

II-29

農薬による地下水汚染

- ゴルフ場周辺での調査事例と文献調査から -

北海道立地下資源調査所 正 員 丸谷 薫

1. はじめに

北海道では1989年11月に広島町の養魚場で養殖魚が大量死する事故が発生し、ゴルフ場からの農薬流出が、社会問題として大きく注目を浴びるようになった。そこで著者ほか¹⁾は、散布された農薬の水系における影響を把握するために、使用量の多い雪腐病防除の殺菌剤を中心に、ゴルフ場調整池およびゴルフ場周辺の表流水の調査を実施してきた。さらに1992年からは、水に溶けやすい除草剤を対象に加え、ゴルフ場周辺で地下水調査を開始した。

本報では、既報²⁾に新しい調査結果³⁾を加えて、ゴルフ場周辺で行った地下水調査の結果を報告する。さらに本調査結果と比較検討する目的で、農薬による地下水汚染事例や汚染機構に関する文献調査を行った。

なお、農薬の分析は道立衛生研究所が行ない、DCBA、Dachthal diacid、Deethylatrazine、フラサスルフロンを除く農薬名の表示および水溶解度は、富澤ほか⁴⁾に従った。

2. ゴルフ場周辺での調査事例

(1)調査地の概要 調査地は、恵庭市西方に位置する漁川沿いの火砕流台地および扇状地で、上流部の火砕流台地上に2カ所のゴルフ場(1990年5月と9月に開場)が位置する。この地域に分布する地質は、山口・小原⁵⁾によると、下位から中・下部洪積層、支笏火山噴出物、恵庭火山および樽前火山噴出物、沖積層である。図-1に地質断面概念図を示した。

中・下部洪積層は、未固結の容水地盤で、シルト、粘土、砂、礫などの互層からなる。支笏火山噴出物は、岩相上で下位のものから降下軽石層、流下軽石層、溶結凝灰岩、流下軽石層にわけられる。最下位の降下軽石層は厚さ2m以内で、粗粒の軽石礫からなり、高い透水性をもった帯水層となっている。溶結凝灰岩はかなり硬質であるが、上部と下部は比較的軟らかい。上部には板状節理、下部には柱状節理が発達する傾向があり、水脈となっているが、こうした水脈は帯水層のように普遍的ではない。流下軽石層は、溶結凝灰岩をサンドイッチ状に挟んで上下2層に分かれる。どちらも無層理、多孔質で保水能は絶大だが、透水性はあまり高くない。恵庭火山および樽前火山噴出物(図-1では省略)は、火砕流台地上に分布しており、現地調査によると、腐植土壌、ローム層および軽石からなる。この地域に分布する沖積層は、砂、礫などで構成される堆積物で、扇状地を形成している。

ゴルフ場調整池およびゴルフ場周辺の表流水の調査²⁾によると、(1)まとまった降雨がなければ、流出が発生しない、(2)降水量の少ない年には表流水中から農薬が検出されない等、非常に水はけのよい水理地質であることを示す観測結果を得た。

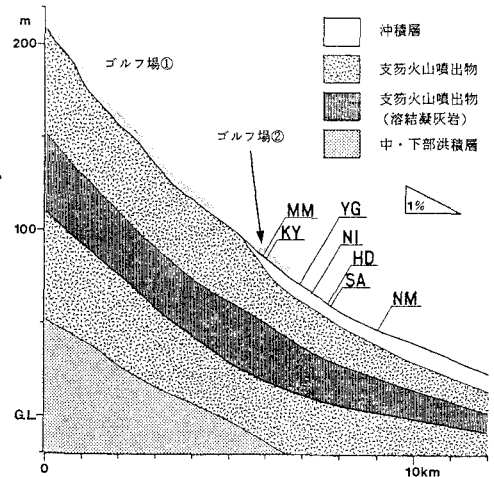


図-1 地質断面概念図

Ground Water Pollution by Pesticides:

A Monitoring Study Associated with Golf Courses and a Literature Survey
by Kaoru MARUTANI

(2)調査方法 ゴルフ場周辺に位置する既存の井戸から採水し、持ち帰り分析した。採水対象層は、中・下部洪積層と扇状地の沖積層に大別される。調査対象の農薬は、水に溶解やすく浸透性の高い除草剤Mecoprop（水溶解度620mg/l）とDicamba（水溶解度4500mg/l）、および大量に使用される殺菌剤Oxine-Copper（水に不溶）とTolclofos-methyl（水溶解度0.3～0.4mg/l）とした。調査時期は、1992年の6、10月と1993年の5、6、9、11月とした。なお、年間平均農薬散布量は2ゴルフ場合わせて、Mecopropが20 l、Dicambaが2 l、Oxine-Copperが180 kg、Tolclofos-methylが204 kgである。

(3)調査結果 分析の結果、いずれの調査時期においても、どの農薬も検出されなかった。

3. 文献調査

次に、本調査地での結果を含め、種々の調査結果を比較検討するために文献調査を行った。国内のゴルフ場農薬による水質汚染の調査報告は、ここ4～5年の間に数多く公表されているが、その多くは調整池や排水を対象としており、地下水を対象にした調査は最近（ここ1～2年）報告され始めているにすぎない。これらの報告を表-1⁹⁾に整理した。

一方米国では、Cohen et al.¹¹⁾ が、アウトウォッシュプレーン（砂と礫がシルト・粘土を部分的に挟みながら層状に堆積）に位置する4ゴルフコースにおいて、17種の農薬を対象に浅井戸（深度3.5-20m）19井の地下水調査を行い、次の結果を得た。(1)散布強度の大きいグリーンとティーの地下水から農薬が検出されたが、その付近の井戸からは検出されなかった。(2)17種のうち10種が検出されたが、井戸の設置時における汚染の可能性があるため、一番最後の調査結果に注目すると、Chlordane（最高7.2μg/l）、DCBA（最高8.94μg/l）、Dachthal diacid（最高1.07μg/l）、Dicamba（最高0.06μg/l）を検出した。

ゴルフ場農薬に関する地下水調査が少ないのに対し、農耕地などにおける地下水の農薬汚染に関する調査は、数多く報告されている。1980年代までの事例については、米国の事例も含め、藤縄・飯塚¹²⁾ がまとめているが、国内ではこの後の報告は少ないようである。米国ではCohen et al.¹³⁾ が、1979年頃からのEPAがおこなった農薬による地下水汚染調査の結果と化学的な特性（水溶解度、土壌吸着平衡定数、Henry定数、半減期など）を化合物ごとに取りまとめた。また、地下水の潜在的な汚染の可能性が大きい条件として次のような農薬の特性と圃場条件が重なった場合を指摘した。

<農薬の特性>①水溶解度30mg/l以上、②土壌吸着平衡定数Koc300-500以下、③ヘンリー定数 $10^{-2}\text{atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ 以下、④周囲のpHで負電荷するもの、⑤加水分解の半減期25週間以上、⑥光分解の半減期1週間以上、⑦土壌中の半減期3週間以上。

<圃場条件>①降水量などのかん要量25cm/年以上、②地下水中に硝酸イオンがあるところ、③不圧帯水層の上に多孔質の土壌がある所、④その農薬に高い安定性のpHを持つ土壌。

表-1 ゴルフ場農薬による地下水汚染報告

文 献	水理地質	調査範囲	対象深度	対象農薬	地下水の調査結果
飯塚 ほか ^{7), 8)}	第四紀 更新世中期の 火山岩類	100～2500m	4.8m 湧水 (排水)	71種 ⁷⁾ 140種 ⁸⁾	9種検出
吉柳 ほか ⁹⁾	詳細不明	ゴルフ場内	40m 75m (調整池)	Diazinon 75サス4700	不検出
辻 ほか ¹⁰⁾	詳細不明	水道水源	深井戸 浅井戸 伏流水 (表流水)	目標値を設定 した21種と EPN, Captafol Beslogine	全体で8種検出 深井戸は不検出 浅井戸と伏流水から検出 ゴルフ場から2km以内

この後、海外で報告された事例としては、Croll¹⁴⁾がチャーク（もろい石灰岩）と更新統および鮮新統（石灰質の軟らかい砂、粘土）の分布する¹⁵⁾地域で表流水と地下水に関する農業汚染調査を実施し、次の結果を得た。(1)表流水からMecoprop、Dicambaなど15種の農薬を検出した。(2)地下水からはMecoprop（最高0.38 $\mu\text{g/l}$ ）、MCPA（最高0.12 $\mu\text{g/l}$ ）、2,4-D（最高0.2 $\mu\text{g/l}$ ）、Atrazine（最高0.43 $\mu\text{g/l}$ ）、Simazine（最高0.26 $\mu\text{g/l}$ ）、Isoproturon（最高0.41 $\mu\text{g/l}$ ）、Chlorotoluron（最高0.12 $\mu\text{g/l}$ ）を検出した。(3)検出頻度の高いTriazine系の農薬（Atrazine、Simazine）は農用以外に起因すると考えられる。

さらに最近では、a)農薬の移動・流出経路について、b)農薬が地下水中に長期間存在すること・地下水流出による表流水への影響について、圃場・農場・実流域など屋外での研究結果が報告されている。

a) Steenhuis et al.¹⁶⁾は、New York州WillsboroのCornell大学実験研究農場において、農薬の移動におけるPreferential Flow（選択流）の効果、および非耕作区と耕作区の違いを検討した。本地区では、石灰岩と苦灰岩の母岩を9m以内の厚さのロームと粘土を主体とした土壤が覆っている。調査対象とした深度は3m以浅、対象農薬はAtrazine、Alachlor、Carbofuranであった。調査により、非耕作区ではAtrazine（最高0.4 $\mu\text{g/l}$ ）、Alachlor（最高0.3 $\mu\text{g/l}$ ）、Carbofuran（最高0.1 $\mu\text{g/l}$ ）、耕作区ではAtrazine（最高0.4 $\mu\text{g/l}$ ）を降雨後に検出し、次の2点を支持する結果を得た。(1)非耕作地ではMacropore Flowにより、農薬は滞留時間、土壤との接触面積が小さく、有機物に吸着されずに地下深部へ移動する。(2)逆に耕作地ではMatrix Flowにより、農薬は有機物に吸着される。

Matthiessen et al.¹⁷⁾は、Mecoprop、Simazine、Atrazine、2,4-Dの4種を対象に、水はけの良いBromyard統が傾斜地に分布し、シルト質粘土ロームのMiddleton統が低地部で不透水性のシルト岩を覆う小流域で農薬流出を調査した。その結果、降雨後にすばやく農薬が流出することから、対象農薬は表面流もしくはPreferential Flow（選択流）により流出すると考えた。

b) Gomme et al.¹⁸⁾は、英国のチャーク流域で20種の農薬を対象に地下水調査を行い、次の結果を得た。(1)4地区（12井）の水道水源井（public supply borehole）を調査したところ、3地区でAtrazine（最高0.03 $\mu\text{g/l}$ ）、さらにその中の2地区でSimazine（最高0.07 $\mu\text{g/l}$ ）を検出した。(2)観測井10井を調査したところ、Atrazine（最高0.31 $\mu\text{g/l}$ ）、Simazine（最高0.40 $\mu\text{g/l}$ ）、Chlorotoluron（最高0.35 $\mu\text{g/l}$ ）、Isoproturon（最高0.61 $\mu\text{g/l}$ ）を検出した。(3)チャーク帯水層における農薬の垂直分布は、深度による濃度差があまりなかった。(4)ピエゾメータ2井（①湧泉帯の河岸で地表から深度1.3m、②河の土手で地表から深度5.6m；河床から深度3.5m）を調査したところ、Atrazine（0.05 $\mu\text{g/l}$ 以下）、Simazine（最高0.05 $\mu\text{g/l}$ ）、Chlorotoluron（0.13 $\mu\text{g/l}$ 以下）、Isoproturon（最高0.33 $\mu\text{g/l}$ ）を検出した。さらに彼ら¹⁹⁾は、同流域で表流水の調査も行い、長期間河川水中から農薬が検出される現象のうち、夏の低流量時における農薬供給源として地下水流出の寄与を指摘した。

Squillace et al.²⁰⁾は、Cedar川の基底流出時におけるAtrazineとDeethylatrazineの供給源を探るために、細～粗な石英砂と3%以下のシルト・粘土から成り、厚さ1m以上の粘土質シルトを覆う帯水層の地下水調査などを行い、次の結果を得た。(1)地下水流出による両農薬の負荷が大きい。(2)15本の浅井戸でAtrazine（最高0.46 $\mu\text{g/l}$ ）、Deethylatrazine（最高0.33 $\mu\text{g/l}$ ）を検出した。(3)9カ月以上、両農薬が地下水中に存在し続けた。

4. まとめ

以上の結果から、農薬による地下水汚染の特徴を整理すると次のように考えられる。

- (1) 不圧帯水層の上に多孔質の土壤があり、水通しのよい地域で地下水が汚染される可能性が高い。
- (2) Preferential Flow（選択流）が存在すると、農薬の滞留時間、土壤との接触面積が小さく、有機物に吸着されずに地下深部へ移動し、地下水が汚染される可能性が高い。
- (3) 地下水中で安定に存在し得る農薬種の場合、低流量時の河川水に大きな負荷を与える可能性がある。

また、地下水を汚染しやすい農薬の特性については、Cohen et al.¹³⁾ が指摘したようなパラメータなどを詳細に検討する必要があるので、ここでは農場・実流域など屋外での研究結果などから考察する。

(4) 上述の(1)の場合は水溶解度の高い農薬が、(2)の場合にはさらに水溶解度の低い農薬も地下水を汚染する可能性がある。

最後に、本調査地で地下水から農薬が検出されなかった結果について、以下の可能性が考えられる。

- (1) Preferential Flow (選択流) が存在せず、水に解けにくい殺菌剤は地下深部へ移動しない。
- (2) 水に解けやすい除草剤は、散布強度が小さいために検出されない。
- (3) 農薬が比較的安定な状態で土壌中に存在し、地下水面へ到達していないために地下水中から検出されていない。
- (4) 農薬が地下水面へ向かって移動するのに時間がかかり、到達するまでに分解されてしまう。

引用文献

- 1) 丸谷薫・石丸聡:ゴルフ場からの農薬流出特性－水理地質の相違から－, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第2部, p494-495, 1992.
- 2) 丸谷薫・石丸聡:ゴルフ場農薬による地下水汚染の可能性について－北海道における雪腐病農薬を中心に－, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第2部, p1124-1125, 1993.
- 3) 北海道立衛生研究所・北海道環境科学研究センター・北海道立地下資源調査所・北海道立工業試験場・北海道立中央農業試験場・北海道立林業試験場:ゴルフ場の環境保全対策技術に関する研究開発, 未公表資料.
- 4) 富澤長次郎・上路雅子・腰岡政二:1989年版最新農薬データブック, 396P, 1989.
- 5) 山口久之助・小原常弘:支笏周辺地下水源調査報告, 39P, 1974.
- 6) 丸谷薫:ゴルフ場による水系への影響について, 北海道大学衛生工学シンポジウム論文集, p369-373, 1993.
- 7) 飯塚宏栄・中野啓二・小林滋・満島裕直・本田誠・藤縄克之:農薬の山地地下水への影響について, 地下水汚染とその防止対策に関する研究集会第1回講演集, p122-125, 1991.
- 8) 飯塚宏栄・藤縄克之・中野啓二・小林滋:農薬の山地地下水への影響, 日本地下水学会1992年度春季講演会講演要旨, p73-76, 1992.
- 9) 吉柳隆行・東房建・白石直典:ゴルフ場における農薬の流出率, 地下水汚染とその防止対策に関する研究集会第2回講演集, p72-79, 1992.
- 10) 辻英高・逸見希子・市橋啓子・築谷尚嗣:ゴルフ場使用農薬に係る水道原水の水質調査, 用水と廃水, 第34巻, 第12号, p32-35, 1992.
- 11) Cohen, S., Z., S. Nickerson, R. Maxey, A. Dupuy, and J. A. Senita: A Ground Water Monitoring Study for Pesticides and Nitrates Associated with Golf Courses on Cape Cod., p1-14, 1990.
- 12) 藤縄克之・飯塚宏栄:潜在的地下水汚染源としての農薬, 地下水学会誌, 第32巻, 第3号, p139-146, 1990.
- 13) Cohen, S., Z., S. M. Creeger, R. F. Carsel, and C. G. Enfield: Potential Pesticide Contamination of Ground Water from Agricultural Uses, Treatment and Disposal of Pesticide Wastes (ACS Symposium Series 259) Eds. Krueger, R., J., N., American Chemical Society, 1984.
- 14) Croll, B., T.: Pesticides in Surface Waters and Groundwaters, J. the Institution of Water Environmental Management, vol. 5, p389-395, 1991.
- 15) Dunham, K., C.: Geological Map of the British Islands based on the work of the Geological Survey. 5th. Edition 1969. (1:1,584,000), The Institute of Geological Sciences, 1969.
- 16) Steenhuis, T., S., W. Staubitz, M. S. Andreini, J. Surface, T. L. Richard, R. Paulsen, N. B. Pickering, J. R. Hagerman, and L. D. Geohring: Preferential Movement of Pesticides and Tracers in Agricultural Soils, vol. 116, p50-66, 1990.
- 17) Matthiessen, P., C. Allchin, R. J. Williams, S. C. Bird, D. Brooke, P. J. Glendinning: The Translocation of Some Herbicides between Soil and Water in a Small Catchment, vol. 6, p496-514, 1992.
- 18) Gomme, J., W., S. Shurvell, S. M. Hennings, and L. Clarke: Hydrology of Pesticides in a Chalk Catchment: Groundwaters, J. the Institution of Water and Environmental Management, vol. 6, p172-178, 1992.
- 19) Gomme, J., W., S. Shurvell, S. M. Hennings, and L. Clarke: Hydrology of Pesticides in a Chalk Catchment: Surface Waters, J. the Institution of Water and Environmental Management, vol. 5, p546-552, 1991.
- 20) Squillace, P., J., E. M. Thurman, and E. T. Furlong: Groundwater as a Nonpoint Source of Atrazine and Deethylatrazine in a River during Base Flow Conditions, Water Resources Research, vol. 29, p1719-1729, 1993.