

芝地上の散布農薬の表面流出と土中浸透 に関する基礎的実験

Fundamental Experiments on Moving Characteristics of Scattered
Agricultural Chemicals on the Grass Land

尾島 勝^{*}・松浦史登^{**}・田村新吾^{***}・李 圭太^{****}

By Masaru OJIMA, Fumito MATSUURA, Shingo TAMURA and Kyu-Tae LEE

Groundwater contamination by agricultural chemicals is getting one of the most serious environmental problems, especially in golf course. The purpose of this study is to investigate the moving characteristics of scattered pesticides caused by heavy rain.

The contents of this study are 1) the investigation of poison characteristics of the main agricultural pesticides in golf course, 2) the analysis of data of sand-column tests based on the method of gaschromatography(GC-FTD), and 3) the analysis of experimental data of surface runoff in the grass channel model by GC-FTD.

Main results obtained are as follows: 1) most of the scattered pesticides are adsorbed by the grass and soil particles, 2) the estimated values of concentration of pesticides in the sand-column tests are a little over the permitted value, and so it is necessary to keep a lookout for the behavior, and 3) the estimated values in the surface runoff tests are no problem.

Keywords: Groundwater Contamination, Agricultural Chemicals, Gaschromatography, Model Experiment

1. まえがき

殺虫剤、殺菌剤、除草剤として使用される農薬の種類と数量は、近年急激に増大している。米国で現在最も重要な地下水汚染問題となっているのは、除草剤によるものであり¹⁾、最近わが国でもゴルフ場の使用農薬による地下水や河川水の汚染が大きな社会問題となりつつある。最近の農薬はその有効性もさることながらいわゆる安全性の確保に絶大な努力が払われており²⁾、現実問題として無農薬社会はあり得ない。農薬は土壌吸着性が強く、残効性が高く、水に難溶性であるという性質を有しているから、一般には、地下水や河川水中には微量にしか溶出しなはずである。したがって、地下水や河川水から検出された農薬量に関する専門的な研究例の提示は、まだ極めて少ないといえる。³⁾⁴⁾

本研究では、昨年度⁵⁾に引き続き、ゴルフ場におけるパティン・グリーン上の散布農薬の挙動に着目し、強降雨時における芝表面流出量と土中鉛直飽和浸透量を実験的に把握し、農薬の土壌吸着性や植物分解能などを解明することを目的としている。

* 正会員 工博 福山大学教授 工学部土木工学科
(〒729-02 広島県福山市東村町三蔵985)

** 理博 福山大学教授 工学部生物工学科
福山大学大学院

*** 正会員 工修 株式会社エニエシステム 技術開発部
(〒113 東京都文京区本郷2-10-9 第一富士ビル)

2. ゴル場使用農薬の特性とその化学的分析法

法的整備が遅れていたゴル場での使用農薬が、1988年 8月から農薬取締法の適用を受けることになり、1990年 5月に厚生省より、主な使用農薬21種について、安全性の目安となる水道原水水質目標値が示された。これに基づき、環境庁も同年 5月25日にゴル場排水口での許容濃度指針値を上記水質目標値の10倍の値として示した。表-1に厚生省の挙げた21種の農薬特性、水質目標値($\text{mg/l}=10/100 \times \text{ADI} \times 50\text{kg}/21$)、および化学的分析法を示した。測定方法に示したGCはガスクロマトグラフィ法であり、MSは質量スペクトル装置結合分析を、FPDは蛍光光度検出器を、ECDは電子捕獲検出器を、FTDは熱分解検出器を用いることを意味し、HPLCは高速流体外相クロマトグラフィ法である。

本研究では比較的分析法の容易なGC-FTDにより分析可能な農薬のうち、使用量も多くその流出挙動の解明が重要であると考えられるダイジノン、MEP、シメジ、フルナリを選んだ。それらの特性を簡単に述べる。

1)ダイジノン 水にわずかに溶ける(40ppm) 農薬としては植物体への浸透圧や揮散性が高いので水面施用剤としての効果が高い。その他にも茎葉散布、土壌施用としても広く用いられる。殺虫作用は、接触作用、消化中毒剤および勲蒸作用により、比較的速効性である。土壌中における半減期は22日、容器内、畑状態(不飽和)で11~12日、水田状態(飽和)で6~7日と比較的短い。

2)MEP(フェントザン) 水に難溶()。カ、ヒ、ゴキブリに効果大で、家庭用殺虫剤としても広く用いられる。動物体内では速やかに分解され、果実、野菜に散布した場合も残留毒性は速やかに減衰する。半減期は畑状態で22~30日、水田状態で4~8日。

3)シメジ(CAT) 水に難溶(5ppm)。発芽前処理剤として地表部の雑草の芽生えに有効。植物体への吸収は根からであり、茎葉からはほとんど認められない。土壌中では粘土鉱物、有機物に吸着。難溶性のため降雨による下方移動はほとんどない。土壌中での分解、不活性化は微生物によるものであり、光分解や揮散による活性成分の消失は極めて少なく、残効性は40~50日とされている。なお砂質土壌では薬量を少なくするか、使用しない。しかし、表-1に示した除草剤の中では最も厳しい水質目標値が示されている。

4)フルナリ 水に難溶(9.6ppm)。農薬としては稲の紋枯病の予防、治療の効果にすぐれ、その他にも広く用いられる。浸透移行性を有し、耐降雨性にすぐれており、残効性が大きい。動物体や土中では容易に分解されて、蓄積性はない。

表-1 厚生省の挙げた21種の農薬特性、水質目標値および化学的分析法

分類	農 薬 名	人畜毒性	魚毒性	水質目標値	測 定 方 法	備 考
殺虫剤	DEP(トサツウホウ)	劇物	B 類	0.030 (mg/l)	GC-MS, GC-FPD	水溶性(154g/l), 化学的不安定, 分析難
	MEP(フェントザン)	普通物	B 類	0.010 (mg/l)	GC-MS, GC-FPD, GC-ECD, GC-FTD	難溶(), 分解能大
	イナキチン	劇物	B 類	0.008 (mg/l)	GC-MS, GC-FPD, GC-ECD	難溶(1.9ppm), 7%水性で不安定
	イナキチン	劇物	B 類	0.001 (mg/l)	GC-MS, GC-FPD, GC-FTD	わずかに溶ける(20ppm), 現在ほとんど使用せず
	イナキチン	劇物	C 類	0.004 (mg/l)	GC-MS, GC-FPD, GC-ECD	養殖池周辺では絶対使用不可
殺菌剤	ダイジノン	劇物	B-s類	0.005 (mg/l)	GC-MS, GC-FPD, GC-ECD, GC-FTD	わずかに溶ける(40ppm)使用量多, 養殖池・川周辺使用不可
	TPN(カブツノコ)	普通物	C 類	0.040 (mg/l)	GC-MS, GC-ECD	ほとんど使用しない, 発がん危険性高し(米科学アカデミー)
	イナキチン	普通物	B 類	0.040 (mg/l)	GC-MS, GC-FPD, GC-ECD	水溶性(48ppm), 分析難
	イナキチン	普通物	A 類	0.300 (mg/l)	GC-MS, GC-FTD, GC-ECD	水溶性(13ppm), 分析難
	エチンチン	普通物	B 類	0.040 (mg/l)	HPLC	難溶, フルコトエチンにも難溶
	イナキチン	普通物	C 類	0.300 (mg/l)	GC-MS, GC-FPD	発がん危険性高し(米科学アカデミー)
	タラシ(TMTD)	普通物	C 類	0.008 (mg/l)	HPLC	水質目標値極めて厳しい
	トラフルスチン	普通物	B 類	0.080 (mg/l)	GC-MS, GC-FPD	難溶(1ppm), 土壌残留性小, 分析難
除草剤	フルナリ	普通物	A 類	0.200 (mg/l)	GC-MS, GC-FTD, GC-ECD	難溶(9.6ppm), 残効性大
	SAP(ベンザト)	普通物	B 類	0.100 (mg/l)	GC-MS, GC-FPD, GC-FTD	水溶性(25ppm), 残効性大, 土壌吸着性大
	イナキチン	普通物	A 類	0.200 (mg/l)	HPLC	水溶性(0.5%)
	シメジ(CAT)	普通物	A 類	0.003 (mg/l)	GC-MS, GC-FTD	難溶(5ppm), 残効性大, 使用量多
	イナキチン	普通物	A 類	0.030 (mg/l)	GC-MS, GC-FTD	
	イナキチン	普通物	A 類	0.004 (mg/l)	GC-MS, GC-FPD, GC-ECD	難溶(5~7ppm)
	イナキチン	普通物	A 類	0.008 (mg/l)	GC-MS, GC-ECD	発がん危険性高し(米科学アカデミー)
殺菌剤	イナキチン	普通物	B 類	0.050 (mg/l)	GC-MS, GC-FTD, GC-ECD	難溶(0.3ppm), 土壌吸着性大, 良薬

3. 砂層がムによる鉛直飽和浸透に関する実験

3.1 実験方法

農薬種による土壌吸着性や分解性の比較検討を目的として小がムを用いた鉛直飽和浸透実験を行い、流出水への溶出農薬の経時変化を明らかにする。図-1に実験装置の概略図を示す。内径 9.9cm、長さ30cmの77777の砂層がムはフィルターメッシュ上に下部より粗砂(相馬砂)、細砂(豊浦砂)および芝を完全飽和状態で敷いて形成した。テストがムは架台により鉛直に保持され、ヘッドタンクのバルブ操作によりQi(給水量)を調節して導水する。また、テストがム内は常に飽和浸透状態にし、芝表面より 1.0cmの湛水深を保つ。通水試験を行い、所定のΔHに対しての定常流量Qoを知り、Qo=Qiとなるようバルブ開度を決定した。実験手順は次のようである。1)実験開始直前に導水パイプをはずし、芝表面まで排水を行いコックを閉じてQoをとめる。2)芝表面に所定の農薬を散布する。3)所定の時間放置した後、Qiを導き、1.0cmの湛水深に達すると同時に、コックを開きQoを受水する。4)所定の時間の受水を繰り返し、テストがム容積の約 5倍の通水を続ける。5)受水した流出水の流量を計測するとともに、所定の分析用試料を採水(2ml)し、直ちに凍結保存する。実験ケースによっては受水した流出水の全量をガス分析にかけた。凍結保存試料はできる限り短時間に前処理を終了させ FTDによるガス分析を行う。実験ケース および実験条件を表-2に示す。

表-2 実験ケースおよび実験条件

CASE	月 日 ・ 時刻		使用農薬	実 験 条 件	
	開始	終了			
CASE 1	7.13,13:15	7.14,10:44	ダ'イジ'ン	農業散布	13:12,15.5cc, ΔH=1.25cm, Qo≒15cc/min
CASE 2	7.16,15:00	7.17,10:15	ダ'イジ'ン	農業散布	12:00,15.5cc, ΔH=1.25cm, Qo≒14~15cc/min
CASE 3	8.27,14:07	8.28,10:10	ダ'イジ'ン	農業散布	14:05,15.5cc, ΔH=1.00cm, Qo≒14~15cc/min
CASE 4	7.20,13:35	7.21, 9:15	シジ'ン	農業散布	13:35, 4cc, ΔH=1.25cm, Qo=15cc/min
CASE 5	7.21,14:10	7.22,10:10	シジ'ン	農業散布	11:10, 4cc, ΔH=1.00cm, Qo=15cc/min
CASE 6	9. 3,13:37	9. 4,10:50	77777	農業散布	13:27, 2cc, ΔH=1.00cm, Qo≒14cc/min
CASE 7	9.10,14:40	9.11,10:50	MEP	農業散布	14:30, 7cc, ΔH=1.30cm, Qo=15cc/min
CASE 8	11. 1,11:30	11. 2,10:25	MEP	農業散布	11:20, 7cc, ΔH=3.8 cm, Qo≒14~15cc/min

表-3 平均水理量

CASE	透水係数 k ×10 ⁻² cm/sec	浸透流速 v ×10 ⁻³ cm/sec	浸透流量qo cm ³ /sec
CASE 1	7.88	3.29	0.253
CASE 2	7.67	3.20	0.246
CASE 3	9.34	3.12	0.240
CASE 4	7.88	3.29	0.253
CASE 5	9.86	3.29	0.253
CASE 6	9.17	3.05	0.235
CASE 7	7.58	3.28	0.253
CASE 8	2.51	3.18	0.245

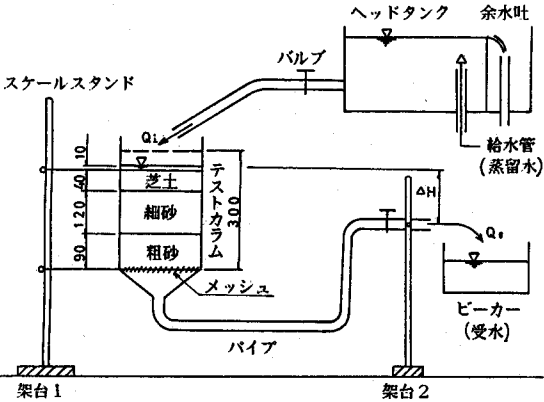


図-1 鉛直飽和浸透実験概略図

3.2 実験結果の考察

実験に使用した農薬は、ダ'イジ'ン水溶液34%(中外製薬)、シジ'ン水和剤50%(日本農薬)、モンカト(77777)水和剤25%(日本農薬) およびミチン(MEP)乳剤50%(住友化学) である。これらを通常がム場で使用されている標準希釈倍率、標準散布量に等しくなるよう計算し、本砂層がム に対する散布原液量を求めれば、ダ'イジ'ン 15.5cc(340ppm)、シジ'ン 4cc(300ppm)、77777 2cc(250ppm)、MEP 7cc(2000ppm) となる。

a)水理特性 表-2に示したとおり、給水量はほぼ15cc/minとなるよう水位差 ΔHを調節した。各実験

における砂層全体としての透水係数、浸透流速および浸透流量を算出すれば表-3のようになる。当然のことながら浸透流量をコントロールしているから浸透流速もほぼ等しくなるが、透水係数は砂および芝土のつめ方によって多少変化している。しかし、新しい芝を使ったケース 8以外はほぼ同じ値とみなしうる。したがって、次項で述べる農薬の流下、拡散に關与する水理特性はほぼ同一であると考えてよからう。

b) 農薬の土中浸透特性 検出された農薬濃度の経時変化を示せば図-2～図-4のようになる。いずれの実験ケースにおいても10分後の第1回採水試料から、検出値の中でも相対的にかなり大きな値が得られていることが注目されるが、全般的にこの経時変化図をみれば、6～7回(60～70分経過)までは濃度値は低下し、第8回目あたりから再び濃度値はあるピーク値まで上昇する傾向がみられる。6～7回目までの排出水量は図-1に示した砂層がμの平均的空隙率を0.42として計算すれば実験開始時に貯留されている水量(980cc～1030cc)とほぼ一致することがわかる。したがって、散布農薬が浸透流に乗ってそのまま下方に移行するものとするれば、第8回目試料以降ではかなりの高濃度値が検出されねばならないことになる。

①図-2に示したダイジノンについては、80分(第8回目)以降0.22ppm値をピーク値として、わずかに減衰傾向を示し、0.1ppm程度の濃度値が検出されている。この値は散布農薬原液が示した9～12ppmに比べれば1/100程度となっているが、ガル7場排水指針値0.05ppmを越えており、問題となる。

しかし、約20時間流水を停止した後の流出水から検出された値は0.007～0.026ppmと指針値よりも小さくなっていることがわかる。すなわち、水溶性は40ppmと今回の使用農薬の中では大きい方であるが、図に示されるように検出濃度ははるかに小さいことから、植物吸着性や土壌吸着性が強く、また飽和土壌中における分解もかなり速いことが推測できる。

②図-3に示したシジノンについては、第1回採水試料の濃度値が、検出値の中で最も大きい値を示し、ガル7場排水指針値0.003ppmの5～10倍の値となっていることが注目される。その後はすでに述べたとおり濃度値は一旦低下し、再び8～9回目の試料でピーク値を示し、以後やや減衰傾向を示すものの約20時間流水

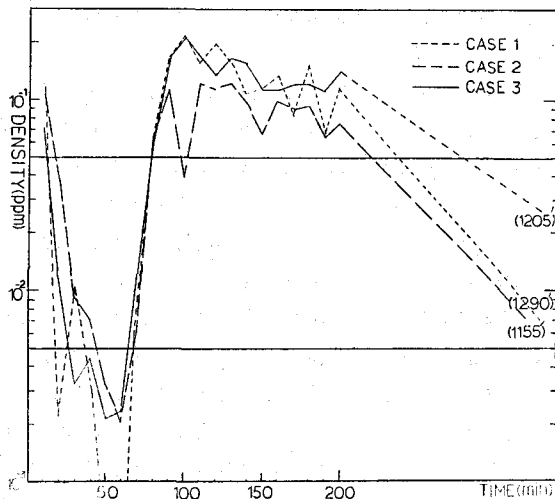


図-2 ダイジノン検出濃度の経時変化

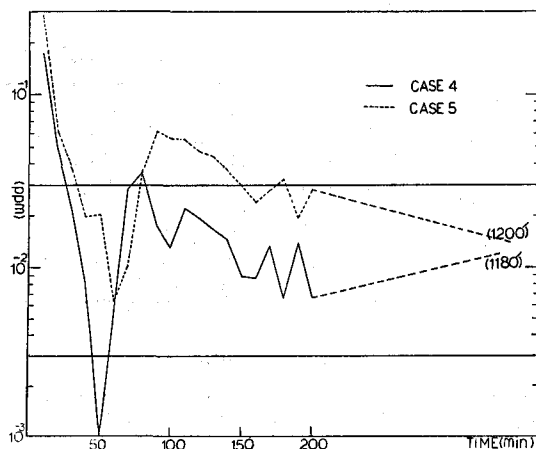


図-3 シジノン検出濃度の経時変化

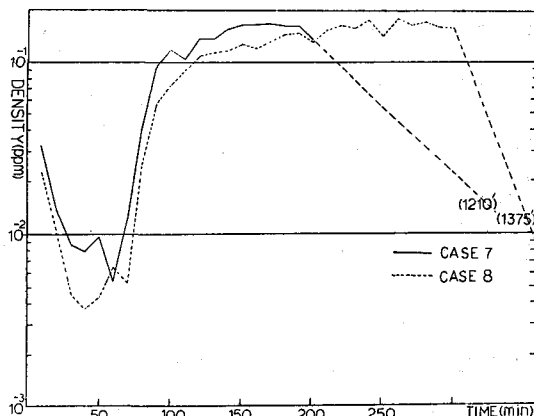


図-4 MEP検出濃度の経時変化

③図-4に示した MEPについては、8回目以後の濃度値は、流水期間中は増大傾向にあり、0.16～0.17ppmを上限值としてほとんど同じ値を検出している。したがって、流水に伴って一定量の農薬の流出が起きていると推測される。しかも、この値は排水指針値の0.1ppmを越えており問題となる。しかし、通水停止後の検出値は2つのケースはそれぞれ0.013ppm, 0.008ppmと1オーダー低い値を示しており、土壤中における分解能の大きいことが推測できる。なお、農薬量の収支については紙面の都合で割愛し、講演時に述べたい。

4.1 実験の概要

表-4 実験ケースおよび実験条件

CASE	月 日 ・ 時 刻		使用農薬	実	験	条	件
	開 始	終 了					
S1C1	9.25, 14:37	15:43	ﾀﾞｲｼﾞﾝ	農業散布	9.25, 14:26, 150cc/(20cm×30cm), Qi=500cc/min,	屋外放置	4日
S1C2	9.27, 16:55	18:01	ﾀﾞｲｼﾞﾝ	農業散布	9.27, 10:15, 150cc/(20cm×30cm), Qi=500cc/min,	屋外放置	2日
S1C3	10. 9, 10:30	11:36	ﾀﾞｲｼﾞﾝ	農業散布	10. 8, 12:00, 150cc/(20cm×30cm), Qi=500cc/min,	屋外放置	11日
S2C1	10.15, 15:28	16:35	ｼﾏｼﾞﾝ	農業散布	10.11, 11:50, 30cc/(20cm×30cm), Qi=485cc/min,	屋外放置	4日
S2C2	10.18, 15:08	16:14	ｼﾏｼﾞﾝ	農業散布	10.17, 13:30, 30cc/(20cm×30cm), Qi=485cc/min,	屋外放置	3日
S2C3	10.22, 14:55	16:01	ｼﾏｼﾞﾝ	農業散布	10.20, 15:00, 30cc/(20cm×30cm), Qi=490cc/min,	屋外放置	4日

この2つの実験「サイズ」中の降雨状況を図-6、図-7に示した。本実験に使用した芝(ナリ)は9月21日までは「J」跡場で育成されていたもので、その育成に必要な肥料や農薬が使われていたものと思われる。また表-4にそれぞれの実験ケースの条件を示しているが、できる限り自然条件下に置くために、流出実験を行う数時間以外は実験用水路を1/100の勾配をつけて屋外に放置した。すなわち、ダ「イ」ンを用いた「サイズ」のSIC1では実験用水路に芝を設置

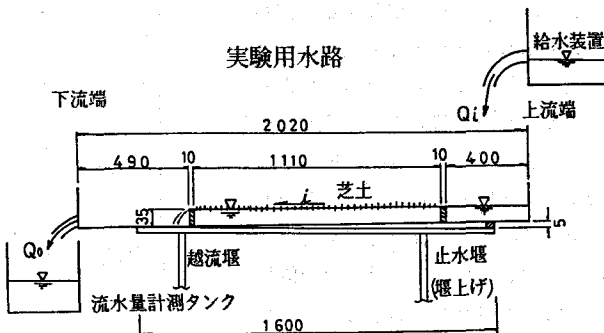


图-5 表面流出实验概略图

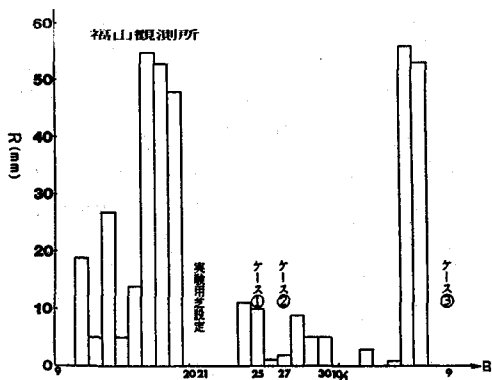


図-6 実験シリーズ 1の降雨状況

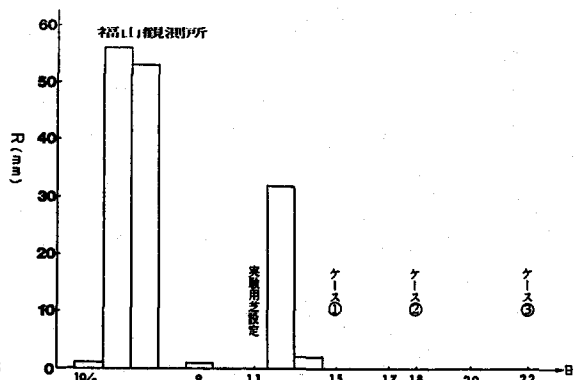


図-7 実験シリーズ 2の降雨状況

し、4日間屋外に放置、農薬散布後11分に流水を開始、S1C2はS1C1に継続して屋外放置2日、農薬散布6時間40分後に流水開始、S1C3はさらにS1C2に続き、屋外11日、農薬散布22時間30分後に流水を開始したものである。77ジンをういたシリーズのS2C1は芝設置後4日間屋外放置、農薬散布99時間36分後に流水開始、S2C2はS2C1に続き、屋外放置3日、農薬散布25時間38分後に流水開始、S2C3はS2C2に続き、屋外放置4日、農薬散布47時間55分後に流水を開始したものである。

a)シリーズ1の考察 流出流量と検出濃度値の経時変化を図-8に示した。

流出流量の定常流量への回復状況から明かなように、芝土の初期飽和状態はS1C3が最も大きく、次いでS1C1、S1C2であることがわかる。しかし、いずれのケースも12分以後は定常表面流出状態になっているといえる。

検出濃度の経時変化から、次のような興味ある考察結果が得られる。
①完全飽和に近い状態にある芝土面に農薬を散布し、ほとんどすぐに流水を開始したケース1では、流出流量がまだ芝土中から浸透水と考えられる3~4分後にも濃度値は大きくなる傾向を示し、表面流が大部分と考え

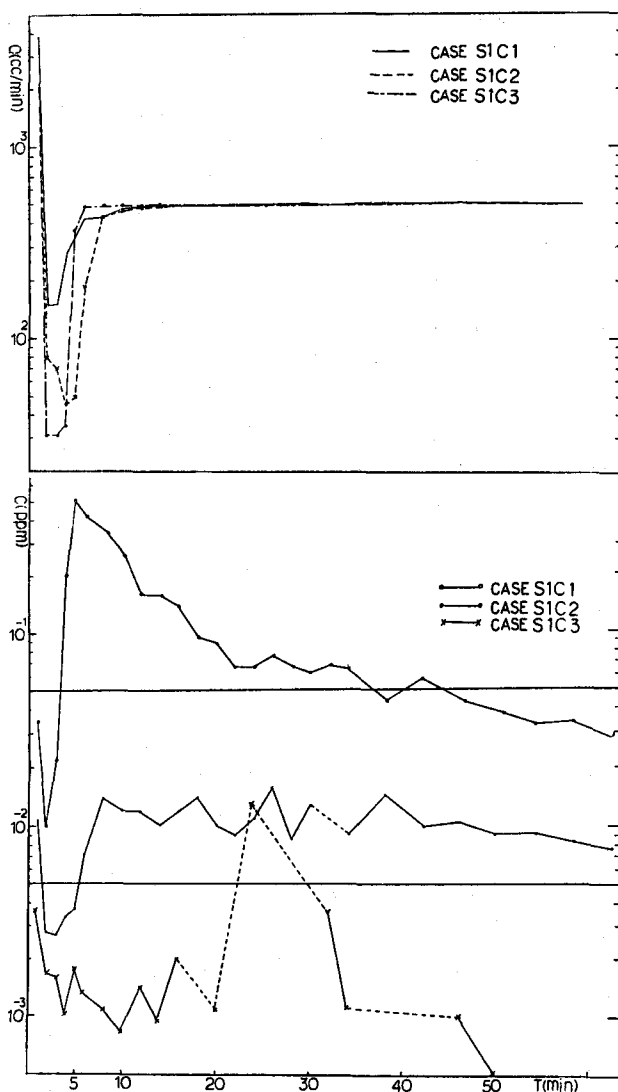


図-8 シリーズ 1の流出流量と検出濃度値

られる 5分には検出濃度はピークに達し、その後は急速に低下する。しかも、通水後40分頃までは排水指針値の0.05ppmを越えている。したがって、散布農業は、浸透流、表面流によって明らかに移流されていることがわかる。②不飽和状態にある芝土面に農業を散布し、1時間15分放置した後、徐々に給水して飽和状態に近い湛水条件とし、農業散布から6時間40分後に流水を開始したケース2では、流出流量の減少とともに濃度値は一旦低下し、表面流が主となると考えられる8分以後は0.01ppm程度の値を示す。すなわち、表面流による農業の流出はあるものの、その量はケース1に比べて1桁小さくなっていることがわかる。しかし、この値はまだ水質目標値0.005ppmに比べれば倍ほど大きい。③完全飽和に近い状態にある芝土面に農業を散布し、22時間30分放置後に流水を開始したケース3では、検出濃度値は極めて小さく、0.005ppmに比べても十分小さい。すなわち、芝土の保水状態が飽和に近くても、農業散布後の時間が長ければ、その間に土壌吸着や植物

吸着、分解が起こり、かなり強い表面流によっても農業は流出しないといえる。

以上の考察のとおり、ゲイジンは、散布から表面流が生起するまでの時間が極端に短ければ問題となるが、散布後数時間以上経過すれば、表面流に伴う移流はほとんど無いと結論できる。

b) シーズ2の考察 流出流量と検出濃度値の経時変化を図-9に示した。図から明かなように、芝土の初期飽和状態は、S2C2とS2C3とはほとんどかわらず、S2C1が若干飽和度が低いといえる。しかし、いずれのケースでも14分以後は定常表面流出状態になっていることがわかる。検出濃度の経時変化図からは次のような考察ができる。農業はいずれも不飽和状態の芝土面に散布され、また流水開始までの放置時間もシーズン1に比べてもかなり長い。いずれのケースについても浸透流出が卓越すると考えられる6~10分で濃度値の一時的上昇傾向がみられるものの、経時的な変化はほとんどない。また、検出濃度値は水道水質目標値の0.003ppmよりは大きい、排水指針値0.03ppmよりは小さい。また、農業散布後の放置時間が長いほど検出濃度値は小さくなっており、土壌中における分解や、植物吸収の量が多くなっていることが推測される。

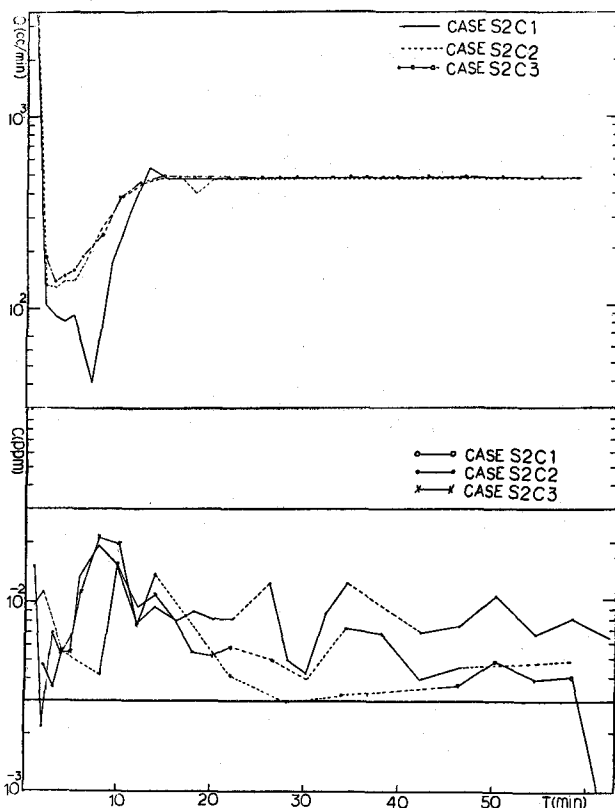


図-9 シーズ2の流出流量と検出濃度値

5. あとがき

本研究で取り組んだ農薬による地下水汚染の問題は、社会的にも緊急を要する課題であるが、まだ実験計測された農薬量に関する専門的な研究例は数少ない。今後、正しく実態を把握するとともに汚染防止の方策をも含めて精力的に研究されなければならない。

本研究は、ゴルフ場ハッティグリーン上に散布された農薬の強降雨時における表面流出量と土中浸透量を基礎的な模型実験により定量的に解析し、農薬の土壌吸着性や植物分解能を解明したものである。

得られた成果を簡潔にもとめれば次のようになる。

1)鉛直飽和浸透実験によれば、①散布農薬量の大部分は土壌吸着、植物吸着や植物分解されること、②浸透流速値が $3 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 程度でも、ダイジノン、MEPの検出濃度値は排水指針値を越えることがあること、③ジジノンの検出濃度値は排水指針値の数倍にもなることがあり、その挙動に注意する必要があることが明らかになった。

2)表面流出実験によれば、①農薬散布時から表面流出が生起するまでの時間が極端に短くない限り、農薬量の大部分は土壌吸着、植物吸着や植物分解されること、② 1.0cm/sec 程度の表面流流速のもとでは、ダイジノン、ジジノンともに検出濃度値は排水指針値以下であることが明らかになった。

今後さらに数多くの実験データを集積、解析し、汚染防止の方策へと結び付けたい。なお、本研究を進めるにあたり、福山大学工学部生物工学科 橋本研介教授の適切な御教唆とご協力をいただいたことを記して、謝意を表する。

参考文献

- 1)Nielsen.E.G. and Lee.L.K : The magnitude and costs of groundwater contamination from agricultural chemicals, Agricultural Economic Rep. 576,USDA,38p.,1987.
- 2)橋本研介 : 農薬の過去と現在—安全対策を中心に—、福山大学人間科学研究センター紀要, No.3, p.p100~115. 1988.
- 3)田瀬則雄・佐伯明義・伏脇裕一 : 浅間山北麓における殺菌剤PCNBによる地下水汚染, 地下水学会誌, 第31巻,第1号, p.p31~37, 1989.
- 4)中野重和 : 活性炭による水中からの農薬類の吸着, 科学と工業, Vol.64(3), p.p90~94, 1990.
- 5)エー・エス・コンサルタント : 芝地における雨水の不飽和鉛直浸透と散布農薬の土中拡散に関する実験的考察, 農薬実験報告書第1号, p.88, 1990.