

## 間隙水と油の同時移動現象に関する室内実験と解析

東海大学 学生員 ○小野 幹平  
東海大学 正会員 本間 重雄

### 1. まえがき

油による地盤環境汚染は、産業活動によって大量に発生する廃油や使用済み炭化水素燃料、暖房用オイル等の不適切な処理処分によるものや、老朽化した地下貯蔵タンクからの漏洩等により長期間に亘って汚染が放置される場合が多く、調査や浄化対策に多額のコストを要している状況である<sup>1)</sup>。地下貯蔵タンクからの漏洩の場合には、漏洩箇所から浸出したガソリン等は飽和土中をほぼ鉛直に上昇し、地下水面に達した後に水平方向へと移動していく<sup>2)</sup> (図-1)。

本研究では、地下水面以下における土中水と油の同時浸透現象をカラム実験を通じて再現し、2相流体の土間隙における置換割合や既存間隙水の残留飽和度について調べるとともに、帯油層原油の注水置換解析で用いられる Buckley-Leverett 解析を通じて実験結果の分析を行った。

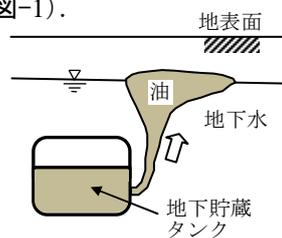


図-1 地下タンクからの油の漏洩

### 2. 実験概要

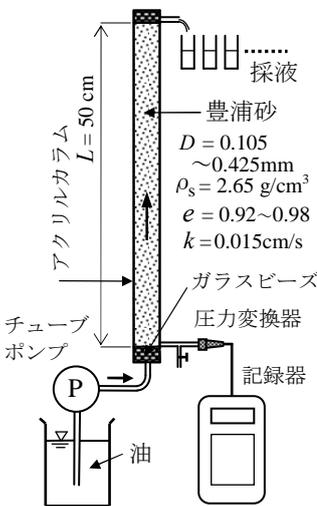


図-2 実験装置

実験装置は図-2 に示す内径 1.5cm、長さ 50cm のアクリルカラムの下部に送液定量ポンプを繋げたもので、カラム下端には注入圧を測定するため小型圧力計を設置した。このカラム内に豊浦砂を一定密度で充填し、最初送水によって試料を完全に飽和させた後、送液を油に切り替え、カラム上端からの排出液を 2cc ずつ連続的に採取した。送液油量は  $q = 0.04 \sim 0.18 \text{ cm}^3/\text{s}$  の範囲で3種類変えて行った。

実験に使用した油は、灯油、A 重油、潤滑油(真空ポンプ油)の3種類で、それらの物理的性質を表-1 に示す。

表-1 油の物理的性質

性質	灯油	A 重油	潤滑油
密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.795	0.837	0.880
粘性係数 $\mu$ (Pa·s)	0.00242	0.0167	0.0250

注)  $\rho_w = 1.00 \text{ g/cm}^3$ ,  $\mu_w = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

### 3. 実験結果

図-3 は飽和砂中へ下端から流量  $q = 0.040 \text{ cm}^3/\text{s}$  で灯油を浸透させたときの、上端から排出された水量  $q_w$  と油量  $q_o$  の変化を示したものである。浸透開始後  $t = 480 \text{ s}$  までは排出液は間隙水のみであるが、 $t = 550 \text{ s}$  付近で  $q_w$  は急激に減少し、代わって油量  $q_o$  が急激に増加している。その後は、 $q_o$  が徐々に増加し、相対的に  $q_w$  は減少して行く。間隙水の排出が止まるのは  $t = 1100 \text{ s}$  付近であり、その時点で排出液は全て油となる。

この変化は充填試料の間隙容量や注入油量の影響を受けるので、横軸を流出間隙体積  $V_p$  に、縦軸を部分流量  $f_w = q_w/q$ ,  $f_o = q_o/q$  に置き換えると図-4 に示す結果が得られる。

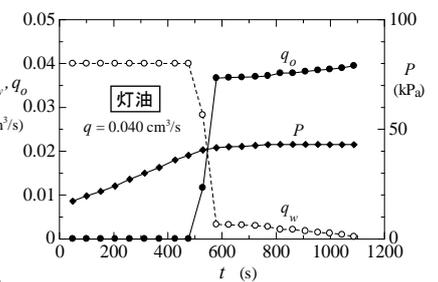


図-3 排出水油量の変化

流出間隙体積  $V_p$  は流体が土間隙を通過する際の累積体積  $V_f$  を土の間隙体積  $V_v$  で除した値である。図から排出液が水から油に切り替わるのは  $V_p = 0.5 \sim 0.55$  であり、したがって  $1 - V_p = 0.45 \sim 0.5$  の量の間隙水が浸透油によって置換されずに間隙中に残存していることになる。これは、図-5 に示すように間隙中では油によって置換されない不動水が存在し、移動可能な自由水を浸透油のフロント部が押し上げながら置換が進行しているものと考えられる。

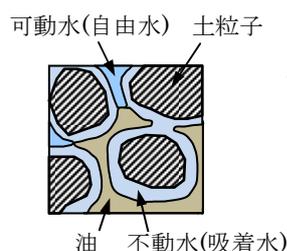
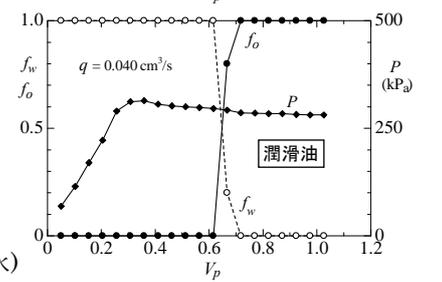
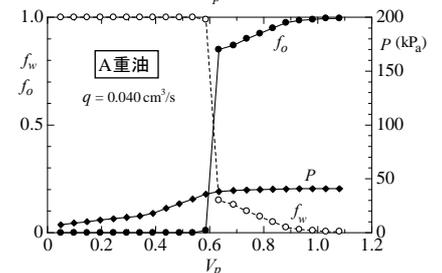
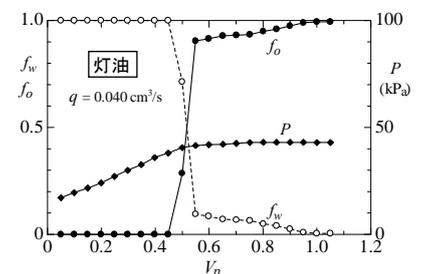


図-5 油による間隙水の置換

図-4 部分流量の変化

キーワード：地盤環境汚染、油汚染、2相流、Buckley-Leverett 解析

連絡先 〒259-12 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 東海大学工学部土木工学科 TEL. 0463-58-1211

油によって置換されない間隙水の残留飽和度を求めると表-2 に示す値が得られ、飽和砂中に油が浸入する場合には、灯油、重油、潤滑油の順に間隙水の残留飽和度  $S_{wr}$  が減少する。

表-2 間隙水の残留飽和度

残留飽和度	灯油	重油	潤滑油
$S_{wr}$	0.45~0.50	0.43~0.47	0.30~0.35

一方、注入圧  $p$  は図-4 より砂中への油の浸入につれて上昇していくが、間隙水が油で置換された後はほぼ一定の状態となる（潤滑油は若干様相が異なる）。

4. 2 相流体の同時浸透解析

多孔質体中の互いに混和しない 2 相流体の移動現象に関しては、採油工学の分野において古くから研究が行われ、一般に Buckley-Leverett 解析法<sup>3)</sup>に基づいて解析が行われる。この解析法は相対透水(油)係数の概念を用い、重力と毛管圧の影響を無視した均質帯油層中の非圧縮性 2 相流体の非混和流れに基づいており、その概要は次のようなものである。

飽和多孔質体中における鉛直方向への油と水の浸透流量は、ダルシーの法則より次式で示される。

$$q_o = -\frac{kk_{ro}A}{\mu_o} \left( \frac{\partial P_o}{\partial z} + \rho_o g \right) \quad (1)$$

$$q_w = -\frac{kk_{rw}A}{\mu_w} \left( \frac{\partial P_w}{\partial z} + \rho_w g \right) \quad (2)$$

ここに、 $k$ は多孔質体の固有透水係数、 $A$ は透水断面積、 $P_o, P_w$ はそれぞれ間隙油と間隙水の圧力、 $k_{ro}, k_{rw}$ は多孔質体に対する油と水の相対透水係数であり、一般に飽和度の関数として図-6 のように与えられる。

油と水の接触面で生じる毛管圧を無視し、式(1)と(2)の差をとり  $q_w + q_o = q$  の関係を用いると(重力の影響も無視)、浸透油の部分流率  $f_o = q_o/q$  は次のようになる。

$$f_o = \frac{1}{1 + \frac{k_{rw} \mu_o}{k_{ro} \mu_w}} \quad (3)$$

一方、浸透油の質量保存則から連続の式は

$$-\frac{\partial}{\partial z} (q_o \rho_o) = A \phi_e \frac{\partial}{\partial t} (S_o \rho_o) \quad (4)$$

と表され、間隙油を非圧縮性と仮定すると  $q_o = f_o q$  の関係から

$$-\frac{\partial f_o}{\partial z} = \frac{A \phi_e}{q} \frac{\partial S_o}{\partial t} \quad (5)$$

となる。ここに  $\phi_e$  は多孔質体の有効間隙率である。 $f_o(S_w)$  であるので、上式は次のように書き直される。

$$\left( \frac{\partial S_o}{\partial t} \right)_z = -\frac{q}{A \phi_e} \left( \frac{df_o}{dS_o} \frac{\partial S_o}{\partial z} \right)_t \quad (6)$$

Buckley-Leverett<sup>3)</sup> のアイディアは上式を次の特性方程式に変換し

$$\left( \frac{\partial z}{\partial t} \right)_{S_o} = \frac{q}{A \phi_e} \left( \frac{df_o}{dS_o} \right)_t \quad (7)$$

式(7)を時間について積分することにより、置換流体の飽和度一定面の進行は

$$z_{S_o} = \frac{qt}{A \phi_e} \left( \frac{df_o}{dS_o} \right) \quad (8)$$

で求められるとした。

図-7 は図-3 に示した  $q = 0.040 \text{ cm}^3/\text{s}$  の灯油置換を式(8)により計算した結果である。

間隙水の残留飽和度は表-2 より  $S_{wr} = 0.45$  を用いた。図から置換油のフロントは約 8 分半でカラム上端に達しており、これは図-3 に示した実験結果とよく一致している。

しかし、図-7 の残留可動水から排出可能間隙水量を算出すると  $4.25 \text{ cm}^3$  となるが、図-3 の  $t = 580 \text{ s}$  以降の  $q_w$  の総量は  $2.12 \text{ cm}^3$  であり

約 2 倍の開きが認められる。これには置換中の可動水の一部が土粒子周囲の不動水に取り込まれてしまうためではないかと推察され、式(8)による単純な部分流率では表現できない土粒子表面部における 2 相流体の複雑な浸潤機構が介在していると思われる。

本研究の結果から、土中を油と水が同時に移動する際

表-3 有効間隙率

置換	灯油	A重油	潤滑油
油→間隙水	0.25 ~0.27	0.25 ~0.27	0.31 ~0.34

の有効間隙率  $\phi_e$  を求めると表-3 に示す値が得られ、飽和砂中に油類が浸出する際の実効空隙率はおおむね 0.25~0.35 の大きさであることが明らかになった。

4. 今後の課題

油汚染土の浄化には間隙中での油の溶解離脱を促す界面活性剤の利用が有効と思われ、今後は本研究の成果を踏まえ実験を行っていくつもりである。

参考文献: 1) 岩田進午・喜田大三監修:「土の環境圏」pp.1197-1207, フジテクノシステム(1997). 2) 地盤工学会「続・土壌・地下水汚染の調査・予測・対策」, 地盤工学・実務シリーズ 25, pp.42-50 (2008). 3) Buckley S.E. and Leverett M.C.: Mechanism of fluid displacement in sands, AIME, Vol.146, pp.107-116(1942).

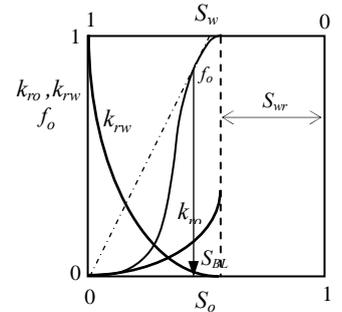


図-6 相対透水係数

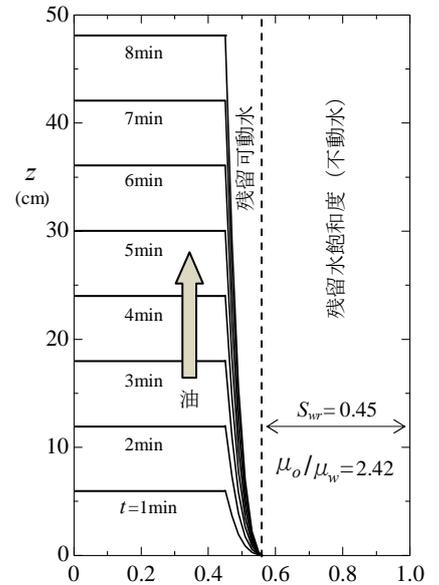


図-7 計算結果