

農薬環境科学研究

第10号

*Proceedings of the 20th Symposium on
Environmental Science of Pesticide*

第20回農薬環境科学研究会
シンポジウム講演集

日本農薬学会
2002

畑地からの流亡する農薬量の推定手法について

(社) 日本植物防疫協会研究所 高橋 義行

1. はじめに

一般に、畑地に投下された農薬の一部は、畑地周辺環境へ拡散・移動し、吸着・分解等をしながらやがて消失するが、近年、この畑地から流亡する農薬の河川等への流出による水質の汚染や生態系への影響の可能性が懸念されるようになった¹⁾。畑地周辺環境への流出経路はおもにドリフト、土壌表面からの流出、および地下浸透に分けられるが、ドリフトと表面流出は河川等の水系へ、地下浸透は地下水系への暴露等が指摘されている²⁾。この3者の中で、ドリフトおよび地下浸透は、農薬の散布時および散布後に大なり小なり確実に発生する。これに対して、表面流出の発生には、降雨強度や降雨時間等の降雨条件と畑地の地形や土壌特性等の圃場条件および作物の有無、種類、作付け等の作物条件、さらに農薬自身の特性などが複雑に絡み合っており、常に発生するというものではない³⁾。また、いずれの経路でも多くの場合は水系に到達する前に消失するものと考えられている。このような農薬の環境中の動態を把握するための試験方法は種々検討されてきた⁴⁾。

本年5月31日に環境省水環境部土壌環境課農薬環境管理室より「農薬生態影響評価検討会」で取りまとめられた第2次中間報告「21世紀における我が国の農薬生態影響評価の在り方について」が公表⁵⁾された(<http://www.env.go.jp/press/press.php3?serial=3377>)。この中で、公共用水域への農薬の暴露経路として地表流出とドリフトが挙げられ、非水田農耕地から流亡した農薬が河川等へ到達した場合の「環境中予測濃度(PEC)」の算定方法が示されている。はじめにPEC算定に用いる環境モデルおよび標準シナリオを設定して、農薬の流出は、散布時のドリフトによるものと降雨に伴う地表流出によるものに分け、別々に予測濃度を求めていずれか高いほうをその農薬のPECとする、としている。ドリフトでは第1段階でドイツのドリフト表⁶⁾を参考にしてドリフト率が設けられ、第2段階で圃場試験のデータを用いる、としている。一方、地表流出では第1段階で数値計算による算定、第2段階で地表流出試験等のデータを用いることとする、としている。概略

的には、「地表流出に関与する予測濃度=散布農薬量×散布面積×流出率／河川水量」と示される。標準シナリオでは、この散布面積の 1/10 が流出に寄与し、モデル河川流量は降雨による増水を考慮する、としている。環境モデルや標準シナリオ等の詳細は、前出の演者に任せるとして、本稿ではこの不確実的に発生する地表流出によって近傍環境に流出する農薬量(流出率)を推定する手法について、演者らが実施してきた流出試験等⁷⁻¹¹⁾をもとに紹介する。

2. 地表流出の実態調査

欧米における地表流出による農薬の環境中への流出への関心は、わが国に比べて早くから持たれてきた^{12,13)}。Leonard¹⁾は、米国における農薬の表面流出の試験報告例(1978 年～1985 年)を多数紹介している。この中には灌漑施設の整った圃場を用いて自然降雨のかわりにイリゲーションによって発生させた地表流出試験¹⁴⁾も含まれているが、単一作物を広大な面積に栽培することが多い米国では、流域全体を対象にした、より大規模で長期間の調査が実施されているのが特徴である。一方、最近の欧州の試験例ではデンマークにおける 0.55ha の小麦圃場での 2 年間にわたる地表流出水をオートサンプラーによって連続捕集した試験報告がある¹⁵⁾。

これに対して、わが国の畑地は欧米に比べて、平坦地が少ない細長い島国であるという地形、灌水施設等を必ずしも必要としない豊富な降雨量という気候風土および比較的小面積に多種類の作物をモザイク的に栽培している、という特徴を持っている。このため、エロージョン対策の面から畑地からの水や土壌の流出について長らく調査¹⁶⁾が行われてきたが、農薬成分の流出の程度を明らかにすることを目的とした調査は比較的最近のことであり、1995 年頃から当時の環境庁の委託調査として幾つかの試験機関で実施されている²⁾。それらは、地表流出の発生しやすい傾斜地の数アール(a)程度の圃場を用いて、まとまった降雨が見込まれる日の直前に農薬を散布する短期間の調査試験が中心である。藤田²⁾は、それらの結果から散布直後の農薬の地表流出は平均して散布量の約 0.4%程度となり、日数が経過するにしたがって減少すると推察している。

演者らは図 1 に示すような方法で表流水を採取した。すなわち、傾斜方向に畝を立てて表流水が流れやすくし、採取地点には簡易ビニルハウスを設置して雨水が直接入らないように、また降雨の最中でも作

業しやすいように工夫した。1995年に黒ボク土の圃場(茨城県牛久市、傾斜角度 $5\sim6^\circ$)において農薬を散布し表流水の発生を待ったが、9～11月の自然降雨では表流水は発生しなかった。1996年には7月までの梅雨の時期でもほとんど発生せず、9月の台風通過時の 30mm/hr 前後の降雨で約 1.7L/m^2 の表流水が得られた⁸⁾。このときの農薬(3種類)の流出率は、投下量に対して $0.01\sim0.05\%$ 程度であった。1997年には同様の試験を宮崎県の灰色低地土の圃場でも実施したが、降雨強度の強い降雨が連続する期間(5～7月)に計13回の表流水の発生が観察された(図2)¹¹⁾。このうち、散布直後に地表流出したのは1回のみで、あとは散布7日後以降であった。したがって、比較的頻繁に表流水が発生するような圃場においても、タイミング良く地表流出試験を実施することは極めて困難であると考えられる。

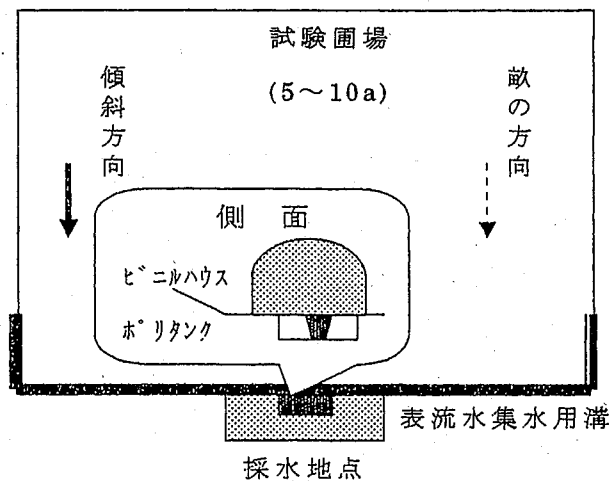


図 1. 傾斜圃場における表流水の採取法

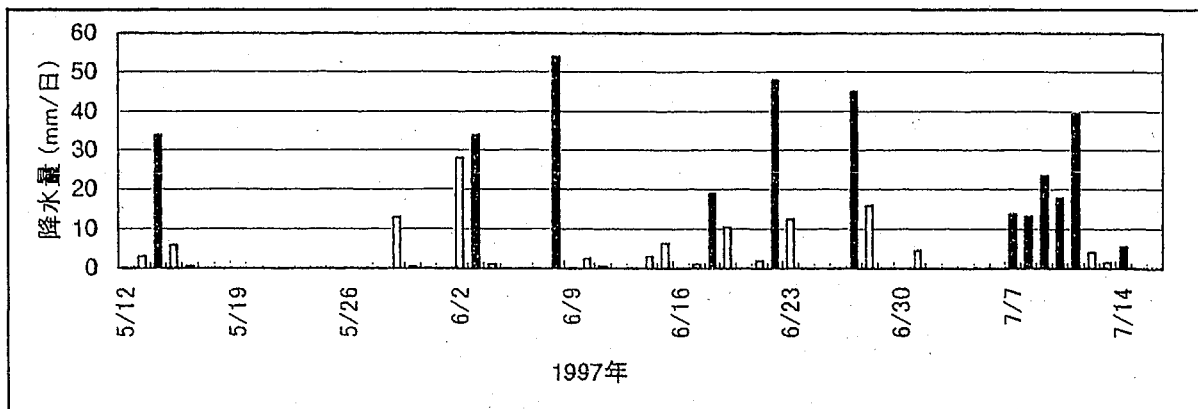


図 2. 灰色低地土の圃場における降雨と表流水の発生(■)(7/9に2回発生)

3. 小規模地表流出

前述のように天候に左右される野外試験で、タイミング良く確実に表流水を得ることは極めて困難である。圃場にスプリンクラーを設置して散水(降雨)して表流水を発生させる試験も実施したが⁷⁾、傾斜地に大量の水を確保し、スプリンクラーを設置するのは莫大なコストを要し、一般的な方法ではない。そこで演者らは野外での自然降雨を良好に再現して地表流出試験を実施するための屋内での小規模試験系を開発してきた⁹⁾。これは降雨条件や圃場条件を制御しやすくするために圃場の作土層の土壌をそのまま大型のコンテナ(0.7m²: 幅 0.76m、長さ 0.93m、深さ 0.20m)に詰め込んで、小さな圃場試験区を作製し、この試験区に傾斜をつけて人工降雨装置の下に設置して人工降雨を与え、表流水を発生させることで、野外での困難な地表流出試験をよりコンパクトに再現するものである。本試験系の詳細、および圃場(黒ボク土)試験の結果を再現することが可能であったことは先に紹介した^{3,4)}ので、本稿ではこの試験系を用いて異なる土壌における表流水の発生について紹介する。

畑地土壌の 40%前後を占める黒ボク土壌、同 5%の灰色低地土および同 2%の砂丘未熟土の水流出の比較を行った。供試した 3 種類の土壌の特性を表 1 に示した。これらの土壌を充填した試験区を作成し、降雨条件 12、20、30 および 40mm/hr の降雨条件で表流水の発生について比較した。すなわち、屋内小規模試験系において、一定の降雨強度の人工降雨下で流出してくる表流水を試験区(0.7m²)当たり 200ml ずつ採取し、そのときの時間を計測した。発生を始めてから時間が経つに従い 200ml の採取時間は短くなり、やがて一定に収束する。この採取最速時間を各降雨強度と 3 種土壌でもとめると表 2 のようになった。これらの数値は、例えば 4.0min/200ml/0.7m² (黒ボク土で 30mm/hr の降雨) は 72ml/m²/min に、さらに 720L/10a/10min と変換できる。同様に他の数値も変換すると表 2 は表 3 で表せる。この表 3 は各土壌の圃場 10a から、それぞれの降雨強度で 10 分間当たりの降雨によって流出する表流水の最大値を示している。この表 3 のデータから図 3 に示すような近似曲線が描ける。この近似曲線から表流水の発生量を示す方程式は次のように表せる。

$$\text{黒ボク土では: } y_a = 0.5868x^2 + 14.822x - 252.02 \quad \dots\dots\dots (1) \\ (R^2 = 1) \quad (y: \text{L/10a/10 分間降雨}, \quad x: \text{mm/hr})$$

$$\text{灰色低地土では: } y_g = 1.3428x^2 - 13.052x + 613.44 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$(R^2 = 1) \quad (y: L/10a/10 \text{ 分間降雨}, \quad x: \text{mm/hr})$$

砂丘未熟土では: $y_s = 1.2544x^2 - 21.69x + 156.01$

$$(R^2 = 0.9994) \quad (y: L/10a/10 \text{ 分間降雨}, \quad x: \text{mm/hr})$$

となった。

表 1. 3 種土壌特性の比較

土壌特性	黒ボク土	灰色低地土	砂丘未熟土
pH(H ₂ O)	6.1	5.5	6.2
pH(KCl)	5.1	5.0	—
有機物含量(%)	3.42	1.69	1.13
CEC(mEq/100g)	25.5	10.7	9.1
リン酸吸収係数	1,120	889	900
砂(%)	52.7	48.7	87.4
シルト(%)	29.9	26.7	11.9
粘土(%)	17.4	24.5	0.7
最大容水量(%)	81.8	62.0	49.5
土性	CL	CL	S

表 2. 表流水 0.2L/0.7m² 当たりの採取最速時間

降雨強度 (mm/hr)	採取最速時間(min)		
	黒ボク土	灰色低地土	砂丘未熟土
12	285.7	4.4	43.8
20	10.0	3.2	12.0
30	4.0	2.0	4.6
40	2.2	1.3	2.2

表 3. 圃場 10a から 10 分間の降雨当たりの表流水の最大流出水量
(表 2 より算出: L/10a/10 分間降雨)

降雨強度 (mm/hr)	最大流出水量(L/10a/10 分間降雨)		
	黒ボク土	灰色低地土	砂丘未熟土
12mm/hr	10	650	70
20mm/hr	280	890	240
30mm/hr	720	1430	620
40mm/hr	1280	2240	1300

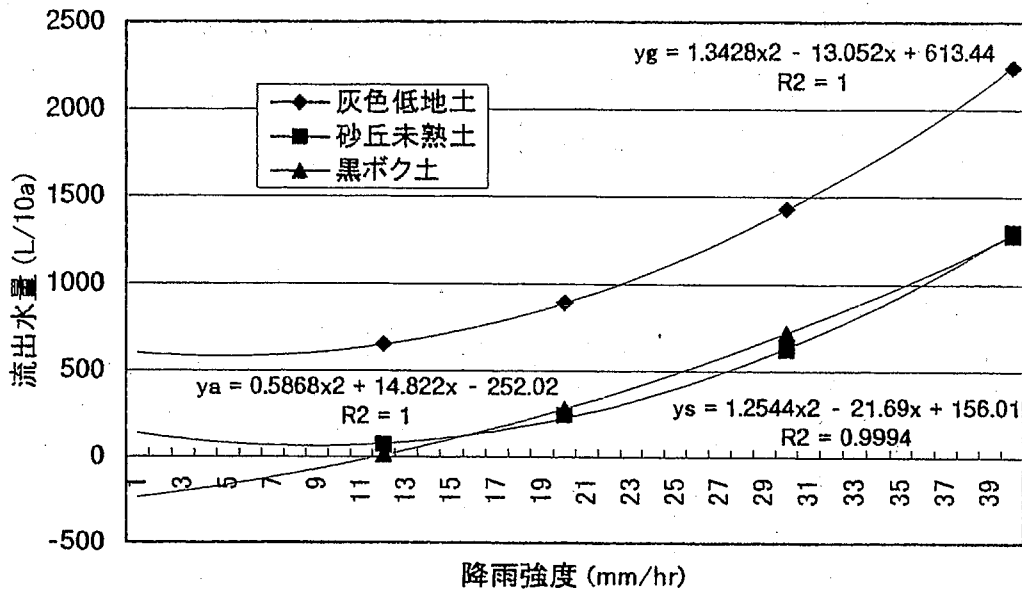


図 3. 各土壌と降雨条件における発生表流量と近似曲線
(表 3 データより描画)

黒ボク土における表流水の発生には、土壌中の水分含量の pF 値が 1.6 前後(飽和状態)まで低下することが必要であり、このためには予め 30-60mm の積算降雨が必要であること、30mm/hr の降雨条件では $pF1.6$ になってから 10 分間程度の降雨で表流水が流れ始めること、20mm/hr の降雨条件では $pF1.6$ になってから 30 分間程度の降雨で表流水が流れ始めること、12mm/hr の降雨条件では $pF1.6$ になってから 240 分間程度の降雨で表流水が流れ始めることなどが明らかになっている^{3,9)}。これより、本土壌においての表流水の発生は降雨強度と降雨時間の関係だけではないと考えられる。したがって、方程式(1)は、土壌水分含量が飽和状態になった特殊な場面での表流水の水量を表すものと考えられる。演者らは既に pF 値を考慮した算出法で表流水の予測水量を算出し実測水量と比較して、黒ボク土の圃場における表流水の発生量の推定がおおよそ可能であることを示している^{3,9)}。これに反して、灰色低地土は土中の水分含量とは関係なしに、土壌表面の状態のみで発生する。また、砂丘未熟土においては、降雨開始後に速やかに $pF1.6$ 以下になってしまい、水分含量を考慮する必要性は低い。したがって、両者は降雨強度と降雨時間の関係で表流水の発生量を推察できるものと考えられる。そこで、降雨データと表流水の実測水量のデータがある灰色低地土と方程式(2)を検証した¹¹⁾。

自然降雨に於いて示される時間当たりの降雨強度は、その時間内で

一定になっていることはなく、かなりの強弱を内在している。より詳細な降雨条件を考慮するために 10 分間当たりの降雨強度を当てはめて、表流水量を予測することを試みた。すなわち、方程式(2)から算出される予想表流水量を 10 分間当たりの降雨強度で示すと表 4 となった。

表 4. 方程式(2)より算出される灰色低地土圃場における予想表流水量

降雨強度 (mm/10min) : x	予想流出量 (L/10a) : y _g	備 考
0.5	586	表流水は発生しない
1.0	583 (0.58mm)	表流水は発生しない
1.5	605	
2.0 (12mm/hr)	650 (0.65mm)	
2.5	720	
3.0 (18mm/hr)	814 (0.81mm)	
3.5 (21mm/hr)	932	
4.0	1074 (1.07mm)	
4.5	1240	
5.0 (30mm/hr)	1430 (1.43mm)	
5.5	1645	
6.0	1884 (1.88mm)	
6.5 (39mm/hr)	2147	
7.0 (42mm/hr)	2434 (2.43mm)	

10 分間当たりの降雨強度が 0.5mm および 1.0mm では極小点を過ぎているため表流水は発生しない。この表 4 の予想水量のデータをもとに再度近似曲線を描くと、次のような方程式が得られた。

$$y_g = 48.298x^2 - 77.917x + 612.71 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$(R^2 = 1) \quad (y_g: L/10a, \quad x: mm/10min)$$

アメダスの降雨データは 10min の降雨強度までであるので、方程式(3)を用いて表流水の総流出量を算出する場合、次のように表せる。

$$A = \sum y_g \quad \dots\dots\dots (4)$$

(A:総量, y_g: 各 10 分間の降雨強度当たりの流出量)

方程式(3)および(4)に実際に観察された降雨データを代入して算出さ

れた予測水量と実際に発生した表流水の実測量を比較したものを表 5 に示した。個々のケースでは必ずしも一致しないものも認められたが、オーバーフローして計測できなかったものを除外した予測水量の総量は実測量の総量の約 3 割増しとなったが、大局的にはかなり合っているものと考えられた。

屋内小規模試験系で黒ボク土と灰色低地土における表流水の発生を比較すると、図 4 に示すように灰色低地土では比較的弱い降雨(12mm/hr)でも黒ボク土におけるかなり強い降雨(30mm/hr)よりも容易に表流水が採取された。これは圃場試験においても同様の傾向が認められる(表 6)¹⁰⁾。また、流出した表流水中の農薬の水中濃度は、図 5 に示すように黒ボク土と灰色低地土で比較した場合、TPN は両者で同定の流出濃度なのに対して、メソミルは灰色低地土のほうが高濃度であった。これらは、土壌の種類が地表流出の有無および流出濃度に影響を及ぼす可能性を示唆しているものと考えられる。

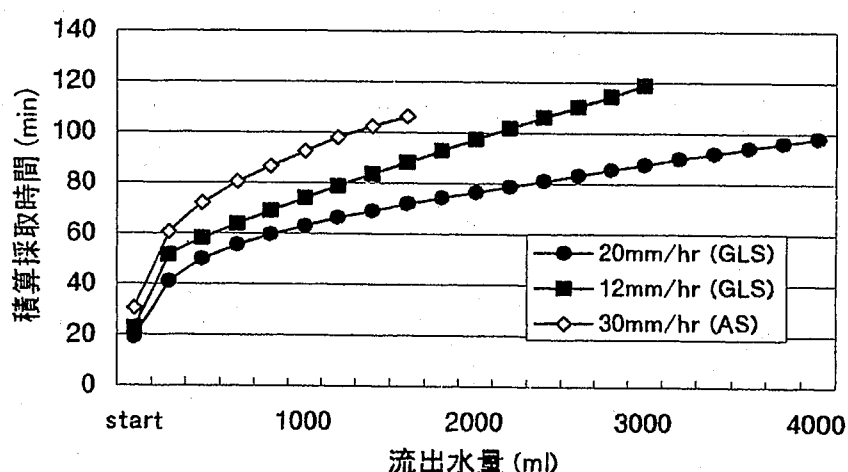


図 4. 黒ボク土(AS)と灰色低地土(GLS)における表流水採取時間の比較

一方、水中濃度に占める SS(浮遊物質)中の濃度は、TPN では高く、メソミルでは検出限界以下であった。この傾向は 2 土壌間で認められ、大きな差はみられなかった。表 7 に灰色低地土の圃場において発生した地表流出試験⁹⁾の一例を示した。TPN は流出の大部分が SS とともに流出し、水相中の濃度は 0.05ppm 前後で一定であった。これに対してジメトエートはその大部分は水相中の濃度であり、SS とともに流出したのは 1%程度であった。したがって、流出水の農薬濃度の中でどの

程度 SS に由来するかは、土壌の違い、例えば含有 SS 量の違い等も影響するかもしれないが、農薬自身の特性にも大きく依存しているものと考えられる。

表 5. 1997 年に灰色低地土の圃場 ^{a)} (日植防研宮崎試験場) で発生した表流水の実測量と方程式(4)によって算出された予測流出量の比較

発生日	10 分間当たりの降水量(mm/10min)									実測流出量(L)	推定流出量(L) ^{b)}
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0		
5/14	3 ^{c)}		2		2	1	1			>1950	(3715)
6/3	5									460	1513
6/8	6									840	1815
6/18	4									218	1210
6/22	10	4	1							>910	(4685)
6/27				1				1		1100	1122
7/7		1			1					419	791
7/8										58	0
7/8	2	1								1440	930
7/9	3	3		1						3530	2290
7/10	4			4				1		>1950	(3553)
7/11	2		1	1						2340	1372
7/14	1	1								700	628
9/8	2				3		1			430	2623
9/12		1					1		2	46	2829
9/16	台風 ^{d)}									---	---
10/2	6	5	4	6	2	1	1	1	1	13300	11068
総量 (n=13)(オーバーフローは除く)										24881	28191
1.5 mm/10 分間以上の降雨でも流出なし(n=3)										0	3767
推定流出水量の総量(L)と流出率(%)										24881	31958 (128.4%)

a) 圃場サイズ : 500m²

b) 方程式: 推定流出量(L) = $\sum(48.298x^2 - 77.917x + 612.71)$,

x: 1.5 mm/10min 以上の降雨強度。

c) 数字はそれぞれの降雨強度の降雨の発生頻度を示す。

d) 台風のため計測不能。

表 6. 1997 年の 9-10 月の灰色低地土圃場と黒ボク土圃場において発生した地表流出の比較¹⁰⁾

地表流水の 発生日時	降雨水量 (mm)	時間当り 最大雨量 (mm/hr)	灰色低地土圃場		黒ボク土圃場	
			流出量 (L)	流出率 (%)	流出量 (L)	流出率 (%)
9/8,						
3:10-5:30	13.5	11.5	430	6.4	- ^{b)}	-
9/12,						
21:20-22:40	20.0	19.5	45	0.5	-	-
9/16,			OF ^{a)}			
1:00-13:00	233.0	33.0		OF	410	0.4
10/2,						
8:10-10:20	21.0	11.5	1100	10.5	-	-
10/2,						
11:30-14:20	48.0	86.5	12200	50.8	1590	6.6
10/2,						
14:20-16:20	17.5	13.0	OF	OF	740	8.5

a) オーバーフローにより計測できず。 b) 地表流出は発生せず。

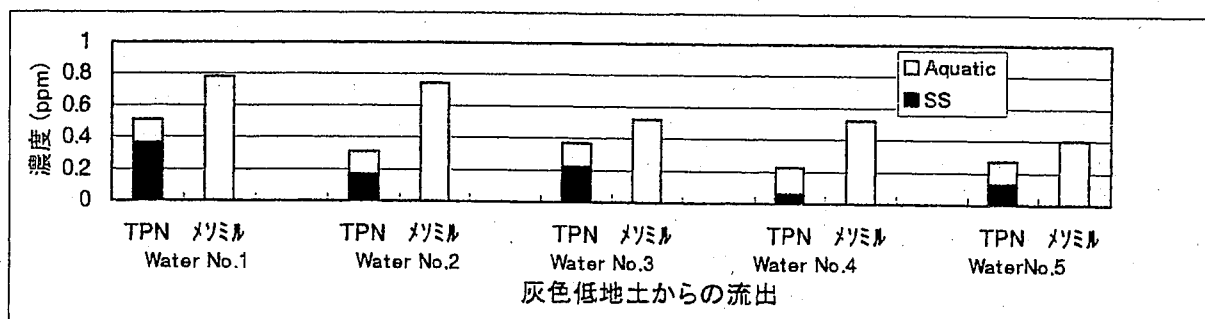
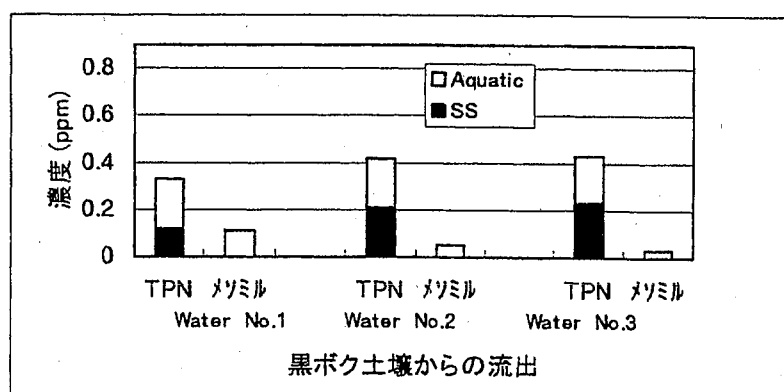


図 5. 屋内小規模流出試験系における 2 土壌間の農薬の表流水中の濃度および SS 中濃度の比較

表 7. 圃場試験(灰色低地土)における表流水中の濃度(mg/L)と SS 中濃度の比率(%)および表流水発生前後の土壌中の農薬濃度(mg/kg)

散布直後 表流水発生 (1440L/5a)	TPN		ダイズン		ジメトエート	
	水中 (SS 中%)	土壌中	水中 (SS 中%)	土壌中	水中 (SS 中%)	土壌中
発生直前		0.20		0.26		0.43
発生初期	1.3320 (96%)		0.1222 (36%)		4.1562 (1%)	
中期	0.2657 (78%)		0.0854 (33%)		1.9343 (1%)	
後期	0.0767 (47%)		0.0490 (44%)		0.2581 (1%)	
終了直後		0.09		0.16		0.30

4. 予測流出率

表流水の発生頻度は5～10月に集中し、全国平均では約11回程度であると見積もられている²⁾。また、前述の「農薬生態影響評価検討会」の第2次中間報告書では、夏期は平均15日に1回程度の頻度で発生することを想定している。さらに標準的な地表流出のケースとして散布7日後に降雨に伴う地表流出があるものとして、第1段階の数値計算では0.2%の流出率を供試するとしている⁵⁾。そして第2段階では実際の試験からの流出率を用いることとしている。

さて、表流水の発生は不確実であることから、前述のような方法でモデル試験を実施することで流出率を算出できることを示した。しかし、この場合、散布直後の流出濃度(率)は高く、日数が経過するにしたがって流出濃度(率)は低下する。したがって、いつ表流水が発生したか、あるいはいつ表流水を発生させたか、が重要になる。そして環境中予測濃度を求める式に代入する「流出率」はどのような値になるのか、どのようにして求めるのか、の検討が必要になる。

投下された農薬が一度の連続降雨によって土壌表面から完全に流れ切った場合が、ポテンシャルとしての最大流出率になる。一方、毎日一定量ずつ流出させて出なくなる日までの流出率を積算したものが「積算流出率」となる。さらに、これを日数で除したものが「平均流

出率」となる。したがって、これらは最大流出率 $\geq$ 積算流出率 $>$ 平均流出率の関係になるものと考えられる。例えば屋内小規模地表流出試験系で散布1日後、3日後、7日後、14日後に一定の降雨強度(例えば黒ボク土では30mm/hr)で一定の流出水量(例えば1L/0.7m²)を採取して農薬の流出率を求め、「積算流出率」や「平均流出率」(図6)を算出することが可能である。また、「7日後」という特定日の流出率も容易に求め得るだろう。

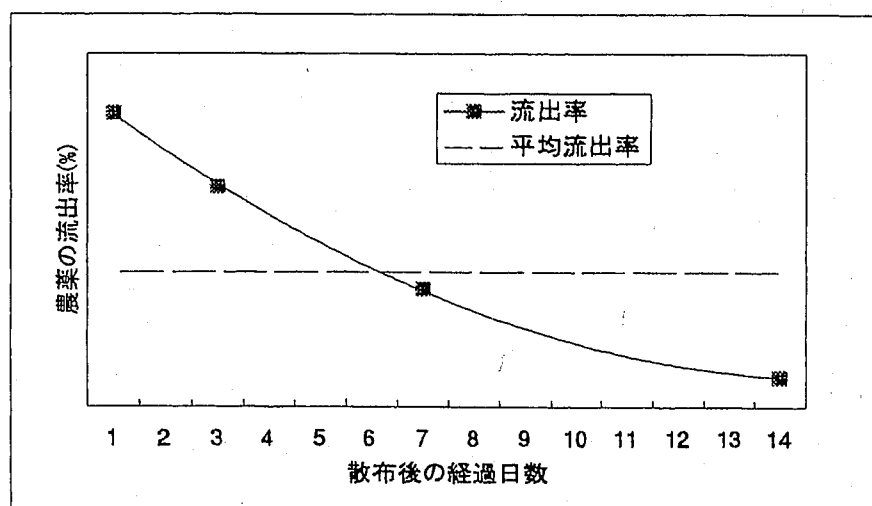


図6. 平均流出率の求め方

5. おわりに

屋内小規模地表流出試験系などを用いて自然降雨で発生した地表流出の実体を再現し、シミュレートすることはおおよそ可能であると考えられる^{8,9)}。しかし、畑地に散布された農薬は、大量の降雨によっても必ずしも流出することは少なく、さらに流出しても多くの場合、用水路等まで到達することは希なことで推察されている²⁾。したがって、各流出試験などにおいて強制的に表流水を発生させて求めた農薬の流出率は(平均値を求めることで幾分かはマイルド化されているのかもしれないが)、極めてワーストケースであり、必ずしも現状を反映しているとは言えないのかもしれない。環境中予測濃度(PEC)の算出に、このようなワーストケースの流出率を利用することは、反面、環境への負荷を軽減する方向に働くとの見方もある。いずれにしても今後の進展を注視していく必要があると考える。

なお、本稿で紹介した試験データの多くは旧環境庁水質保全局土壌農薬課からの委託試験によるものであるが、本稿の内容については、演者の責任に負うものであり、環境省の見解を含むものではない。

6. 引用文献

- 1) Leonard, R. A.: "Pesticides in the Soil Environment: Processes, Impacts & Modeling," ed. by H.H. Cheng, SSA Book Series No.2, Soil Science Society America, Madison, pp.303-349. (1990)
- 2) 藤田俊一：農薬環境科学研究 6:77-89. (1998)
- 3) 高橋義行：農薬環境科学研究 7:11-21. (1999)
- 4) 高橋義行・藤田俊一：植物防疫 56:353-356. (2002)
- 5) 農薬生態影響評価検討会：第2次中間報告「21世紀における我が国の農薬生態影響評価の当面の在り方について」、環境省水環境部、pp.52. (2002)
- 6) Ganzelmeier, I. H. et al.: Studies on the spray drift of plant protection products, Results of a test program carried out throughout the Federal Republic of Germany. BBA, Berlin. 111pp. (1995)
- 7) Takahashi, Y. et al: J. Pesticide Sci. 24: 255-261. (1999)
- 8) Takahashi, Y. et al: J. Pesticide Sci. 25: 140-143. (2000)
- 9) Takahashi, Y. et al: J. Pesticide Sci. 25: 217-222. (2000)
- 10) Takahashi, Y.: in "Environmental Fate and Effects of Pesticides" ed. by J.R. Coat et al, ACS book 投稿中.
- 11) Takahashi, Y. et al: J. Pesticide Sci. 27: 印刷中. (2002)
- 12) Nicholson, H.P. et al: Limnol. Ocean. 9:310-317. (1964)
- 13) Nicholson, H.P. et al: Proc. Symp. Agric. Waste Water. Water Resour. Cent., Univ. Calif., Rep. 10:132-141. (1966)
- 14) Spencer, W.F.: USDA-ARS Conserv. Res. Rep. 31. U.S. Gov. Print. Offiec, Washigton, DC. (1985)
- 15) Felding, G. et al.: Pesticides Reseach No. 29, Danish Environmental Protection Agency, 76pp. (1997)
- 16) 農林水産省農産園芸局農産課：わが国の耕地に於ける水蝕と風蝕 (1979)