

不飽和層での水みち流れによる溶質移動の実験とシミュレーション

Solute Transport by Water Path Flow through Unsaturated Media

坂本 康^{*}

By Yasushi SAKAMOTO

Solute transport by water path flow through unsaturated media was examined by experiments and simulations. Experimental results showed that solute transported through wider water path of higher fractal dimension for smaller glass-bead layer ($<0.84\text{mm}$) than for bigger one, and that the change of solute concentration in water path was small. Simulation results showed that the 'water path invasion model' could produce similar water paths to experimental ones when the angle of contact was set to be 87° and degree of saturation was set to be similar to those of experiments.

Keywords: water path flow, unsaturated media, solute transport

1. はじめに

廃棄物埋立層のような大きな固体を含む不飽和層中の流れではRichards式が適用できないといわれている(東條ら(1993))。このような特殊な不飽和層の流れの解析には新しい手法が必要である。著者は、そのような手法の開発を最終目標として、その基本となる水みち流れについて検討してきた(坂本(1992, 1994))。本論文ではその研究の一環として、水みち流れによる溶質移動を対象とした。本研究の目的は、水みち流れができたときに水と溶質が水平方向にどのように広がるか、流出水の濃度の時間変化はどうなるか、について基礎的知見を得ることである。また、シミュレーションによって水みちのフラクタル次元、水平方向の広がりがどの程度再現できるかも検討した。

2. 水みち流れの実験方法

2.1 実験装置

実験手法は、ガラスビーズ不飽和層に溶質液を鉛直浸透させ、下端から流出させるというものである。装置概要を図-1に示す。装置の主要部はアクリル槽(奥行: 1.5cm)である。この槽に所定の径のガラスビーズを充填し、水分調節して不飽和層とした。この槽の特徴は、槽の下から約 $2/3$ のところまで槽の中に鉛直な仕切り壁を入れた点である。仕切り壁は 19mm 間隔で19個あり、これにより槽内の下部約 $2/3$ は20個(図で

* 正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科
(〒400 山梨県甲府市武田 4-3-11)

は簡略化して10個のみ示した)に仕切られている。一般に、不飽和層からの流出実験で下端の流出口を大気圧に設定すると、流出口付近に飽和層ができてしまう。もし仕切り壁がないと、この飽和層で水・溶質が水平方向に広がってしまう。したがって、流出の観測結果が不飽和層での広がりによるか飽和層での広がりによるか判別できなくなってしまう。これを防ぐために、下部約 2/3に仕切り壁を入れ、上部約 1/3の不飽和層での広がりだけを観測できるようにした。なお、ビーズの流出を防ぐために、流出口は布(市販のナイロンスッキングを切ったもの)で覆った。また、流出口には左から順にNo.1から No.20まで番号をつけた。

2.2 実験手順

上記アクリル層に充填するガラスビーズ(空隙率: 38-40%)は、直径0.59-0.84、0.84-1.00、1.00-1.41、1.41-1.70mmの4種とした。実験はこの層を乾燥状態として1回、湿潤状態として5回行った。湿潤状態とは、精製水でガラスビーズ層を飽和にした後、約2時間重力により排水した状態である。各粒径での5回の実験では、実験のたびに前の実験のガラスビーズをアクリル槽から取り出し、新たにガラスビーズをアクリル槽に充填し直した。

不飽和層へ浸透させる液は、始めはKMnO₄溶液(500mg/l)、流出量が一定になってからは精製水とした。不飽和層への液の注入は、上端に挿入した注射針から流量約5.0cm³/minで行った。注射針の先端は、層表面の中心の約3cmの深さにある。この注入位置は、下端の流出口10、11の間の仕切りの真上にあたる。このような浸透条件で、流出口からの流出水を5分間隔で試験管に採水し、流出量、流出濃度を測定した。流出水濃度は585nm吸光度で測定した。また、水みちを写真撮影して、4種の大きさのメッシュで水みちを覆ったときのメッシュの大きさ r と個数 $N(r)$ との関係($N(r)=kr^{-D}$)から、水みちのフラクタル次元 D を求めた。

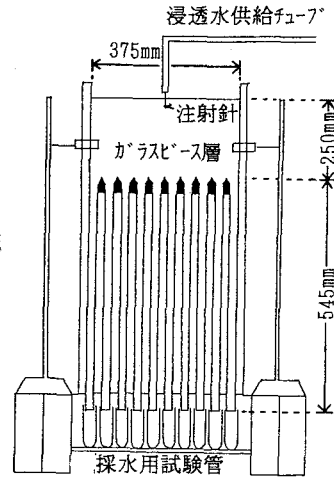


図-1 実験装置概要

3. 実験結果と考察

3.1 流出量の水平分布

乾燥状態の実験結果では、どの粒径でも水はほぼ鉛直に直線状に流れ、水みちの水平方向の広がりは見られなかった。そこで、以下では、湿潤状態の結果のみを検討する。各流出口からの流出量の例を図-2、3に示す。図-2は最小粒径(0.59-0.84mm)、図-3は最大粒径(1.41-1.70mm)での流出量の例である。図-2のように、粒径が小さいときには水は注入位置を中心として左右に正規分布のように広がった。これに対して、粒径が大きいと中心近くの数箇所だけで流出した。これは、粒径が大きいときには線的な一次元的水みちに分岐したためである。図-4には各流出口の中心からの距離と流出比率との関係を示す。この図で流出比率と表現した量は、各位置での流出量の平均値を注入量で除した値である。一つの距離について2箇所の流出口(No.10&11、No.9&12 etc.)があり、同じ粒径で5回の実験を行っているため、データは一つの距離について10個ある。図の値はその10個のデータの平均値である。図-4のように最小粒径(0.59-0.84mm)では比較的水平方向にも広がる

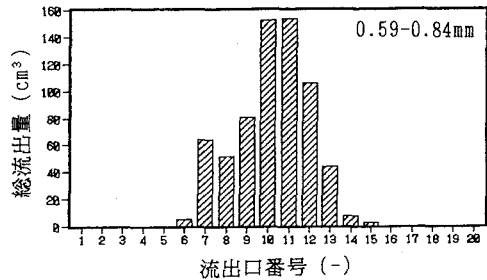


図-2 各流出口からの流出量(1)

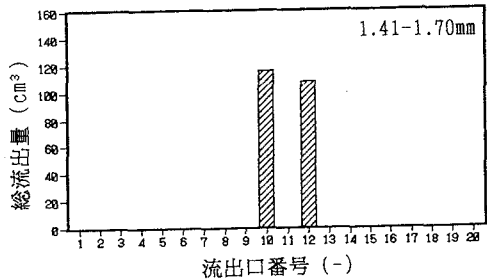


図-3 各流出口からの流出量(2)

が、0.84mmを越える粒径では中心から 3cm以内のところに 90%以上が集中した。しかも、この範囲では3種の粒径による差はそれほどない。また、10個のデータの分散は、最小粒径のときのみ他の1/11-1/6倍ととくに小さくなった。このことは、粒径が0.84mm程度を越えると一次元的な水みちを形成する傾向が強くなることを示している。

3.2 流出量、流出濃度の時間変化

図-5、図-6に最小粒径での流出量と流出 KMnO_4 濃度、図-7に最大粒径での流出 KMnO_4 濃度のそれぞれ時間変化を示す。これらは、図-2、図-3と同じ実験の図である。図-5によると、流量は浸透水の先端が流出口に達した後10分以内で安定している。図-6、図-7によると、濃度は浸透水の先端が流出口に達すると、かなり早く一定濃度になる。つまり、水みちの先端では初期濃度に近い濃度を保っており、流れ方向への拡散は小さいと考えられる。また図-6によると、最小粒径では中心から遠い流出口の濃度が幾分低い。また最小粒径では、水と KMnO_4 の全体の回収率も 93%となった。これに対し、他の粒径では図-7のように中心からの距離による濃度の差はなく、回収率も 96-99%であった。図-8には、平均粒径と各流出口への到達時間との関係を示す。図のように、最小粒径のときは到達時間が他に比べ極端に長くなるが、他の粒径ではほぼ同程度であった。このように、最小粒径では流下過程で層内に留まる時間が長いいため、非可動水への移動の影響で回収率が下がると考えられる。なお、濃度の時間変化に対して、濃度の対数値 ($\ln$ (濃度)) と経過時間、 $\ln$ (濃度) と累加流量との関係の定式化を試みたが、いずれも線形関係は見いだせなかった。

3.3 水みちのフラクタル次元

水みちの範囲を、(a)最小粒径 (0.59-0.84 mm)、(b)最大粒径 (1.41-1.70 mm) の場合について図-9に示す。ただし、この図では特に色の濃いところのみを示している。写真のプリントでは色の薄い水みち部分も判別できるので、フラクタル次元の測定では、より色の薄い部分も含めて水みちとした。図-9によると、粒径が小さいと細かな水みちの集合のようになり水平方向への広がりが大きくなる。これに対し、粒径が大きいとより太い2、3本の水みちとなり、水平方向への広がりが小さくなる。

平均粒径と水みちのフラクタル次元との関係を図-10に示す。図-10によると、粒径が大きいとフラクタル次元は小さくなる。これは、粒径が大きいと水みちがより一次的になることを示す。図-10には、層表面上空数cmから液を滴下したときにできる水みちのフラクタル次元 (坂本康(1992)) も示した。図-10より、上空から滴下しても層中に直接注入しても、水みちは同程度のフ

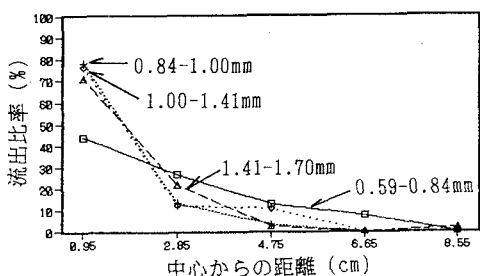


図-4 中心からの距離と流出比率

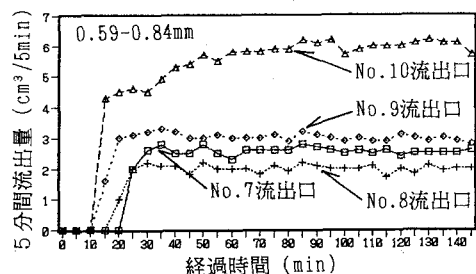


図-5 流出量の時間変化

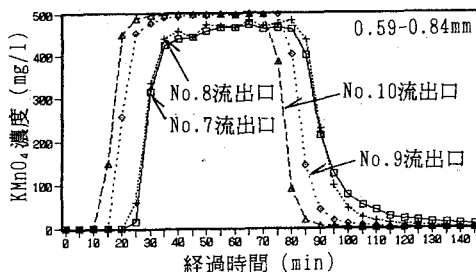


図-6 流出 KMnO_4 濃度の時間変化(1)

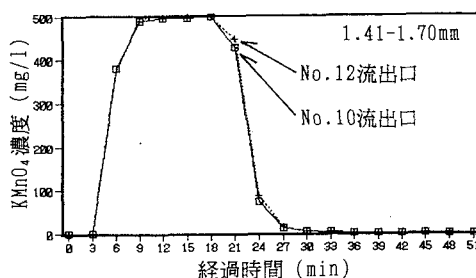


図-7 流出 KMnO_4 濃度の時間変化(2)

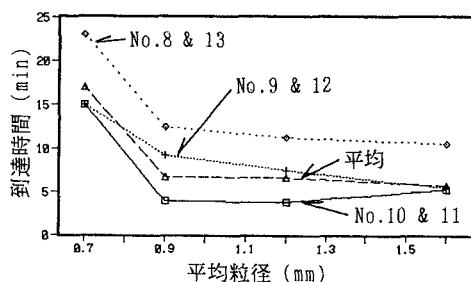


図-8 平均粒径と流出口への到達時間

ラクトル次元になる傾向がある。

4. 水みち流れのシミュレーション方法

4.1 シミュレーションの原理

実験結果から得られた水みち流れの水平方向の広がり
とフラクタル次元をモデルシミュレーションにより再現
することを試みた。対象は、最小粒径 (0.59-0.84 mm)
の層と最大粒径 (1.41-1.70 mm) の層とした。シミュレ
ーションに用いたモデルは著者が「水みち侵入モデル」
と名付けたものである。このモデルでは、不飽和層を細
管のネットワーク (水平・鉛直方向の正方格子状、格子間
隔はビーズ粒径に設定) に置き換える (図-11)。そして、
水みちが次にどの細管に侵入するかを、各細管の「侵入の
しやすさ」の大小で決定する。たとえば、時刻 t で図-11
の●のところに水みちが侵入しているとすると、このとき、
時刻 $t+1$ までに水みちが侵入する可能性がある細管は、図
の○、◎の7箇所につながった細管である。各細管には予
め「侵入のしやすさ」の値が設定してあるので、この値の

最も大きい細管に $t+1$ までに水みちを侵入させる。もし、図-11 で◎につな
がった細管の「侵入のしやすさ」が最大であったとすると、水みちは時刻 $t+1$ までに
◎の点まで侵入する。そして、次の時刻 $t+2$ までに水みちが侵入する可能性が
ある細管は、○と◇の9箇所につながった細管となる。シミュレーションでは、こ
のような水みちの侵入を水みちが20cmの深さに達するまで行う。ここで、「侵入
のしやすさ」の値は、各細管に流れうる流量 (平均流速が管径の二乗と水頭勾配
に比例する管内ポワズユウ流の流量) の値とした。この流量を、毛管力を駆動
力とする流量 F_1 と重力を駆動力とする流量 F_2 に分けて表現すると、水平方向の細管では毛管力のみが駆動力
なので「侵入のしやすさ」の値は F_1 となり、鉛直方向の細管では、毛管力と重力の合力が駆動力なので $F_1 \pm$
 F_2 (下向き流れで+、上向き流れで-) となる。なお、 F_1 、 F_2 はそれぞれ次式である。

$$F_1 = \left(\frac{2\pi\gamma}{8\mu} \right) \cos\alpha \frac{a^3}{l} \quad (1)$$

$$F_2 = \left(\frac{\rho g \pi}{8\mu} \right) a^4 \quad (2)$$

ここに、 a : 細管の半径 [L]、 l : 細管の長さ [L]、 α : 接触角、 γ : 水の表面張力 [M/T²]、 ρ : 水の密度 [M/L³]、
 μ : 水の粘性係数 [M/L/T]、 g : 重力加速度 [L/T²] である。また、鉛直下向きの重力による水頭勾配は1とした。

4.2 シミュレーションの設定条件

細管の大きさは、半径 a はガラスビーズの粒径の0.0775~0.500倍、長さ l は粒径の0.575~1.73倍の範囲
の一様分布と仮定した。この範囲は、六方配列 (細密充填) の場合から六方配列の中に粒子と同じ大きさの
空隙がある場合までの範囲である。個々の細管の a 、 l の値は計算機で作った一様乱数を使って設定した。

毛管力の寄与は、接触角 α の大きさに強く影響される。シミュレーションでは、試行錯誤によりこの値を
87° に設定した。この値は接触角としてはかなり大きな値だが、玉井ら (1987) の研究で推定された接触角と
同程度である。上で設定した細管径分布では、接触角をこれより小さく設定すると、水平移動が大きくなり
実験のような水みち形状を再現できなかった。

シミュレーションではさらに、不飽和層の水分の影響も考慮した。前述の実験では、ガラスビーズ層は一
旦飽和させた後重力により排水した。このため、浸透実験開始前も層中にはある程度水が残っている。この

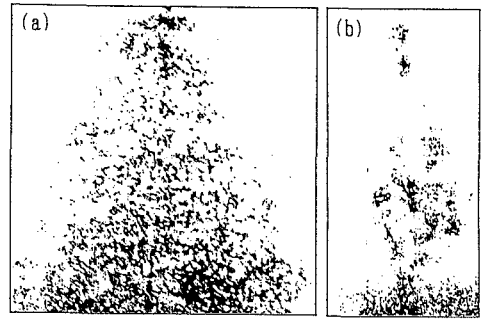


図-9 水みちの範囲 ((a)0.59-0.84mm、
(b)1.41-1.70mm)

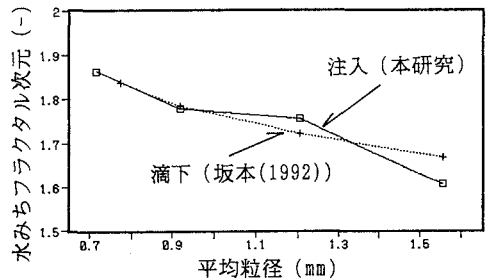
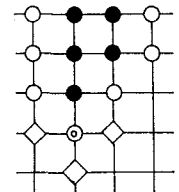


図-10 平均粒径と水みちフラクタル次元



● 水みち侵入位置
図-11 シミュレーション
原理の模式図

水の量を別途求めた水分特性曲線から推定すると、いずれの径でも飽和度で約6%であった。また、この値は深さによらず一定であると推定できた。そこで、大きさが一様分布と設定した細管のうち、小さい方から6%までの範囲にはいる細管には水が残っていると仮定した。そして、この水が残っている細管には優先的に水みちが侵入する（つまり、「侵入のしやすさ」が非常に大きい）と設定した。また、水が残っている細管が複数あるときは、大きな管ほど侵入しやすいとした。なお、シミュレーションは細管の空間分布を替えて（使用する乱数列を替えて）、二種の粒径でそれぞれ6回ずつ行った。

5. シミュレーション結果と考察

5.1 流出量の水平分布

シミュレーションで得られた各流出口の中心からの距離と流出比率との関係を図-12 に示す。流出比率は6回のシミュレーション結果の平均値である。この図は、実験結果の図-4に近い結果となった。実験では粒径が0.84mm程度を越えると一次元的水みちが形成される傾向が強いので、平均粒径とその粒径で想定される重力の寄与と毛管力の寄与の比（ F_2/F_1 ）を、シミュレーションと同じ細管径分布、飽和度、接触角で算出してみた。結果を図-13 に示す。図-13 には、①六方配列（細密充填）の場合（ただし、飽和度約6%のときに水が残っている空隙を除いた、 $a=0.208(d/2)$ ）、②六方配列の中に粒子と同じ大きさの空隙がある場合（ $a=1.000(d/2)$ ）、および③その平均（ $a=0.604(d/2)$ ）について算出した関係を示す。図-13 で y座標が1を越えると重力の寄与が毛管力の寄与より大きくなる。図-13 によると、最小粒径（0.59-0.84 mm）ではどの細管でも毛管力の寄与が重力の寄与よりも大きくなっている。これに対して他の粒径では重力の寄与が大きい管も存在している。このことが、粒径が0.84mm程度を越えると一次元的水みち形成の傾向が強くなる原因と考えられる。

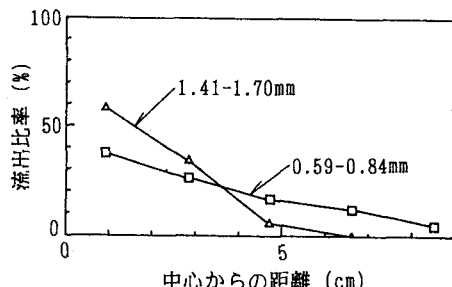


図-12 中心からの距離とシミュレーションでの流出比率

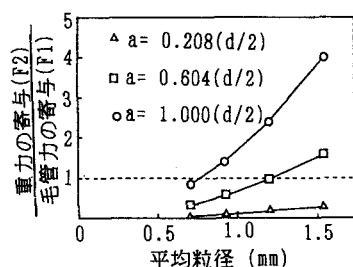


図-13 各粒径での重力と毛管力の寄与の比

5.2 水みちのフラクタル次元

シミュレーションで最小粒径（0.59-0.84 mm）の層にできた水みちを図-14 に示す。図-14 は、(a) 1回目のシミュレーションでできた水みち、(b) 6回のシミュレーションのうち1回でも水みちとなった範囲である。実験でのフラクタル次元は1.86であったが、6回のシミュレーションの平均のフラクタル次元は1.67、(b)の図のフラクタル次元は1.89であった。おなじく、最大粒径（1.41-1.70

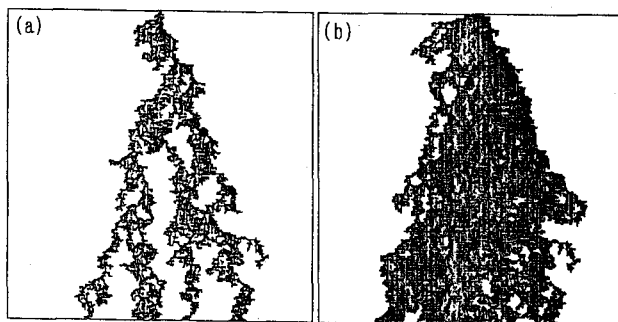


図-14 小さい粒径（0.59-0.84mm）での水みちシミュレーション結果

mm）の層にできた水みちを図-15 に示す。図-15 は、(a) 1回目のシミュレーションでできた水みち、(b) 6回のシミュレーションのうち1回でも水みちとなった範囲、(c) 3回以上水みちとなった範囲を示す。実験でのフラクタル次元は1.61であったが、6回のシミュレーションの平均のフラクタル次元は1.62、(c)のフラクタル次元は1.59であった。また、実験では図-9のように注入針先端近くに色の濃い部分が見られたが、シミュレーションでもその部分が水みちとなることが多かった（図-15 の(c)）。以上の結果、粒径が大きいときには1回のシミュレーションで実験と同じようなフラクタル次元をもつ水みちが再現できた。一方、

粒径が小さいときには複数回のシミュレーションの結果を重ねて作った水みちのフラクタル次元の方が1回のシミュレーションでできる水みちよりも実験結果に近いフラクタル次元になった。これは、シミュレーションでは二次元流れを仮定したが実験では奥行きの影響も現れたためと考えられる。つまり、実験では粒径が小さいときには注射針の先端から奥行き方向にも水が広がり、その状態で水みちができるため、横方向から見ると幾本かの水みちが重なって見え、その結果観測された水みちのフラクタル次元が大きくなったと考えられる。一方粒径が大きいときには、水平方向に移動しにくい奥行き方向への広がりが少なくなる。このため、水みちが奥行き方向で重なることが少ないと考えられる。

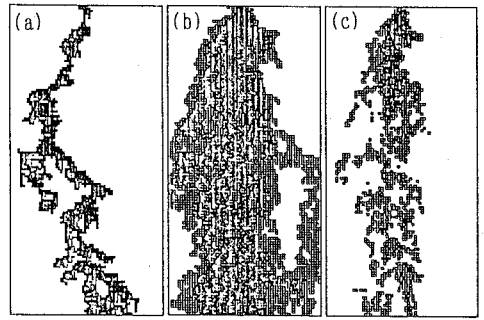


図-15 大きい粒径 (1.41-1.70mm) での水みちシミュレーション結果

6. まとめ

粒径が 0.59-1.70mm の範囲の4種の径のガラスビーズで作った不飽和層を対象に、水みち流れによる溶質移動を実験により検討した。さらに、水みち侵入モデルによる流れのシミュレーションを試みた。得られた主な結果は以下である。

- (1) 流れの水平方向への広がり：粒径が0.84mm以下だと比較的まとまった水平方向へも広がる流れとなる。一方、それより粒径が大きいと分岐した一次元的な水みちとなって中心近くのみを流れた。
- (2) 流出の時間変化：水みち流れでは浸透水の先端での拡散の影響は見られなかった。また、粒径が0.84mm以下だと、各流出口への到達時間が極端に長くなり、また濃度には非可動水の影響も現れてきた。
- (3) 水みちのフラクタル次元：平均粒径が大きくなるにつれ水みちのフラクタル次元は小さくなった。また、層表面への滴下と層中への注入では、水みちのフラクタル次元に大きな差はなかった。
- (4) 水みちのシミュレーション：「水みち侵入モデル」を用いたシミュレーションでは、飽和度を実験条件と同じに設定し、接触角を大きく (87°) 設定すれば実験と同じ水平方向への広がりを再現できる。ただし、水みちのフラクタル次元については、粒径が小さいときには幾本かの水みちが奥行き方向に重なっていると考える必要があった。

本研究の結果、ガラスビーズ層の水みち流れについては、「水みち侵入モデル」が適用できると考えられた。今後はこのモデルのフィルム状物質等を含む層への適用、水みち侵入時の接触角の測定を計画している。

謝辞

本研究の実験の実施においては、山梨大学工学部土木環境工学科卒業生、小滝英達（現、中央リサーチ (株)）西田喜之（現、大林道路(株)）両君の多大なる協力を得た。記して謝意を表したい。

文献

- 坂本康(1992)：不飽和層中の水みち流れのフラクタル次元と水みち侵入モデルによるシミュレーション、水工学論文集、36、447-452。
- 坂本康(1994)：接触角と水分量の影響を考慮した水みち侵入モデルによるシミュレーション、水工学論文集、38、179-184。
- 玉井信行・浅枝隆・田中靖治(1987)：毛管モデルによる不飽和透水係数の評価、土木学会論文集、381(II-7)、75-81
- 東條安匡・田中信寿・松藤敏彦(1993)：廃棄物充填層の二次元不飽和浸透に関する研究、第4回廃棄物学会研究発表会講演論文集、531-534。