

報 文

土壤中における農薬の溶脱性試験法*

能 勢 和 夫

農林水産省農業技術研究所病理昆虫部
(昭和54年9月5日受理)

A Method for Estimating Leaching Property of Pesticides*

Kazuo NOSE

National Institute of Agricultural Sciences, Yatabe, Tsukuba-gun, Ibaragi 305, Japan

A polynomial expression which gives the change in concentration of elute was derived for soil column system in which pesticide solution was added at constant concentration. The polynomial was composed of a theoretical plate number P of soil column, adsorption ratio G for the soil, and distance moved by the solution expressed by imaginary plate number n . The curve has an inflexion point except when G is small or P is unit. P is estimated from the inflexion point n_1 , which is calculated from the observed inflexion point using the water capacity of the column and a volume of unit fraction. A constant value of approximately 12 g as soil weight per unit plate was obtained with picric acid using soil columns with different weights of a volcanic ash soil. Chlorate showed no adsorption on the soil and gave no physically significant P value. Pentachlorobenzoic acid gave a small G value (0.5) indicating that the amount of soil used in the assaying was too small to give any physically significant P value. An apparatus to supply a constant flow rate of water was devised.

緒 言

農薬等が土壤中を移動する場合、土壤水に溶けまたは分散してその動きに伴って移動する場合と、気化して自己拡散により移動する場合とがある。このうち土壤からの溶脱は土壤水の動きに伴って起こる。わが国は降雨量が多いため、土壤水は主として表層から下層に向かって動くから、農薬等微量生理活性物質の土壤からの溶脱性を把握しておくことはとくに重要である。

土壤水の動きに伴う薬剤の移動(マスフローによる移動)は吸着-脱着現象と拡散現象とが時間因子を含んで複雑にからみ合っている。クロマトグラフィ理論に基づく数理的の一連の研究が Davidson ら^{1,4-6)}、Scott

ら²⁾、Shearer ら³⁾によって展開されている。これら速度論的理論は時間因子を含むため複雑であるが、古典的プレート理論⁷⁾は時間因子を吸着平衡の成立によって消去しているため比較的単純である。著者はプレート理論によって農薬の溶脱性を試験する方法を検討した。

理論的考察

Martin-Synge の理論⁷⁾はカラムに薬剤を与えたのち、薬剤を含まない溶媒で展開するさいの理論式を与えている。これにならって、薬剤を含まないカラムに一定濃度 C の溶液を流下する系について、各プレート中の溶質の分布を計算すると Table 1 のとおりになる。ただし、溶質は固相: 水相 = $G: J (G+J=1)$ の比率で分配されるものとする。 θ は土壤柱の空隙率、 V は各段の容積とする。

溶液の先端が仮想段 $(n-1)$ に達したとき第 $(P-1)$

* 農薬等の溶脱 (第1報)

Leaching of Pesticides and Related Chemicals in Soil (Part 1)

Table 1 Trapped amount of solute in the P th plate when top of solution fills in the n th.

$\times \theta CV$

| P | n | | | | | | | | P | n | |
|-----|---|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|-----|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | |
| 1 | $1 +$ | $G +$ | $G^2 +$ | $G^3 +$ | $G^4 +$ | $G^5 +$ | $G^6 +$ | $G^7 +$ | $\dots + G^{P-1} + \dots + G^{n-1}$ | | |
| 2 | | $J[1 +$ | $2G +$ | $3G^2 +$ | $4G^3 +$ | $5G^4 +$ | $6G^5 +$ | $7G^6 +$ | $\dots + (P-1)G^{P-2} + \dots + (n-1)G^{n-2}$ | | |
| 3 | | | $J^2[1 +$ | $3G +$ | $6G^2 +$ | $10G^3 +$ | $15G^4 +$ | $21G^5 +$ | $\dots + \binom{P-1}{2}G^{P-3} + \dots + \binom{n-1}{2}G^{n-3}$ | | |
| 4 | | | | $J^3[1 +$ | $4G +$ | $10G^2 +$ | $20G^3 +$ | $35G^4 +$ | $\dots + \binom{P-1}{3}G^{P-4} + \dots + \binom{n-1}{3}G^{n-4}$ | | |
| 5 | | | | | $J^4[1 +$ | $5G +$ | $15G^2 +$ | $35G^3 +$ | $\dots + \binom{P-1}{4}G^{P-5} + \dots + \binom{n-1}{4}G^{n-5}$ | | |
| 6 | | | | | | $J^5[1 +$ | $6G +$ | $21G^2 +$ | $\dots + \binom{P-1}{5}G^{P-6} + \dots + \binom{n-1}{5}G^{n-6}$ | | |
| 7 | | | | | | | $J^6[1 +$ | $7G +$ | $\dots + \binom{P-1}{6}G^{P-7} + \dots + \binom{n-1}{6}G^{n-7}$ | | |
| 8 | | | | | | | | $J^7[1 +$ | $\dots + \binom{P-1}{7}G^{P-8} + \dots + \binom{n-1}{7}G^{n-8}$ | | |
| P | | | | | | | | | $J^{P-1} \left[\binom{P-1}{P-1}G^0 + \binom{P}{P-1}G^1 + \binom{P+1}{P-1}G^2 + \dots + \binom{n-1}{P-1}G^{n-P} \right]$ | | |
| n | | | | | | | | | | | J^{n-1} |
| Sum | $1 + (G + J) + (G + J)^2 + (G + J)^3 + (G + J)^4 + \dots + (G + J)^{P-1} + \dots + (G + J)^{n-1} = n$ | | | | | | | | | | |

$$Y_n = Q_{n-1} / \theta CV = \left[1 + PG + \binom{P+1}{P-1}G^2 + \binom{P+2}{P-1}G^3 + \dots + \binom{n-2}{P-1}G^{n-P-1} \right] J^P$$

$$= 1 - G^{n-P} \left[1 + (n-P)J + \binom{n-P+1}{2}J^2 + \dots + \binom{n-3}{P-2}J^{P-2} + \binom{n-2}{P-1}J^{P-1} \right]$$

段中の全溶質量 Q_{n-1} は,

$$Q_{n-1} = \theta CV J^{P-1} \sum_{m=0}^{n-P-1} \binom{P+m-1}{m} G^m \quad (1)$$

溶液の先端が仮想段 n に達したとき, 第 P 段から溶出する溶質量は $Q_{n-1}J$ である. すなわち,

$$Q_{n-1}J = \theta CV J^P \sum_{m=0}^{n-P-1} \binom{P+m-1}{m} G^m \quad (2)$$

$$= \theta CV \left[1 - G^{n-P} \sum_{m=0}^{P-1} \binom{n-P+m-1}{m} J^m \right] \quad (3)$$

$Y_n = (Q_{n-1}J) / (\theta CV)$ とすれば,

$$Y_n = (1-G)^P \sum_{m=0}^{n-P-1} \binom{P+m-1}{m} G^m \quad (4)$$

ただし, n, P は正の整数で $n \geq P+1$ である.

Y_n を縦軸に n を横軸にとり, $P=1, 10$ とし $G=0.1 \sim 0.9$ について作図した結果を Fig. 1 に示す.

(4) 式が成立するためには, 薬剤は溶液のみによって移動することすなわち気中液中での拡散は無視しうること, 薬剤は固相と液相との間に一定比率 $G:J$ で分配され飽和現象は起こらないこと, プレートは均質であり,

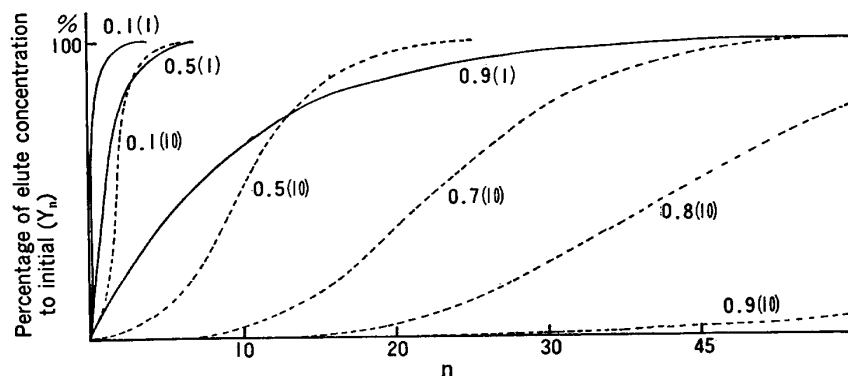


Fig. 1 Leaching curves for $G(P)$.

各プレート内で吸着平衡が成立することまたは液相の移動が一定で吸着率が一定となり準平衡と見なしうることが前提となっている。このような条件を完全に満たす系は存在しないが、実際にどの程度許されるかは、物質ごとに土壌ごとに実験的に明らかにしてゆく必要がある。なお、吉田⁸⁾は P 番目のプレートの出入量に関する微分方程式に、本報と同一の条件を与え、解として1と累積ポアソン分布の差を得ている。

P, G が一定であれば式 (4) より、

$$\frac{\Delta Y_n}{\Delta n} = \binom{n-1}{n-P} G^{n-P} \times (1-G)^P \\ = \binom{n-1}{P-1} G^{n-P} \times (1-G)^P \quad (5)$$

$$\frac{\Delta Y_{n-1}}{\Delta n} = \binom{n-2}{P-1} G^{n-P-1} \times (1-G)^P \quad (6)$$

$$\frac{\Delta Y_{n+1}}{\Delta n} = \binom{n}{P-1} G^{n-P+1} \times (1-G)^P \quad (7)$$

$$\frac{\Delta^2 Y_n}{\Delta n^2} = \left(\frac{\Delta Y_{n-1}}{\Delta n} - \frac{\Delta Y_n}{\Delta n} \right) = (1-G)^P \\ \cdot \left\{ \binom{n-2}{P-1} G^{n-P-1} - \binom{n-1}{P-1} G^{n-P} \right\} \quad (8)$$

または

$$\frac{\Delta^2 Y_n}{\Delta n^2} = \left(\frac{\Delta Y_n}{\Delta n} - \frac{\Delta Y_{n+1}}{\Delta n} \right) = (1-G)^P \\ \cdot \left\{ \binom{n-1}{P-1} G^{n-P} - \binom{n}{P-1} G^{n-P+1} \right\} \quad (9)$$

曲線 (4) は $n=0, \infty$ 以外では極値をもたないが、変曲点をもつことがある。変曲点では $\Delta^2 Y / \Delta n^2 = 0$ である。ただし、 n_i は変曲点の n 数とする。

(8), (9) 式の { } 内の値を 0 とすれば、

$$\frac{(n_i-2)! G^{n_i-P-1}}{(P-1)!(n_i-P-1)!} = \frac{(n_i-1)! G^{n_i-P}}{(P-1)!(n_i-P)!}, \\ \frac{(n_i-1)G}{n_i-P} = 1$$

または、

$$\frac{(n_i-1)! G^{n_i-P}}{(P-1)!(n_i-P)!} = \frac{n_i! G^{n_i-P+1}}{(P-1)!(n_i-P+1)!}, \\ \frac{n_i G}{n_i-P+1} = 1$$

これより、

$$P = n_i(1-G) + G \quad (10)$$

または

$$P = n_i(1-G) + 1 \quad (11)$$

n_i, G がわかれば、式 (10) または (11) より P を推定することができる。この曲線が変曲点をもつ場合一種の S 字曲線になり、 $\Delta Y / \Delta n_i$ は極大になるのだから、これより n_i を推定することができる。

実 験

1. 溶脱試験の装置と方法

溶脱試験の装置は Fig. 2 に示すとおりである。A は約 1 l 容分液漏斗状の容器で、コックの手前 3 mm が外径 30 mm の円筒状になっている。これに外径 30 mm のふくらみを先端にもつガラス筒 E を挿入し、A の内壁と E の球部をほとんど接触させる。漏斗の下端は沈でん受け B、毛細管 C を通って流出管 D に接続する。

容器 A に濃度 C の溶液を入れ E を装着後コックを開いて B, C, D に溶液を満たす。B, C, D 中の気泡は注意深く排除し、流出口の高さ t を調節すれば流下速度を調節することができる。すなわち、液面 s は外気圧との接触面ですべて平衡している。液圧は常に一定値 $(s-t)$ に保たれるから、A 内の液量が減少しても流下速度は一定に保たれる。本実験は流速 10~20 ml/hr で実施した。

クロマト管 F は内径 15 mm のガラス管にガラスフ

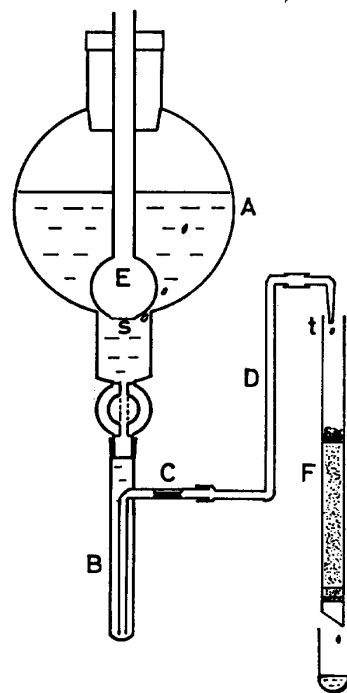


Fig. 2 Apparatus for leaching test.

フィルタ G2 を溶解させたもので、海砂 1g を敷いた上に土壌 25g を落としこみ、その上にガラスウールをのせた。西ヶ原表土では、土壌柱の高さは 270 mm であった。土壌 50g, 100g では内径 50 mm のガラス管を用いたが、そのときの土壌柱の高さはそれぞれ 40 mm および 80 mm であった。流出液はフラクシオンコレクタにより 10 ml ごとに区分し分析に供した。

2. 段数 P の算出

フラクシオンの番号を z とする。最初の流出番号が 1 番である。土壌柱の飽和水分量を H ml とすれば、1 段当たりの水分は H/P である。流出液の 1 区分 F ml には FP/H 段分の水分が含まれている。変曲点に相当する区分番号を z_i とすれば、流出からそれまでの段数は $z_i FP/H$ である。滴下始めから流出までに P 段を通過しており、この部分を加え n_i は、

$$n_i = z_i PF/H + P$$

式 (10), (11) に代入すれば

$$P = 1 / \left\{ 1 - \frac{z_i' F}{H} \frac{(1-G)}{G} \right\} \quad (12)$$

または

$$P = 1 / \left\{ G - \frac{z_i F(1-G)}{H} \right\} \quad (13)$$

式 (12) または (13) より P を算出することができる。ただし、実際には $\Delta Y_n / \Delta z$ が最大値を示すとき、これを挟む z のうち小さいほうを z_i 、大きいほうを z_i' ($z_i' = z_i + 1$) とする。

3. 吸着実験 (G, J の算出)

50 ml 共栓沈でん管に滴下に使う水溶液 20 ml, 土壌 10g を入れ、30 分間振とう後遠心分離し、上澄液 10 ml を分析に供した。土壌は生土のまま 5 mm のふるいを通した西ヶ原表土 (Table 2) を用いた。

Table 2 Physical and chemical properties of Nishigahara soil used.

| | |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Origin: | volcanic ash soil |
| Predominant clay mineral: | allophane |
| Total carbon content: | 3.57% |
| Phosphate absorption coefficient: | 2066 |
| CEC: | 22.2 meq/100 g |
| Surface area: | 172 m ² /g |
| pH: | 6.1 (in H ₂ O, 1:2) |
| Maximum water holding capacity: | 125% |
| pF 2.7 | : 59% |
| pF 4.0 | : 35% |
| Water content before test | : 58.2% |

溶液の濃度 (初濃度) A ppm, 上澄液の濃度 B ppm とする。土壌 10g のうち液相 3.68g, 固相 6.32g となるので、系の全水分は 23.68g である。液相中の全薬量は $23.68B \mu\text{g}$ となるので、土壌に吸着されている薬量は $(20A - 23.68B) \mu\text{g}$ である。固相中の濃度を S とすれば、分配率 $D = S/B = (\text{固相中の濃度})/(\text{溶液濃度})$ は

$$D = (20A - 23.68B)/(6.32B) \quad (14)$$

溶脱試験系において、土壌溶液量 (液相容量) V_{sol} および土壌重量 (固相重量) V_{soil} とすれば、吸着率 $G = (\text{土相中の薬量})/(\text{土壌系の全薬量})$ は、

$$G = \frac{SV_{\text{soil}}}{SV_{\text{soil}} + BV_{\text{sol}}} = \frac{S/B}{S/B + V_{\text{sol}}/V_{\text{soil}}} \\ = \frac{D}{D + W_{\text{max}}} \quad (15)$$

によって表わされる。ただし、 $W_{\text{max}} = V_{\text{sol}}/V_{\text{soil}}$ であって、溶脱試験では最大容水量以上の水分は流下し、系外に去るので、 W_{max} は (最大容水量 ÷ 100) に相当する。西ヶ原表土を用いた本実験系では

$$G = \frac{D}{D + 1.25} \quad (16)$$

となる。

4. 供試薬剤と分析法

塩素酸カリウム (特級), ペンタクロロ安息香酸 (三共試製品), ピクリン酸 (特級) を水に溶かして滴下溶液とした。ただし、ペンタクロロ安息香酸は 0.1 N 水酸化ナトリウム溶液に溶かしたのち、1,000 倍にうすめた。初濃度は分析に便利な濃度として、塩素酸イオン $74 \mu\text{M}$ (塩素酸カリウム 9.1 ppm), ペンタクロロ安息香酸 $160 \mu\text{M}$ (47 ppm), ピクリン酸 $65 \mu\text{M}$ (15 ppm) をえらんだ。

1) 塩素酸イオン

供試水溶液 2 ml に 0.2% トリジン酢酸 0.5 ml を加えよく振り混ぜてから、濃塩酸 5 ml を加え 447 nm の吸収極大値について比色定量した。分光光度計は島津 UV-300 を用いた。

2) ペンタクロロ安息香酸

供試水溶液 10 ml に 0.1 N 水酸化ナトリウム溶液 1 ml を加え、237.5 nm における変曲点の高さにより比色定量した。

3) ピクリン酸

供試水溶液をそのまま 355 nm の吸収極大値について比色定量した。

Table 3 Partition ratio D , adsorption ratio G and theoretical plate number of chemicals P on soil.

| Chemicals | Chlorate | Pentachloro- benzoic acid | Picric acid |
|----------------------------|------------------|------------------------------|------------------|
| Initial con- centration | 74 μM | 160 μM | 65 μM |
| D | -0.14 | 1.2 | 4.1 |
| G | -0.12 | 0.49 | 0.77 |
| P | 0 | 0 | 2.4 |

結果と考察

1. 分配率, 吸着率

塩素酸カリウム (74 μM), ペンタクロロ安息香酸 (160 μM), ピクリン酸 (65 μM) 溶液の西ヶ原表土に対する分配率と吸着率は Table 3 に示すとおりである。塩素酸イオンは分配率が 0 より小で吸着は認められないが, ペンタクロロ安息香酸およびピクリン酸では土壤による吸着が認められた。

2. 溶出曲線

74 μM 塩素酸カリウム, 160 μM ペンタクロロ安息香酸, 64 μM ピクリン酸溶液を西ヶ原表土 25g のカラムに滴下した場合の溶出曲線は Fig. 3 に示すとおりである。縦軸は溶出液濃度の初濃度に対する百分率を, 横軸はフラクション番号 z を示している。曲線の形状は Fig. 2 に示す理論曲線に類似している。

段数 P は (12), (13) 式により求められる。 $z_i - z_i'$ ($\Delta Y/\Delta z$ が極大値を示す直前一直後の区分番号) は塩素酸イオン 1-2, ペンタクロロ安息香酸 3-4, ピクリン酸 3-4 であった。前式に代入した結果, 前二者では P が負になり物理的に意味のある値とはならなかった。ピクリン酸は $P=2.4-2.5$ となった。これは土壤 25g について得られたので, 逆に 1 段あたりでは土壤約 10g に相当する。

3. 段数 P の検討

物理的に意味のある段数値がピクリン酸について得られたので, 内径 50mm のガラス円筒に土壤 50g および 100g を充填して溶脱実験を行なった。その結果は Fig. 3 および Table 4 に示すとおりで, $z_i - z_i'$ として

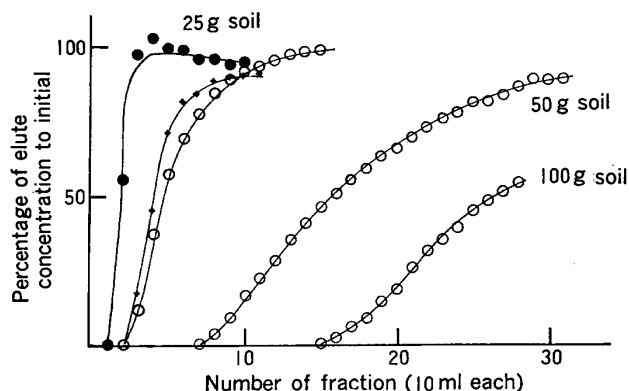


Fig. 3 Leaching curves of chlorate, pentachlorobenzoic acid and picric acid.

● chlorate, × pentachlorobenzoic acid, ○ picric acid

それぞれ 9-10 および 22-23 が得られた。1 段当たりの土壤量は, 土壤柱に関係なくほぼ平均 12g となり, 底辺および高さの違いにかかわらず, 比較的よい一致を示している。

バッチ法では土壤量: 溶液量比が一定であれば, 一定の上澄液濃度を与えるが, 本実験において同一の流出液濃度を与える液量, たとえば初濃度の 1/2 濃度が流出する液量は, 土壤 25g で 46 ml, 50g で, 120 ml, 100g で 288 ml であり, それぞれの土壤量の 1.8 倍, 2.4 倍, 2.9 倍に相当し, 一定倍率にはならない。これが P の効果と思われる。

4. 変曲点がない場合

曲線 (1)~(4) は常に変曲点をもつとは限らない。 $P=1$ の場合, または G が小さくしかも P も小さい場合は, ΔY_n のなかで ΔY_1 が最大値を示し変曲点は存在しない。この場合は $\Delta^2 Y_n/\Delta n^2=0$ の点は存在しないから, 式 (10), (11), (12), (13) は成立しない。

安息香酸で P 値が負を示したのは, 溶出曲線に $\Delta^2 Y/\Delta n^2=0$ の点が存在しないためと思われる。物理的に意味のある P 値を得るためには F/H を小さくする。すなわち土壤量を多くすることが必要となるであろう。

塩素酸イオンは土壤により正吸着されないので P 値は存在しないと考えるほうがよいであろう。それでも

Table 4 Variation of P value obtained from picric acid on various amount of soil.

| Size of column Diameter length (mm) | Amount of soil (g) | $z_i - z_i'$ | P | Soil g/ P |
|--|-----------------------|--------------|---------|-------------|
| 15×270 | 25 | 3-4 | 2.4-2.5 | 10-10 |
| 50×40 | 50 | 9-10 | 4.1-4.2 | 12-12 |
| 50×80 | 100 | 22-23 | 7.2-7.9 | 14-13 |

z_1 にはまったく塩素酸イオンが検出されず、 z_2 でも55%しか検出されていない。 z_1 では生土にもとからあった水分 9.2 ml がそのまま押し出されたと考えることができるが、吸着されないならば少なくとも z_2 ではほとんど 100% が検出されるはずである。同様な溶出の遅れは安息香酸でも認められている。これらには吸着以外の要因、たとえば塩素酸イオンを分解する物質や、安息香酸を不溶性にする物質が土壤にあって、これらを飽和したのちに溶脱がおきるのかもしれない。

5. 問題点

本法は1滴ごとに平衡が成立し流下することを前提とするが、滴ごとのつながりは必ずしも必要としない。流出速度は、滴が土壤中を自然降下する速度以下であれば、結果は大きく影響しないと思われる。これ以上であれば土壤柱上に溶液が溜り、結果が乱れるおそれがある。本法では土壤柱に空気が十分供給されるので、土壤が還元されるおそれがない。

本法では、吸着率 G が一定であることを前提にしている。一般的にはフロイドリッヒ型吸着が成立するので、 G は低濃度ほど大きくなるはずである。また、各段で吸着平衡が成立するとしたが、実際にこの程度の流下速度で成立しているかどうかにも疑問がある。場合によっては拡散を含む速度論的な補正も必要かもしれない。生土がすでに保持している水分を無視して P の計算を行なっているが、これに対する補正も必要かもしれない。これらは今後検討すべき重要な問題である。

6. 結論

一定濃度の薬液が土壤に無限に供給される場合、土壤溶液の濃度変化を示すために、土壤柱の理論段数 P 、薬剤の吸着率 G 、溶液が移動した仮想段数 n からなる、 $(n-P)$ 項の多項式を導いた。この多項式が表わす曲線は G が小さくない限り、土壤すなわち P を十分大きくすれば変曲点をもち、その位置を実測することにより、 P を推定することができる。ピクリン酸では理論段数1段当たりの土壤量は供試土壤量 (25~100 g) が異なってもほぼ一定の値 12 g となった。塩素酸イオンでは土壤に負吸着するためか、物理的に意味のある P 値は得られなかった。ペンタクロロ安息香酸でも多分供試土壤量が小さかったため物理的に意味のある P 値は得られなかった。初濃度の相違、濃度による G の変化、吸着平衡の成立する時間と溶液の流速との関係など補正因子として今後検討を要する点が多いが、薬剤の溶脱性を表わすパラメータとして理論段数 P は重要なものの一つと考えられる。

要 約

1) 薬剤の土壤溶脱性を表わす方法として、一定濃度の薬液が定常的に土壤柱に滴下する系を想定し、浸出液の濃度変化を示す多項式を導いた。

2) この多項式は土壤吸着率、土壤柱の理論段数、溶液の移動距離を示す仮想段数からなり、溶出曲線の変曲点から理論段数が推定される。

3) ピクリン酸の溶出曲線から、理論段数1段当たりの土壤量 12 g が、土壤柱の大きさに関係なく得られた。

4) 塩素酸イオンの土壤への吸着は負で、物理的に意味のある理論段数値は得られなかった。

5) ペンタクロロ安息香酸の土壤吸着は小さく、試験した土壤量 (25 g) では物理的に意味のある理論段数値は得られなかった。

Table 5 List of Symbols.

| | |
|-------------------|--|
| C | =concentration of added solution ($\mu\text{g/ml}$) |
| G | =adsorption ratio, adsorbed amount (μg)/total amount of the system (μg) |
| J | $=1-G$ |
| θ | =porosity of soil |
| V | =volume of unit plate (ml) |
| P | =theoretical plate number of chemicals on soil |
| n | =imaginary plate number signifying position of top of elute |
| Q_{n-1} | =total amount of solute in the P th plate when top of solution or elute fills the $(n-1)$ th (μg) |
| Y_n | =concentration ratio of elute from the P th plate to initially feeded solution |
| n_i | =theoretical plate number corresponding with inflexion point on the leaching curve |
| z_i | =observed inflexion point expressed by fraction number of elute, maximum ΔY is put between z_i and z_i' ($z_i < z_i'$) |
| H | =maximum water holding content of soil column (%) |
| F | =volume of unit fraction of elute (ml) |
| D | =partition ratio, concentration in soil ($\mu\text{g/g}$)/concentration of solution ($\mu\text{g/ml}$) |
| A | =initial concentration of solution on adsorption test ($\mu\text{g/ml}$) |
| B | =concentration of equilibrating solution ($\mu\text{g/ml}$) |
| W_{\max} | =maximum water holding capacity |
| V_{soil} | =volume of solution in soil column (ml) |
| V_{soil} | =weight of soil in soil column (g) |
| S | =concentration in solid phase ($\mu\text{g/g}$) |

6) 理論段数は溶脱において注目すべき重要な特性と思われる。

7) 一定速度で溶液を滴下できる装置を考案した。

理論多項式の数値解のためのコンピュータプログラミングにつきお世話になった農業技術研究所 堀江 武技官に感謝申し上げます。

引用文献

1) P. S. C. Rao & J. M. Davidson: *Water Res.* **13**, 371 (1979)

2) H. D. Scott, R. E. Phillips & R. F. Paetzold: *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **38**, 558 (1974)

3) R. C. Shearer, J. Letey, W. J. Frammer & A. Klute: *ibid.* **37**, 189 (1973)

4) M. Th. Van Genuchten, J. M. Davidson & P. J. Wierenga: *ibid.* **38**, 29 (1974)

5) A. G. Hornsby & J. M. Davidson: *ibid.* **37**, 828 (1973)

6) J. M. Davidson & R. K. Chang: *ibid.* **36**, 257 (1972)

7) A. J. P. Martin & R. L. Synge: *Biochem. J.* **35**, 1358 (1941)

8) 吉田武彦: 土壌の物理性 第35号, 10 (1977)