

# 飽和土の間隙中における油の最大・最小飽和度について

大同工業大学建設工学科 正会員 棚橋秀行  
岐阜大学工学部 正会員 佐藤 健

## 1.はじめに

近年、我が国でも各地で地下水汚染が問題になってきている。その中には、灯油・ガソリンなど非水溶性の油による汚染例が多々報告されている。このような汚染の予測・浄化の際、土中における油の飽和度が土の特性から推定できれば大変に有用である。本研究は、土(DL クレイおよび粒径0.074~2.0mmの汚染現場土)、ならびにガラスビーズ(粒径0.05~3.0mmの数種類)を充填した室内鉛直飽和カラムと灯油を用いた実験から得られた浸入油飽和度  $S_{oi}$  (imbibition oil saturation: 油の最大飽和度)と残留油飽和度  $S_{or}$  (residence oil saturation: 油の最小飽和度)が、土・ガラスビーズの間隙特性とどのような関係にあるかを実験的に検討したものである。

## 2.実験方法と試料

透明アクリルカラム(内径 $\phi=5.0\text{cm}$ )に試料を水による飽和状態で充填したのち、図-1(a)の状態において灯油浸入過程、図-1(b)の状態において灯油排出過程の2つの過程を継続して行った。

1)灯油浸入過程 送液ポンプによりカラム上端へ灯油を供給して試料層に灯油を浸入させ、間隙水と置換させた。灯油浸入はカラムから水が排出されなくなるまで行われた。その後フラクションコレクターにセットされた試験管中の排出水の合計体積を測定し、カラム内の浸入油量  $V_{oi}$  とした。浸入油飽和度  $S_{oi}$  は  $V_{oi}$  と間隙率より算出した。

2)灯油排出過程 バルブ1, バルブ2を閉じて浸入過程とは流れを上下反対になるよう配管し、カラム下端へ送液ポンプにより水を供給して試料層の灯油をカラム上端より排出させた。灯油排出はカラムから灯油が排出されなくなるまで行われた。その後、フラクションコレクターにセットされた試験管中の排出灯油の合計体積を測定し、これを先ほどのカラム内浸入油量  $V_{oi}$  から減ずることでカラム内の残留油量  $V_{or}$  を求めた。残留油飽和度  $S_{or}$  は  $V_{or}$  と間隙率より算出した。

本研究に用いた土試料(DL クレイおよび現場土)とガラスビーズ(粒径0.05mm, 0.1mm, 0.2mm, および0.2mmと3.0mmの混合ガラスビー

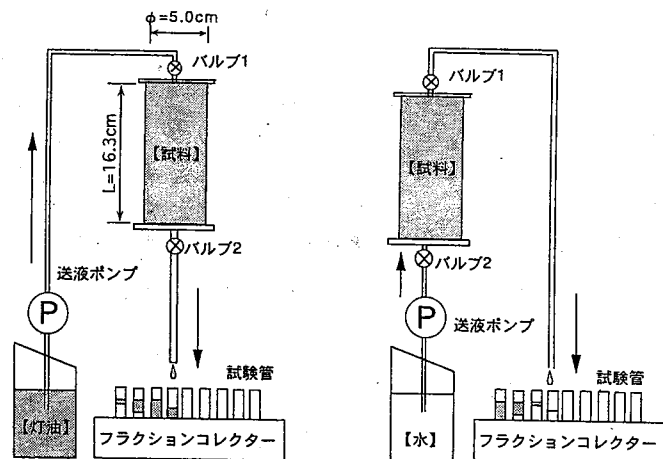


図-1(a)実験装置  
(灯油浸入過程)

図-1(b)実験装置  
(灯油排出過程)

The study on the maximum and minimum oil saturation in the pore of the saturated soil:

H. Tanahashi (Daido Institute of Technology) and T. Sato (Gifu University).

表-1 実験条件および結果

実験No.	試料名	粒径 (mm)	間隙率 (-)	平均断面流速 $q$ (cm/min)	$S_{oi}$ (%)	$S_{or}$ (%)	水分保持特性曲線		
							$S_{wr}$ (%)	$\alpha$ (1/cm)	$n$ (-)
EX.S-1	現場土	0.074~2.0	0.333	0.042	53.9	41.3	20.8	0.0660	3.0
EX.S-11	現場土	0.074~2.0	0.333	0.340	53.6	17.3	20.8	0.0660	3.0
EX.S-12	現場土	0.074~2.0	0.333	0.340	35.8	17.4	20.8	0.0660	3.0
EX.S-13	現場土	0.074~2.0	0.333	0.340	60.1	33.0	20.8	0.0660	3.0
EX.S-14	現場土	0.074~2.0	0.333	0.316	52.8	10.5	20.8	0.0660	3.0
EX.DL-1	DLクレイ	$D_{50}=0.015$	0.433	0.083	60.5	34.6	9.1	0.0286	3.5
EX.005-11	ガラスビーズ	0.05	0.379	0.051	58.1	28.8	8.8	0.0085	8.0
EX.01-11	ガラスビーズ	0.1	0.402	0.199	73.3	16.5	6.3	0.0167	8.0
EX.02-11	ガラスビーズ	0.2	0.366	0.510	79.4	15.7	6.1	0.0250	9.0
EX.02-12	ガラスビーズ	0.2	0.366	0.510	79.3	15.5	6.1	0.0250	9.0
EX.02-13	ガラスビーズ	0.2	0.366	0.127	75.2	17.5	6.1	0.0250	9.0
EX.02-14	ガラスビーズ	0.2	0.366	0.051	69.5	21.0	6.1	0.0250	9.0
EX.02-15	ガラスビーズ	0.2	0.366	0.357	82.3	19.7	6.1	0.0250	9.0
EX.M30-11	混合ガラスビーズ	0.2+3.0	0.244	0.510	75.3	11.2	6.4	0.0303	20.0
EX.M30-12	混合ガラスビーズ	0.2+3.0	0.244	0.357	73.4	5.4	6.4	0.0303	20.0
EX.M04-11	混合ガラスビーズ	0.2+0.4	0.332	0.510	78.1	18.2			
EX.M08-11	混合ガラスビーズ	0.2+0.8	0.280	0.510	70.6	1.8			
EX.30-11	ガラスビーズ	3.0	0.366	0.510	80.3	5.1			

ズ)の水分保持特性曲線を、それぞれ図-2、図-3に示した。両図の曲線は式(1)に示した van Genuchten<sup>1)</sup>の提案したモデルによる近似曲線であり、両図の括弧内の $\alpha$ (1/cm)と $n$ (-)は同モデルの定数である。

$$Se = \left\{ 1 + |\alpha h|^n \right\}^{-1+1/n} \quad (1)$$

ここで、 $Se$ ：有効飽和度(-)、 $h$ ：サクシヨン(cm)である。表-1に実験条件および結果を示した。同表の混合ガラスビーズは、粒径0.2mmのガラスビーズが50%を占めるように配合し、残りの50%を占めるガラスビーズの粒径が異なるものである。なお、ダルシー流速は灯油浸入・排出過程で同じである。

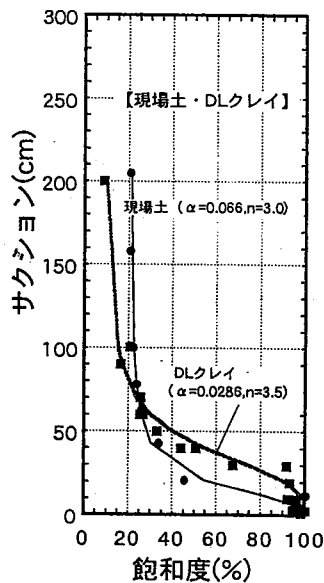


図-2 土試料の水分保持特性曲線

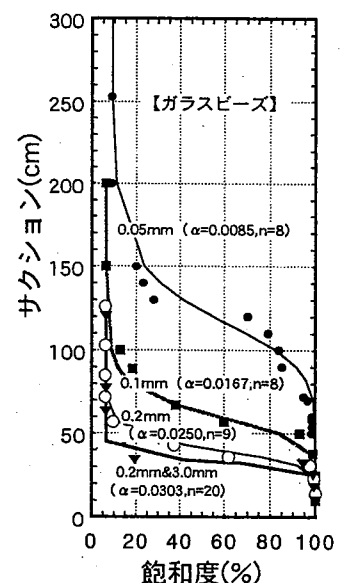


図-3 ガラスビーズの水分保持特性曲線

### 3. 結果と考察

#### 3.1 水分保持特性曲線と浸入・残留油飽和度の関係

前節の実験から得られた浸入油飽和度  $S_{oi}$  の値を説明するものとして、各試料の水分保持特性曲線における残存水飽和度  $S_{wr}$  に着目した。残存水飽和度  $S_{wr}$  は間隙中の排出されない水分であり、 $S_{wr}$  が大きい試料は油浸入過程でも排出されない水分が多く、浸入油飽和度  $S_{oi}$  が小さくなるのではないかと考えた。そこで、残存水飽和度  $S_{wr}$  と浸入油飽和度  $S_{oi}$  の関係を整理してみたところ、上述のような傾向が図-4のように確認でき、この関係は近似式(2)によって良く再現できた。

$$S_{oi} = \frac{36}{S_{wr} - 5} + 49 \quad (2)$$

一方、残留油飽和度  $S_{or}$  の値を説明するものとして、各試料の水分保持特性曲線に対する van Genuchten<sup>1)</sup>の提案したモデルの定数、 $\alpha$ と $n$ に着目した。定数 $\alpha$ は粒径の小さい試料ほど小さく

なる傾向を持ち、定数  $n$  は水分保持特性曲線の分布が広く間隙の大小の相対差が大きな試料ほど小さくなる傾向を持つ。よって、定数  $\alpha$  と  $n$  を乗じたものが小さい試料ほど、トラップによる残留油飽和度  $S_{or}$  が大きくなるのではないかと考えた。そこで、定数  $\alpha$  と  $n$  を乗じたものと、残留油飽和度  $S_{or}$  の関係を整理してみたところ、そのような傾向が図-5 に示すように確認でき、この関係は近似式(3)によって良く再現できた。

$$S_{or} = 8.395(\alpha n)^{-0.479} \quad (3)$$

但し、本研究では同一試料に対して異なるダルシー流速で実験を行っている。図-4、図-5 のデータは各試料毎のダルシー流速  $q$  の最も大きな実験ケースの結果についてプロットしたものであり、流速の大小の影響は説明されていない。図-6 は、同一試料（粒径 0.2mm のガラスビーズ）・同一間隙率（0.366）で行った実験に対して、ダルシー流速  $q$  の違いが及ぼす影響について整理したものである。図-6 から、それほど大きさの変わらない範囲の流速においても流速が大きいほど浸入油飽和度  $S_{oi}$  が大きく、流速が小さいほど残留油飽和度  $S_{or}$  が大きくなる傾向が見られた。

そこで、残存水飽和度  $S_{wr}$  と浸入油飽和度  $S_{oi}$  の関係に、ダルシー流速  $q$  が大きいほど浸入油飽和度  $S_{oi}$  が大きくなるという影響を考慮して（ $q$  を分子側の変数として）、再度整理を行った結果、図-7 に示すような右上がりの傾向が確認でき、この関係は近似式(4)によって良く再現できた。

$$S_{oi} = 102.5 \left( \frac{q}{S_{wr}} \right)^{0.107} \quad (4)$$

また、 $\alpha \cdot n$  と残留油飽和度  $S_{or}$  の関係に、ダルシー流速  $q$  が大きいほど浸入油飽和度  $S_{or}$  が小さくなるという影響を考慮して（ $q$  を分母側の変数として）、同じく再度整理を行った結果、図-8 に示すような右下がりの傾向が確認でき、この関係は近似式(5)によって良く再現できた。

$$S_{or} = 6.881(q\alpha n)^{-0.300} \quad (5)$$

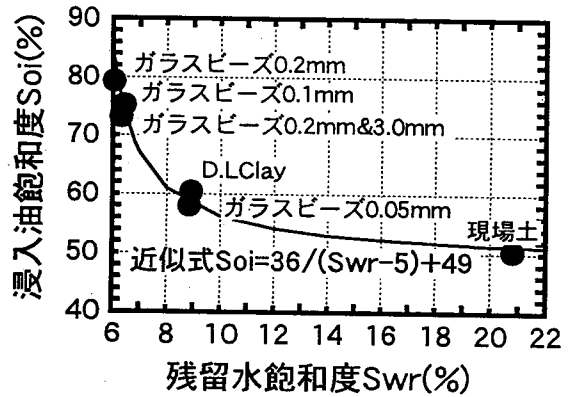


図-4 残留水飽和度  $S_{wr}$  と浸入油飽和度  $S_{oi}$  の関係

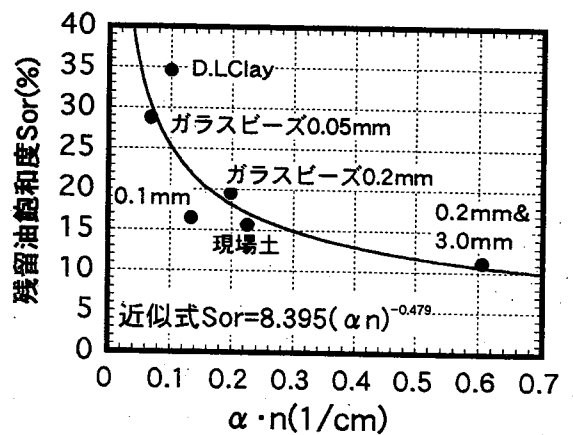


図-5  $\alpha \cdot n$  と残留油飽和度  $S_{or}$  の関係

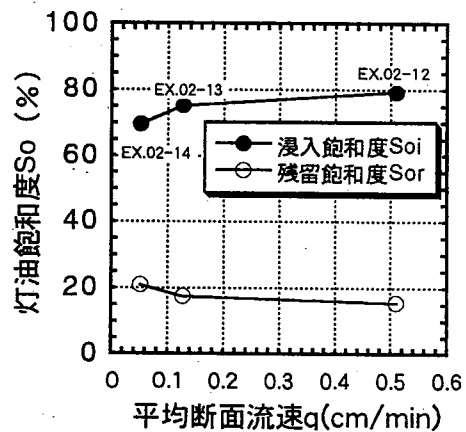


図-6 平均断面流速  $q$  の影響

### 3.2 間隙径分布と残留油飽和度の関係

図-8の横軸は  $q$  と  $\alpha$  と  $n$  で整理されているが、 $\alpha$  と  $n$  はフィッティングのための定数にすぎないので直接的な意味はあいまいである。そこで  $\alpha$  と  $n$  を水分保持特性から推定される試料の間隙径分布の平均間隙径と標準偏差に置き換えて考察することを試みた。サクシヨン  $h(\text{cm})$  と間隙径  $d(\text{cm})$  の間には式(6)のような関係がある<sup>2)</sup>。

$$h = \frac{0.3}{d} \quad (6)$$

これを van Genuchten<sup>1)</sup>の式(1)に代入すると以下のようになる。

$$Se = \left\{ 1 + \left( \alpha \frac{0.3}{d} \right)^n \right\}^{-1+1/n} \quad (7)$$

式(7)を間隙径  $d$  について整理すると次式のようになる。

$$d = \alpha \frac{0.3}{\left( Se^{n/(1-n)} - 1 \right)^{1/n}} \quad (8)$$

式(8)を用いると、試料の間隙径の代表値として有効飽和度  $Se=0.5$  の時の平均間隙径  $d_{50}$  を表-2のように算出することができる。 $d_{50}$  が大きな試料ほど  $Sor$  は小さくなるものと予想される。

また、間隙径分布の標準偏差  $\sigma$  は正規分布の分布関数<sup>3)</sup>より以下の式(9)から求められる。

$$1 = \frac{1}{2} \left( \frac{d_{84} - d_{50}}{\sigma} + \frac{d_{50} - d_{16}}{\sigma} \right) \quad (9)$$

式(9)から求められた標準偏差  $\sigma$  を表-2に示す。これを見ると、ガラスビーズの粒径  $0.05\text{mm}$  で  $\sigma=0.0054\text{mm}$ 、粒径  $0.2\text{mm}$  で  $\sigma=0.0142\text{mm}$  と粒径  $0.2\text{mm}$  のほうが標準偏差  $\sigma$  は大きくなっているが、

図-3に示した実際の水分保持特性曲線の分布は  $0.05\text{mm}$  のほうが大きく、標準偏差ではこれをうまく表わしていない。そこで各試料の平均間隙径  $d_{50}$  を1としたときの標準偏差を間隙径分布の相対標準偏差  $\sigma_r$  と定義し、式(10)によってこれを算出した。

$$1 = \frac{1}{2d_{50}} \left( \frac{d_{84} - d_{50}}{\sigma_r} + \frac{d_{50} - d_{16}}{\sigma_r} \right) \quad (10)$$

表-2から、ガラスビーズの粒径  $0.05\text{mm}$  で  $\sigma_r=0.2369$ 、粒径  $0.2\text{mm}$  で  $\sigma_r=0.2073$  と粒径  $0.05\text{mm}$  のほうが相対標準偏差  $\sigma_r$  は大きくなっている。 $\sigma_r$  が大きくなることは間隙のバリエーションが広

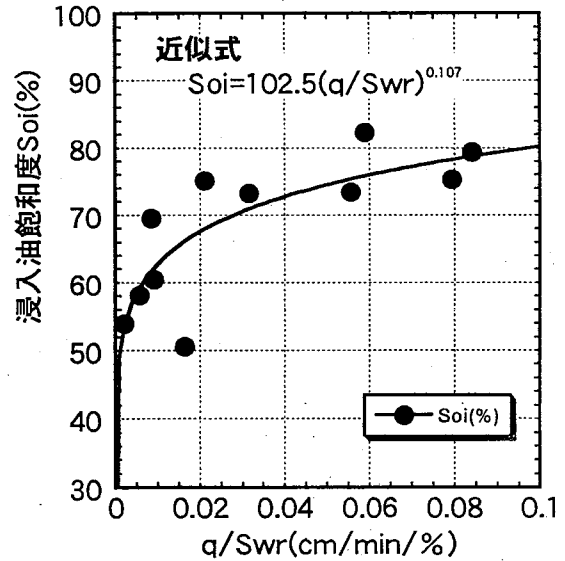


図-7 残留水飽和度  $Swr$  と浸入油飽和度  $Soi$  の関係に平均断面流速  $q$  を考慮した整理

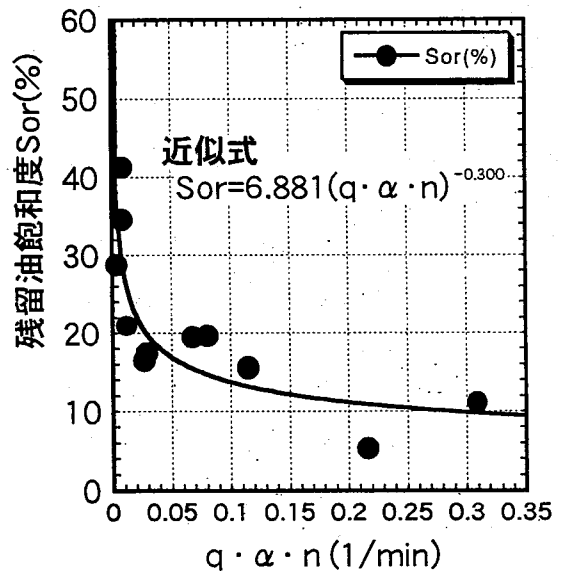


図-8  $\alpha \cdot n$  と残留油飽和度  $Sor$  の関係に平均断面流速  $q$  を考慮した整理

表-2 水分保持特性曲線から求めた間隙径分布

試料名	$\alpha$ (1/cm)	n (-)	$d_{50}$ (mm)	$d_{84}$ (mm)	$d_{16}$ (mm)	標準偏差 $\sigma$ (mm)	相対標準偏差 $\sigma_r$ (-)
現場土	0.0660	3.0000	0.1619	0.2961	0.0810	0.1076	0.8288
DLクレイ	0.0286	3.5000	0.0745	0.1239	0.0422	0.0409	0.6628
ガラスビーズ0.05r	0.0085	8.0000	0.0249	0.0308	0.0200	0.0054	0.2369
0.1mm	0.0167	8.0000	0.0489	0.0605	0.0392	0.0107	0.2369
0.2mm	0.0250	9.0000	0.0736	0.0889	0.0606	0.0142	0.2073
0.2+3.0mm	0.0303	20.0000	0.0906	0.0985	0.0832	0.0076	0.0873

がることを意味し、塊状にトラップされている油が除去されにくくなり Sor が大きくなるものと思われる。  $\sigma_r$  の逆数が大きくなると、逆に Sor が減少していく傾向になると考えられる。

図-8では  $\alpha \times n$  が大きくなると Sor が減少していく傾向になっている。これと同じ傾向をもつであろうと予想される、平均間隙径  $d_{50}$  と  $\sigma_r$  の逆数を乗じたものを  $\alpha \times n$  部分に置き換えて整理すると図-9 のようになった。図-9 から図-8 と同様な傾向が見受けられ、これは近似式(11)でよく再現できた。

$$Sor = 3.973 \left( \frac{q d_{50}}{\sigma_r} \right)^{-0.293} \quad (11)$$

ここで、近似式(4)と(11)について考察する。

近似式(4)は、図-7に示したように原点に近づく

ほど急な曲線の形状になっている。これに従うと残存水飽和度 Swr が大きい場合は横軸の値が原点に近づくために、ダルシー流速  $q$  の大小が浸入油飽和度  $Soi$  の値に与える影響が大きい、ということになる。このことは、実際の土で考えると間隙中の排出されない水分である残存水飽和度 Swr が大きい試料は、油浸入過程の油の流速が小さいと、なかなかこの水分が排出されない、ということと対応していると考えられる。また、Waddill and Parker<sup>4)</sup> が浸入油飽和度  $Soi$  の最大値は残存水飽和度 Swr を 100% から減じたものに近くなると述べている事からも、近似式(4)の上限は  $Soi=100-Swr(\%)$  に達したときであると考えられる。

近似式(11)は、図-9に示したように原点に近づくほど急な曲線の形状になっている。これに従うと平均間隙径  $d_{50}$  と相対標準偏差  $\sigma_r$  の逆数が小さい場合は横軸の値が原点に近づくために、ダルシー流速  $q$  の大小が残留油飽和度 Sor の値に与える影響が大きい、ということになる。このことは、実際の土で考えると、平均間隙径が小さく、かつその間隙径の付近の分布が広い試料では、油排出過程の水の流速が小さいとなかなか間隙中の油が排出されない、ということと対応している。

#### 4.まとめ

本研究の実験・考察の結果、得られた知見を以下に示す。

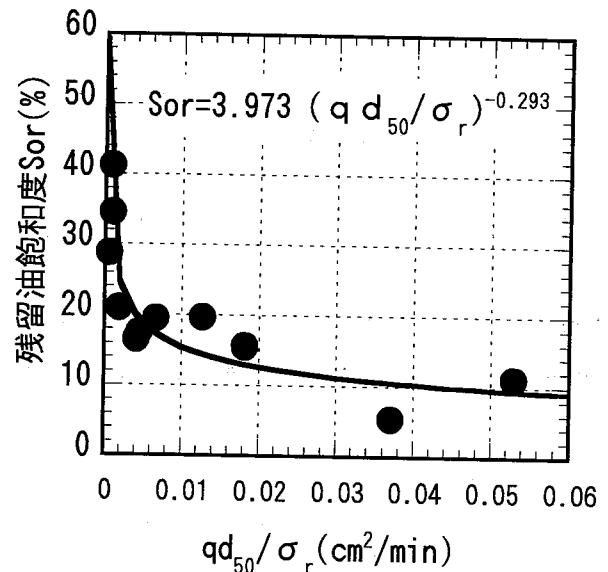


図-9  $d_{50} \cdot \sigma_r$  と残留油飽和度 Sor の関係に平均断面流速  $q$  を考慮した整理

- ①水分保持特性曲線から求められた残存水飽和度  $S_{wr}$  と浸入油飽和度  $S_{oi}$ , 及びダルシー流速  $q$  の間に図-7のような有意の関連性が確認でき, これは近似式(4)によって良く再現できた.
- ②また, van Genuchten<sup>1)</sup>のモデルにおける定数  $\alpha$  と  $n$  を乗じたものと残留油飽和度  $S_{or}$ , 及びダルシー流速  $q$  の間に図-8のような有意の関連性が確認でき, これは近似式(5)によって良く再現できた.
- ③②の結果の, 定数  $\alpha$  と  $n$  を乗じたものの部分を, 平均間隙径  $d_{50}$  と相対標準偏差  $\sigma_r$  の逆数を乗じたものに置き換えて整理したところ, これと残留油飽和度  $S_{or}$ , 及びダルシー流速  $q$  の間に図-9のような有意の関連性が確認でき, 近似式(11)によって良く再現できた.

#### 参考文献

- 1) van Genuchten, M.Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil. Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892~898, 1980.
- 2)赤井浩一:土質力学,p.33,朝倉書店,1988.
- 3)亀田弘行・池淵周一・春名攻:土木学会編 新体系土木工学・2 確率・統計解析, p.46, 技報堂出版, 1988.
- 4)Dan W. Waddill and Jack C. Parker : Recovery of light, non-aqueous phase liquid from porous media : laboratory experiments and model validation, Journal of Contaminant Hydrology, 27, pp.127~155, 1997.