

不飽和層中の障害物が溶質の移流・拡散に与える影響

Effects of an Obstacle Plane on Convection-Dispersion Transport
of Solute through Unsaturated Media

坂本 康*

By Yasushi SAKAMOTO

Effects of an obstacle plane on the convection-dispersion transport of solute through unsaturated media were examined. Experimental results showed that convection caused by capillary force occurred behind the obstacle, and that the concentration of detouring water caused the asymmetrical temporal change of overall discharge concentration of solute. Simulation using 'water path invasion model' could produce similar convection behind the obstacle to that of experiment, and its results showed that infiltration rate and pore size influenced the ratio of immobile water which was cause of solute dispersion.

Keywords: obstacle plane, convection-dispersion transport
unsaturated media, preferential flow

1. はじめに

廃棄物埋立処分場の適正管理には、廃棄物層中での水移動・溶質移動を把握することが重要である。しかし、廃棄物層中にはフィルム状物質などの大きな面を持つ物質が混在しており、これが障害物となって水が移流しない箇所、溶質が拡散しない箇所も多く存在すると予想される。そこで本研究では、そのような場での移流・拡散を簡単な構造の不飽和層で検討した。対象としたのは、擬似二次元不飽和ガラスビーズ粒子層中に流れに対して障害物となる平面が存在する場合である。本研究では、まず実験により、粒子の径、障害物面の角度が移流・拡散に与える影響を検討した。次に、著者の提案する「水みち侵入モデル」^{1,2,3)}で実験結果をシミュレートし、そのシミュレーション結果から、見かけの拡散の原因となる非可動水がどの程度存在するかを検討した。

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。装置はアクリル板で作成した槽（奥行：1.5cm）と4cm間隔に注射針9本をつけた浸透水供給装置とからなる。槽はその下部約2/3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、各水平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

* 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)

に採取できるようにしてある。仕切り壁が長いのは、出口付近にできる飽和部での水平移動を防ぐためである。したがって、本実験で起こりうる水平移動は、上部約 1/3 の不飽和層（幅：37.5cm、高さ：25.0cm）での移動のみとなる。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長さ10cmの板（上面が厚さ10mmのゴム板、下面が厚さ 2mmの亚克力板）を埋め込んで障害物とした。障害物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50分間 KMnO_4 溶液（500mg/l）を流し、その後、さらに精製水を50分間流した。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・

濃度の経時変化を観測した。流入量は約 $9\text{cm}^3/\text{分}$ 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。実験条件として、ガラスビーズの径を3種類（0.42-0.84mm, 0.84-1.00mm, 1.00-1.41mm）、障害物面の水平面に対する角度を3種類（ 0° , 30° , 60° ）設定した。実験は各条件で3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

溶質移動のようすを写真-1, 2, 3に示す。粒径 1.00-1.41mm（写真-3）では水みちに分かれた流れがほぼ鉛直に流れ、障害物の陰の部分には浸透しなかった。一方、0.42-0.84mm（写真-1）、0.84-1.00mm（写真-2）では、陰の部分にまで浸透した。この実験での溶質移動は、水みちを作りながらの移動である。その水みち

が形成されるようすを観察すると、移流が障害物の陰の部分に回り込んでおり、移流と拡散の組合わさった移動と考えられる。

この2種の粒径の場合について、写真像をトレーセ紙に写し取り、各実験で着色した範囲を重ね合わせた。その結果、3回の実験で2回以上着色した範囲を浸透域、1回しか、またはまったく着色しなかった範囲を不浸透域と考えた。これらを図-2に示す。図-2によると、粒径が小さい 0.42-0.84mm のときに、不浸透域が小さくなっている。この粒径による不浸透域の差は水平方向への移流の大きさの差が原因と考えられる。粒径が小さいときは毛管力が大きくなり、毛管力による水平方向の移流により陰の部分への浸透が大きくなったと考えられる。

また、角度 0° , 30° では大きな不浸透域ができたが、角度 60° では不浸透域がかなり小さくなっている。図-2を見ると、角度 60° では障害物の裏側の面に沿った流れが起きている。このように、面の角度が鉛直に近付くと面に沿った流れの影響が大きくなる。

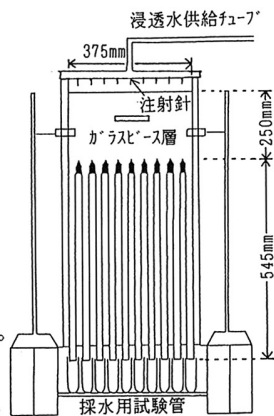


図-1 実験装置概要

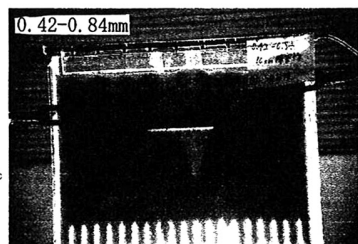


写真-1 障害物周辺の水みち流れ(1)

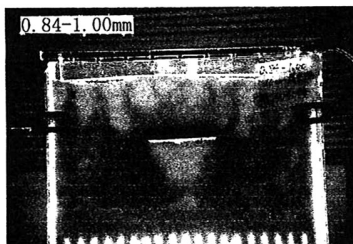


写真-2 障害物周辺の水みち流れ(2)

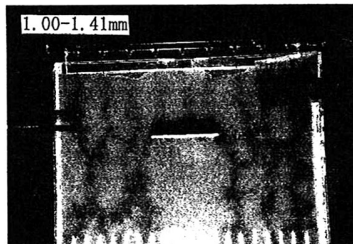


写真-3 障害物周辺の水みち流れ(3)

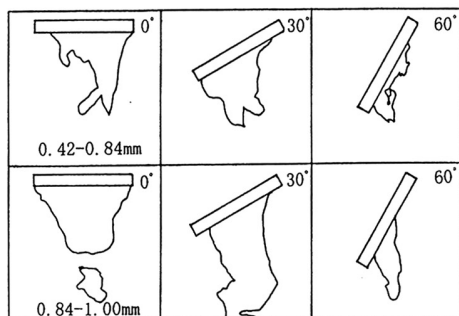


図-2 不浸透域の形状

(b) 流出水量の分布と変動

流出水量の水平方向分布を図-3に示す。各流出口からの流出量のばらつきが大きかったため、図には3つの流出口の流出量を足し合わせた量を全流出量に対する%で示してある。図のように粒径が小さいときには0°のときでも障害物直下からの流出が多い。この結果から、粒子間空隙が小さいときは移流による回り込みが障害物の影響を打ち消すといえる。また、各角度で流出水量の最大値と最小値の差を求めると、この差は30°のときに最も大きくなった。これは、面に沿った流れが30°のときには左方向への移動を強めているのに対し、60°のときには左方向への移動よりも鉛直方向への移動を強めているためと考えられる。

各流出口からの流出量の総和の時間変化を図-4に示す。経過時間には流出口付近の飽和部での流下時間も含まれているため定量的な比較はできないが、定性的な傾向は見て取れる。図によると、粒径が小さいほど流量の増加が遅くなり、減少が緩やかになる。これは、粒子が小さいほど水みち流下速度が小さくなるためと考えられる。

(c) 流出水濃度の分布と変動

障害物の角度0°のときの流出水濃度の水平方向分布を図-5に示す。図の濃度は、KMnO₄溶液（500mg/l）50分間、精製水50分間の全実験期間の平均濃度である。そのため、流出水濃度はいずれの流出口でも流入濃度の1/2、約250mg/lになると予想された。しかし、粒径が大きいときには位置によってはこの値との差が大きく、ばらつきも大きくなった。実験の前半のKMnO₄溶液の浸透・流出は水みちを作りながらの流出であるのに対して、後半の精製水の浸透・流出は出来上がった水みちに沿った流出である。水みちを作りながらの流出では、実験前の残存水との接触の程度、袋小路部の形成の程度が各水みち毎に異なる。このため、異なる水みち、異なる流出口からの流出水では濃度差も大きい。この差が、図-5に示した流出全体で濃度差を生じたと考えられる。粒子が小さいときにもこの水みちによる差は考えられるが、粒子が小さいときは水みち同士がお互いに干渉しあい濃度が均一化されると考えられる。

全流出口の流出水濃度の平均値について経時変化を図-6（0°の例）に示す。これも飽和部の影響が考えられるが、全体としては粒径が小さいほど濃度の上昇が遅くなるといえる。また、粒径が小さいときは経時変化の図は左右非対称になっている。障害物の影響、水みちの影響を考慮しないでこの結果を解釈しようとすると、「粒径が大きいほど流速が大きく、その結果機械的分散も大きくなり濃度の上昇が早く起きる。」

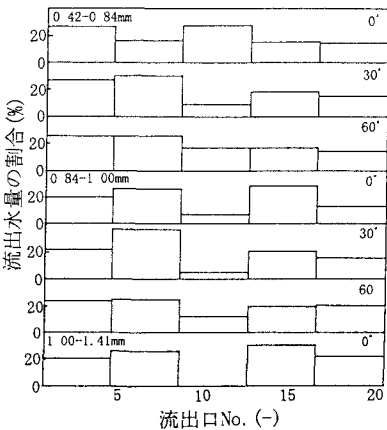


図-3 流出水量の水平方向分布

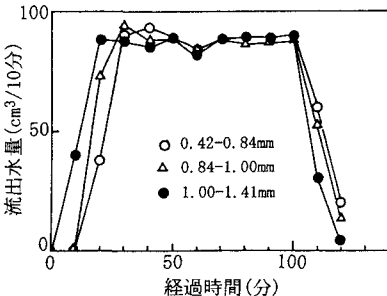


図-4 流出水量の経時変化

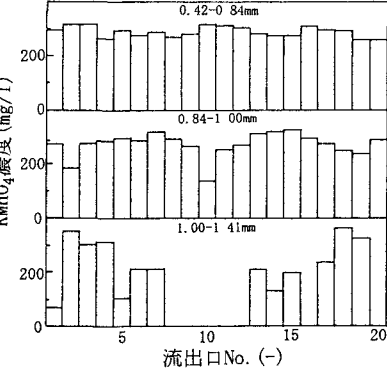


図-5 流出水濃度の水平方向分布

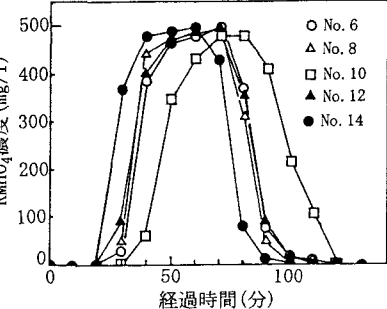


図-7 各流出口の流出水濃度の経時変化

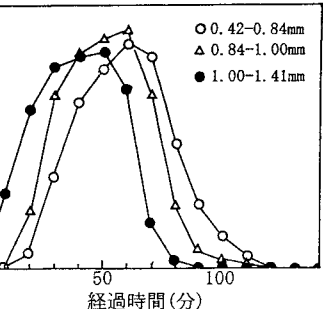


図-6 平均流出水濃度の経時変化

粒径が小さいと非可動水の影響が大きくなり経時変化が非対称となる。」と考えられる。しかし、粒径が大きいときは前述のように水みち毎の濃度差が大きく、実際はこの差が全体でのみかけの分散・拡散を大きくしていると考えられる。また、粒径が小さいときの経時変化の非対称性も、障害物と水みちの影響であることが図-7より分かる。図-7は粒子が小さいときの各流出口毎の濃度変化である。図のように、粒子が小さいと障害物直下(No. 10)では濃度上昇が遅くかつ分散・拡散の大きい流出が起こる。これは、この部分に流出する水は層中の移動距離、滞留時間が長く、そのために非可動水の影響を強く受けるためである。流出水全体の平均濃度の経時変化の非対称性は、この障害物直下からの流出が他の流出よりも遅く起きるためと考えられる。今回の実験では、故意に障害物を混入した。しかし、障害物をいれる意図がなくても、実験槽への充填時に障害物に相当するような浸透しにくい部分を作ってしまうことが往々にしてある。その結果、上記の障害物の影響と同様な濃度変化を生じるおそれがある。流れが可視化できない実験方法では、この点に特に注意する必要がある。

3. 水みち流れのシミュレーション

3.1 目的

水みち流れが生じる場合、不飽和層中での分散・拡散には、①水みち中の水、つまり可動水中での分散・拡散と、②可動水と非可動水との間の濃度差による拡散の2種が考えられる。従来の研究ではこれらを分けることができなかった。上記の実験結果では、水みち毎の濃度差が大きく、その原因としては②の影響が大きいと考えられる。本実験条件では、水みちと非可動水の関係は図-8のように考えられる。まず、層を一旦飽和にしたあと排水して不飽和層としたため、実験開始前に層中に非可動水(A1、A2)が個々に孤立した水塊として存在する。これを残存非可動水と呼んでおく。この層へ水(図の斜線部)を浸透させると、残存非可動水の一部(A2)は水みちとなる。この過程で、残存非可動水により水みち中の溶質水は希釈される。一方、水みちが形成される過程で、水みち内に袋小路部分(B)ができる。水みち完成後はこの部分も非可動水となる。この水みち形成で新たにできた非可動水を袋小路非可動水と呼んでおく。この非可動水(B)は水みち形成初期の高い濃度を保つ。そして、可動水が溶質水から精製水にかわったときには、袋小路非可動水の濃度が可動水濃度よりも高くなるため、非可動水から可動水への溶質移動が起こる。本実験条件では、このような水みちの可動水と非可動水との関係が不飽和層全体での分散・拡散を評価する上で重要である。しかし、非可動水の量と分布を実験的に求めることは困難である。そこで、著者の「水みち侵入モデル」を用いたシミュレーションで、非可動水の存在量を検討することとした。

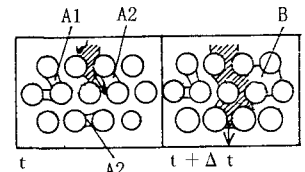


図-8 水みちと非可動水の関係

3.2 シミュレーション方法

(a) 基本原理

「水みち侵入モデル」^{1,2)}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、格子間隔をビーズ粒径に設定)に置き換える(図-9)。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-9の●のところには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-9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。ここで、「侵入のしやすさ」の値としては、各細管に流れうる流量を採用した。また、この流量として、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を仮定した。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

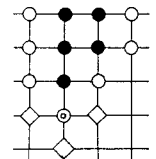


図-9 水みち侵入の模式図

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 $F_1 \pm F_2$ （下向き流れて+、上向き流れて-）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と仮定した。以上の原理による水みち形成のシミュレーションを、水みちが20cmの深さに達するまで行った。

(b) シミュレーション条件

細管半径 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^{1,2)}の一様分布と仮定した。個々の細管の a 、 l の値は計算機で作った一様乱数を使って設定した。シミュレーションは各粒径で6回ずつ行った。各シミュレーションでは、使用する乱数列、つまり細管の大きさの空間分布をかえた。接触角 α は過去の研究結果²⁾から87°に設定した。残存非可動水は、水分特性曲線と実験条件の比較に基づき、飽和度の約6%で深さによらず一定とした。また、残存非可動水のあ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。

(c) 袋小路部の判定

水みち形成後の非可動水を求めるために、水みちの中で袋小路となる部分を求めた。袋小路部は、水の侵入した位置（図-10の●、○）のうち、幅が1あるいは2メッシュで、上下左右4方向のうち1方向だけが水みち本体●に接している部分（○A1、A2）とした。また、2方向に水があるが、一方は水みち本体ではなく袋小路になっている部分（○B）もまた袋小路非可動水とした。

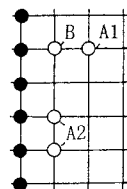


図-10 袋小路部の模式図

3.3 シミュレーション結果

(a) 不浸透域の再現性

「水みち侵入モデル」が障害物のないときの水みち流れを再現できることは、実験とシミュレーションの水みちのフラクタル次元の比較により既報^{1,2,3)}中で確認してある。本実験条件のような障害物があるときにも適用できることの確認として、シミュレーションで得られた不浸透域と実験で得られた不浸透域とを比較することにした。本実験では、実験毎に場のランダム性が異なる。そのため、個々の実験とシミュレーションを直接比較することはできない。そこで不浸透域として、実験では3回中の2回の共通部分（図-2）、シミュレーションでは6回中の2回以上の共通部分（図-11）を図にして比較した。図-11



図-11 水みちシミュレーション

の黒い部分は、6回のシミュレーションのうち2回以上浸透域となった部分である。ランダムな現象の比較であり統計的検討も行っていないため厳密さには欠けるが、両図の比較からシミュレーション結果は実験結果に似ているといえる。このことと既報の結果から、このシミュレーション方法は妥当と判断した。そこで、シミュレーションした水みちで非可動水量がどの程度になるかを求めた。

(b) 非可動水

代表的なシミュレーション例で水みちとその周りの袋

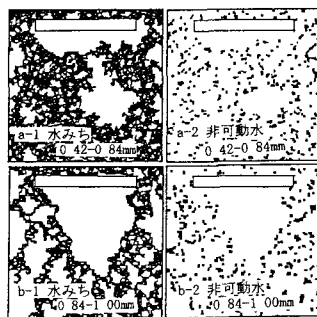


図-12 非可動水シミュレーション

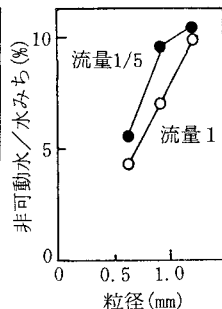


図-13 粒径と非可動水比率

小路非可動水を図-12 に示す。また非可動水部面積の水みち部面積に対する比率（6回のシミュレーションの平均値）を図-13に示す。図には実験の1/5の流量（実験では均等な給水ができない流量）での結果も示す。ここで袋小路非可動水としたのは図-10 のように、幅が1、あるいは2メッシュ分の細い袋小路だけである。しかし、それだけでも非可動水量が水みち量の10%程度にもものぼることが分かる。また図-13 のように、流量が大きく、粒径が小さいほど非可動水の比率が小さくなる傾向がある。これは、流量が大ききとき、および空隙の体積が小さいときには、同一時間で水が侵入する空隙数が多くなるためと考えられる。水が侵入する空隙数が多いと、水みち形成途中で一旦袋小路になった部分にも水が侵入せざるをえず、その結果、袋小路非可動水の可動化が起きやすくなるためと考えられる。以上のような粒径、流量による非可動水量の比率の相違は、不飽和層全体の見かけの分散・拡散係数にも影響すると考えられる。

4. まとめ

流れの障害となる平面が混在する不飽和粒子層について、移流・拡散による溶質移動を検討した。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障害物の陰の部分に溶質が浸透する。毛管力によるため、空隙が小さいほどこの効果は大きい。
- (2) 面が鉛直に近くなると面にそった流れの影響が強くなる。
- (3) 障害物の影響で水みちが形成されるときには、非可動水との接触が水みち毎に違うため、個々の水みちの濃度はそれぞれ異なる。粒径が小さいと、水みちがお互いに干渉しあい、この濃度差は小さくなる。
- (4) 各水みちの流出水量変化・濃度変化の差により、平均流出水濃度の時間変化の非対称性、つまり拡散の非対称性が生じる。
- (5) 「水みち侵入モデル」によるシミュレーションで障害物の陰への流れが再現できる。シミュレーション結果によると、このような流れでは、空隙の大きさ、流量が非可動水の量を左右する。空隙が小さいとき、流量が大ききときには水の流れる空隙数が増えるため、非可動水の比率が小さくなる。

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、佐々木恭（現、名古屋大学大学院）、中神賢上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(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.
- 2) 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.
- 3) 坂本康(1995): 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、水工学論文集、39、337-342.