

# 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
菴ヶ崎	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。土石流が起こりやすい。

## 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 *
	1<8>		72.5	2.04	0.0281	0.0045 *	
	ジメトエト		51,385	7-8	477	22.92	0.0480
		48,160	0<7>	1438.5	1725.17	1.1993	3.5822 *
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。

表5) 農薬の鉛直浸透試験の一例(日植防研究所(1993)<sup>6)</sup>)

農薬名 処理内容	深度	処理後経過日数					
		土壤中農薬濃度 (ppm)					
D-D		3	7	14	30	45	62
牛久		ガス抜前/後					
裸地	0-15cm	14.20	12.80 / 10.50	1.410	0.606	0.461	0.466
40L/10a	20-30cm	3.260	1.760/ 3.220	0.688	0.310	0.190	0.244
1回	35-45cm	0.182	0.674/ 0.630	0.554	0.048	0.018	0.030
ビニル被覆	50-60cm	0.040	0.670/ 0.163	0.075	0.011	0.010	0.010
高知	0-15cm	16.90	12.60 / 14.80	11.60	6.640	2.780	2.230
処理同上	20-30cm	9.920	12.50 / 15.20	10.00	8.170	7.500	4.690
	35-45cm	0.970	1.440/ 1.680	1.660	2.200	1.230	1.240
	50-60cm	0.846	0.666/ 0.398	1.040	1.060	0.656	0.924
シマジンWP		0	7	14	30	61	
牛久	0-15cm	0.282	0.354	0.258	0.252	0.181	
小麦	20-30cm	0.006	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	
100L/10a	35-45cm	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	
1回	50-60cm	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	
高知	0-15cm	0	8	14	30	61	
処理同上	20-30cm	0.433	0.202	0.196	0.107	0.076	
	35-45cm	0.120	0.004	0.014	<0.003	0.003	
	50-60cm	0.040	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	
ハンチカーブEC		0	8	14	30		
高知	0-15cm	6.02	2.09	3.15	0.35		
裸地	20-30cm	0.38	0.12	0.05	<0.02		
1L/10a	35-45cm	0.21	0.05	0.11	0.05		
1回	50-60cm	0.54	<0.02	0.02	<0.02		
フラムWP		0	7	14	30		
牛久	0-15cm	7.838	14.858	8.598	6.458		
芝地	20-30cm	0.040	0.034	0.009	<0.006		
4g/L/m <sup>2</sup>	35-45cm	0.020	<0.006	0.135	<0.006		
3回散布	50-60cm	0.033	<0.006	0.095	<0.006		

注) 11-12月の低温期の試験である。牛久は火山灰土壌、高知は鉍質土壌である。処理量はいずれも製剤ベース (D-D:92%, シマジン:50%, ハンチカーブ:50%, フラム:80%)。濃度は乾土当たりの計算値。D-DはE体Zと体の合計値。フラムでは処理前の土壌での検出値を差し引いて表示した。D-D/高知では被覆時に多量の降雨があり、またガス抜き時にロータリー耕耘しており、結果に影響したと思われる。

供試農薬の物性

	水溶解度	Koc	土壌中半減期
D-D	2 g/L (20C)		6- 17day
シマジン	6.2mg/L(pH7, 20C)	103-277	27-102day
ハンチカーブ	30 mg/L(20C)	3170	2-3 week
フラム	18 mg/L(室温)		0.5day

出典) The Pesticide Manual, 11th Edition(1997)

水田では湛水の影響によって比較的浅い土壌層では浸透が容易と思われるが、不透水層が形成されているため、深部に浸透する割合は少ないのではないと思われる。

農薬の地下浸透を調査する手段はいくつか考案されているが、大別すると浸透水を採取



する方法と農薬の地中移動を調べる方法があり、それぞれ一長一短がある。

前者では、地中に埋設するタイプのパンライシメータ、キャピラリライシメータがあり、これらは圃場で利用できる可能性がある<sup>7)</sup>。実験的にはいわゆるライシメータを用いる方法がある。欧州で推奨されているモノリスライシメータは圃場から土壤の固まりをそっくり掘抜いてライシメータとして使う方法であるが、浸透水ばかりでなく、深度別に土壤中での挙動も調べる模様である。農業用井戸水の調査はモニタリング手段として有効であるが、井戸自体が不完全であったり、調査区域の地下水を反映しない場合もあると聞くので注意を要しよう。

後者の方法としてよく知られているのは、長さ1mほどの採土管を用いて定期的に土壤を採取し、層別に経時的に土壤中農薬量を調査するものである。この方法は土壤中半減期に関する情報のほか、野外条件下での移動性や分解性といった情報が得られるため、米国では地下水汚染の可能性を評価する必須試験として位置づけられている<sup>8)</sup>。

当協会研究所では、現在この試験から土壤水を採取して浸透水評価に応用する検討を行っており、良好な中間結果を得ている。

よく整備された圃場では、暗渠排水機能が備わっている場合がある。暗渠は通常比較的浅い地点に設置されるため、浸透水とともに溶脱した農薬がこれによって排水される可能性もある。こうした暗渠排水の行き先は一般に河川等の地表水であることが多いことから、ある程度の深さまで地下浸透した農薬が暗渠によって地表水として排出される場合があると推測される。

#### 4. ゴルフ場での農薬の地表流出と地下浸透

ゴルフ場は一般に優れた排水機構を有しており、暗渠によりグリーンやフェアウェイから直接調整池に排水できる仕組みが多く取り入れられている。このため散布された農薬は、降雨に伴う表流水のほか、暗渠による浸透水の排水、及び一部はより深部に地下浸透、といった経路で移動する可能性が考えられる。すなわち、地下浸透のかなりの部分が地表流出として排出される点が特徴的といえる。

これまでの研究でも、表面排出と浸透排出が主たる流出になり、それらは降雨に伴って発生することが明らかにされている<sup>9)</sup>。また、これらの流出濃度は農薬の水溶解度と高い相関があり、畑地の場合と同様に散布直後の流出が最も濃度が高いとされている<sup>9,10)</sup>。この点について、ゴルフ場の表流水は畑地と異なりSSの含有率が低くなると考えられるため、農薬の物性を反映しやすくなるのではないかと思われる。

表流水も暗渠排水もその到達先は場内の調整池である場合が多いが、調整池に流入した農薬はそこで一旦滞留したのちに排水として公共用水域に放出される。

表6に調整池と排水口での農薬濃度の調査結果を、表7に排水口での指針値超過状況を示す。

これらのことから、ゴルフ場内では降雨があると表流水と浸透排水によって農薬の流出が生じ、散布に近接した降雨があるとその割合は大きくなるが、流出した農薬は調整池等を経由し場外へ流出するまでの間に減衰し、一般に排水口での農薬濃度は指針値に比べと

くに問題がないレベルになっていると考えることができる。

表6) ゴルフ場の調整池と排水口での農薬の調査事例

農薬名	最高濃度(mg/l)		(指針値)	備考
	調整池	排水口		
シメジン	0.0097	0.0058	(0.03)	1990, 千葉
	0.020	0.016	(0.03)	1990, 神奈川
プロピザミド	0.016	0.0065	(0.08)	1990, 千葉
	0.024	0.030	(0.08)	1990, 神奈川
イソプロチオン	0.015	0.0046	(0.4)	1990, 千葉
	0.033	0.0008	(0.4)	1990, 神奈川
フルトラニル	0.032	0.0092	(2)	1990, 千葉
	0.027	0.0047	(2)	1990, 神奈川
アトラジン	0.0031	0.0005		1990, 千葉
タイアジノン	0.0017	0.017	(0.05)	1990, 千葉
	0.0034	0.00051	(0.05)	1990, 神奈川
イキサチオン	0.00001	0.00003	(0.08)	1990, 神奈川
イソフェホス	0.00001	0.00004	(0.01)	1990, 神奈川
ケルビリホス	0.000004	0.00090	(0.04)	1990, 神奈川
フェニロチオン	0.00002	0.0001	(0.1)	1990, 神奈川
キャブタン	0.0004	0.0005	(3)	1990, 神奈川
クロタロニル	0.00008	0.00012	(0.4)	1990, 神奈川
トルクロホスメチル	0.0027	0.0010	(0.8)	1990, 神奈川
ベンフルリン	0.0002	0.0001	(0.8)	1990, 神奈川
イプロシオン	0.004	0.003	(3)	1991, 長崎
アシュラム	0.014	0.002	(2)	1991, 長崎
トリクロホス	0.0001	0.0141	(0.3)	1990, 宮崎
DDVP	0.0107	0.0186		1990, 宮崎
イソプロチオン	0.0003	0.0070	(0.4)	1991, 宮崎
テルブカルブ	0.0081	0.0021	(0.2)	1990, 宮崎

注) 伏脇・浦野(1993)<sup>9)</sup>から調整池と排水口のデータが併記されているもののみ抜粋し改変。

表7) ゴルフ場排水の調査結果(環境庁公表)

調査年度	調査対象 ゴルフ場総数	調査対象 農薬数	総検体数	指針超過 検体数	超過率 (%)
H3	1,734	30	89,713	14	0.016
H4	1,783	30	110,701	7	0.006
H5	1,877	30	111,489	3	0.003
H6	1,898	30	106,895	1	0.0009
H7	1,937	30	108,563	1	0.0009
H8	1,984	30	102,846	1	0.001
H9	1,990	35	120,774	5	0.0041

## 5. 公共用水域での農薬の検出実態

河川等における農薬の実態調査はこれまで数多く行われている。参考までにいくつかの

比較的大がかりな調査から畑作用農薬（ゴルフ場用途も含む）の調査データを表8にまとめたが、大づかみにみると畑作用農薬の検出レベルは全体に低く、検出されないか基準値を大きく下回る場合がほとんどである。また、参考として地下水からの検出状況を表9に示す。

表8) 公共用水域での畑作用農薬の検出実態

単位：ppb

農薬名	水質基準 (ppb)	調査事例1		調査事例2		調査事例3		調査事例4			
		年度	検出数 /調査数	最高濃度	検出数 /調査数	最高濃度	検出数 /調査数	濃度範囲	A川平均濃度		E川平均濃度
									6月	6月	9月
フェニトチオン	3(監)	S58	0/30	ND	50/269	3.32	34/68	0.004-0.026	0.0067	0.068	0.134
マリン	10(公)	H5	0/51	ND	(ND)		2/68	0.015-0.026			
DDVP	10(監)	S58	0/30	ND	12/220	0.66	40/68	0.003-0.13			
タ・イシ・ン	5(監)	S58	0/30	ND	65/277	0.72	49/68	0.002-0.78	0.0735	0.232	0.022
クロピリホス	30(公)	S63	0/72	ND	4/185	2	18/68	0.007-0.20			
トルクロスメチル	200(公)				8/109	3.33	(ND)				
トリクロホス	30(保)	H5	0/33	ND	(ND)		(ND)				
DBCP	1(WHO)	H1	0/66	ND							
アセフェート	(75)	H5	0/30	ND							
シメエート	(50)	H5	0/30	ND	(ND)		(ND)				
DMTP(メチタチオン)	(12.5)	H5	0/54	ND	1/16	0.06	2/68	0.013-0.036			
ホロン	(15)	H5	0/54	ND	12/220	0.66	40/68	0.003-0.13			
オキサミル	(75)	H4	0/33	ND							
メソミル	(75)	H4	0/33	ND	(ND)		(ND)				
DCIP		S59	0/24	ND							
BRP(サト)		S59	0/24	ND	(ND)		(ND)				
クロタニル	40(監)	H3	0/57	ND	3/141	0.66	(ND)				
チラム(TMTD)	6	S60	0/27	ND							
クロネフ	50(コ)				(ND)		6/68	0.003-0.024			
エクロメニール	4(コ)				(ND)		1/68	0.007			
プロシミン	(250)				(ND)		1/68	0.35			
トリアシメホ	(75)				(ND)		1/68	0.035			
1,3-ジクロロプロパン 2		S59	0/21	ND							
PCNB	(17.5)	H3	0/57	ND	59/76	5.5	(ND)				
クロピクリン		S54	0/24	ND							
臭化メチル		S51	0/60	ND							
シマジン	3	S58	0/57	ND	74/208	0.32	57/68	0.005-0.14	0.145	0.698	0.207
プロピサミト	8(監)				(ND)		4/68	0.006-0.021			
アトラジン	2(WHO)	H3	0/57	ND	(ND)		29/68	0.005-0.0067			
トリフルリン	20(WHO)	H6	0/30	ND	(ND)		(ND)				
ケリホサート	(375)	H5	0/33	ND							
メトラクロル					(ND)		(ND)		0.0025	0.0084	0.0008
DPA		S59	2/21	1	(ND)		(ND)				

注) 水質基準は、(公)：水質評価指針/公共用水域/評価指針値、(監)：水道水質基準/監視項目指針値、無印：水道水質基準/基準項目基準値、(保)：登録保留基準(水田の1/10倍として表示)、WHO：WHOの飲料水基準値、( )つきの数値はADIからの推定値。

調査事例1：化学物質の環境調査結果(環境庁,S49-H7)<sup>11)</sup>からまとめ。調査時期は9-11月である。

調査事例2：高木(1988-1991)による各水道事業体の調査結果のまとめ。高橋(1997)<sup>12)</sup>から引用。

調査事例3：琵琶湖・淀川での調査結果(1991)。高橋(1997)<sup>12)</sup>から引用。

調査事例4：高橋<sup>12)</sup>による調査結果。A河川は1991年6月。E河川は1990年の調査である。

これらのデータから畑地やゴルフ場からの流出がどの程度寄与しているのかを検討する場合、いくつか考慮しなければならない点がある。

まず、河川への農薬の曝露経路は地表流出のほかにドリフト、さらに一部は中間流出が関与すると考えられる。従って、単一の曝露経路の寄与率を推定することはなかなか困難である。詳しいデータはないが、ドリフトのほうが大きく関与する場合があるように思う。

つぎに、畑地からの地表流出は豪雨時に限られるが、そうしたタイミングでの調査が現実にはなかなか行われにくいことである。仮に実施されたとしても、河川水量は大幅に増水している点にも注意が必要である。

また、河川流域には水田、畑、果樹園、施設、ゴルフ場などが点在しており、農薬の使用場所と使用量の推定は実際には困難を伴う。このほか、調査が行われた時期も重要である。

これらのことを総合すると、既存のモニタリングデータから曝露経路ごとに汚染源を特定し、実態を把握することは実際にはなかなか難しい。しかし、複数の曝露経路の総体としてみた場合でも、畑地用農薬の検出実態や地表流出の発生頻度からみて、畑地からの地表流出がさほど大きく寄与しているとは考えにくい。

一般に、流域で広域に使用されている、主用途が水田である、空中散布が行われる、といった場合に水系からの農薬の検出頻度は高まる。しかし、我が国のモザイク的な土地利用の実態からみてそのような地区はむしろ限られている。そのため畑地に限って言えば、特定の農薬が年間降水量の多い大規模な傾斜畑作地帯で頻繁に使用されない限り、地表流出は問題になりにくいのではないかと思われる。ゴルフ場の場合は、前述した調査結果からみると現実的な問題はさほどないものと考えられ、今後も想定しにくいように思う。

表9) 地下水測定結果(環境庁まとめ)

	H8			H7	H6	H5
	総数 (本)	検出数 (本)	超過数 (本)	超過数 / 総数	超過数 / 総数	超過数 / 総数
1,3-ジクロロベンゼン	2572	6 (2)	0	0 / 2574	0 / 2359	0 / 908
チウラム	2405	0 (0)	0	0 / 2459	0 / 2307	0 / 892
シメジン	2380	5 (1)	0	0 / 2445	0 / 2284	0 / 892
チオベンカルブ	2377	0 (0)	0	0 / 2444	0 / 2287	0 / 892

出典) 平成8年度地下水質測定結果について(環境庁水質保全局, H9年12月)より地下水質評価基準が定められている4農薬化合物の概況調査を抜粋。検出数の( )は検出数のうち飲用に供されているものを示す。

## 6. 事前予測評価について

地表流出や地下浸透の潜在的なリスクを事前に予測し評価することは重要な課題であるが、それを論ずるのは本稿の目的ではないので、ここではそのような評価を行おうとした場合の基本的な課題をいくつか指摘するにとどめる。

地表流出については、これまで述べたとおり、農薬の物性から単純に類推することはできない（但しゴルフ場農薬では可能性があるように思う）。仮に野外試験を行おうとした場合、自然の降雨、それも突発的な豪雨という極めて標準化しにくい要素をどのように取り扱うのが問題となる。しかも農薬散布から地表流出発生までの時間経過が結果に大きく影響する。つぎに、圃場からの流出を把握できたとしても、流入先の公共用水域での状態を推測（河川中予測濃度）しなくてはならないが、圃場と河川のスケール、河川水中での動態など、ここでも様々な要因がある。すなわち、評価系全体に多くの不確定要因が含まれることになる。そのため、一部の試験を限定した条件のもとで精緻に行っても、全体の評価の精度の向上にはつながりにくいように思われる。

特定の分野では、こうした複雑な環境要因をも考慮した予測モデルが検討されている模様であるが、一方、米国のように簡単な環境モデルを用いて評価を始めていく方法もある。

いずれにしても、河川中のモニタリングデータ等との比較検討によって予測結果が著しくかけはなれないようにしなくてはならないが、畑作用農薬では利用可能なデータがさほど多くないように思われる。

一方地下水影響については、まず農薬が地中深くに移動し存在しつづける可能性を検討し、懸念がある場合には浸透水を実験的に精査するような進め方が考えられる。前者の検討には、野外での土壤中消失試験が積極的に利用できるものと思う。

## 7. 謝 辞

本稿のうち、アメダスデータの解析には当協会桜井昭寿主査に、公共用水域での実態調査については当協会研究所竹田 勇調査役の協力をいただいた。また、当協会研究所スタッフには各種助言をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

## 8. 引用文献

- 1) 農林水産省農蚕園芸局農産課：わが国の耕地に於ける水蝕と風蝕，(1979)
- 2) 上村春美・五十嵐正次・渋谷勤治郎：斜面ライシメーターにおける水収支の研究，農業土木試験場技報 A9,1-17,(1973)
- 3) Gitte Felding et al.: Surface Run-off Pesticides from Farmland to Streams and Lakes, Pesticides Research No.29, Danish Environmental Protection Agency, (1997)
- 4) 環境庁水質保全局土壌農薬課：平成6～9年度農薬残留対策調査試験成績（未定稿）
- 5) 井上隆信・海老瀬潜一：水田からの農薬流出の定量評価，農業環境科学研究, 4, 13-25, (1996)
- 6) 環境庁水質保全局土壌農薬課：平成5年度農薬残留対策調査試験成績（未定稿）
- 7) 山本幸洋・金子文宣・尾崎保夫・高橋 強：砂質露地畑における農薬鉛直浸透量のキャピラリライシメータ法とパンライシメータ法による測定と比較，平成9年度日本農薬学会第22回大会講要, 98, (1997)
- 8) US EPA: Standard Evaluation Procedures/Terrestrial Field Dissipation, (1990)
- 9) 伏脇裕一・浦野紘平：ゴルフ場農薬による環境汚染の現状と今後の動向，用水と廃水 35, No. 9, 39-51, (1993)
- 10) Y. Odanaka et al: Runoff and Leaching of Pesticides in Golf Course, J. Pesticide Sci. 19, 1-10, (1994)
- 11) 環境庁：化学物質の環境調査結果, (1996)
- 12) 高橋保雄：水道原水及び水道水中の残留農薬について，1997年度東京理科大学分析化学セミナー講要, 39-59, (1997)