

大型ライシメータにおける  
不飽和土壌中の水分の鉛直移動特性

Characteristics of Vertical Infiltration through Unsaturated Soil in a Lysimeter

国立公害研究所 水質土壌環境部 大坪国順 K. O t s u b o

1. まえがき

近年、土壌圏の環境劣悪化が深刻な問題となってきた。土壌環境汚染の過程・経路を解明する上で、不飽和土壌中の水分や物質の移動特性の研究は不可欠である。ここ数年、土壌中の物質の挙動に関して、押し出しモデルでは説明できない現象が多く報告されるようになった。例えば、トレーサー物質の浸透に伴う異常に大きな拡散、浸透量のピークより物質濃度のピークが遅れて出現する事実、降雨に対する地下水位の異常に早い応答などである。これらの現象を説明するために、不自然なほど大きい透水係数や分散係数が導入されたり、土壌の不均一性を考慮にいれた「水みち」モデルが提案された<sup>1)・2)</sup>。後者の有効性は論を待たないが、その研究は緒についたばかりである。また、最近、不飽和浸透におけるkinematic wave特性に着目し、この特性を考慮すれば、通常の透水係数や拡散係数だけで、上記の現象は合理的に説明できるという仮説が出された<sup>3)</sup>。しかし、kinematic waveの存在を実証する実験データがなく、様々な議論を呼んでいる。

本研究の目標は、大型ライシメータに充填された淡色黒ぼく土を対象として、不飽和土壌中の水分と物質の鉛直移動特性を十分な精度で実験的に明らかにすることである。具体的には、水分や物質の実質的な鉛直移動速度と水分量分布の移動速度（時空間変化）を特殊なトレーサーや水分計などを用いて測定することにより、両者の移動機構の解明の糸口を見いだそうというものである。

2. 研究の方向

1. 小型浸透実験カラム実験

目的： 大型ライシメータを用いた浸透実験を実施する上での予備知識を得るために、ビーズと淡色黒ぼく土壌を対象として小型カラムによる不飽和浸透実験を行なった。基本的な浸透パターン、トレーサーとして用いる重水(D<sub>2</sub>O)やNaClの適正濃度、D<sub>2</sub>Oのトレーサーとしての有効性、及びトレーサーの検出濃度限界のチェックが主な目的である。

2. 大型ライシメータ浸透実験

目的： 地温、外気温及び湿度等が制御された条件下で、大型ライシメータを用いて現地に近い土壌状態で不飽和鉛直浸透実験を行なう。

不飽和浸透では、水分の実質的な移動と、水分量分布の時空間変化は異なるメカニズムに支配されるという観点に立ち、前者を重水トレーサーにより、後者をサクシオン・メーター（吸引圧計）と水分（電導度）

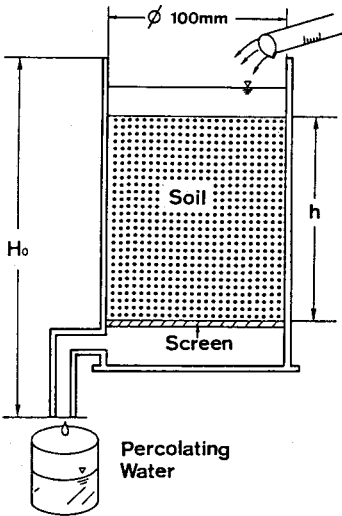


図-1 小型浸透実験カラム

表-1 ビーズ、黒ぼく土の諸元とカラム実験の結果

|           |                     | ビーズ    | 淡色黒ぼく土  |
|-----------|---------------------|--------|---------|
| 試料の高さ     | h(cm)               | 23.1   | 23.3    |
| 試料面積      | A(cm <sup>2</sup> ) | 78.5   | 78.5    |
| 試料体積      | V(cm <sup>3</sup> ) | 1814   | 1830    |
| 水頭差       | H0(cm)              | 50     | 79.5    |
| 透水係数      | k(cm/s)             | 0.027  | 8.9E-05 |
| 平均粒径      | d50(mm)             | 0.326  | 0.455   |
| 標準偏差      | σd(mm)              | 0.08   | 0.477   |
| 比重        | ρ                   | 2.44   | 2.5     |
| 間隙比       | e                   | 0.712  | 2.15    |
| 残存水分量     | Ww(g)               | 425    | 1117    |
| 残存含水比     | w(%)                | 15.825 | 80.07   |
| 重水供給濃度    | C0(ppm)             | 14250  | 14250   |
| ピーク濃度比    | Cmax/C0             | 0.823  | 0.308   |
| ピーク時間係数   | Qmax(l)             | 530    | 1272    |
| 立上り時間係数   | Q10(l)              | 350    | 1072    |
| 終了時間係数    | Q90(l)              | 730    | 1800    |
| 回収率       | (%)                 | 97     | 98      |
| 塩素イオン供給濃度 | C0(ppm)             | 73.2   | 73.2    |
| ピーク濃度比    | Cmax/C0             | 0.814  | 0.28    |
| ピーク時間係数   | Qmax(l)             | 530    | 1722    |
| 立上り時間係数   | Q10(l)              | 350    | 1322    |
| 終了時間係数    | Q90(l)              | 730    | 2022    |
| 回収率       | (%)                 | 98.9   | 112     |

計により、区別して追跡する。

特色： 8カ所で、土壌水位の定期的採水とサクシオン及び電導度の連続計測を実施することにより、土壌層内の水分量の分布や移動特性が把握できる。また、重水をトレーサーとして用いることにより、実際の土壌内での水分移動を正確に追跡できる。

### 3. 装置・測定項目

#### 1. 小型浸透カラム実験

実験に用いた小型浸透カラムの諸元は図-1の様である。表-1の上半分に、ピーズと黒ぼく土の基本的物性、充填状態、カラム内残留水分量などを示す。予備実験での測定項目は、降雨パターン、浸透量の時間変化、浸透水中の重水とNaClの濃度の時間変化及び両トレーサーの回収率である。

#### 2. 大型ライシメータ浸透実験

図-2は環境制御型大型ライシメータ（直径1.7m、高さ2.3m）の説明図である。充填土壌は淡色黒ぼく土壌で、裸地である。表層から35cmまでが作土、それ以下が下層土である。土壌の物性及び充填状況は表-2の様である。地温（18℃）及び室温（日中25℃、夜間20℃）は自動制御される。土壌表層から25cmを皮切りに、鉛直方向に25cmピッチで8地点に水分サンプラー、サクシオンメーター、水分計、地温計が設置されている。最下層を通過した水分は浸透タンクに導かれ、その量が自動記録される。測定項目は、8カ所(25 cm間隔)での重水濃度、サクシオン及び水分量、水質(Cl<sup>-</sup>, etc.)と、最下層での浸透量や浸透水質である。

### 4. 実験の方法・手順

#### 1. 小型浸透カラム実験

実験カラムの初期含水状態は、表-1でいう残留水

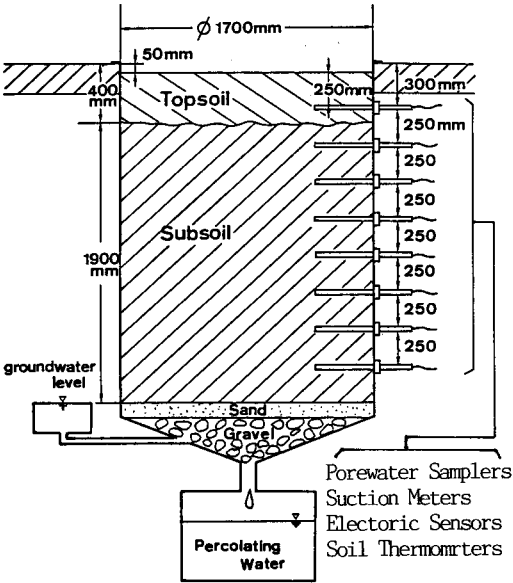


図-2 大型ライシメータの説明図

表-2 ライシメータの諸物性値の鉛直分布

| サンプル |       | Gs   | e    | w(%) | Sr(%) |
|------|-------|------|------|------|-------|
| 東    | 表土    | 2.54 | 2.87 | 67.7 | 64.6  |
| 東    | 18cm  | 2.53 | 2.87 | 72.5 | 64.3  |
| 東    | 50cm  | 2.51 | 2.37 | 86.9 | 93.3  |
| 東    | 75cm  | 2.55 | 2.35 | 85.3 | 92.5  |
| 東    | 100cm | 2.54 | 2.45 | 84.8 | 83.8  |
| 東    | 125cm | 2.56 | 2.28 | 82   | 91.5  |
| 東    | 150cm | 2.57 | 2.42 | 83.1 | 87.6  |
| 東    | 175cm | 2.64 | 2.38 | 83.1 | 89    |
| 西    | 表土    | 2.46 | 2.66 | 67.4 | 64.5  |
| 西    | 18cm  | 2.48 | 2.72 | 73.4 | 68.7  |
| 西    | 50cm  | 2.5  | 2.41 | 86.7 | 91.6  |
| 西    | 75cm  | 2.69 | 2.36 | 86.2 | 93    |
| 西    | 100cm | 2.48 | 2.32 | 85.5 | 93.9  |
| 西    | 125cm | 2.54 | 2.22 | 78.8 | 90.3  |
| 西    | 150cm | 2.73 | 2.04 | 77.9 | 97.5  |
| 西    | 175cm | 2.53 | 2.03 | 78.9 | 99    |

Gs: Specific gravity, e: Void ratio, w: Water content, Sr: Saturating index

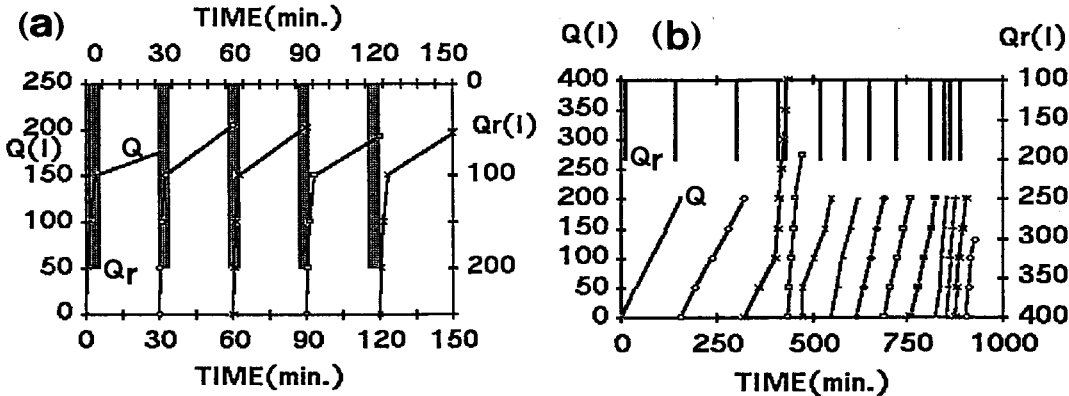


図-3 模擬降雨パターンと浸透量の時間変化

分状態（十分な量の降雨の後、浸透しきった状態）である。模擬降雨  $Q_r(I)$  はパルスの与え、最初の降雨（200ml）にトレーサの重水（14250ppm）とNaCl（73.2 ppm）を混入させた。それ以後の降雨はすべて蒸留水とした。図-3（a）,（b）はビーズと黒ぼく土に対する模擬降雨  $Q_r(I)$  のパターンと浸透量  $Q(I)$  の時間変化を示したものである。ビーズの場合は、降雨後直ちに降雨量（200 ml）に相当する量が浸透し、30分以内に浸透が止まった。そこで30分間隔で降雨を与えた。各降雨に対する浸透パターンはほぼ同じであった。黒ぼく土の場合には、降雨に相当する量が浸透しきった後に次の模擬降雨を与えると、その分は土壌表面に冠水したまま殆ど浸透しない。これは土壌内の存在する空気の影響と考えられる。そこで、表面に冠水していた水がしみこんだ直後に次の模擬降雨  $Q_r(I)$  を与えた。浸透パターンは、各降雨に対して同じとはなっていない。模擬降雨後、浸透水を50mlずつ集め、その所要時間と水質を測定した。

## 2. 大型ライシメータ浸透実験

浸透実験は土壌表面からの蒸散を許す条件で行なった。実験開始第一週に、重水（約14000 ppm）とNaCl（67ppm）を含んだ蒸留水（65 l）を模擬降雨（パルス）として与えた。トレーサの初期濃度は小型カラム実験の結果を参照して決めた。第二週からは、毎週一回、同量の蒸留水をパルスとして与えている。図-4は降雨  $Q_r(I)$  と浸透量  $Q(I)$  の時間変化を示したものである。この浸透パターンが毎週繰り返される。浸透量は約37 l/week、蒸散量は約 28 l/weekである。毎週定時に、8カ所から重水および各種水質の濃度測定用の土壌水を採取する。8カ所的水分計のデータは自動記録させ、サクションは適当な間隔で読みとった。重水濃度は重水分析装置で、 $Cl^-$  を始めとした水質9項目の濃度はオートアナライザーで、 $Na^+$  および  $K^+$  濃度は蛍光光度計で測定した。

## 5. 実験結果

### 1. 小型浸透カラム実験

図-5は浸透水中の重水とNaCl濃度（ppm）の時間変化である。表-1の下半分は、図-5の特徴の要約である。①. ビーズの場合には、重水とNaClはほとんど同じ挙動を示している。回収率も両トレーサともほぼ100%である。最大濃度比（ $C_{max}/C_0$ 、ここで、 $C_{max}$ :最大濃度、 $C_0$ :供給濃度）をはじめ、濃度に関する立ち上がり、ピークおよび終了の時期もほぼ同じとなった。（表-1では、浸透量  $Q(I)$  をパラメータとしてその特性を評価した。） ②. 黒ぼく土壌の場合には、回収率は両トレーサともほぼ100%であるが、最大濃度比がビーズの場合と比べて半分以下となっている。また、重水とNaClとは、ピーク値に達するまでの分布形が異なり、ピーク時期もNaClのほうが450 mlほど遅れている。重水が水分の移動最も正確にを反映しているとすれば、今回の結果は、NaClは水分移動トレーサとして十分でない場合もあることを示唆している。 ③. 降雨後、その影響は浸透量に現われるが、その降雨が浸透して来るまでにはある程度時間がかかった。表-1より、ビーズと黒ぼく土壌の両カラムの残存量  $W_u$  は、それぞれ、425及び1117（g or ml）である。一方、ビーズにおける両トレーサの立ち上がり時の浸透量は350 mlであり、黒

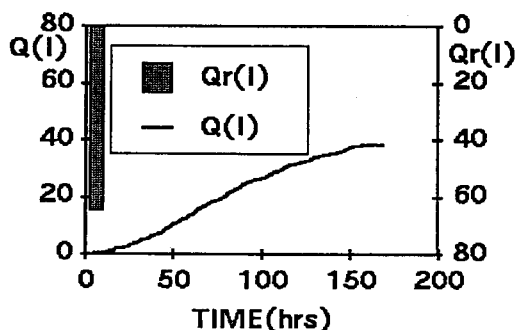


図-4 大型ライシメータ実験における降雨と浸透量の時間変化

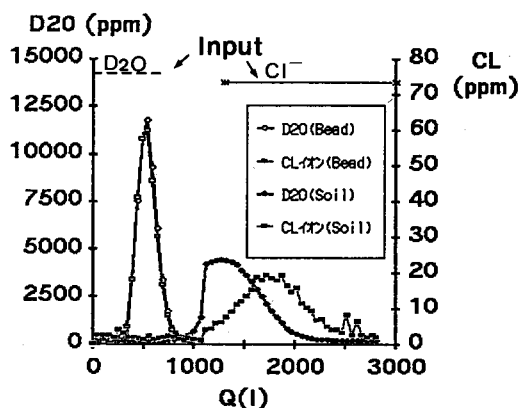


図-5 浸透水中のD<sub>2</sub>OとNaClの濃度変化（小型浸透カラム）

ばく土におけるそれは1072ml(重水)および1322 ml (NaCl)である。これより、表面に供給された水分の大部分は、カラム内の水分を下方に押し出しながらか下流すると考えられる。④。同時に、水分移動時の分散性が示されたが、この程度の規模の実験では、“水みち”効果は議論できない。⑤。またこの土壌カラム実験では、カラム内での水分の分布状態や移動特性はわからない。

## 2. 大型ライシメータ浸透実験

大型ライシメータを用いることによって、現地レベルでの土壌浸透現象がある程度再現される。トレーサ濃度や水分量を鉛直方向に8カ所でモニターする事により、土壌層内の水分の移動特性がかなり詳しく把握できる。研究の方向で述べたように、水分の実質的な移動速度と水分分布形の移動速度が異なるという観点に立って、現象を見て行くことにする。

2-1 水分の実質的な移動-----水分の実質的な移動特性は、トレーサの鉛直下挙動を追跡することにより得られる。図-6 (a), (b)は、それぞれD<sub>2</sub>OおよびNaCl濃度の25、50、75 cm層での時間変化を示したものである。25 cm層に到達するのに、NaClはD<sub>2</sub>Oより数週間遅れているのがわかる。ピーク濃度の移動速度は、D<sub>2</sub>Oの場合は25cmまで約10cm/week(0.06cm/hr)、25cm~50cmで約4cm/week(0.023 cm/hr)、一方、NaClの場合25cmまで約3cm/week(0.018 cm/hr)である。小型カラム実験の場合と同様、大型ライシメータ実験でも、NaClは作土層の実質水分の移動に対しては適切なトレーサではない。図-7は、各地点のD<sub>2</sub>O濃度の時間変化を総合的に判断してD<sub>2</sub>Oの鉛直分布形の時間的推移を示したものである。分布形は下方に移動するに連れて扁平になり、トレーサ供給後14週間後には、ピークはほぼ70cmまで到達し、50cm程に広がりを持つことがわかる。図-8は、D<sub>2</sub>Oのピーク鉛直推移の実測値と押し出しモデルにもとずくD<sub>2</sub>Oの鉛直推移を比較したものである。○印を実線で結んだものが飽和度70%での、●印を実線で結んだものが飽和度100%での押し出し流れモデルによる鉛直推移である。実測値とは、25cm層への推移速度にかなり開きが現われた。○および●印を点線で結んだものは、25cmまでは、実測の推移とし、25cm~50cmまでの推移形態に上記の押し出しモデルを考えた場合である。飽和70%のモデルはほぼ実測に近い推移を与えている。D<sub>2</sub>Oピークの移動速度を押し出しモデルで評価できるか否かは、もう少し深い層までのデータが得られた後に判定する。

2-2 水分量分布形の移動-----水分量分布形の移動は8カ所に設置されたサクションメーターや水分(電気電導度)計によって追跡された。サクションは土壌が同じであれば水分量のみ依存し、水分量と負の相関がある。水分計は電気電導度をmVに変換して出力され、水分量と正の相関をもつが、mV値は溶存態イオン濃度にも依存し、その値から水分の絶対量を評価するのは難しい。しかし、水分計は後で述べ

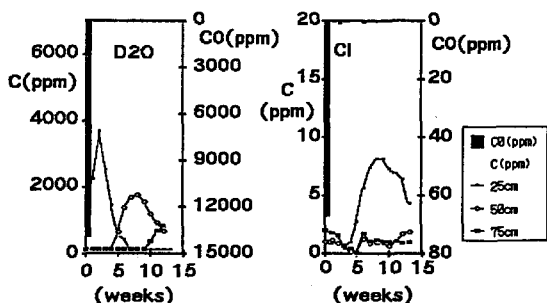


図-6 D<sub>2</sub>OとNaClの時間変化(大型ライシメータ 25, 50, 75 cm層)

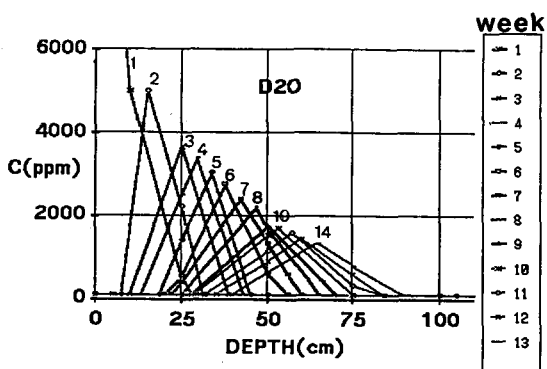


図-7 D<sub>2</sub>Oの鉛直分布の時間的推移

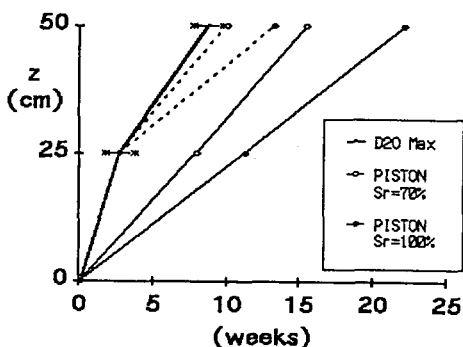


図-8 D<sub>2</sub>O濃度のピークの鉛直推移

るように水質項目の長期的変動のモニターとして利用できる。図-9は一降雨に対する各深さのサクションの、図-10はそれに対する水分計の、時間変化である。両者とも、降雨に対して上層から順に、数分ないし数十分で反応し始めている。図-11は、各深さに対するサクションの極小値と水分計の極大値の鉛直推移を示したものである。作土層を除いて、各深さのサクションの極小値と水分計の極大値とはほぼ同一時刻に起こっている。作土層で、時間にずれがあるのは、二つの計器の時空間的時定数が違うためである。一般的に、間隙比が大きく飽和度の低い場合には、水分計の方が敏感である。しかし、下層に行くに連れて、サクションメーターの方が、水分変動を明確にとらえている。最大水分量の推移速度は、作土層で約8~12cm/hrであり、下層土で約0.8~2 cm/hrである。これらの値は、前述の実質水分の移動速度に比べると、非常に速い。この事実は、土壌層内の実質水分の移動に関する機構と水分分布の移動機構とは全く別のものであることを意味し、鉛直不飽和浸透における kinematic wave特性の存在を裏付けるものと考えられる。

③長期的变化----- これまでに述べたことは、従来指摘されてきた押し出しモデルでは説明できない浸透現象は、kinematic wave特性を考えれば説明できるという立場を支持するものであった。しかし、著者は浸透現象における”水みち効果”を否定するものではない。以下に述べる事実は、土壌中の物質移動において水みちの影響の重大さを裏付けるものである<sup>4)</sup>。図-12 (a), (b)は、8カ所の水分計の値 $I_p$  (mV)と浸透水中の $Cl^-$ 濃度(ppm)の長期変動を示したものである。ここで、 $I_p$ は次の降雨直前の値である。100週目から170週目にかけての降雨量 $Q_r$  (1)は150 l/weekである。何れの $I_p$ の値も減少して行くが、100週目以降に上から順に極大値を示す。 $I_p$ の値が減少するのは、土壌が蒸留水によって洗われ、土壌水分中の溶存態物質の濃度が減少するためと考えられる。浸透水中の塩素イオンはほぼ一定値を保っているが、150週目付近で極大値を示している。各層とも、降雨直前の水分量は

毎週ほぼ同じであるため、 $I_p$ の極大値の出現は、その層を高濃度の溶存態物質が通過したことを意味する。図-13の浸透水中の $Cl^-$ 以外の各物質のイオン濃度には極大値は現われていないことから、図-12の $I_p$ の極大値は高濃度の $Cl^-$ の通過によると考えられる。図-14は、各層を $I_p$ の極大現象のピークが通過した週 $T_{pmax}$ と、各層で極大現象が始まる週 $T_{pin}$ を示している。 $z=205$ cmのデータは浸透水を意味する。100週目付近で負荷された塩素イオンは、10週間後には浸透水に影響が現れ始め、50週目付近で極大値を示すことが解る。図-14中の点線は、ライシメータ内の水分は単純に上から下へ押し出されると仮定した塩素イオンの推移である。土壌の比重、間隙比、飽和度などの結果から計算される一降雨(150 l/week)の滞留時間 $T_s$ は約20週となる。浸透水の $T_{pin}$ が、押しだしモデルによる $T_s$ や $I_p$ から求めた $T_{pin}$ よりか

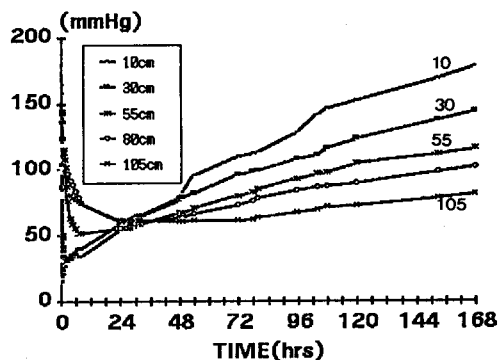


図-9 一降雨に対するサクションの時間変化

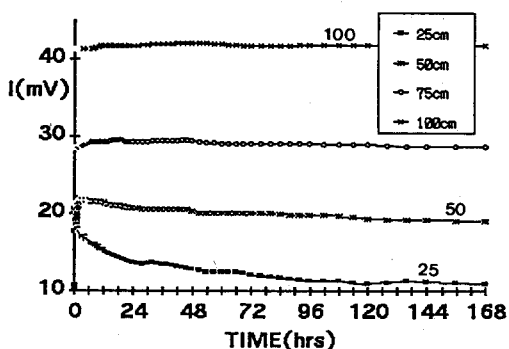


図-10 一降雨に対する水分計出力値の時間変化

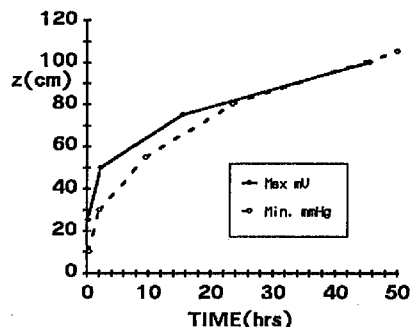


図-11 サクションの極小値と水分計出力の極大値の鉛直推移

なり早いという事実は、溶存態物質の土壤中での鉛直移動に関して、水みちの影響が大きいことを示唆していると考えられる。

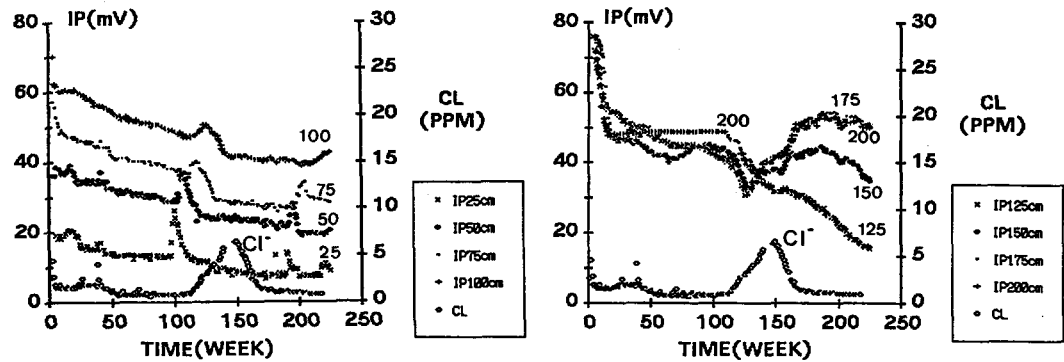


図-1 2 各層の水分計の出力 $I_p$ と浸透水中の $Cl^-$ 濃度の長期変動

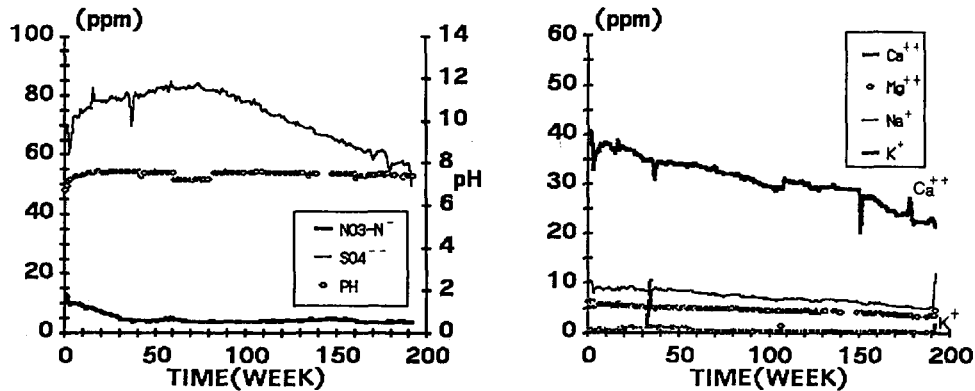


図-1 3 浸透水中の各種イオン濃度の長期変動

## 6. あとがき

今回得られた結果を要約すると次のようになる。  
 ①. 黒ぼく土の不飽和鉛直浸透現象における実質水分移動のトレーサーとしては、重水が最適である。  
 ②. 不飽和状態での実質水分の移動速度(cm/hr)は、水分分布の移動速度より2オーダーほど小さく、両者の移動メカニズムは全く別ものと考えられる。  
 ③. 不飽和浸透における水分分布の移動はkinematic waveとして理解され得る。  
 ④. 一方、水質の長期変動には、水みちの影響と解釈される実測結果を得た。

**謝辞** 本実験を遂行するに当たり、多大なる協力と貴重な助言を賜った国立公害研究所主任研究員 久保井 徹氏、並びに水質分析を補助して下さいた同研究補助員 森田倫子氏に深謝の意を表するものである。

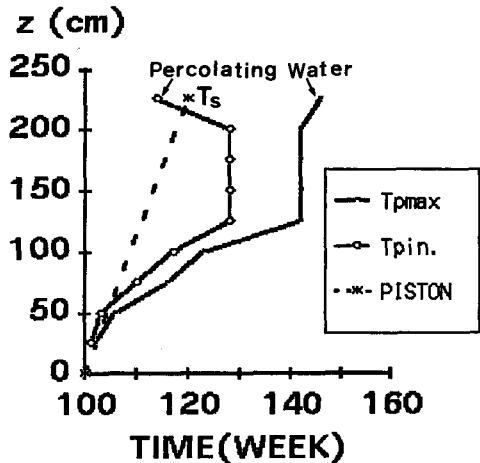


図-1 4 各深さにおける $I_p$ の極大現象の発生時期

**参考文献** 1) 土壤肥科学会編(1987): 移動現象, 博友社, pp.41-82. 2) 坂本・竹内・竹富(1987): 第42回土木学会年講, pp. 116-117. 3) 小林・山田(1987): 第42回土木学会年講, pp. 122-123. 4) 大坪国順(1987): 第42回土木学会年講, pp. 202-203.