

II-211

空隙中におけるNAPL液滴の運動に関する実験的研究

(株)ニュージェック 正員 ○尾崎 将人

埼玉大学 正員 佐藤 邦明

埼玉大学 正員 足立 克巳

1.はじめに 人間をはじめとするすべての動植物は水なしには生きることはいできない。しかし近年、その水は地下水汚染の危機にさらされている。その中でも石油系化合物は、地層・地下水の汚染物質となっており、それらの多くは非水溶性液(NAPL: non-aqueous phase liquid)である。ここでは均質な飽和多孔媒体中の水よりも軽い液滴の運動に注目し、水よりも重い液滴の場合と比較・検討することを目的とする。

2.実験方法 図1(a)のような液滴の運動に伴う壁面効果の影響を明らかにするために、種々の管径 d_t ($=0.44 \sim 15.0\text{cm}$)の透明細管(管長 $40 \sim 80\text{cm}$)に水を満たし、管底から注入管を用いてベンゼンの単一液滴を放出する。液滴の運動速度と液滴径、管径の大きさの関係から壁面効果を見出し得る範囲を求めた。次に図1(b)のように透明細管($d_t=5.0 \sim 8.4\text{cm}$)にガラス球(粒径 $d=1.015, 1.257\text{cm}$)を充てんし(表1参照)、同様にベンゼン液滴を注入して、飽和多孔媒体空隙中の上昇液滴の抵抗を求めた。

3.実験結果 図2は管径が十分に大きく上昇液滴が壁面効果の影響を受けないときの液滴径と最終上昇速度の関係であり、図3はこのときの液滴レイノルズ数 Re と抵抗係数 C_D の関係である。 C_D を与える式は

$$C_D = \frac{4(\rho - \rho_d)g}{3\rho U_0^2} \quad (1)$$

である。 (ρ, ρ_d) :それぞれ水、液滴の密度)

これらの図中には水中を下降するトリクロロエチレン(以下TCE)の運動の場合についても載せている。液滴最終速度 U_0 は液滴径が大きくなるにつれて増加し、やがて一定値($U_0=11.604\text{cm/s}$)に近づくが、液種の密度差による最終速度の違いは生じる。しかし、上昇時と下降時の抵抗はほぼ一致しているといえる(図3)。 C_D が Re が増加するにつれて一旦減少して増加するのは液滴が球形状からだ円状に扁平になり、ある程度大きい液滴径になると分裂し、再び小さいレイノルズ数の液滴になるからである。

図4では無次元最終液滴速度と無次元液滴径 $r=d/d_t$ (d :液滴径)の逆数の関係を表しており、 U_0/U (U :多孔体中での

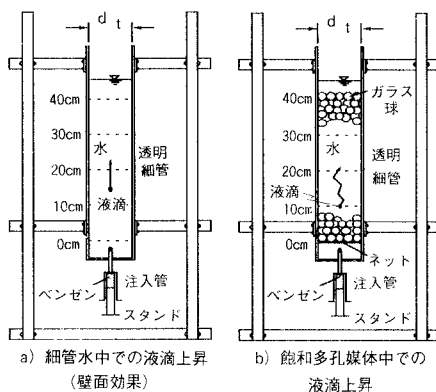


図1 実験装置

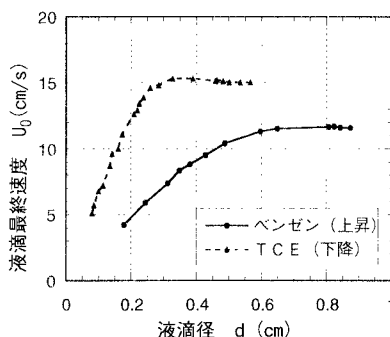


図2 管径が大きく壁面効果がないときの液滴径と液滴最終速度の関係

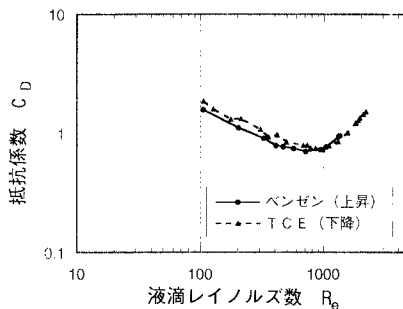


図3 管径が大きく壁面効果がないときの液滴レイノルズ数と抵抗係数の関係

の速度)がほぼ一定になる $\text{Log}(1/r)=1.1$, $r=0.08$, つまり液滴径が管径の 0.08 倍を超えなければ壁面効果は無視し得ることになる。図5は多孔媒体中を液滴が運動するときの抵抗係数 C_f を、相対液滴径 d/D^* (D^* :有効空隙径)によって粒径に関係なく評価したものである。いずれの液滴種でも C_f は d/D^* の増加に伴って大きくなるが、ベンゼンはTCEより C_f が大きい。これはベンゼン液滴はガラス球に衝突したときの抵抗や摩擦力が大きいため、運動速度が小さくなるからである。

C_f の式は以下のようにして与える。液滴の力のつりあいより飽和多孔体中の運動方程式は

$$\frac{du}{dt} = \frac{\rho - \rho_d}{\rho} g(\cos\theta - f \sin\theta) - \frac{3\rho}{4d\rho_d} C_d u^2$$

ここで、 $u = U_1$ (定常速度) とすると、 C_d は

$$C_d = \frac{4d}{3} \frac{1}{U_1^2} \frac{\rho - \rho_d}{\rho} g(\cos\theta - f \sin\theta)$$

広義の抵抗係数 $C_d = \lambda' C_D$ (λ' :補正係数) とおき

$$\frac{\cos^2 \theta}{\lambda'} (\cos\theta - f \sin\theta) - \frac{U^2}{U_0^2} = 0$$

新しい係数 $C_f = 1 - C_m$ を導入して

$$C_m - \frac{U^2}{U_0^2} = 0, C_m = \lambda'^{-1} \left(\cos^2 \theta - \frac{1}{2} f \sin 2\theta \cos\theta \right)$$

$$C_f = 1 - \frac{U^2}{U_0^2} \quad (2) \quad \text{が最終的に得られる。}$$

表1 ガラス球充てん特性

多孔媒体	No.1	No.2	No.3	No.4	A	B	C	D	E
透明管直径 d_t (cm)	5.0	8.4	5.2	5.2	6.6	5.2	8.4	6.6	5.6
粒径 D (cm)	1.257	1.257	1.257	1.015	1.015	1.015	1.257	1.257	1.257
空隙率 n (%)	41.20	42.10	43.30	42.60	41.00	42.00	42.56	42.00	43.50

(No.1~No.4:ベンゼン (上昇), A~E:TCE (下降))

4.おわりに 本研究により、以下のような点が明らかになった。

- 1) $r \leq 0.08$ なら壁面効果は認められず、周囲からの影響を受けない。
- 2) 多孔媒体中の液滴運動は $C_f = 1 - (U^2/U_0^2)$ によって統一的に記述できる。

今回の実験的研究を通じ、NAPLの地下水中の挙動を水理学的に評価する基礎知識が得られたと言える。

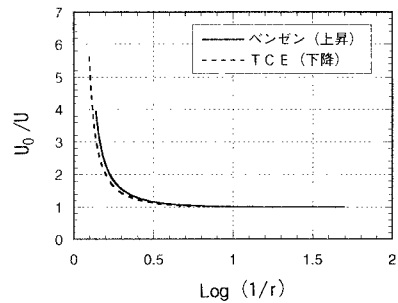


図4 無次元最終液滴速度と無次元液滴径の逆数の関係

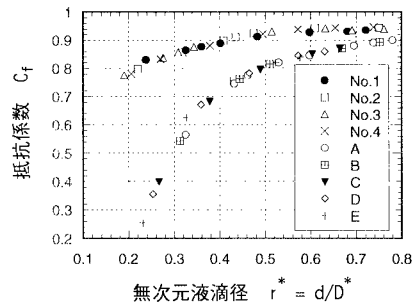


図5 動的有效空隙径 D^* で無次元化した液滴径と抵抗係数の関係