

# 農薬の地表流出と地下浸透

社団法人日本植物防疫協会 藤田 俊一

## 1. 農薬の環境中曝露経路

農薬は一般に野外環境中で使用される化学物質であり、圃場に投下された農薬成分は様々な経路で系外に拡散/移動し、それらは多くの場合それぞれの環境中で分解等を受けてやがて消失する。系外への曝露経路は多様であるが、おおまかにいうと、ドリフト、土壌表面からの流出、地下浸透に分類できる。

ドリフトは農薬の散布によって生じ、それ自体の運動エネルギーによって、あるいは気流によって系外に拡散するが、その状況は農薬の剤型、散布方法及び気象条件によって大きく異なる。一方、散布等によって土壌表面に直接又は間接的に落下した農薬は、その初期には土壌表層に存在しているが、やがて灌水や降雨によって土壌中にゆっくり浸透していく(地下浸透)。土壌表面に農薬が留まっている間に極めて強い降雨があれば、土壌表面にあふれた雨水(表流水)によって農薬成分は系外に流亡する可能性がある(地表流出)。

それぞれの曝露経路によって、その系外拡散がもたらす問題の意味は異なる。ドリフトはまず散布作業、周辺住環境、有用動植物への直接的被害の観点で問題となるが、水系への直接混入による水質影響も重要となる。地表流出も主に水系への混入による水質影響である。地下浸透は、中間流出による表層水との関連づけもあるが、主体は地下水影響である。極論すれば、ドリフトと地表流出は表層水の飲料水質保全と水系生態保全、地下浸透は地下水質保全と土壌生態保全というように整理できるものと思う。

本稿では、畑地を中心とし、これらの曝露経路のうち地表流出と地下浸透について、筆者が携わった調査・検討から得られたフィールドレベルでの知見を紹介する。

## 2. 地表流出

### 2-1. 表流水の発生条件

農薬の地表流出に関与する要因は複雑かつ多岐にわたるが、表流水が媒体となることから、まずどのような条件で降雨が表流水となるのかを知る必要がある。農耕地に関するこうした研究は、これまで農地造成、例えばエロージョン防止対策等の分野で取り組まれてきている。

これらの研究から、表流水が発生しやすい農耕地の要件としては、①傾斜圃場、②透水性が悪く表土が堅い圃場、③傾斜線にそった縦畝栽培、④裸地圃場、のように整理することができる。また、当然のことながら、圃場が水系に隣接したり直結していれば、表流水が水系に影響を及ぼしやすいといえる。

降雨条件は圃場要件と並んで極めて大きな要因である。これまでの調査では、傾斜畑では、裸地の場合鈹質土壌では積算雨量10-70mmに達したのちに3mm/30分の降雨で、火山灰土壌では同15-20mmののち2-3mm/30分の降雨でそれぞれ発生し、作付けがあるとその2倍

程度で発生する、と報告されている<sup>1)</sup>。また、斜面ライシメーターを用いた研究から、表流水と年間降雨量が正の相関を有するとの報告もある<sup>2)</sup>。

我が国は南北に長く、地域によって降雨条件はかなり異なる。そこで、筆者らは全国各地の過去10年間のアメダスデータを解析し、地域ごとの潜在的な地表流出発生頻度のおおまかな推定を試みた(表1)。その結果、①発生はおおむね5~10月に集中する。②頻度は概ね西高東低であり、年間降水量と正の相関がある。③表流水発現の降雨条件は年平均1.6回(北海道)~20.8回(宮崎)、全国平均10.6回となった。いうまでもなく降雨には様々なパターンがあり、またある圃場で表流水が発生したからといってその地域の多くの圃場で発生するとは限らない。

表1) 畑地からの推定表流水発現回数(10年間の平均)

場所	年降水量	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	計
芽室	890	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0	0.9	0.3	0.1	0	0	1.6
奥中山	1142	0	0	0	0.1	0	0	1.2	1.4	1.1	0.1	0	0	3.9
福島	1125	0	0.1	0	0.1	0.1	0.3	0.7	1.6	0.9	0.3	0	0	4.1
竜ヶ崎	1389	0.1	0.1	0.2	0.5	0.5	1.0	0.6	1.9	1.8	1.0	0.5	0.1	8.3
前橋	1256	0	0	0	0	0.2	0.6	1.5	2.7	1.9	0.2	0.4	0	7.5
野辺山	1459	0.1	0	0	0	0.1	0.5	1.1	1.2	1.2	0.3	0.1	0	4.6
豊橋	1711	0.2	0.7	0.6	1.0	1.4	1.9	1.2	1.6	2.7	1.1	0.8	0.4	13.6
岐阜	1901	0	0.2	0.3	0.3	0.8	2.4	3.6	1.6	2.5	0.5	0.8	0	13.0
金沢	2462	0	0	0.1	0.1	0.8	2.0	2.7	1.2	1.8	0.8	0.9	0.4	10.8
福知山	1612	0	0	0.1	0.7	0.4	1.8	2.4	1.5	2.1	0.5	0.3	0	9.8
米子	1824	0	0	0	0.1	0.1	1.6	2.6	1.6	1.7	1.0	0.4	0	9.1
津山	1528	0	0	0	0.3	0.5	1.9	3.0	1.0	1.3	0.5	0.4	0	8.9
世羅	1428	0	0	0	0.3	0.6	2.5	1.9	1.4	1.5	0.5	0.4	0.2	9.3
徳島	1499	0	0.1	0.2	1.0	0.6	1.5	0.5	2.3	1.5	0.7	0.7	0.1	9.2
宇和島	1725	0.1	0.2	0.4	0.8	0.8	3.1	1.8	2.2	1.7	0.7	0.2	0	12.0
日田	1950	0.1	0.2	0.5	0.4	1.6	4.3	3.7	1.9	1.3	0.3	0.1	0	14.4
高森	2607	0.4	0.4	0.8	0.8	2.4	4.6	5.8	2.4	1.8	0.4	0.3	0	20.1
宮崎	2630	0.1	0.5	0.8	0.9	1.7	4.5	3.7	3.4	2.9	1.6	0.4	0.3	20.8
大隅	2409	0.2	0.7	1.2	1.2	2.3	4.5	3.3	3.3	2.7	0.7	0.2	0.2	20.5
平均	1713	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	2.1	2.2	1.8	1.7	0.6	0.4	0.1	10.6

注) 全国の畑作園芸地帯を代表すると思われるアメダス観測地点19か所について、1984-1993年の10年間のアメダスデータを検討し、連続積算降雨量が30mmに達したのちの時間降雨量が10mm以上のとき、又は積算雨量にかかわらず時間降雨量が20mm以上のとき、を表流水発現条件と仮定し、年平均条件発現回数を月別に表示した。連続2日以上にわたる場合も1回として集計したが、おおむね回数=日数である。

発生する表流水量はこれまた千差万別であるが、大胆な平均として、5-10°の傾斜圃場で年間降水量の2.8%という報告がある<sup>1)</sup>。1回当たりの降雨と表流水量の関係では、最近の環境庁委託調査により当協会研究所をはじめ幾つかの県試験場で得られたデータ(表流水が発生しやすい傾斜圃場、耕作条件で実施)を概観すると、おおむね降水量の数%以下である。この調査における各圃場からの表流水量も千差万別であるが、大胆に平均すると1回の発生につき1m<sup>2</sup>当たり1.5Lほどになっている。

実際の農耕地では、強い降雨中であっても大規模な表流水を目にすることはまずない。

そもそも表流水が生じやすい雨の多い傾斜地帯では、エロージョン防止の観点から一般に農地造成や耕作に工夫がなされている場合が多いからである。従って、表流水が認められる場合でも、圃場全面からではなく、踏み固められた通路等からの流出を目にすることのほうがより一般的と思われる。

表2) 雨の強さと降雨状況

通称	雨の強さmm/hr	降雨状況
小雨	1未満	地面がほとんど濡れないか、かすかに湿る程度。
弱い雨	1-3未満	地面がすっかり湿る。
雨	3-8未満	地面に水たまりができる。
やや強い雨	8-15未満	雨の降る音が聞こえる。
強い雨	15-20未満	地面に一面水溜りができる。雨の音で話がよく聞き取れない。寝ている人の半数くらいが気づく。
激しい雨	20-30未満	どしゃ降りになり傘をさしていても濡れる。側溝がたちまちあふれる。小川の氾濫が始まる。大雨注意報が出る。
非常に激しい雨	30-50未満	バケツをひっくり返したように降る。都市では下水管があふれる。大雨警報が出る。山崩れ・がけ崩れが起こりやすい。場合により避難の準備を始める。
猛烈な雨	50以上	滝のように降る。雨しぶきで辺りが白っぽくなる。土石流が起きやすい。

## 2-2. 農薬の地表流出

農薬の地表流出は上記の表流水によって発生する（我が国の場合、積雪地帯の融雪では表流水は認められないとの報告がある。<sup>1)</sup>）。

農薬の散布直後に豪雨にあい、表流水が発生した場合に農薬の地表流出は一般に最も多くなるが、散布後数日も経過すると農薬濃度は圧倒的に減少してしまう。これは、散布された農薬が時間とともに土壌表層から下方移動したり、土壌吸着がすすんだり、作物に吸収されたり、農薬そのものの分解がすすんだりすることによって、地表面の潜在流出可能量が減少することによる。

これらのことは、農薬サイドの要因、すなわち化合物の物理化学性、及び農薬の剤型等と密接に関係する。これまで得られた知見をもとにその概略を表3にまとめたが、それぞれの要因のなかでも、ある条件では相反する性状を示すことがあり、必ずしも単純ではない。例えば、土壌吸着性の高い農薬は一般に地表流出されにくいと考えがちであるが、表流水に含まれる微細な土壌粒子(SS)が多い場合には、むしろ圃場からの流出率は高まる傾向がある。

散布された農薬は実際にどの程度地表流出するのであろうか？ 流出量は表流水の状態で左右されるため一般化は難しいが、これまでの調査（注：表流水が発生しやすい耕作条件で実施）の範囲では、散布直後で散布量のおおむね0.4%程度、散布から数日経過するとかなり減少し、一週間もするとほとんど無視できる程度の流出量となることが示されている（表4）。この調査の範囲では、流出傾向は農薬の要因よりも圃場の要因、例えば表流水の発生しやすさ、SS混入率といった影響をむしろ強く受けている。但し圃場間の土壌特性との相関までは明確ではない。

表3) 地表流出に関する農薬サイドの主な要因

要因	影響
分解性	分解の早い農薬では散布後の早いうちに潜在流出量は減少する。
土壌吸着性	土壌への吸着が高い農薬は、表流水による地表流出が相対的に発生しにくいといえるが、細かな表面土壌粒子（SS）が混入しやすい圃場では、土壌に吸着されたまま流出しやすくなる。
水溶解性	水溶解度の高い農薬は、表流水に溶解して流出しやすい。一方、雨水や土壌水に溶解して下方移動しやすい性質も併せ持つ。
剤型	粒剤やマイクロカプセルなど徐放性の製剤では、処理後の潜在流出可能量の推移が液剤と異なる。またフロアブル剤も散布後の短時間の範囲では、その他の液剤と異なる。
処理形態	処理回数が多ければ地表流出の遭遇確率が相対的に高まる。茎葉散布では土壌表面への落下量は減少するが散布直後の強雨があると茎葉からのwash-offが生ずる。灌漑等の土壌中への処理は表層での潜在流出量は減少するが、土壌表面処理はその反対である。

この種の調査を大規模かつ精緻に行うのは難しいため、我が国における上記の調査も1枚の圃場単位で期間を限定して実施したものであるが、最近デンマークでかなり大がかりな試験が行われている<sup>3)</sup>。試験は0.55haの冬小麦栽培農地（平均斜度約7度）の下部に表流水の採取・観測装置を設置して行われた。冬小麦作付けの秋に除草剤のmecopropを散布し、翌春には除草剤のdichlorpropを散布、出穂後に殺虫剤のalpha-cypermethrinを散布するという年間サイクルを2か年つづけ、その間得られた表流水をその都度分析したものである。その結果、小規模な流出は頻繁に記録されたが、農薬の流出上問題となる表流水は4回記録され、それらによる各農薬の流出状況は以下のとおりである。

農薬名	表流水中最高濃度	2年間での合計流出率
mecoprop	0.00615ppm	0.08%
dichlorprop	0.00464ppm	0.002%
alpha-cypermethrin	0.00013ppm	0.001%

デンマークの試験も含め、これらの試験はいずれも圃場（畑地等）の水尻を排水ポイントにみため、その地点で圃場からどの程度農薬が流出したかを調査したものである。実際の農地では、そのようなポイントが水路に直結している場合も確かにあるが、圃場の一角に留まったままであったり、流れ出た先で土壌に浸透してしまうような場合も少なくないと思われる。従って、地表流出した農薬が直接水系に混入する割合は、調査で得られた流出率より実際にはかなり少ないものと推測される。

表4) 農薬の地表流出に関する圃場試験結果の概要<sup>1)</sup>

年 場所 (作目)	農薬名	投下量 (mg)	処理後 日数	表流水 量(L)	流出量 (mg)	表流水中 濃度(mg/L)	流出率 (%)	
H9 青森 (リンゴ)	ダイアジノン	238,000	6	30	4.05	0.1350	0.0017	
			11	(217)	5.56	0.0256	0.0023	
			16	2.5	0.07	0.0280	<0.0001	
			32	(107)	0.27	0.0025	0.0001	
			35	5	0.01	0.0032	<0.0001	
	MEP	238,000	6	2.3	0.03	0.0152	<0.0001	
			350,000	4	2.5	0.17	0.0680	<0.0001
		350,000	21	(107)	0.61	0.0057	0.0002	
			24	5	0.02	0.0040	<0.0001	
			6	2.3	0.03	0.0148	<0.0001	
			7	(107)	0.13	0.0012	<0.0001	
			10	5	0.003	0.0006	<0.0001	
H8 茨城 (ハクサイ)	ダイアジノン	24,000	1	13.5	0.167	0.0124	0.0007	
			3	168	0.4875	0.0029	0.002	
		32,000	1<15>	114.1	1.78	0.0156	0.0056 *	
			2<16>	1320	4.659	0.0035	0.0146 *	
		TPN	24,000	1	13.5	0.119	0.0088	0.0005
				3	168	0.254	0.0015	0.0011
	32,000		1<15>	114.1	2.63	0.023	0.0082 *	
			2<16>	1320	40.56	0.0307	0.1268 *	
	H8 JPPA 牛久 (ダイコン)	TPN	34,100	2	1420	15.97	0.0112	0.0468
		ダイアジノン	34,100	2	1420	2.47	0.0017	0.0072
		シメトエート	36,700	2	1420	3.78	0.0027	0.0103
	H8 JPPA 牛久 (キャベツ)	TPN	46,800	1	0.56	0.0019	0.0034	<0.0001
ダイアジノン		46,800	1	0.56	0.0016	0.0028	<0.0001	
シメトエート		50,400	1	0.56	0.0005	0.0008	<0.0001	
H7 千葉 (ニンジン)	メトクロル(G)	55,200	13	0.425	0.0017	0.004	<0.0001	
			14	0.185	0.0011	0.006	<0.0001	
			50	1.5	0.006	0.004	<0.0001	
			52	34	0.102	0.003	0.0002	
			66	35	N.D.	N.D.	0.0000	
			73	3.5	0.0105	0.003	<0.0001	
			89	35	0.105	0.003	0.0002	
H6 山梨 (苺)	MEP	220,000	2	107	5.5	0.0514	0.0025	
H8 長野 (キャベツ)	TPN	69,600	0-1<14>	124	254.3	2.0508	0.3654 *	
	PAP	87,000	0-1	124	95.9	0.7734	0.1102	
	ヒリタフエンチオン	69,600	0-1	124	104.5	0.8427	0.1501	
	シメトエート	69,600	0-1<14>	124	74.7	0.6024	0.1073 *	
H9 長野 (ハクサイ)	ヘルメリン	10,472	3	102	4.2	0.041	0.0401	
			14,280	1<14>	22	3.82	0.1736	0.0268 *
	PAP	52,360	3	102	1.30	0.0127	0.0025	
			71,400	1<14>	22	0.97	0.0441	0.0014 *
			シメトエート	45,030	3	102	3.83	0.0375
61,400	1<14>	22	4.01	0.1823	0.0065 *			
H8 島根 (ダイズ)	TPN	16,800	0-1	2900	9.6	0.0033	0.0571	
	ダイアジノン	16,800	0-1	2900	60.5	0.0209	0.3601	
	MEP	21,000	0-1	2900	64.6	0.0223	0.3076	

(つづき)

年 場所 (作目)	農薬名	投下量 (mg)	処理後 日数	表流水 量(L)	流出量 (mg)	表流水中 濃度(mg/L)	流出率 (%)
H9 島根 (キャベツ)	TPN	16,800	7	3508	24.9	0.0071	0.1482
		16,800	0-1<19>	3000	165.2	0.055	0.983 *
			1-2<20>	1825	1.12	0.0006	0.0067 *
			5-6<24>	7550	54.79	0.0073	0.3261 *
			9-10	1700	0.8	0.00047	0.0048
	13-14	6800	4.3	0.00063	0.0256		
	ダイアジノン	16,800	7	3508	92.7	0.0264	0.5518
		16,800	0-1<19>	3000	304.9	0.1016	1.8149 *
			1-2<20>	1825	43.4	0.0238	0.2583 *
			5-6<24>	7550	73.0	0.0097	0.4345 *
			9-10	1700	3.8	0.0022	0.0226
	13-14	6800	3.3	0.0005	0.0196		
	ジメトエト	18,100	7	3508	70.5	0.0201	0.3895
		16,800	0-1<19>	3000	72.8	0.0243	0.4022 *
			1-2<20>	1825	18.2	0.0100	0.1006 *
5-6<24>			7550	21.4	0.0028	0.1182 *	
9-10			1700	3.1	0.0018	0.0171	
13-14	6800	2.2	0.0003	0.0122			
H9 JPPA	ダイアジノン(G)	150,000	56	477	N.D.	N.D.	0.0000
宮崎 (キャベツ)	TPN	47,800	7-8	477	1.33	0.0028	0.0028
		44,800	0<7>	1438.5	270.67	0.1882	0.6042 *
	ジメトエト	51,385	7-8	477	22.92	0.0281	0.0045 *
			48,160	0<7>	1438.5	1725.17	1.1993
		44,800	1<8>	72.5	10.93	0.1507	0.0227 *
ダイアジノン	44,800	0	1438.5	99.33	0.0691	0.2217	
			1	72.5	0.99	0.0137	0.0022
平均			0-1				0.3517
			2-4				0.0419
			5-7				0.1681
			8-21				0.0080
			21以上				<0.0001

注) 実圃場規模で自然降雨下で得られたデータのうち、計算可能なものを抽出し整理した。  
 (G)は粒剤であるが、それ以外は液剤の散布処理である。処理後日数の<>は前回散布からの日数を表す。表流量中の( )は推定。流出量と表流水濃度にはSSが含まれる。流出率の\*は前回散布の影響があると考えられるが、1回投下量に対する割合で表示した。平均は各事例の単純平均で表示した。島根及びJPPA宮崎の調査圃場は降水量に対する表流量の割合が極めて高い特殊な圃場である。

### 2-3 水田からの地表流出

我が国特有の農業形態である水田からの農薬の地表流出は、掛け流しや落水といった人為的な排水によるものであるが、降雨によっても影響を受ける<sup>5)</sup>。一般に畑地よりも問題になりやすい要因を有するといえるが、すでに多くの研究報告例があるので本稿では触れない。

### 3. 地下浸透

地表流出が強い降雨によってもたらされる突発的な現象であるのに対し、地下浸透は灌水や降雨等によってじわじわとすすんでいく。地表流出と地下浸透は、一見とくに関係なさそうであるが、大量の降雨があると一旦地表下に浸透した農薬があふれた雨水によって地表流出される場合もある。降雨のあと晴天がつづけば地表面からの蒸発が活発となり、土壌中では上向きの水の流れが生ずる。このように、浸透をはじめた農薬は、ときとして上方への移動もとりまぜながら、徐々に下方に移動していく。

農薬の地下浸透に関与する要因は、すでによく知られているとおり、農薬サイドの要因としては水溶解度、土壌吸着性、分解性等が関係し、欧米ではそれぞれ地下浸透能評価の目安とされている。我が国ではこれらの検証は本格的に行われていないが、本質的にはさほど違わないと考えられる。

すなわち、水溶解度が高く土壌吸着性の低い農薬は土壌中での移動性が高く、土壌中での分解が遅いものほど地中深くに浸透し存在しつづけるリスクが大きいといえる。反対に、土壌吸着性が極めて強い農薬は土壌表層付近に留まり、しかも分解が早いものであればそのようなリスクは極めて小さいといえる。

周知のとおり土壌吸着は土壌によって異なる。一般に、我が国の農耕地の多くを占める黒ボク土では土壌吸着性は高く、砂質土壌では低いとされる。従って後者の場合に農薬の地下浸透は高まると考えられる。このことに加え、圃場の土性や地下構造等の土壌特性も農薬の地下浸透に影響を及ぼす。実際の農地では必ずしも均質な地下構造とはなっておらず、トラクタ等による耕耘や作物栽培などによって地表に近い層は比較的やわらかく維持される一方、その直下は鎮圧された固い層となっている場合がある。このとき鎮圧された固い層で遮断された浸透水は、横方向への移動のほか、地表の蒸発散に引っ張られて上方へも移動し、蒸発で失われるものも少なくないと推測される。このように、圃場ごとの土壌条件、降雨等の気象条件によって地下浸透のすすみかたは異なると考えられる。

平成5年に当協会研究所で実施した調査結果を表5に示す。この試験は試行錯誤の部分もあったが、調査の範囲ではD-D以外は下層には到達せず、時間経過とともに消失していく傾向が示されている。また、農薬の物性（水溶解度、土壌吸着性、土壌中半減期）を比較的良好に反映した結果になっている。