

(財)日本地下水理化学研究所コーナー

空気吸引不飽和カラム試験による 水・油・空気3相系透過性試験装置の開発

棚橋 秀行*・佐藤 健**

1. 本研究の目的

わが国の地下水・土壌汚染問題は全国的な拡がりを見せ、もはや数十年前の研究テーマ的な特殊な問題ではなく、現場で浄化を行う実務者はもとより、住民にいたるまで日々直面するものとなってきている。抜本的な問題解決は汚染を引き起こさないことに尽きるが、現存する地下水・土壌汚染をいかに迅速に浄化するかも早急な課題である。

本研究は、油による汚染現場を想定し、油の土中での挙動を追跡するための物性値を求めるため、空気吸引不飽和カラム試験による水・油・空気3相系透過性試験装置の開発を行うものである。

従来、飽和度100%での透水・透油・透気係数のみを実験で求め、不飽和での水・油・空気の相対透過度を水分保持特性曲線の形状から算出する方法が良く用いられている¹⁾。これに対し、直接測定を行なう方法も Scheidegger²⁾によって複数紹介されているが多くのものはその試験方法・制御が複雑である。本研究ではなるべく簡便に、計測可能な実験装置の開発を目指した。

2. 装置の試作

2.1 実験装置の試作と試験方法

まず試作した装置から紹介する。図2-1の実験装置の中央部の透明アクリル製円筒カラム(内径 $\phi=6.0\text{cm}$)に土試料を充填する。水、油(この時点では灯油)をポンプから汲み上げ土試料に散布する。真空ポンプで吸引しながら、流れを定常化させる。吸引を行うのは、カラム内の3相飽和度鉛直分布を均一にするための操作である。

定常後、単位時間当たりの水分流量・油分流量・空気流量を測り、マンメータの水位の差から、空気吸引圧を測定する。その後、カラムを分解し

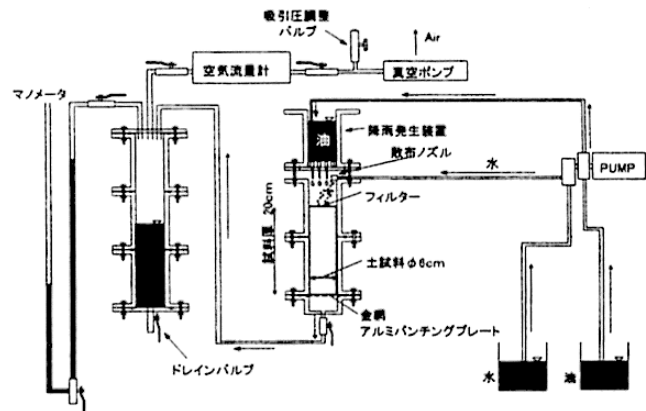


図2-1 試作した実験装置

飽和度分布を測定した。

2.2 透水・透油・透気係数の求め方

この装置では空気の吸引を行っているため、図2-2(a)~(d)のようにして圧力水頭を同定する手法を考案した。実験後のカラムを分解したとき、図2-2(a)のような水分分布になっていたとする。例として $S_{r,AVE}=70\%$ だとする。このときの空気圧がカラム上端で P_{aT} 、下端で P_{aB} であったとする。 P_{aT} は大気圧であるのでゼロであり、 P_{aB} は図2-2(b)のマンメータの高さ Δh_a より求めることができる。図2-2(c)は実験を行った土試料の水分保持特性曲線で、 $S_{r,AVE}=70\%$ でのサクシオンが h であったとする。ここで、空気吸引カラムでは飽和度が鉛直方向にほぼ均一であることから、カラム全体でおおよそサクシオンは h であると考えるのがこの方法のポイントである。

この考えかたに基づくと図2-2(d)を描くことができる。図2-2(d)は空気の圧力水頭 h_a と水の圧力水頭 h_w の分布である。空気圧 $0 \sim \Delta h_a$ の分布にサクシオン h を加えることで、水の圧力水頭 h_w が求められる。

*たなはし ひでゆき・大同工業大学工学部都市環境デザイン学科、**さとう たけし・岐阜大学工学部社会基盤工学科

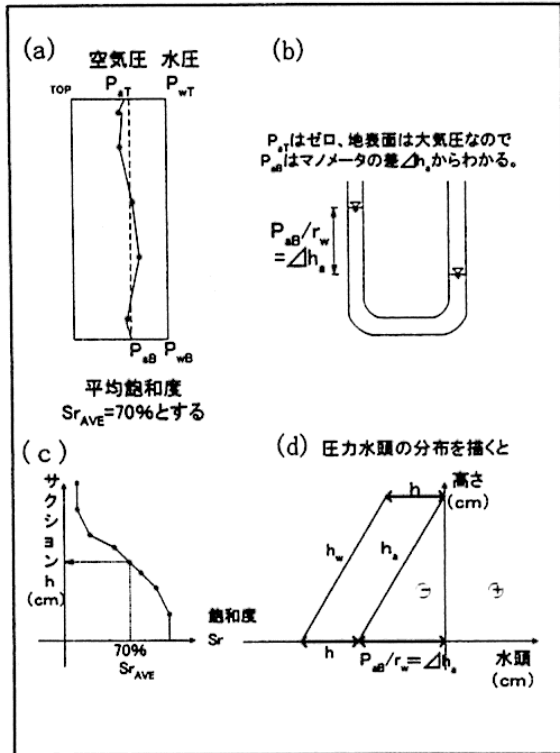


図 2-2 空気吸引状態下での透水係数の計算における圧力水頭の考え方

(a) 透水係数の求め方

図 2-2 (d) においてカラムの高さを z とすると、水の動水勾配は $i_w = \{(z-h) + (h + \Delta h_a)\} / z = (z + \Delta h_a) / z$ 、として求めることができる。水のダルシー流速が v_w であったとすると、ダルシーの法則 ($v_w = k_w \times i_w$) より、透水係数は、 k_w は、 $k_w = v_w / i_w = v_w \times z / (z + \Delta h_a)$ として算出することができる。

(b) 透油係数の求め方

上述の透水係数の計算と同様に考えると、油の動油勾配は $i_{oil} = \{(z-h) + (h + \Delta h_a)\} / z = (z + \Delta h_a) / z$ 、として求めることができる。油のダルシー流速が v_{oil} であったとすると、ダルシーの法則 ($v_{oil} = k_{oil} \times i_{oil}$) より、透油係数 k_{oil} は、 $k_{oil} = v_{oil} / i_{oil} = v_{oil} \times z / (z + \Delta h_a)$ として算出することができる。

(c) 透気係数の求め方

透水係数・透油係数の計算と異なり、空気には位置水頭 z を考慮しないため、動気勾配は $i_a = (P_{ab} / r_w) / z = \Delta h_a / z$ として求めることができる。空気のダルシー流速が v_a であったとすると、ダルシ

一の法則 ($v_a = k_a \times i_a$) より、透気係数 k_a は $k_a = v_a / i_a = v_a \times z / \Delta h_a$ として算出することができる。

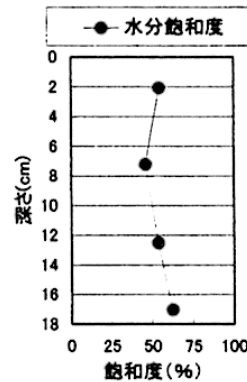


図 2-3 2相系飽和度分布(水・空気) ガラスビーズ 0.2mm

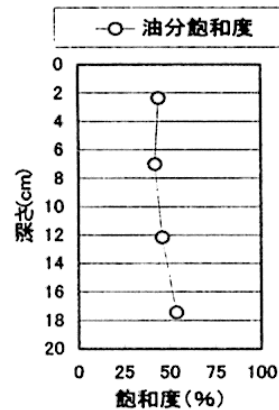


図 2-4 2相系飽和度分布 (油・空気) ガラスビーズ 0.2mm

2.3 飽和度分布に関する実験結果

実験結果を図 2-3~2-6 に示す。灯油を用いた実験において、均一な飽和度分布を得ることに成功した。

0.2mm のガラスビーズを高さ $Z = 20\text{cm}$ に充填し、吸引圧 = 60cm で通水実験を行った。その後、カラムを分解し飽和度分布を測定した結果、図 2-3 に示すように、鉛直方向に均一な飽和度分布が得られた。平均すると水分飽和度 54.0% となった。

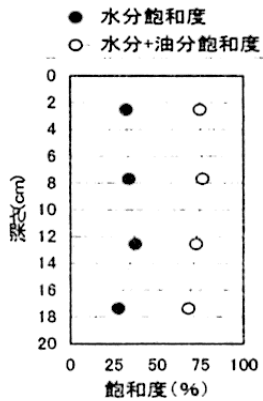


図 2-5 3相系飽和度分布(水・油・空気)
ガラスビーズ 0.2 mm

0.2mm のガラスビーズを高さ Z=20cm で充填し、吸引圧=60cm で灯油のみでの実験を行った結果を図 2-4 に示す。鉛直方向に均一な飽和度分布が得られた。平均すると油分飽和度 46.4%となった。

0.2mm のガラスビーズを高さ Z=20cm で充填し、吸引圧=50cm で 3 相系実験を行った結果、図 2-5 に示すように、鉛直方向に均一な飽和度分布が得られた。平均すると水分飽和度 32.7%、油分飽和度 40.3%となった。

図 2-1 の実験装置の注射針の先端をつぶした散布ノズルにより、液体を満遍なく散布させ、空気の吸引により均一な鉛直飽和度分布を作成することに成功した。ただし、この装置では粘性の低い(灯油のような)液体しか散布できないという問題があった。

3. 空気吸引不飽和カラム試験による水・油・空気 3 相系透過性試験装置の開発

3.1 水・油の散布方法の改良

灯油よりも粘性の高いエンジンオイルに着目し、2. の装置を用いて予備実験を行ってみたが、エンジンオイルが「だま」となって落ちてしまい、うまく散布できなかった。そこで、粘性の高いエンジンオイルでも実験ができるよう、以下のような装置の改良を行った。

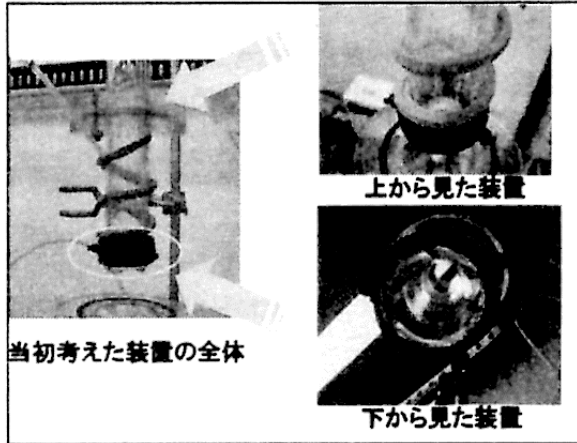


写真 3-1 考案した油散布法

粘性の高いエンジンオイルを満遍なく散布するため、写真 3-1 に示したような方法を考案した。アイデアは、らせん状に水と油を流して混ぜながら落とす点であった。実験を行ったところ、途中までは水と油はうまく混ざりながら流れていたが、装置の下端から滴り落ちる場所が同じところにばかりになってしまい、土試料表面に満遍なく落とすことが難しかった。

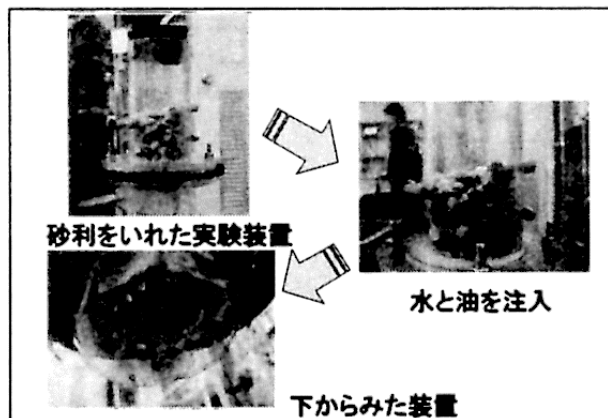


写真 3-2 改良した油の散布法

そこで、写真 3-2 に示したように、砂利を入れたカラムにいったん水と油を通すことで散らし、下端ののこぎりの歯のようなガイドの頂点から滴らせることで同じ位置にばかり滴下しないようにする装置を考案した。当初、粒径 1mm のガラス

ビーズで試してみたが、密度が高く油がうまく落ちず失敗であった。粒径が 5mm 前後の砂利をいれて実験したところ水と油がうまく具合に混ざり、少ない流量の場合でも満遍なく落とすことに成功したので、この方法を採用することにした。

3.2 試験装置 VER.1 による予備実験

図 3-1 に示すのが、試験装置 VER.1 である。今回、着目する油がエンジンオイルになり、粘性が高くなったため、水とエンジンオイルを土に浸透させるため空気吸引に要する圧力が大きくなり従来のマンメータの水頭差では測定できなくなったので、圧力計・アンプ・デジタル表示部で構成される測定部を導入した。

この装置を用いて予備実験を行った。散布中の水・油のメスシリンダーで測定した体積・空気流量などを記録したものが表 3-1 である。

散布を終了した後、カラムを 4 つに分解し飽和度分布を測定した。油の土粒子に対する付着性が高くなったためエマルジョンブレイクという操作を行った。エマルジョンブレイクとは、土粒子に付着した油を界面活性剤で洗浄した際に生成される乳化液を水分・油分に分離する操作である。乳化液をメスシリンダーへ移し、NaCl を入れて攪拌し、煮沸する。それによりメスシリンダー内の乳化液が油相と水相に分かれるが、この油相には界面活性剤が混ざった状態になるので、さらにエタノールを入れ煮沸する。しばらくすると油相から界面活性剤が水相に移動する。これにより、油のみが抽出されるので、その量を測定する。その他、水分質量などを求めて水分・油分の飽和度分布を求めた。

4 つに分解したカラムのサンプルから、1 つを代表として飽和度、透気・透水・透油係数を算出した結果が表 3-2 である

この予備実験結果で分析までの実験手法の見通しがたった。しかし新たな問題が生じたため、次節以降のような改良を行うことにした。

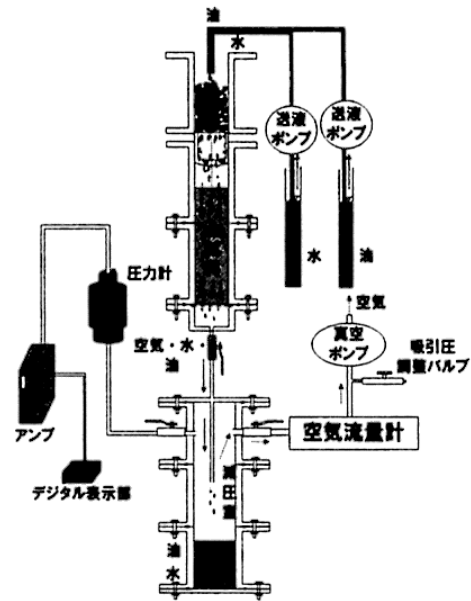


図 3-1 空気吸引不飽和カラム試験による水・油・空気 3 相系透過性試験装置 VER.1

表 3-1 予備実験データ その 1

	水の量 (ml)	油の量 (ml)	吸引圧 (cmH ₂ O)	空気流量 (l/min)
開始時	36	32	-201	0.23
1時間後	18	17	-148	1.22

表 3-2 予備実験データ その 2

	水	油	空気
飽和度	20.05%	43.06%	36.88%
透水係数	0.0013191	0.001099	6.126

単位 (cm/min)

3.3 空気流量計の設置箇所の改善 (試験装置 VER.2)

図 3-1 の空気流量計の位置だと、流量計の流入側も流出側も減圧下であるため、空気の体積が膨張した状態で流量を測定しているのではないかと、という問題が生じた。

そこで、図 3-2 のように新たに流量計を加えて 2 つにするとともに、流量計の片方が大気圧であるような配置に変更した。図 3-2 の <空気流量計 OUT> で計った流量から、<空気流量計 IN> で計った流量を減算することで精度を向上させた。

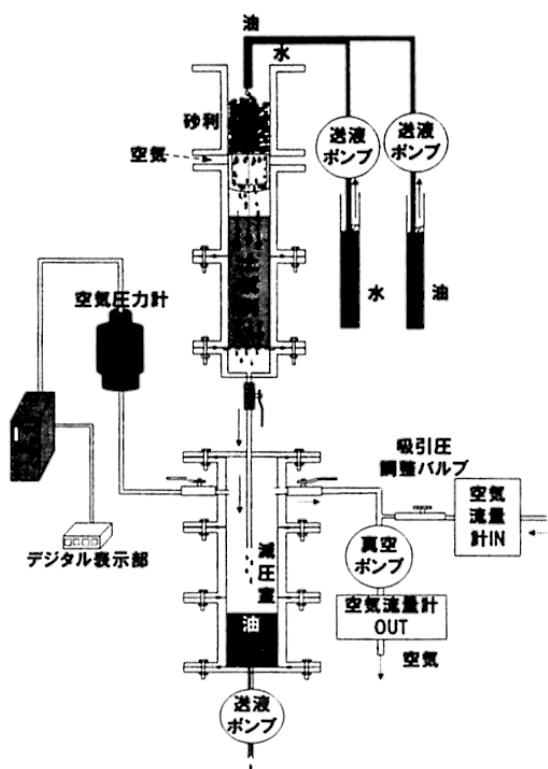


図 3-2 空気吸引不飽和カラム試験による水・油・空気 3 相系透過性試験装置 VER.2

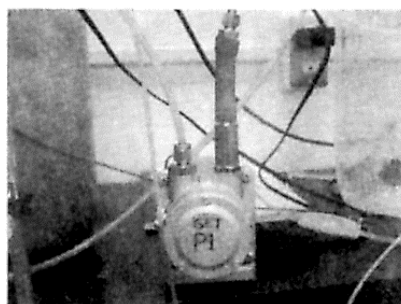


写真 3-4 真空ポンプ排気側の熱についての解決

これと同時に、以下の 2 つの問題点をクリアした。

問題点-1 真空ポンプの排気側は熱を持った空気が出てくるため、実験を開始して数時間で排気管の金属部にセットしたチューブがやわらかくなる。そのため折れ曲がったり、裂けたりしてしまうと

いう問題が発生した。そこで、**写真 3-4** のように市販のガスホースを利用したところ、問題点が解決できた。

問題点-2 真空ポンプの排気側から出てきた温められた空気が室温によって冷やされて、**図 3-2** の <空気流量計 OUT> の中に結露した水がたまってしまふという問題が発生した。これによって装置が破損してしまった。この問題は流量を計測しない間は**写真 3-5a**) のように空気を放出し、流量を計測する時にだけ**写真 3-5b**) のように流量計に空気を通すという手段を用いることで解決した。

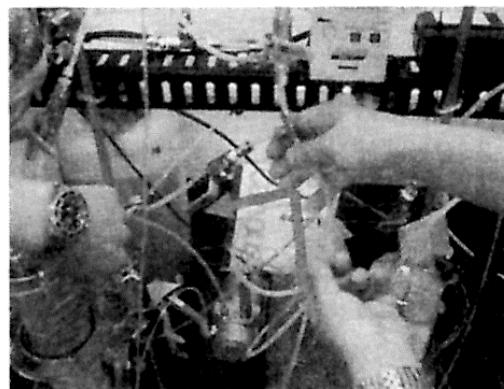


写真 3-5a) 冷却空気の結露問題について (空気の放出)

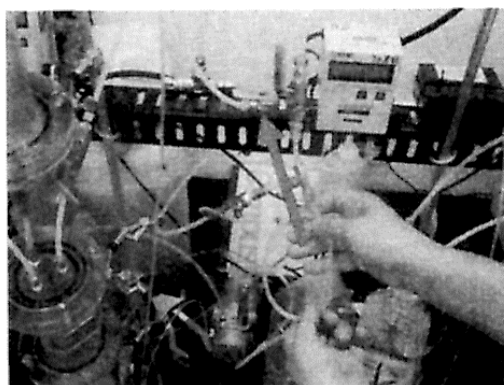


写真 3-5 b) 冷却空気の結露問題について (空気流量の測定)

ここまでの装置を**試験装置 VER.2** と名づけたが、検討の結果まだ次節に示すような改良が必要であった。

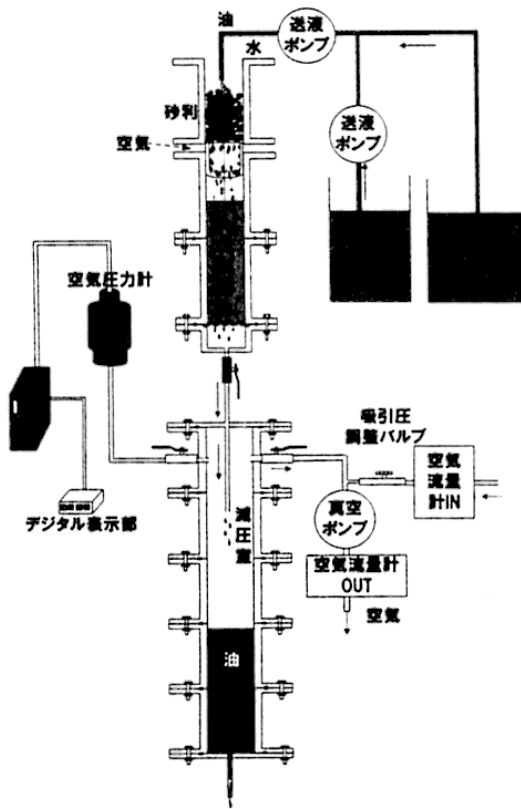


図 3-3 空気吸引不飽和カラム試験による水・油・空気 3 相系透過性試験装置 VER.3

3.4 水と油のパイプの接続順序・その他の改善 (試験装置 VER.3)

試験装置 VER.2 までは、水と油を別々に 2 台の送液ポンプで実験を行っていた。しかし送液ポンプの構造がゴムチューブをしごくものであり、エンジンオイルがゴムに滲みると空すべりはじめ、流量がだんだん小さくなってしまふ欠点があった。

そこで、図 3-3 のように水のラインにエンジンオイルを合流させるような送液ポンプの配置に変更した。このアイデアにより、エンジンオイルに水が混ざるので、ゴムの性能の劣化を防ぐことができ、問題を解決することができた。また、合流前に水側にある送液ポンプによって水の流量を調節し、合流後にある送液ポンプによって全体の流量をコントロールすることができるようになった。観察していると、写真 3-6 中央の Y 字部分で水と

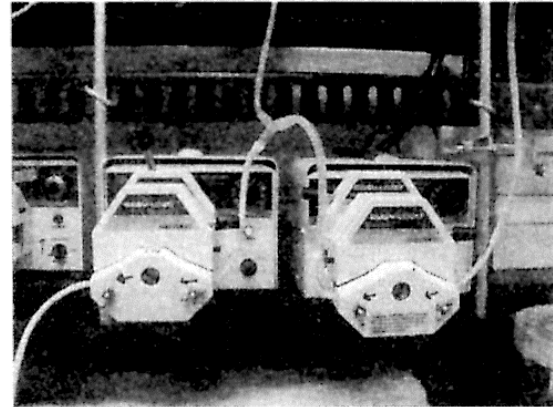


写真 3-6 送液ポンプの写真

エンジンオイルが均等に混ざっている様子が確認できた。

また、試験装置 VER.3 では水とエンジンオイルをメスシリンダーからではなく、18L タンクから送るように変更し、長時間の実験を可能にした。それぞれの流量は、1 日流し続けた後、翌日、図 3-3 の砂利の高さの位置で 30 分間メスシリンダーに受け、水とエンジンオイルの 1 分当たりの流量を求めるようにした。

さらに、従来の減圧室の底からポンプで廃液を排出する方法では、ポンプに支障があった場合に、減圧室に大量の水とエンジンオイルが溜まってしまい、最悪の場合、真空ポンプや空気流量計に流れ込んで器具を破損してしまう事が考えられた。その点を図 3-3 の試験装置 VER.3 のように減圧室のカラム数をふやすことによって許容量を増やし、克服した。

上記のような改良の結果、図 3-3 の試験装置 VER.3 を完成させた。以下に、この装置による水・油・空気の透過特性を示す。

4. 実験結果と考察

4.1 飽和度分布

図 4-1 に示したのは、豊浦標準砂とエンジンオイルの組み合わせで行った、実験の飽和度分布の一例である。空気吸引によってカラム下端のエンドエフェクトを排し、ほぼ均一な飽和度分布の流れ場を形成することができた。

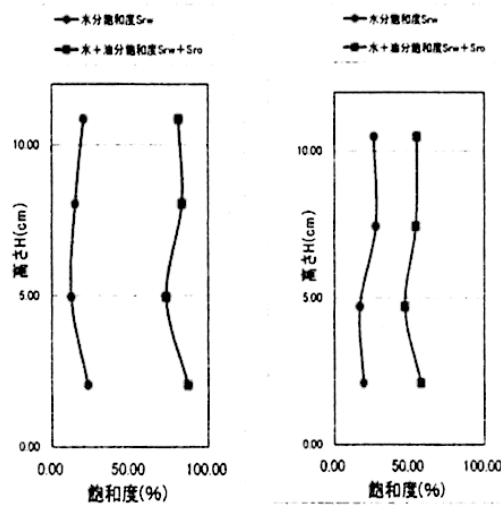


図 4-1 3 相系飽和度分布
 左:実験 EX041202-R 右:実験 EX041202-L
 (図 4-3 参照)

4.2 実験結果と計算結果の比較

任意の飽和度での透水係数・透油係数・透気係数は

$k_w = k_{sw} k_{rw}$ $k_{oil} = k_{soil} k_{roil}$ $k_{air} = k_{sair} k_{ra}$
 である。添え字 s は飽和度 100% での透水・透油・透気係数で実験から直接求める。添え字 r のあるものは水・油・空気の相対透過度であり、van Genuchten モデル³⁾を拡張した式はそれぞれ以下の式(1)~(3)ようになる。

$$k_{rw} = s_{we}^{-\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{s_{we}^m} \right)^m \right]^2 \quad (1)$$

$$k_{ro} = \left(\frac{s_{te} - s_{we}}{s_{te} - s_{we}} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(1 - \frac{1}{s_{we}^m} \right)^m - \left(1 - \frac{1}{s_{te}^m} \right)^m \right]^2 \quad (2)$$

$$k_{ra} = \left(1 - \frac{1}{s_{te}^m} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{1}{s_{te}^m} \right)^{2m} \quad (3)$$

ここで、 s_{we} は水の有効飽和度、 s_{te} は水と油の総有効飽和度である。m は水分保持特性曲線の形状より求められるパラメータである。

この式をもとにし、油を灯油あるいはエンジンオイルとした実験の飽和度 100% での透水・透油・透気係数と、各吸引実験ケースでの水・油・空気の飽和度を入力し、得られた不飽和透水係数・透油係数・透気係数の計算値が、実験より求められた不飽和透水係数・透油係数・透気係数の実験値をどこまで再現できるのかを検討してみることにした。

図 4-2 に灯油、図 4-3 にエンジンオイルについて計算値と実験値の比較を整理した結果を示す。図 4-3 の横軸は実験のケースの記号であるが、これらはすべて水・油・空気 3 相系の実験である。灯油を用いて行った実験では、プロットを見ればわかるように、透水・透油・透気係数のすべてにおいて実験結果 (●◆■) と計算結果 (○◇□) がよく一致している。

これに対し、エンジンオイルについて行った実験では、透水係数のみが計算結果 (○) よりも実験結果 (●) のほうが小さくなっている。これは、透過性の悪いエンジンオイルによって水の流れが阻害されたためであることは実験から明白である。共存する流体の透過性が影響しない式で構成される従来の計算では、この現象が反映されないことを示す興味深い結果が得られた。

4.3 実験装置で見出された問題点

今年の装置で水と灯油を用いた実験を 2 日間にわたって行なってみたところ、エンジンオイルでは起こらなかった問題点が発生した。



写真 4-1 ゴムチューブから灯油がしみ出す様子

写真 4-1 のように、ゴムチューブの厚みを超えて灯油がしみ出してしまい、チューブをうまくしごげずに滑ってしまった。その結果、灯油が送液されず、水だけの散布になってしまった。

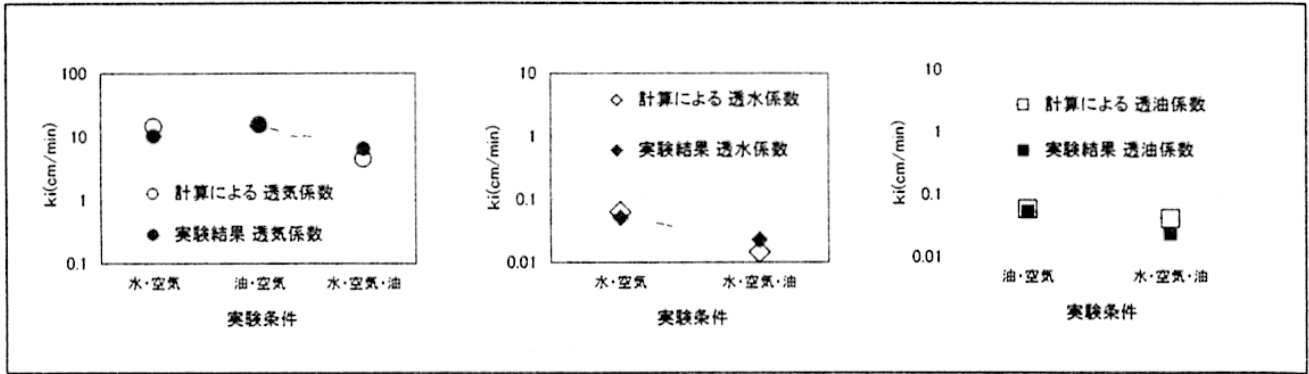


図 4-2 ガラスビーズ 0.2mm と灯油による実験結果と計算結果の比較

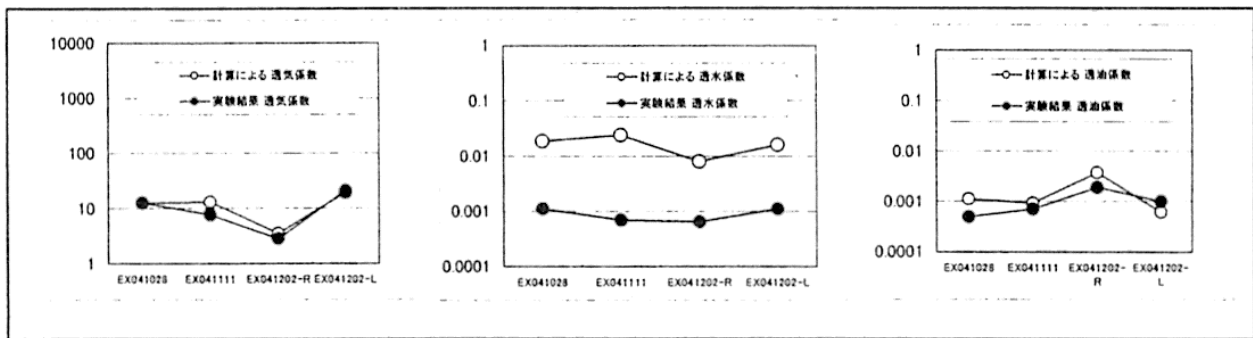


図 4-3 豊浦砂とエンジンオイルによる実験結果と計算結果の比較

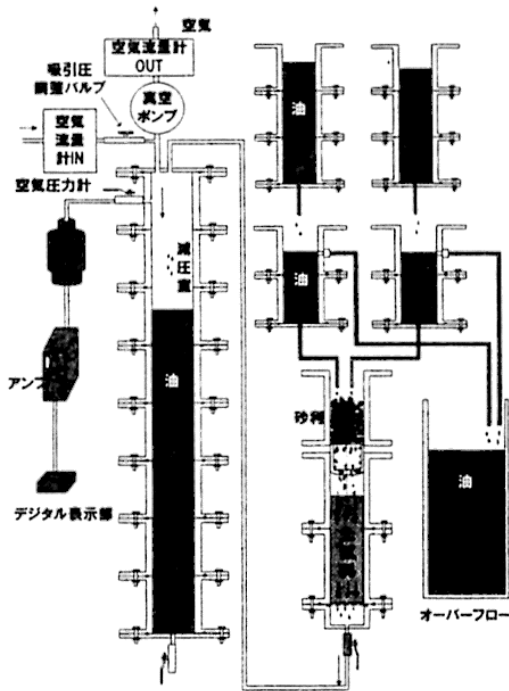


図 4-4 空気吸引不飽和カラム試験による
水・油・空気 3 相系透過性試験装置 VER.4

4.4 更なる装置の改良に向けて(試験装置 VER.4)

上記の問題を改善するために、新たに**試験装置 VER.4**を考案した。図 4-4 に示したこの装置では油は重力落下するため、送液ポンプでの散布ではないので、ゴムチューブ部分の耐久性を心配することから解放される。また、粘性の高い低いに関係なく実験が行えると思われる。

また、従来はポンプの流量が何らかのはずみで増減するために、流量が最悪の場合、予想していたよりもかなり多くなって、減圧室が満杯になってしまうことがあった。また、仮に流量が安定していたとしても、実験担当者が翌日に実験に来れない場合には同様の問題が発生した。図 4-4 の方法では、上流側に設置したサーバーの体積以上が流ることがない。

図 4-4 の**試験装置 VER.4**は未完成であるが、これを用いた実験を今後は行なっていきたいと考えている。

5. 結論

本研究は、水・油・空気の高相流における各相の不飽和透過性を簡便に測定できる、空気吸引不飽和カラム試験による水・油・空気 3 相系透過性試験装置を開発することを目的とした。

当初の試作装置を改良し、試行錯誤を繰り返すことによりエンジンオイルのような高粘性の油に対しても実験が行える装置を開発することができた。

実験の結果、透過性(透水係数)について従来よく用いられるモデルに基づく計算で求めた透水係数の値と、今回の実験によって得た実測値に違いが生じた。これは灯油では見受けられなかった違いであり、透過性の悪い油、粘性の高い油によって水の流れが阻害されることが、従来の計算法では反映されないことを示す興味深い結果を得るこ

とができた。

なお、この研究は平成 16・17 年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))により行われた。

参考文献

- 1) 例えば土壌・地下水汚染の調査・予測・対策, 地盤工学・実務シリーズ 15, 社団法人 地盤工学会, p. 93, 2002.
- 2) Scheidegger, A.E. : The physics of flow through porous media, *University of Toronto Press*, 1974.
- 3) van Genuchten, M.T. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America. J.*,44, pp.892-898, 1980.

