

面に沿う流れと浸透量が不飽和層中の 水みち流れに与える影響

Effects of Solid Surface Flow and Percolation Rate on Water Path Flow
through Unsaturated Media

坂本 康*

By Yasushi SAKAMOTO

Effects of surface flow and percolation rate on water path flow through unsaturated media inserted by circle surface were examined. Experimental results showed that convection caused by capillary force go behind obstacle, and that the dispersion of discharge water concentration was influenced by detour water quality. Simulation using 'water path invasion model' could produce similar convection only by considering surface flow effect and showed that realistic percolation rate produces considerable non-percolation zone.

Keywords: water path flow, surface flow, unsaturated medium

1. はじめに

廃棄物層のような混在層では、粒子層の中に流れを妨げる大きな面が存在する。このことが、水移動、溶質移動に大きな影響を与えていると考えられる。このような流れに対して、著者は水みち流れとして扱うことを提案している(坂本(1996)¹⁾)。本報では、円形の面を持つ物質が内在する不飽和粒子層での水みち流れについて、面に沿う流れの影響と浸透量の影響を実験とシミュレーションとによって検討した。本研究では、まず実験により、粒径、浸透量が水みちの浸透域に与える影響を求めた。次に、著者の提案する「水みち侵入モデル」に面に沿う流れと浸透量の影響を加味して、実験結果をシミュレートした。

著者が水みち流れと呼んでいるものは、自然土壌中の流れで注目され、近年盛んに研究されるようになった preferential flow に近い概念である。preferential flow は一般に、1mm 程度以上の径の大きな空隙 (macro pore) や亀裂などの中の流れ(構造的な水みち)と一見均一に見える場に局所的に存在する周辺より空隙率、透水係数、含水率の大きい部分の流れ(非構造的な水みち)などと考えられている(Flury ら(1994)²⁾、Ritsema & Dekker(1994, 1996)^{3, 4)}、Tindall & Vencill(1995)⁵⁾など)。著者が一連の研究で対象としているのは後者の流れである。しかし、この流れに対する視点としては、透水係数などの分布・局所的不均一性による流れという視点ではなく、毛管力の分布のランダム性に起因する capillary fingering (Lenormand(1989a, b)^{6, 7)}) によるフラクタルな流れとして扱っている。そして、このような扱いに適するように、実際の土、廃棄物層よりも極端に理

* 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)

想化した場、見かけ上、より均一な場を対象としている。ただし、現実にはこのようなfingering現象が含水率、透水係数などの分布の本質、原因であり、また現実の水みちの形成の引金となる想定している。また、廃棄物埋立では自然土壌と違って不飽和層の構造制御が埋立時にある程度可能であるため、本研究のような理想化した場での検討結果が埋立の実際の計画に役立つ可能性があると考えている。

2. 浸透流出実験

2.1 実験方法

(a) 実験装置

実験装置の概要を図-1に示す。装置はアクリルで作成した槽（奥行：1.5cm）と4cm間隔に注射針9本がついた浸透液供給装置とからなる。槽はその下部約1/2を19mm間隔の鉛直な仕切り壁で20個（図では簡略化して10個のみ示した）に分けてある。これにより、各位置からの流出水をそれぞれ下端の流出口より別々の試験管に採取できるようにしてある。この仕切り壁は、出口付近にできる飽和部での水平方向の移動を防ぐためのものである。したがって、水平方向の移動は上部約1/2の不飽和層（幅：37.5cm、高さ：40.0cm）でのみ起こる。流出口には左から順にNo. 1-20の番号をつけ、中央がNo. 10、11流出口である。

(b) 実験手順

上記の槽にガラスビーズを詰め（空隙率：38-40%）、さらにガラスビーズ層中に直径10cmの円形板（ポリエチレン容器を輪切りにして内表面に厚さ3mmのゴム板を巻いたもの）を埋め込んで流れに対する障害物とした。円形面の中心は層表面から10cmの深さとした。この層に精製水2リットルを流した後、2時間重力により排水した層を、実験で用いる不飽和層とした。したがって、実験開始前にも層中に非可動水が残留している。実験では、この不飽和層に KMnO_4 溶液（500mg/l）を500ml流し、その後、さらに精製水を流した。この間に、溶液の浸透するようすを写真撮影し、各流出口からの流出水の水量・濃度の時間変化を観測した。

ガラスビーズ層はある程度光を通すので、ガラス面に接した部分だけでなく、内部も含めた水みちのようすが観測できた。流入量は5 or 10 cm^3/min とし、流出水の採水間隔は10分間とした。濃度は585nmの吸光度より求めた。ガラスビーズの径は3種類（0.42-0.84mm、0.84-1.00mm、1.00-1.41mm）設定し、実験は各径につ

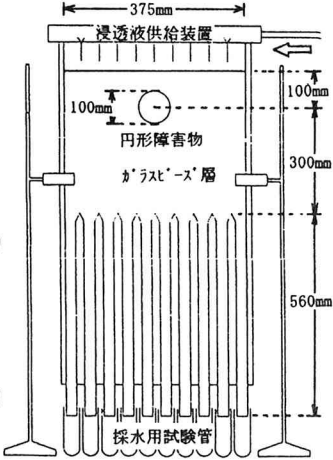


図-1 実験装置概要

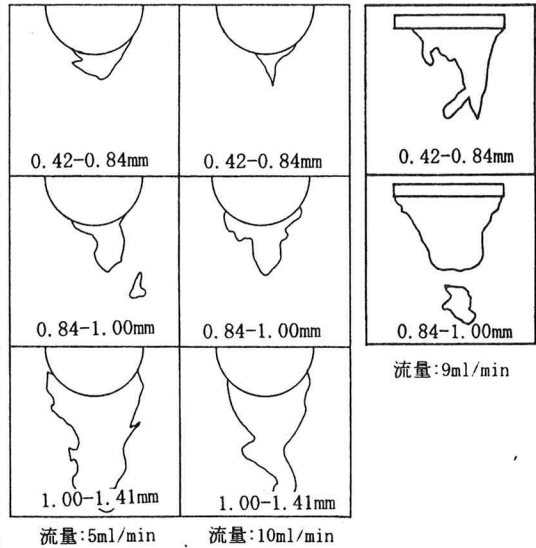


図-2 実験による不浸透域

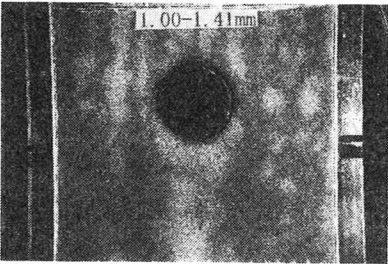
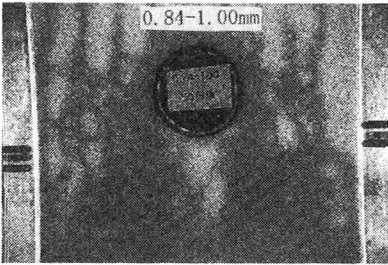
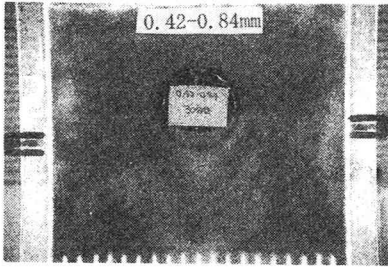


写真-1 円形障害物周辺の水みち流れ

度より求めた。ガラスビーズの径は3種類（0.42-0.84mm、0.84-1.00mm、1.00-1.41mm）設定し、実験は各径につ

いて $5\text{cm}^3/\text{min}$ ($53\text{mm}/\text{h}$)で3回づつ、 $10\text{cm}^3/\text{min}$ ($107\text{mm}/\text{h}$)で5回づつ行い、その都度、ガラスビーズと障害物を充填しなおした。

2.2 実験結果

(a) 不浸透域の形状と大きさ

浸透のようすを写真-1に示す。粒径の大きいときには障害物がなくともフィンガリング状の流れとなるが、この流れが円形面のまわりを迂回して流れるようすが観測できた。各粒径について、写真をトレース紙に写し取り、各実験で浸透した範囲を重ね合わせた。その結果、5回の実験で3回以上、3回の実験で2回以上浸透しない範囲を不浸透域と考えた。この不浸透域を図-2に示す。図には円形面と同じ 10cm の幅を持つ平面で過去に行った実験(浸透量 $9\text{cm}^3/\text{min}$ 、坂本(1996)¹⁾)の結果も示す。図のように、不浸透域は粒径が小さいほど小さくなるが、 $5\text{cm}^3/\text{min}$ と $10\text{cm}^3/\text{min}$ とでは流量による有意な差は見られなかった。また、円形面では平面に比べて不浸透域が小さくなっている。

粒径による差は、粒径が小さいほど毛管力により水平方向の移動が大きくなったためである。しかし、平面と円形面の差違は水平方向の毛管力の差では説明できない。このことから、円形面の上では面に沿う流れが生じている可能性が高いと考えられる。

(b) 流出水の空間分布

総流出量の水平分布を図-3に、ばらつきの分散を図-4に示す。図のように粒径が大きいと障害物下からの流出が少なく、ばらつきも大きい。また図-4のように、粒径が大きいときには浸透量が多いほどばらつきが大きい傾向がある。これは、粒径が大きいと鉛直方向の水みちが得意やすいため水みちになる部分とならない部分が水平位置ではつきりわかれるためである。平面の実験では粒径 $1.00\sim 1.41\text{mm}$ ではNo. 9から12までの流出口からの流出はなかったが、円形面ではここでの流出も観測された。これも、面に沿う流れの影響といえる。

(c) 流出水の時間変動

中央より右側での流出水濃度変化を図-5に、全体の濃度変化を図-6に示す。図のように、障害物の真下(No. 11)では濃度変化が遅く値も低い。図-6では粒径が小さいほど拡散が大きいように見えるが、実際は図-5の障害物下の流出がみかけの拡散を大きくしている。

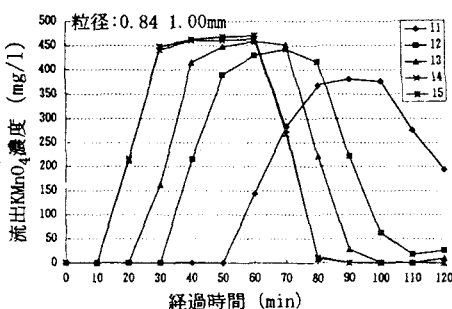


図-5 各流出口の流出水濃度の経時変化

図のように粒子が小さいと障害物直下で遅い流出が起こる。この流出水は、層中の滞留時間が長く非可動水の影響を強く受けるため、濃度上昇も遅い。この流出が、平均濃度変化図の非対称性を生じたと考えられる。ところが、障害物下の流れでは面に沿う流れがあるとき(円形面)とないとき(水平平面)では流出が異なる。したがって、面の方向、形も障害物下の濃度変化、ひいてはみかけの拡散係数に影響する可能性がある。

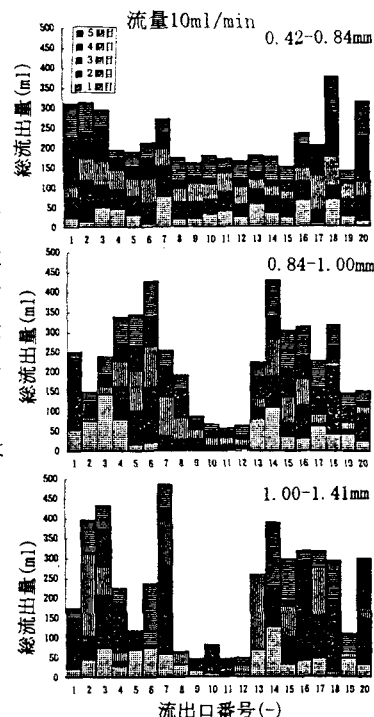


図-3 流出量の水平方向分布

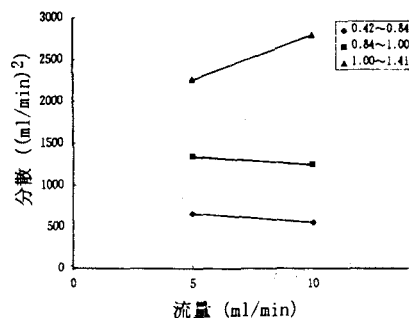


図-4 流出量の水平方向分布の分散

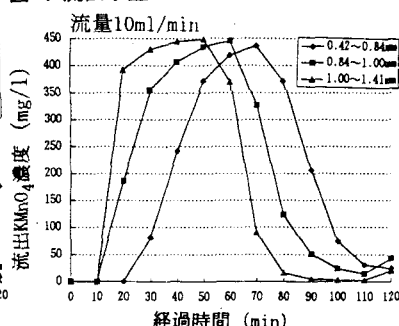


図-6 平均流出水濃度の経時変化

3. 水みち流れのシミュレーション

3.1 シミュレーション方法

(a) 基本原理

「水みち侵入モデル」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-7）。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（坂本(1992)⁸⁾）。たとえば、時刻 t で図-7の●のノード（格子点）に水みちが侵入しているとする。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つのノード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-7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つのノードにつながった細管となる。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ジューユ流の流量）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 と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。

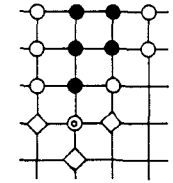


図-7 水みち侵入の模式図

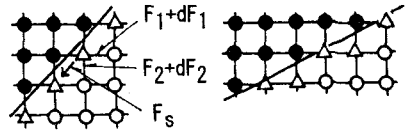


図-8 面に沿う流れの模式図

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ジューユ流の流量）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 と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。

$$F_1 = \left(\frac{2\pi\gamma}{8\mu} \right) \cos\alpha \frac{a^3}{l} \quad (1) \qquad F_2 = \left(\frac{\rho g \pi}{8\mu} \right) a^4 \quad (2)$$

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。以上の原理による水みち侵入のシミュレーションを水みちが26cmの深さに達するまで行った。

(b) 面に沿う流れの効果

シミュレーションでは、面の近くのノードには水が行き易くすることで、面に沿う流れの効果を表現した。図-8の●は面の内側で水が入れないノード、△は面に接したノード、○は面の外側で面に接していないノードである。本研究では、面に接したノード△に接続した管の F_1 、 F_2 を大きくすることで、面の近くに行き易くした。具体的には、 $dF_1 = F_s \cos\theta$ 、 $dF_2 = F_s \sin\theta$ として、 F_1 を $F_1 + dF_1$ で、 F_2 を $F_2 + dF_2$ で置き換えて設定した。ここに、 F_s は面の方向に空隙があるとし、その空隙で想定される流量、 θ は面と水平方向とのなす角である。そして、 F_s は毛管力による流量と重力による流量の和であると仮定して、 $F_s = F_1 + F_2 \sin\theta$ と設定した。つまり、毛管力による流量はそのノードにつながる細管のものと同じに設定し、重力についてはそのノードにつながる細管のものの $\sin\theta$ 倍とした。これは、空隙が傾いているために水頭勾配が $\sin\theta$ 倍になることを考慮したためである。なお、この操作をするノードとしては、水平方向で接するノード（△のうちの各列の左端の一個づつ）だけを対象としたときと、水平・鉛直いずれかで接するすべてのノード（△すべて）を対象としたときの二種を検討した。

(c) 浸透量の効果

本研究のシミュレーション方法では、浸透量の大小は一度に侵入する細管の数の大小に置き換えられる。まず、粒子層表面への給水量を粒子径の幅当たりに直す。たとえば、奥行1.5cmのところに径0.63mm（0.42-0.84mmの平均）の粒子があるときには、給水量を23.8(=15/0.63)で除した量が粒子径の幅当たりの浸透量となる。この量を1つの細管の平均体積で除すと、1秒間に同時に水が侵入する細管の数となる。ただし、細管での1秒当たりの流量（ポワジューユ流の流量）がこれらの細管の総容積より小さいとこれだけの細管に水を侵入させることができない。本シミュレーション条件でこの点を確認したが、各粒子径で細管の流量は1つの細管の体積の50倍以上であったためこの点の問題はなかった。そこで、シミュレーションでは1つの時間ステップで（粒子径の幅当た

りの浸透量) / (細管の平均体積) 個のノードに同時に水みちを侵入させた。

シミュレーションでは、実験で再現できない低流量 (実験では均等な給水ができない流量) も検討するために、実験での値に近い100mm/hの他に 10mm/hでも検討した。100mm/hは1秒間に侵入する細管の個数で表現すると粒径0.42-0.84mm、0.84-1.00mm、1.00-1.41mmでそれぞれ54、26、15 個/secに相当し、10mm/hは同じくそれぞれ5、3、1個/secに相当する。

(d) シミュレーション条件

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倍の範囲の一樣分布と仮定した。個々の細管の a 、 l の値は計算機で作った一樣乱数を使って設定した。接触角 α は過去の研究結果 (坂本(1994)⁹⁾) から87° に設定した。残存非可動水は、水分特性曲線を参考にして、いずれの径でも飽和時の約6%で深さによらず一定であるとした。この水の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。つまり、このシミュレーションでは、初期水分分布も水みち形成に影響する。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)、それぞれ5回づつ行った。

3.2 シミュレーション結果

(a) 面に沿う流れの影響

100mm/hでのシミュレーション結果を図-9、10に示す。図-9は面に沿う流れを考慮しないとき、図-10は考慮したときである。また、面に沿う流れを考慮するときは、水平・鉛直いずれかで接するすべてのノードについて考慮しなければ、考慮しないときとの差が現れなかった。図-2と比較すれば明らかなように、面に沿う流れを考慮すればこのモデルで実験で観測された円形面下の流れをある程度再現できた。このような面に沿う流れの原因としては、面の上での接触角が粒子層中よりも小さいこと、面への付着の効果があること、などが考えられるが、この点は現時点では明らかではない。

(b) 浸透量の影響

浸透量を10mm/hとしたときのシミュレーション結果を図-11に示す。図のように、浸透量10mm/hrでは粒径が小さいときにも不浸透域は大きくなった。これは、浸透量が多いとき、1個の空隙の体積が小さいときには、同一時間で水が侵入する細管数が増えるためである。一般に、毛管力のみによる水平方向の移動は、毛管力と重力の両者が働く鉛直方向の移動よりも起こりにくい。しかし、同一時間で侵入する細管数が増えると、比較的侵入しにくい水平方向へも行かざるをえなくなる。そのため、水平方向の移動も増え、不浸透域が小さくなると考えられる。このような結果から、実際に頻繁に見られる降雨強度程度ではこのような層では水の浸透しない領域がかなり大きくなるとも考えられる。

4. まとめ

流れの障害となる円形面が混在する不飽和粒子層について水みち流れを検討した。実験と「水みち侵入モデル」によるシミュレーションとで得られた主な結果は以下である。

(1) 毛管力による水平方向移流により円形障害物の陰の部分に溶質が浸透する。毛管力によるため、粒径が小さ

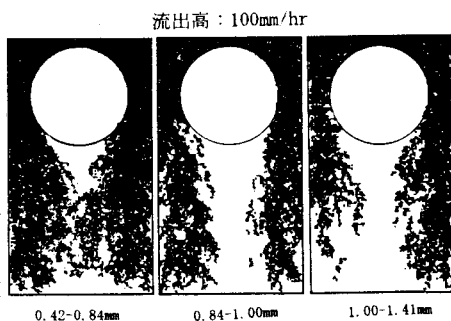


図-9 シミュレーションによる不浸透域 (1)

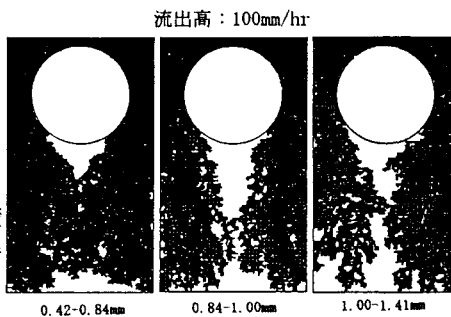


図-10 シミュレーションによる不浸透域 (2)

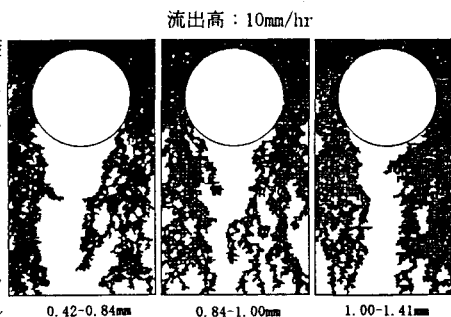


図-11 シミュレーションによる不浸透域 (3)

いほど障害物下への浸透が多くなる。また、円形面では面に沿う流れがあるため、同じ幅の水平平面よりも不浸透域は小さくなる

- (2) 障害物の影響で水みちが形成されるときには、個々の水みちの濃度はそれぞれ異なる。とくに障害物直下の流出では大きく異なるため、障害物によりみかけの拡散係数が大きくなる。障害物直下の流れは面に沿う流れの影響を受ける。このため、面に沿う流れに影響を与える面の角度、形なども流出水質に影響する可能性がある。
- (3) 「水みち侵入モデル」では、面に接したノードに水が行きやすく設定することで、実験で観測された面に沿う流れを再現できる。また、シミュレーションで設定した実際の降雨に近い条件 (10mm/h) では、不浸透域が大きくなるおそれがある。

本研究と過去の研究 (坂本(1996)¹⁾) の結果より、廃棄物層のような大きな面を含む不飽和粒子層中の流れの検討がある程度可能となった。今後の課題は、粒子層の構造をより現実に近いものとして検討すること、面が多数、ランダムに含まれているときの流れを検討することなどである。

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、伊藤康範 (現、西原環境衛生研究所)、津永由行 (現、三井共同建設コンサルタント) 両君の多大なる協力を得た。記して謝意を表したい。

文献

- 1) 坂本康(1996)：不飽和層中の障害物が溶質の移流・拡散に与える影響，水工学論文集，40，443-448.
- 2) Flury, M., Fluhler, H., Jury, W. A. and Leuenberger J. (1994): Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study, Water Resources Research, 30, 7, 1945-1954.
- 3) Ritsema, C. J. and Dekker, L. W. (1994): Soil moisture and dry bulk density patterns in bare dune sands, J. of Hydrology, 154, 107-131.
- 4) Ritsema, C. J. and Dekker, L. W. (1996): Influence of sampling strategy on detecting preferential flow paths in water-repellent sand, J. of Hydrology, 177, 33-45.
- 5) Tindall, J. A. and Vencill, W. K. (1995): Transport of atrazine, 2,4-D, and dicamba through preferential flowpaths in an unsaturated claypan soil near Centralia, Missouri, J. of Hydrology, 166, 37-59.
- 6) Lenormand, R. (1989a): Flow through porous media: limits of fractal patterns, Proc. R. Soc. London, A423, 159-168.
- 7) Lenormand, R. (1989b): Capillary Fingering: Percolation and Fractal Dimension, Transport in Porous Media, 1, 599-612.
- 8) 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.
- 9) 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.