

ゴルフ場グリーンにおける散布農薬の降雨に伴う 土中浸透と拡散に関する実験的研究

Experimental Study on Infiltration and Dispersion of Agricultural Chemicals with
Rainfall on Putting-green in Golf Course

* ** *** **** *****
尾島 勝・李 圭太・堀 勝也・高橋英二・坂本純二・岩田光一郎

By Masaru OJIMA, Kyu-Tae LEE, Katsuya HORI, Eiji TAKAHASHI, Jyunji SAKAMOTO and Kouichirou IWATA

Groundwater contamination by agricultural chemicals is getting one of the most serious environmental problems, especially in golf course. This study focuses on the infiltration and dispersion of pesticides(MEP) with rainfall on the putting-green in golf course.

In order to estimate both the hydraulic characteristics of groundwater and the concentration distribution of scattered pesticides in the ground, the experimental research is carried out with sand-layer column models. Experimental data of tensiometers and thermometers are estimated by hydraulic analysis and test samples of polluted water are chemically analyzed by the method of gaschromatography(FTD).

Main results obtained are as follows : 1) values of tensiometer do not change under such rainfall condition as less than or equal to 20 mm/hr intensity and 20 min duration time, except the surface layer and 2) most of the scattered pesticides are adsorbed by the grass and soil particles and therefore the amounts which flow out into the groundwater are very little.

**Keyword : Groundwater Contamination , Agricultural Chemicals,
Infiltration, Dispersion, Golf Course**

1. まえがき

我国は夏季には高温、多湿となる モンスーン地帯に位置しているため、植物を害する病害虫や雑草が多発し易く、大きな被害を受け易い条件にある。このため、農薬はゴルフ場においても芝生や樹木などを保全するうえで重要な役割を担っている。しかし、昨今ゴルフ場の農薬汚染という問題が専門的というよりもむしろ感情的に大きな社会的関心を呼んでいる。ところが現状では専門的な研究の提示は少なく¹⁾²⁾、したがって実験データの集積と解析・分析手法の確立が急務であると考ええる。表-1にはゴルフ場における使用農薬量の標準値を示しているが最も多く使用されるのはパッティング・グリーンであるため、本研究ではグリーン構造に模した砂層から実験を行い、降雨の鉛直不飽和浸透機構および農薬の移流拡散機構を検討し、地下水への農薬流出の影響を評価しようとしたものである。

* 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)
** 正会員 工修 株式会社エー・エス・コンサルタント 技術開発部
(〒113 東京都文京区本郷2-10-9 第一富士ビル)
*** 工修 株式会社エー・エス・コンサルタント 代表取締役社長
**** 株式会社エー・エス・コンサルタント 地域開発室室長
***** 株式会社エー・エス・コンサルタント 技術2部部長
***** 株式会社エー・エス・コンサルタント 技術1部次長

表-1 試験場における使用農薬量

	散布量 g/m^2 (散布時期)	年間総量 g/m^2
除草剤	0.8(4月末) 0.5(6月末) 1.0(9月末)	2.3
殺菌剤	2.0(春先) 4.0(梅雨) 4.0(秋口)	10.0
殺虫剤	2.0(春) 2.0(初夏)	4.0

2. 砂層模型実験の概要

図-1に砂層模型実験装置の概略を示す。実験は室内外で行うため、実験装置を移動式架台上に設け、砂層がムの遮光と断熱のため芝面を除き周囲を合板製の箱で覆った。実験条件として付加される降雨は噴霧ノズル(イワキ製)と流量調節バルブ、ポンプ からなる降雨発生装置を作製しこれを用いた。実験がムは底版より10cmの高さにあるフィルターメッシュ上に、下部より順次砂利(鳴門)、粗砂(相馬砂、 $G_s=2.65$, $D_{10}=0.45mm$, $U_c=1.38$)、細砂(豊浦砂、 $G_s=2.62$, $D_{10}=0.12mm$, $U_c=1.50$)、芝(ベンチス)および苗床用土を所定の厚さに敷いて形成する。実験手順は次のようである。1)水を張りながら砂層を形成した後、所定の水位(越流口設置)まで排水し、所定の位置にテンシオメータ・温度計(5cmおよび10cm間隔)・採水用注射針(5cm間隔)を設置し防水固定を行う。2)その後再び砂層が完全に飽和するよう、注意して降雨発生装置を用いて給水し、あらかじめ飽和させておいた芝および芝土を砂層の上に敷く。3)がム内の水を再び排水し、数時間放置して初期不飽和状態を作る。4)所定の実験条件の下に実験を開始する。5)砂層がム内に設置されたテンシオメータ および温度計により、実験開始から1時間までは15分間隔、2時間までは30分間隔、その後は1時間または2時間間隔で測定、採水は実験開始時刻以外は実験ケース毎に適当な時間間隔で採水する。6)採水試料は $-40^{\circ}C$ で冷凍保存しておき、前処理を行いガスクロマトグラフィーにかけ化学分析を行い含有農薬の濃度を測定する。表-2に実験ケースと実験条件を示した。その表記法はSはサイズを表し、Cは農薬で0は無農薬、1は0.2%農薬、2は1%農薬を表す。Rは降雨を示し、00は無降雨、11はバブルMJ010の上向き、12はバブルMJ020の下向き、21はバブルMJ020の上向きを表す。

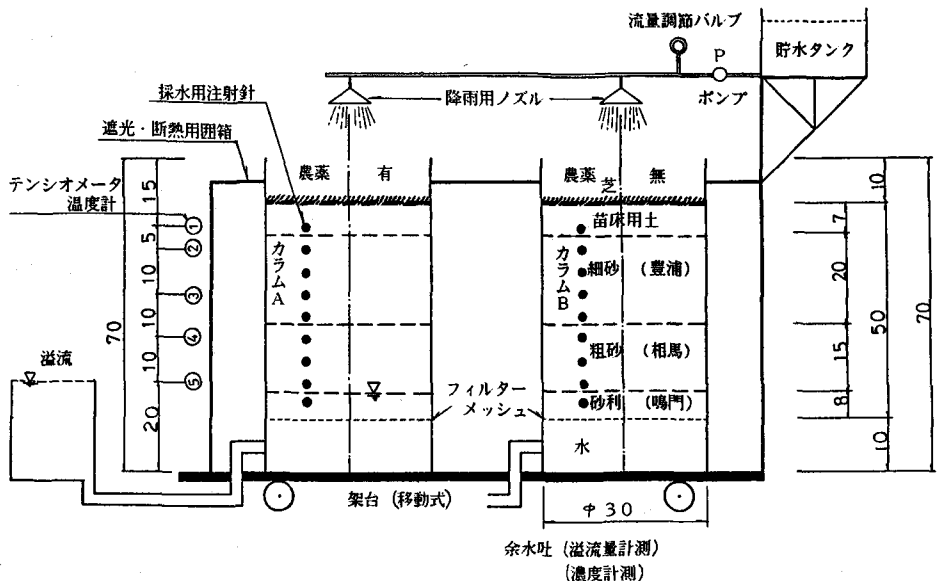


図-1 砂層模型実験装置の概略図(cm)

表-2 実験ケースと実験条件

CASE	月 日 , 時 刻		農 業	降 雨 条 件	場 所	
	開 始	終 了			内	外
S1 C0 R00	9.13,15:30	9.14,14:10	—		○	
S1 C0 R12	9.18,14:00	9.18,15:30	—	14:00-14:15 J10 h=90cm down p=2kg/cm ²	○	
S2 C0 R00	9.21,15:30	9.22,11:00	—		○	
S2 C1 R00	9.22,11:00	9.22,13:30	0.2% 70cc		○	
S2 C1 R12	9.22,13:30	9.23,14:30	↓	13:30-13:50 J10 h=90cm down p=3kg/cm ²	○	
S3 C0 R00	9.26,11:30	9.26,15:00	—			○
S3 C1 R00	9.26,15:00	9.27,11:00	0.2% 70cc			○
S3 C1 R11	9.27,11:00	9.28,11:00	↓	11:00-11:20 J10 h=84cm up p=2kg/cm ²		○
S4 C0 R00	10. 2,14:00	10. 2,16:00	—			○
S4 C1 R11	10. 2,16:00	10. 3,13:00	0.2% 70cc	18:05-16:25 J10 h=40cm up p=2kg/cm ²		○
S4R C1 R11	10. 3,13:00	10. 4,12:00	0.2% 70cc	13:05-13:25 J10 h=40cm up p=2kg/cm ²		○
S5 C0 R00	10. 6,10:00	10. 6,11:00	—		○	
S5 C2 R00	10. 6,11:00	10. 6,15:30	1.0% 70cc		○	
S5 C2 R21	10. 6,15:30	10. 9,10:00	↓	15:30-15:50 J20 h=40cm up p=2kg/cm ²	○	
S6 C0 R00	10.27,16:30	10.28,10:15	—			○
S6 C1 R21	10.28,10:15	10.30,10:30	0.2% 70cc	10:30-10:50 J20 h=40cm up p=2kg/cm ²		○
S7 C0 R00	12. 6,10:00	12. 6,11:00	—			○
S7 C1 R00	12. 6,11:00	12. 6,14:00	0.2% 70cc			○
S7 C1 R21	12. 6,14:00	12. 8,13:00	↓	14:05-14:25 J20 h=40cm up p=2kg/cm ²		○
S8 C1 AR00	1.10,16:30	1.13,10:00	0.2% 70cc			○
S8 C1 BR21	1.10,16:30	1.13,10:00	0.2% 70cc	16:35-16:55 J20 h=40cm up p=2kg/cm ²		○

3. 土中水残留農薬の化学分析

実験に用いた農薬 MEP (フェントメチン) は、有機リン系の薬剤で殺虫剤として使用頻度の高いものであり、毒物および劇物取締法には指定はなく、農薬取締法で決められた水産生物の急性毒性試験による分類では B 類になる。また、半減期は畑状態で 22~30 日、水田状態で 4~6 日である。この場合使用農薬に係わる水質目標値および排水指針値は、それぞれ 0.01mg/l、0.1mg/l (0.1ppm) となっている。図-2 にガス chromatograph の基本的な構造を模式的に示す。この中の検出器は、今回は水素炎イオン化検出器 (FID) を改良して、有機リン、有機窒素化合物に対する感度を高めた熱イオン検出器 (FTD) を使用した。残留農薬の分析手順は次のようである。1) クリスタル (試料中の農薬を有機溶媒によって天然成分と分離する操作) を行う。2) FTD を用いるガス chromatograph のピーク高さと MEP 標準液の検量線より (1) 式を用いて定量分析を行い採水試料の MEP 濃度を求める。

$$E(\text{ppm}) = D(\text{ng}) / C(\mu\text{l}) \times B(\text{ml}) / A(\text{g}) \quad \cdots (1)$$

ここで、A : MEP の量 (農薬を含む採水試料の量, 1ml)

B : 抽出後、70℃ に溶かした時の量 (1ml)

C : ガス炉への注入量

D : 検量線より求められた MEP の量

E : 求められる MEP の濃度

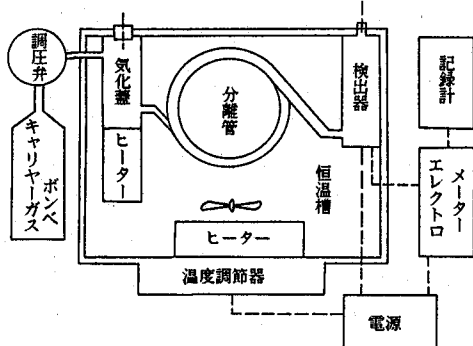


図-2 ガス chromatograph の構造図

4. 考察

4.1 温度

測定温度に関してはその経時変化と鉛直分布について考察したが図-3に鉛直分布図の一例を示した。図の縦軸の数値は砂層がMの底板面から測った高さである。底より18cmの高さが自由水面であり、地表(GL)からの各測点の深度はそれぞれ、2cm, 7cm, 17cm, 27cm, 37cmである。実験実施日の季節、天候、実験降雨条件などにより表層近くでは温度変動がみられるが、砂層がMの中・下層部ではほとんど温度勾配はなく4~6時間以降は砂層がM全域においてほぼ同一の温度になることがわかる。S3C1R11の場合、測点①および②では300分頃までは明かな温度変化が生じているが、測点③④⑤の中・下層部では温度変化がほとんど認められない。とくに実験開始後60分以内では、温度変化は顕著であり芝地表層が日照によって暖められた後、実験降雨によって冷却される状況が明確に現れている。なお、このケースの砂層がMの定常温度は24.5℃程度でいずれの測点においてもほぼ同一の値を示し、全層にわたり一様の温度となる。ここに示していない、その他の各ケースにおいても各測点間の温度差はわずかであり、テニオメータ、濃度測定値に対する温度補正を行う必要なしと判断した。

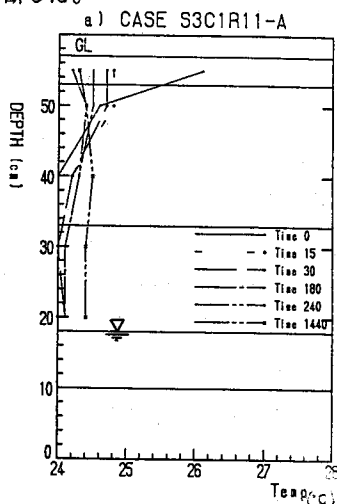


図-3 温度の鉛直分布

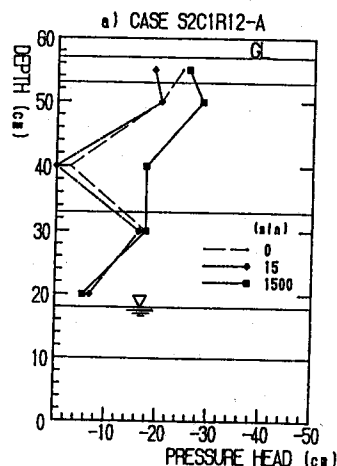
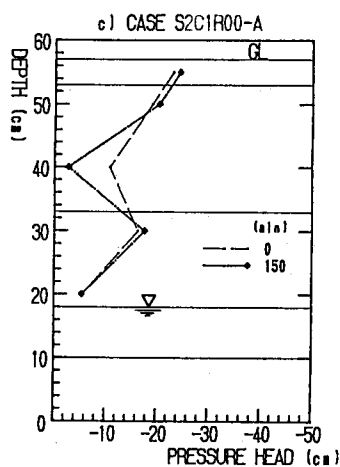


図-4 シリーズ2 テニオ値の鉛直分布

4.2 テニオ値および農薬濃度

a) シリーズ2 S2C1R00 はS2C0R00の1100分の排水実験後に70ccの農薬を散布したものである。テニオメータ値は③測点を除いて、ほとんど変化しておらず、表-3に示したように③測点以深で採水された試料からは農薬は検出されていない。しかし、これに引き続いて行われたS2C1R12では降雨強度が18.3mm/hrと全実験ケースのうちで最強であり、一様に砂層がMに受水されるものとすれば20分間での排水量は402.70cm³となる。この実験におけるA層のテニオ値の変化は、図-4をみれば明かなように大きく変化しており、特に降雨継続中である第1回採水時(15分後)の値の変化が著しく、砂層がM内の水圧の増加ならびに水分量の増加があったことが示されている。したがって砂層内に間隙水の重力移動が生じ、この浸透水に乗った農薬の下方への移流拡散が予想される。表-3の結果をみれば時間の経過とともに砂層の下部にまで農薬が浸透していくことがわかる。すなわち、15分後に測点A4近傍に3.28ppmをピーク値として高濃度域があり、30分経過後の結果では、測点A7の1.08ppmをピーク値として高濃度域は下部へと移動しており、最下層のA9の濃度値も0.62ppmと高くなっている。さらに30分後には上層の試料からは農薬は検出されずA9での値も0.54ppmに減じている。ただ農薬を散布していないB層においても15分後の採水試料からも農薬が検出されていることが注目される。これは初期残留農薬の流出であるとも考えられるが、それ以上は言及できない。

表-3 シリーズ2 ガス分析値(ppm)

CASE S2C1R00

Time(分)	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
1(30)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							0.00	0.00
2(90)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							0.00	0.00

CASE S2C1R12

Time(分)	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
1(15)	2.52	3.28	1.66	1.72	0.10	0.48	0.06		1.06	0.80	0.96	0.02	0.52	0.50	0.22	0.02
2(45)	0.30	0.10	0.64	0.86	1.08	0.34	0.62									0.00
3(75)	0.00	0.00	0.00				0.54									
6(165)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									0.00
7(195)	0.94	0.20	1.04			0.00										
8(260)	0.20	0.16	0.04	0.06	0.00	0.04	0.24									0.00
9(380)	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									0.00
10(500)	0.12	0.00	0.08	0.10	0.00	0.06	0.00									0.00

b) シリーズ 3 70ccの農薬を散布した

S3C1R00 では、テンジ値の低下は芝士では生じているがその他ではほとんど変化はない。それにもかかわらず、ガス分析結果には砂層下部の採水試料にまで農薬が検出されていることが注目される。この実験開始時の不飽和度はテンジメータ③測点を除いて、どの測点においても過剰負圧がかかっている状態にある。しかし、農薬散布後1~2時間は、A7Aの①および②測点のテンジ値がかなり大きく低下していることが示されている。

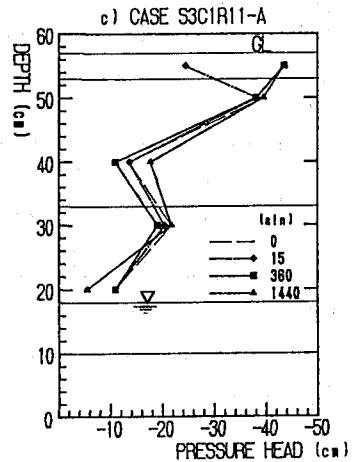
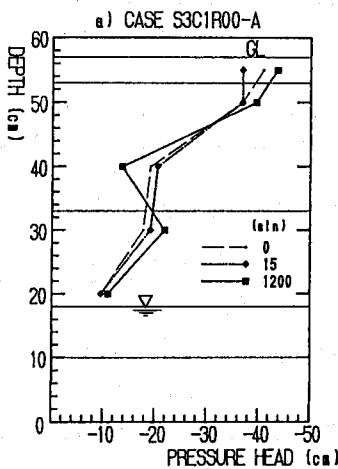


図-5 シリーズ3 テンジ値の鉛直分布

したがって、水圧の増加、飽和度の増加があったことになり、間隙水圧の重力移動が生じ、農薬の下層への移流拡散が生じたことが予想される。表-4に示したガス分析結果をみれば、この実験においても15分後の採水試料からはすべての測点において農薬が検出されており、最下部のA9においても0.26ppmの濃度を示している。また、これらの砂層内残留農薬の濃度は、A9測点を除いて時間が経過してもほとんど低下しておらず、検出測点が移動しているだけで本質的な濃度希釈は生じていないといえる。さらに引き続いて行われた降雨付加のS3C1R11では降雨強度は9.10mm/hr、受水ボリュームは178.25cm³と計算される。

この時のテンジ値の変化の様相は、図-5をみると

間隙水の重力移動が生じていることが推測できる。したがって、残留農薬は希釈され、濃度値は時間の経過とともに若干低下していると言えよう。c) シリーズ4~7 検出された農薬濃度値は上記の2シリーズのそれに比べて1オーダーないし2オーダー小さく、芝士より下部の砂層にはほとんど移流していないと判断できる。このこと

表-4 シリーズ3 ガス分析値(ppm)

CASE S3C1R00									
Time (分)	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	
1(15)	0.28	0.16	0.46	0.16	0.12	0.06	0.34	0.26	
2(30)	0.00	0.55	0.41	0.13	0.28	0.00	0.00	0.00	
6(120)	0.00	0.35		0.25	0.34	0.36	0.08	0.04	
7(1140)	0.00	0.00	0.40	0.00	0.50	0.00	0.36	0.00	
CASE S3C1R11									
2(30)	0.00	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	
4(60)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	
7(240)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.07	
9(360)	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
10(1380)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	

は散布する農薬濃度を1%と通常の5倍にした

S5C2R00 および S5C2R21のガスクロ分析結果(表-5)をみても同様であり、散布農薬のほとんど全部が層厚約5cmの芝および芝土内に付着残留しているものと推察できる。

d)シリーズ8 この実験では各時刻において砂層からAの芝土を厚さ5cm、φ22mmのリングで適当に切り取って試料としているから、農薬が一様に散布されていないければこの程度の値のバラツキは考えられる。

濃度値は経時的な変化もほとんど生じていないことが明確である。検出濃度値の最大値でも原液濃度

の13%程度でしかない。このことは芝や芝土に付着している農薬を強制的に水中に振り落とし流出させたものであるから、見方を変えれば相当激しい豪雨にあっても農薬の流出は現在世論を沸かせているほど大きくないということになる。

表-5 シリーズ5 ガスクロ分析値(ppm)

CASE S5C2R00									
Time (分)	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	
0	0.00	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01	0.00	
1(15)	0.00	0.02	0.00	0.00				0.04	
2(30)	0.00	0.06	0.00					0.00	
3(45)	0.10	0.04	0.03					0.00	
4(60)	0.02	0.02	0.02					0.00	
5(90)	0.01	0.01	0.02					0.00	
6(120)	0.05	0.01	0.03					0.00	
CASE S5C2R21									
1(30)	0.01	0.02	0.02		0.01	0.00	0.00	0.00	

表-6 シリーズ8 ガスクロ分析値(ppm)

CASE S8C1 AROO, BR21

Column A C(ppm)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	MEP Co.
Column B C(ppm)	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	
	19	28	17	40	8	22	36	21	24	47	21	15	360ppm
Time(分)	30	60	90	1050	1170	1290	1410	2490	2610	2730	2850	3930	

5. 結論

5.1 テンシメータによる吸引圧(テンソ)の経時変化、鉛直分布の考察より得られた成果：飽和状態からの排水過程ではA・Bからにおけるテンソの時間的挙動を詳細に比較すれば若干異なっているが最終定常状態では両からともほぼ同様の圧力分布を示す。この状態を初期条件として農薬散布ならびに降雨付加を行ったが、農薬散布によるテンソ値の変化はほとんどない。また降雨付加のからにおいて保水率の増加の割合は降雨強度の強弱には関係なく、また芝土表層より下部の砂層域では降雨によるテンソ値の変化はほとんど認められないことが明らかとなった。

5.2 農薬濃度の考察より得られた成果：砂層内の初期飽和度が高い場合には砂層内に間隙水の重力移動が生じ、この浸透水に乗って農薬の下層への移流拡散が生じることが明らかになった。初期不飽和度が高い場合には砂層内の間隙水の重力移動がほとんど生じず、層厚約5cmの芝土よりも下部の砂層には農薬は移流せず、ほとんど芝土内に付着していることが明確になった。浸透水がない場合には2~3日間程度では残留農薬の濃度はほとんど減衰していない。MEP農薬の大気汚染や半減期については、今回の実験からは言及できなかったが、原液濃度360ppmであったとしても、その1/1000程度以下の地下水流出量であることになり、散布農薬(MEP)の芝地からの流出は極めて少ないことが明確となった。

6. あとがき

本研究で取り組んだ農薬汚染問題は、社会的にも緊急を要する課題であるが、まだ研究の緒についたばかりであり、本研究のように砂層内におけるテンソ、温度および農薬濃度の分布状態や経時変化を詳細にデータとして示したものはほとんどない。今後は、農薬の種類、降雨条件の相違、植物反応、土壌吸着分解を考慮し、また現状の問題として危惧される表面流出について実験を行い究明したい。

参考文献 1)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,pp.31~37,1989.

2)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),pp.90~94,1990.