加する位置は、それぞれの図に示すとおりとする。それぞれの図において、電極間に印加する電圧は交流とする。

ところで、電氣的漏水位置検知システムでは、電気抵抗の大きい遮水シートに生じた損傷や施工不良部周辺に生ずる電氣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。

これらの図に示す電極位置の場合、電極間に流れる電流の経路は、それぞれの図-3.1 と図-3.2 に赤矢印と遮水シート上下近傍の状態を示した図-3.3 のように、以下の 3 つに分けられる。

- ①漏水に流れる電流
- ②保護層および搬入道路に流れる電流
- ③遮水シートに流れる電流

遮水シートを介して流れる電流は、電流が廃棄物や中間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、遮水シートの漏水を流れる電流も、電極から大きく拡がる電気経路のうち最も電気抵抗が小さくなる経路を主に流れるものと考えられる。

ここで、図-3.1～図-3.3 に示した漏水を経由する回路、保護層を経由する回路、遮水シートを経由する回路における、それぞれの電気抵抗成分を以下の記号で示す。

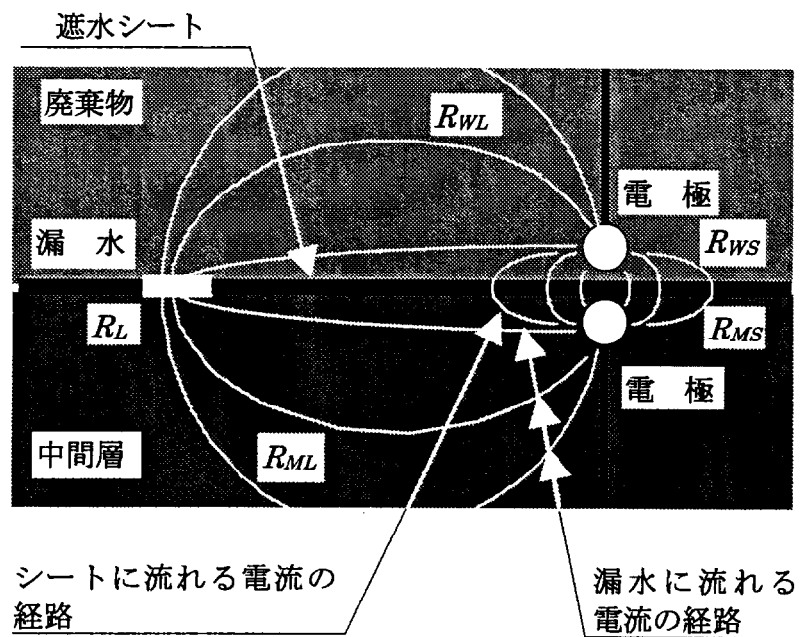


図-3.3 漏水周辺に流れる電流の経路

(漏水を経由する回路)

- R_{WL} : 廃棄物の電気抵抗
- R_{ML} : 中間層もしくは地盤の電気抵抗
- R_L : 漏水の大きさに相当する電気抵抗

(保護層を経由する回路)

- R_{WP} : 廃棄物の電気抵抗
- R_{MP} : 中間層もしくは地盤の電気抵抗
- R_P : 保護層および搬入道路の電気抵抗

(遮水シートを経由する回路)

- R_{WS} : 廃棄物の電気抵抗
- R_{MS} : 中間層もしくは地盤の電気抵抗
- R_S : 遮水シートの電気抵抗
- C : 遮水シートの静電容量

(電極表面の電気抵抗)

- R_W : 廃棄物の電気抵抗
- R_M : 中間層もしくは地盤の電気抵抗

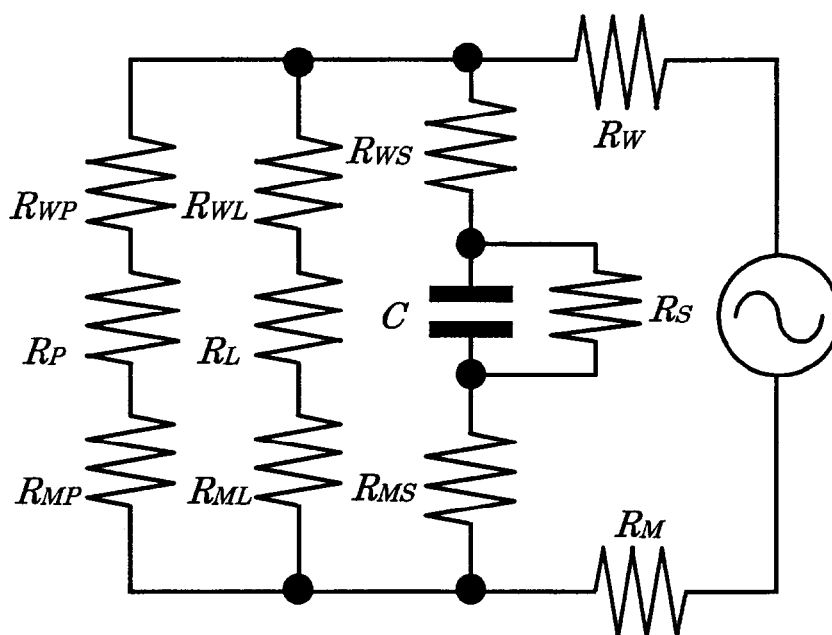


図-3.4 漏水のある処分場の等価回路

以上のパラメータを用いて、処分場の電気的特性は、遮水シートが1重もしくは2重に関わらず模式的に図-3.4 の等価回路に示される。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保護層ならびに中間層もしくは地盤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。

すなわち、電気的漏水検知システムとは、処分場内に配置した測定電極によって、漏水の大きさに相当する電気抵抗 R_L を経由して流れる電流によって生ずる変化を測定する一連の手法と解釈することができる。

ここで、図-3.4 の等価回路を検討すると、漏水の大きさに相当する電気抵抗 R_L を経由して流れる回路と並列に遮水シートを経由して流れる回路と保護層を経由して流れる回路があることが分かる。漏水以外のこれらの回路を経由して流れる電流は、漏水検知の阻害要因である。

電気的漏水検知システムで高感度かつ高精度の測定結果を得るためには、漏水を経由する回路の電気抵抗が小さく、それ以外の電気抵抗が大きくなければならない。逆に、漏水を経由する回路の電気抵抗よりもその他の回路の電気抵抗が小さいと、漏水を経由して流れる電流が相対的に小さく、漏水検知が困難となる。

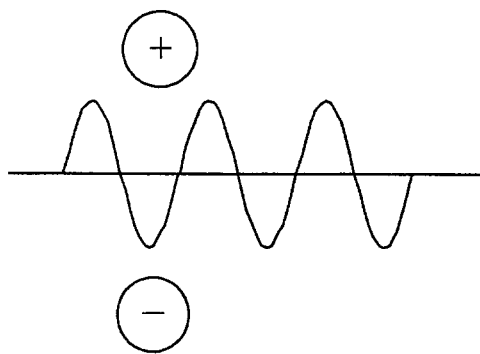


図-3.5 正弦波電圧

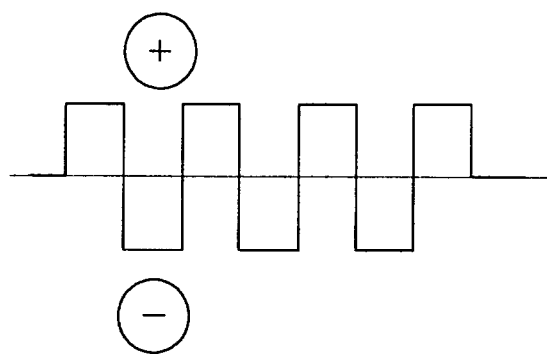


図-3.6 矩形波電圧

3.1.1 遮水シートを経由する回路

(1) 交流電源の場合

廃棄物処分場に敷設される遮水シートは、電氣的絶縁体と考えられている合成ゴムや合成樹脂である。絶縁体を挟んで上下に図-3.5 に示す交流電圧 v を印加すると、絶縁体の静電容量 C 、角周波数 ω 、時間 t 、電圧の波高 A を用いて、絶縁体表面に帯電する電荷 q は、式(3.1)で示される²⁾。

$$q = Cv = C A \sin \omega t \quad (3.1)$$

式(3.1)で示される電荷の時間微分は電流であるから、絶縁体を介して流れる電流 i は式(3.2)で示される。

$$i = \frac{d}{dt} Cv = \frac{d}{dt} C A \sin \omega t = \omega C A \cos \omega t \quad (3.2)$$

式(3.1)と式(3.2)を比較すると、絶縁体を介して流れる電流は、印加される電圧よりも 90° 進み位相であることが異なるが、電圧と同じ周期で流れる電流であることがわかる。

遮水シートが完全な絶縁体であれば、遮水シートを介して流れる電流は、式(3.2)で示される電流だけであるが、遮水シートに導電性物質が含有されていれば、図-3.4 の R_s を経由する回路が形成される。

これらの遮水シートに交流電圧を印加した場合に生ずる電流成分は、前節で述べたように、漏水検知を阻害する要因である。しかし、遮水シートの静電容量 C を介して流れる電流成分は、印加電圧の位相と異なるため、既知の印加電圧の位相に基づいて除去することが可能である。一方、遮水シートに抵抗成分 R_s が存在する場合には、漏水や保護層を経由して流れる電流と同相になるため、位相に基づく除去はできない。

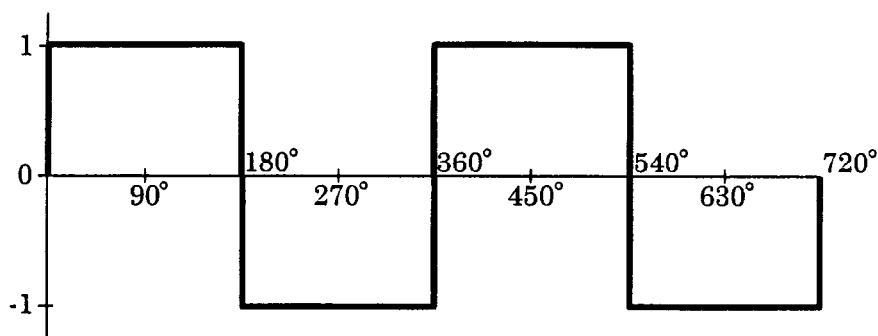


図-3.7 フーリエ級数展開した矩形波

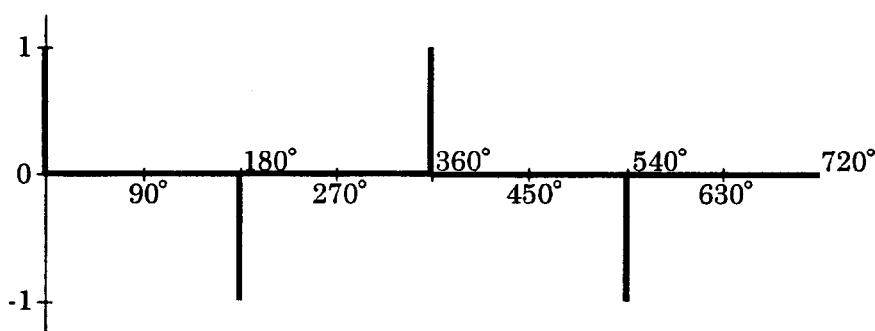


図-3.8 矩形波の微分結果

(2) 直流電源の場合

図-3.4 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-3.4 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。図-3.4 において、交流電源を直流電源に変更すると、遮水シートを介して流れる電流成分がなくなり測定上有利となるはずであるが、直流電圧を大地に印加すると、電極表面で電気2重層により電流が安定せず測定に支障をきたす³⁾。

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、図-3.6 に示す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(3.3)で示される⁴⁾。

$$f(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{(2i-1)\pi} \sin((2i-1)\omega t) \quad (3.3)$$

式(3.3)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、波高が1の矩形波電圧 $v (=f(t))$ が印加された遮水シート面に帯電する電荷 q は、遮水シートの静電容量 C を用いて式(3.4)で示される。

$$q = Cv = C \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{(2i-1)\pi} \sin((2i-1)\omega t) \quad (3.4)$$

遮水シートを介して流れる電流 i は、式(3.4)に示す遮水シートに帯電する電荷 q の時間微分値となる。

$$i = \frac{dq}{dt} = C \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4\omega}{\pi} \cos((2i-1)\omega t) \quad (3.5)$$

式(3.5)から、交替直流であっても、遮水シートの静電容量成分によって遮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。図-3.7は、角周波数 ω を $\pi/180$ (rad/sec)とした式(3.3)で示される矩形波である。一方、式(3.5)で示される電流は、静電容量 C を1ファラドとすると図-3.8に示すようになる。この波形は、非常にピーキーではあるが周期性がある。この特性から測定精度を阻害する自然電流や高調波電流などノイズ成分を除去することも可能と考えられるが、回路上の取り扱いとしては面倒である。

また、遮水シートに電気抵抗成分 R_s が存在する場合には、交流電圧が印加された場合と同様に、遮水シートを経由して流れる電流成分を除去することはできない。

ところで、図-3.4の等価回路のように、単一波長の交流電源を使用すると、遮水シートを介して静電容量に相当する成分があるが、この電流は恒常的な交流電流となることがわかる。図-3.4の等価回路において、漏水に流れる電流の経路と遮水シートを介して流れる経路を比較すると、漏水を流れる経路は、電気抵抗だけで構成されているのに対して、遮水シートを介して流れる経路には遮水シートの静電容量 C を介して流れるから、それぞれの経路を経由して流れる電流は、同波長であるが位相が異なる。また、地盤に電圧を印加すると、電流および電位測定で、自然界の自然電流や電磁波の影響と考えられる高調波ノイズ成分も混入する。

したがって、交流電源を用いる方が直流電源や矩形波電源を用いるよりも安定した測定が可能で、位相検波回路を採用することにより、波長、位相印加電圧と電流の位相差から、自然電流などノイズ成分も除去可能であるため、電氣的漏水検知システムでは交流電源を採用する方が有利と判断される。

3.1.2 保護層を経由する回路

図-3.2 において，遮水シートは1重であるから，処分場外は大地となっている．大地の比抵抗は，金属や黒鉛などよりも大きい，電界が大きく広がるため，図-3.4 の等価回路における電気抵抗 R_{ML} ， R_{MP} ， R_{MS} は小さく，遮水シート下の電極位置によって生ずる電気抵抗の変化も小さいと考えられる．このように遮水シートの下側の電気抵抗が小さい条件で，導電性保護層および搬入道路を経由する回路の電気抵抗について考える．保護層の材料や厚みや，形状を以下のように仮定すると，保護層を経由する回路の電気抵抗は，次のように概算できる．

図-3.9 に示した電気抵抗算定用モデル処分場において，通常の処分場が底部に浸出水が常時存在することを考慮し，底部保護層の電気伝導度（比抵抗の逆数）は，処分場で観測された電気伝導度 3mS/cm とした．斜面部保護層の電気伝導度は，湿った砂の比抵抗⁵⁾40

（保護層の諸元）

材 料	： 湿った砂
比 抵 抗（ σ ）	： $40\ \Omega\text{m}$ （斜面部）， $0.3\ \Omega\text{m}$ （底部）
保護層の厚み（ l ）	： 10cm
処分場の形状（ b_1 ）	： 半径 50m の円形
底部の形状（ b_2 ）	： 半径 35m の円形
電極の諸元（ a ）	： 半径 25cm，高さ 10cm

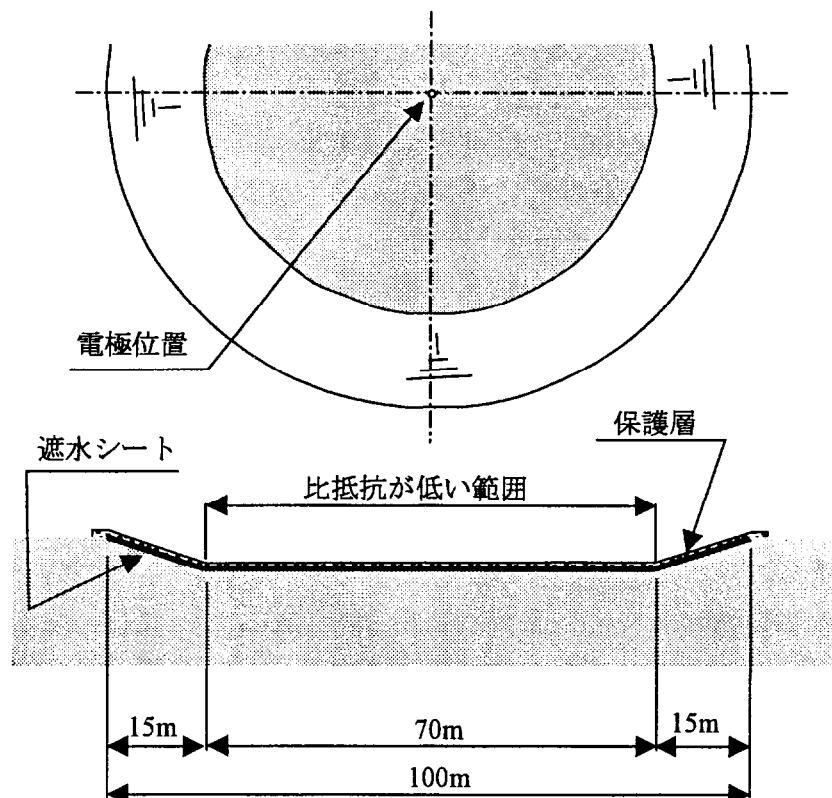


図-3.9 保護層の電気抵抗算定用モデル処分場

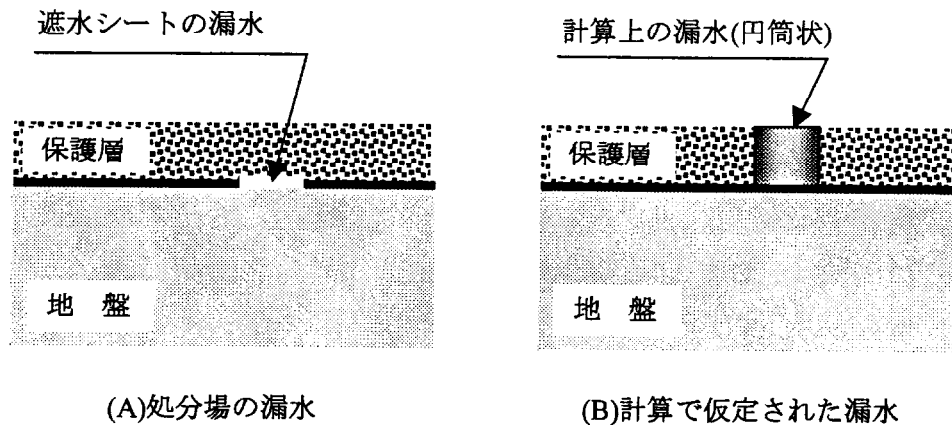


図-3.10 印加電極と漏水間の境界条件の差異

$\Omega \text{ m}$ の逆数とした。円形処分場の中心に置いた印加電極から底部外周部までの電気抵抗 R_1 と、処分場底部外周部から処分場外周部までの電気抵抗 R_2 は、下に示す 2 式で計算できる⁶⁾。

$$R_1 = \frac{1}{2\pi\sigma l} \log \frac{b_2}{a} = \frac{1}{2\pi \times 0.3 \times 0.1} \log \frac{35}{0.25} = 26 \Omega \quad (3.6)$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi\sigma l} \log \frac{b_1}{a} = \frac{40}{2\pi \times 0.1} \log \frac{50}{35} = 23 \Omega \quad (3.7)$$

処分場中央の電極から処分場外周部までの電気抵抗は、 R_1 と R_2 の和であるから 49Ω ($= R_1 + R_2$) となる。

一方、図-3.9 の保護層を半無限の広がりと仮定して、処分場の中央の電極からの距離 d (5m) 離れた半径 b_3 (5cm) の図-3.10 に示す円柱状電極 (高さ 10cm) を漏水とみたとて、この間の電気抵抗 R_3 を計算すると、以下のとおりとなる⁷⁾。

$$R_3 = \frac{1}{2\pi\sigma l} \log \frac{d^2}{ab} = \frac{1}{2\pi \times 0.3 \times 0.1} \log \frac{5^2}{0.25 \times 0.05} = 40 \Omega \quad (3.8)$$

処分場の中央部の電極から 5m 離れた漏水までの電気抵抗 40Ω と保護層の電気抵抗 49Ω を比較すると、漏水までの電気抵抗は、保護層の電気抵抗の 82% ($= 100 \times 40 / 49$) に過ぎないことがわかる。それぞれの電気抵抗に流れる電流の比は、漏水と保護層を経由する電気抵抗の比 (82%) の逆数となるから 1.23 ($= 1/0.82$) である。すなわち、漏水に流れる電流は、保護層に流れる電流の 23% 増でしかない。

この計算は、漏水の大きさを半径 5cm (直径 10cm) と比較的大きな漏水について行ったが、漏水には施工不良部のように比較的小さなものもある。保護層の電気抵抗は、漏水の有無によらず変わらないため、施工不良部のように小さな漏水の電気抵抗と比較すると、保護層を経由する回路の電気抵抗の方が相対的に小さくなり、漏水経由の電流が検知しにくくなる。

3.2 遮水シートの電気特性

前節の等価回路の説明において、導電性の保護層や遮水シートの低い電気抵抗が漏水検知の障害となることを示した。土質材料やコンクリートを用いた保護層は、現状では広く使用されておらず、問題となっていない。現状で主流の劣化防止用の遮光マットは、導電性ではないため、測定障害とならない。しかし、遮水シートに導電性がある場合には、電氣的漏水検知システムは測定不能となる。

遮水シートは、電気材料ではないため、各種シートの電気特性は公表されておらず、電氣的漏水検知システムの研究者も遮水シートの電気特性を把握していない。そこで、筆者は、廃棄物処分場に使用されている遮水シートの電気特性を独自の方法により試験した。

日本の管理型一般廃棄物最終処分場において、1990年代前半頃まで EPDM (=Ethylene Propylene Diene Monomer)が広く用いられてきたが、現在 HDPE (=High Density Polyethylene) や TPO (=Thermo Plastic poly Olefine) 製遮水シートが広く用いられている。

一方、管理型産業廃棄物最終処分場には、PVC (=Poly Vinyl Chloride) 製遮水シートが使用されている。また、遮水シートの厚みも一般に 1.5mm 以上のものが普通である。

TPO 遮水シートは、遮水シートの接合に熱融着ができる EPDM 遮水シートの一種とする見方がある。しかし、EPDM 遮水シートは、合成ゴム的一种で、PVC や HDPE 遮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特性がある。したがって、EPDM 遮水シートと TPO 遮水シートを厳密に分けて考える。

3.2.1 遮水シートの電気抵抗と静電容量

遮水シートの電気特性を測定する方法は、電気材料でないこともあり、JIS など公的に定められていない。そこで、筆者は、各種遮水シートの電気特性を、図-3.11 に示すように、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、供試体の遮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。試験に使用した遮水シートの厚みは、すべて 1.5mm の製品である。

表-3.1 に各種遮水シートの電気特性を示す。表-3.1 から、EPDM, HDPE および PVC 遮水シートをそれぞれ比較すると、EPDM 遮水シートの電気抵抗がそれ以外の遮水シートと比較して非常に小さいことがわかる。また、EPDM 遮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 遮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 $8.5 \times 10^2 \text{M}\Omega / 120 \text{cm}^2$ 、静電容量が $20.71 \text{nF} / 120 \text{cm}^2$ であった。

これに対し、PVC や HDPE 遮水シートの電気特性は電気抵抗がテスターの測定限界である $10 \text{M}\Omega / 120 \text{cm}^2$ 以上であり、静電容量が約 $1.5 \text{nF} / 120 \text{cm}^2$ である。遮水シートの電気抵抗は、直流のテスターで計測した結果でも、測定限界の $280 \sim 200 \text{M}\Omega / 120 \text{cm}^2$ 以上であった。

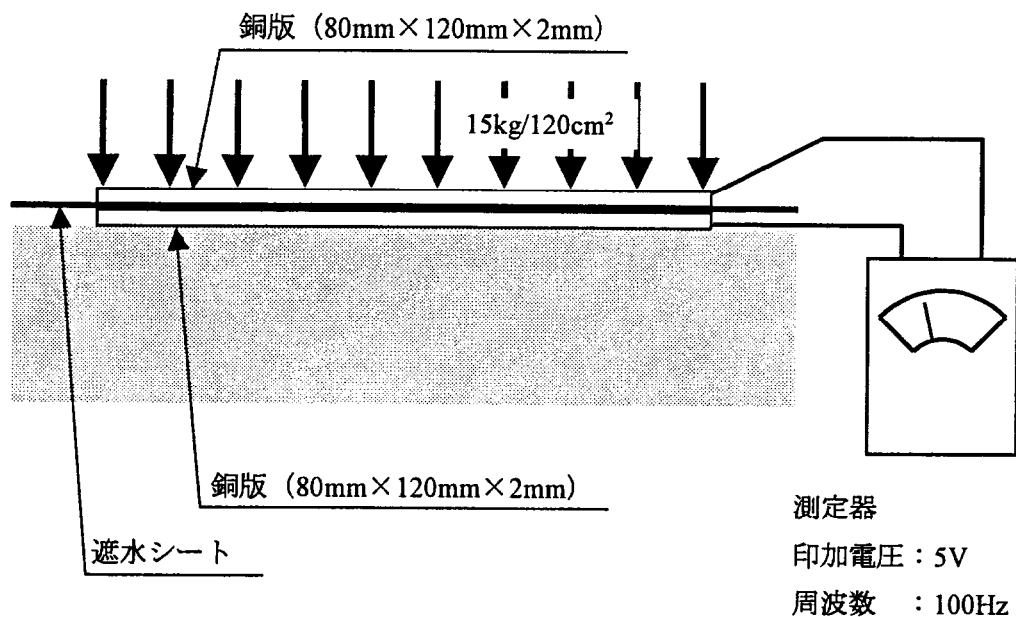


図-3.11 遮水シートの電気特性試験

PVC や HDPE の遮水シートは、電極と遮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 遮水シートの場合には $5.4 \times 10^{-4} \text{M}\Omega / 120 \text{ cm}^2$ と電気抵抗が非常に小さくなる。すなわち、処分場の遮水シートの保護砂が湿潤状態にある場合にはA社の EPDM 遮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 遮水シートの1万分の1程度と考えられる。

こうした遮水シートの電気抵抗の違いは、遮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%である。これが遮水シートの電気抵抗に関与しているものと考えられる。

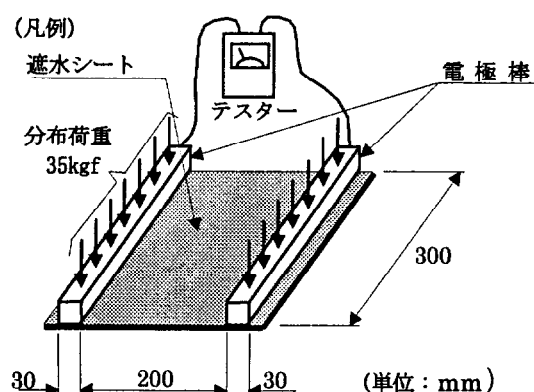
一方、TPO 遮水シートの電気特性は、PVC 遮水シートや HDPE 遮水シートの電気特性と比較してほぼ同等の特性を示す。この理由は、TPO 遮水シートは、ポリエチレンやポリプロピレンの混合物（カーボンブラック含有量約 2%）に EPDM の粒子が分散した構造になっているためと考えられる。したがって、各社の TPO 遮水シートは、EPDM と称して販売されることがあるが、電気的特性からみると、HDPE や PVC などのプラスチックの遮水シートと非常に近い特性を有していることがわかる。しかし、電気抵抗が大きい合成樹脂系の遮水シートであっても、配合される材料中に導電性の高いカーボンブラックなどの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と考えられる。

表-3.1 各種遮水シートの電気特性

種 類	電気抵抗 ($M\Omega/120cm^2$)	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
TPO (G 社)	10 以上	0.97	乾燥
	10 以上	1.15	湿潤
TPO (H 社)	10 以上	2.39	乾燥
	10 以上	2.66	湿潤
TPO (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

表-3.2 導電性 HDPE 遮水シートの電気抵抗

シートの種類	電気抵抗 ($M\Omega/30cm$)	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
TPO (H社)	10 以上	乾燥
	10 以上	湿潤



3.2.2 遮水シート表面の電気抵抗

表-3.1 の導電性 HDPE の欄に示した遮水シートは、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。この遮水シートの敷設工事において、遮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、白色の遮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遮水シートのピンホール部分を検知し、遮水シート敷設工事時の品質管理に使用されている⁸⁾。

この製品の遮水シート表裏間の電気抵抗は、表-3.1 に示すように通常の HDPE や PVC 遮水シートのように非常に大きい。しかし、表-3.2 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、 $5.8 \times 10^{-3} M\Omega/30cm$ となる。一方、同様の測定を EPDM 遮水シートについて行くと、 $34 \times 10^{-3} M\Omega/30cm$ となり、導電性 HDPE 遮水シートの電気抵抗は、EPDM 遮水シートの約 $1/6$ にすぎないことがわかる。同様の測定を、TPO や導電性 HDPE 遮水シートの白色に着色された電気抵抗の大きい遮水シート面について行くと、測定器の限界以上である $10 M\Omega/30cm$ 以上の値を示す。

以上の測定結果から、遮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。

3.2.3 遮水シートと地盤の電気抵抗の比較

遮水シートの表裏間の電気抵抗と表面抵抗が、地盤や2重シートの中間層の電気抵抗よりも大きければ電氣的漏水検知システムの測定に致命的な障害とならないと考えられる。

そこで、地盤とA社のEPDM遮水シートの電気抵抗について、図-3.12に示す土槽を用いて検討した。土槽の大きさは、19m×9mの平面形状で、遮水シート上下にφ3.2mmの裸銅線を2m間隔で設置し、遮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遮水シートを敷設し、他の1つの土槽にはF社製1.5mm厚のPVC遮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-3.3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。

土槽に設置した遮水シート上下それぞれの電極間電気抵抗を表-3.4に示す。この表-3.4の電極間電気抵抗は、遮水シート上下の電極の長さが、遮水シートの上側と下側で9mと19mと異なるため、電極10m当りに換算した電気抵抗である。EPDMおよびPVC遮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遮水シートを敷設した土槽の電極間電気抵抗がPVC遮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。特に遮水シート下側の電極間電気抵抗の差が顕著である。

ところで、PVC遮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遮水シートを敷設した土槽に設置した遮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162Ω/10mおよび地盤の電気抵抗が620Ω/10mと見なせる。

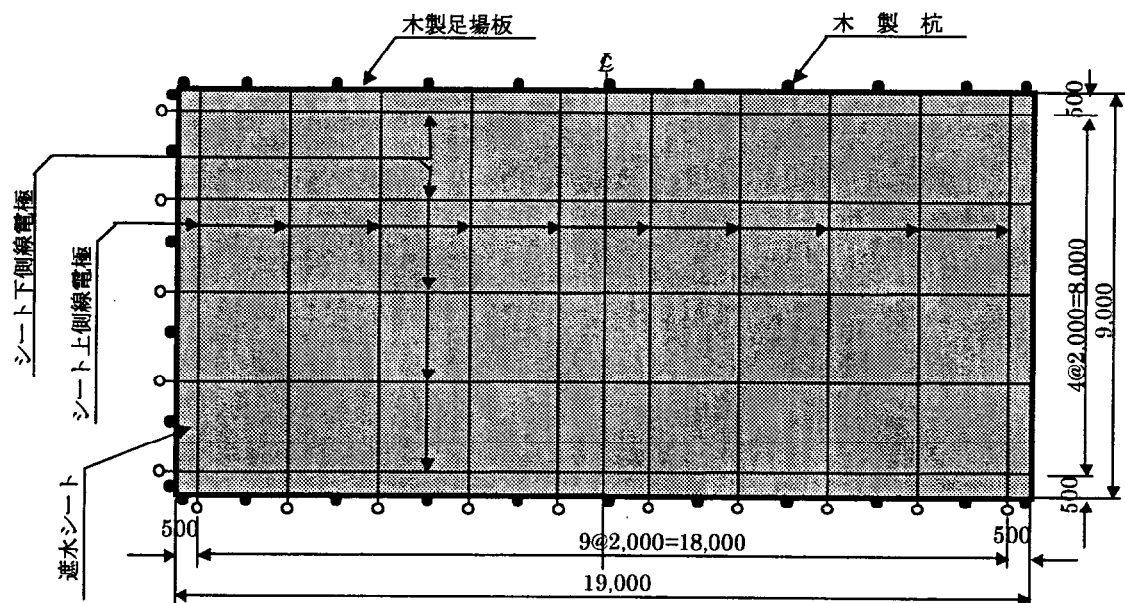
すなわち、PVC遮水シートを敷設した土槽とEPDM遮水シートを敷設した土槽において、遮水シート上下の電極間抵抗の違いは、敷設された遮水シートの電気抵抗の違いによって生じたものと考えられる。ここで、EPDM遮水シートの地盤側と砂層側の10m幅あたりの電気抵抗をそれぞれ r_D 、 r_G とする。電極間電気抵抗は、地盤もしくは砂層の電気抵抗と遮水シートの電気抵抗との合成電気抵抗であるから、以下の式(3.9)と式(3.10)が成り立つ。それぞれの式を解くことにより、EPDM遮水シートの10m幅当たり電気抵抗は、地盤側が282Ω/10m、土槽の砂層側が1150Ω/10mの値が得られる。

(遮水シート地盤側の電気抵抗)

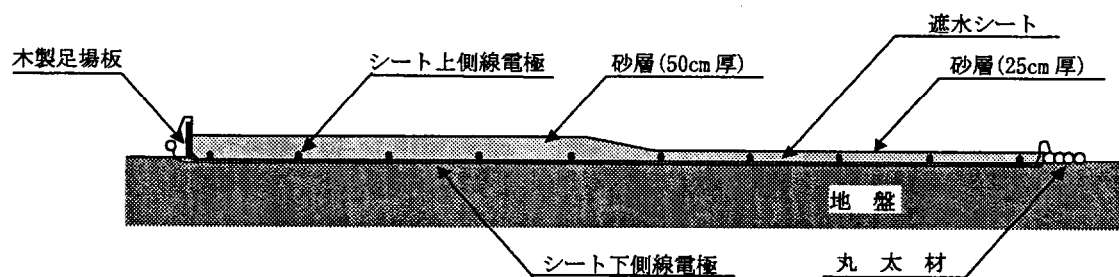
$$\frac{1}{\frac{1}{r_D} + \frac{1}{162}} = \frac{1}{142} \quad (3.9)$$
$$r_D = 1150\Omega/10m$$

(遮水シート砂層側の電気抵抗)

$$\frac{1}{\frac{1}{r_G} + \frac{1}{620}} = \frac{1}{194} \quad (3.10)$$
$$r_G = 282\Omega/10m$$



(土槽平面図)



(土槽断面図)

図-3.12 実験用土槽

表-3.3 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-3.4 遮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

以上の実験から、A社のEPDM遮水シートの電気抵抗は、遮水シート接合方向に地盤の電気抵抗の45% ($=100 \times 282/620$) しかなく、遮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。

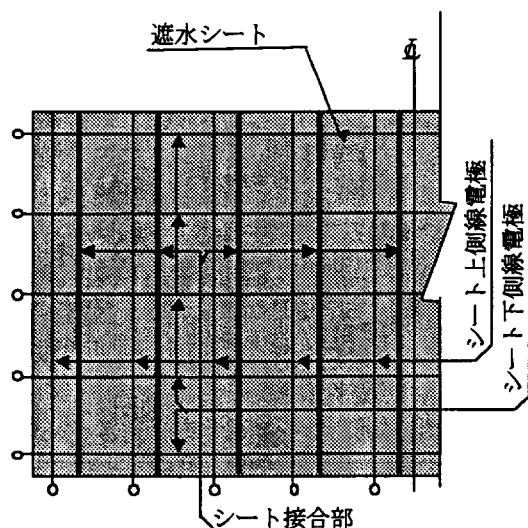
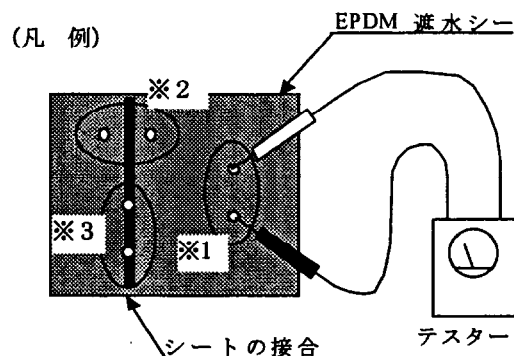


図-3.13 測定電極とシート接合部の位置関係

表-3.5 シート接合部周辺の電極間電気抵抗

測定条件	電気抵抗 ($M\Omega / 4\text{ cm}$)
接合部に平行 ※1	0.6
接合部に垂直 ※2	3.0
接合部 ※3	120



3.2.4 EPDM 遮水シートの電気抵抗の特性

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

すなわち、土槽に敷設した遮水シートは、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-3.13 に示すように土槽の短手方向に約 2 m 幅の遮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。

この遮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 遮水シートは、表-3.5 に示すように遮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、非加硫ゴムを遮水シート状に加工し、遮水シートの電気特性を試験したところ、表-3.1 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、これによって遮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、接合部の直交方法に電気が通りにくくなっていると考えられる。

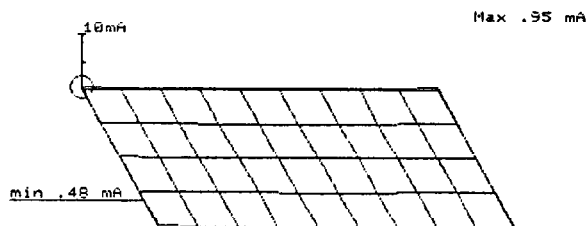


図-3.14 実験開始前の測定結果 (PVC)

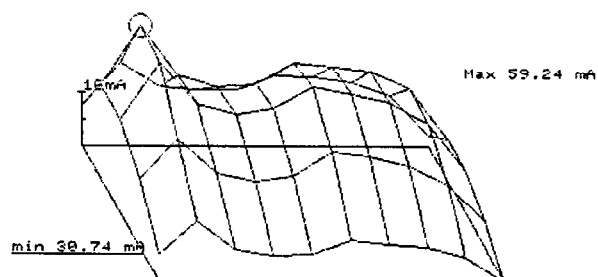


図-3.15 実験開始前の測定結果 (EPDM)

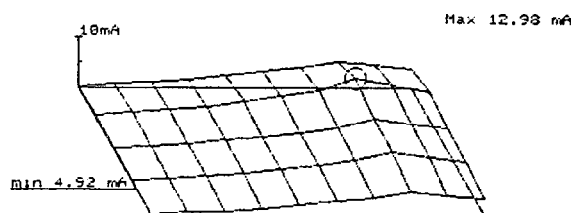


図-3.16 シート破損後の測定結果 (PVC)

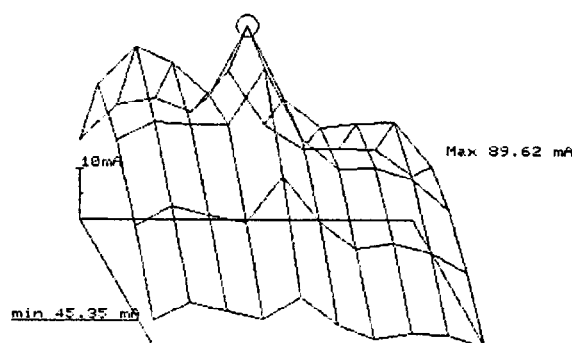


図-3.17 シート破損後の測定結果 (EPDM)

3.2.5 導電性遮水シートによって生ずる測定障害

3.2.3 と 3.2.4 で述べたように、EPDM 遮水シートの電気抵抗が地盤の電気抵抗より小さく、遮水シートの接続部に使用される接着剤によって接続部の平行方向と直交方向で電気抵抗が異なる。

そこで、図-3.12 に示す土槽を用いて行った電氣的漏水検知の実験結果を示す。実験に使用した土槽は、3.2.3 において述べたように、EPDM および PVC 遮水シートを敷設して2つ製作した。これらの土槽の上に 20t クラスのブルドーザを走行させるとともに連続して方向転換させ、その前後で漏水検知システムによる測定を行った。

図-3.14～図-3.17 に示す測定結果は、図-3.12 に示した実験土槽の遮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-3.14 と図-3.15 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-3.15 は、PVC 遮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-3.15 に示す EPDM 遮水シートを敷設した土槽の測定結果は、遮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、電流の大きさも漏水の存在を示すような傾向がみられる。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遮水シートの状態を調査したが、遮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 遮水シートが破損した直後の測定結果は、図-3.16 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 遮水シートを敷設した土槽の場

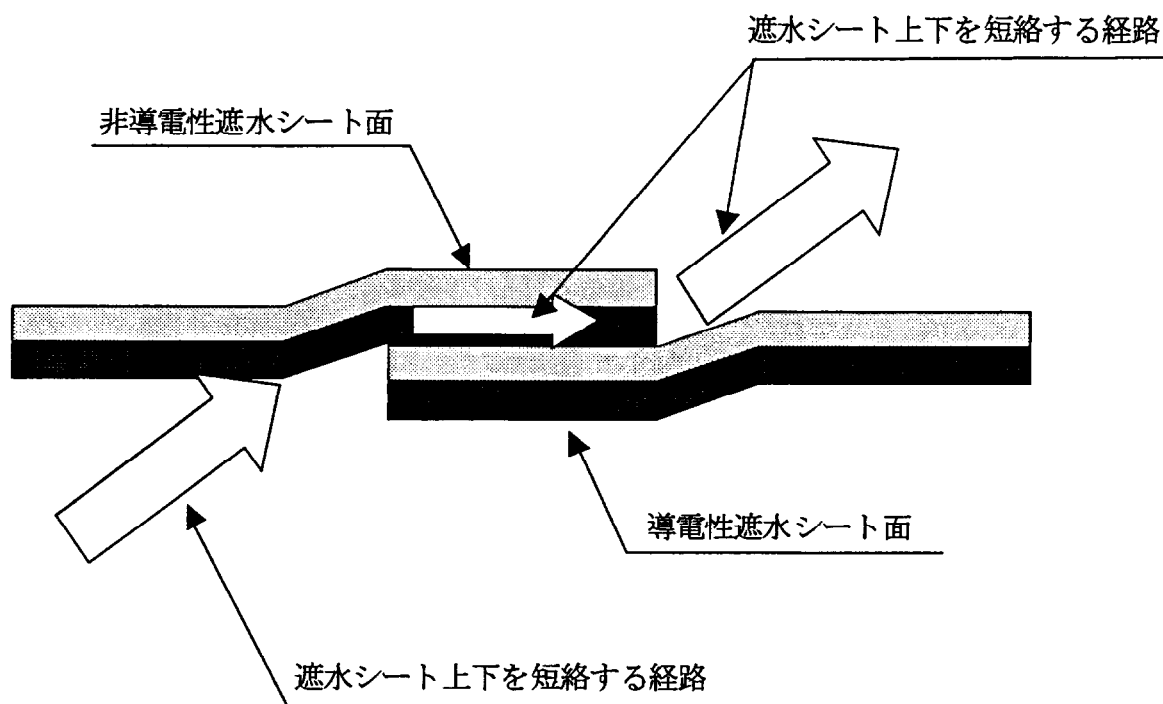


図-3.18 導電性 HDPE 遮水シートの接合部

合、図-3.15 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された。

EPDM 遮水シートを敷設した土槽と PVC 遮水シートを敷設した土槽について、損傷の発生の前で確認された電流の最大値の変化を比較すると、PVC 遮水シートの場合 13.7 倍 ($=12.98/0.95$) であるのに対して、EPDM 遮水シートの場合 1.51 倍 ($=89.62/59.24$) にすぎない。これは、EPDM 遮水シートの電気抵抗がもともと小さいため、損傷が生じることによって生ずる遮水シート上下の電気抵抗の低下が小さいためと考えられる。

この実験結果から、電気抵抗が小さく接合部の接着剤によって電気抵抗に異方性がある EPDM 遮水シートが敷設された処分場は、電氣的漏水検知システムを適用できないと考えられる。

3.2.6 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^{9)・11)}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 遮水シートのように遮水シート表裏間の電気抵抗が低い遮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示した。

一方、表-3.1 と表-3.2 に示した導電性 HDPE のように遮水シートの片面のみ電気抵抗が小さい場合、遮水シート表裏間の電気抵抗は PVC 遮水シートや通常の HDPE 遮水シ-

トや TPO 遮水シートのように非常に電気抵抗が大きい。したがって、遮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可能と考えられる。裏面側の地盤に点電極を配置する漏水検知方法は、点電極が導電性のシート面によって短絡状態となるため測定不可能である。

ただし、処分場内に点電極を設置する方法であっても、図-3.18 に示すように、遮水シートの接合部分は、遮水シートの上下を接続する電氣的な経路となるため、この部分を完全に電氣的に絶縁しなければならない。この絶縁処理が完全になされないと、鉦体流電法や電位傾度法および各種電流測定による方法も、遮水シートの接合部分を遮水シートの漏水として検知する。したがって、電氣的には十分使用できる可能性はあるが、全接合部を完全に絶縁することはまず不可能であるため、実際にはできないと考えられる。

一方、2重遮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では、遮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、電気抵抗が低い遮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遮水シートに線電極の適用は不可能と考えられる。

3.3 廃棄物処分場の電気特性のまとめ

廃棄物処分場の等価回路により、電氣的漏水検知システムにとっての測定障害について検討した。これらの測定障害となる要因のうち、各種遮水シートの電氣的特性に関する実験を行った。これらの検討結果から、判明した処分場の電気特性は以下のようにまとめられる。

- 1) 廃棄物処分場の漏水検知システムが有効に機能させるためには、遮水シートと保護層の電気抵抗が大きいことが重要である。
- 2) 遮水シートで仕切られた処分場内外に交流電圧を印加すると、遮水シートの静電容量に応じて電流が定常的に流れる。この電流の位相は、印加電圧の位相と異なることを利用して、位相検波回路など回路技術により取り除くことができる。
- 3) EPDM 遮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、電極と遮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。
- 4) シート表面が濡れた条件の場合、一般に PVC 遮水シートや HDPE 遮水シートおよび TPO 遮水シートの電気抵抗は、テスターの測定限界である $10\text{M}\Omega/120\text{cm}^2$ 以上と非常に高く、静電容量も EPDM 遮水シートと比較すると $1/1000$ 程度である。遮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く電氣的漏水検知システムに最適な遮水シートである。
- 5) 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遮水シートも存在する。遮水シートの片面のみ電気抵抗を小さくした HDPE 遮水シートは、遮水シート表裏間の電気抵抗が一般の遮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。しかし、処分場における全接合部を完全に絶縁するのは、現実には無理である。
- 6) 導電性の高い遮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、遮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。
- 7) 地盤よりも電気抵抗が小さい遮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。
- 8) 線電極を使用する電氣的漏水位置検知方法は、電気抵抗が小さい遮水シートや片面のみ電気抵抗を小さくした遮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、事前に遮水シートの電気特性の検討が不可欠である。遮水シートの電気抵抗が小さい場合、遮水シートの漏水位置検知が非常に困難となる。

このような遮水シートの特性に関連した測定障害は、事前の遮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、遮水シートの詳細な電氣特性の把握も重要と考えられる。また、新しい漏水検知システムを開発する場合には、遮水シートやコンクリートや土質材料を用いた保護層など、廃棄物処分場の電氣的構造を踏まえて開発しなければならない。

(参考文献)

- 1) 厚生省，総理府：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係わる技術上の基準を定める命令の一部を改正する命令，官報 号外第 121 号，1998.
- 2) 西巻正郎：電氣学，森北出版， pp.60, 1975.
- 3) 物理探鉱技術協会編：物理探査用語辞典，物理探鉱技術協会， pp.246-247, 1979.
- 4) 大石進一：フーリエ解析，岩波書店，1989.
- 5) 物理探鉱技術協会編：物理探査用語辞典，物理探鉱技術協会， pp.390, 1979.
- 6) 後藤憲一，山崎修一郎：詳解電磁氣学演習，共立出版株式会社， pp.171-172, 1973.
- 7) 後藤憲一，山崎修一郎：詳解電磁氣学演習，共立出版株式会社， pp.173, 1973.
- 8) Cadwallader, M. W., Barker, P. W. : Post Installation Leak Testing Geomembrane, *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol.3, pp.919-922, 1994.
- 9) 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方法，物理探査学会第 86 回（平成 4 年度春季）学術講演会講演論文集， pp.390-395, 1992.
- 10) de Meerleer, F.: 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.
- 11) 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遮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.

4. 点電極電場制御電流測定による漏水検知

電場制御電流測定とは、電氣的絶縁性を有する遮水シートなどの上下の電場を制御した状態で、絶縁体上下間に流れる電流を測定することにより電氣的異常が生じている位置を検知する方法である。この方法は、筆者が開発した全く新しい検知方法である。

電場制御電流測定は、既往の研究に多く用いられている点電極を用いた測定システムと、線電極を用いた測定システムがある。これらの電極方式によって、遮水シート上下の電場制御のやりかたと測定回路上の測定機器の構成が異なる。

本章は、電場制御電流測定の測定原理の詳細と水槽を用いた実験結果ならびにその効果について示す。

4.1 電場制御電流測定の測定原理

4.1.1 交流電源

先に直流電圧を地盤に印加した場合、電極表面にできる電気2重層の影響で電流が定常的に流れないことを示した。一方、交流電圧を地盤に印加した場合、電気2重層の影響は受けない。図-4.1は、岩盤に穿孔した2本のボーリング孔内に電極を挿入し、この間に交流電圧に印加した条件における印加電圧と電極間に流れる電流のオシロスコープによる測定結果である。

この図から、交流電圧の場合定常的に電流を地盤に流すことができることがわかる。しかし、図-4.1の上段に示した印加電圧波形がきれいな正弦波をなしているのに対して、図-4.1下段に示した電流には電磁波の影響と考えられる高調波ノイズが混入することがわかる。また、電流と印加電圧の波形を比較すると、電流の位相は、印加電圧の位相と同じであることがわかる。電極間に流れる電流の位相は、地盤を流れる過程で変化していないと考えられる。

ここで、図-4.2に示すように、遮水シート上にコンクリートや土質材料を用いた導電性の保護層を設けた処分場の内外に交流電圧を印加する場合について考える。遮水シートは絶縁体すなわち高誘電体であるから、交流電圧が印加された場合には3章で述べたように、静電容量をもつコンデンサーとして作用する。一方、処分場外に設置した電極は、電極表面積を大きくとることにより、接地抵抗は小さいものとなる。また、処分場内部は、地盤の電界の広がりと比較して非常に小さいが、処分場内に埋め立てられる廃棄物中の塩分などにより、接地抵抗は小さくなる。そこで、図-2.4における電極から遮水シートならびに漏水や保護層までの電気経路中の電気抵抗を 0Ω と見なして、図-4.3に示すように単純化して考える。

図-4.3における、保護層と漏水に流れる電流と遮水シートを介して流れる電流は、概念的に図-4.4に示される。遮水シートを介して流れる電流は、正弦波電圧にしたがって

帯電と放電を繰り返すことによって流れるから、位相がズレルことになる。

したがって、電源から流れる電流は、図-9.4 の最下段に示すように、これらの電流成分の重ね合わせとして測定される。

ところで、処分場の漏水位置を検知するためには、図-4.1 に示した高調波ノイズや遮水シートを介して流れる電流成分だけでなく、保護層を介して流れる電流も除去する必要がある。

ところで、図-4.4 の等価回路の遮水シートを介して流れる電流(i)は、式(4.1)に示す遮水シート表面に帯電する電荷(q)の時間微分であるから、遮水シートの静電容量(C)と角周波数(ω)正弦波電圧の波高(A)および時間(t)を用いて、式(4.2)に示される。

$$q = CA \sin \omega t \quad (4.1)$$

$$i = \frac{dq}{dt} = \omega CA \cos \omega t = \omega CA \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (4.2)$$

式(4.2)において、 $A \sin(\omega t + \pi/2)$ は、印加電圧の正弦波より $\pi/2$ だけ進み位相となっているが、この項が電圧に相当するから、遮水シートを介して流れる電流経路のインピーダンス(Z)は、式(4.3)に示すようになる。

$$Z = \frac{1}{\omega C} \quad (4.3)$$

ここで、静電容量(C)は、遮水シート敷設面積(S)、遮水シートの厚み(d)、真空の誘電率(ϵ_0)、絶縁体の比誘電率(ϵ)を用いて式(4.4)に示される。

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d} \quad (4.4)$$

式(4.4)により、遮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遮水シートが薄い程大きく、また遮水シート材料の比誘電率が高い程大きくなることわかる。しかし、式(4.4)から遮水シートを介して流れる電流(i)は、(ωC)の大きさに支配されているから、遮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遮水シートを介して流れる電流を完全と言えないまでも制御できることがわかる。

また、ノイズ成分のうち、高調波ノイズや遮水シートを介して流れる電流成分は、波長もしくは位相が異なるため、この特性を利用して回路技術によって除去することが可能と考えられる。

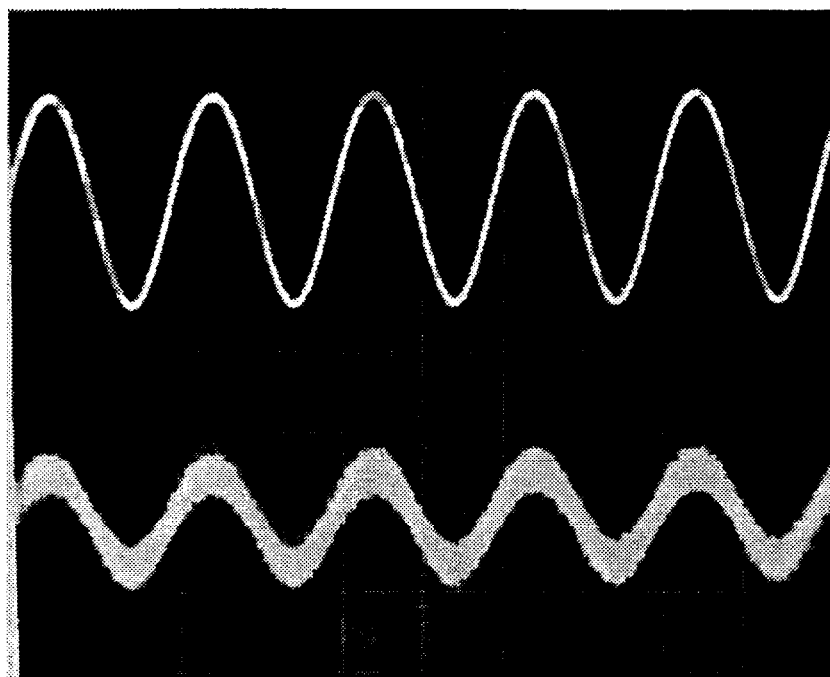


図-4.1 印加電圧波形と測定電流
(上段：印加電圧波形,下段：測定電流)

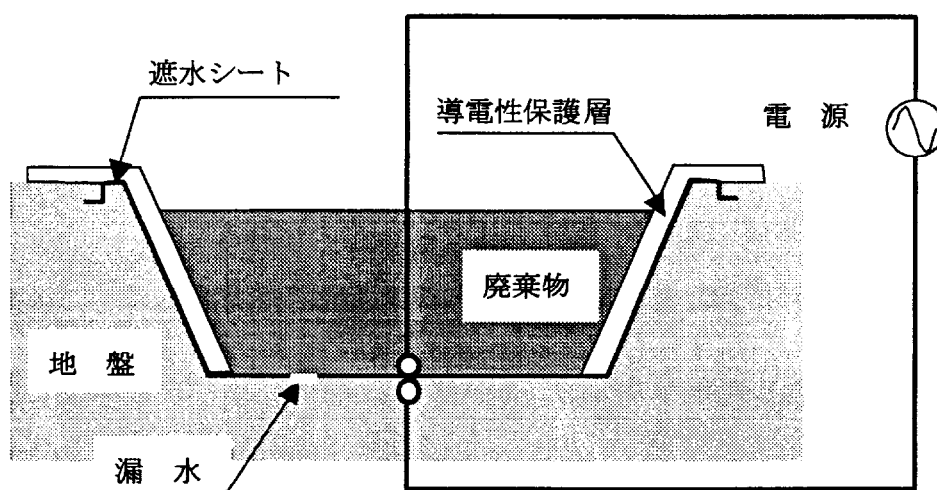


図-4.2 処分場に交流電圧を印加した条件

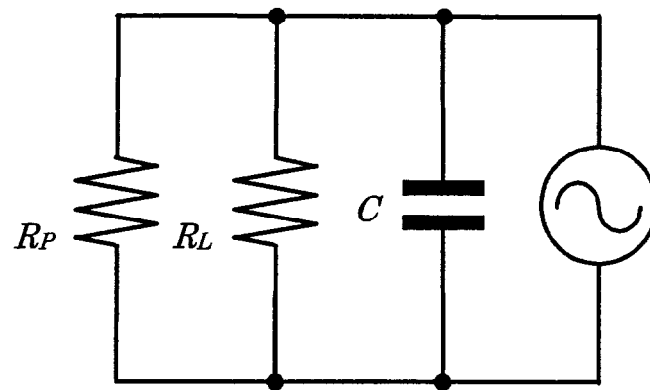


図-4.3 地盤および処分場内の電気抵抗を評価した等価回路

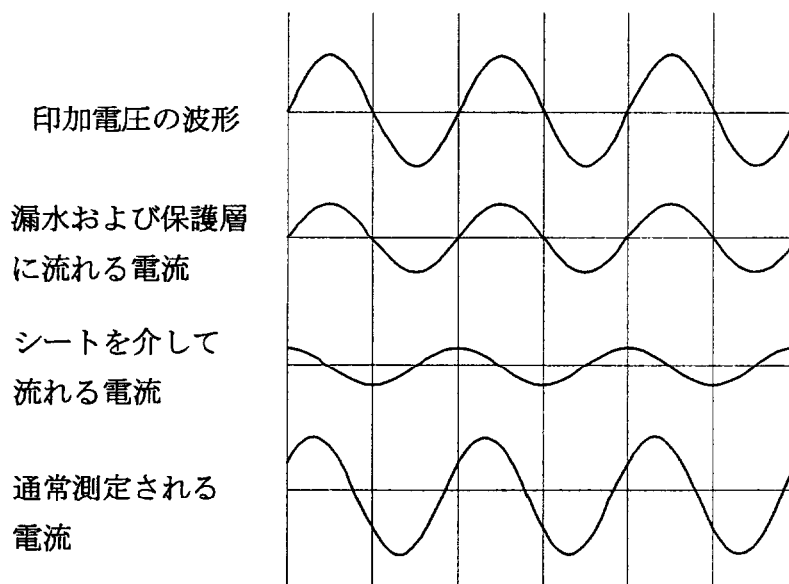


図-4.4 処分場に流れる電流

4.1.2 電流測定と位相検波回路

以下に本研究において、測定精度を低下させる遮水シートを介して流れる電流成分や自然電位や電磁波の影響で発生する高調波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 $V(t)$ は自然電位などによるノイズ $g(t)$ と信号の振幅 A 、時間 t および角周波数 ω を用いて式(4.5)で示すことができる。

$$V(t) = A \sin \omega t + g(t) \quad (4.5)$$

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(4.6)で示される。

$$S(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{(2i-1)\pi} \sin((2i-1)\omega t) \quad (4.6)$$

式(4.5)と式(4.6)の積を $V_0(t)$ とすると、式(4.7)に示すとおりとなる。

$$\begin{aligned} V_0(t) &= V(t)S(t) \\ &= \frac{2A}{\pi} - \frac{2A \cos 2\omega t}{\pi} + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{4}{(2i-1)\pi} A \sin((2i-1)\omega t) \sin \omega t + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{(2i-1)\pi} A \sin((2i-1)\omega t) g(t) \end{aligned} \quad (4.7)$$

式(4.7)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項の値のみ得ることができる。したがって、式(4.7)の時間平均値($V_{0\text{ av.}}$)は式(4.8)に示すとおりである。

$$V_{0\text{ av.}} = \frac{2A}{\pi} \quad (4.8)$$

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¹⁾。

しかし、導電性を有する保護層や複数の漏水を經由して流れる電流を位相や波長の違いによって除去することはできない。

4.1.3 遮水シート上下の電場制御

4.1.2 に述べたように、複数の漏水を経由して流れる電流を、位相差などを利用して個々の固有の電流成分として分離することはできない。このような複数の漏水が存在する場合には、漏水を経由して流れる電流のうち、印加電極周辺の漏水のみ経由してくる電流を測定し、印加電極から離れた漏水を経由して流れる電流成分が発生しないようにすれば、複数の漏水が存在する条件においても、それぞれの漏水を個別に検知することが可能と考えられる。

ここで、図-4.5 に示すように、遮水シート上下に電極を複数設置した場合について考える。処分場の遮水シート上に設置した電極群には、それぞれ2つの電源端子のどちらかに接続できる電極切替装置に配線されている。2本ある電源線の片側に接続した電極は、直流電源であれ交流電源であれ、すべて同電位となる。したがって、図-4.5 の電源の一端をNとし、他端をSとすると、スイッチcに接続された電極は電源N端の電位となり、その他の電極は電源S端の電位となる。

ここで、電極切替器によって電源のN端に接続された電極を印加電極と称し、電源のS端に接続された遮水シート上側の複数の電極を電場制御電極と称することにする。遮水シート上側の複数の電極は、電極切替器の接続条件によって、印加電極にも電場制御電極にもなる。そこで、遮水シート上側の電極群を、電圧印加／電場制御電極と称する。また、電源のS端と計測器に常時接続されている遮水シート下側に設置された電極群を電流測定電極と称することとする。

図-4.5 に示す電極への接続状態において、漏水1の周辺の遮水シート上下は、この周辺に配置した電極により電源S端と同電位となるから、漏水があっても電流は漏水を経由して流れない。

しかし、漏水2についてみると、遮水シート上側のスイッチcにつながる電極は、電源N端の電位で、遮水シート下側の電極は電源S端と同電位である。したがって、漏水2周辺の遮水シート上下に、電源のN端とS端の電位差が生じ、漏水2を経由する電流成分が流れる。さらに、スイッチcを電源S端側に切り替えて、スイッチeを電源N端側に切り替えると、漏水1および漏水2の遮水シート上下の電位は電源S端の電位であるから、2つの漏水を経由する電流は流れない。

このように、遮水シート上側の1本の印加電極をのぞき遮水シート上下の電場を、電場制御電極と電流測定電極によって同電位になるよう制御し、遮水シートの下側の電流測定電極に流れる電流だけ計れるよう計測器を接続すれば、複数の漏水を経由して流れる電流をそれぞれ分離して測定することが可能となる。

ところで、計測器で測定される電流には、漏水を経由して流れる電流成分と遮水シートを介して流れる電流が含まれる。しかし、遮水シートを介して流れる電流は、前述の位相検波回路により除去される。

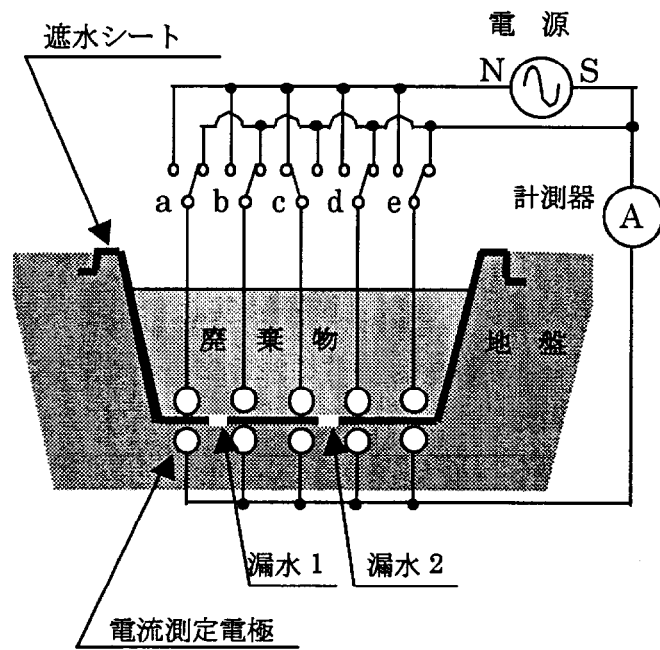


図-4.5 遮水シート上下の電場の制御

4.1.4 保護層に流れる電流の補正方法

3章の等価回路で説明したとおり、斜面部にも全面的にコンクリートなどの導電性の保護層が設置されると、処分場全体で遮水シートの上下が電氣的に接続された条件となる。

こうした電氣的条件においても、図-4.6 に示すように、切替式の電圧印加/電場制御電極だけでなく、電場制御専用電極を遮水シート上下に設置することにより影響を除去することが可能なはずである。しかし、保護層を経由する遮水シート上下を接続する電気経路の規模が大きく、実際には遮水シート上下に設置した電極群だけでは処分場全体の遮水シート上下の電場を完全に同電位に制御するのは困難である。その結果、電流測定電極に流れる電流には、保護層の完全に制御しきれない電場から漏洩する保護層を経由する電流成分が混入する。

そこで、図-4.6 および図-4.7 に示すように保護層の周辺に補正電極を設置する。補正電極の断面積は一定で、保護層が処分場外につながる部分周辺の電圧印加/電場制御電極側に設置する。

図-4.7 において、1点鎖線で表示したX軸とY軸の交差点を原点として、それぞれの電圧印加/電場制御電極を x,y 座標で示す。ここで、座標 (x,y) の電極を印加電極とし、その他の電極を電場制御電極とした場合、A1の測定器で計測される電流測定電極に流れる電流を $I_{meas}(x,y)$ とし、A2の測定器で計測される補正電極を経由して流れる電流を $I_{cor}(x,y)$ とする。電流 $I_{meas}(x,y)$ には、漏水を経由して流れる電流成分 $I_{leak}(x,y)$ と保護層を経由して流れる電流成分 $I_{con}(x,y)$ が含まれている。保護層を経由して流れる電流 $I_{con}(x,y)$ は、印加電極表面の電気抵抗、廃棄物、保護層、地盤、電流測定電極の電気抵抗が直列につながった経路を流れている。これらの直列につながった電気抵抗のうち、地盤の電気抵抗は、地盤の電氣的な広がりが大きいため、電気抵抗は非常に小さいと考えられる。

そこで、「保護層と地盤との接触面における電位分布は、電流測定電極や補正電極の電位とほとんど差がない。」とする第1の仮定を設ける。

この仮定に従うと、保護層を経由して流れる電流 $I_{con}(x,y)$ は、印加電極の電気抵抗、廃棄物の電気抵抗、保護層の電気抵抗により決定される。

一方、補正電極に流れる電流 $I_{cor}(x,y)$ は、遮水シート上下で同電位となるよう電場を制御しているため、漏水を経由して流れる微小な電流成分も含まれるが、基本的に印加電極の電気抵抗、廃棄物の電気抵抗、保護層の電気抵抗で決定すると考えられる。

そこで、「補正電極で測定される電流に、漏水を経由して流れる電流成分が混入しない。」とする第2の仮定を設ける。

補正電極は、電圧印加/電場制御電極群を包囲し、処分場内外を電氣的に接続する部分に沿って設置される環状の電極であるから、印加電極に近い。したがって、補正電極に流れる電流は、電流測定電極に保護層を経由して流れる電流よりも大きいと考えられる。また、補正電極に流れる電流 $I_{cor}(x,y)$ と電流測定電極に流れる電流 $I_{meas}(x,y)$ のうち保護層を経由して流れる電流成分 $I_{con}(x,y)$ は、印加電極表面の電気抵抗と廃棄物の電気抵抗が共通で、保護層と補正電極表面の電気抵抗が異なるだけである。すなわち、印加電極位置 (x,y)

によって変化する電流の特性はほぼ同じで、相似となると考えられる。これにより、図-4.6と図-4.7の測定器 A2 で測定される電流 $I_{cor.}(x,y)$ は、保護層に流れる電流成分 $I_{con.}(x,y)$ の相似率 n を用いて表記できる。

したがって、測定器 A1 と A2 により測定される電流は、式(4.9)と式(4.10)によって示される。

$$I_{meas.}(x,y) = I_{leak.}(x,y) + I_{con.}(x,y) \quad (4.9)$$

$$I_{cor.}(x,y) = n I_{con.}(x,y) \quad (4.10)$$

式(4.10)において、印加電極位置 (x,y) によって変化する電流のうち、保護層に流れる電流成分 $I_{con.}(x,y)$ の最大値を $I_{con.max}$ とし、補正電極に流れる電流 $I_{cor.}(x,y)$ の最大値を $I_{cor.max}$ とすると式(4.11)で示される。

$$I_{cor.max} = n I_{con.max} \quad (4.11)$$

式(4.10)の左辺と右辺を、(4.11)式の左辺と右辺で割ると、(4.12)式を得ることができる。

$$\frac{I_{cor.}(x,y)}{I_{cor.max}} = \frac{I_{con.}(x,y)}{I_{con.max}} \quad (4.12)$$

式(4.9)の $I_{con.}(x,y)$ を、式(4.12)で消去し、漏水に流れる電流 $I_{leak.}(x,y)$ について書き直すと式(4.13)が得られる。

$$I_{leak.}(x,y) = I_{meas.}(x,y) - \frac{I_{con.max}}{I_{cor.max}} I_{cor.}(x,y) \quad (4.13)$$

式(4.13)において、保護層を経由して流れる電流 $I_{con.max}$ は、電流測定電極で測定される電流のうち保護層の影響によって生じていると判断される電流の最大値である。

ところで、補正電極と電流測定電極の測定結果は、印加電極が保護層に近い測定範囲外周部にある条件で保護層を経由して流れる電流の影響が最も大きくなると考えられる。そこで、印加電極が測定範囲の外周部分にある条件で、電流測定電極で測定される最大電流を $I_{con.max}$ として式(4.13)を用いることにより、保護層を経由して流れる電流の影響を除去して漏水部を流れる電流を測定することができる。

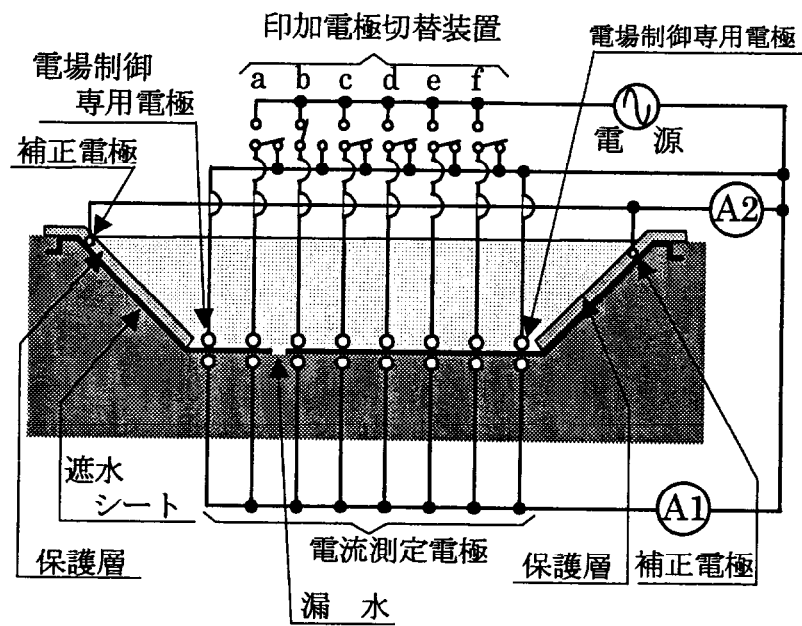


図-4.6 周辺への漏洩電流補正電極

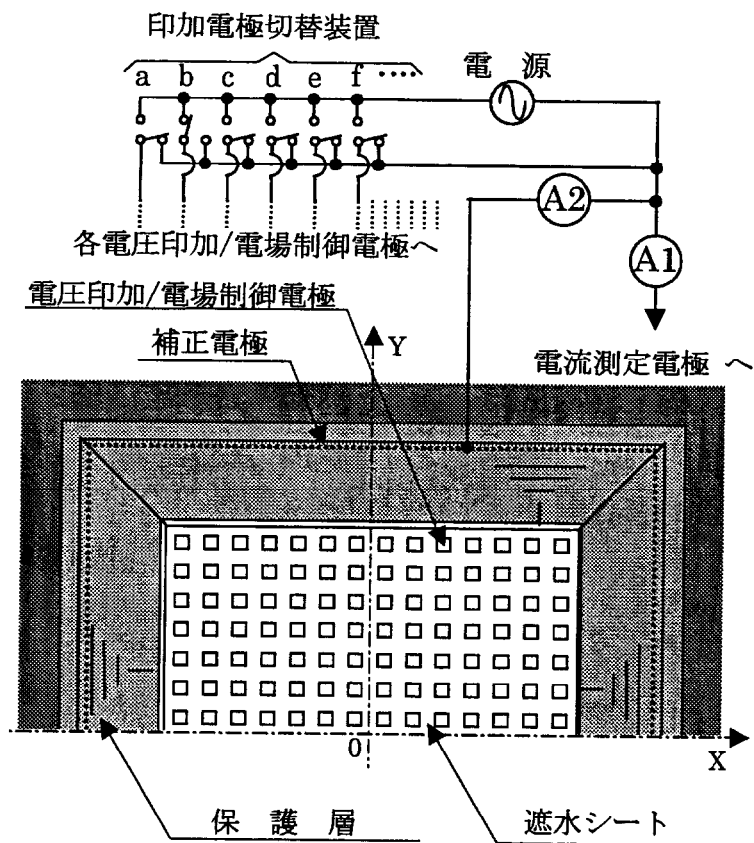


図-4.7 漏洩電流補正電極設置平面図

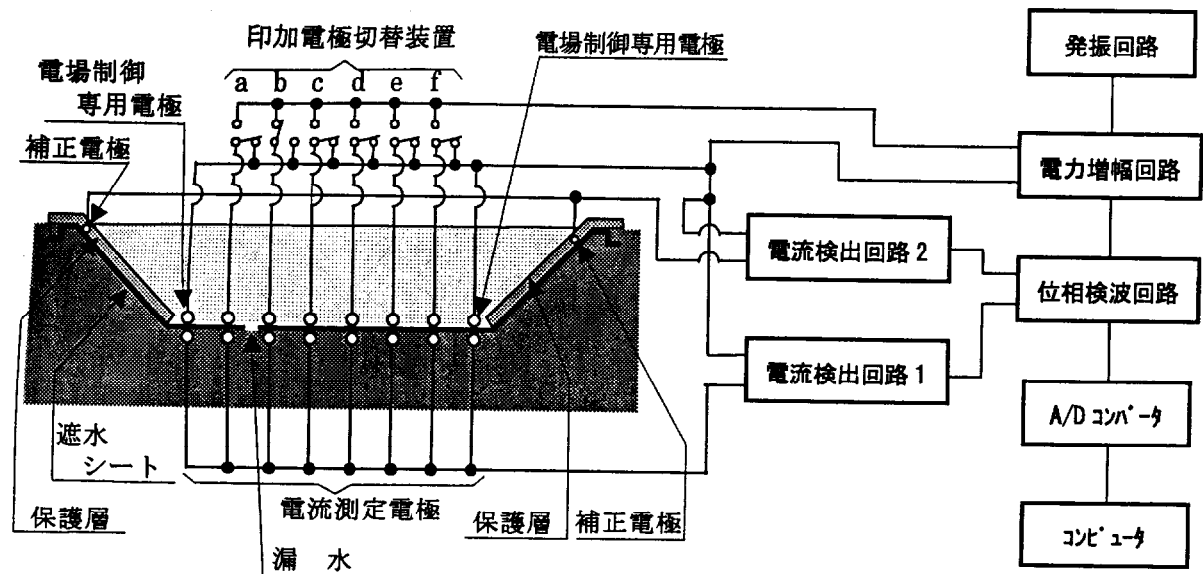


図-4.8 点電極式電場制御電流測定概念図

3章の等価回路に示した土質材料やコンクリートの保護層が設けられた処分場に対応できる漏水検知システムのブロック回路図を図-4.8に示す。

図-4.6に示した電源に相当する部分が、(発振回路)－(電力増幅回路)である。発振回路は、所定の周波数の正弦波を作り、電力増幅回路は、発振器で作られた正弦波を5Vから最大10Vに増幅し、処分場内の電極群から選択された1本の電極に処分場内外に印加する。

また、図-4.6に示したA1とA2に相当するのが(電流検出回路1)－(位相検波回路)と(電流検出回路2)－(位相検波回路)である。位相検波回路は、電力増幅回路の出力電圧の波長と位相を参照して、異なる波長と異なる位相の電流成分を除去した測定を行う。

位相検波回路で測定された電流測定電極の測定結果と補正電極の測定結果は、アナログ/デジタルコンバータを介してコンピュータに接続し、前述の保護層を経由して流れる電流の補正計算を行う。

4.2 水槽実験

4.2.1 実験方法および実験条件

(1) 水 槽

実験に使用した水槽の形状を図-4.9 に示す。水槽は、全体形状 16m×16m の大きさと、10m×10m の底盤と周辺斜面の一部に PVC (ポリ塩化ビニル) 遮水シート ($t=1.5$ mm) を敷設し、それよりも上の斜面をモルタル吹き付けとした。遮水シートは、真砂土を敷き均した上にポリエステル長繊維不織布 (目付量 800g/m²) を敷きつめた上に敷設した。

造成した水槽斜面の勾配は 1:1 で、最大水深 1.6m と最小水深 0.4m で使用した。最大水深では、モルタル吹き付け面が水と接し、電氣的に水槽内外が導通状態となり、最小水深では、水槽は遮水シートだけが水と接し、電氣的に水槽内外は電流が流れない条件となる。

本実験に使用した水槽のモルタル吹き付けは、遮水シート上に吹き付けたものではなく、基礎地盤に直接吹き付けたものである。したがって、モルタル吹き付けは、遮水シートの保護層となっていない。これは、通常の縮尺モデルとすると、モルタル吹き付け層の厚みが非常に薄く、水槽内外を接続する電気経路が非常に小さくなるため、測定結果への保護層を経由して流れる電流の影響が過小評価されるためである。

水槽の水の電気伝導度は、水槽底部の濁り水が 0.338mS/cm～0.347mS/cm で、表層水が 0.275mS/cm～0.286mS/cm で、全体でみると約 0.3mS/cm であった。

水槽の材料として使用した PVC 遮水シートの電気特性は、表-4.1 に示すとおりである。この表に示した遮水シートの電気特性は、150mm×80mm(=120cm²)の2枚の金属板で試料を挟み、15kg の重量を均等にかけた条件で、100Hz 定電流電源により測定したものである。この遮水シートの電気抵抗の測定に、直流電源を用いる一般的なテスターを使用したところ、測定限界である 280M Ω ～200M Ω の値が得られた。

実験に使用した電極は、水槽底盤の中央部 8m×8m に 50cm 間隔に 45mm×45mm の銅板($t=0.5$ mm)を 289 ヶ(=17×17)電圧印加/電場制御電極として設置した。

電極それぞれの番号は、図-4.10 に示すように 1～17 の数字と A～Q で表記した。

電圧印加/電場制御電極の周辺に電場制御専用電極として ϕ 5mm 銅線を 2 本配置した。電流測定電極については、遮水シート下に電圧印加/電場制御電極と同一仕様の銅板を平面的に重なるように配置するとともに、電場制御専用電極も遮水シートを挟んで同一位置に配置した。また、補正電極として、 ϕ 5mm 銅線を遮水シートとモルタル吹き付けの境界沿いに配置した。

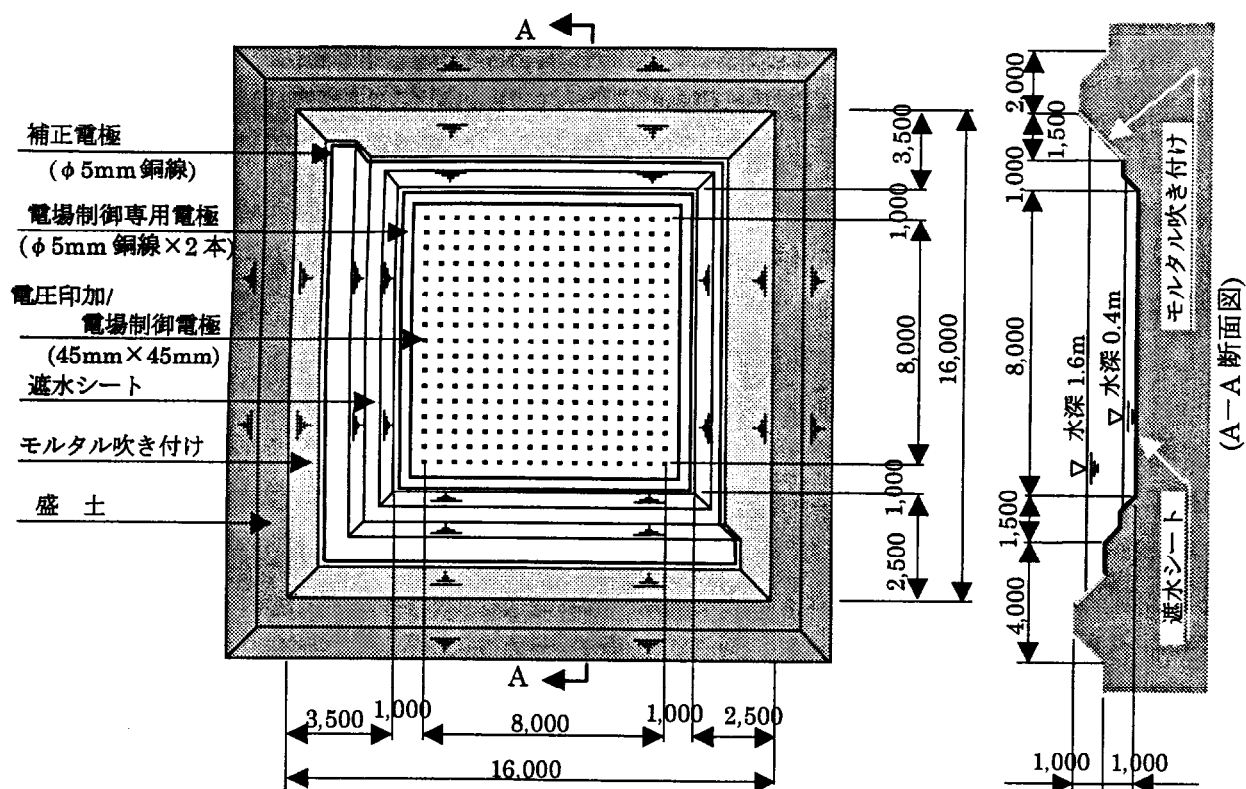


図-4.9 実験水槽

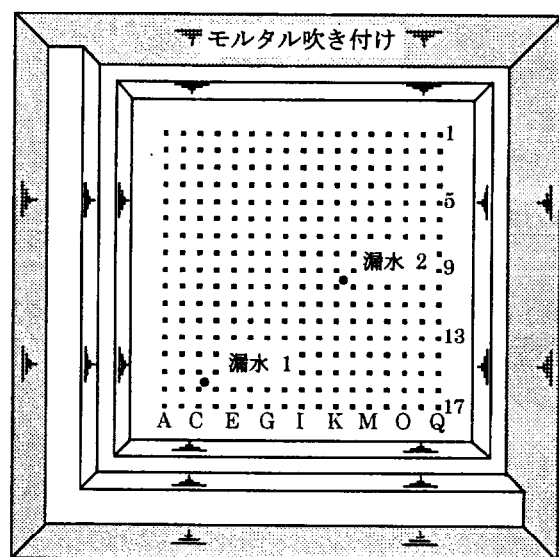


図-4.10 電極番号と漏水位置

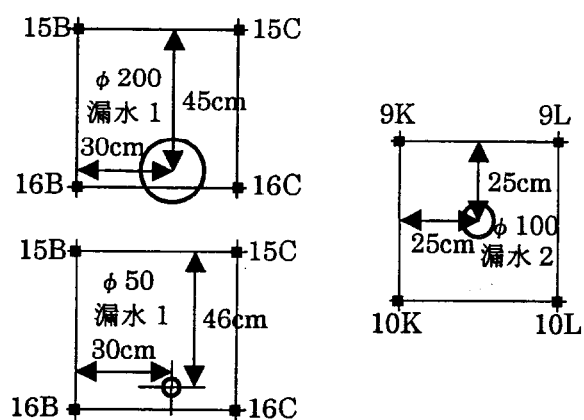


表-4.1 PVC遮水シートの電気的特性

種 類	電気抵抗 (MΩ/120cm ²)	静電容量 (nF/120cm ²)	電極 表面状態
PVC	10 以上	1.28	乾燥
	10 以上	1.55	湿潤



写真-4.1 水槽全景(最大水深 1.6m)

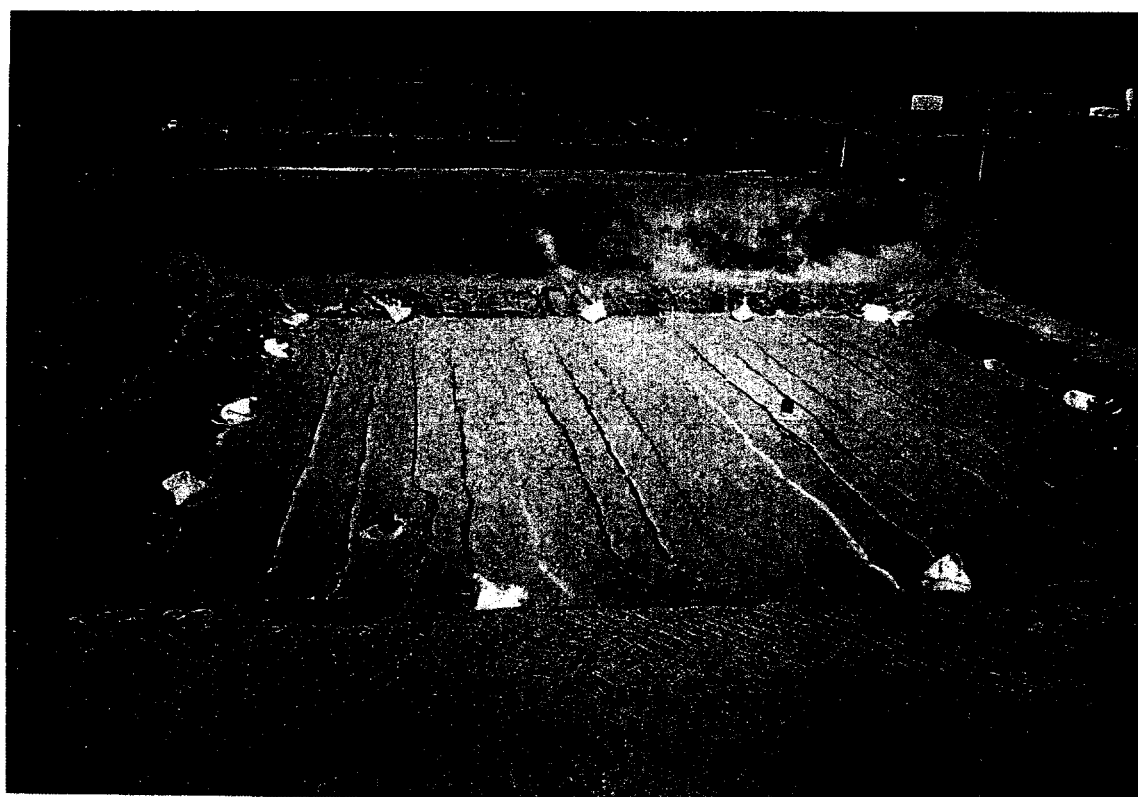


写真-4.2 水槽内配線状況



写真-4.3 電極の設置作業

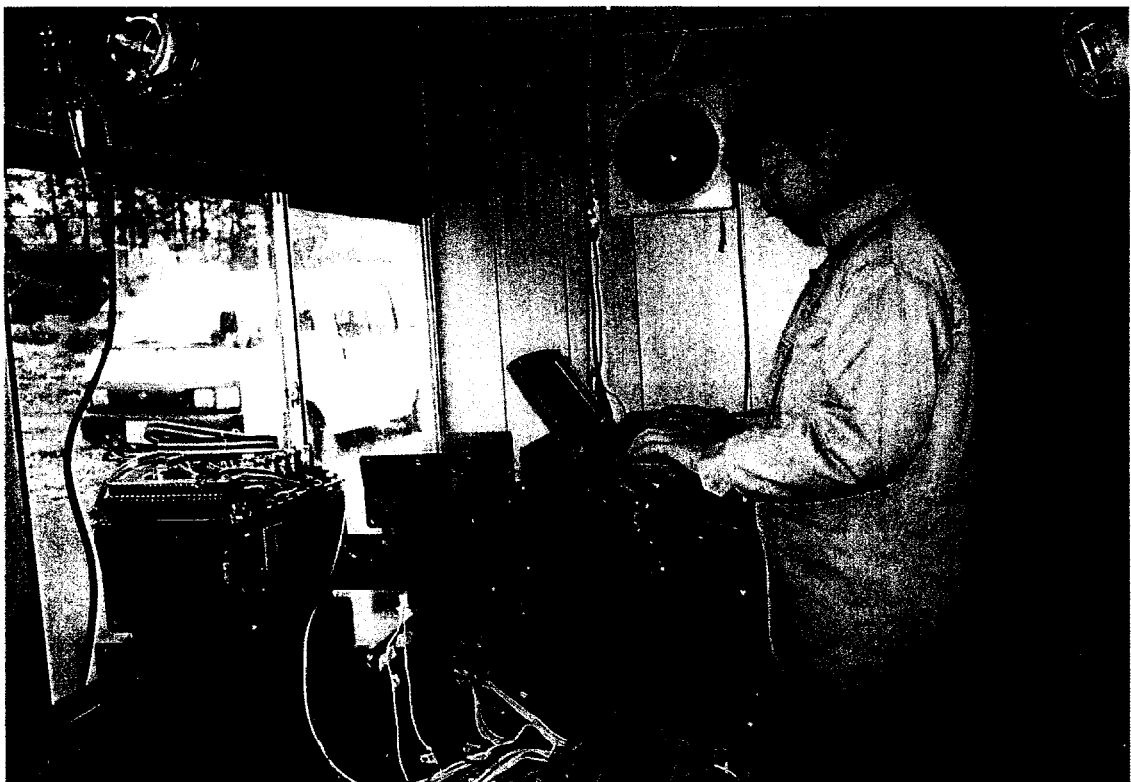


写真-4.4 実験状況

(2) 実験条件および実験手順

水槽実験における漏水は、水槽に敷設した遮水シートを実際に切り取って作成した。漏水の大きさは、図-4.10 の漏水 1 が $\phi 200\text{mm}$ (314cm^2) および $\phi 50\text{mm}$ (19.6cm^2) で、漏水 2 が $\phi 100\text{mm}$ (78.5cm^2) である。漏水 1 は、実験当初に $\phi 200\text{mm}$ の大きさに遮水シートを切開して作成し、後で $\phi 50\text{mm}$ の大きさに補修した。漏水位置は、図-4.10 に示すように漏水 1 が 16C の近傍で、漏水 2 が 10K の近傍である。

実験は、漏水の有無、水槽の内外の電氣的接続状態（水深 40cm と水深 160cm）、電場制御専用電極の本数および漏水のサイズを変えて行った。

(3) 測定装置

測定ユニットは、所定の周期の正弦波を作る発振器、電力を増幅する増幅器、電圧印加/電場制御電極を選択する切替器、電流を検出する電流検出回路ならびに特定の位相の電流成分を抽出する位相検波回路で構成されている。

測定ユニットは、それ自体コンピュータの機能を有しており、電極切替器の操作や測定されたアナログ信号をデジタル信号への変換およびデータバッファへのデータ収納を制御する。測定を制御するプログラムは、パーソナルコンピュータから通信ケーブルを経由して受信される。測定ユニット測定対象は、位相検波回路で印加電圧と同相成分電流、離相成分電流および測定器から流れる全電流であるが、プログラムにより測定対象を電位差に変更することも可能である。測定ユニットは、データバッファに一時収納された測定データを、パーソナルコンピュータから受信したコマンドにしたがって、通信回線で送信する。

測定ユニットの出力電圧は、最大 10V であるが、測定機器の限度以上に電流が流れる場合に電圧波形が乱れるため、測定時にオシロスコープで電圧波形を確認した。実験における印加電圧は 5V で、周波数は 80Hz である。

4.2.2 水槽実験結果

(1) 電圧印加/電場制御電極の効果

水槽の水位を最小水深（40cm）にした条件における漏水の有無に関する測定結果を図－4.11 と図－4.12 に示す。これらの図は、電場制御専用電極と電流測定電極を使用せず、水槽の遮水シートの上に設置した電圧印加/電場制御電極だけで電場制御しつつ電流測定を行った結果の立体表示である。図中の数字およびアルファベットは、図－4.13 の電極番号と対応する。また、それぞれの図の測定データを表－4.3 と表－4.4 に示す。

図－4.11 に示すように、漏水がない条件の測定結果の最大値は、図の左端に相当する A17 と B17 の部分で、表－4.2 から 0.20mA と読み取ることができる。また、最小値 ($I_{\text{nonleak.min}}$) は、測定範囲のほぼ中央部に広がっており、表－4.2 から 0.02mA であることがわかる。

一方、漏水がある条件での測定結果のうち、最大の測定値は、表－4.3 から $\phi 200\text{mm}$ の漏水位置における 6.15mA で、最小の測定値 ($I_{\text{leak.min}}$) は 0.06mA である。また、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水位置において測定された電流は、1.63mA である。測定結果の傾向をみると、 $\phi 200\text{mm}$ の漏水から約 2.7m 離れた位置ではほぼ一定の電流 0.06mA となり、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水から約 2.2m 離れた位置で電流が一定となっており、漏水の影響による測定電流の大きさは限定的であることがわかる。

ここで、 $\phi 200\text{mm}$ の漏水および $\phi 100\text{mm}$ の漏水における測定電流 (I_{peak}) の大きさと周辺の平坦部分の最小電流 ($I_{\text{leak.min}}$) の倍率 (M) は、以下のとおりである。

[点電極式電場制御電流測定 of 漏水周辺の測定電流の倍率 (M)]

($\phi 200\text{mm}$ の漏水)

$$M_{200} = I_{\text{peak}} / I_{\text{leak.min}} = 6.15 / 0.06 = 102.5 \text{ 倍}$$

($\phi 100\text{mm}$ の漏水)

$$M_{100} = I_{\text{peak}} / I_{\text{leak.min}} = 1.63 / 0.06 = 27.2 \text{ 倍}$$

この計算結果から、漏水の規模が大きくても、漏水を経由して流れる電流は、印加電極位置が 2.5m 程度離れると、電場制御/電圧印加電極による遮水シート上下の電位が制御されているため、電流測定電極によって測定されないことがわかる。

ところで、漏水の近傍で測定される電流だけが大きく、漏水から離れた位置で測定される電流に生ずる変化が小さければ、漏水位置を明確に検知することが可能となる。漏水の有無によって生ずる最小測定電流の倍率 (N) は、以下のよう計算できる。

[点電極式電場制御電流測定 of 漏水の有無による電流の倍率 (N)]

$$N = I_{\text{leak.min}} / I_{\text{nonleak.min}} = 0.06 / 0.02 = 3 \text{ 倍}$$

漏水の有無によって生ずる最小測定電流の変化 (3 倍) は、漏水とその周辺との電流変化 (27.2 倍～102.5 倍) と比較すると変化が小さいことがわかる。

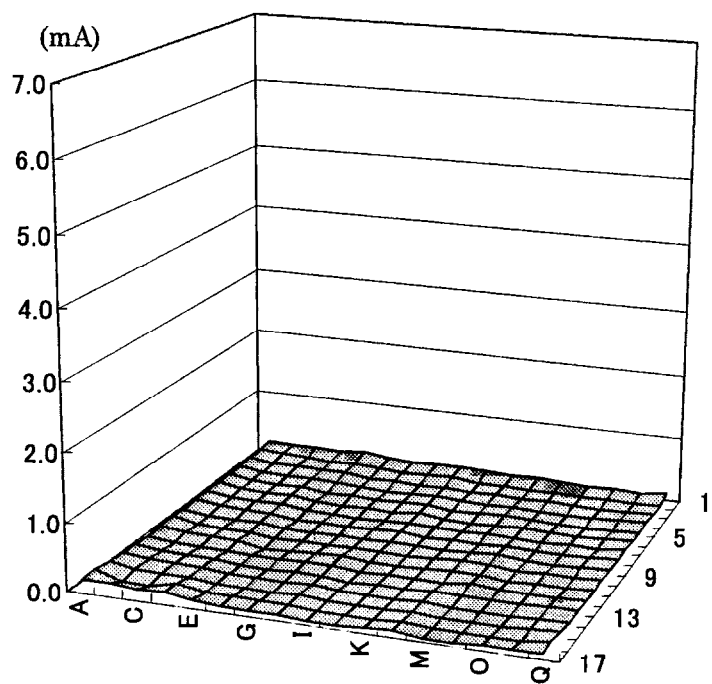


図-4.11 漏水がない条件の測定結果
(水深 0.4m)

表-4.2 漏水がない条件の電流測定電極の測定結果
(水深 0.4m, 単位 : mA)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	0.18	0.15	0.17	0.15	0.17	0.12	0.12	0.12	0.12	0.10	0.09	0.09	0.10	0.06	0.07	0.07	0.11
2	0.16	0.13	0.12	0.11	0.12	0.08	0.07	0.07	0.08	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04	0.06
3	0.15	0.10	0.09	0.08	0.09	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03	0.05
4	0.13	0.09	0.07	0.08	0.07	0.04	0.03	0.04	0.06	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.05
5	0.13	0.08	0.06	0.07	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.05
6	0.14	0.08	0.06	0.07	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.04	0.06
7	0.14	0.08	0.07	0.08	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.06
8	0.14	0.08	0.07	0.07	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.05
9	0.12	0.08	0.06	0.07	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.02	0.03	0.03	0.05	0.02	0.02	0.03	0.05
10	0.14	0.08	0.07	0.06	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.04	0.05	0.04	0.02	0.03	0.03	0.05
11	0.14	0.08	0.06	0.07	0.00	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.04	0.05	0.02	0.03	0.03	0.05
12	0.12	0.08	0.07	0.06	0.03	0.03	0.04	0.05	0.02	0.02	0.03	0.03	0.07	0.03	0.03	0.04	0.06
13	0.13	0.09	0.07	0.07	0.04	0.03	0.04	0.05	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.05	0.06
14	0.15	0.10	0.09	0.09	0.05	0.04	0.05	0.06	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05
15	0.18	0.11	0.09	0.09	0.07	0.05	0.06	0.07	0.04	0.03	0.04	0.05	0.03	0.02	0.03	0.05	0.09
16	0.19	0.07	0.08	0.14	0.08	0.07	0.07	0.08	0.05	0.04	0.05	0.07	0.04	0.04	0.05	0.03	0.09
17	0.20	0.20	0.15	0.19	0.11	0.09	0.10	0.09	0.07	0.07	0.09	0.11	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09

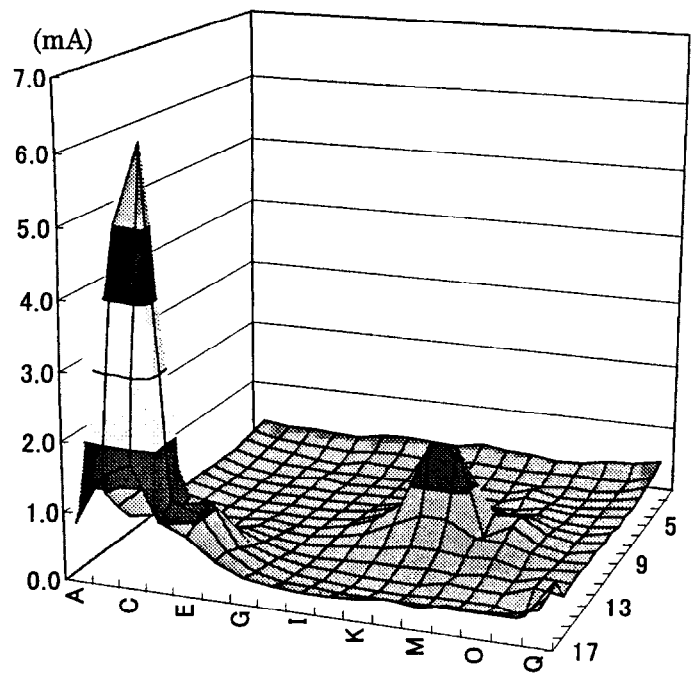


図-4.12 漏水がある条件の測定結果
(水深 0.4m)

表-4.3 漏水がある条件の電流測定電極の測定結果
(水深 0.4m, 単位 : mA)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	0.34	0.30	0.31	0.27	0.25	0.34	0.35	0.32	0.31	0.38	0.35	0.32	0.27	0.28	0.37	0.39	0.44
2	0.32	0.23	0.20	0.16	0.16	0.21	0.20	0.18	0.17	0.21	0.20	0.18	0.19	0.20	0.20	0.22	0.31
3	0.28	0.19	0.14	0.10	0.09	0.14	0.12	0.11	0.11	0.15	0.13	0.12	0.11	0.15	0.14	0.18	0.28
4	0.26	0.15	0.10	0.09	0.07	0.10	0.08	0.08	0.09	0.12	0.11	0.09	0.19	0.13	0.13	0.17	0.26
5	0.24	0.13	0.09	0.07	0.09	0.07	0.07	0.07	0.08	0.12	0.11	0.10	0.19	0.17	0.14	0.18	0.24
6	0.25	0.14	0.09	0.06	0.07	0.06	0.07	0.08	0.12	0.15	0.16	0.14	0.14	0.22	0.18	0.20	0.27
7	0.28	0.14	0.09	0.07	0.08	0.06	0.07	0.11	0.18	0.25	0.30	0.29	0.22	0.27	0.21	0.20	0.26
8	0.26	0.15	0.09	0.07	0.08	0.07	0.09	0.14	0.26	0.40	0.56	0.54	0.38	0.38	0.25	0.21	0.28
9	0.23	0.15	0.09	0.07	0.09	0.09	0.11	0.17	0.29	0.61	1.29	0.98	0.51	0.52	0.30	0.24	0.28
10	0.28	0.17	0.11	0.09	0.13	0.10	0.12	0.19	0.36	0.65	1.63	1.57	0.30	0.53	0.29	0.22	0.30
11	0.30	0.19	0.15	0.12	0.19	0.14	0.14	0.18	0.29	0.47	0.67	0.66	0.44	0.42	0.32	0.24	0.28
12	0.34	0.27	0.23	0.18	0.31	0.20	0.17	0.17	0.24	0.27	0.34	0.34	0.30	0.33	0.24	0.28	0.30
13	0.41	0.49	0.44	0.33	0.46	0.27	0.18	0.15	0.17	0.20	0.19	0.20	0.17	0.24	0.20	0.33	0.27
14	0.69	1.01	0.94	0.68	0.78	0.37	0.24	0.17	0.17	0.14	0.14	0.14	0.22	0.19	0.18	0.31	0.27
15	1.07	2.17	2.46	1.02	1.09	0.50	0.29	0.20	0.18	0.15	0.14	0.14	0.17	0.15	0.17	0.08	0.63
16	1.25	4.92	6.15	1.18	1.05	0.58	0.34	0.25	0.25	0.20	0.19	0.20	0.21	0.20	0.19	0.20	0.54
17	0.88	1.60	1.80	1.02	0.89	0.57	0.41	0.33	0.32	0.30	0.34	0.39	0.32	0.41	0.39	0.42	0.53

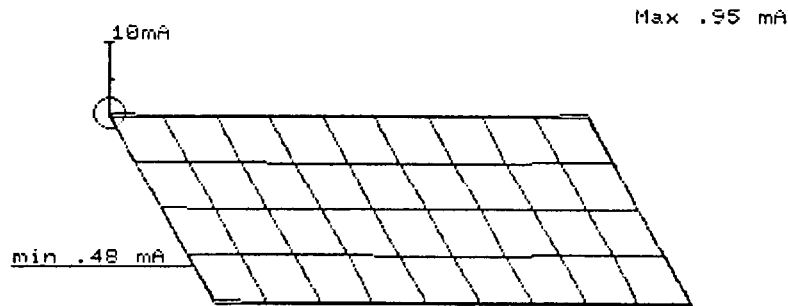


図-4.13 線電極を用いた検知システムの測定結果²⁾
(電極間隔 2m, 実験開始前)

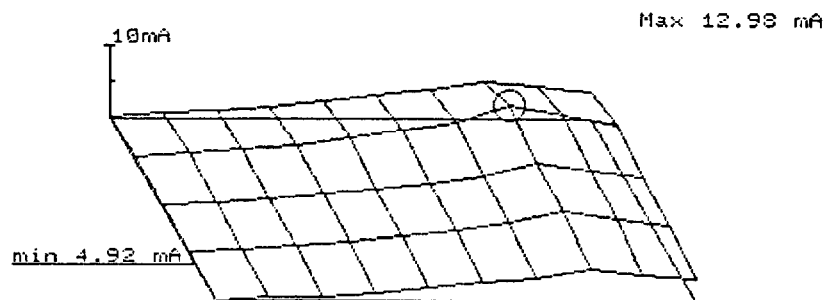


図-4.14 線電極を用いた検知システムの測定結果²⁾
(電極間隔 2m, 遮水シート破損後)

ここで、漏水周辺の測定データの傾向について、本測定システムの測定データと線電極電流測定を採用した電氣的漏水位置検知システムの測定結果²⁾を比較する。

この線電極電流測定の実験において、図-4.13 に示すように、漏水がない条件で平坦なグラフとなっており、漏水の存在は認められない。この測定結果の最小電流は、0.48mAで、最大電流は、0.95mAであった。一方、漏水が生じた条件で、図-4.14 に示すように、明確に漏水箇所が認められるが、漏水の影響が実験土槽全体に広がっており、漏水の影響がどの程度の範囲におよぶか判断できない。最大電流 (I_{peak}) は、漏水箇所において 12.98mAで、最小電流 ($I_{leak.min}$) は、漏水から 14m 離れた位置における 4.92mAであった。

これらのデータから、点電極式電場制御電流測定の場合と同じように、漏水位置で測定される最大電流と最小電流の倍率 (M) および漏水の有無によって生ずる最小値の倍率 (N) を計算すると以下のようになる。

[線電極式電場電流測定の漏水周辺の測定電流の倍率 (M_{line})]

$$M_{line} = I_{peak} / I_{leak.min} = 12.98 / 4.92 = 2.64 \text{ 倍}$$

[線電極式電流測定の漏水の有無による電流の倍率 (N_{line})]

$$N_{line} = I_{leak.min} / I_{nonleak.min} = 4.92 / 0.48 = 10.3 \text{ 倍}$$

線電極式電流測定は、漏水から 14m 離れても、漏水周辺で測定された最大電流と最小電

流の倍率が 2.64 倍に過ぎないのに対して、漏水の有無によって生ずる測定電流と最小電流の倍率が 10.3 倍に増加していることがわかる。

漏水における電流値と漏水から離れた位置における電流の比は、漏水の大きさや電流が流れる媒体の比抵抗などによって異なるため、そのまま比較することができない。しかし、遮水シート上下の電場を制御することにより、一定の距離はなれると、漏水の影響が他の電極を印加電極とした測定に生じにくいと考えられる。

したがって、電圧印加/電場制御電極による遮水シート上下が同電位となるよう電場を制御する効果は、漏水を経由して流れる電流の影響を漏水周辺だけに限定する効果が大きいと判断できる。この効果は、複数の漏水が存在する条件で、それぞれの漏水を分離するのに非常に有効と判断される。

また、漏水を明確に検知するための目安として、漏水周辺で測定されたピーク電流が漏水のない部分で測定される最小測定電流との差とピーク電流の比率があげられる。この比率は、漏水周辺で測定されるピーク電流中の漏水についての信号比率（SR=Signal Ratio）と考えることができる。信号比率が大きければ、測定データに強いコントラストが付き、漏水の検知しやすさの指標となる。

[点電極式電場制御電流測定におけるピーク電流中の漏水についての信号比率（SR）]

（φ 200mm の漏水）

$$SR_{200} = 100 \times (I_{\text{peak}} - I_{\text{leak.min}}) / I_{\text{peak}} = 100 \times (6.15 - 0.06) / 6.15 = 99\%$$

（φ 100mm の漏水）

$$SR_{100} = 100 \times (I_{\text{peak}} - I_{\text{leak.min}}) / I_{\text{peak}} = 100 \times (1.63 - 0.06) / 1.63 = 96\%$$

以上に示した点電極式電場制御電流測定の SR_{200} と SR_{100} の計算結果を見ると、漏水の存在を示す電流のピーク値のうち 96%～99%が信号となっていることがわかる。

そこで、電場制御を行っていない線電極式電流測定の測定結果について信号比率を計算すると以下のとおりとなる。

[線電極式電場制御電流測定におけるピーク電流中の漏水についての信号比率（ SR_{line} ）]

$$SR_{\text{line}} = 100 \times (I_{\text{peak}} - I_{\text{leak.min}}) / I_{\text{peak}} = 100 \times (12.98 - 4.92) / 12.98 = 62\%$$

この計算は、先の M を計算したのと同様に、漏水の近傍で測定されたピーク電流と 14m 離れた位置における最小電流を用いて計算している。計算結果 62%は、信号の比率としては悪い値ではないが、計算に用いた最小値が漏水から 14m はなれた位置の測定値を用いている。先に計算した点電極式電場制御電流測定の測定結果についての信号比率は、漏水から 2.7m と 2.3m の位置における測定電流を用いており、電場制御をした場合の信号比率は、これらの計算結果の差よりも大きい。

(2) 電場制御専用電極の効果

図-4.15 と図-4.16 に水深 1.6m, すなわちモルタル吹き付け部分が水没した条件で, 図-4.11 と図-4.12 の測定と同様に, 電圧印加/電場制御電極だけで測定した結果を示す。

それぞれのグラフをみると, モルタル吹き付け面を経由して流れる電流の影響で, 測定範囲外周部分に印加電極がある場合に, 測定電流が大きくなることがわかる。図-4.15 と図-4.16 の測定値を示したものが表-4.4 と表-4.5 であるが, 双方とも測定された最小電流が約 1.2mA (グラフ中央部分), 最大電流が約 3.1mA (グラフ外周部分) となっており, 先の最小水深 (40cm) における測定結果のグラフと比較して, 中央部の電流が小さい部分で 6 倍 ($=1.2/0.2$) の電流が流れていることがわかる。グラフ外周部分とグラフ中央部分で, 測定電流が 1.9mA ($=3.1-1.2$) 大きくなっているのに対し, $\phi 200\text{mm}$ の漏水の有無で生ずる電流の増加は 0.23mA ($=2.59-2.36$) にとどまっている。この結果から, モルタル吹き付け面を経由して流れる電流の影響を低減しないと, 漏水を明確に確認できないと判断できる。

図-4.17 と表-4.6 は, 電場制御専用電極を併用した条件での測定結果である。この図から, 電場制御専用電極を用いることにより, モルタル吹き付けを経由して流れる電流を 0.15mA 程度に押さえることができることがわかる。また, ○印で示すように漏水が 2箇所グラフから確認できるが, $\phi 200\text{mm}$ の漏水における測定電流が 0.330mA で, $\phi 100\text{mm}$ の漏水における測定電流が 0.230mA であり, 測定エリア外周部で測定された電流 0.250mA と比較すると, 必ずしも大きな電流とはいえず, その他に漏水が測定エリア外周部にないと断言できない。

したがって, 電場制御専用電極を使用することにより, モルタル吹き付けを経由して流れる電流の低減に一定の効果を上げることができるが, 電場制御専用電極だけではモルタル吹き付けを経由して流れる電流の影響を除去することが難しいことがわかる。

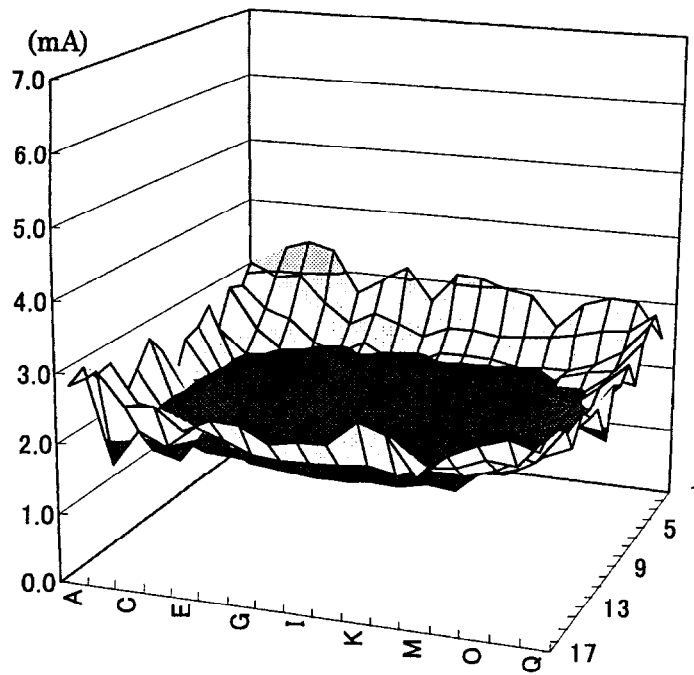


図-4.15 漏水がない条件の測定結果
(水深 1.6m, 電場制御専用電極不使用)

表-4.4 電場制御専用電極を使用しない条件の電流測定電極の測定結果
(水深 1.6m, 漏水なし, 単位 : mA)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	2.93	3.29	3.43	3.33	2.70	2.94	3.15	2.68	3.12	3.12	2.97	2.93	2.45	2.85	2.99	2.98	2.46
2	3.11	2.93	2.97	2.59	2.28	2.49	2.35	2.20	2.39	2.39	2.32	2.36	2.42	2.48	2.58	2.61	2.92
3	2.84	2.50	2.40	2.04	1.90	2.15	1.93	1.84	2.10	2.10	2.09	1.99	2.03	2.05	2.19	2.41	2.87
4	2.92	2.27	2.01	1.89	1.66	1.92	1.72	1.64	1.85	1.85	1.75	1.80	1.74	2.07	2.17	2.24	2.71
5	2.36	2.01	1.88	1.85	1.69	1.61	1.61	1.37	1.67	1.67	1.56	1.55	1.48	1.99	1.94	2.26	2.17
6	2.82	2.01	1.77	1.58	1.57	1.45	1.40	1.31	1.45	1.45	1.45	1.40	1.57	1.89	1.89	2.21	2.61
7	2.59	1.96	1.79	1.59	1.53	1.31	1.25	1.24	1.49	1.49	1.40	1.48	1.50	1.63	1.83	2.03	2.42
8	2.51	1.95	1.65	1.50	1.42	1.25	1.25	1.18	1.50	1.50	1.26	1.34	1.44	1.66	1.79	1.95	2.54
9	1.97	1.92	1.55	1.45	1.26	1.28	1.18	1.17	1.30	1.30	1.31	1.21	1.35	1.74	1.83	1.99	1.83
10	2.55	1.93	1.61	1.43	1.42	1.24	1.20	1.15	1.25	1.25	1.37	1.24	1.55	1.73	1.73	1.94	2.41
11	2.85	1.86	1.64	1.45	1.54	1.31	1.24	1.20	1.30	1.30	1.28	1.35	1.48	1.65	1.78	2.00	2.41
12	2.50	1.93	1.64	1.44	1.57	1.40	1.40	1.27	1.29	1.29	1.33	1.41	1.65	1.68	1.87	2.01	2.60
13	2.20	2.10	1.71	1.54	1.52	1.48	1.40	1.36	1.39	1.39	1.38	1.47	1.42	1.77	1.95	2.08	2.22
14	2.82	2.26	1.74	1.77	1.93	1.59	1.55	1.56	1.55	1.55	1.54	1.59	1.87	1.88	1.88	2.10	2.62
15	2.78	2.36	1.78	1.66	2.19	1.84	1.81	1.78	1.67	1.67	1.74	1.75	1.94	1.93	2.09	2.29	2.73
16	3.00	1.66	2.17	1.98	2.33	2.18	2.03	2.00	2.02	2.02	2.09	1.99	2.15	2.19	2.35	2.33	2.80
17	2.86	3.08	2.65	2.68	2.38	2.57	2.56	2.36	2.44	2.44	2.80	2.67	2.15	2.50	2.68	2.80	2.69

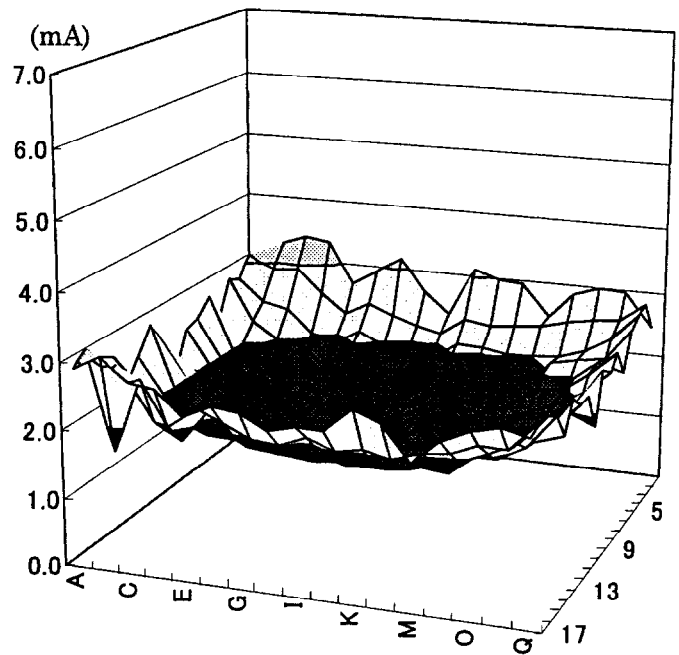


図-4.16 漏水がある条件の測定結果
(水深 1.6m 電場制御専用電極不使用)

表-11.5 電場制御専用電極を使用しない条件の電流測定電極の測定結果
(水深 1.6m, 漏水あり, 単位: mA)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	2.91	3.27	3.40	3.33	2.69	2.94	3.15	2.68	2.33	3.11	2.98	2.94	2.45	2.86	2.99	2.98	2.45
2	3.10	2.90	2.95	2.59	2.28	2.49	2.35	2.20	2.13	2.39	2.33	2.37	2.41	2.50	2.58	2.61	2.93
3	2.82	2.48	2.38	2.04	1.91	2.15	1.94	1.85	1.84	2.11	2.09	2.01	2.04	2.06	2.21	2.43	2.87
4	2.90	2.26	2.01	1.89	1.66	1.91	1.73	1.66	1.68	1.88	1.76	1.81	1.75	2.09	2.18	2.25	2.71
5	2.34	2.00	1.87	1.86	1.69	1.62	1.62	1.38	1.39	1.69	1.58	1.57	1.50	2.01	1.96	2.28	2.18
6	2.82	2.00	1.77	1.56	1.58	1.45	1.42	1.33	1.42	1.50	1.49	1.43	1.59	1.92	1.92	2.23	2.62
7	2.58	1.95	1.79	1.60	1.55	1.32	1.26	1.28	1.33	1.54	1.44	1.52	1.54	1.67	1.85	2.06	2.43
8	2.51	1.95	1.66	1.51	1.45	1.27	1.28	1.21	1.28	1.50	1.36	1.42	1.51	1.72	1.83	1.96	2.56
9	1.97	1.93	1.56	1.46	1.27	1.30	1.22	1.20	0.95	1.39	1.52	1.38	1.43	1.80	1.86	2.01	1.83
10	2.55	1.93	1.62	1.45	1.45	1.27	1.24	1.19	1.44	1.35	1.71	1.33	1.65	1.79	1.76	1.96	2.42
11	2.91	1.87	1.66	1.48	1.57	1.34	1.28	1.23	1.39	1.38	1.37	1.44	1.54	1.70	1.80	2.02	2.41
12	2.53	1.95	1.68	1.49	1.61	1.43	1.43	1.31	1.44	1.34	1.38	1.45	1.68	1.72	1.89	2.03	2.61
13	2.24	2.15	1.77	1.60	1.57	1.53	1.43	1.39	1.44	1.43	1.43	1.51	1.45	1.79	1.97	2.09	2.22
14	2.77	2.35	1.83	1.85	2.01	1.63	1.59	1.58	1.66	1.57	1.56	1.62	1.90	1.91	1.91	2.11	2.62
15	2.87	2.59	2.01	1.78	2.25	1.89	1.84	1.82	1.82	1.69	1.75	1.77	1.95	1.95	2.11	2.30	2.75
16	3.11	1.64	2.76	2.11	2.42	2.24	2.07	2.02	2.20	2.04	2.11	2.01	2.17	2.20	2.36	2.35	2.80
17	2.93	3.16	2.81	2.77	2.43	2.60	2.58	2.37	2.46	2.46	2.81	2.66	2.16	2.50	2.68	2.80	2.69

註: 表中の破線で囲まれた部分が漏水位置

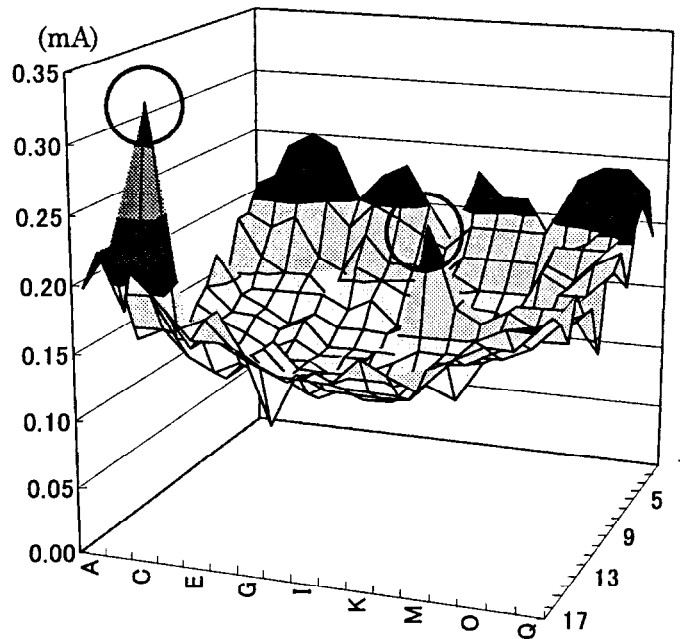


図-4.17 漏水がある条件の測定結果
(水深 1.6m, 電場制御専用電極使用)

表-4.6 電場制御専用電極を使用した条件の電流測定電極の測定結果
(水深 1.6m, 漏水あり, 単位 : mA)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	0.20	0.24	0.25	0.24	0.20	0.22	0.23	0.20	0.17	0.23	0.21	0.21	0.18	0.23	0.24	0.24	0.19
2	0.21	0.22	0.23	0.20	0.18	0.20	0.19	0.18	0.17	0.19	0.19	0.19	0.19	0.22	0.22	0.22	0.23
3	0.19	0.18	0.19	0.16	0.15	0.18	0.16	0.16	0.15	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.19	0.21	0.22
4	0.19	0.16	0.15	0.15	0.13	0.16	0.15	0.14	0.14	0.16	0.15	0.15	0.15	0.19	0.19	0.19	0.21
5	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14	0.12	0.12	0.14	0.14	0.14	0.13	0.18	0.17	0.19	0.17
6	0.17	0.14	0.13	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.18	0.17	0.19	0.20
7	0.15	0.13	0.13	0.12	0.13	0.11	0.11	0.11	0.12	0.14	0.13	0.14	0.13	0.15	0.17	0.17	0.19
8	0.14	0.13	0.12	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12	0.14	0.13	0.14	0.14	0.16	0.16	0.17	0.19
9	0.12	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.11	0.09	0.14	0.19	0.17	0.14	0.17	0.17	0.17	0.14
10	0.15	0.13	0.12	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.13	0.13	0.23	0.17	0.16	0.17	0.16	0.16	0.18
11	0.17	0.13	0.12	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14	0.14	0.16	0.16	0.17	0.18
12	0.15	0.14	0.12	0.11	0.13	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.20
13	0.14	0.15	0.13	0.12	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.15	0.16	0.17	0.17
14	0.18	0.18	0.15	0.15	0.16	0.13	0.13	0.12	0.13	0.12	0.12	0.13	0.16	0.16	0.16	0.17	0.19
15	0.20	0.23	0.19	0.15	0.18	0.15	0.10	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.16	0.16	0.17	0.18	0.20
16	0.22	0.18	0.33	0.17	0.18	0.16	0.15	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14	0.16	0.17	0.18	0.18	0.20
17	0.20	0.23	0.21	0.19	0.17	0.17	0.16	0.15	0.15	0.15	0.17	0.16	0.15	0.17	0.19	0.20	0.20

註：表中の破線で囲まれた部分が漏水位置

(3) 補正電極の効果

図-4.18 と図-4.19 に補正電極を併用して測定した電流測定電極の測定結果と補正電極の測定結果を示す。なお、これらの測定は、先の実験で用いた $\phi 200\text{mm}$ の漏水を $\phi 50\text{mm}$ に補修して行った。

図-4.18 に示す電流測定電極の測定結果は、図-4.17 の電場制御専用電極を用いた測定結果と同様に、表-4.6 から中央部の漏水 ($\phi 100\text{mm}$) において電流値が 0.157mA で、周辺の電流値がおおよそ 0.060mA であることから明確に検知できるが、 $\phi 50\text{mm}$ の漏水周辺の電流測定値が $0.057\text{mA}\sim 0.094\text{mA}$ で、測定エリア外周部で測定される電流値 $0.074\text{mA}\sim 0.100\text{mA}$ と比較してほとんど差がなく、明確に漏水位置を特定することができない。

また、図-4.18 から、モルタル吹き付けを経由して流れる電流成分は、補正電極を新たに加えたことにより、図-4.17 に示す電位制御専用電極を用いた場合と比較して、表-4.5 と表-4.6 を参照することにより、漏水から離れた測定エリア外周部の最大電流値で 0.250mA から 0.136mA と約半分になっているが、やはり保護層を経由して流れる電流を消去できないことがわかる。

一方、同一条件における補正電極の測定結果である図-4.19 は、電流測定電極の測定結果である図-4.18 のように測定エリア中央部の漏水を示す電流のピークが存在しないことと全体的な電流の大きさが異なるが、測定エリア外周部のグラフの傾向が非常に似ていることがわかる。

そこで、「4.1.4 保護層に流れる電流の補正方法」に示した式(4.13)を用いて補正した結果を図-4.20 に示す。図-4.20 から、図-4.18 では周辺のモルタル吹き付けの影響で測定エリア外周付近に見られる電流の増大が、表-4.9 に示すように、 0mA 近辺の非常に小さな値 ($-0.005\text{mA}\sim -0.017\text{mA}$) に補正され、漏水周辺以外非常に平坦なグラフとなっていることがわかる。

ところで、図-4.18 において、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水部分で計測された電流の大きさは、約 0.15mA で、漏水周辺で測定された最小の電流は約 0.05mA である。したがって、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水位置における測定電流から、モルタル吹き付けを経由して流れる電流の影響を除外すると約 0.1mA の電流が漏水によって生じた電流と考えられる。一方、図-4.20 において電流のピークとなる $\phi 100\text{mm}$ の漏水部分における電流は、表-4.9 に示すように 0.099mA となっており、モルタル吹き付けを経由して流れる電流を十分補正できていることがわかる。また、 $\phi 50\text{mm}$ の漏水についても、補正後最大電流 0.010mA 流れるのに対し、漏水周辺では $-0.005\text{mA}\sim -0.010\text{mA}$ の電流が流れており、周辺の補正後の電流と比較して明瞭に位置を確認できる。

また、水槽が遮水シートだけで構成される水深 0.4m の実験の場合と同様に、印加電極が $\phi 100\text{mm}$ の漏水から 2.2m 離れた条件では、漏水を経由して流れる電流の影響が消え、 $\phi 50\text{mm}$ の漏水から 1.7m 離れた条件で漏水を経由して流れる電流の影響を除去できることがわかる。

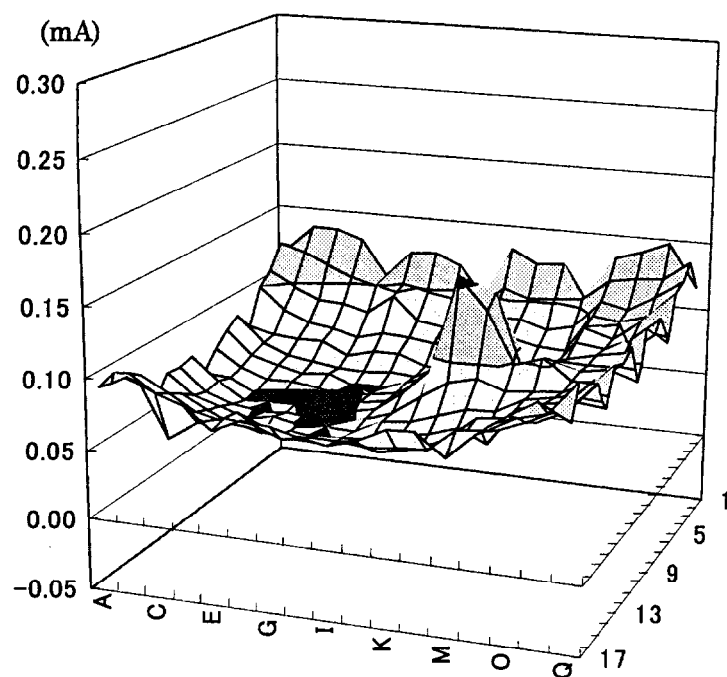


図-4.18 補正前の電流測定電極の測定結果
(水深 1.6m, 電場制御専用電極使用)

表-4.7 補正前の測定結果
(水深 1.6m, 電場制御専用電極使用, 単位: mA)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	0.120	0.136	0.136	0.130	0.102	0.123	0.124	0.116	0.092	0.133	0.124	0.125	0.096	0.134	0.140	0.148	0.116
2	0.125	0.121	0.113	0.105	0.100	0.103	0.098	0.095	0.092	0.107	0.101	0.102	0.104	0.120	0.124	0.126	0.140
3	0.109	0.098	0.090	0.087	0.083	0.098	0.081	0.078	0.080	0.089	0.089	0.084	0.089	0.109	0.106	0.117	0.131
4	0.100	0.084	0.077	0.074	0.069	0.074	0.072	0.069	0.071	0.079	0.080	0.076	0.075	0.104	0.101	0.108	0.127
5	0.074	0.070	0.068	0.069	0.059	0.059	0.065	0.058	0.057	0.072	0.067	0.067	0.060	0.099	0.094	0.108	0.095
6	0.088	0.068	0.061	0.059	0.056	0.055	0.056	0.055	0.065	0.066	0.067	0.067	0.071	0.095	0.092	0.102	0.119
7	0.082	0.064	0.059	0.055	0.057	0.049	0.049	0.057	0.063	0.071	0.071	0.078	0.074	0.087	0.092	0.096	0.112
8	0.073	0.061	0.054	0.053	0.051	0.047	0.051	0.055	0.064	0.075	0.083	0.085	0.081	0.092	0.091	0.092	0.121
9	0.059	0.059	0.049	0.047	0.041	0.047	0.050	0.054	0.051	0.085	0.133	0.142	0.084	0.098	0.092	0.096	0.088
10	0.078	0.061	0.050	0.050	0.050	0.047	0.049	0.054	0.068	0.088	0.157	0.134	0.098	0.104	0.091	0.093	0.119
11	0.076	0.060	0.052	0.049	0.051	0.049	0.047	0.052	0.060	0.073	0.086	0.091	0.084	0.087	0.089	0.098	0.114
12	0.077	0.062	0.056	0.050	0.053	0.049	0.050	0.050	0.060	0.062	0.068	0.075	0.076	0.087	0.090	0.096	0.118
13	0.062	0.069	0.059	0.051	0.048	0.052	0.049	0.051	0.052	0.057	0.062	0.068	0.058	0.085	0.092	0.096	0.093
14	0.087	0.075	0.065	0.060	0.065	0.055	0.055	0.053	0.059	0.055	0.058	0.067	0.083	0.086	0.086	0.095	0.116
15	0.094	0.082	0.071	0.064	0.075	0.063	0.061	0.060	0.064	0.059	0.062	0.067	0.080	0.083	0.092	0.101	0.122
16	0.100	0.094	0.057	0.072	0.076	0.074	0.067	0.071	0.070	0.068	0.071	0.072	0.087	0.090	0.100	0.105	0.129
17	0.096	0.105	0.095	0.089	0.074	0.083	0.082	0.077	0.073	0.078	0.089	0.090	0.074	0.094	0.108	0.120	0.108

註：表中の破線で囲まれた部分が漏水位置

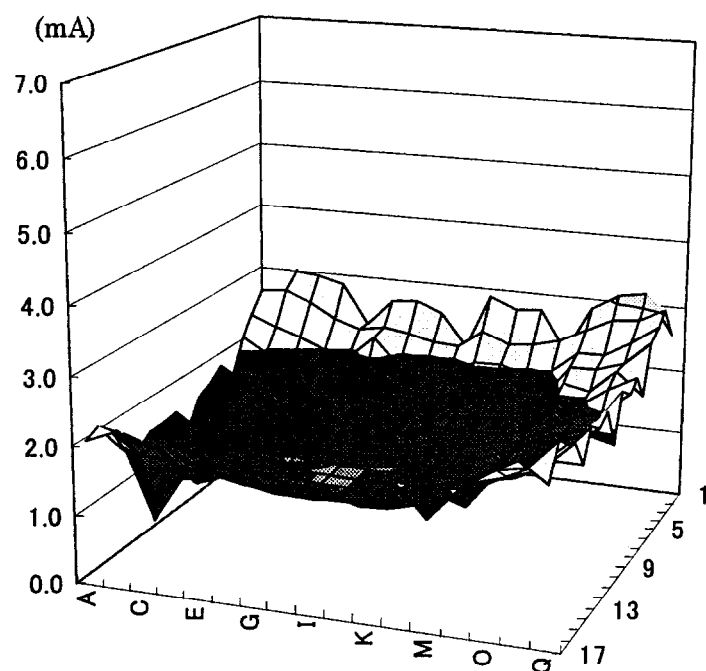


図-4.19 補正電極の測定結果
(水深 1.6m, 電場制御専用電極使用)

表-4.8 補正電極の測定結果
(水深 1.6m, 電場制御専用電極使用, 漏水有り, 単位: mA)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	2.605	3.002	2.966	2.856	2.259	2.650	2.703	2.518	2.034	2.866	2.716	2.741	2.142	2.846	3.083	3.165	2.562
2	2.747	2.765	2.618	2.399	2.271	2.338	2.268	2.163	2.135	2.434	2.274	2.314	2.413	2.620	2.795	2.837	3.044
3	2.441	2.274	2.157	1.999	1.915	2.264	1.873	1.795	1.841	2.048	2.038	1.948	2.041	2.374	2.388	2.604	2.891
4	2.194	1.978	1.822	1.748	1.637	1.775	1.623	1.585	1.557	1.791	1.783	1.708	1.716	2.261	2.247	2.402	2.742
5	1.692	1.678	1.620	1.646	1.388	1.471	1.462	1.293	1.254	1.546	1.455	1.479	1.343	2.101	2.031	2.375	2.047
6	1.931	1.599	1.467	1.388	1.330	1.239	1.213	1.173	1.300	1.363	1.349	1.361	1.468	1.949	1.963	2.215	2.466
7	1.779	1.518	1.427	1.304	1.308	1.080	1.056	1.103	1.169	1.314	1.256	1.361	1.392	1.665	1.852	2.008	2.321
8	1.650	1.483	1.289	1.240	1.163	1.041	1.049	1.028	1.075	1.211	1.202	1.234	1.396	1.638	1.783	1.894	2.459
9	1.289	1.401	1.187	1.141	0.902	1.021	0.990	0.986	0.826	1.164	1.168	1.351	1.271	1.701	1.788	1.919	1.805
10	1.672	1.404	1.200	1.141	1.105	0.995	0.979	0.959	1.125	1.125	1.178	1.149	1.396	1.809	1.757	1.913	2.411
11	1.624	1.368	1.201	1.117	1.135	1.028	0.978	0.970	1.067	1.086	1.136	1.258	1.378	1.593	1.731	2.014	2.291
12	1.629	1.423	1.294	1.134	1.189	1.070	1.068	1.021	1.128	1.074	1.134	1.268	1.464	1.633	1.830	2.010	2.447
13	1.481	1.563	1.369	1.212	1.120	1.141	1.063	1.076	1.076	1.125	1.194	1.357	1.216	1.708	1.936	2.054	2.036
14	1.831	1.686	1.442	1.383	1.463	1.256	1.234	1.199	1.286	1.219	1.253	1.417	1.707	1.801	1.867	2.081	2.470
15	2.026	1.693	1.391	1.453	1.727	1.445	1.384	1.375	1.439	1.349	1.372	1.487	1.733	1.816	2.034	2.232	2.574
16	2.200	1.859	0.938	1.579	1.737	1.681	1.563	1.654	1.646	1.566	1.641	1.674	1.877	1.984	2.240	2.325	2.752
17	2.106	2.286	2.017	1.996	1.707	1.822	1.869	1.735	1.685	1.760	2.040	2.038	1.608	2.060	2.339	2.570	2.304

註：表中の破線で囲まれた部分が漏水位置

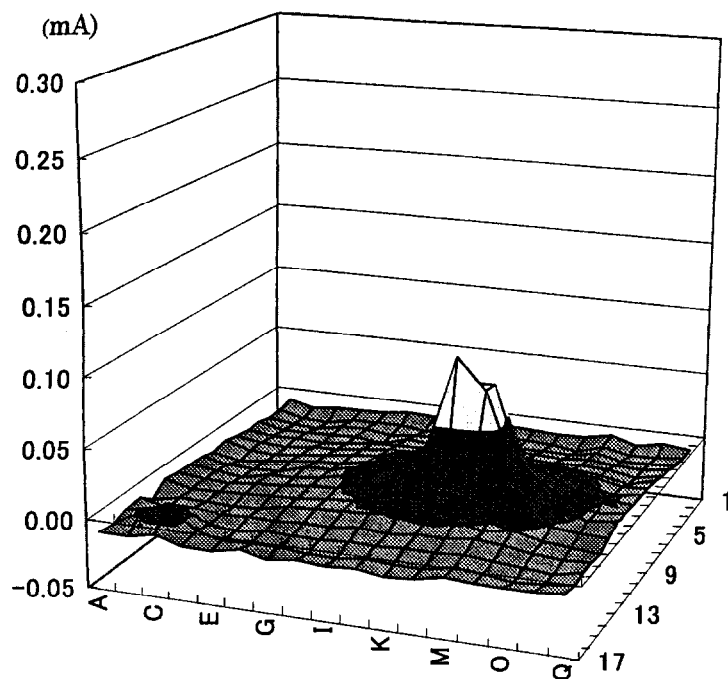


図-4.20 補正電極による補正結果
(水深 1.6m, 電場制御専用電極使用)

表-4.9 補正電極による補正結果
(水深 1.6m, 漏水有り, 電場制御専用電極使用, 単位: mA)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	-0.009	-0.013	-0.011	-0.012	-0.010	-0.008	-0.010	-0.009	-0.009	-0.009	-0.011	-0.011	-0.010	-0.007	-0.013	-0.009	-0.011
2	-0.011	-0.016	-0.017	-0.014	-0.013	-0.013	-0.015	-0.012	-0.014	-0.014	-0.012	-0.013	-0.016	-0.010	-0.015	-0.015	-0.011
3	-0.012	-0.015	-0.017	-0.012	-0.012	-0.014	-0.012	-0.011	-0.011	-0.013	-0.012	-0.013	-0.012	-0.009	-0.012	-0.012	-0.012
4	-0.009	-0.014	-0.013	-0.013	-0.012	-0.014	-0.009	-0.010	-0.006	-0.010	-0.008	-0.009	-0.010	-0.008	-0.010	-0.011	-0.009
5	-0.010	-0.013	-0.012	-0.013	-0.010	-0.008	-0.008	-0.006	-0.005	-0.005	-0.005	-0.006	-0.007	-0.005	-0.007	-0.010	-0.007
6	-0.008	-0.011	-0.012	-0.010	-0.010	-0.006	-0.004	-0.003	0.001	-0.002	0.000	-0.001	-0.002	-0.002	-0.005	-0.008	-0.003
7	-0.006	-0.011	-0.012	-0.010	-0.008	-0.005	-0.003	0.002	0.005	0.006	0.009	0.010	0.005	0.004	0.000	-0.004	-0.003
8	-0.009	-0.013	-0.010	-0.009	-0.007	-0.005	-0.001	0.004	0.011	0.015	0.023	0.024	0.012	0.011	0.003	-0.002	-0.001
9	-0.005	-0.010	-0.010	-0.010	-0.004	-0.004	0.001	0.005	0.010	0.027	0.075	0.075	0.021	0.014	0.003	0.001	-0.002
10	-0.005	-0.009	-0.010	-0.007	-0.005	-0.002	0.000	0.006	0.012	0.032	0.099	0.077	0.029	0.014	0.004	-0.002	-0.001
11	-0.005	-0.008	-0.008	-0.006	-0.005	-0.002	-0.002	0.004	0.007	0.019	0.030	0.029	0.016	0.008	0.003	-0.002	0.000
12	-0.004	-0.009	-0.008	-0.006	-0.006	-0.004	-0.003	-0.001	0.004	0.009	0.012	0.012	0.003	0.006	-0.001	-0.004	-0.003
13	-0.011	-0.009	-0.009	-0.009	-0.008	-0.005	-0.004	-0.002	-0.001	0.001	0.003	0.001	-0.002	0.000	-0.004	-0.006	-0.008
14	-0.004	-0.009	-0.007	-0.009	-0.008	-0.007	-0.006	-0.006	-0.005	-0.005	-0.004	-0.003	-0.002	-0.003	-0.007	-0.008	-0.007
15	-0.006	-0.002	0.002	-0.008	-0.011	-0.009	-0.008	-0.008	-0.007	-0.008	-0.006	-0.007	-0.006	-0.006	-0.007	-0.009	-0.010
16	-0.009	0.002	0.010	-0.006	-0.010	-0.009	-0.011	-0.011	-0.012	-0.010	-0.010	-0.011	-0.006	-0.006	-0.008	-0.011	-0.010
17	-0.008	-0.008	-0.005	-0.010	-0.011	-0.007	-0.011	-0.009	-0.011	-0.009	-0.012	-0.011	-0.006	-0.006	-0.008	-0.008	-0.007

註：表中の破線で囲まれた部分が漏水位置

ここで、保護層を経由して流れる電流を補正電極の測定値を用いた補正について検証する。前述のように、図－4.18 と図－4.19 を比較すると、補正電極の測定結果である図－4.19 では、測定エリア中央部の漏水位置で電流のピークが認められないところが異なるだけで、モルタル吹き付けの影響が大きくでている測定エリア外周部分の傾向は同じである。これは、「4.1.4 保護層に流れる電流の補正方法」で述べた2つの仮定が成り立っているためと考えられる。

すなわち、第1の仮定とは、「保護層と地盤との接触面における電位分布は、電流測定電極や補正電極の電位とほとんど差がない。」で、第2の仮定とは、「補正電極で測定される電流に、漏水を経由して流れる電流成分が混入しない。」である。

そこで、第1の仮定について、本研究に使用した実験水槽のデータを用いて検証する。ここで、比抵抗 (ρ) を有する無限の広がりを持つ平面上にに設けられた電源から電流(I) が流れている場合、電源から距離(r)はなれた位置における電位(V)は、式(4.14)によって示される³⁾。

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (4.14)$$

本実験水槽に設置した多数の電極で構成された電流測定電極から、モルタル吹き付けに最も近い1本の電極について、式(4.14)により、モルタル吹き付け位置における電位を計算してみる。式(4.14)に、地盤の比抵抗を粘土層の代表的な値 $10 \Omega \text{m}^2$ 、電流測定電極に流れる電流を図－4.17 から 0.15mA として、電流測定電極からモルタル吹き付けまでの距離 $2.0 \text{m} \sim 4.4 \text{m}$ を代入してモルタル吹き付け位置での電位は、以下のように計算できる。

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} = \frac{10 \times 0.15}{2\pi \times (2.0 \rightarrow 4.4)} = 0.05 \text{mV} \rightarrow 0.12 \text{mV} \quad (4.15)$$

この計算は、1本の電極にモルタル吹き付けを経由して流れる電流が集中して流れる条件である。現実には、モルタルを経由して流れる電流は、個々の電極に分散して流れるから、モルタル吹き付け位置と電流測定電極の電位差は、先の計算結果よりも小さいこととなる。したがって、地盤の電気抵抗は非常に小さく、モルタル吹き付けにおける電位は一定と考えられる。

一方、補正電極は、モルタル吹き付けに沿って環状に配置されており、銅線であるため電位は一定である。したがって、これら2つの電流の経路を比較すると、印加電極から水の部分における電気経路は共通であるから、電流測定電極と補正電極で測定される特性が非常に近くなっているものと考えられる。

つぎに、第2の仮定である「補正電極に漏水を経由して流れる電流成分が混入しない。」について考えてみると、補正電極の測定結果である図－4.19 には漏水に相当する電流のピークは見られず、モルタル吹き付けの影響のみ測定されているようにみえる。

漏水を経由して補正電極に流れる電流の経路は、印加電極から漏水、地盤、モルタル吹き付け、補正電極である。先に計算したように、地盤に設置した多数の電流測定電極によって地盤の電位が電流測定電極や補正電極とほぼ同一のレベルであるため、電流測定電極群の間隙を抜けて補正電極に電流が流れられないと考えられる。

保護層を経由して流れる電流の補正方法は、保護層と処分場の地盤との接続面における電位が電流測定電極とほとんど差がない状態となっていることで成立している。

したがって、こうした条件が満足されれば、処分場の形状によらず補正方法が適用できると判断される。

(4) 漏水の位置的精度の検証

測定対象に対する点電極電場制御電流測定の位置的精度について考える。

図-4.15 に示した水深 0.4mの条件についての測定結果を，図-4.21 に示すコンター図として示す。遮水シートにあけた $\phi 200\text{mm}$ と $\phi 100\text{mm}$ の孔の部分について，拡大表示したものが，図-4.22 と図-4.23 である。

図-4.15，図-4.23 をみると，それぞれの漏水は，最大値が測定された電極をピークとする円錐状の形状をしている。しかし，漏水周辺の電極が少ないことから，最大測定値が測定された電極の位置が漏水位置とはならない。しかし，最大測定値が測定された電極周辺の測定結果を総合すると，漏水位置を特定することができる。

すなわち，測定結果をそのまま図示すると，図-4.15 や図-4.21 のようになるが，最大値周辺の等電流コンター線が，マクロに見ると円形もしくは楕円形となっている。

そこで，漏水1 ($\phi 200\text{mm}$) と漏水2 ($\phi 100\text{mm}$) の漏水周辺のコンターに合わせて円および楕円を図-4.22 と図-4.23 のように描き，その座標を求めると，図-4.10 のようになる。すなわち，漏水の推定位置と設置位置の誤差は，おおよそ $\pm 5\text{cm}$ であることがわかる。

表-4.10 漏水の位置的精度（水深 0.4m，遮水シートだけで構成された条件）

漏 水	漏水の推定位置	漏水設置位置	誤 差
漏水 1 ($\phi 200\text{mm}$)	15B+横 30cm+縦 48cm	15B+横 30cm+縦 45cm	横 $\pm 0\text{cm}$
			縦 $+3\text{cm}$
漏水 2 ($\phi 100\text{mm}$)	9K+ 横 20cm+縦 30cm	9K+ 横 25cm+縦 25cm	横 -5cm
			縦 $+5\text{cm}$

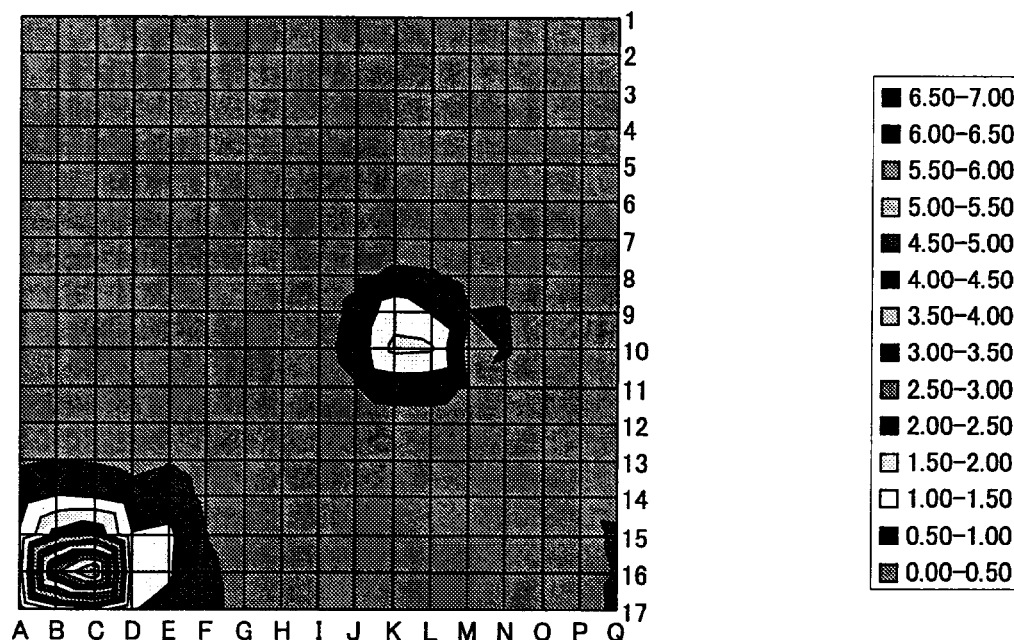


図-4.21 $\phi 200\text{mm}$ (左下)， $\phi 100\text{mm}$ (中央) の漏水の測定結果
(水深 0.4m，遮水シートだけで水槽が構成されている)

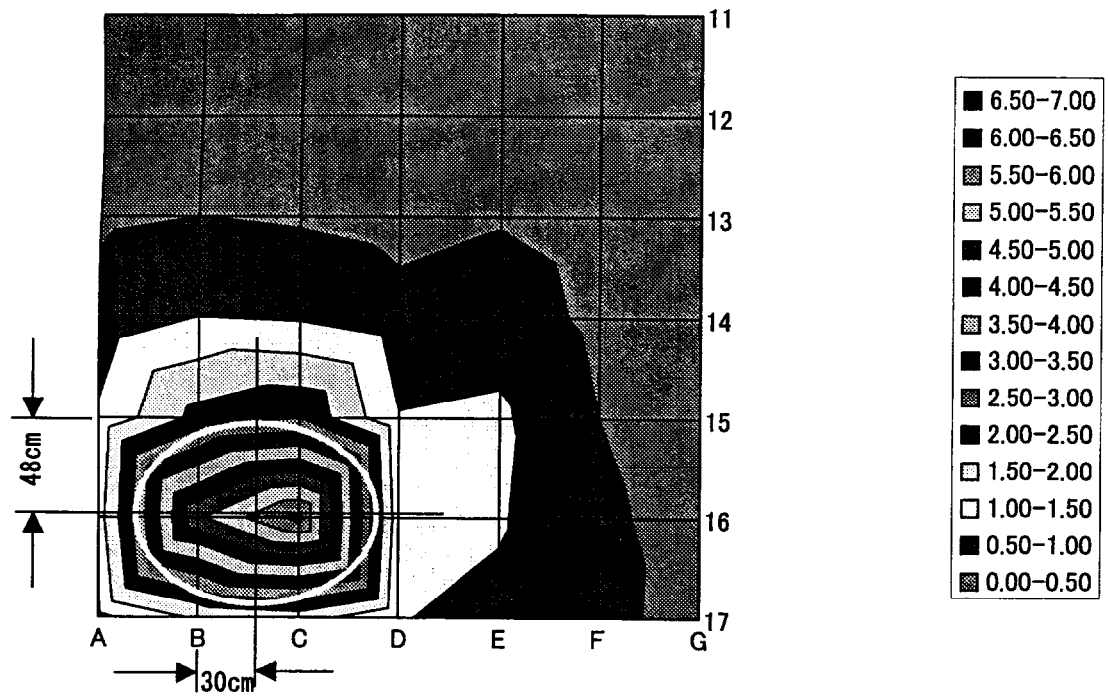


図-4.22 $\phi 200\text{mm}$ 漏水周辺のコンター図
(水深 0.4m, 遮水シートだけで水槽が構成されている)

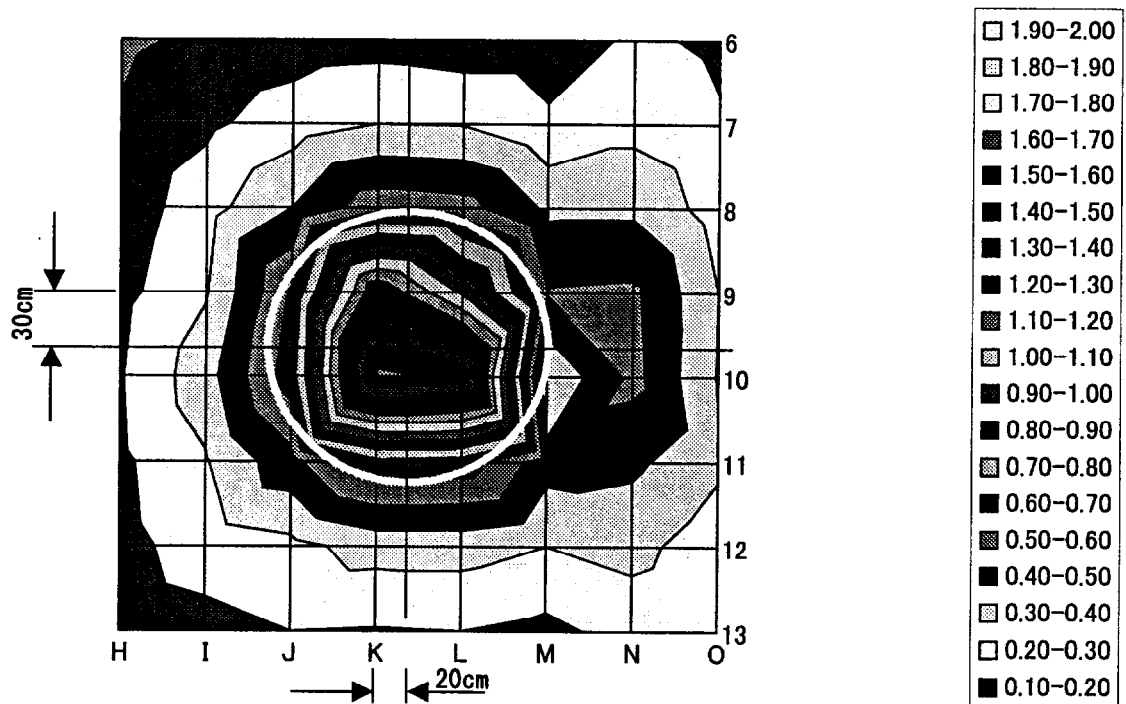


図-4.23 $\phi 100\text{mm}$ 漏水周辺のコンター図
(水深 0.4m, 遮水シートだけで水槽が構成されている)

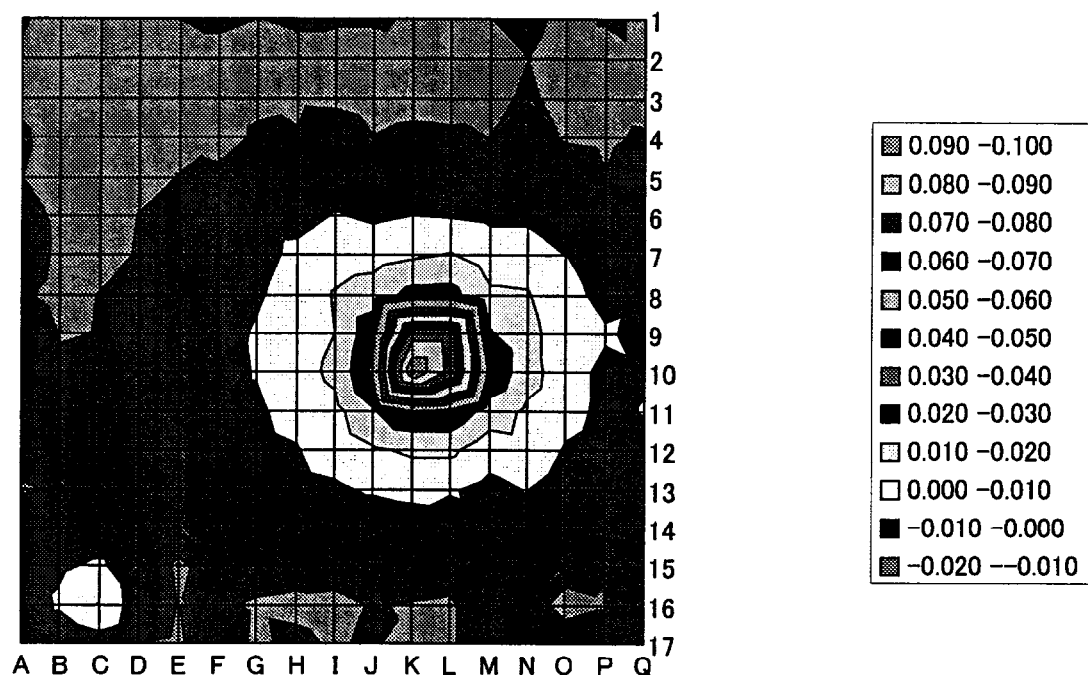


図-4.24 $\phi 50\text{mm}$ (左下), $\phi 100\text{mm}$ (中央) 漏水の測定結果
(水深 1.6m, モルタル吹き付けが水没した条件)

表-4.11 漏水の位置的精度 (水深 1.6m, モルタル吹き付けが水没した条件)

漏 水	漏水の推定位置	漏水設置位置	誤 差
漏水 1 ($\phi 50\text{mm}$)	15B+横 40cm+縦 40cm	15B+横 30cm+縦 46cm	横 +10cm
			縦 -6cm
漏水 2 ($\phi 100\text{mm}$)	9K+ 横 20cm+縦 30cm	9K+ 横 25cm+縦 25cm	横 -5cm
			縦 +5cm

同様に、図-4.23 に示した補正処理を施した水深 1.6m の測定結果についても、図-4.25 と図-4.26 を用いて漏水 2 ($\phi 100\text{mm}$) と漏水 1 ($\phi 50\text{mm}$) の漏水位置を推定すると、それぞれの漏水の中心座標は、表-4.11 のようになる。

漏水 2 ($\phi 100\text{mm}$) の漏水位置は、先の水深が 60cm の条件の測定結果と同様に、電極 9K からの距離が同じとなった。一方、漏水 1 ($\phi 50\text{mm}$) の漏水は、漏水の大きさが $\phi 200\text{mm}$ から $\phi 50\text{mm}$ に小さくなったせいもあり、横方向に 10cm 異なる結果となった。

水深 0.4m と水深 1.6m の測定結果から得られた漏水の位置的精度は、水深の違いやモルタル吹き付けに流れる電流の補正を施しても、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水については $\pm 10\text{cm}$ 程度である。一方、 $\phi 50\text{mm}$ の漏水の位置的精度は、縦方向には -5cm と小さいが、横方向には 10cm と精度に違いが見られた。これは、漏水の周辺で確認できる電流が小さいためであるが、電極間隔の 1 m と比較すると、 $1/5 (=10\text{cm}/50\text{cm})$ の誤差である。

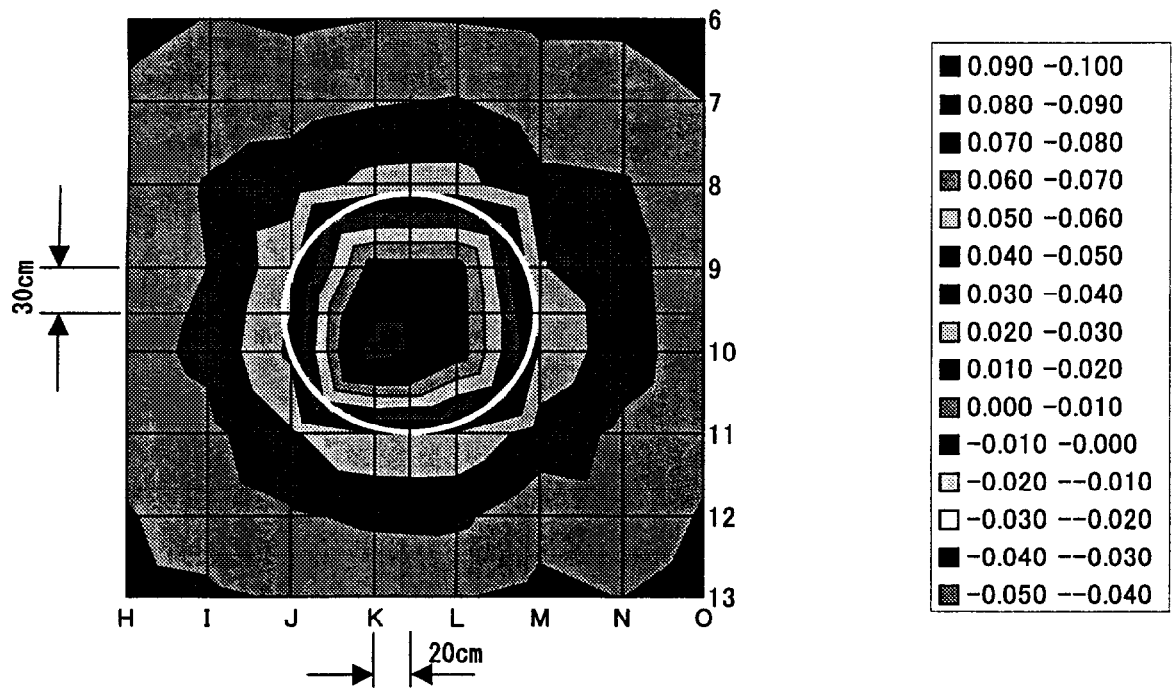


図-4.25 $\phi 100\text{mm}$ (中央) 漏水周辺のコンター図
(水深 1.6m, モルタル吹き付けが水没した条件)

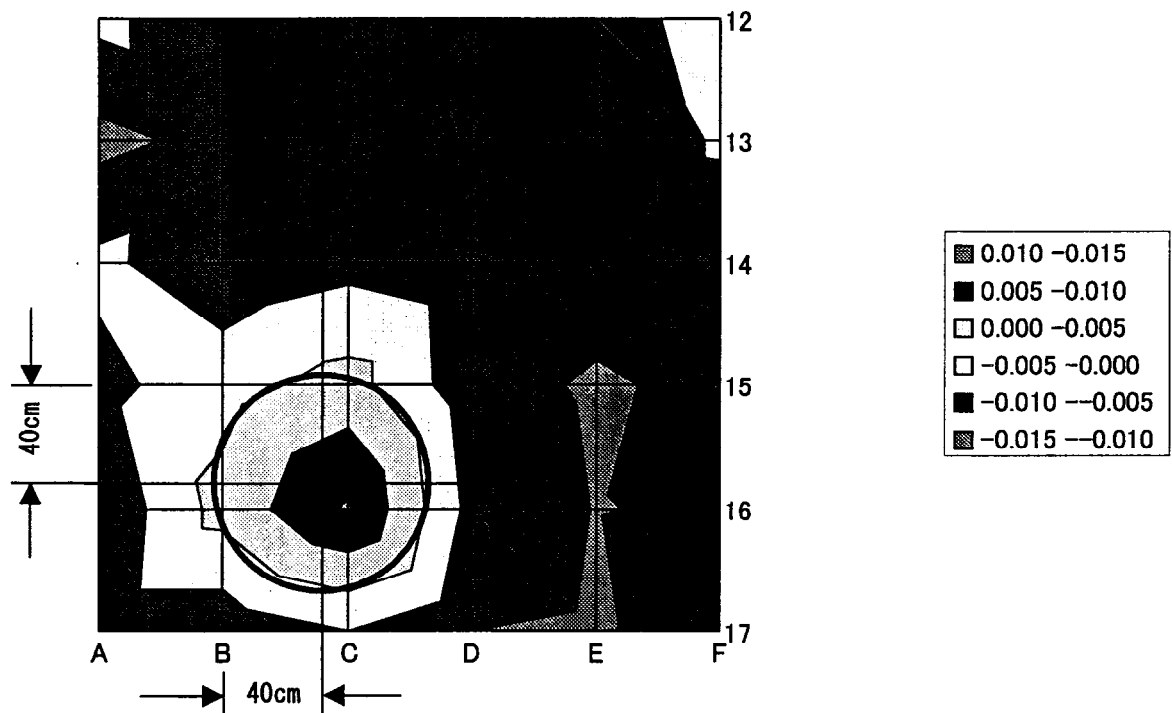


図-4.26 $\phi 50\text{mm}$ (左下) 漏水周辺のコンター図
(水深 1.6m, モルタル吹き付けが水没した条件)

(5) 測定原理の普遍性

電氣的漏水位置検知システムは、全て浸透流や熱伝導と同じポテンシャル理論に支配されている。したがって、電流を流す媒体の電氣伝導度と印加電圧を調整することにより、実規模の処分場について模型実験結果から漏水位置検知システムの性能について推定することが可能である。

本研究に使用した実験水槽は、遮水シートの厚みが 1.5mm で、実処分場に敷設されている遮水シートと同じであるが、実験水槽のスケールは 16m×16m とおおよそ実処分場の約 1/10 の大きさである。また、処分場内に埋め立てられる廃棄物は、種々雑多であり電氣伝導度も一般の地盤よりも高いと考えられる。事実、筆者らの調査によれば、主として焼却灰が埋め立てられる処分場 3 箇所の浸出水の電氣伝導度を調査したところ約 3mS/cm～10 mS/cm であった。一方、本実験において実験水槽に貯留した水の電氣伝導度は、約 0.3mS/cm であるから、約 1/10～1/30 の電氣伝導度である。

ここで、印加電圧 5V のままで、電氣伝導度が 10 倍かつ実験水槽の 10 倍の大きさを有する処分場について考える。実験水槽の大きさが 10 倍の条件では、遮水シートの厚みは 15mm となるが、処分場に敷設される 1.5mm の遮水シートとすると、実験と同じ周波数かつ同電圧を印加した条件では、遮水シートを介して流れる電流成分が実験の場合と比較して増えることとなる。しかし、遮水シートを介して流れる電流成分は、同波長であるが位相が 90° 異なることを利用して、位相検波回路で除去でき、測定への影響は軽微である。したがって、遮水シートを介して流れる電流成分について除外して考えることができる。

ところで、漏水に流れる電流 I は、電界の強さ E 、電流の流れる媒体の電氣伝導度 σ 、漏水の面積 a を用いて式(4.16)で示される⁹⁾。

$$I = a\sigma E \quad (4.16)$$

式(4.16)から、実際の処分場の漏水に流れる電流 I_L は、電界の強さ E_L 、電流の流れる媒体の電氣伝導度 σ_L 、漏水の面積 a_L を用いて式(4.17)で示される。また、実験水槽の漏水に流れる電流 I_s は、電界の強さ E_s 、電流の流れる媒体の電氣伝導度 σ_s 、漏水の面積 a_s を用いて式(4.18)で示される。

$$I_L = a_L\sigma_L E_L \quad (4.17)$$

$$I_s = a_s\sigma_s E_s \quad (4.18)$$

実験で測定された漏水の電流が測定可能な電流の大きさとする、実処分場の漏水についても同じ大きさの電流が測定できれば、十分漏水位置を確認できると考えられる。そこで、式(4.19)の条件で実処分場の漏水の大きさを示すと式(4.20)となる。

$$I_L = I_s \quad (4.19)$$

$$a_L = a_s \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_L} \right) \left(\frac{E_s}{E_L} \right) \quad (4.20)$$

式(4.20)において、実験水槽と実処分場の電気伝導度の比(σ_s/σ_L)は、前述のように 1/10 である。また、電界の強さの比(E_s/E_L)は、印加電圧を実験水槽と実処分場で同一とすると、実験水槽の縮尺から 10 となる。

したがって、式(4.19)は、実処分場と実験水槽の電気伝導度と電界の強さの条件から $a_L = a_s$ となり、実処分場においても、実験水槽にあけた同一のサイズの漏水についても検知できると判断される。

補正方法についても、実処分場における測定条件であっても、印加電極から地盤側に設置した電流測定電極に流れる電流と印加電極から補正電極に流れる電流は、実験水槽と実処分場の形状が同一であれば、電界の強さと電気伝導度の大きさによって決まることとなる。したがって、本補正方法についても普遍的に成り立つものと考えられる。

以上の考察により、個々の電圧印加/電場制御電極を実験と同様に 50cm 間隔に設置したり、処分場に高電圧を印加することなく、漏水位置を検知できると判断される。

ところで、「(4) 漏水の位置的精度の検証」で述べたように、水深が 1.6m でモルタル吹付けの影響がある条件で、漏水の位置的精度は、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水 2 で $\pm 5\text{cm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$ の漏水 1 で $\pm 10\text{cm}$ である。前述のように相似則に基づいて、実際の処分場に適用した場合の漏水の位置的精度は、水槽実験結果を 10 倍にした位置的精度すなわち、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水について $\pm 50\text{cm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$ について漏水で $\pm 100\text{cm}$ となる。

つぎに、実験に使用した水槽の 10 倍のスケールアップモデルと実規模の処分場の違いを踏まえた上で、実際の処分場への適用について考える。

水槽のスケールアップモデルにおいて設置される電極サイズも同じ比率で大きくなり、 $45\text{cm} \times 45\text{cm}$ の大きさとなる。実験に使用した電圧印加/電場制御電極のサイズと比較すると、面積で 100 倍大きくなっており、地盤側ならびに廃棄物処分場内とも電極と周辺との接触抵抗が低減でき、電極面から効率よく電流が流れるようになる。また、電極面積が大きくなることにより、電極面積が小さい場合と比較して個々の電極と周辺との接触条件が均一となり、測定結果のばらつきが小さくなり、漏水位置検知システムにとって測定上有利である。

また、本実験では、電流測定電極として $45\text{mm} \times 45\text{mm}$ の銅板を 50cm 等間隔に設置したが、縮尺 10 倍の大きさの処分場では、 $45\text{cm} \times 45\text{cm}$ の電極を 5m 等間隔に設置することとなる。電流測定電極は、地盤側の電位を均一にし、漏水を経由してくる電流を効率よく捕捉できる機能を有すればよいから、点電極である必要は特になく、裸銅線など等間隔に設置するなどにより、さらに効果的な電極構成とすることが可能である。

つぎに、廃棄物の電気伝導度について考えると、処分場内が埋め立てられる廃棄物中の塩分などにより、実験に使用した水よりも電気伝導度が高い。したがって、実処分場内に

配置する電圧印加/電場制御電極は、廃棄物中の塩分などにより電極と周辺との接触抵抗が低下するため、印加電極から電流が流れやすくなる。また、廃棄物の電気伝導度が高いために電位勾配が生じにくく、電場制御が容易となると考えられる。

ところで、処分場に埋め立てられる廃棄物の含水比や浸出水の電気伝導度にばらつきは、電位分布の乱れから漏水位置を検知する漏水位置検知システムの場合、処分場全体の電位分布に乱れを生じさせるため、漏水位置検知の精度を低下させる要因である。

しかし、本漏水位置検知システムでは、処分場内の電気伝導度にばらつきがあっても、印加電極周辺の電位分布が乱れるだけで、印加電極周辺以外は、遮水シート上下とも多数の電場制御電極によりほぼ同電位に制御されるため、漏水の周辺に印加電極が存在する条件で大きな電流が測定される特性は変化しない。

一方、式(4.16)からわかるように、廃棄物が有する電気伝導度の大きさによって、漏水を経由して流れる電流の大きさが変化すると考えられる。このため、同一の大きさの漏水であっても、測定電流に大きな差が生じ、漏水の大きさについて精度が低くなると考えられる。

以上の考察より、本漏水位置検知システムは、処分場の規模や電気伝導度の高低やばらつきなどの条件を考慮しても、十分処分場に適用できる性能を有すると判断できる。

(6) 鉍体流電法を応用したシステムとの比較

本実験に使用した水槽を利用して、鉍体流電法を応用した漏水位置検知の実験を実施した。鉍体流電法を応用した漏水位置検知システムには、処分場内外に電圧を印加した条件で、電位測定電極を処分場内の遮水シートの上に設置する方法と、電位測定電極を処分場外である遮水シートの下に設置する方法がある。これらの漏水位置検知システムは、一般に交替直流と呼ばれる矩形波電圧を処分場内外に印加するが、この実験では、先の実験と同様に、交流電圧 5V を水槽内外に印加して行った。漏水の位置と大きさは、先の点電極式電場制御電流測定の場合と同様で、B15-C15-B16-C16 の電位測定電極に囲まれた位置に設置した $\phi 50\text{mm}$ の漏水と、K9-L9-K10-L10 の電位測定電極に囲まれた位置に設置した $\phi 100\text{mm}$ の漏水である。また、実験を行った水深は、水槽が遮水シートだけで構成される条件となる 0.4m と、モルタル吹き付け面が水没する条件となる 1.6m である。

図-4.27 は、水槽内に電位測定電極を設置する方法による水深 0.4m での測定結果であるが、印加電極周辺の電位ばかりが目立ち、2つの漏水をこのままでは確認できない。

一方、図-4.28 は、水槽外に電位測定電極を設置する方法による水深 0.4m での測定結果であるが、 $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 100\text{mm}$ の2つの漏水位置を明瞭にとらえていることがわかる。また、図-4.15 の点電極式電場制御電流測定の測定結果と比較すると、グラフの凹凸が小さく、遮水シートだけで構成された測定条件において、各測定電極における測定結果のバラツキが小さいことがわかる。

一方、水深 1.6m において、モルタル吹き付けで水槽内外が電氣的に接続された条件になると、図-4.29 に示すように、水槽外に電位測定電極を設置する鉍体流電法を応用した漏水位置検知システムは、漏水位置が確認できなくなる。

処分場外に電位測定電極を設置した鉍体流電法を応用した漏水位置検知システムは、遮水シート上側にコンクリートや土質材料など導電性の保護層がない条件で、測定値のバラツキが小さく精度的に筆者の研究成果である点電極式電場制御電流測定よりも優れていると考えられる。しかし、遮水シート上側に導電性の保護層が設置された条件では、鉍体流電法を応用した漏水位置検知システムは、全く機能しなくなることがわかる。

これは、「2.1.2 電氣的漏水検知システム (1) 鉍体流電法の応用手法」において解説したように、モルタル吹き付けで水槽内外が電氣的に短絡された条件になり、漏水位置検知が不可能となる現象が生じているものと考えられる。

したがって、廃棄物処分場に砂などの土質材料やコンクリートが、保護層として用いられた場合には、現状の鉍体流電法の応用だけでは漏水が検知できないと判断される。

また、土質材料やコンクリートなど導電性の保護層ばかりでなく、現状の処分場においても、廃棄物の搬入道路によって処分場内外が電氣的に接続された条件となっており、鉍体流電法を応用した漏水位置検知システムを採用する場合には、搬入道路の入口部分で特殊な電氣的絶縁処理が必要となる。

こうした保護層や搬入道路の要因を考慮すると、筆者らが開発した点電極式電場制御電流測定による漏水位置検知システムが有利と考えられる。

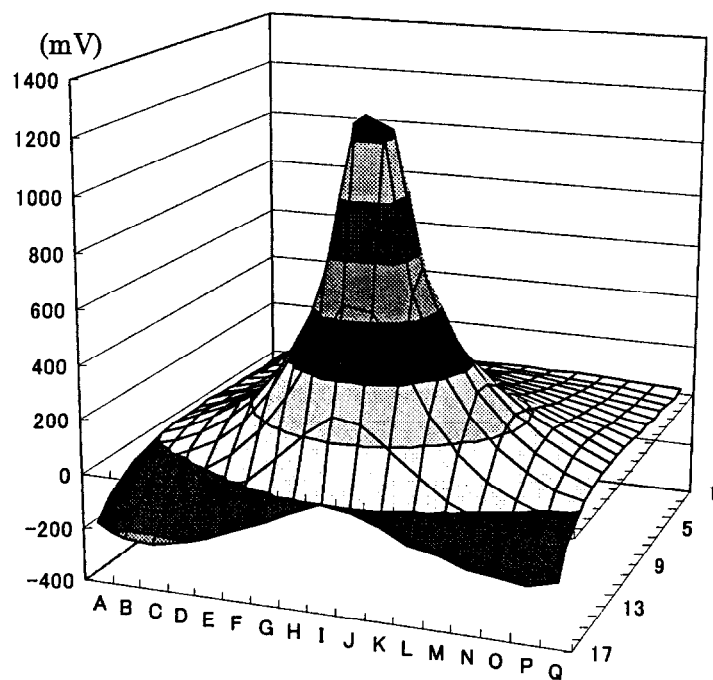


図-4.27 水槽内に電位測定電極を設置した鉱体流電法の
測定例（印加電圧 5V，水深 0.4m）

表-4.12 鉱体流電法による漏水検知
（水槽内電位測定電極設置，印加電圧 5V，単位：V）

(V)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	-0.004	0.014	0.023	0.031	0.037	0.042	0.045	0.047	0.047	0.047	0.046	0.044	0.041	0.036	0.031	0.024	0.019
2	-0.007	0.013	0.025	0.037	0.047	0.054	0.059	0.063	0.065	0.067	0.063	0.059	0.052	0.046	0.037	0.026	0.015
3	-0.007	0.013	0.030	0.045	0.058	0.068	0.076	0.082	0.084	0.083	0.082	0.075	0.066	0.057	0.045	0.032	0.018
4	-0.006	0.015	0.036	0.055	0.072	0.085	0.096	0.103	0.106	0.105	0.102	0.093	0.083	0.069	0.054	0.038	0.023
5	-0.003	0.021	0.043	0.067	0.088	0.105	0.119	0.127	0.132	0.131	0.125	0.115	0.101	0.085	0.066	0.046	0.026
6	0.000	0.028	0.054	0.082	0.108	0.130	0.147	0.159	0.164	0.162	0.152	0.137	0.119	0.099	0.078	0.054	0.031
7	0.003	0.033	0.065	0.099	0.132	0.159	0.182	0.199	0.204	0.198	0.183	0.164	0.142	0.117	0.092	0.063	0.036
8	0.006	0.041	0.075	0.116	0.156	0.191	0.223	0.249	0.257	0.247	0.224	0.195	0.168	0.139	0.108	0.075	0.043
9	0.009	0.046	0.085	0.129	0.183	0.231	0.276	0.316	0.327	0.313	0.260	0.216	0.197	0.163	0.124	0.085	0.046
10	0.011	0.050	0.092	0.142	0.210	0.273	0.346	0.408	0.433	0.415	0.334	0.281	0.241	0.191	0.142	0.095	0.050
11	0.011	0.048	0.091	0.155	0.230	0.322	0.422	0.527	0.582	0.570	0.490	0.381	0.289	0.215	0.153	0.100	0.051
12	0.003	0.038	0.086	0.149	0.235	0.354	0.494	0.666	0.829	0.819	0.635	0.456	0.328	0.229	0.151	0.096	0.050
13	-0.013	0.017	0.060	0.121	0.215	0.346	0.526	0.799	1.264	1.224	0.753	0.487	0.328	0.214	0.134	0.077	0.037
14	-0.030	-0.016	0.019	0.073	0.153	0.283	0.462	0.732	1.256	1.222	0.686	0.432	0.276	0.170	0.095	0.042	0.016
15	-0.062	-0.063	-0.042	-0.003	0.062	0.168	0.302	0.475	0.652	0.637	0.467	0.292	0.170	0.081	0.026	-0.012	-0.018
16	-0.109	-0.143	-0.140	-0.097	-0.046	0.018	0.109	0.207	0.281	0.267	0.187	0.103	0.031	-0.024	-0.063	-0.085	-0.071
17	-0.174	-0.221	-0.228	-0.206	-0.177	-0.131	-0.093	-0.042	-0.003	-0.017	-0.054	-0.102	-0.126	-0.162	-0.176	-0.191	-0.157

（印加電極位置表中の十）

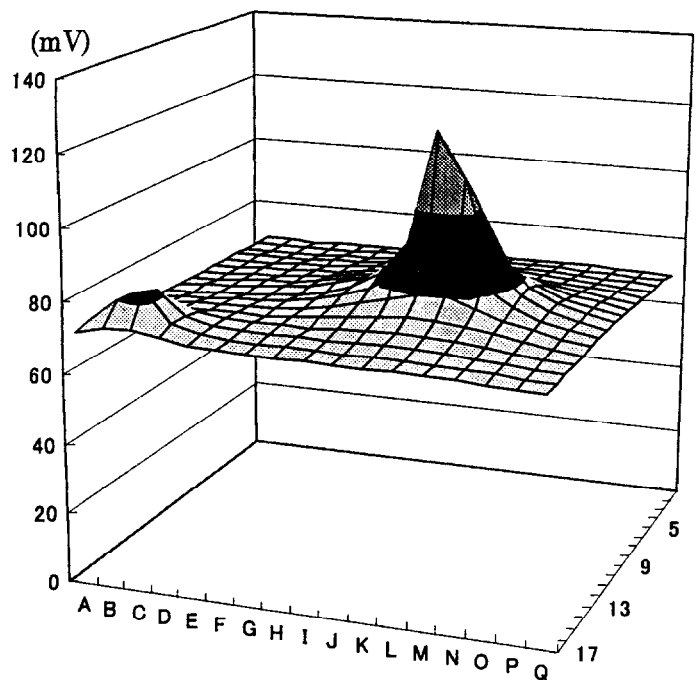


図-4.28 水槽外に電位測定電極を設置した鉍体流電法の
測定結果（印加電圧 5V，水深 0.4m）

表-4.13 鉍体流電法による漏水検知

（遮水シート下に電位測定電極設置，印加電圧 5V，単位：mV）

(V)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	71.9	74.1	74.4	73.0	71.7	71.1	71.0	70.8	70.8	70.7	70.7	70.5	70.3	70.2	69.8	69.5	69.1
2	73.5	80.0	82.5	74.8	72.7	71.7	71.6	71.5	71.5	71.4	71.4	71.2	71.1	70.6	70.2	69.7	69.4
3	73.4	79.4	81.2	75.0	72.9	72.1	72.2	72.0	72.2	72.2	72.2	72.0	71.8	71.1	70.6	70.0	69.6
4	72.0	73.9	74.6	73.5	72.7	72.3	72.5	72.6	73.0	73.3	73.5	73.3	73.0	72.1	71.2	70.5	70.0
5	71.1	72.2	72.0	72.4	72.2	72.3	72.9	73.4	74.1	75.0	75.7	75.7	74.5	73.5	72.2	71.1	70.1
6	70.6	71.2	71.5	71.7	71.9	72.4	73.2	74.5	76.1	78.3	80.0	80.1	77.6	75.1	73.4	71.7	70.4
7	70.2	70.5	70.8	71.4	71.7	72.3	73.7	75.6	78.2	83.4	88.6	88.7	81.5	76.6	73.8	71.9	70.6
8	69.7	70.0	70.4	70.9	71.6	72.3	73.8	76.0	80.3	90.3	121.7	109.1	85.4	78.1	74.6	72.3	70.9
9	69.4	70.0	70.4	70.9	71.5	72.7	74.2	76.4	80.7	90.9	116.0	102.5	85.6	78.3	74.5	72.2	70.8
10	69.5	69.7	70.0	70.6	71.2	72.1	73.4	75.0	77.8	82.6	87.3	85.8	81.0	76.7	73.8	72.0	70.7
11	69.4	69.5	69.7	70.2	70.7	71.4	72.7	73.7	75.3	77.4	78.7	78.3	76.8	74.7	72.9	71.6	70.4
12	69.1	69.4	69.6	69.9	70.4	70.9	71.9	72.6	73.5	74.6	74.9	74.8	74.1	73.0	71.9	71.0	70.0
13	68.9	69.2	69.4	69.6	70.0	70.4	71.1	71.6	72.2	72.8	73.0	72.9	72.3	71.8	71.1	70.4	69.7
14	68.9	69.0	69.1	69.3	69.7	69.9	70.5	70.9	71.2	71.5	71.7	71.5	71.3	70.9	70.4	69.8	69.4
15	68.7	68.7	68.8	68.9	69.3	69.5	70.0	70.2	70.3	70.6	70.5	70.5	70.5	70.1	69.7	69.4	68.9
16	68.7	68.7	68.6	68.7	68.9	69.1	69.5	69.7	69.7	70.0	69.9	69.9	69.8	69.5	69.2	69.0	68.8
17	68.6	68.5	68.3	68.4	68.4	68.6	68.8	69.2	69.0	69.3	69.2	69.2	69.0	69.1	68.7	68.7	68.5

（印加電極位置表中の+）

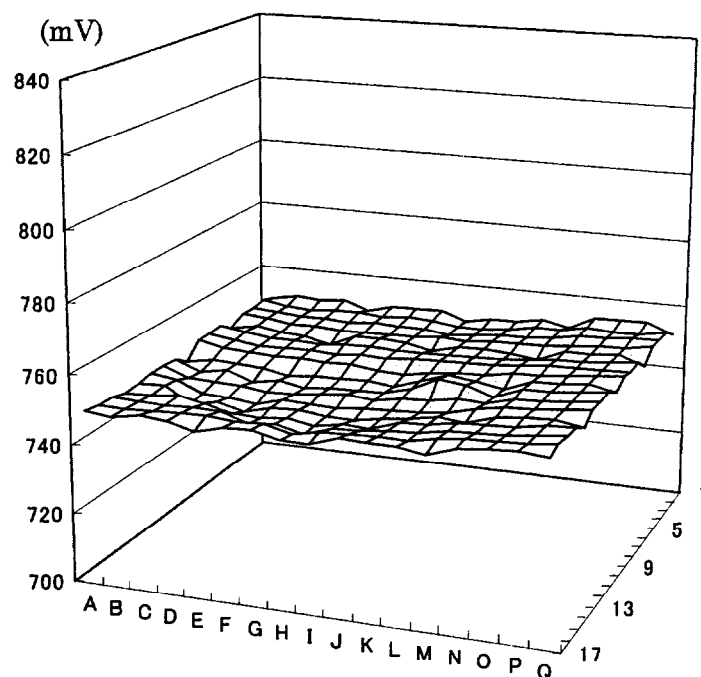


図-4.29 水槽外に電位測定電極を設置した鉍体流電法の
測定結果（印加電圧 5V，水深 1.6m）

表-4.14 鉍体流電法による漏水検知

（遮水シート下に電位測定電極設置，印加電圧 5V，水深 1.6m，単位：mV）

(V)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	750.2	749.6	750.8	749.9	748.1	750.4	750.7	748.8	748.6	750.9	750.7	750.6	749.3	752.2	752.8	753.3	752.8
2	749.5	749.2	749.3	749.8	749.9	749.3	749.4	747.8	749.3	749.6	749.9	749.8	751.2	752.0	752.4	753.1	753.7
3	749.4	748.8	748.5	749.0	748.7	746.3	747.0	745.2	748.0	748.3	749.4	749.7	751.0	751.1	751.9	752.8	753.7
4	748.0	748.6	749.2	747.6	745.5	745.6	746.4	744.8	746.5	746.3	749.1	749.3	750.7	751.2	751.6	752.6	753.1
5	748.4	748.7	744.4	745.7	743.9	745.8	746.1	745.6	745.4	746.9	747.8	749.0	748.3	750.8	751.6	752.1	750.8
6	749.2	748.5	744.8	744.7	743.9	745.6	745.5	745.5	746.0	746.7	747.0	747.7	749.8	751.0	751.7	752.2	753.2
7	749.2	746.9	746.1	745.7	744.8	745.0	745.9	747.2	746.0	747.4	748.1	749.4	748.9	751.3	751.4	752.5	753.2
8	748.9	746.2	747.6	744.8	746.0	744.7	745.6	746.0	746.3	748.3	752.2	751.1	748.5	751.4	751.7	752.6	753.4
9	745.8	747.8	747.2	746.5	745.3	746.2	746.2	746.4	745.7	747.9	751.0	749.6	748.1	751.4	751.8	752.8	751.5
10	750.6	749.0	748.4	748.3	748.3	748.1	748.2	747.3	746.8	748.3	749.2	749.5	750.5	751.3	752.0	752.6	753.3
11	750.5	749.1	748.5	748.5	748.3	748.3	748.8	748.6	749.3	749.5	750.1	750.3	750.7	751.4	751.8	752.4	752.7
12	750.9	749.4	748.8	748.7	748.5	748.9	749.2	749.0	749.1	749.1	749.5	749.6	750.2	751.3	751.7	752.3	753.3
13	748.0	749.2	748.4	747.7	746.1	749.2	749.4	749.2	747.5	749.2	749.4	749.4	747.9	751.2	751.7	752.6	749.7
14	750.5	749.7	748.9	748.6	748.5	748.4	748.5	749.0	749.6	749.3	749.7	749.9	750.4	751.3	751.8	752.3	753.7
15	750.5	749.7	749.3	749.3	748.6	749.6	748.8	749.0	748.1	748.5	749.9	750.0	750.4	751.8	752.4	753.0	753.4
16	750.5	749.6	749.3	749.8	749.6	749.6	750.0	749.3	748.2	748.7	749.3	750.5	751.0	752.2	751.7	751.8	753.6
17	749.1	750.6	750.5	750.8	748.6	750.7	750.7	750.9	748.3	749.5	750.0	751.0	749.7	753.1	753.3	753.4	750.7

（印加電極位置表中の十）

4.3 点電極式電場制御電流測定まとめ

筆者が開発した電氣的漏水検知システム「電場制御電流測定」には、点電極式と線電極式がある。また、筆者の開発した漏水検知システムに、これらの前身である「線電極式電流測定」がある。これらの漏水検知システムについて水槽実験、土槽実験、処分場実験を行った。それぞれの実験において得られた結果は、以下のようにまとめられる。

水槽実験により、点電極式電場制御電流測定は、実験から以下に示す性能を有すると考えられる。

- 1) 遮水シートで処分場内外が電氣的に遮断された条件では、遮水シート上下の電場を同電位になるよう制御することにより、従来の電流測定による漏水位置検知システムよりも分解能が高くなると考えられる。
 - 1-1) 遮水シート上下を接続する保護層がある場合、電圧印加/電場制御電極だけでは、漏水位置検知は不可能と考えられる。ただし、電圧印加/電場制御電極に加えて電場制御専用電極を併用することより、保護層を経由して流れる電流を低減でき、漏水位置検知がある程度可能となる。
 - 1-2) 点電極式電場制御電流測定の信号比率は、 $\phi 200\text{mm}$ の漏水に対して 99% で $\phi 100\text{mm}$ の漏水に対して 96% と高い。
- 2) 処分場の遮水シート上下を短絡する保護層があっても、点電極式電場制御電流測定は、電流測定電極の測定結果を補正用電極の測定結果によって、保護層を経由して流れる電流の影響を(4.13)式により補正できる。
 - 2-1) 保護層周辺に設置した補正電極に流入する電流の傾向は、地盤側に設置した電流測定電極の測定結果に混入する保護層を経由して流れる電流の傾向と同じである。
 - 2-2) 補正電極に流れる電流は、遮水シート上下が電圧印加/電場制御電極によって同電位に制御されているため、電流測定電極に流れる電流とは異なり、漏水を経由する電流が含まれない。
- 2-3) 鉙体流電法を応用した漏水位置検知システムは、処分場内外が電氣的に接続された条件で、漏水位置を検知できない。
- 2-4) 廃棄物処分場における点電極式電場制御電流測定の漏水についての位置的精度は、相似則と水槽実験結果から、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水で $\pm 50\text{cm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$ の漏水で $\pm 100\text{cm}$ である。
- 3) 処分場の規模と廃棄物の電気伝導度を考慮し、本実験と同じ測定電流が測定される条件で検討すると、本漏水位置検知システムは、保護層を経由して流れる電流の補正方法を含め本実験と同精度で漏水を検知できると考えられる。
- 4) 点電極式電場制御電流測定は、廃棄物に電気伝導度にばらつきがあっても、漏水位置の精度に大きな影響はないが、漏水の大きさの精度が低下すると考えられる。鉙体流電法を応用した漏水検知システムは、漏水位置の精度と漏水の大きさに対する精度の両方が低下すると考えられる。

(参考文献)

- 1) 阿部善右衛門, 木下敏夫:計測回路, 朝倉書店, pp.188-190, 1980.
- 2) 荒井健, 新井斉, 山崎宣悦, 大即信明:電氣的漏水位置検知に遮水シートの電氣特性
が与える影響, 土木学会論文集, No.630/VI-44, pp.27 - 38, 1999.
- 3) 物理探査学会:図解 物理探査, 物理探査学会, pp.194, 1989.
- 4) 物理探鉱技術協会編:物理探査用語辞典, 物理探鉱技術協会, pp.391, 1979.
- 5) 西巻正郎:電氣学, 森北出版, pp.23-24, 1975.

5. 線電極式電場制御電流測定による漏水検知

電場制御電流測定を既往の研究と同様の点電極に適用し、導電性があるコンクリートや土質材料の保護層と地盤の接触部分の近傍に補正電極を用いることにより、保護層を経由して流れる電流の影響を補正できることを示した。しかし、既往の研究と同様な点電極を採用した漏水検知システムは、処分場内に設置する電極数が多く、測定システムの構築コストが大きいばかりでなく、各点電極に接続したケーブルが廃棄物に埋もれてしまうため保守点検ができず、20年という長期の測定システムの供用期間を満足させることがむずかしい。

こうしたシステムの構築コストの低減と長期の維持管理を可能としたのが線電極式電場制御電流測定である。この方法は、筆者が開発した全く新しい検知方法である。

5章では、4章で述べた点電極式電場制御電流測定に採用した交流電源と位相検波回路を同様に採用しているが、内容は同一であるため測定原理の説明は省略し、線電極による漏水検知の原理と電場制御を併用した漏水検知システムの測定原理について述べる。

5.1 線電極式電場制御電流測定の測定原理

5.1.1 線電極

従来の漏水位置検知システムは、一般に点電極を処分場内に均一に配置する方式であった。点電極には、それぞれ測定ケーブルが接続されるため、ケーブル材料費や配線に要する人件費ならびに電極切替器のチャンネル数の増大など、検知システムの設置コストが非常に大きくなる欠点がある。また、廃棄物中に油脂類が万が一混入していたりす

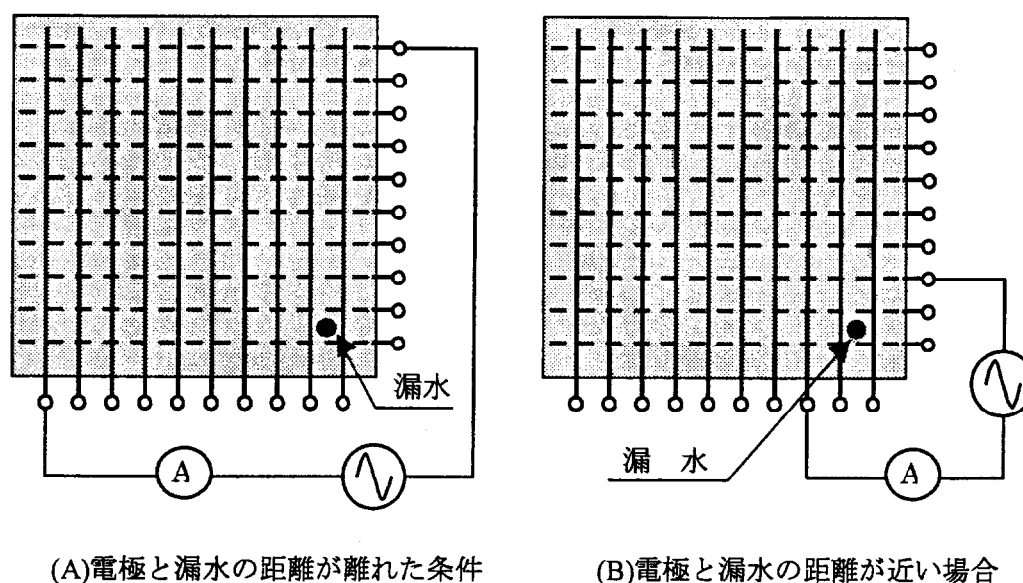


図-5.1 線電極電流測定による漏水検知

ると、処分場内に配線されたケーブルの被覆が劣化し、測定電極だけでなく被覆が劣化した部分で電流や電位を測定することとなり、測定結果の信頼性が大きく低下する。こうした油脂類によるプラスチックや合成ゴムの被覆劣化だけでなく、ケーブル被覆の劣化は、太陽光の紫外線などでも生ずる。このような測定ケーブルの被覆の劣化が生じた場合には、測定ケーブルを随時修理したり交換しなければ、供用年数 20 年を保証できない。

図-5.1 に示すように、遮水シートの下側に等間隔に裸銅線の線電極を配置し、遮水シートの上側にも等間隔に線電極を配置する。遮水シート上下の線電極群から各 1 本の線電極を選択し、これらの電圧が印加された 2 本の電極間に電流を測定すると、処分場に埋め立てられる廃棄物量が少なく、廃棄物の電気伝導度が低ければ、漏水と線電極の位置関係と電流の大きさが相関関係を持ち、漏水位置を検知することが可能となる。

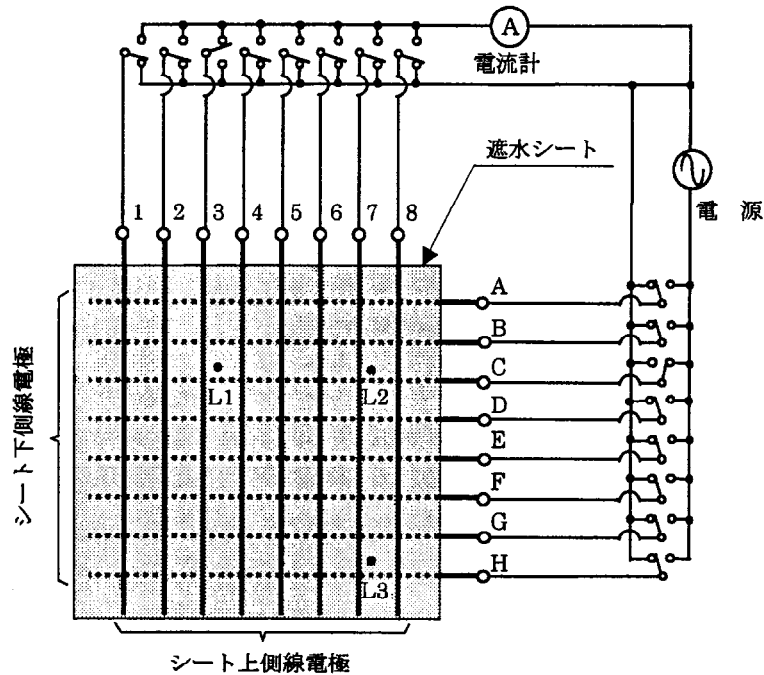
しかし、3 章の等価回路において説明したように、処分場の内部は、廃棄物の埋立にともなって処分場内の電気伝導度の上昇するだけでなく、埋立廃棄物のボリュームの増大により電界が拡大するため、漏水と各線電極間の電気抵抗が小さくなる。また、処分場の地盤側は、電界の広がりが大きく、漏水と各線電極間の電気抵抗はもともと小さい。これらの理由によって、各線電極と漏水間の電気抵抗はほぼ同じとなり、電流測定だけで漏水位置を検知することはむずかしい。

5.1.2 線電極式電場制御電流測定

前述のように、遮水シート上下に設置した線電極間に流れる電流測定だけでは、普遍的に成立する測定原理とはならない。そこで、線電極に 4 章に示した遮水シート上下の電場制御の概念を導入する。図-5.2 は、線電極に電場制御の概念を適用した概念図である。

すなわち、図-5.2 の遮水シート下側の電極を選択し、これを電源の一端に接続し、その他の遮水シート上下の全線電極を電源の他端に接続するようにする。また、遮水シート上側の線電極の 1 本を選択して電流測定器に接続する。このような電極の接続状態にすると、遮水シート下側の線電極 1 本以外は、全て同電位に制御できる。図-5.2 において、遮水シートの下側電極 C とその他の線電極間に電圧が印加され、遮水シート上側の電極 3 が電流測定器に接続されている。ここで、L1~L3 を遮水シートの漏水とすると、漏水 L1 は、遮水シート下側の印加電極 C と電流測定器が接続されている遮水シート上側の電極 3 の近傍にあり、印加電極 C と電極 3 の間に流れる電流が測定される。

当然のことながら、電極 C から隣り合う電極 B や D などにも電流が流れるが、これらの線電極が接続された回路は電流測定器を経由しないため、測定されずに電源の他端に戻るだけである。漏水 L2 についてみると、印加電極 C が近傍にあり、遮水シートの上側には線電極 7 と 8 があり、この間にも電流が流れることとなるが、これらの線電極には電流測定器が接続されていないため、漏水 L2 を経由して流れる電流は測定されない。漏水 L3 についてみると、この漏水の近傍にある線電極は、遮水シートの下側が G と H で、遮水シートの上側が 7 と 8 であるが、それぞれの電極は全て電源の同じ端に接続さ



図－5.2 電場制御の概念を導入した線電極式電流法

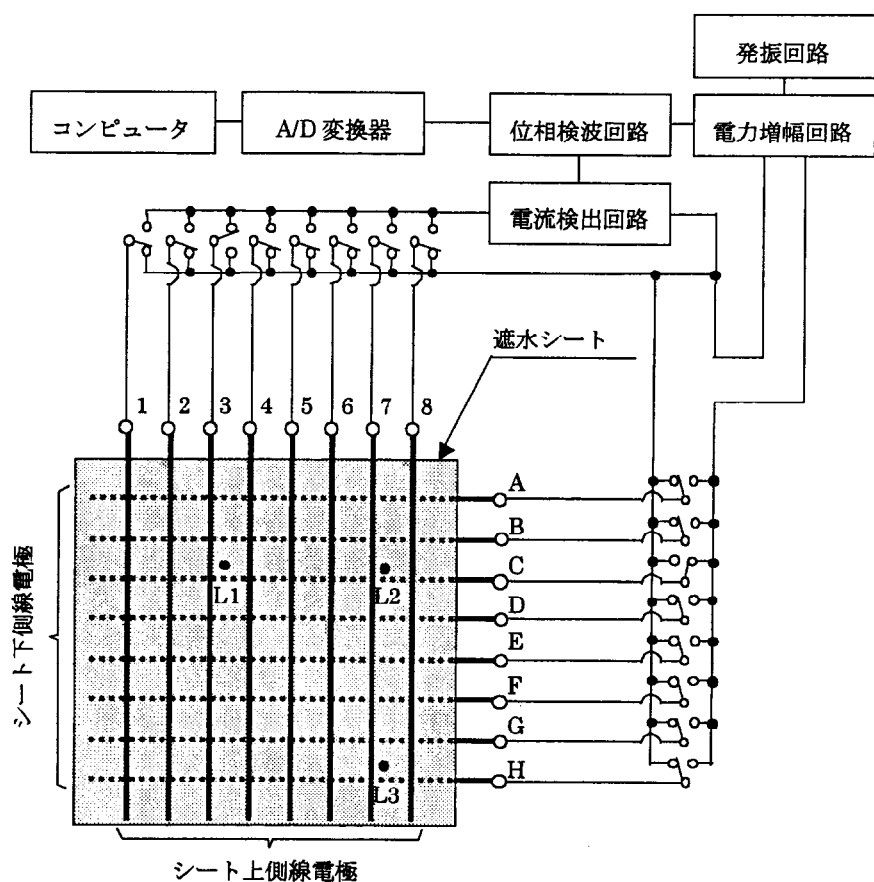
れており、電位差が存在しない条件であるため、漏水 3 が存在しても遮水シート上下間に電流が流れない。

このように、電源の一端に接続する遮水シートの下側の線電極 1 本と電流測定装置に接続する線電極 1 本を選択し、線電極の全組み合わせについて電流測定を行えば、処分場全体の漏水位置検知を行うことができる。

以上に述べたように線電極式電場制御は、線電極の交差部分が点電極 1 カ所に相当するから、電極数が図－5.2 の場合、遮水シート上下の線電極合計 16 本で処分場全体をカバーすることになる。同じ面積に対して点電極を用いた場合の 64 本 ($=8 \times 8$) と比較して、1/4 の電極数で処分場全体をカバーすることが可能となる。このように少数の電極で処分場全体をカバーするため、電極に接続する測定ケーブルの数量も少なく、電極切替器の台数も少なくてすみ、測定システムの設置コストも小さい。

また、測定電極に接続される測定ケーブルの配線は、図－5.2 から明らかなように、処分場の遮水シート端部に限られ、この部分は埋め立てられる廃棄物の厚みも小さく通常は測定ケーブルが露出している部分である。このため、測定ケーブルの紫外線による被覆の劣化状態などを目視や触感によって確認することが可能であり、劣化状態によっては補修や交換が十分可能である。線電極式電場制御電流測定の場合、処分場内部に設置される測定システムの部材は線電極だけに限られる。そこで、線電極の腐食代を十分考慮しておけば、電極に接続されるケーブルの劣化に対する対策だけで十分長期の維持管理が可能となる。

線電極を用いた電場制御電流測定による漏水検知システムのブロック回路図を図－



図－5.3 線電極式電場制御電流測定概念図

図－5.2 電場制御概念を導入した線電極式電流法

5.11 に示す．点電極を用いた電場制御電流測定の場合と同様に，（発振回路）－（電力増幅回路）が，図－5.2 の電源に相当する．また，（電流検出回路）－（位相検波回路）が図－5.2 の電流計に相当する．

5.2 土槽実験

「5.1.1 線電極」において説明したように、線電極は、従来の漏水検知システムの点電極とは異なり、経済性、維持管理性に優れた測定電極構成である。本節では、電場制御を併用しない電流測定だけの線電極の漏水検知システムを実験用土槽に適用し、線電極の機能について検証する。

ところで、電流測定だけで漏水位置を検知する方法は、処分場内の埋立廃棄物ボリュームの増大や電気伝導度の上昇で、理論的に測定不能となることを3章の電流法の項に示した。土槽実験では、線電極による漏水位置検知の可能性について主に検討する。

5.2.1 実験条件および実験方法

(1) 実験用土槽

実験に使用した土槽の形状と漏水の位置を図-5.4に示す。土槽は、12m×12mの大きさのPVCシート($t=1\text{ mm}$)を、雑草等を除去した地表面に抅げ、そのシート上に30 cm厚の盛土により造成した。

PVCシートの電気特性は、交流テスターを用いた計測で、測定限界である電気抵抗が10 ($\text{M}\Omega/120\text{ cm}^2$)以上で、静電容量が2.33 ($\text{nF}/120\text{ cm}^2$)であった。遮水シートの電気抵抗は、直流テスターを用いた計測で測定限界である200~280 ($\text{M}\Omega/120\text{ cm}^2$)以上の大きさであった。遮水シートの電気特性の計測方法は、前述の2章において示した方法と同じである。

シートの上下には、線電極($\phi\ 3.2\text{ mm}$ の錫メッキ銅線)を100 cm等間隔に設置し、シートの上下で線状電極の方向が直交するようにした。土槽に設置した線電極は、遮水シートの下に11本、遮水シートの上に11本である。

(2) 実験条件および実験手順

計測装置は、この実験のために製作したプロトタイプである。土槽に印加した電圧波形は、ファンクションジェネレータで作成される。この電圧波形を電力増幅回路によって増幅され、手動の電極切替装置を介して土槽に印加された。印加電圧は、6.24Vで、周波数は20Hzである。土槽への印加電圧波形および波長について、オシロスコープで所定の特性であることを確認した。電極切替器は、遮水シートの上に設置した電極用と遮水シートの下に設置した電極用の2台で構成されており、それぞれの電極切替器から各1本電極を選択し、これらの電極間に電圧を印加する。この電極間に流れる電流は、電流検出回路を介して位相検波回路に導かれ、電力増幅回路の印加電圧波形と同波長かつ同相の電流成分を検出される。この電気信号は、アナログ/デジタル変換器でコンピュータに回収され、図表化などのデータ解析が行われる。

ところで、遮水シートの漏水は、遮水シートの表裏を電氣的に短絡するバイパスと解釈することができる。すなわち、遮水シートの漏水は、必ずしもシートに貫通孔をあける必要はなく、シートを表裏をリード線で短絡することにより貫通孔と同等の効果を与えるこ

とができる。本実験では図-5.5 に示す 9 枚の金属板で構成された 2 つの電極を，シートを挟んで同一位置になるよう設置し，金属板間を結ぶケーブルをスイッチ操作で短絡することにより漏水の大きさを変更できるようにした。漏水位置は，図-5.4 に示すように，(X3,Y9)の近傍である。漏水から遮水シート上下の電極への距離は，それぞれ 25cm である。

土槽実験において，各 16cm^2 ， 8cm^2 ， 4cm^2 ， 2cm^2 ， 1cm^2 の大きさの漏水について測定し，得られた結果から漏水位置を確認できるか検討を行った。計測は，印加電圧と同位相の電流（同相電流）について行った。

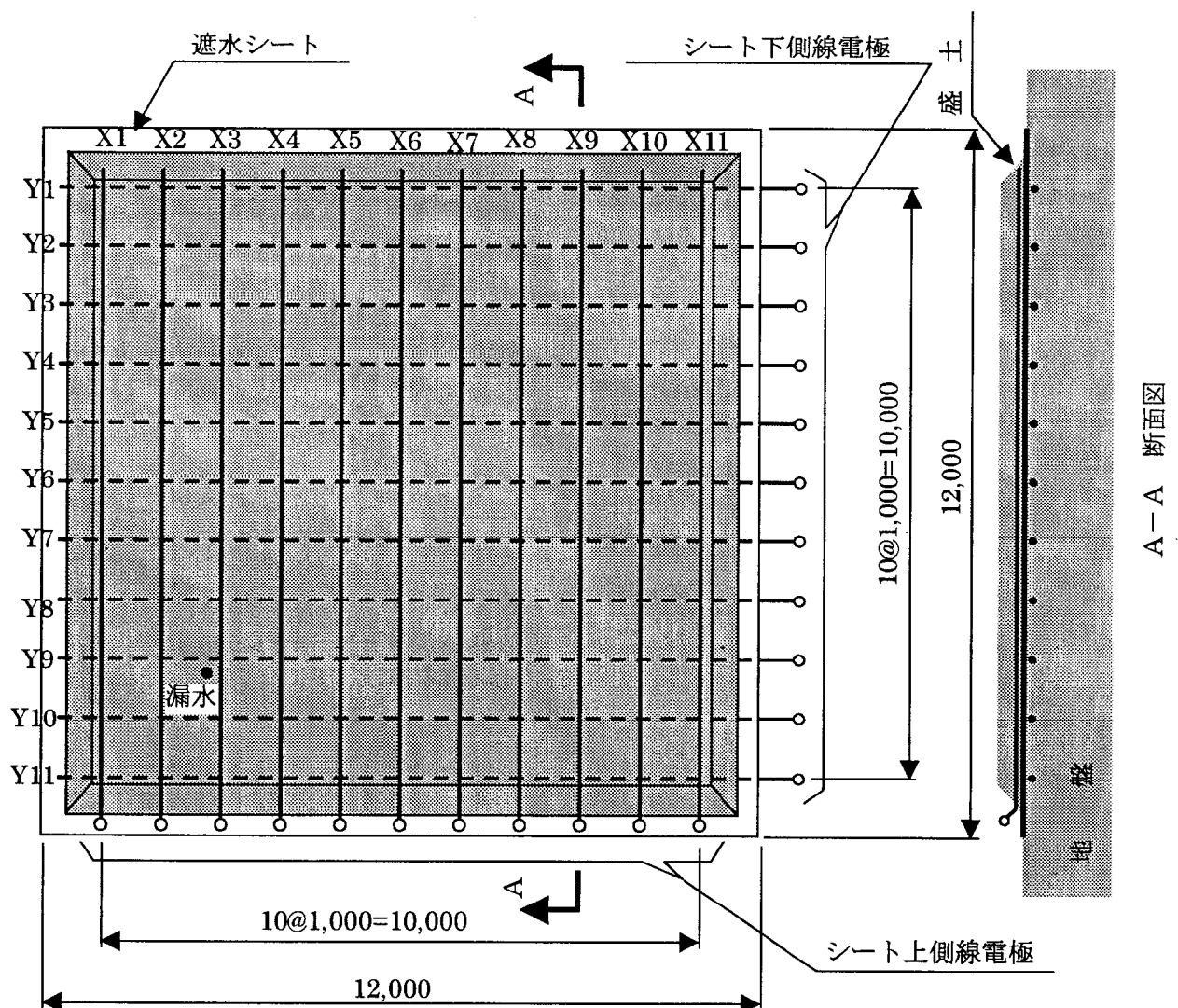


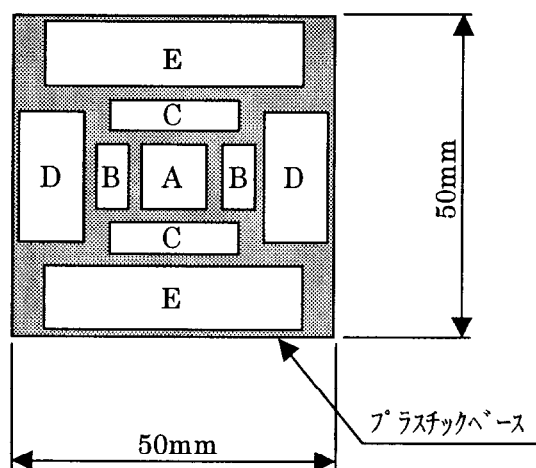
図-5.4 実験用土槽



写真-5.1 土槽全景



写真-5.2 計測状況



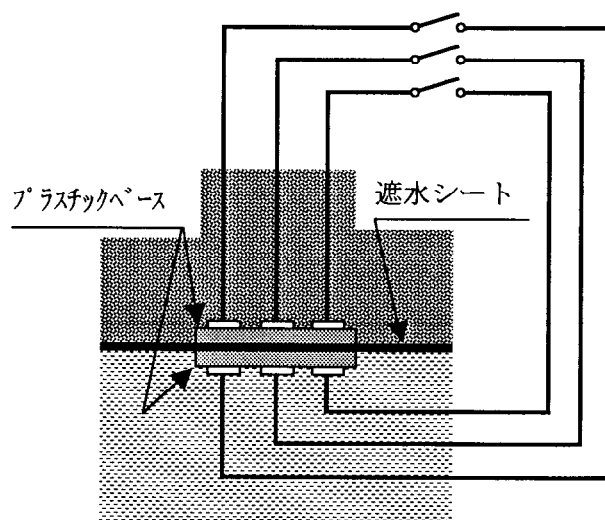
(金属板のサイズ)

A: $1.0 \text{ cm}^2 \times 1$ B: $0.5 \text{ cm}^2 \times 2$

C: $1.0 \text{ cm}^2 \times 2$ D: $2.0 \text{ cm}^2 \times 2$

E: $4.0 \text{ cm}^2 \times 2$

(A)ダミー電極の金属板配置図



(B)ダミー電極の配置断面図

図-5.5 ダミー漏水



写真-5.3 ダミー漏水シート下側電極

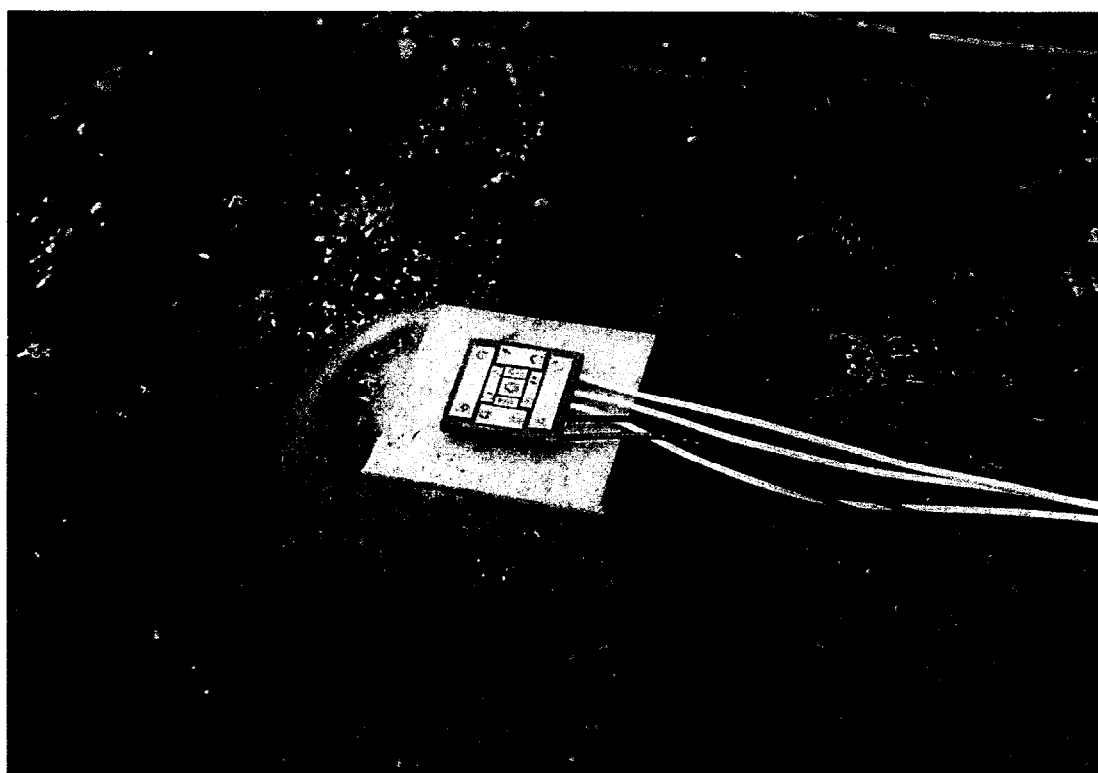


写真-5.4 ダミー漏水シート上側電極

5.2.2 土槽実験結果

図-5.6～図-5.11 に、印加電圧の位相と同相の電流測定結果を示す。これらの測定結果は、各ケースについて全測定値中の最小値を差引いて立体表示した。この立体図は、実験土槽を示した図-5.4 を、図左下から図中央部を俯瞰するように示している。また、これらの測定値を、表-5.1～表-5.6 に示す。表中において、漏水の設置位置は、太線の枠で囲んだ9つの欄の中央付近である。

これらの同相電流のグラフから、 $1\text{ cm}^2\sim 16\text{ cm}^2$ の大きさの漏水について以下のことが分かる。

- ①漏水の周辺において、線電極間に流れる電流が最大電流となることから、漏水位置を一応検知できる。
- ②漏水の大きさにかかわらず、漏水が存在する部分近傍で測定される最大電流と漏水から離れた位置における最小電流の差が小さく、漏水が検知しにくい。
- ③漏水を経由して流れる電流の影響が土槽全体に広がり、土槽の X 方向と Y 方向で測定感度も異なっている。

①は、遮水シートの上下に等間隔に配置した線電極群によって、漏水を検知できる可能性を示している。これは、漏水が線電極の近傍にあれば漏水を経由する電流が増大することを示しており、信号比率を向上させる測定原理を付加えれば少数の電極で漏水が検知できる可能性を示唆するものと考えられる。

②についてみると、図-5.6～図-5.11 は、最小値から最大値についてグラフ化しているため、それ程顕著に見えない。しかし、これらの測定における最大値と最小値をまとめた表-5.7 をみると、信号比率 SR (= Signal Ratio) が 4.8%～13.3%と「4.2 水槽実験」で得られた点電極式電場制御電流測定 of 信号比率 96%～99%と比較すると低い値となっている。表-5.7 に漏水がない条件での最大電流と最小電流を参考として示したが、漏水が 1 cm^2 の条件での最大電流と比較すると 12.52mA ($=13.41-0.89$) に電流が増加している。この電流の増加分 12.52mA と漏水の大きさが 1 cm^2 の条件における最大測定電流と最小測定電流の差 0.65mA を比較すると、 1 cm^2 の漏水の有無で生ずる電流変化の方が 20 倍近く大きい。したがって、漏水を経由して流れる電流の増加分を測定精度の向上に利用できていないことがわかる。

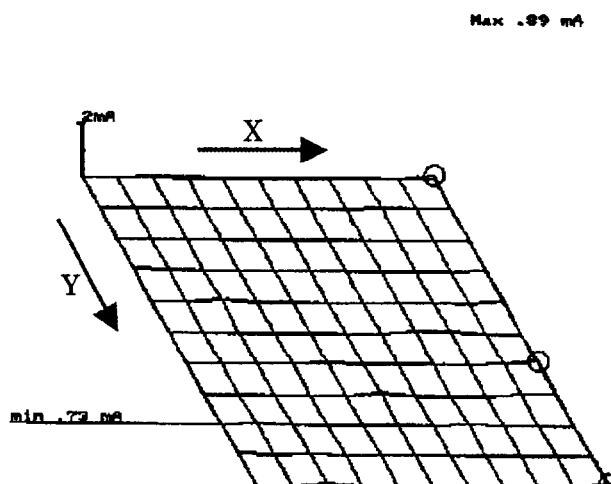


図-5.6 同相電流測定結果 (漏水なし)

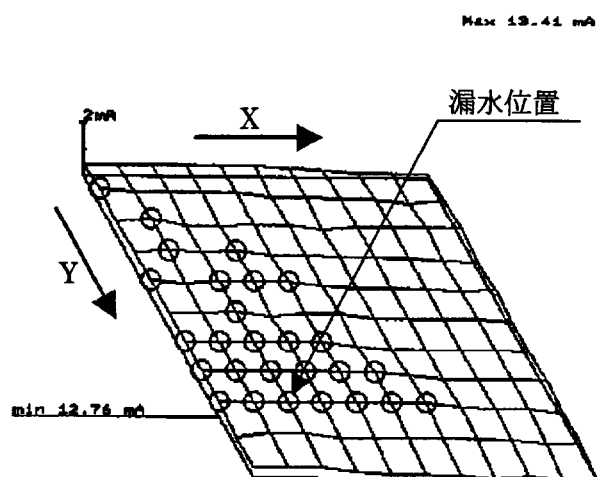


図-5.7 同相電流測定結果 (漏水 1cm²)

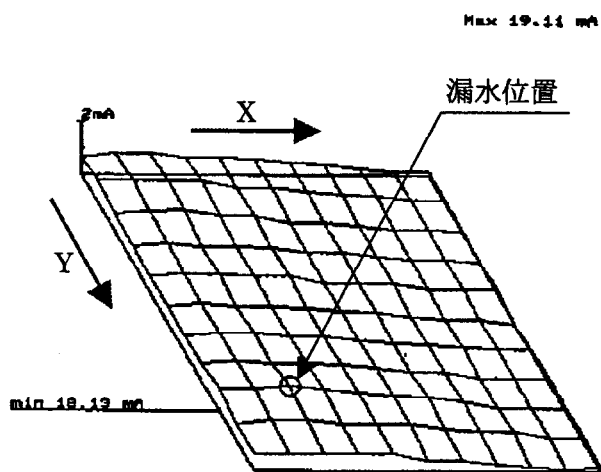


図-5.8 同相電流測定結果 (漏水 2cm²)

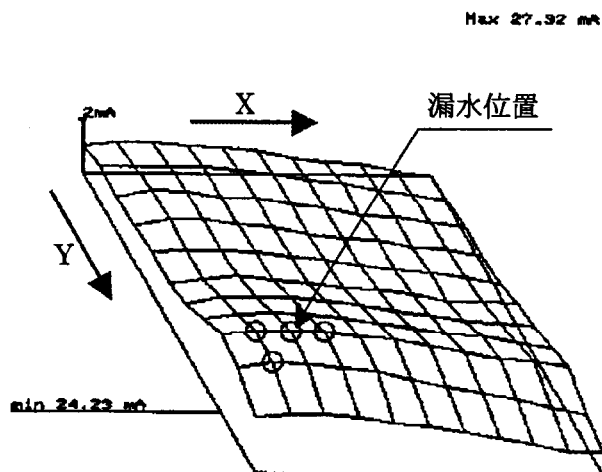


図-5.9 同相電流測定結果 (漏水 4cm²)

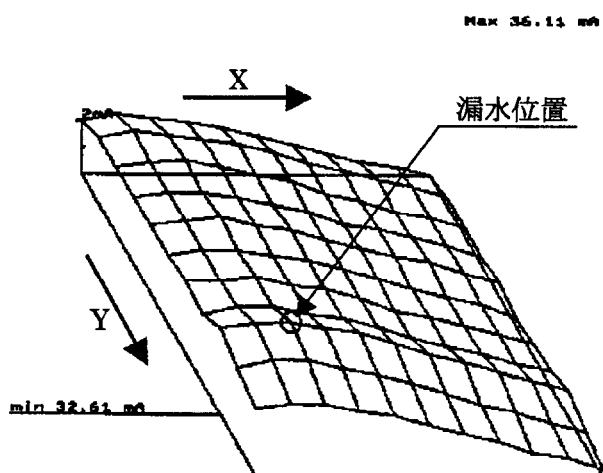


図-5.10 同相電流測定結果 (漏水 8cm²)

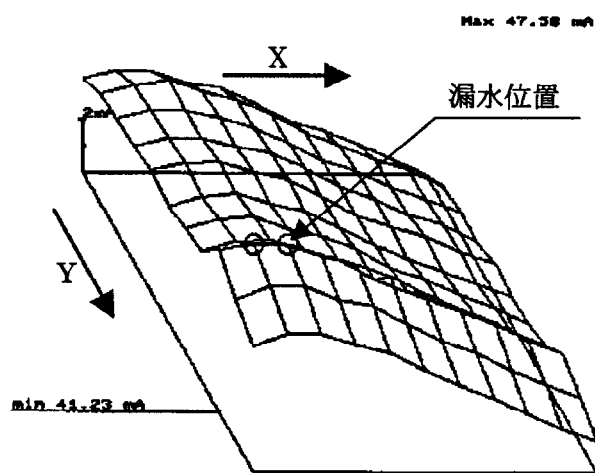


図-5.11 同相電流測定結果 (漏水 16cm²)

表－5.1 同相電流の測定結果（漏水なし）

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
Y1	0.73	0.73	0.81	0.81	0.73	0.81	0.81	0.81	0.81	0.73	0.89
Y2	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.81	0.81	0.81
Y3	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
Y4	0.81	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.81
Y5	0.73	0.73	0.81	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.81
Y6	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.81	0.81	0.73	0.73
Y7	0.73	0.73	0.73	0.73	0.81	0.73	0.73	0.73	0.73	0.81	0.89
Y8	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.81	0.73	0.73	0.73	0.81	0.81
Y9	0.73	0.81	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.81	0.73	0.73	0.73
Y10	0.81	0.73	0.81	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
Y11	0.73	0.73	0.81	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.89

(単位：mA)

表－5.2 同相電流の測定結果（1 cm²漏水）

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
Y1	13.17	13.17	13.17	13.17	13.17	13.17	13.09	13.01	12.93	12.93	12.93
Y2	13.41	13.33	13.33	13.33	13.33	13.17	13.17	13.09	13.09	12.93	13.09
Y3	13.33	13.41	13.17	13.17	13.25	13.25	13.09	13.17	13.17	13.17	13.17
Y4	13.33	13.41	13.33	13.41	13.25	13.25	13.17	13.17	13.17	13.09	13.01
Y5	13.41	13.33	13.41	13.41	13.41	13.25	13.17	13.17	13.17	13.09	13.17
Y6	13.33	13.33	13.41	13.25	13.33	13.33	13.17	13.17	13.17	13.17	13.09
Y7	13.41	13.41	13.41	13.41	13.41	13.25	13.17	13.17	13.17	13.17	13.09
Y8	13.41	13.41	13.41	13.41	13.41	13.41	13.33	13.17	13.17	13.17	13.17
Y9	13.41	13.41	13.41	13.41	13.41	13.41	13.41	13.25	13.17	13.17	13.01
Y10	13.17	13.33	13.33	13.17	13.17	13.17	13.17	13.17	13.09	13.01	13.01
Y11	13.17	13.17	13.17	13.01	12.93	12.93	12.93	12.76	12.93	12.76	12.76

(単位：mA)

表－5.3 同相電流の測定結果（2 cm²漏水）

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
Y1	18.78	18.95	18.95	18.78	18.78	18.70	18.62	18.54	18.38	18.30	18.30
Y2	19.03	19.03	19.03	19.03	18.78	18.78	18.62	18.54	18.46	18.30	18.30
Y3	18.86	18.95	19.03	18.78	18.78	18.54	18.54	18.46	18.30	18.30	18.21
Y4	18.78	18.86	18.78	18.78	18.70	18.54	18.54	18.38	18.30	18.30	18.21
Y5	18.78	18.86	18.86	18.78	18.78	18.54	18.54	18.54	18.30	18.30	18.30
Y6	18.78	18.86	18.78	18.78	18.70	18.62	18.54	18.38	18.30	18.30	18.13
Y7	18.78	18.86	18.86	18.78	18.78	18.62	18.54	18.46	18.38	18.30	18.30
Y8	18.86	18.95	18.86	18.86	18.78	18.70	18.54	18.54	18.30	18.30	18.30
Y9	19.03	19.03	19.11	19.03	18.86	18.78	18.70	18.54	18.30	18.30	18.30
Y10	18.78	18.95	18.95	18.78	18.78	18.78	18.62	18.54	18.54	18.30	18.30
Y11	18.78	18.78	18.78	18.78	18.78	18.54	18.54	18.38	18.30	18.21	18.30

(単位：mA)

表－5.4 同相電流の測定結果（4 cm²漏水）

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
Y1	25.29	25.37	25.37	25.29	25.21	25.13	24.88	24.72	24.64	24.40	24.23
Y2	25.61	25.61	25.61	25.61	25.53	25.37	25.13	25.05	24.80	24.64	24.40
Y3	25.61	25.86	25.78	25.61	25.61	25.37	25.21	24.96	24.88	24.72	24.56
Y4	25.61	25.86	25.86	25.70	25.61	25.37	25.21	25.13	24.88	24.80	24.56
Y5	25.78	25.86	25.86	25.78	25.61	25.53	25.29	25.13	24.05	24.88	24.64
Y6	25.70	25.86	26.02	25.86	25.78	25.61	25.53	25.37	25.13	25.13	25.05
Y7	26.10	26.35	26.35	26.35	26.27	26.10	25.86	25.70	25.53	25.45	25.37
Y8	26.67	26.83	26.92	26.83	26.75	26.51	26.35	26.18	26.10	25.86	25.61
Y9	27.24	27.32	27.32	27.32	27.16	27.08	26.83	26.59	26.35	26.27	26.10
Y10	27.08	27.32	27.24	27.08	27.00	26.37	26.43	26.18	25.94	25.61	25.37
Y11	26.35	26.43	26.43	26.35	26.10	26.02	25.78	25.61	25.37	25.13	25.13

(単位：mA)

表－5.5 同相電流の測定結果（8 cm²漏水）

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
Y1	34.64	34.89	34.72	34.64	34.40	34.07	33.75	33.42	33.10	32.94	32.61
Y2	35.13	35.38	35.21	35.05	34.89	34.56	34.16	33.91	33.59	33.34	32.94
Y3	35.13	35.29	35.38	35.13	34.89	34.64	34.16	33.91	33.50	33.26	32.94
Y4	35.13	35.29	35.29	35.13	34.89	34.64	34.16	33.99	33.67	33.34	32.94
Y5	35.21	35.38	35.54	35.21	35.05	34.72	34.40	34.07	33.83	33.42	33.10
Y6	35.21	35.38	35.38	35.21	35.05	34.72	34.32	33.99	33.67	33.42	32.94
Y7	35.38	35.38	35.54	35.21	35.13	34.72	34.24	34.07	33.75	33.42	33.10
Y8	35.21	35.54	35.54	35.39	35.13	34.81	34.40	34.07	33.83	33.42	33.18
Y9	35.86	36.03	36.11	35.86	35.70	35.29	34.89	34.64	34.24	33.91	33.59
Y10	35.16	35.78	35.78	35.46	35.29	34.97	34.56	34.16	33.91	33.50	33.18
Y11	35.13	35.29	35.29	35.05	34.89	34.48	34.16	33.91	33.50	33.34	32.94

(単位：mA)

表－5.6 同相電流の測定結果（16cm²漏水）

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
Y1	44.81	45.14	45.14	44.65	44.48	43.92	43.26	42.94	42.37	41.80	41.23
Y2	45.28	45.70	45.87	45.46	45.14	44.65	43.92	43.43	42.94	42.53	41.96
Y3	45.54	45.87	45.87	45.62	45.22	44.65	44.00	43.59	43.02	42.53	42.04
Y4	45.62	45.95	45.95	45.62	45.38	44.81	44.16	43.67	43.10	42.70	42.04
Y5	45.87	46.11	46.19	45.79	45.54	44.89	44.16	43.75	43.35	42.78	42.37
Y6	45.62	45.95	46.11	45.70	45.46	44.81	44.16	43.67	43.18	42.70	42.21
Y7	45.87	46.27	46.36	45.87	45.62	45.14	44.40	44.00	43.43	42.94	42.37
Y8	46.19	46.52	46.60	46.19	45.87	45.14	44.65	44.16	43.67	43.18	42.61
Y9	47.33	47.58	47.58	47.17	46.84	46.36	45.70	45.14	44.65	43.92	43.43
Y10	46.60	47.09	47.19	46.60	46.36	45.70	45.05	44.57	43.92	43.43	42.94
Y11	45.95	46.44	46.44	46.03	45.70	45.05	44.48	44.00	43.43	42.86	42.45

(単位：mA)

表－5.7 最大電流中に占める信号の比率

漏水 (cm ²)	最大値 (mA)	最小値 (mA)	最大値－最小値 (mA)	信号比率 (%)
1	13.41	12.76	0.65	4.8
2	19.11	18.13	0.98	5.1
4	27.32	24.23	3.09	11.3
8	36.11	32.61	3.50	9.7
16	47.58	41.23	6.35	13.3
なし	0.89	0.73	—	—

表－5.8 漏水の X 方向，Y 方向の測定結果の傾向

漏水 (cm ²)	最大値	X 方向		Y 方向	
	(X3,Y9) (mA)	(X11,Y9) (mA)	信号比率 (%)	(X3,Y1) (mA)	信号比率 (%)
1	13.41	13.01	3.0	13.17	1.8
2	19.11	18.30	4.2	18.95	0.84
4	27.32	26.10	4.5	25.37	7.1
8	36.11	33.59	6.7	34.72	3.8
16	47.58	43.43	8.7	45.14	5.1
なし	0.73	0.73	—	0.73	—

③に示したように、漏水を経由して流れる電流の影響が土槽全体に広がっており、土槽の X 方向と Y 方向で感度が異なっている。ここで、図－5.11 と表－5.6 に示す漏水の大きさが 16 cm² の測定結果を見ると、漏水の最も近い (X3,Y9) において 47.58mA の電流が測定されるのに対し、土槽の X 方向の端にあたる (X11,Y9) において、43.43mA の電流が測定され、Y 方向の端にあたる (X3,Y1) では、45.14mA の電流が測定された。そこで、1 cm²～16 cm² の大きさの漏水について X 方向と Y 方向の最小値を用いて信号比率を計算すると、表－5.8 に示すとおりとなる。この表を見ると、漏水の大きさが 4 cm² の場合以外、X 方向の信号比率の方が Y 方向の信号比率の約 7 割増であることがわかる。

この理由は、図－5.4 に示すように、X1～X11 電極は、遮水シートの上側に設置されており、Y1～Y11 電極は遮水シートの下側に設置されているところに原因があると考えられる。

表－5.9 は、遮水シートの上側の X4 電極を印加電極と Y1～Y11 電極間に流れる電流のみ抜粋したものである。表中で距離と表示した欄は、漏水と Y1～Y11 電極までの距離で

ある。この表から、 16cm^2 の漏水から 3.25m 以上離れると電流の大きさは変わらず、 2cm^2 の漏水から 2.25m 離れれば電流の大きさは変わらないことがわかる。また、漏水なしの条件による測定結果と、 1cm^2 の漏水の測定結果を比較すると、電流の大きさに 18 倍 ($=13.41 / 0.73$) の違いがあるにもかかわらず、信号比率は最大で見積もっても表-12.7 の 4.8% でしかない。

ここで、遮水シートの下側の Y1～Y11 電極と漏水の関係は、図-5.12 に示すように単純化できる。3 章の電流法の測定原理において、式 (3.1) で漏水と電極間の電気抵抗は、電極間隔と廃棄物など電流を流す媒体の比抵抗（電気伝導度の逆数）によって決定され、電極間隔に影響されないことを示した。図-5.12 は、地盤面に設けられた点電極と線電極で、それぞれ半球状の電極ではないが、無限大の広がりをもつ地盤の電機抵抗測定としての意味は同じである。

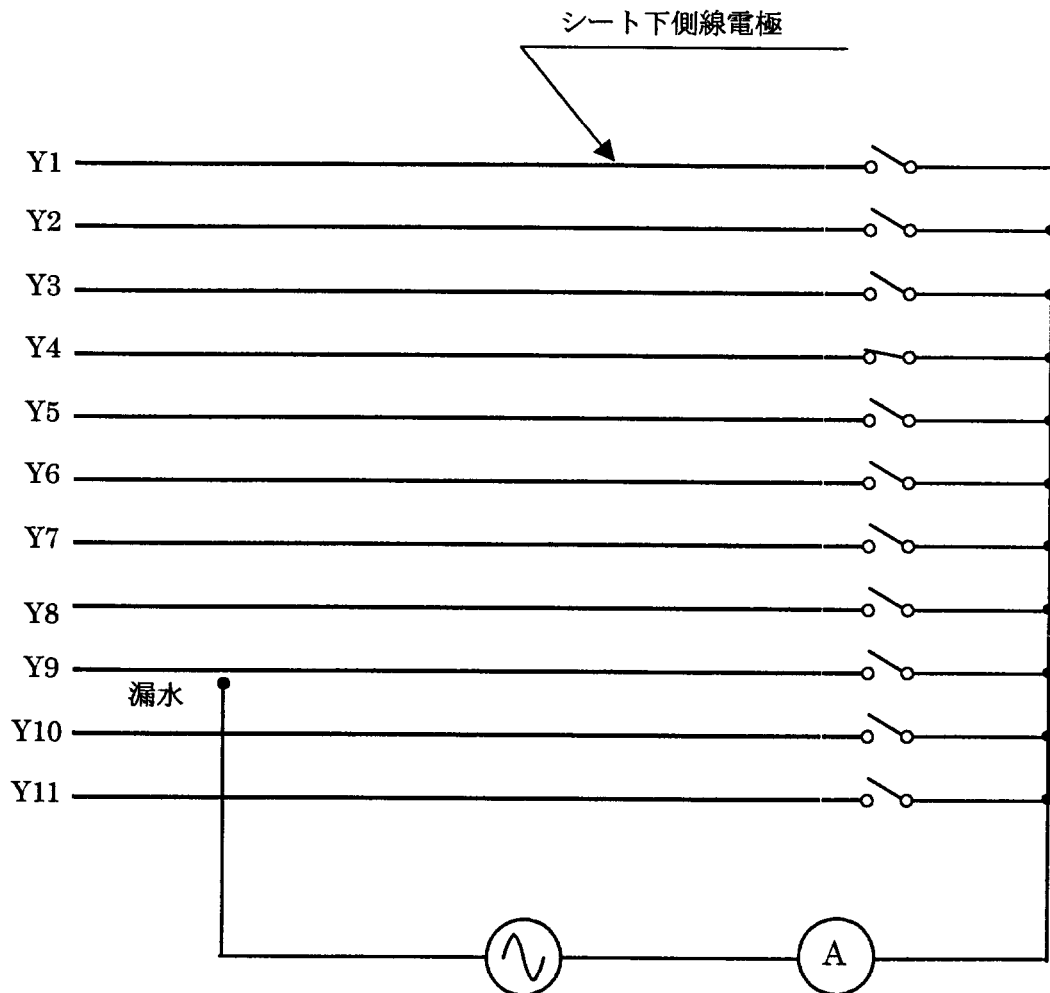
したがって、漏水と測定電極 Y1～Y11 間の電気抵抗がほとんど同じであるため、Y 方向の測定電流の変化が生じない。また、土槽内部の限られた空間であっても、電極から漏水までの電気抵抗が無限大となることがないため、微小な電流が必ず流れる。

以上の理由により、漏水の有無によって生ずる電流の増大が信号比率の向上につながらないことがわかる。

以上に述べた②と③は、電流測定だけを測定原理とする電氣的漏水検知システムが機能しにくいことを示している。しかし、①に示したように、漏水と線電極の距離が短ければ漏水を検知できる可能性がある。ただし、電流測定以外に前述の水槽実験に用いた漏水検知システムのように、遮水シート上下の電場制御の概念を導入しない限り実用化できる測定精度を確保できないと考えられる。

表ー5.9 電極 X4 使用時の電流測定結果 (mA)

	距離(m)	漏水なし	1cm ²	2cm ²	4cm ²	8cm ²	16cm ²
Y1	8.25	0.81	13.17	18.78	25.29	34.64	44.65
Y2	7.25	0.73	13.33	19.03	25.61	35.05	45.46
Y3	6.25	0.73	13.17	18.78	25.61	35.13	45.62
Y4	5.25	0.73	13.41	18.78	25.70	35.13	45.62
Y5	4.25	0.73	13.41	18.78	25.78	35.21	45.79
Y6	3.25	0.73	13.25	18.78	25.86	35.21	45.70
Y7	2.25	0.73	13.41	18.78	26.35	35.21	45.87
Y8	1.25	0.73	13.41	18.86	26.83	35.39	46.19
Y9	0.25	0.73	13.41	19.03	27.32	35.86	47.17
Y10	0.75	0.73	13.17	18.78	27.08	35.46	46.60
Y11	1.75	0.73	13.01	18.78	26.35	35.05	46.03



図ー5.12 地盤上の線電極と漏水間の電流測定

5.3 処分場実験

4.2 節において、遮水シート上下の電場制御を併用した電流測定が高い効果を有することを確認した。5.2 節において、線電極を用いた電流測定による漏水検知システムの実験結果は、遮水シート上下に配置した線電極が点電極の代わりに使用できる可能性を示している。

北海道様似町の一般廃棄物処分場において、遮水シートの損傷を 5.1.2 において原理を説明した線電極式電場制御電流測定を用いて発見した。この損傷の発見時に、前述の 5.2 節の土槽実験に使用した線電極式電流測定でも計測を実施した。

本節は、線電極式電場制御電流測定について、線電極式電流測定のデータと比較して、電場制御電流測定と線電極の組合せの効果について述べる。

5.3.1 実験条件及び実験方法

(1) 様似町の廃棄物処分場

線電極式電場制御電流測定による漏水検知システムを設置した北海道様似町の一般廃棄物処分場の平面図と写真を図-5.13 と写真-5.5 に示す。埋め立てられる廃棄物は焼却灰が主体で、1 日の作業終了時に覆土を掛ける一般的な使用方法がとられている。

処分場の構造、廃棄物の種類、敷設された遮水シートの特性は、以下のとおりである。

廃棄物処分場の構造	: 1 重シート
廃棄物の種類	: 焼却灰主体の一般廃棄物
遮水シートの種類	: 1.5mm 厚 HDPE
遮水シートの電気特性	電気抵抗 10 M Ω /120cm ² 以上 (交流テスター計測限界)
	電気抵抗 200 M Ω /120cm ² 以上 (直流テスター計測限界)
	静電容量 1.05 nF/120cm ²

遮水シートの上下に設置した線電極に、 ϕ 5mm の裸銅線を使用し、電極間隔は 5m を基本とした。処分場の上下に設置した線電極は、写真-5.6 と写真-5.7 に示すように、遮水シートの敷設工程に合わせて設置した。線電極に接続した測定ケーブルは、測定機器やターミナルボックスへ写真-5.8 に示すトラフ管に配線した。写真-5.8 からわかるように、測定ケーブルは、処分場外周に設置したトラフ管に配線されているため、廃棄物に埋まることはなく、蓋を明けることにより、測定ケーブルを適時保守点検できる。写真-5.9 に示すターミナルボックスは、測定システムの保守点検のために、測定システムに接続されていない線電極の端部にケーブルを接続し、これらを 1 ヶ所に集めたものである。

また、管理棟には、写真-5.10 に示すように、測定機器が設置されている。

この測定システムは、線電極式電場制御電流測定ではなく、土槽実験と同じ線電極式電流測定の測定システムである。

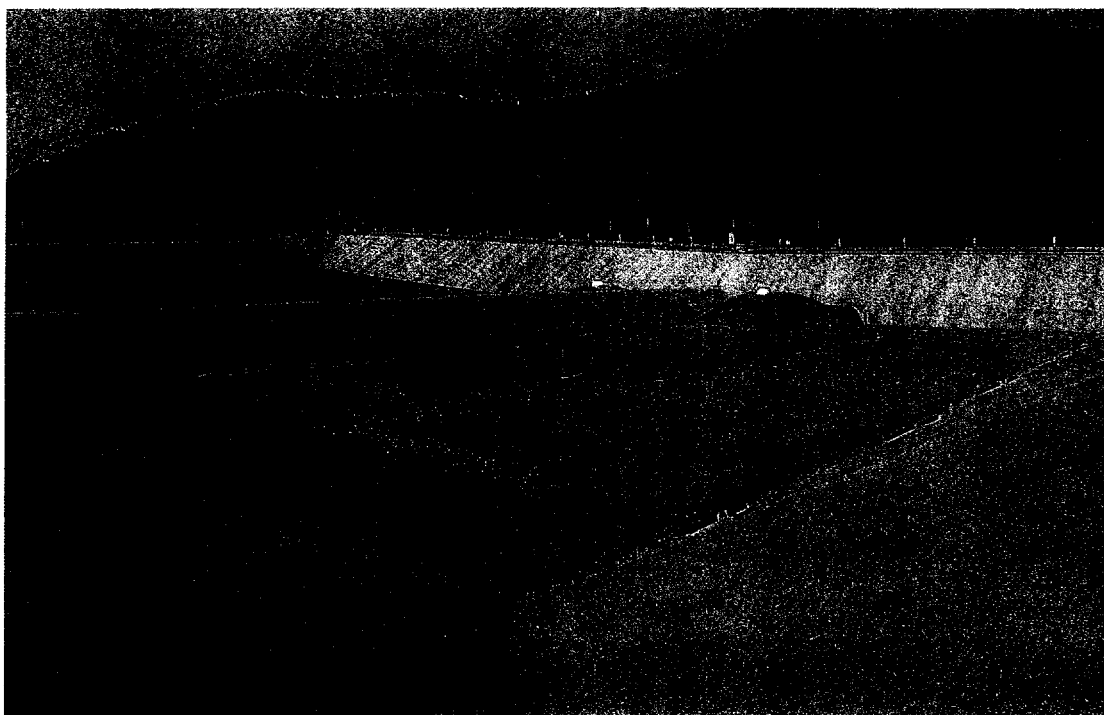


写真-5.5 様似町廃棄物処分場概観



写真-5.6 遮水シート下の線電極の設置
(ϕ 5mm 裸銅線)

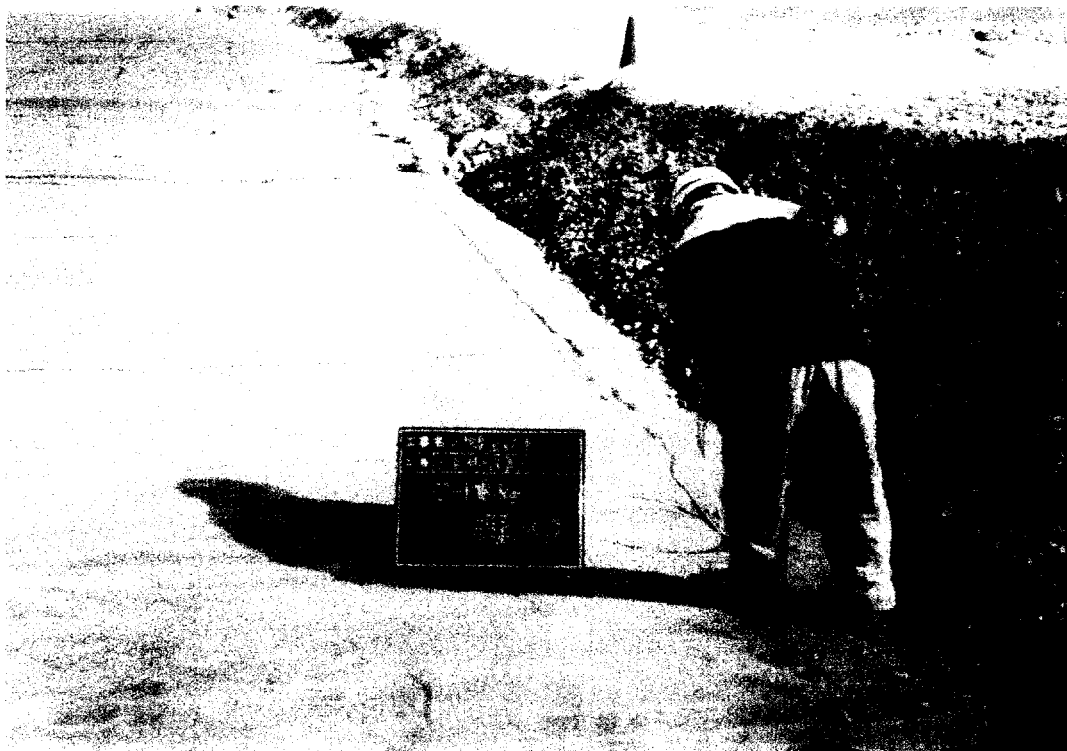


写真-5.7 遮水シート上の線電極の設置
($\phi 5\text{mm}$ 裸銅線)



写真-5.8 測定ケーブル配線用トラフ管（測定電極への分岐部分）

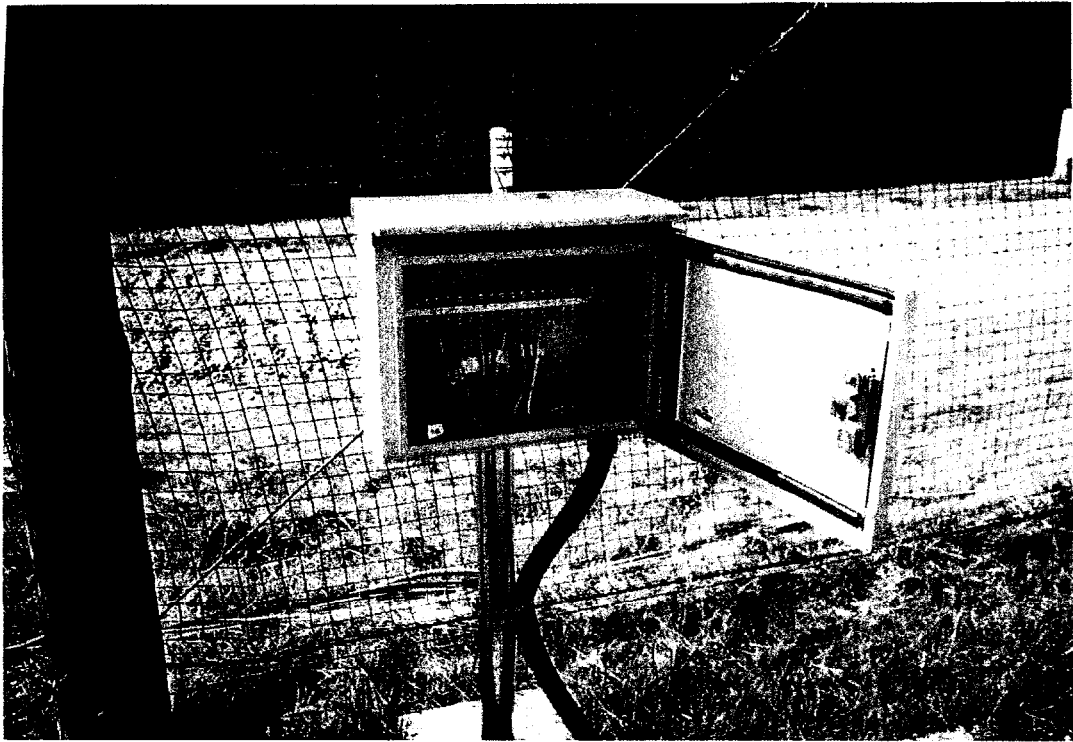


写真-5.9 ターミナルボックス

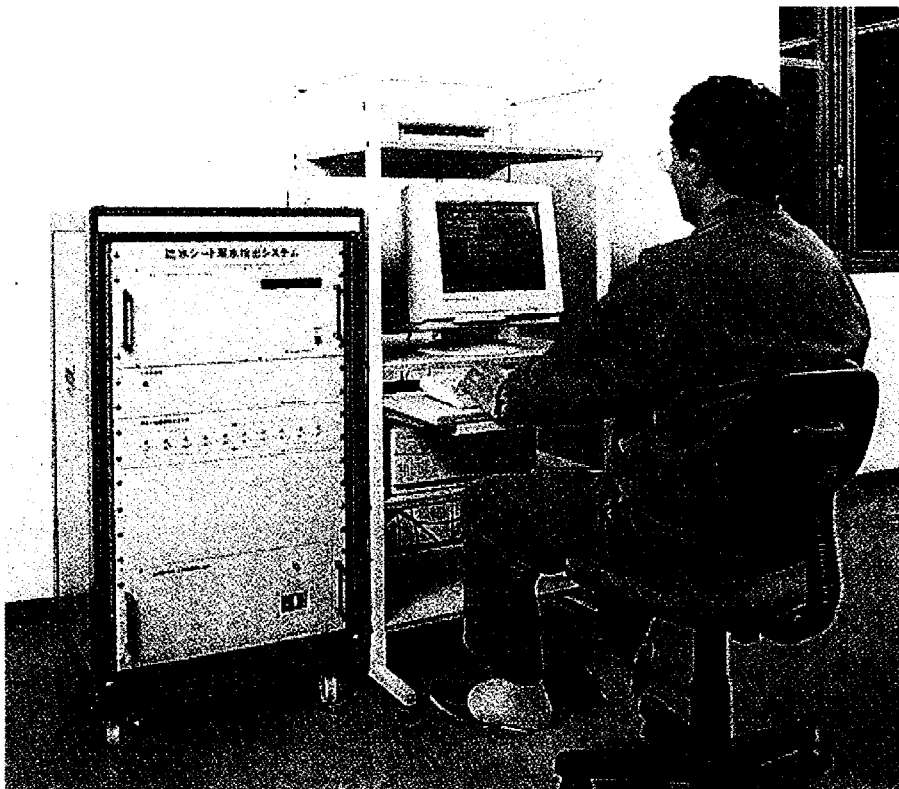


写真-5.10 線電極式電流測定測定装置

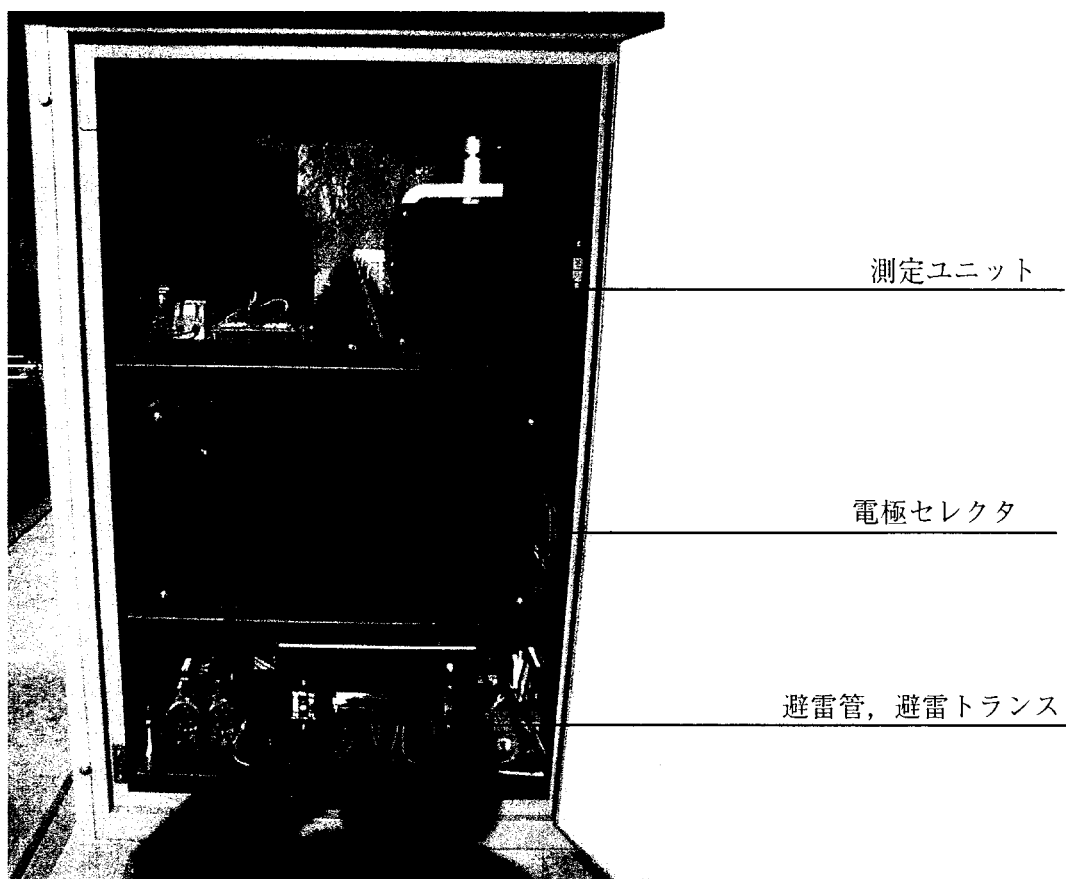


写真-5.11 測定器格納箱内計測器

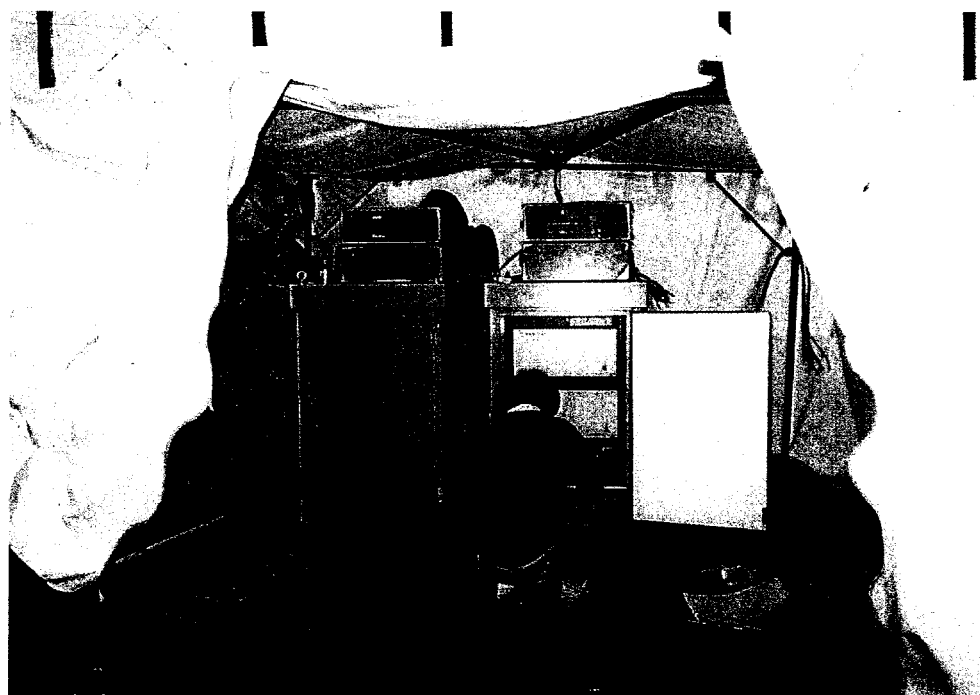


写真-5.12 線電極式電場制御電流測定用機器の調整

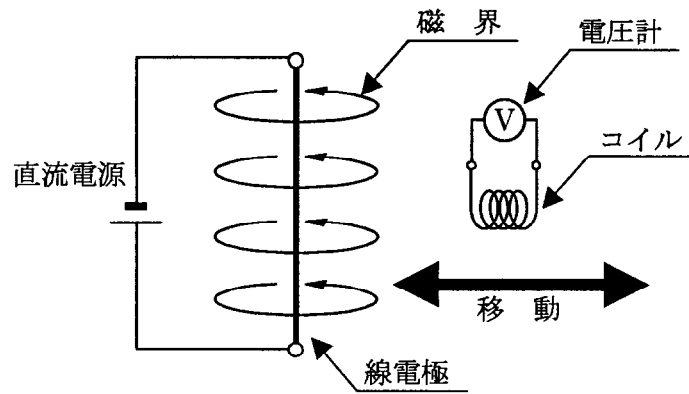


図-5.14 線電極位置確認方法

(2) 漏水位置検知方法

この遮水シートの損傷は、本廃棄物処分場に既に設置されている線電極式電流測定と新たに電場制御の思想を導入した線電極式電場制御電流測定の比較実験において発見されたものである。既設の測定システムは、写真-5.10 に示すように管理棟内に設置されているが、線電極式電場制御電流測定の測定機器は、写真-5.11 に示すように処分場の近傍に設置された格納箱内に置かれ、測定データは光通信で管理棟に送信される。今回の実験では、写真-5.12 に示すように処分場の周回道路にテントを設営し格納箱の測定ユニットに直接パーソナルコンピュータを接続して実験を行った。処分場への印加電圧は 5V で、周波数は 80Hz である。廃棄物処分場における漏水検知システムの測定において損傷など遮水シートに異常が認められた場合、通常以下の手順によって遮水シートの損傷位置の確認、補修の確認などを行う。

- ①漏水検知システムの測定結果から、遮水シートに異常を発見する。
- ②異常が認められる部分について、異常が発生した時期と異常によって生じた電流の変動の大きさを把握する。
- ③明らかに遮水シートの損傷発生が考えられる場合には、電極位置から損傷が生じている位置を特定し、埋立て作業位置と比較する。
- ④最大電流が測定された電極位置から、バックホーなど重機を用いて大まかに掘削する。
- ⑤遮水シートに近い部分は、人力で注意深く掘削し、損傷を確認する。
- ⑥損傷発見後、損傷部分で遮水シート上下が電氣的につながっていない状態にして計測を行い、その他に漏水がないことを確認する。
- ⑦発見した損傷を全て補修した後、損傷部分を埋め戻すとともに再度計測を行い、損傷部分が完全に補修されたことを確認する。

この手順の中で、遮水シートの下側に設置された線電極や廃棄物に埋まった線電極を、

現場で処分場の平面図から見つけるには意外にむずかしい。様似町の処分場のみならず処分場に設置した線電極の位置は、図－5.14 に示すように、線電極の両端に直流電圧を印加し、線電極周りに発生する磁界をコイルで捉え、コイルに発生する最大電圧が発生する位置から比較的簡単に見つけることが可能である。

5.3.2 処分場実験結果

(1) 線電極式電流測定による漏水検知

様似町の廃棄物処分場において得られた測定結果を、図-5.15、図-5.16 および表-5.10、表-5.11 に示す。図-5.15、図-5.16 のグラフは、図-5.13 に示した平面図の左側 2 区画についての測定結果である。平面図の右側 1 区画は、供用していないため、測定していない。また、これらの測定結果図は、図-5.13 に示した平面図において、図右上から俯瞰するように示している。

これらの図表から、以下の知見が得られる。

- ①土槽実験と同様に、遮水シートの下側の線電極と漏水電極間の距離がはなれていても、電流の低下は小さい。また、漏水を経由する電流の影響が処分場全体に広がり、漏水がない部分で一定値に収束しない。
- ②遮水シートの下側の線電極を、処分場の電極の切れ目ごとに別の線電極にすると、別の区画に存在する漏水の影響を受けにくくできる。

①に示したように、前述の土槽実験結果と同様に、地盤の電界の広がりによって、遮水シートの上に設置した電極によって測定された電流の変化が大きく、遮水シートの下に設置した電極によって測定された電流の変化が小さい。

各区画内で測定電流を比較してみると、X 軸方向に測定値の変化が小さいことがわかる。また、Y 軸方向の測定値の変化をみると、X 軸方向の測定値の変化と比較すれば大きい、40m～50m 離れても測定電流が一定値に収束しないように見える。測定電流の大きさをみると、遮水シートの損傷の近傍 (X4,Y11) で、ピーク電流 197.95mA が流れている。この (X4,Y11) から、X 方向に 50m 離れた (X14,Y11) で、電極を分割しても 84.22mA までしか低下しない。一方、Y 方向に 50m 離れた (X4,Y1) において 14.42mA まで低下している。

実験土槽から実際の処分場に規模が大きくなっても、漏水を経由して流れる電流の影響は処分場全体に広がり、漏水の影響範囲が限定されないことがわかる。これは、3 章の図-3.12 と式(3.1)に示すように、電極と漏水の距離がある程度離れてしまえば、漏水と電極間の電気抵抗が一定となる現象によって生じていると考えられる。

漏水を補修した後の測定結果である図-5.16 および表-5.11 ついてみると、漏水を補修した部分の区画において (X4,Y11) で 72.36mA の電流が流れているが、X 方向に 50m 離れた (X14,Y10) で、電極を分割しても 63.29mA までしか低下しない。一方、Y 方向に 50m 離れた (X4,Y1) において 15.84mA まで低下している。

測定結果の傾向は、X 方向にあまり変化がなく、Y 方向には変化が大きい、処分場全体に同一の傾向が広がっていることがわかる。

また、②に示したように、X 軸方向の電極 (Y1～Y14) は分割されているため、区画の境界で大きく測定値が変化していることがわかる。測定電流の大きさは、遮水シートの損傷の近傍 (X4,Y11) で、ピーク電流 197.85mA が流れているのに対し、X 方向に測定電流

をみると、以下のようにになっている。

	X4	X5	…	X7	(電極の切れ目)	X8	…	X14
Y11	197.85	173.83	…	169.29	(電極の切れ目)	87.07	…	84.22

測定電流は、電極の切れ目を挟んで同一区画内においてピーク電流 197.85mA から (X7,Y11)の測定電流 169.29mA に 28.56mA ($=197.85-169.29$) 低下するのに対し、電極の切れ目を挟んで (X7,Y11)から (X8,Y11) の間で 169.29mA から 87.07mA まで 82.22mA ($=169.29-87.07$) 低下する。

同様に、損傷補修後の測定である図-5.16 および表-5.11 ついてみると、遮水シートの損傷の近傍 (X4,Y11) で、最大電流 72.36mA が流れており、X 方向の測定電流の変化は、以下のようになる。

	X4	X5	…	X7	(電極の切れ目)	X8	…	X14
Y11	72.36	72.17	…	71.85	(電極の切れ目)	59.69	…	58.59

同一区画内において、(X4,Y11) の 72.36mA から (X7,Y11)の 71.85mA に 0.51mA しか低下しないのに対し、電極の切れ目を挟んで (X7,Y11)から (X8,Y11) の間で 71.85mA から 59.69mA まで 12.16mA ($=71.85-59.69$) 低下する。

これは、図-5.13 に示すように、処分場内に設置した電極を 2 つに分割し、対応する座標の測定時以外は、大地に接地しているためである。このため、ある区画に漏水が存在する場合、同一区画内の電流は大きく測定され、他の区画での測定電流と大きな差が生ずると考えられる。遮水シート下側に設置した線電極を区画に分けて分割すると、漏水からはなれた線電極に漏水を経由する電流を遮断するため、漏水検知システムは測定感度の向上に有効と考えられる。

様似町の線電極による電流測定による漏水検知は、図-5.20 に示すように、一応漏水位置を検知できているが、この測定は処分場の供用開始後わずか 1 ヶ月後の測定であり、処分場に埋め立てられた廃棄物のボリュームも小さく、浸出水の電気伝導度も約 3mS/cm であった。

供用開始後 4～5 年経過すると、廃棄物のボリュームは、100m×100m×5m のスケールとなり、浸出水の電気伝導度も 3mS/cm 以上になる。これとともに、処分場内の電界の広がりも大きくなるため、地盤側に設置した線電極と同様に各電極と漏水間の電気抵抗に差がなくなり、漏水位置を検知できなくなる可能性が高いと考えられる。

したがって、電流測定を測定原理とする漏水検知システムは、処分場の大きさや浸出水の電気伝導度の高さにかかわらず、漏水と各電極間の距離によって電気抵抗が変化するような測定原理を導入しないかぎり、実用に耐えないと考えられる。

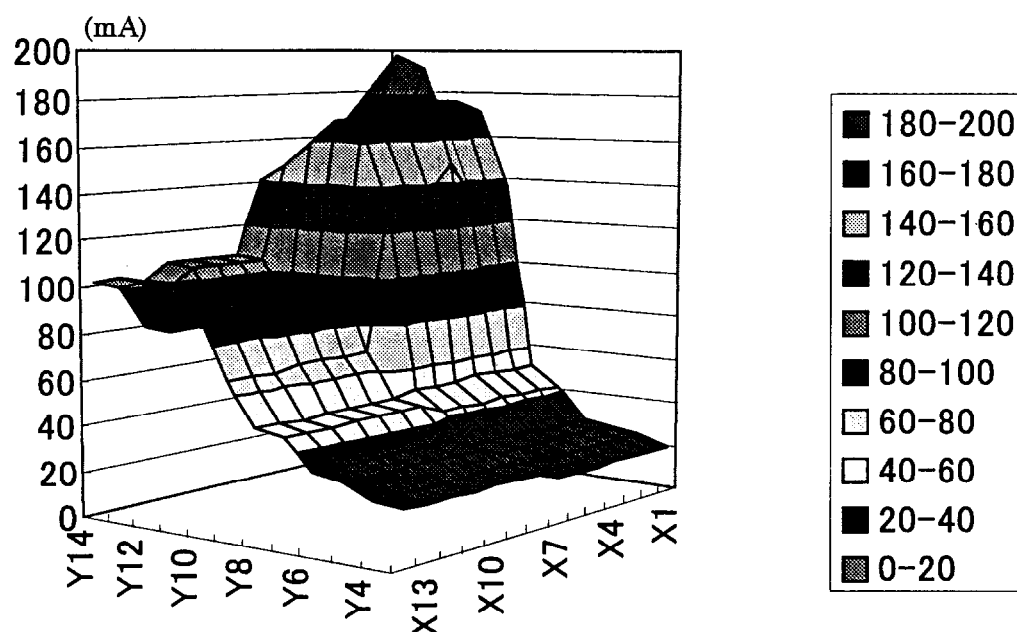


図-5.15 遮水シートの損傷発見時の測定結果
(線電極, 電流測定, 単位: mA)

表-5.10 遮水シートの損傷発見時の測定結果 (線電極, 電流測定のみによる測定)

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
Y1	14.36	14.35	14.35	14.42	14.35	14.33	14.33							
Y2	18.06	18.06	18.05	18.18	18.05	18.02	18.02							
Y3	20.08	20.07	20.07	20.24	20.07	20.03	20.04	23.95	23.94	23.94	23.95	23.63	23.77	23.76
Y4	24.39	24.38	24.36	24.63	24.35	24.27	24.30	25.73	25.72	25.73	25.74	25.35	25.53	25.52
Y5	26.92	26.91	26.89	27.22	26.87	26.79	26.80	31.00	30.98	31.00	31.01	30.43	30.68	30.67
Y6	28.36	28.34	28.31	28.68	28.29	28.20	28.20	33.24	33.24	33.25	33.26	32.59	32.88	32.87
Y7	42.57	42.53	42.46	43.46	42.44	42.21	42.19	46.29	46.27	46.29	46.32	44.95	45.54	45.51
Y8	51.25	51.19	51.07	52.65	51.03	50.67	50.64	48.42	48.39	48.41	48.44	46.90	47.56	47.52
Y9	137.11	136.61	135.59	149.04	135.21	132.77	132.45	68.16	68.08	68.13	68.17	65.12	66.41	66.33
Y10	172.07	171.28	169.69	191.81	169.09	165.32	164.79	96.58	96.42	96.38	96.44	90.40	92.94	92.76
Y11	176.98	176.16	174.47	197.95	173.83	169.82	169.29	87.07	87.00	87.14	87.24	82.25	84.29	84.22
Y12	165.46	164.73	163.25	183.50	162.69	159.17	158.73	87.90	87.92	88.07	88.20	83.09	85.21	85.13
Y13	153.68	153.06	151.77	168.97	151.29	148.25	147.86	105.32	105.19	105.29	105.44	98.26	101.26	101.07
Y14	144.72	144.15	143.04	158.19	142.62	139.96	139.58	106.61	106.40	106.55	106.69	99.33	102.34	102.17

(単位: mA)

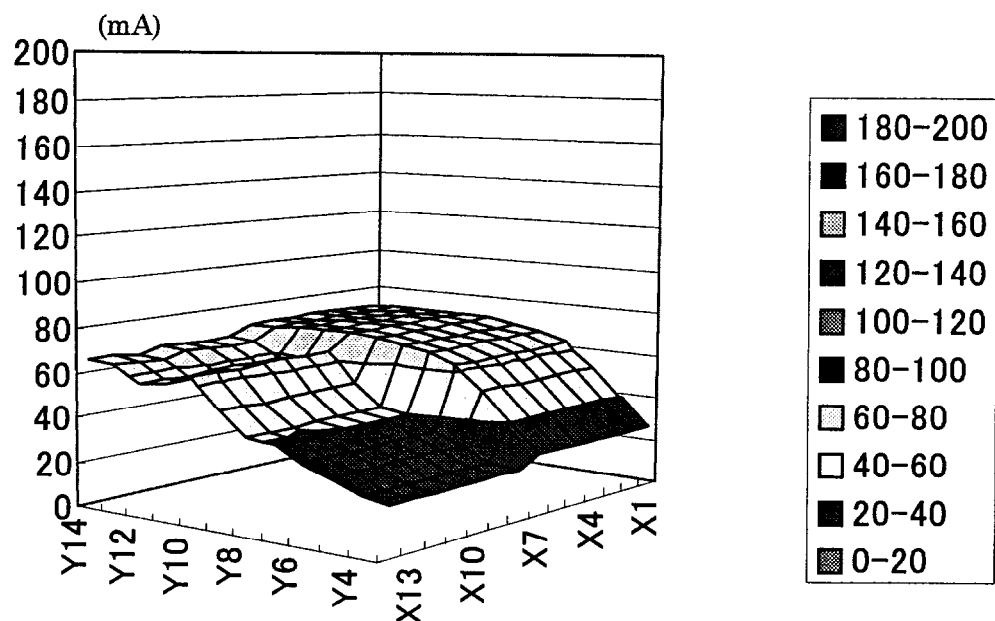


図-5.16 遮水シート損傷修復後の測定結果
(線電極，電流測定，単位：mA)

表-5.11 遮水シート損傷修復後の測定結果 (線電極，電流測定のみによる測定)

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
Y1	15.86	15.84	15.83	15.84	15.82	15.81	15.80							
Y2	21.88	21.84	21.82	21.83	21.81	21.78	21.76							
Y3	27.23	27.16	27.12	27.15	27.10	27.05	27.03	22.51	22.49	22.49	22.50	22.19	22.34	22.33
Y4	40.31	40.16	40.07	40.12	40.02	39.90	39.85	24.08	24.07	24.09	24.11	23.74	23.92	23.92
Y5	52.56	52.32	52.18	52.27	52.11	51.90	51.84	29.67	29.63	29.65	29.67	29.10	29.37	29.36
Y6	63.29	63.00	62.84	62.95	62.75	62.50	62.44	33.83	33.81	33.84	33.87	33.15	33.50	33.49
Y7	67.58	67.28	67.11	67.22	67.01	66.73	66.66	40.10	40.04	40.06	40.09	39.11	39.57	39.55
Y8	69.24	68.94	68.77	68.89	68.68	68.39	68.32	41.36	41.29	41.32	41.35	40.31	40.80	40.77
Y9	71.48	71.21	71.05	71.14	70.95	70.68	70.63	51.02	50.92	50.96	51.01	49.52	50.23	50.18
Y10	72.62	72.37	72.22	72.31	72.12	71.85	71.81	64.36	64.24	64.29	64.37	62.43	63.36	63.29
Y11	72.69	72.43	72.28	72.36	72.17	71.91	71.85	59.69	59.57	59.60	59.67	57.81	58.68	58.59
Y12	72.29	72.01	71.85	71.95	71.75	71.46	71.40	58.35	58.29	58.35	58.43	56.63	57.50	57.44
Y13	71.99	71.68	71.51	71.62	71.40	71.10	71.04	65.13	65.00	65.02	65.09	63.06	64.00	63.92
Y14	71.70	71.37	71.18	71.29	71.06	70.78	70.70	66.13	65.99	66.05	66.14	64.00	65.01	64.94

(単位：mA)

(2) 線電極式電場制御電流測定による漏水検知

図-5.17, 図-5.18 のグラフは, 図-5.15, 図-5.16 図-5.13 と同じ部分についての線電極式電場制御電流測定の測定結果である。これらの測定結果図は, 図-5.13 に示した平面図において, 図右上から俯瞰するように示している。測定値は, 表-5.12, 表-5.13 に示した。

これらの図表から, 以下のような知見が得られる。

- ①線電極式電流測定と比較すると, 遮水シートの損傷位置周辺においてのみ測定電流が大きく, 損傷位置が確認しやすい。
- ②損傷の規模にもよるが, 損傷から一定距離はなれると, 漏水を経由する電流の影響を受けなくなる。
- ③処分場を区画に分けて線電極を分割すると, 漏水を経由する電流の隣合う区画に与える影響を低減できる。
- ④今回検知された 100cm×50cm の損傷に対する線電極式電場制御電流測定の信号比率は 86.5%で, 損傷に関する信号比率が高い。

①に示した漏水検知のやりやすさについては, 図-5.17 から明らかなように座標 (X4,Y11) において非常に大きなピーク電流 (12.170mA) が認められ, 前述の線電極式電流測定とは異なり, 漏水位置を明確に特定できる。このピーク部分に相当する処分場に敷設された遮水シートを点検したところ, 写真-5.13 に示す遮水シートの損傷を発見した。

遮水シートの損傷位置は, 図-5.13 に示すように, X4 電極と Y11 電極の交差部分の近傍で, この部分は廃棄物搬入道路の法肩にあたる。この損傷発生原因は, 廃棄物の埋立てによって遮水シートが隠れ, ブルドーザーのオペレータが遮水シートの存在に気づかず排土板を接触させたことによって生じたことがわかった。損傷の大きさは, 縦横約 100cm×50cm の大きさで, 約 1mX4,Y10 側に寄った X4,Y11 の交点付近であった。

②に示した漏水を経由して流れる電流の影響についてみると, 表-5.12 の測定結果から, ピーク電流 12.170mA が測定された (X4,Y11) から X 方向に 5m 離れた (X3,Y11) と (X5,Y11) において, それぞれ 0.658mA, 0.653mA となり, Y 方向に 10m 離れた (X4,Y9) と (X4,Y13) において, それぞれ 1.987mA, 2.371mA となった。一方, ピーク電流が測定された (X4,Y11) から X 方向に 15m 離れた (X7,Y11) と Y 方向に 15m 離れた (X4,Y8) において, それぞれ 0.052mA, 0.494mA が測定された。表-5.12 から, 遮水シートに生じた損傷から 15m 以上離れた位置において, おおよそ 0.020mA~0.040mA の電流が測定されている。この測定電流の大きさは, 遮水シートの損傷から 15m 離れた位置で測定された電流と大きく変わらない。

この結果から, 電場制御を併用した電流測定によって, 縦横約 100cm×50cm の大きさの損傷から 15m 離れれば, 損傷を経由して流れる電流の影響を受けなくなると考えられる。

一方, 遮水シートの損傷を補修した後の測定結果を, 表-5.13 と図-5.18 に示す。漏水

の発見された (X4,Y11) において、0.607mA が測定された。処分場全体についてみると、0.2mA～1.0mA の電流が測定された。この測定電流の大きさは、先の遮水シートに損傷が生じた条件で、損傷を経由して流れる電流の影響を受けない部分で測定された 0.02mA～0.04mA の電流と比較すると、10 倍～25 倍大きな測定電流である。この理由は、損傷が検知されたのは、処分場への廃棄物埋立てが開始されてから 1 ヶ月後で、補修するまでの間約 1 ヶ月間、損傷から浸出水が漏れないよう応急処置を講じた上で、廃棄物の埋立てを続行したことと、この間の降水によって廃棄物中の塩分が浸出水に溶解出し、電気伝導度が上昇したためと考えられる。

③に示した線電極の埋立て区画ごとの分割についてみると、表－5.12 から、埋立て区画の境界周辺で測定電流は、以下に示すようになっている。

	X4	X5	…	X7	(電極の切れ目)	X8	…	X14
Y11	12.127	0.653	…	0.494	(電極の切れ目)	0.040	…	0.022

遮水シートの損傷がある区画内で、損傷から 5m 離れた (X5,Y11) で 0.653mA の測定電流が 15m 離れた (X7,Y11) で 0.494mA と 0.159mA ($=0.653-0.494$) 低下するのに対し、電極の切れ目を挟んだ (X7,Y11) と (X8,Y11) 5m の間で 0.494mA から 0.040mA まで 0.454mA ($=0.494-0.040$) 電流が低下していることがわかる。線電極を分割したことにより、隣接する損傷のない区画で損傷を経由して流れる電流の影響が 8.1% ($=100 \times 0.040 / 0.494$) に減少していることがわかる。線電極の分割は、電場制御電流測定にとっても、遮水シートの損傷を経由して流れる電流の影響を、損傷のある区画に限定する効果が高いことがわかる。

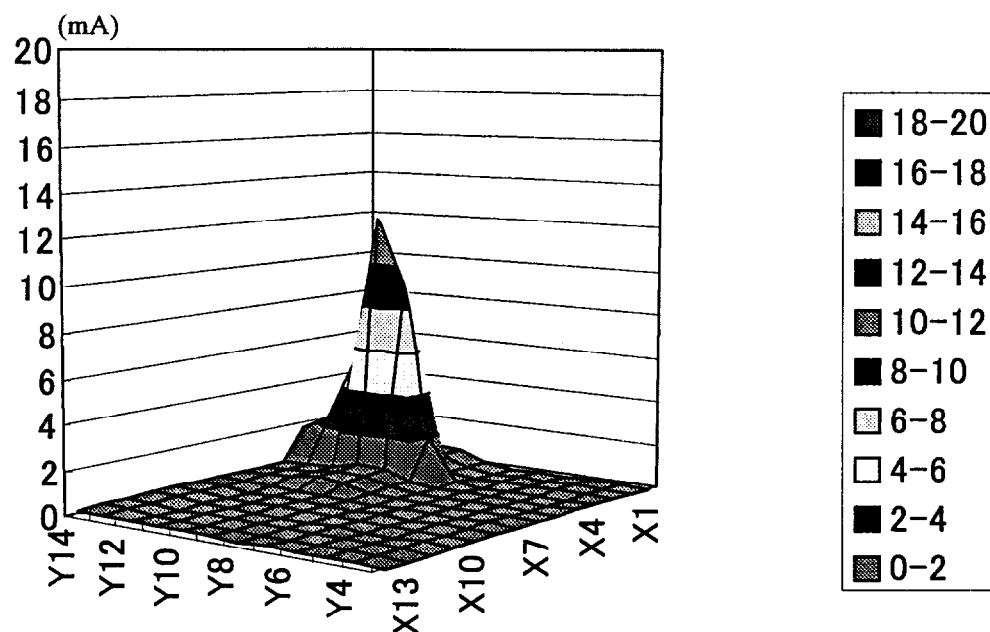


図-5.17 遮水シートの損傷発見時の測定結果
(線電極，電流測定，電場制御併用による測定，単位：mA)

表-5.12 遮水シートの損傷発見時の測定結果（線電極，電流測定，電場制御併用による測定）

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
Y1	0.016	0.009	0.012	0.003	0.027	0.023	0.022							
Y2	0.043	0.036	0.034	0.018	0.048	0.040	0.040							
Y3	0.032	0.028	0.027	0.015	0.042	0.034	0.033	0.054	0.040	0.042	0.035	0.017	0.024	0.026
Y4	0.034	0.027	0.028	0.010	0.043	0.034	0.033	0.076	0.073	0.078	0.071	0.038	0.051	0.052
Y5	0.043	0.036	0.038	0.021	0.051	0.041	0.041	0.037	0.037	0.037	0.028	0.016	0.022	0.022
Y6	0.026	0.021	0.022	0.010	0.036	0.029	0.029	0.029	0.028	0.030	0.020	0.012	0.017	0.018
Y7	0.014	0.009	0.011	0.004	0.027	0.020	0.020	0.078	0.079	0.081	0.075	0.040	0.054	0.056
Y8	0.014	0.008	0.011	0.052	0.027	0.021	0.021	0.021	0.020	0.022	0.011	0.008	0.010	0.012
Y9	0.148	0.136	0.133	1.987	0.142	0.116	0.108	0.025	0.023	0.027	0.014	0.017	0.012	0.014
Y10	0.562	0.531	0.511	9.186	0.509	0.411	0.385	0.039	0.038	0.039	0.029	0.017	0.023	0.022
Y11	0.723	0.683	0.658	12.170	0.653	0.529	0.494	0.040	0.039	0.040	0.031	0.022	0.023	0.023
Y12	0.388	0.360	0.344	5.006	0.354	0.289	0.268	0.037	0.039	0.042	0.034	0.020	0.025	0.024
Y13	0.262	0.236	0.221	2.371	0.239	0.200	0.182	0.116	0.122	0.140	0.154	0.092	0.105	0.094
Y14	0.249	0.221	0.203	1.643	0.221	0.186	0.166	0.185	0.197	0.227	0.242	0.145	0.155	0.133

(単位：mA)

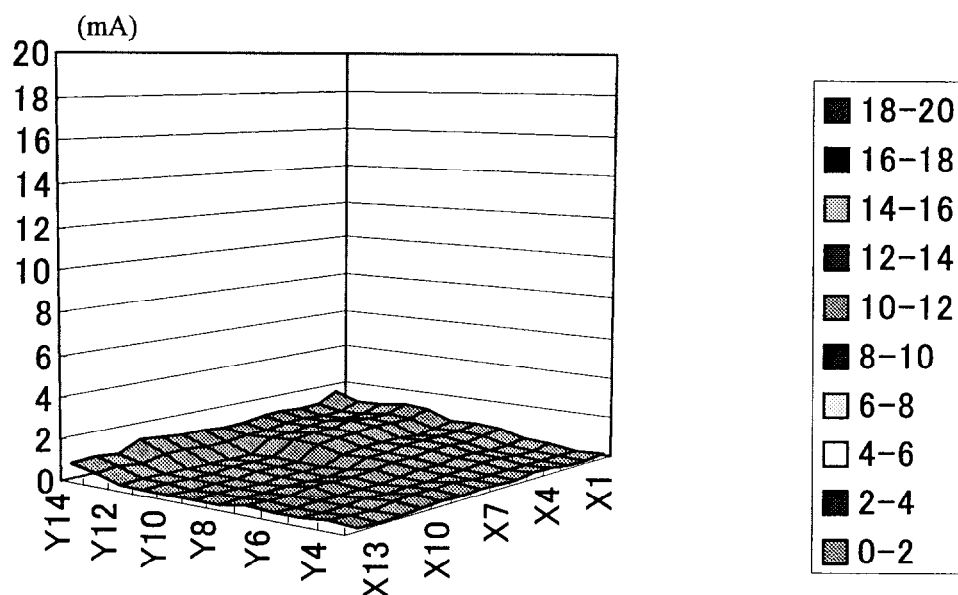
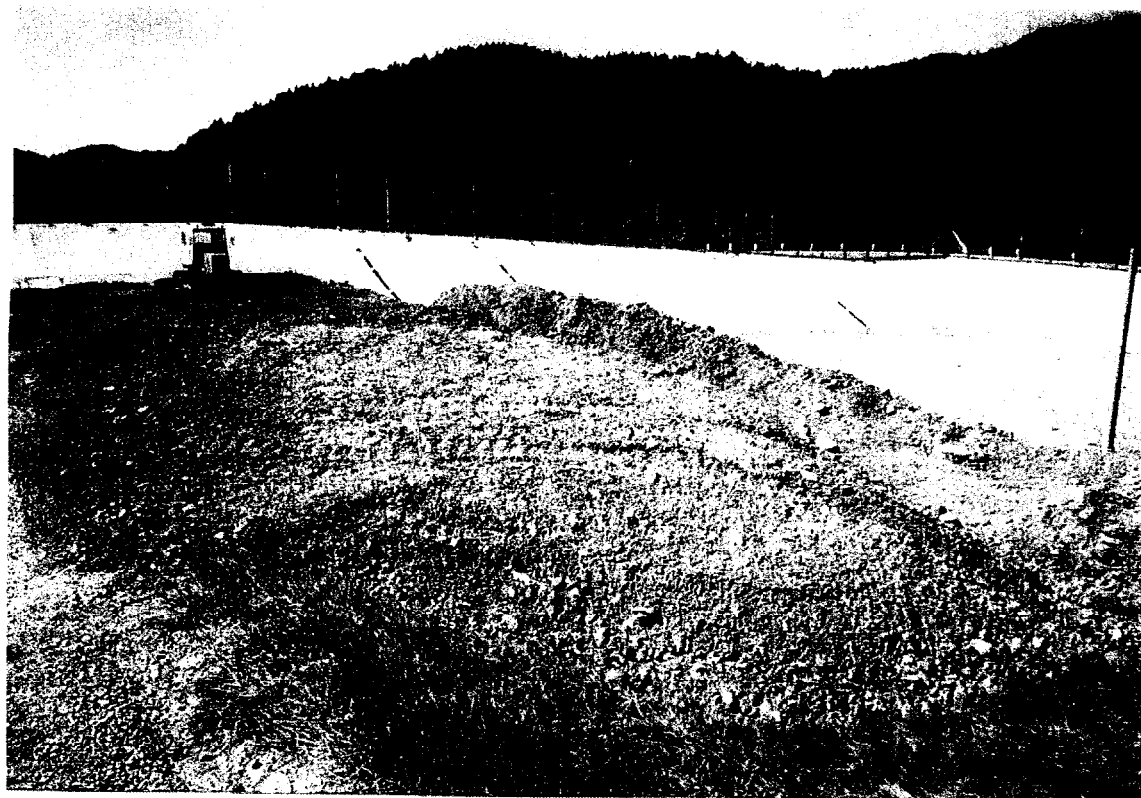


図-5.18 遮水シート損傷修復後の測定結果
(線電極，電流測定，電場制御併用による測定，単位：mA)

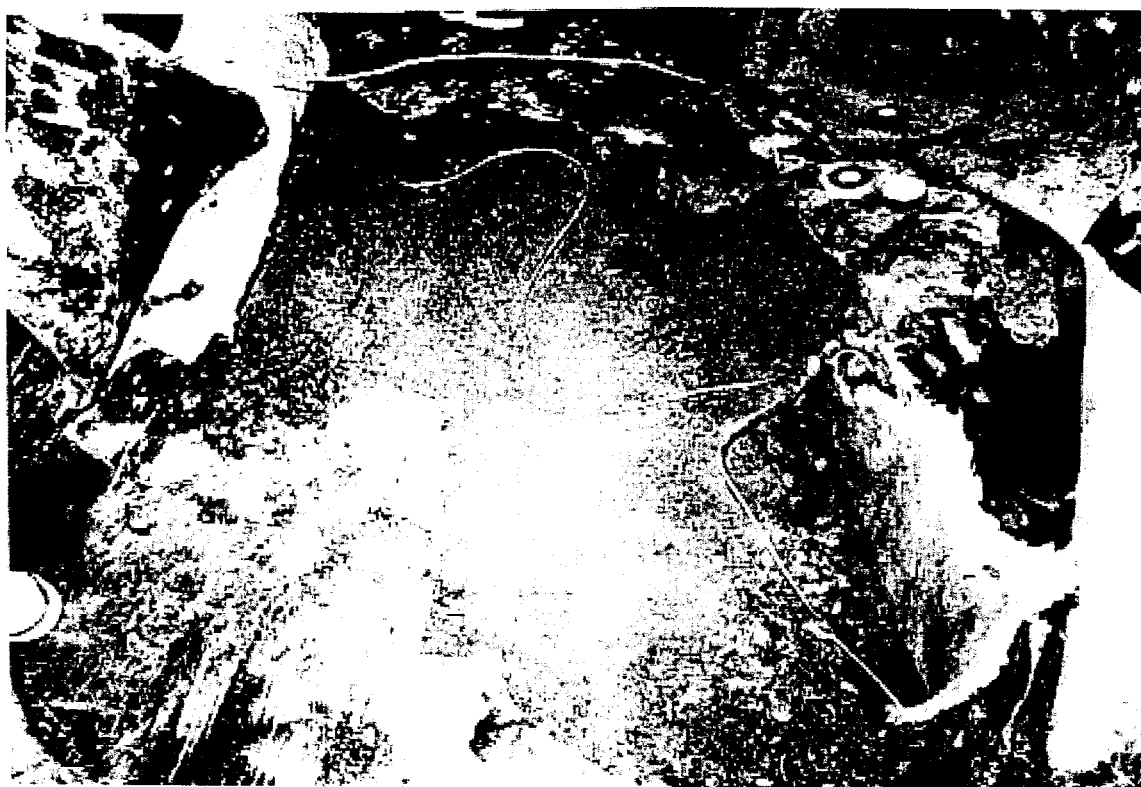
表-5.13 遮水シート損傷修復後の測定結果 (線電極，電流測定，電場制御併用による測定)

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
Y1	0.720	0.602	0.520	0.492	0.399	0.336	0.318							
Y2	1.010	0.830	0.765	0.839	0.755	0.647	0.589							
Y3	0.777	0.630	0.576	0.626	0.570	0.499	0.457	0.459	0.416	0.451	0.365	0.144	0.187	0.180
Y4	0.818	0.678	0.637	0.664	0.596	0.503	0.451	0.356	0.351	0.363	0.385	0.158	0.201	0.200
Y5	0.803	0.663	0.613	0.649	0.587	0.510	0.459	0.332	0.306	0.331	0.307	0.139	0.168	0.169
Y6	0.912	0.762	0.705	0.750	0.682	0.593	0.544	0.431	0.430	0.421	0.412	0.170	0.220	0.206
Y7	0.839	0.668	0.611	0.659	0.593	0.529	0.491	0.605	0.545	0.595	0.603	0.334	0.419	0.428
Y8	0.770	0.600	0.549	0.585	0.520	0.464	0.430	0.426	0.449	0.474	0.473	0.251	0.330	0.321
Y9	0.917	0.713	0.611	0.672	0.587	0.534	0.475	0.545	0.442	0.375	0.425	0.235	0.265	0.238
Y10	0.892	0.641	0.552	0.603	0.491	0.475	0.411	0.784	0.477	0.368	0.079	-0.115	-0.267	-0.289
Y11	0.655	0.579	0.526	0.607	0.535	0.523	0.443	0.527	0.374	0.349	0.228	0.065	0.005	-0.007
Y12	0.573	0.527	0.554	0.652	0.593	0.547	0.481	0.475	0.324	0.334	0.246	0.124	0.082	0.059
Y13	0.439	0.464	0.504	0.617	0.552	0.532	0.471	0.721	0.750	0.771	0.563	0.222	0.224	0.053
Y14	0.522	0.498	0.580	0.718	0.676	0.661	0.585	0.993	0.876	0.781	0.854	0.436	0.464	0.272

(単位：mA)



写真－5.12 損傷位置概観



写真－5.13 図－5.17 に示した測定結果より発見された遮水シートの損傷

表－5.14 遮水シートの損傷から約 15m離れた位置における測定電流
(電流測定,線電極,電場制御併用, 単位：mA)

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Y8	0.014	0.008	0.011	0.052	0.027	0.021	0.021
Y9	0.148	0.136	0.133	1.987	0.142	0.116	0.108
Y10	0.562	0.531	0.511	9.186	0.509	0.411	0.385
Y11	0.723	0.683	0.658	12.170	0.653	0.529	0.494
Y12	0.388	0.360	0.344	5.006	0.354	0.289	0.268
Y13	0.262	0.236	0.221	2.371	0.239	0.200	0.182
Y14	0.249	0.221	0.203	1.643	0.221	0.186	0.166

④に示した測定結果中に占める信号比率は、図－5.17 の傾向から相当高いことがわかる。図－5.17 と電場制御を併用していない図－5.20 を比較すると、遮水シートの損傷から 15m 離れれば、電場制御によって漏水を経由してくる電流の影響が低下することがわかる。表－5.12 の実験結果から、最大値とその周辺における測定電流を抜粋すると、表－5.14 に示すようになる。

表－5.14 において、中央 (X4,Y11) から約 15m の距離における測定結果を薄い灰色で示した。漏水から 15m の距離における最大の測定電流は、(X4,Y14)の 1.643mA で、最小の測定電流は、(X3,Y8) の 0.011mA である。信号比率は、最悪の条件における値こそ意味があると考えて、信号比率計算には 1.643mA を用いる。これらの測定値を用いて「(1) 点電極式電流測定による漏水検知」の場合と同様に信号比率 SR_{EFC} を計算すると、以下のようになる。

$$SR_{EFC} = 100 \times (12.170 - 1.643) / 12.170 = 86.5\%$$

また、線電極式電流測定の測定結果について、信号比率 SR_{NEFC} を検討すると、線電極式電場制御電流測定による測定とは異なり漏水から 50m 近く離れても、測定電流はあまり低下しない。そこで、漏水から 15m 離れた位置における測定電流と漏水位置における測定電流から信号比率を計算する。表－5.10 から、漏水を中心として 15m の距離における測定電流を抜粋すると、表－5.15 に示すようになる。この表は、表－5.14 と同様に、漏水から 15m の距離における測定結果を薄い灰色で示した。これらの測定結果のなかで、最大値は、(X1,Y11) の 176.98mA で、最小値は (X6,Y8) の 50.67mA である。前述のとおり、信号比率は、最悪の条件でこそ意味を持つため、(X1,Y11) の 176.98mA と漏水における測定電流 197.95mA から、信号比率 SR_{NEFC} は、以下のように計算できる。

$$SR_{NEFC} = 100 \times (197.95 - 176.98) / 197.95 = 10.59\%$$

表－5.15 遮水シートの損傷から約 15m離れた位置における測定電流
(電流測定,線電極で測定, 単位: mA)

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Y8	51.25	51.19	51.07	52.65	51.03	50.67	50.64
Y9	137.11	136.61	135.59	149.04	135.21	132.77	132.45
Y10	172.07	171.28	169.69	191.81	169.09	165.32	164.79
Y11	176.98	176.16	174.47	197.95	173.83	169.82	169.29
Y12	165.46	164.73	163.25	183.50	162.69	159.17	158.73
Y13	153.68	153.06	151.77	168.97	151.29	148.25	147.86
Y14	144.72	144.15	143.04	158.19	142.62	139.96	139.58

信号比率が 10.59%と小さな値となった理由は、先に述べた地盤側に設置した線電極と漏水までの電気抵抗にほとんど差がないことに起因すると考えられる。また、(X6,Y8)の 50.67mA を用いて同様の計算をすると信号比率が 74.40%となるが、Y 方向の測定結果も、廃棄物の埋立てに伴う浸出水の電気伝導度の上昇によって各電極と漏水間の電気抵抗が低下し、信号比率 74.40%よりも大きく低下すると考えられる。

したがって、線電極式電場制御電流測定は、電場制御をしていない線電極式電流測定と比較して、信号比率が約 8 倍 ($=86.5/10.59$) 向上することがわかる。

ここで再度、廃棄物処分場の埋立てが進んだ条件における線電極式電場制御電流測定の計測について考える。処分場内の電場は、浸出水の電気伝導度の上昇とともに、電位が一樣化しやすくなり、人為的に電場を制御しやすくなると考えられる。また、廃棄物の埋立てが進行して埋立てボリュームが大きくなっても、電界の広がりが大きくなって電位が一樣になりやすくなると考えられる。いずれにせよ、線電極式電場制御電流測定の漏水位置検知性能は、廃棄物の埋立てに伴って大きく低下することはないと考えられる。

したがって、線電極式電場制御電流測定は、廃棄物処分場の種々の条件においても漏水位置を確実に捉えることができると考えられる。

(3) 線電極式電場制御電流測定による測定精度

線電極式電場制御電流測定による漏水検知において、漏水の検知限界や漏水の位置的精度についての実験を行っていない。そこで、この測定方法による漏水の検知限界と位置的精度について考察する。

4.2 節の点電極式電場制御電流測定の実験において述べたとおり、電氣的漏水検知システムは、ポテンシャル理論に支配されている。したがって、電流を流す媒体の比抵抗（電気伝導度）や電圧を考慮することにより、模型実験の結果から種々の規模の処分場についての測定性能を推定することができる。

線電極式電流測定と線電極式電場制御電流測定を同一測定対象に適用した場合、表－5.10 と表－5.12 の測定最大電流の比較から、電場制御を併用した方がしない場合の測定電

流の 6.15% ($=100 \times 12.170 / 197.95$) になる。そこで、土槽実験における 1cm^2 の漏水の測定電流 13.41mA を用いて、電場制御を併用した場合も先の比較と同様に測定電流が低下すると仮定すると、 0.824mA ($=13.41 \times 0.0615$) の測定電流が得られる。この電流の大きさは、表-5.12 の漏水のない場所における一般的な測定電流 $0.02\text{mA} \sim 0.04\text{mA}$ と比較して 20 倍～40 倍大きく、 1cm^2 の漏水も十分検知できると考えられる。

位置的精度についてみると、4.2 節の点電極式電場制御電流測定の実験と同様に、測定結果をコンター図としてみると、図-5.19 に示すように等間隔にコンター線がなrandていることがわかる。4.2 節と同様に、コンターが等間隔になrandた部分について、楕円でコンター線を近似して漏水の推定位置を求めると、図-5.20 に示すように、 (X_4, Y_{10}) から (X_4, Y_{11}) の方向に 3.5m 寄った X_4 電極位置に漏水が存在することを示している。

図-5.53 の遮水シートの損傷状態をみると、シート下側の電極 (X_4 電極) が露出しており、 X_4 電極上に損傷が存在することがわかる。また、 Y_{11} 電極から損傷の中心までの距離は 1.4m と、推定位置と約 10cm 異なった。この漏水位置推定方法は、楕円の中心の置き方で、 10cm 程度の誤差が生ずるのはしかたがないので、ほぼ $50\text{cm} \times 100\text{cm}$ 規模の漏水位置は、正確に推定できていると判断される。

一方、線電極式電場制御電流測定を処分場に適用すると、遮水シートに $50\text{cm} \times 100\text{cm}$ の大きな損傷が生じて、漏水から 15m 離れると漏水を経由して流れる電流の影響が生じないことが判明している。したがって、漏水が小さくなると、最大電流が測定される位置から 5m 以上離れれば、漏水を経由して流れる電流の影響を受けなくなると考えられる。

ここで、図-5.21 に示すように、微小な漏水の周辺について考える。図-5.21 の微小な漏水の周辺には、遮水シートの下側に X_{i-1} 、 X_i 上側に Y_{i-1} 、 Y_i の線電極が配置されている。漏水の近傍にある遮水シートの下側の線電極 X_i を印加電極として用いると、線電極 X_{i-1} は印加電極ではないから、印加電極とは別の極性となっている。漏水位置の電位は、低くなっているが電極 X_{i-1} 、 Y_{i-1} 、 Y_i よりも高い電位となっている。したがって、漏水を経由して流れる測定回路に接続されている遮水シートの上側の線電極 Y_{i-1} 、 Y_i に流れる電流成分が生ずる。

すなわち、漏水に流れる電流が、印加電極以外の線電極による電場制御によって、電極間隔 5m よりも離れた位置で確認できない状態であっても、漏水の近傍の線電極が印加電極として使用された場合には、漏水を経由して流れる電流が測定されることとなる。たとえば、図-5.21 のように、微小な漏水が遮水シート上下の線電極によって形成された四角形の中央部にある場合には、 (X_{i-1}, Y_{i-1}) 、 (X_{i-1}, Y_i) 、 (X_i, Y_{i-1}) 、 (X_i, Y_i) で測定される測定電流は、それぞれほぼ同じ大きさの電流が測定される。また、図-5.22 のように、微小な漏水が (X_i, Y_{i-1}) の近傍にある場合には、 (X_i, Y_{i-1}) において最大の電流が測定され、 (X_i, Y_i) で 2 番目の大きさの電流が測定される。線電極 X_{i-1} を印加電極として電流を測定する場合には、漏水の上下は線電極 X_i によって同電位に制御されるため、測定電流は、小さくなる。こうした、電極配置と漏水位置の関係がおよぼす測定電流への影響を把握すれば、微小な漏水であっても、電極間隔の $1/2$ までの位置的精度で漏水を検知することができると考えられる。

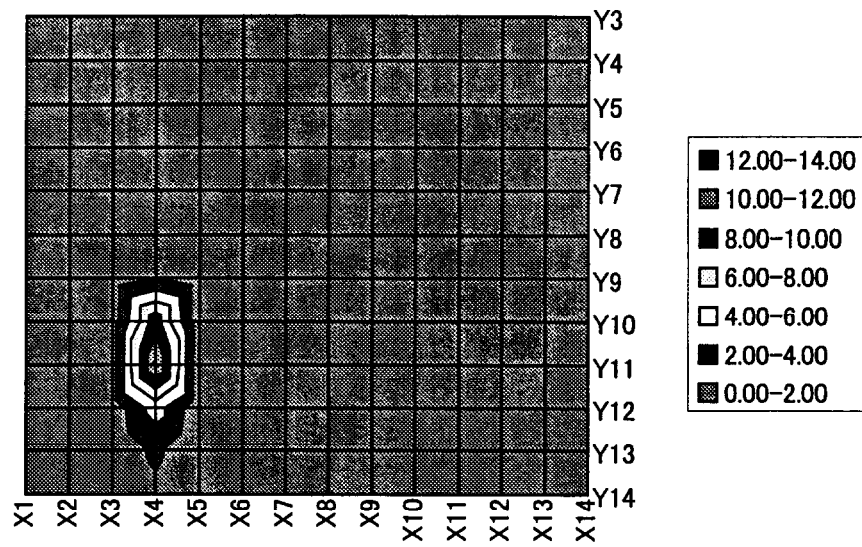


図-5.19 漏水周辺のコンター

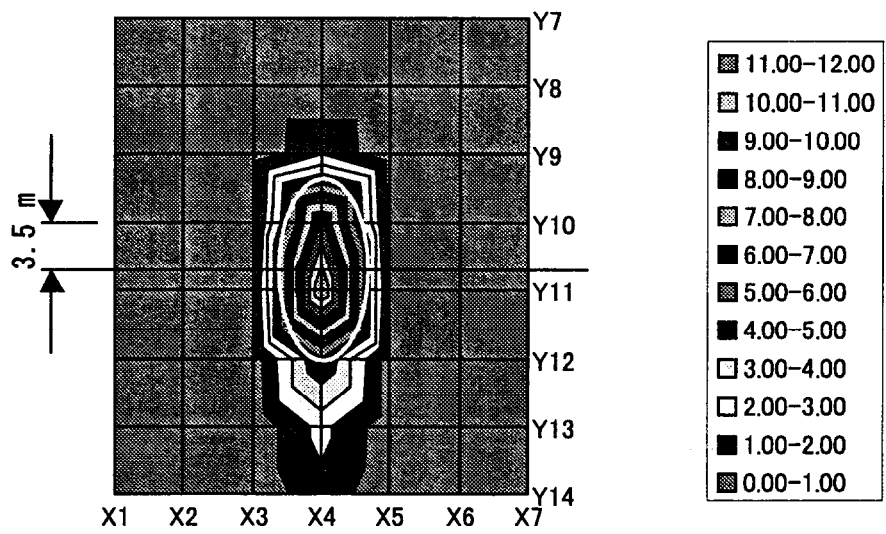


図-5.20 漏水周辺のコンターと位置推定

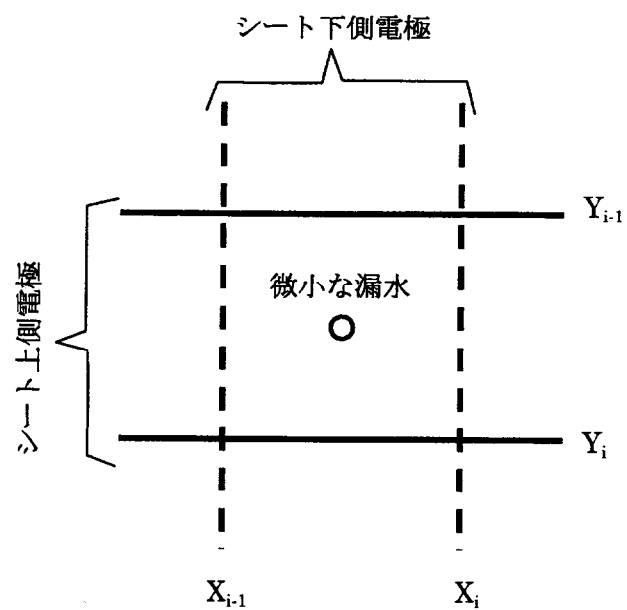


図-5.21 微小な漏水周辺の測定条件

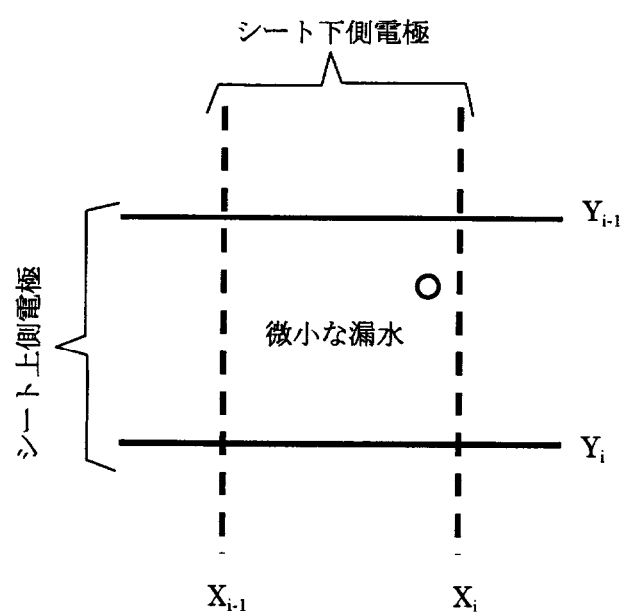


図-5.22 微小な漏水周辺の測定条件

5.4 電場制御電流測定まとめ

筆者が開発した電氣的漏水検知システム「電場制御電流測定」には、点電極式と線電極式がある。また、筆者の開発した漏水検知システムに、これらの前身である「線電極式電流測定」がある。これらの漏水検知システムについて水槽実験、土槽実験、処分場実験を行った。それぞれの実験において得られた結果は、以下のようにまとめられる。

(1) 土槽実験

土槽実験により、線電極式電流測定は、以下のような特性を持っていることがわかる。

- 1) 線電極式電流測定は、線電極間に流れる電流が最大電流となることから、漏水位置を一応検知できる。これは、漏水が線電極の近傍にあれば漏水を経由する電流が増大することを示しており、信号比率を向上させれば少数の電極で漏水が検知できる可能性を示唆するものと考えられる。
- 2) 漏水の大きさにかかわらず、漏水が存在する部分近傍で測定される最大電流と漏水から離れた位置における最小電流の差が小さく、漏水が検知しにくい。
 - 2-1) 線電極式電流測定は、 1cm^2 の漏水が存在することにより電流が 18 倍 ($=13.41 / 0.73$) 増加するにもかかわらず、信号比率 SR (= Signal Ratio) は 4.8% でしかなく、電流の増加分を測定精度の向上に有効に利用できない。
 - 2-2) 漏水を経由して流れる電流の影響が土槽全体に広がる理由は、漏水と電極間の電気抵抗が電極間隔と廃棄物など電流を流す媒体の比抵抗（電気伝導度の逆数）によって決定され、電極間隔に影響されないためである。したがって、漏水と線電極間の電気抵抗がほとんど同じであるため測定電流の変化が生じず、漏水の有無によって生ずる電流の増大が信号比率の向上につながらない。
- 3) 漏水を経由して流れる電流の影響が土槽全体に広がり、土槽の X 方向と Y 方向で測定感度も異なっている。
 - 3-1) 遮水シートの上側は、電界の広がり土槽の限られた空間となり、線電極と漏水間の距離に応じて電気抵抗が変化する。しかし、遮水シートの下側は、電界の広がりが地球という半無限の空間となるため、線電極と漏水間の距離に関わりなく電気抵抗がほとんど同じとなる。
 - 3-2) 土槽内部の限られた空間であっても、電極から漏水までの電気抵抗が無限大となることがないため、微小な電流が必ず流れる。

(2) 処分場実験

線電極と遮水シート上下の電場制御を併用した電流測定による漏水位置検知システムについて、土槽実験と廃棄物処分場における計測結果から以下のようにまとめられる。

- 1) 線電極式電場制御電流測定による漏水位置検知システムにより、ブルドーザーによる

廃棄物埋立て作業に伴って発生した廃棄物処分場に敷設された遮水シートの縦横約 100cm×50cm の損傷を 10cm の誤差で発見した。このことにより、線電極式電場制御電流測定は、実用上十分の精度で漏水を検知できることを証明した。

- 1-1) 遮水シート上下の電場を制御した場合、遮水シートの損傷から 15m 離れた場所における信号比率は 86.5% となり、電流測定だけの漏水検知方法と比較して測定精度が高いと判断できる。すなわち、5m 間隔の線電極を等間隔に設置することにより、処分場上下の電場を十分制御できることが証明された。また、廃棄物処分場への埋立て進行に伴う埋立体積の増大と浸出水の電気伝導度の上昇も遮水シート上下の電場制御に悪影響はなく、漏水位置検知の性能は変化しないと考えられる。
- 1-2) 遮水シート上下に配置した線電極の交差部分 1 箇所は、4.2 節で示した点電極 1 箇所に相当する。これにより、広い面積を少数の電極でカバーできる。また、測定電極に接続するケーブルは、廃棄物に埋まらない部分に配線されるため、保守点検作業も常時可能である。
- 1-3) 線電極式電場制御電流測定は、 1cm^2 の漏水を検知できると考えられる。また、測定装置の検出限界に近い電流が流れる微小な漏水の場合には、漏水の位置的精度は、電極間隔の $1/2$ となると考えられる。
- 2) 処分場を区画に分けて線電極を分割すると、漏水を経由する電流の隣り合う区画に与える影響を低減できる。
- 3) 遮水シート上下の電場制御を行わない場合、漏水に関する信号比率が、遮水シートの上側について 74.40% であるのに対して、遮水シートの下側について 10.59% となる。これは、遮水シートの下側に設置した各線電極と遮水シートの漏水間の電気抵抗に大きな差がないためと考えられる。処分場への廃棄物埋立てが進み、埋立てボリュームと電気伝導度が上昇すると、遮水シート上側の信号比率が大きく低下する可能性があり、電流測定だけで漏水位置を検知することは困難となると考えられる。

6. 本研究の結論

6.1 各章で得られた結論

(1) 2章の結論

- a) ドレーン式漏水検知システムは、浸出水漏洩の量と水質から補修の緊急性を判断できる利点がある。しかし、漏水位置がゾーンでしかわからず、排水パイプやホースの閉塞状態が管理できず、システムの耐久性とメンテナンスに課題が残る。
- b) 鉍体流電法や電位傾度法など電気探査を応用した漏水検知システムは、遮水シートによって処分場内外が電氣的に遮断された条件であれば、高い精度で漏水を検知できる。しかし、土質材料の保護層が遮水シート上に設けられると、漏水位置を検知できない。また、点電極を用いる測定システムは、測定ケーブルの維持管理がむずかしく、処分場の供用期間 10 年～15 年の測定精度を保証できない。
- c) 電流測定による漏水検知システムは、廃棄物の埋め立て量が増加と電気伝導度の上昇に合わせて、漏水位置の検知精度が低下する。また、土質保護層が遮水シート上に設置されると、漏水位置が検知できない。点電極を用いる測定システムは、測定ケーブルの維持管理がむずかしく、処分場の供用期間 10 年～15 年の測定精度を保証できない。
- d) パルス法は、電極周辺の電気状態を一定に管理しなければ漏水を検知できず、また、電圧比率法は、複数の漏水を原理的に検知できない。これらの方法は、測定上の制約が多く、実用化のレベルまで研究が進んでいない。
- e) アコースティックエミッションなどその他の方法は、研究内容や施工実績についての報告がほとんどなされておらず、評価の対象とならない。

(2) 3章の結論

- a) 廃棄物処分場の電氣的構造は、処分場に敷設されている遮水シートと遮水シート上に設置される保護層によって決定される。
- b) 廃棄物処分場に敷設されている遮水シートには、EPDM などカーボン含有量が多いものがある。この種の遮水シートは、電気抵抗が小さく、全ての電氣的漏水検知システムにとって測定障害となる。
- c) 遮水シートの片側だけカーボン含有量を上げて、スパークテストをしやすくした製品がある。この製品が敷設された処分場に対して、カーボン含有量が高い面に電極を配置する漏水検知システムは漏水を検知できない。一方、遮水シートのカーボン含有量が低い面に電極を設ける電氣的漏水検知システムは、全接合部を完全に電氣的に絶縁すれば測定が可能となる。これは、理論上可能であるが、現実には無理がある。
- d) 土質材料などの保護層が斜面部にも全面的に設けられると、遮水シート上下を接続する回路が形成されるため、従来の電気探査を応用した漏水検知システムでは検知でき

なくなる。

- e) 電氣的漏水検知システムが機能するためには、廃棄物処分場の遮水シートにカーボン含有量 2 % 程度の HDPE, TPO, PVC などの遮水シートが敷設されていなければならない。これらの遮水シートであっても、シート片面のカーボン含有量を高めて導電性を持たせた製品は使用できない。

(3) 4 章の結論

筆者は、漏水検知システムの構成する新技術である「電場制御電流測定」と「補正電極」を開発した。筆者は、これらを組合わせて「点電極式電場制御電流測定」を開発した。これらの測定システムについて、水槽実験を行い以下の結論を得た。

- a) 処分場の遮水シート上下を短絡する保護層があっても、点電極式電場制御電流測定は、電流測定電極の測定結果を補正用電極の測定結果によって、保護層を経由して流れる電流の影響を補正できる。
 - a - 1) 従来の電氣的漏水検知システムと点電極式電場制御電流測定を比較すると、遮水シートの上下を短絡する保護層を経由して流れる電流の補正方法を有していることから、従来の漏水検知システムよりも優れている。
 - a - 2) 遮水シートの保護層に土質材料やコンクリートを経由して流れる電流の補正方法は、補正電極の電位と保護層と処分場外の接触部分の電位が一定であることに基づいているため、処分場の規模が変わっても普遍的に成立する。
- b) 廃棄物処分場における点電極式電場制御電流測定の漏水についての位置的精度は、相似則と水槽実験結果から、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水で $\pm 50\text{cm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$ の漏水で $\pm 100\text{cm}$ である。
- c) 点電極式電場制御電流測定の信号比率は、 $\phi 200\text{mm}$ の漏水に対して 99% で $\phi 100\text{mm}$ の漏水に対して 96% と高い。
- d) 鉗体流電法を応用したシステムは、導電性の保護層が存在すると漏水を検知できない。

(3) 5 章の結論

筆者は、漏水検知システムの構成する新技術である「電場制御電流測定」と「線電極」を開発した。筆者は、これらを組合わせて「線電極式電流測定」を開発した。この測定システムについて、土槽実験、処分場実験を行い以下の結論を得た。

- a) 遮水シートの上下に等間隔に電極を配置し、電極の設置方向を遮水シート上下で 90° 変えると、遮水シート上下の線電極の交差部分 1 ヶ所は、点電極 1 ヶ所と同様の機能を発揮する。また、遮水シート上下の電場を制御すると、漏水位置をさらに明確に検知できる。これにより、線電極式電場制御電流測定は、小数の電極で処分場全体をカバーできる経済性と、測定ケーブルを常時維持管理できる特性から、従来の電氣的漏水検知システムよりも優れていると結論付けられる。

- b) 線電極式電場制御電流測定の実定結果の傾向は、漏水部分周辺だけに大きな電流が測定され、漏水のない部分の実定電流は小さい。電場制御をしていない線電極式電流測定は、漏水を経由する電流に影響を受け処分場全体の実定電流が増大する。
- c) 線電極式電場制御電流測定と線電極式電流測定によって、処分場に敷設された遮水シートの損傷（100cm×50cm）を発見した。漏水位置の実定結果と漏水から 15m 離れた位置の実定結果を用いて計算した信号比率は、線電極式電場制御電流測定の場合 86.5%であるのに対し、電場制御がなされない場合は 10.59%であり、測定精度に約 8 倍の差がある。
- d) 線電極式電場制御電流測定は、廃棄物処分場の埋立てボリュームの増大と浸出水の電気伝導度の上昇による遮水シート上下の電場制御への悪影響はなく、漏水位置検知の性能に変化はないと考えられる。
- e) 遮水シート上下の電場は、5m 間隔の線電極で十分制御可能である。この電極間隔 5m であれば、処分場の規模にかかわらず測定原理が普遍的に成立する。
- f) 廃棄物処分場の長手方向に 1 本の線電極を設置するよりも、2 本もしくは 3 本に分割する方が、漏水を経由して流れる電流の影響を受けにくくすることができる。

6.2 全体としての結論

廃棄物処分場の電気的特性は、遮水シートと遮水シートの保護層の電気特性によって決定される。廃棄物処分場に敷設される遮水シートの種類の中で、カーボン含有量が高く電気を流すものがあり、電氣的漏水検知システムの測定障害となることが判明した。また、我国では少数であるが、遮水シートの上に土質材料やコンクリートを用いた保護層が設けられる例が耐久性と耐損傷性の面から今後増加すると考えられる。この種の保護層は、遮水シート上下が電氣的に短絡状態にするため、従来の電気探査を応用した電氣的漏水検知システムでは漏水を検知できない。

従来の漏水検知システムの問題点と廃棄物処分場の電気的構造を踏まえた上で、筆者は、新たな漏水検知システム「点電極式電場制御電流測定」と「線電極式電場制御電流測定」を開発した。廃棄物処分場は、それぞれ保護層など種々の特徴があるが、筆者が開発した2種類の漏水検知システムを適用すれば、遮水シートの漏水位置を高い精度で検知できる。

すなわち、点電極式電場制御電流測定と線電極式電場制御電流測定を表-6.1 のように使い分ければ全ての処分場の漏水検知が可能である。

ところで、廃棄物処分場の電気特性を踏まえた上で、電氣的漏水検知システムの開発にあたって以下に示す8項目の目標を立てた。

- ①100cm²の漏水個所が見つけられ、誤差範囲が±1mである。
- ②複数の漏水でも別々に検知できる。
- ③斜面部にも土質材料の保護層が設けられても漏水を検知できる。
- ④自然電流や高調波ノイズの影響を受けない。
- ⑤埋め立てられる廃棄物の電気特性によらず、漏水検知が可能である。
- ⑥測定に危険が伴わない。(感電事故などが発生しない。)
- ⑦測定システムのメンテナンスが容易にでき、20年間機能を保持できる。
- ⑧測定システムの構築コストが低廉である。

ここで、表-6.2 において、点電極式および線電極式の電場制御電流測定と既往の測定

表-6.1 点電極式および線電極式電場制御電流測定の使い分け

漏水検知システムの種類	処分場の特徴	効 果
点電極式電場制御電流測定	コンクリートや土質材料を保護層とした処分場 (今後増加すると考えられる処分場)	導電性の保護層があっても漏水位置を検知できる。
線電極式電場制御電流測定	不織布を保護層とした処分場 (日本の一般的な処分場)	少数の電極とケーブルで処分場全体をカバーでき、経済性と維持管理に優れ、20年の長期計測が可能である。

システムとの比較を、①測定精度 25 点、②複数の漏水 15 点、③土質材料の保護層 10 点、④ノイズの影響 5 点、⑤廃棄物の電気特性 5 点、⑥危険性 10 点、⑦維持管理 15 点、⑧コスト 15 点の 8 項目合計 100 点満点の評価で行う。上記配点において、測定精度、複数の漏水、維持管理、コストを重視し、これらの配点の合計は 85 点である。

この配点の中で、測定精度を 25 点満点としたが、これは、測定原理面における理論的裏付けが成り立っているかを評価するためである。各種電氣的漏水検知システムのなかには、測定原理が成り立つ保証がないものや必要とされる測定条件の制御メカニズムの研究が一切なされていないものがある。そこで、これらの漏水検知システムについては、評価を 0 点とした。

表－6.2 において、それぞれの漏水検知システムの総合評価を見ると、筆者が開発した線電極式電場制御電流測定が 88 点となり、求められる項目のうち土質材料の保護層への対処に問題を残す以外ほぼ完全に要求を満たしている。これに次いで筆者が開発した点電極式電場制御電流測定が 68 点となり、以下鉙体流電法 (53 点)、電位傾度法 (43 点)、パルス法 (33 点)、インピーダンス法 (10 点) の評価となった。

本研究の成果である電場制御電流測定は、電極構成により線電極式と点電極式に分かれる。線電極式は、③以外の全目標をほぼ満足する漏水検知システムである。一方、点電極式は、補正電極を併用することにより、土質材料などを用いた保護層が遮水シート上に設置された処分場でも漏水を検知でき、⑦⑧以外の全目標を十分満足する。既往の研究の中で、上記目標の中で③を満足するものはなく、⑦⑧を同時に満足するものもない。

表一6.1 主要な電氣的漏水位置検知システムの性能比較一覧表

比較項目	線電極式電場 制御電流測定	点電極式電場 制御電流測定	鉍体流電法	電位傾度法	インバータ法	パルス法
①測定精度	25/25	25/25	25/25	25/25	0/25	0/25
②複数の漏水	15/15	15/15	15/15	15/15	0/15	0/15
③土質材料の保護層	0/10	10/10	0/10	0/10	0/10	0/10
④ノイズの影響	5/5	5/5	0/5	0/5	0/5	5/5
⑤廃棄物の電気特性	3/5	3/5	3/5	3/5	0/5	3/5
⑥危険性	10/10	10/10	10/10	0/10	10/10	10/10
⑦維持管理	15/15	0/15	0/15	0/15	0/15	15/15
⑧コスト	15/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15
総合評価	88/100	68/100	53/100	43/100	10/100	33/100

次に、本研究を改めて電気探査の視点から評価する。

従来の電氣的漏水検知システムは、電気探査の応用技術が主流であり、電気探査の1応用分野と解釈することができる。電気探査や弾性波探査など探査技術は、基本的に地球内部の構造や地下資源の賦存状態を調査するための手法であるから、測定対象の大きさは10m～100m 単位の大きさである。一方、電氣的漏水検知システムを電気探査技術として見ると、10,000m² 規模の処分場に存在する大きさが 100cm² の漏水を検知する精密探査技術であると理解できる。

ここで、電気探査の測定対象である地盤について考えてみると、地盤は比抵抗が高い岩盤で構成されているが、電界の広がり半無限である。このため、地表に打込んだ2本の電極間抵抗は、電極の接触抵抗を除外すると理論上 0Ωとなる。したがって、電気探査として電流測定を行うと、全て同じ大きさの測定電流となるため、電流測定を原理とする手法はありえない。従来の電気探査は、この現象を克服するために、電極の接触抵抗が大きくとも正確に計測できる電極間の電位差を測定対象としている。

これらを踏まえると、本研究は電気探査技術として以下のように独創的かつ重要と再評価できる。

- a) 従来の電気探査は、全て電位測定を基本原理としているが、本研究は、電流測定を基本原理とする新たな電気探査方法である。
- b) 電流測定を基本原理とすることにより、電場制御を併用することが可能となり、複数の漏水に対して分解能が高い。電場を制御するとともに電流を測定する電気探査方法は、従来にない新たな電気探査方法である。

6.3 今後の課題

本論文は、線電極式電場制御電流測定を主に述べてきた。この電氣的漏水検知システムは、経済性や測定精度の面で現在最も優れた方法と考えられる。しかし、以下に示す課題が残されている。

- a) 線電極式電場制御電流測定の測定精度は、重機を使用した埋立て作業に伴って発生した 500cm×100cm の大きさの損傷について求めたが、
 - ①500cm×100cm よりも小さい損傷についての測定データ
 - ②5m 以上に埋立てられ条件の測定データ などを収集していく必要がある。
- b) 線電極式電場制御電流測定は、点電極式と比較して低廉なコストで測定システムを建設することが可能である。しかし、現状の線電極式電場制御電流測定は、電気を通す土質保護層がある条件で、機能しないと考えられる。今後は、線電極式電場制御電流測定に、保護層を経由して流れる電流の補正方法を確立する必要がある。

線電極式電場制御電流測定は、漏水原因となる遮水シートの損傷に関するデータが集まりつつあるとはいえ、まだまだ不十分である。遮水シートの損傷について、今回発見した損傷よりも小さい損傷について測定精度を把握する必要がある。また、処分場建設後 5 年～6 年経過した埋立て深さ 5m 以上の条件において、漏水検知の性能は、測定原理上から低下することはないと考えられるが、測定結果によって確認しておく必要がある。

ところで、一般のしゃ光マットと称する遮水シートの保護材と土質材料を比較すると、土質材料の方が耐久性に富むことは明白である。土質材料の保護層が設けられた廃棄物処分場に対しては、現状では点電極式電場制御電流測定しか対応できない。しかし、点電極は、測定ケーブルが廃棄物に埋まるため測定ケーブルのメンテナンスに課題が残ることと、電極数が線電極式よりも増えるため、システムの構築コストが増大する。そこで、線電極式電場制御電流測定で、土質材料の保護層を経由して流れる電流を補正できる技術開発が必要である。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、御多忙にも関わらず貴重な御助言を頂きました東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学科専攻（開発システム工学科）教授 大即信明先生ならびに開発システム工学科（土木工学コース）教授 太田秀樹先生に心より感謝の意を表します。本論文の審査をして頂きました国際開発工学専攻教授日野出洋文先生ならびに国際開発工学専攻（電気・情報）助教授高田潤一先生ならびに土木工学助教授神田学先生に深く感謝いたします。

また、共同研究者として数多くの御助言や資料を頂いただけでなく、計測機器の試作や実験に協力して頂いた坂田電気株式会社代表取締役社長 坂田文男氏をはじめ部長山崎宣悦氏、次長遠藤真一氏他多数の研究員の方々に厚く御礼申し上げます。

前田建設工業株式会社社内におきましても、本研究の機会を与えて頂いた歴代の土木設計部長である服部孝氏、布施勝氏、吉田洋二郎氏はじめ現在の部長である高森貞彦氏に深く感謝します。また、直属の上司であるとともに大学の先輩でもある部長北川滋樹氏、副部長梨本裕氏、副部長近江氏には、研究ばかりでなく様々な面で御尽力いただきました。ここに御礼申し上げます。さらに、同時期に土木設計部内に在籍した諸先輩諸氏や後輩諸氏に常に御声援頂きましたことに感謝いたします。