

[資 料]

模型地盤を用いた電気探査法の環境調査への適用方法に関する研究

佐坂公規

1 はじめに

土壌・地下水汚染機構の解明には、汚染物質の濃度分布に加え、汚染の場(水理地質構造など)の把握が必要になる。この場合、通常はボーリング調査が用いられるが、作業性やコストだけでなく難透水層の破壊による汚染拡大の防止という見地から、掘削地点の数には限りが生じる。それゆえ今後は環境調査における非破壊的な調査手法の重要性も高まることが予想される。

電気探査法は、主に資源探査分野で発展してきた非破壊的な調査手法であり、近年は土壌・地下水汚染など環境分野にも適用されつつある¹⁾。しかし、地盤の比抵抗に影響を及ぼす多様な要因やこれらが複合して及ぼす定量的な影響が明らかにされていない等²⁾、汚染現場における探査結果の解釈や適用限界に向けた検討が不十分であり、現状では実用手法として確立していない。また、実際の汚染調査に電気探査法を適用する場合、汚染物質が地盤の比抵抗に及ぼす影響について定量的に議論する必要があるが、こうした検討はサイトプロブレムへの適用事例^{3), 4), 5)}に比べると非常に少ない⁶⁾。

このような観点から、本研究では測定条件を定量的に制御できる測定サンブラ及び模型地盤を用いた実験手法により、地盤の比抵抗に影響を与える因子や電気探査による汚染物質の検出可能性について基礎的な検討を行った。

2 実験方法

2.1 土質試料の比抵抗測定

種々の因子が地盤比抵抗に及ぼす影響について定量的な検討を行う場合、実用上の関心は「複数の因子を同時に取り上げた場合、何が比抵抗変化により大きな影響を及ぼしているか」であると思われる。そこで、地盤の比抵抗に影響を与える因子として、①試料混合比(砂:角礫)、②間隙水の塩分濃度、③粘土鉱物添加量を取り上げ、実験計画法の一つであるラテン方格法を適用した土質試料の比抵抗測定を行った。ここで、①～③はそれぞれ試料の間隙率、間隙水の比抵抗及び粘土鉱物含有量という因子に対応している。

試料には乾燥した砂(φ:2mm程度)及び角礫(φ:15mm程度)を用い、添加用粘土鉱物としてベントナイトを使用した。間隙水は塩化ナトリウムを精製水に溶かして調製した。

測定系は、①通電するための送信部、②電位差を測定する信号調整部、③抵抗値を算出する演算部及び④サンブラ

から構成される。測定サンブラは図1に示すように縦84mm、横150mm、深さ84mmの箱型で、両端に電流電極、内側に電位電極を配置したものを製作した。

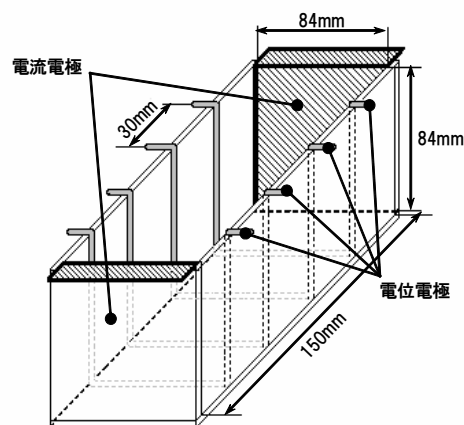


図1 測定サンブラの構造

測定には、実際のフィールド調査で利用する周期1.6秒の交替直流を用い、電流値 I (mA)及び測定区間に生じた電位差 V (mV)から、式(1)により比抵抗 ρ (Ωm)を算出した。

$$\rho = \frac{VS}{IL} \quad (1)$$

ここに、 S は試料断面積(m^2)、 L は測定区間長(m)である。表1に示すように①～③の各因子に3水準を設定し、温度一定の条件下で測定を行った。

表1 測定に用いた因子及び水準

要因\水準	1	2	3
試料混合比(砂:角礫)	4:1	1:1	1:4
間隙水の塩分濃度(mol/L)	0.005	0.05	0.5
粘土鉱物添加量(g)	0	18	36

2.2 汚染地下水及び汚染土の比抵抗測定

汚染に伴う地下水や土の比抵抗変化、言い換えれば電気探査による土壌・地下水汚染の検出可能性について検討するため、汚染地下水及び汚染土の比抵抗測定を行った。

地下水試料にはエビアン[ミネラルウォーター]を使用し、表2に示す各物質を溶解し、各種濃度の汚染地下水を調製した。

一方、土試料には砂(φ:2mm程度)を用い、間隙水にはエビアンを使用した。汚染物質には軽油を用い、含水比一

表2 比抵抗測定に用いた汚染物質

無機陰イオン	亜硝酸性窒素 (NO ₂ ⁻), 硝酸性窒素 (NO ₃ ⁻)
軽質非水相液体 (LNAPL)	ベンゼン, 灯油
重質非水相液体 (DNAPL)	ジクロロメタン, トリクロロエチレン, テトラクロロエチレン

定の土試料に混合して軽油添加率の異なる汚染土試料を数種(1、2、5、10%)調製した。軽油添加率は、式(2)のように砂試料の乾燥質量に対する軽油の質量比とした。

$$\text{軽油添加率 (\%)} = \frac{\text{軽油の質量 (g)}}{\text{砂試料の乾燥質量 (g)}} \times 100 \quad (2)$$

測定方法及び比抵抗の算出方法については、地下水、土試料とも2.1節と同様である。

2.3 模型地盤を用いた比抵抗測定

前節の結果を踏まえ、空間的な拡がりをもった汚染範囲が電気探査で得られる見掛け比抵抗断面にどのように反映されるかについて検討するため、検討対象を模型地盤に拡張して比抵抗測定を行った。実験に用いた模型地盤は均質な砂質土の中央部に軽油による汚染域を設けたものであり、その概略的な構造を図2に示す。

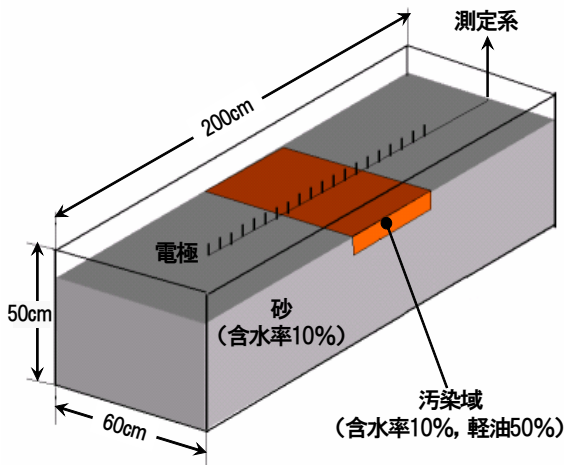


図2 実験用模型地盤の模式図

測線は模型地盤の長辺方向に汚染域を横切る形で設定し、電極間隔5cm、最大電極隔離係数1としてダイポール・ダイポール電極配置を用いた測定を行った。

3 結果及び考察

3.1 地盤比抵抗に影響を与える因子

土質試料の比抵抗測定結果からすべての要因変動と自由度を求め、分散分析を行った結果を表3に示す。

間隙水の塩分濃度の効果は1%水準で有意であり、塩分濃度の増加に伴う比抵抗の低下が認められた。間隙水の比抵抗が地盤の比抵抗に大きな影響を及ぼすという知見は早い時期から出されており、今回の結果はこれを追認するものとなった⁷⁾。一方、試料混合比及び粘土鉱物添加に伴う効果については有意差が認められなかった。とりわけ、粘土鉱

物添加における効果は残差変動に吸収される程度であり、比抵抗への影響はないと考えられる。

表3 分散分析表

要因	試料混合比	間隙水の塩分濃度	粘土鉱物添加量	残差	計
変動	27.08	3954.46	1.64	14.16	3997.34
自由度	2	2	2	2	8
分散	13.54	1977.23	0.82	7.08	—
F値	1.91	279.18	0.12	—	—
判定		**			
備考	F ₂ ² =19.00 (5%), 99.01 (1%)				

3.2 汚染に伴う地下水及び土質の比抵抗変化

汚染地下水の測定結果の一例を図3に示す。亜硝酸イオンによる汚染では、地下水環境基準(10mg/L)を超える領域において急激な汚染地下水の比抵抗の低下が見られ、この傾向は硝酸イオンによる汚染においても同様であった。未汚染の地下水(エビアン)と比較した場合、地下水環境基準の数十倍の濃度で10Ωm程度の比抵抗差が生じており、このレベルの汚染は電気探査で検出可能と思われる。一方、ベンゼンやテトラクロロエチレンによる汚染では、濃度と無関係に模擬汚染地下水はほぼ一定の比抵抗を示すことから、電気探査による汚染の検出は困難と思われる。

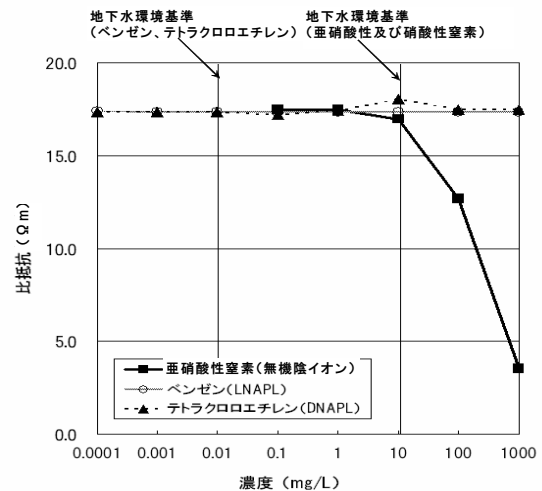


図3 汚染物質濃度と模擬汚染地下水の比抵抗

また、汚染土試料の軽油添加率と比抵抗との関係を図4に示した。各試料とも2%までは軽油添加率の増加に伴う比抵抗低下が見られたが、5~10%では含水比10%の試料を除いて比抵抗はほぼ横ばいに推移した。

軽油添加率5~10%において、含水比5%及び20%の試料では比抵抗変化が見られない理由を同一と仮定すると、含水比10%の試料を用いた場合の比抵抗低下を説明することができない。それゆえ含水比5%と20%の試料とでは比抵抗が横ばいに推移する原因は異なると考えられる。

汚染物質を含まない含水比5%の試料は約30%の空隙を有する。添加した軽油の大部分は空隙の中に入り込むと予想されるが、空隙を満たす媒質は絶縁性のままであり、試料全体としては比抵抗に大きな変化は生じないと考えられる。

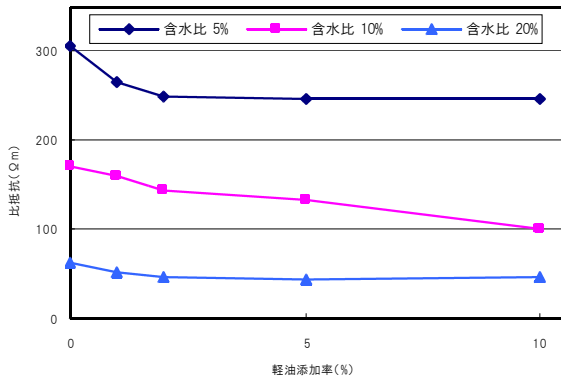


図4 試料の軽油含有量と比抵抗の関係

また、汚染物質を含まない含水比20%の試料は10%強の空隙を有し、添加した軽油は残存した空隙に入り込むか、あるいは間隙水を押し出して土粒子の間隙内に留まると予想される。しかしながら、この程度の軽油添加量では間隙水分布の連続性を絶つまでには至らず、試料の比抵抗にはほとんど変化が生じないと考えられる。

一方、含水比10%の未汚染試料は20%強の空隙を有し、添加した軽油はこれらと同様の挙動を示すと予想される。しかし、実際には含水比20%のケースで考えたような間隙水の押し出しが生じることで間隙水分布に新たな連続性が形成され、試料の比抵抗が低下したと考えられる。

3.3 模型地盤による実験結果

軽油による汚染域を設ける前後の比抵抗構造断面を図5に示す。全体的には試料の比抵抗よりも高めの比抵抗分布が得られたが、高比抵抗異常領域の位置・形状は作製した汚染域のそれと調和的であり、かつ未汚染域と明確に区別可能であった。このように汚染の有無による地盤の比抵抗コントラストが明確なケースでは、電気探査法の汚染源探査への適用が可能と思われる。

なお、今回の模型地盤による実験は、限られた設定条件についてしか実施できなかったが、使用した模型は実地盤のスケールモデルとして十分機能することが確認できた。

4 まとめ

本研究では、比抵抗断面を高精度で解釈する方法を確立するため、地盤比抵抗に影響を与える因子の基礎的検討を行うとともに、測定サンプリングや模型地盤等を用いた比抵抗測定を行い、電気探査法の環境調査への適用性について検討した。その結果、以下のような知見が得られた。

- ① 試料の間隙率、間隙水の比抵抗及び粘土鉱物含有量を因子とした土質試料の比抵抗測定では、間隙水の比抵抗による影響が支配的であった。
- ② 汚染地下水試料の比抵抗測定では、イオン系物質による汚染コントラストの把握可能性が示唆されたが、非水相液体 (NAPLs) への適用については否定的な結果が得られた。
- ③ 軽油汚染土試料の比抵抗測定では、土粒子間隙の状

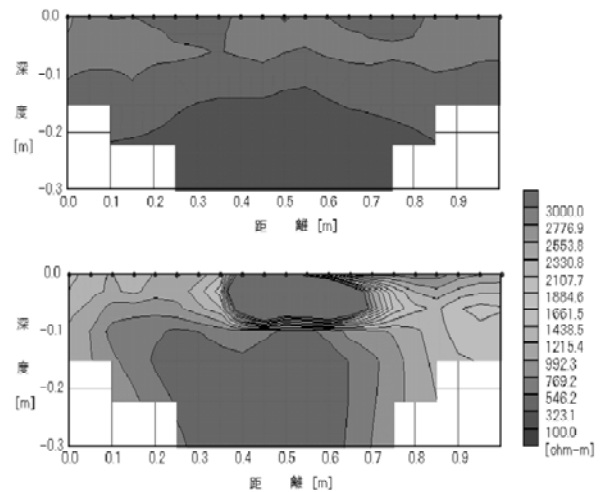


図5 模型地盤の比抵抗構造断面図
(上:汚染域を設ける前、下:汚染域[白枠]を設けた後)

況も比抵抗変化の一因を担うことが示唆された。

- ④ 模型地盤を用いた電気探査では、作製した軽油汚染域の位置・形状と調和的な高比抵抗領域が観測された。この結果は、汚染の有無が明確な比抵抗差として検出される他のケースにおいても同様と思われる。

模型地盤を用いた比抵抗測定では、比抵抗に影響を与える因子や汚染物質による影響の制御が可能であり、検討を行う上で非常に有効であった。今後、フィールドで得られる比抵抗断面の解釈方法を一般化していくためには、こうした諸要因による影響の定量性について検討を進めるとともに、模型地盤を用いて2・3次元的地盤構造による影響等についても検討していく予定である。

文献

- 1) 地盤工学会 土壌・地下水汚染の調査・予測・対策編集委員会(2002)土壌・地下水汚染の調査・予測・対策, 地盤工学会, 271.
- 2) 朴三奎, 藤原寛, 朴美京, 松井保(1999) 土の比抵抗に関する基礎的研究, 物理探査, Vol.52, No.4, 299-306.
- 3) Yang C. H., You J. I. (1999) High resistivities associated with an LNAPL plume imaged by geoelectrical tomography, 69th Ann. Internat. Mtg. Soc. of Expl. Geophys., 469-472.
- 4) 斎藤光義, 石川秀浩, 三宅西作, 田熊康秀(2002) 旧油槽設備跡地における油汚染土壌評価への比抵抗調査の適用について, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第8回講演集, 161-162.
- 5) 河村茂樹, 西田道夫, 佐坂公規, 八戸昭一, 高橋基之(2003) 土壌・地下水汚染調査における物理探査の適用性(その1) - 工場跡地における物理探査 -, 物理探査学会第108回(平成15年度春季)学術講演会講演論文集, 181-184.
- 6) 岩崎智治, 西田道夫, 荻野晃平, 笠水上光博, 藤田崇(1993) 比抵抗法による地下水汚染物質(TCE・PCE)探知の可能性について, 日本地下水学会1993年秋季講演会要旨, 104-110.
- 7) ARCHIE, G. E.(1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. Am. Inst. Mech. Eng., Vol.146, 54-62.