

II-72

雨水浸透場への吸着性化学物質の移動について

大同工業大学 正員 下島 栄一

C.S.I.R.O.(Australia) Munna L. SHARMA

1. はじめに： 土壤中の農薬、肥料、重金属の移動に関する研究は、環境問題と関連して、益々重要となっている。不飽和土壤中でのこれら物質移動は、'動水'と'不動水'という形態の異なる相で起こり¹⁾、また、吸着性物質の場合、そこでは、土壤粒子による吸着や脱離が並行して起こるため、移動過程には複雑な物理的・化学的現象が介在している。本文は、特に間隙水の移動速度が物質移動に及ぼす影響や吸着・脱離過程の可逆・非可逆性に着目して行った不飽和土壌柱への吸着性化学物質の移動実験の結果を示したものである。

2. 実験方法

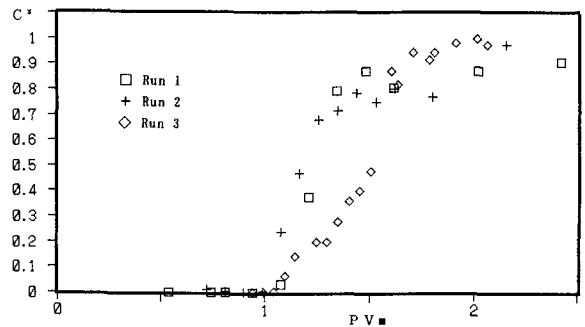
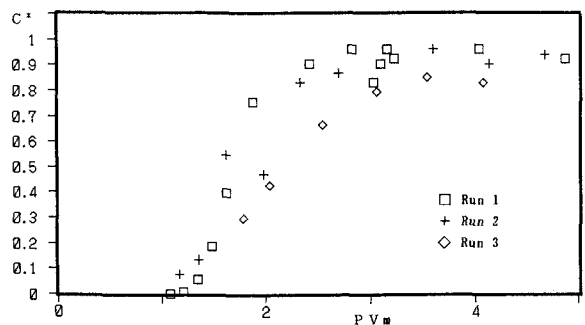
下端にポーラス・ガラスプレートの付いたPVCパイプ(長さ100 cm、直径10.8 cm)に、気乾状態にある西オーストラリアのBassendean sand(平均粒径約0.2 mm)を充填して一様な砂柱を作り、これをストレイン・ゲージで鉛直に吊り下げた。採水のため、砂柱には深さ20 cm、40 cm、70 cmにポーラスカップを差し込み、また円柱下端には、実験中そこから排水される水を、まずテフロンチューブで導き、ついで脈動ポンプを介してフラクションコレクターに配水できるようにしてある。ポーラスカップからの採水は手動ポンプで行った。

実験は、吸着性化学物質の吸着過程(実験A)と脱離過程(実験B)に着目して行った。実験Aの場合、脱イオン水で一旦脱水平衡に達した砂柱の下端に一定の負圧を与えつつ、砂柱重量の変化がなくなるまで、表面に脱イオン水を一定強度(q)で散水した。ついで、リン、シマジン、リニュロンを含む高濃度の水溶液を同じ強度で与え続けた。 q は6.9 cm/h(Run 1)、3.1 cm/h(Run 2)、0.62 cm/h(Run 3)の三通りである。また、実験中、臭素イオンをパルス的に与えたが、これは各測点での破過曲線の最大濃度の走時曲線より動水相の含水率を調べるためである。実験Bの場合、まず3.5日間同水溶液で水分飽和させた砂柱を同様にして排水させた後、同水溶液を3.1 cm/hの強度で2.5時間散水し、ついで脱イオン水を同強度で与え続けた。

3. 実験結果

実験Aの場合： 実験Aの破過曲線(BTC)を図1、2に示す。ここに縦軸は無次元濃度($C^* = C/C_0$)、横軸はパワーボリューム($PV_m = qt/(X\theta_m)$)、 C は質量濃度、 C_0 は供給濃度、 t は時間、 X は深さ、 θ_m は動水の体積含水率である。Run 1はRun 2とほぼ一致しているが、最も低フラックスのRun 3とは一致せず、左側に位置している。また、リニュロン($C_0 = 1.8$ mg/l)の結果をも考慮すると、吸着強度はリニュロン>シマジン>リンの順に大きくなっている。ただ、浅い測点($X = 40$ cm)では、BTCに及ぼす q の影響は明確ではなかった。

実験Bの場合： 図3は、実験BのBTCを示す。横軸は $PV_{ave} = q \cdot t / (\theta_{ave} \cdot X)$ で、 t は脱イオン水供給開始時よりの時間、 θ_{ave} は平均体積含水率($> \theta_m$)である。リンとシマジンは最初吸着過程を経て、脱離過程に移行し、濃度は低減し続けている。リニュロンは、最初僅かな濃度の低下が現れる。

図1：リンのBTC($X = 100$ cm, $C_0 = 11$ mg/l)図2：シマジンのBTC($X = 100$ cm, $C_0 = 0.53$ mg/l)

ている。また、これら物質の脱離の困難さの大小関係は上記の吸着の強さの関係と一致している。

4. 実験結果の解析

(1) 理論的背景

一様な水分量分布を示す均質浸透場への化学物質の移動が移流と分散(本実験の場合、分子拡散の寄与は無視できる)で行われ、また不動水相の影響が無視できる場合、この移動は次式で表せる。

$$\partial C / \partial t + Q \cdot \partial C / \partial X = D^{**} \cdot \partial^2 C / \partial X^2 \dots \textcircled{1}$$

ここに、 $Q = Q/R$ 、 $D^{**} = D^*/R$ 、 Q は実質流速(q/θ_m に対応)、 $R = \{1 + (\rho/\theta) \cdot G \cdot dF/dC\} \dots \textcircled{2}$

$D^* = D_a^e/\theta$ 、 D_a^e は有効分散係数、 ρ は乾燥土壤密度であり、 θ は動水相に対応する。式①では、土壤粒子への物質吸着量(S)が次の平衡等温式に従うとしている。 $S = G(\theta/\theta_{sat}) \cdot F(C) \dots \textcircled{3}$

ここに、 θ_{sat} は飽和時の θ 、 $\theta = \theta_{sat}$ で $G = 1$ 、また $F(C)$ は水分飽和状態でのものである。

異なるフラックス(q)条件下、ある特定深さでのBTCを比較する際、関数 G が θ の線形関数⁽²⁻³⁾で近似できる場合($R = R(C)$)、以下の相似則が満足されれば、式①②より、比較されるBTCは相似的な関係にあることが分かる。

$$Q_r t_r / X_r = 1 \dots \textcircled{4}, D_r^* t_r / X_r^2 = D_r^* / (Q_r X_r) = 1 \dots \textcircled{5}$$

ここに、添字' r 'はscaling factorを意味し、比較する諸量の比である。式④の左辺はパワーボリュームの比に一致し、式⑤左辺はブレンナー数の比に対応する。本実験のように $D_r^* = Q_r$ と近似できる場合、式⑤は、 $X_r = 1 \dots \textcircled{6}$ となる。

(2) 実験値の検討

実験Aの場合： リンとシマジンのBTCは、Run 1 とRun 2の場合ほぼ一致した(図1、2)。この一致は式④、⑥の相似則より説明できる。しかし、 q 値が1オーダー異なる場合のRun 1とRun 3のBTCは、比較で相似則の成立にも係わらず合致していない。これは、相似則の誘導の際、式③で間隙水の移動速度(Q)の運動学的効果は無視した結果であるとみなせる。この影響は Q がほぼ遅延因子 R が小さくなる様に現れるはずであるが、 R の概算値は、リンで1.5、シマジンで2となった。上記した浅い測点でのBTCに及ぼす q の影響の不明瞭さは、砂柱表面より測点までの移動距離が短いために因るものと考えられる。

実験Bの場合： 砂柱下端での脱離過程を解析する際、測定濃度の最大値(リン、シマジンの場合、 $C = C_0$ 、 $0.69 \cdot C_0$)を $C = C_0'$ として、脱イオン水の供給開始時($t = 0$)で $C(X, 0) = C_0'$ なる条件が近似的に成立すると考える。式①で、 $C \rightarrow C^{**} = (C_0' - C)/C_0'$ と変数変換すると、 R (式②)が一定の場合、 C^{**} に対する境界条件($X = 0, \infty$)は実験Aの場合(C^*)と等価となる。基礎式①についても同様である。従って、上記の相似則を介して、実験Aと実験BのBTCは比較できることになる。図4は、実験BでのBTC($C^{**} \sim PV_{ave}$)と実験AのBTC($C^* \sim PV_{ave}$)を比較したものであるが、リンとシマジンの吸着・脱離実験の曲線はほぼ一致している。これは二つの過程が可逆的であること、また $R = \text{一定}$ ($dF/dC = \text{一定}$)の近似が妥当であったことを示唆する。

5. おわりに： 実験と殺虫剤の化学分析には、それぞれ C.S.I.R.O.の J. Byrne 及び R.G. Gerritse博士の助力を得た。

<参考文献> 1)例えば、Van Genuchten et al., Soil Sci. Soc. Am., 40, 1976, 2)堀内将人ら、土木学会論文集II-20, 1992, 3)S. Akatanakul et al., Soil Sci., 135, 1983.

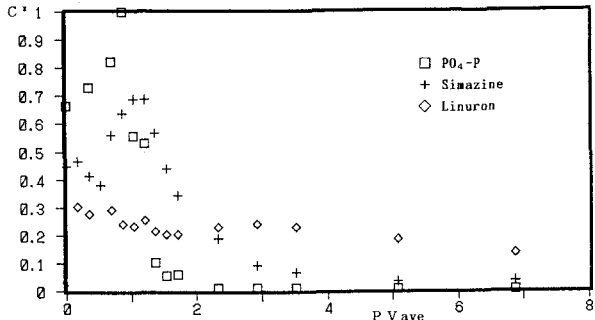


図3：実験BのBTC(X = 100 cm)

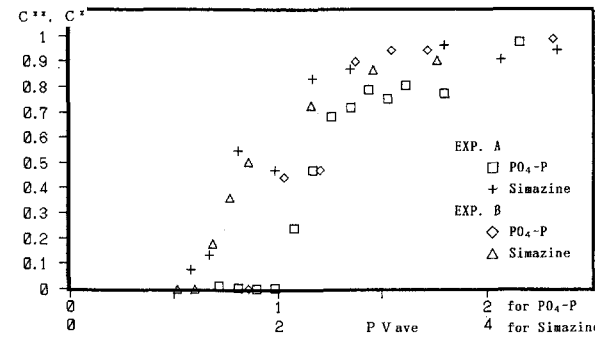


図4：実験A(吸着)と実験B(脱離)のBTCの比較