

地下水位の変化に伴う毛管帯における 物質の挙動

The Behavior Ions in the Capillary Zone with
the Changes in Water Level

唐 常源*・新藤 静夫**

Chang-yuan TANG and Shizuo SHINDOU

I はじめに

地中に埋め立てられた廃棄物あるいは農作物への施肥に起因する汚染物質が不飽和帯を経て地下水に移動、拡散して行く過程を追跡し、その機構を明らかにする研究は最近多くなされるようになり、種々の重要な指摘がなされている。これらは、地下水の位置を常に固定して考え、上部から下部への水の浸透過程という条件での物質の移動を取り扱ったものが多い。しかし、地下水位は人為的な要因あるいは自然的な要因によって絶えず変化し、それとともに毛管帯も絶えず変動しているため、上記の条件でのみの研究は充分ではない。

Buckingham (1907) によって導入された毛管ポテンシャルは、土壤水の運動をエネルギー概念によって解析しようとした最初の物理量である。とくに、Schofield (1935) によって土壤水の pF が提唱されるにおよんで、エネルギー概念による運動学的研究は一段と進歩をみるにいたった。

開発 (1984) は不飽和砂の水分特性曲線とそのヒステリシス、毛管水縁の発達、不飽和透水係数について調べ、間隙封入空気の状態の影響を考慮した不飽和砂の保水性、透水性について物理的に検討した。

一方、寺沢 (1963) は畑土壤中の物質移動に対して次のことを指摘した。即ち、土壤中の可溶性成分は溶媒としての土壤水中に溶存し、しかも土壤水の運動に伴って溶存塩類が移動する。土壤コロイドは塩類を保持する特性を有するから、可溶性成分はすべて水の運動に伴って移動に参加し得ず、又強く保持された水に溶存する塩類は、その水の中であって、土壤中に保持されると述べている。鈴木ら (1982) は重水を利用して、土壤中の物質移動を調べた。彼らの研究結果から、畑地における土壤表面から浸透する水の動きについては、均一土壤モデルにおいて、水の浸透の伴うピストン流が主であることが認められた。飯塚 (1981) は豊平埴壤土と西の里砂壤土を主として供試したカラム実験によって、土壤中の水の塩について述べた。彼の研究から、アドベクションによる塩類の移動では、流量と塩の移動はほぼ直線関係にあり、塩の移動は土壤の透水性によって左右されていることがわかった。

しかし、毛管帯中の物質も毛管帯の上下に伴って移動、拡散し続けているはずである。本研究の主な目的はこの機構を明らかにすることにある。

勿論、このような目的を達成するためには、その前に解決しておかなければならない問題も多い。中でも、地下水位の変動に伴う毛管帯での水

* 筑波大学・院・地球科学研究科 ** 筑波大学地球科学系

(1985年7月20日受理)

分のヒステリシス現象は土中における物質の挙動を把握する上で欠くことの出来ないものである。そこで、本研究ではこの点についても追究することとした。

II 実験方法

1. 実験装置

第1図に示したのは本研究で使われた実験装置である。本装置は二つのカラムから構成されており、カラム I は直径20cm、長さ100 cm、カラム II は直径3 cm、長さ180 cmである。カラム I は土壤水分の鉛直分布を知るために使用し、カラム II は土壤における物質の移動を調べるために用いた。両者とも豊浦標準砂を充填した。カラムの底は砂が流出しないように実験用のろ紙を敷いた。そこに土壤試料が均一に詰まるように、土壤の充填は水締め方式で行なった。測定項目は、圧力水頭、水位、電気伝導度、塩素イオン濃度、染料濃度などである。

カラム I に高さが30, 50, 70, 90, 110 cm の5カ所にテンシオメータを設置した。水位を上昇させる場合には、先端に注射針をつけたチューブで

上部タンクから水を集水タンクへ注入した。上部タンク内の水位から注射針までの高さをコントロールすることによって、水位上昇の速度を一定にすることができる。同様に、水位を降下させる場合には、集水タンクから水を汲み出し、水位降下の速度を一定にする。

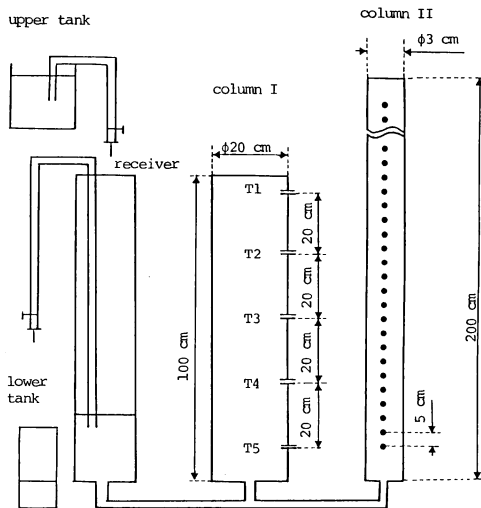
カラム II に5 cm ごとに、穴をあけ、そこに脱着可能なゴム栓がセットされている。カラムに一定の水位を設定しておき、約48時間経てから、カラム II 中の水面上からの高さ30cmのところへ NaCl 溶液単独の場合と NaCl と染料 (Acid miling Green) の混合溶液の場合に分け、注射針でそれを30ml 注入した。24時間後に、実験を開始した。実験で使用したトレーサー濃度は、NaCl 溶液単独の場合は NaCl と蒸留水との比は0.5 g 対100 g であり、NaCl と染料の混合溶液の場合は、染料と NaCl と蒸留水との比は0.3 g 対0.5 g 対100 g である。採水は水位が10~15cm 上昇あるいは降下するたびに行なった。塩素イオン測定するために、電気化学計器株式会社製の model WC-10 イオンメータを利用した。電気伝導度の測定はサンプルの温度を変化させないように行なった。染料濃度は滴定法と比色法を用いて測定した。

2. 土壤試料の物理特性

本研究ではなるべく均一な土壤を選ぶために、豊浦標準砂を用いた。第1表に変水位透水試験によって得られた飽和透水係数と、飽和土壤試料から求めた間隙率の値、及び中央粒径を示す。

第1表 土壤試料の物理特性
Table 1 Physical properties of experimental soil.

material	sand
median diameter (mm)	0.15
saturated hydraulic conductivity (cm/sec)	0.022
specific gravity	2.50
porosity (%)	57



T1, T2, T3, T4, T5 : tensiometer

第1図 実験装置の概要

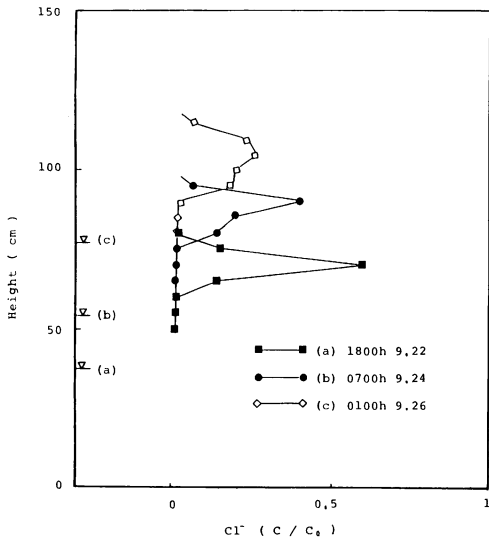
III 実験結果

本研究では、浸透水の影響のない条件を考え、

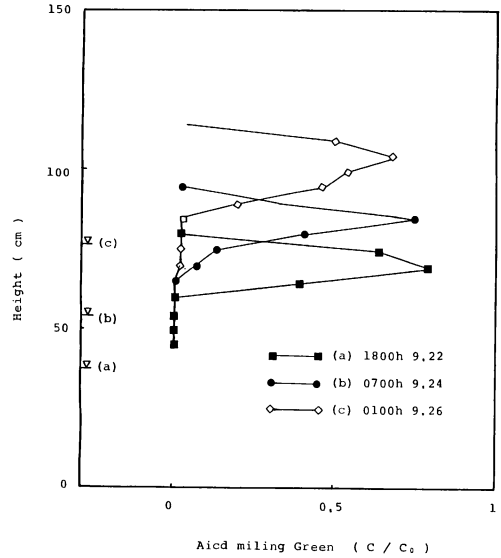
地下水位の変化のみを前提条件として行なった。

第2図、第3図、第4図及び第5図は9月22日から10月3日まで行なわれたNaClと染料の混合溶液トレーサー実験の結果を示している。ここで、実験開始時の水位は40cm、上昇させた一番高い水位は95cm、実験完了のときの水位は45cmである。

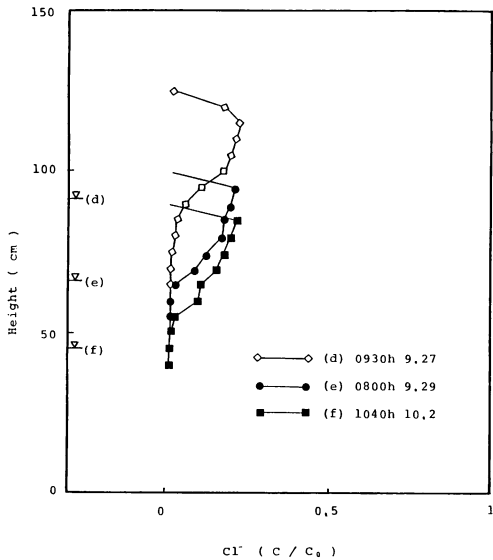
実験の期間内での水位の上昇速度は0.5cm/hr、水位の降下速度は0.25cm/hrである。第2図と第4図を比較すると、水位上昇時には、塩素イオン濃度と染料濃度ともピーク濃度が低く、分布幅が広くできた。しかし、9月22日18時での塩素イオンのピーク濃度の位置は染料のピーク濃度の位置



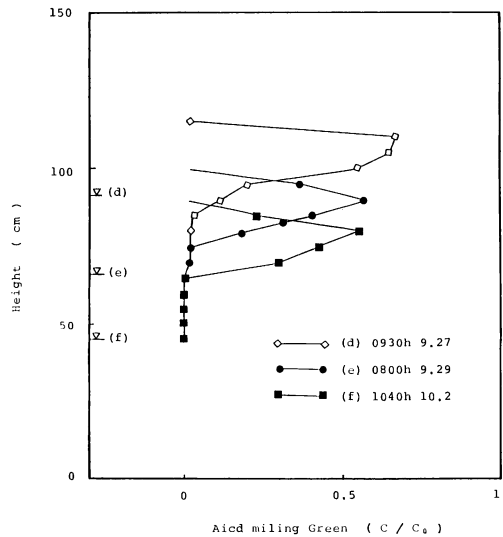
第2図 水位上昇時の塩素イオン濃度の経時変化



第4図 水位上昇時の染料濃度の経時変化



第3図 水位降下時の塩素イオン濃度の経時変化



第5図 水位降下時の染料濃度の経時変化

と同じであるのに対して、9月24日7時での塩素イオンのピーク濃度の位置は染料のピーク濃度の位置より5cm上のところにあることがわかる。これは同じような水分分布の場合に塩素イオンの移動速度は染料の移動速度より速いことを示す。一方、第3図と第5図を比較すると、水位降下につれて、塩素イオンの濃度変化パターンは染料の濃度変化パターンと違うことがわかる。塩素イオン及び染料の分布幅の変化を見てみると、9月27日9時30分での塩素イオンの分布幅と染料の分布幅はともに20cmであるのに対して、10月2日10時40分での塩素イオンの分布幅は35cm、染料の分布幅は25cmとなり、その差は10cmであることが分る。つまり、塩素イオンの移動速度は染料の移動速度より速いだけでなく、塩素イオンの分布幅の拡大速度も染料より速いことが示されている。

IV 考 察

1. 水位の変動と毛管帯の発達

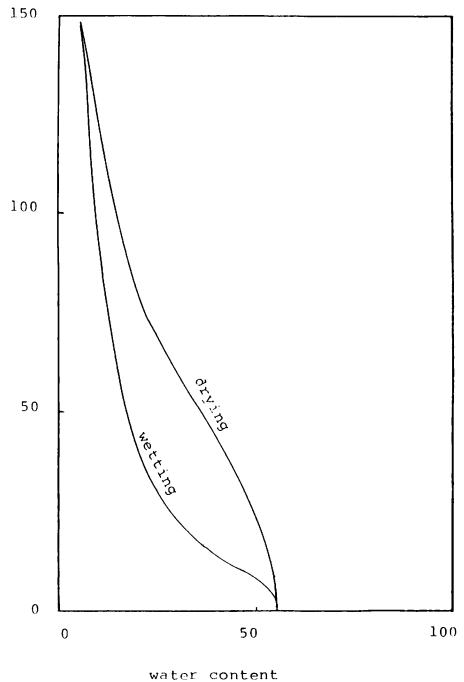
周知のように、毛管帯の発達水位の上昇または降下によって異なる。第6図に示したのは本研究で使われた豊浦標準砂の水分特性曲線である。排水曲線は吸引法で得られたデータのもとに求めたものであり、吸水曲線は Mualen の改良式を利用して求めたものである。

水分特性曲線は、当然のことながら、あるポテンシャルで保持されている体積含水率を示すものであるが、毛管ポテンシャルで保持されている体積含水率を知るために、pF～比水分容量曲線を利用した方がよい。比水分容量 $C(\theta)$ (Specific water capacity) を次のように定義している。

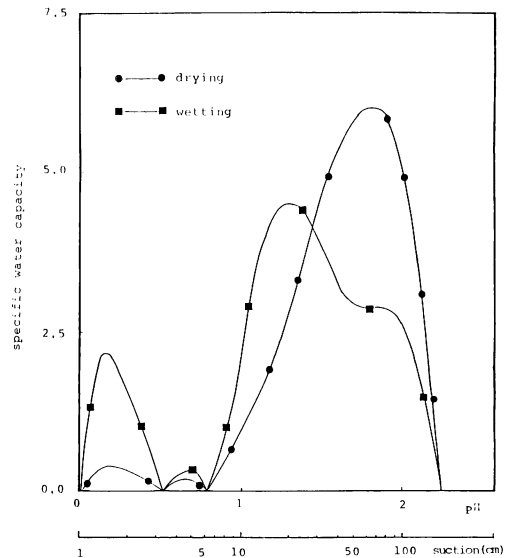
$$C(\theta) = -\frac{d\theta}{d\psi} \quad (1)$$

ここで、 $d\psi$ はサクションの変化量、 $d\theta$ はそれに対する体積含水率の変化量である。

第7図は、第6図のもとに得られた排水過程および吸水過程での pF～比水分容量曲線を表わしている。これを見ると、排水過程での pF～比水分容量曲線は吸水過程での pF～比水分容量曲線と異なることが明らかである。



第6図 土壌試料の水分特性曲線



第7図 pF～比水分容量曲線

まず、第7図中の排水過程での pF～比水分容量曲線を見ると、吸引圧力水頭の値が50～60cmに相当するところで、比水分容量 $C(\theta)$ は著しく大

きな値を示しており、吸引圧力水頭が55cmになるところにそのピークが見られる。このことは、この値の近くの吸引圧力水頭に相当する毛管ポテンシャルによって、保持されている水分が集中して存在していることを示しているものである。逆の観点から見れば、間げき内でこの水頭値に相当する毛管ポテンシャルで保持されている水は、その水頭値で表わせれる大きさの吸引圧力が作用すると、容易に移動することを意味する。体積含水率30パーセント以上の水分領域に相当する水分が間げきの毛管性にに基づく毛管ポテンシャルによって保持されているのに対して、体積含水率が30パーセント以下に相当する水分は砂粒子の表面のもっている保水能、すなわち、毛管ポテンシャルによって、保持されていることを示すものである。

吸水過程での pF ～比水分容量曲線を見ると、サクシヨンの値は15～25cmに相当するところで、比水分容量 $C(\%)$ は一番大きなピークを示しており、その最大値はサクシヨンの値が約20cmになるところを表わしている。つまり、このことは、その最大値の近くのサクシヨンの値に相当する毛管ポテンシャルによって保持されている水分が集中して存在していることを意味するものである。そこに、体積含水率30パーセント以上の水分領域に相当する水分が間げきの毛管性にに基づく毛管ポテンシャルによって保持されている。

上述したことから、明らかなように排水過程での pF ～比水分容量曲線の中で一番大きなピークに対応するサクシヨンの値は吸水過程でのそれと異なるにもかかわらず、それらの値とも体積含水率30パーセント以上の水分領域に相当する水分が保持されている間げきの毛管性にに基づく毛管ポテンシャルである。これは土壤における物質の移動に大きな影響を及ぼすものである。つまり、同一なサクシヨンの値に対して、排水過程の場合での移動しやすい水分量と吸水過程の場合でのその水分量は異なるので、そこでの物質移動のパターンも違ってくる。

2. 毛管帯での水の移動に伴う物質の移動
土壤中の物質移動に影響を及ぼす毛管帯の役割を

論じる場合に明らかなように排水過程と吸水過程によって、毛管帯での水分分布は違うので、そこにおける物質移動の形も異なる。

まず吸水過程について述べる。第2図および第4図では、水位の上昇につれて塩素イオン及び染料の濃度変化が示された。全体を見ると、水位の上昇につれて、ピーク濃度はだんだん低下しながら、分布の幅は拡大してきた。これらの変化はすべて毛管帯の中で発生していたものである。そのとき、水位が上がるほど、水位とトレーサーのピークがあらわれている位置との距離はだんだん小さくなっていく。第2図を見ると、わかるように9月22日18時での水位は35cm、塩素イオンのピークの位置は70cmである。その間の差は35cmである。9月24日7時での水位は58cmであり、それに対する塩素イオンのピークの位置は90cmであり、その差は32cmである。さらに、9月26日1時での水位は80cm、塩素イオンのピークの位置は105cmでありその間の差は25cmまで縮小された。このような変化のパターンはいままで行なわれたほとんどの実験の結果に認められる。

本実験では、吸水過程の場合に毛管帯での水分は主に吸引法から求められた相当間げき径約0.2mm中で集中している。それに対応するサクシヨンの値は17～20cmである。つまり、サクシヨンの値がこれより小さくなると、水は土壤へ大量に浸み込んで、水分は相対的に移動しやすくなっていく。一方、土壤における物質の移動は土壤中の移動しやすい水分によって、大きく左右されている。実験結果及びシミュレーションの結果によると、サクシヨンの値が大きい場合には、物質移動は主に拡散の影響を受ける。サクシヨンがある値に達してからは、水分が移動できることになり、物質移動は主にアドベクシヨンの影響を受ける。サクシヨンの値が小さくなるにつれて、水分の移動は容易になっていくだけでなく、移動可能な水分の量も多くなっていく。そのために、水位上昇につれて水位とトレーサーのピークの位置との距離は小さくなり、物質は移流によって混合したり、拡散したりして、そのピーク濃度は小さくなり、分布

幅も広がる。

水位降下の場合に毛管帯中の水分は排水過程にはいる。第7図で示した排水過程での $pF \sim$ 比水分容量曲線はサクシヨンの値が45cmとなるとともに最大値を持っている。これはサクシヨンの値が45cmより大きくなると、相対的に水分は土壌から多く排出されてしまうことを意味する。第3図と第5図は水位降下時における塩素イオン及び染料の濃度の変化パターンを示している。全体として水位降下につれてトレーサーのピーク濃度及び分布幅はあまり変化しなく、ピストン流のような形で徐々に移動している。一方、第3図および第5図を見ると、そのときの水位とトレーサーのピークの位置との距離の変化の様子は水位上昇のときの様子と逆になっていることがわかる。9月27日9時30分での水位は95cm、塩素イオンのピーク濃度の位置は115cmであり、その差は20cmである。9月29日8時での水位は68cm、塩素イオンのピーク濃度の位置は95cmであり、その差は27cmである。さらに、10月2日10時40分での水位は45cm、塩素イオンの濃度ピークの位置は85cmであり、その差は40cmまで広がっている。つまり水位降下につれてトレーサーの濃度ピークの位置と水位との高度差は大きくなっていく。しかしながら、この差は無限ではなく、あるところで一定となる。この差は比水分容量曲線で表わされたピークに対応するサクシヨンであると考えればよいと思う。

また、水位が変化するときの毛管帯での塩素イオン濃度の変化は染料濃度の変化と比較すると、互に異なる点が存在する。水位降下の場合に、染料の分布幅は変化しないにもかかわらず、そのピーク濃度が低下してくる。これは、土壌が染料を強く吸着し、体積含水率の低い毛管帯の上部に染料は移動しにくくなり、そのまま土壌に残るためである。

V 結 論

地下水位が変化する条件のもとでの毛管帯における水分移動と物質移動に関して、室内カラム実

験を行なった。その結果は次の通りである。

(1) 水位上昇につれて、毛管帯における物質のピーク濃度及び分布幅とも変化する。この分布幅は毛管帯の高さに関係する。水位降下の場合には、毛管帯における物質のピーク濃度及び分布幅があまり変化せず、そこでの物質はピストン流の形で徐々に下に移動する。

(2) 土壌中の物質移動には、土壌水の運動とイオンの可動化が必要である。物質移動は両条件が満たされて初めて具体的に生じる。

(3) $pF \sim$ 比水分容量曲線でもヒステリシス現象を示すことができる。この曲線は水分量のサクシヨンに対する変化量を示すために、そこに現われている最大値は毛管帯における物質に対して大きな意味を持っている。

謝 辞

本研究に際し、御教示いただいた筑波大学地球科学系の田瀬則雄講師、示唆に富む御意見を賜った同地球科学系の古藤田一雄助教授にそれぞれ厚く御礼を申し上げます。そして、筑波大学環境科学研究科流域環境研究室の方々の御協力に対しても深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 天谷孝夫、長堀金造、三野徹(1984)：当面する物質移動の課題。土壌の物理性, **49**, 3~8.
- 飯塚文男(1981)：土壌カラム中の無機塩の移動。土壌の物理性, **44**, 32~43.
- 開発一郎(1984)：不飽和砂の保水性と透水性。日本地下水学会会誌, **26**, 111~120.
- 鈴木大助、寿松木章、栗原淳(1982)：重水利用による土壌中の物質移動の解析。土肥誌, **53**, 467~470.
- 寺沢四郎(1963)：畑土壌の水分の運動に関する研究。農業技術研究所報告B, **13**, 1~115.
- Mualen, Y., (1974), A conceptual of hysteresis. *Water Resour. Res.*, **10** (3), 514~520.
- Mualen, Y., (1984), Prediction of the soil boundary wetting curve. *Soil Sci.*, **137** (6), 379~390.