

降雨時における耕作放棄地からの汚濁物質の流出

武田育郎*・深田耕太郎

Outflow of pollutants from abandoned farmland during rainfall

Ikuo Takeda*, Kotaro Fukada

Abstract Runoff water during rainfall was collected at almost the same time in six watersheds (four abandoned farmlands, a paddy field and a forest), and the water quality between these points was compared. As a result, the water quality from abandoned farmland was sometimes much higher than that of paddy fields under cultivation, and the average water quality in 11 rainfall events increased as the rate of abandoned farmland increased. In addition, suspended solids from abandoned farmland during rainfall contained a certain amount of bioavailable phosphorus, and in some cases this concentration was much higher than that of phosphate. However, there is still a problem in using the forest watershed as a background for water quality.

Keywords abandoned farmland, forest, paddy field, water quality during rainfall

はじめに

現在、富栄養化現象が問題となっている閉鎖性水域において、窒素やリンの環境基準の達成率が低いままであることが解決困難な課題であると認識されている。こうした汚濁の原因に、点源（工場、事業所等）とともに面源（山林、水田、畑地、市街地等）から流出する汚濁物質の負荷量（原単位）が議論されているものの、十分な研究の進展に至っていないとする指摘もある（日本水環境学会 2012）。その主要な理由は、実態を詳細に把握した基礎データが少ないことが挙げられるが、概して面源から流出する汚濁負荷量は、予測困難な気象現象や観測者が制御できない流域条件（流域面積、地質、植生、傾斜など）の影響を強く受けるので十分な因果関係が得られず、公表されている知見が少ないのが現状である。

一方、近年増加している耕作放棄地は、上述の分類から外れており、議論の対象とされていない。耕作放棄地では肥料の投入がないため水質汚濁への寄与は小さいと

も考えられるが、特にリンについては、過去の施肥によって土壌のリン酸肥沃度が過剰になっている所が多いことが全国調査より知られており（小原・中井 2004）、人為的な管理がなくなった耕作放棄地では、降雨時の増水による流出が多くなることが懸念される。

一般に面源から流出する汚濁負荷量は、降雨時には晴天時（無降雨時）の100倍以上に増加することが知られているが、降雨時の水質は短時間に大きく変化するので、自動採水器を水文観測施設付近に設置して1時間～数時間間隔で流水を採集し、水質測定を行う方法が用いられる。しかしながら、得られた結果が着目する要因（本研究の場合は耕作放棄地の有無）によるものであるかどうかは、上述した観測者が制御できない流域条件の影響を受けるので、評価が困難である場合が多い。

このようなことから本研究では、1つの流域（あるいは比較のために2つの流域）に水文観測施設などを設置して降雨時の水質変化を1時間～数時間の頻度で重点的に測定するのではなく、耕作放棄地を含む多数の流域を対象とし、降雨時に増水した水をほぼ同時刻に採水し、これらの地点間の窒素、リン、有機物質等の水質を比較することとした。

環境共生科学科

*責任著者 (ikuotake@life.shimane-u.ac.jp)

また概して降雨時のリンの水質上昇の多くは懸濁物質によるものであるが、わが国の公定法であるJIS K0102（並木編 1999）で規定されているリンの水質項目はT-P（全リン）と $PO_4\text{-P}$ （リン酸態リン）であるため、下流の湖沼での影響を考慮し、海外では測定されることの多いBAP（bioavailable phosphorus：生物利用可能リン）を定量した。さらに、リン流出の主要な供給源と考えられる土壌中のリンについて、土壌のリン酸肥沃度の指標の一つである可給態リン酸を測定した。

研究方法

1. 対象流域

本研究で対象とした流域と採水地点の位置図を図1に、流域面積などの諸元を表1に示した。本研究では、島根県松江市内の6つの流域を対象として選んだ。すなわち、山林が多くを占めるものの山林以外では耕作放棄地のみである流域（放棄地1～4）と、比較のために山林が多くを

占めるものの山林以外では耕作中の水田のみである流域（水田流域）、それにバックグラウンドとして山林のみの流域（山林流域）である。研究の目的から考えると、耕作放棄地のみで構成されている流域（山林を含まない流域）を選定するのが望ましいが、平野部にある耕作放棄地では、近隣の人家や事業場などの影響が無視できず、また晴天時（無降雨時）の流水がない場合が多いため、山間部に位置する耕作放棄地を選定した。このうち放棄地2では、流域の末端において複数の流水があったが、最も水量の多い場所を採水地点とした。

ここで放棄地1～4については、2013年時点において、国土地理院の1/25,000の地形図（国土地理院 2009）で「田」となっているものの、現地では耕作放棄地となっている地点を選んだ。それぞれの地点での耕作放棄地になった時期については、地権者や近隣住民から十分な情報が得られなかったものの、5～10年前または10年以上前であった。なお、2023年発行の1/25,000の地形図においても、放棄地1～4は「田」となっていたが、2009年以降

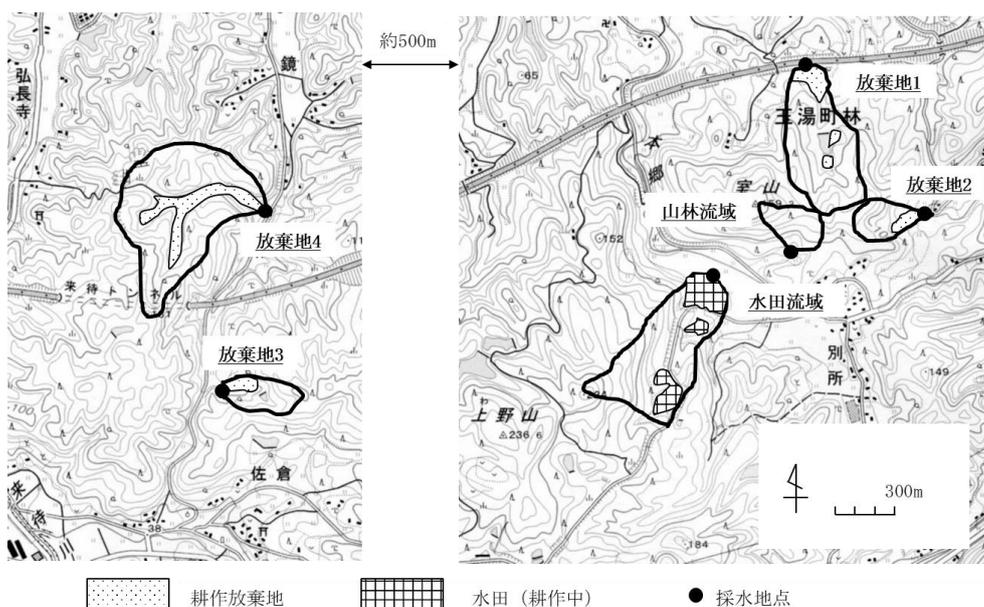


図1 対象流域

（国土地理院 2.5 万分 1 地形図に作図，太い黒線は流域界）

地点名	面積 (ha)				耕作放棄地 になった時期	備考
	耕作放棄地	水田	山林	合計		
放棄地1	1.7	0.0	13.3	15.0	10年以上前	上流にため池がある
放棄地2	0.7	0.0	3.4	4.1	5～10年前	流出口が複数ある
放棄地3	0.7	0.0	3.7	4.4	5～10年前	谷津田水田群の上流部分
放棄地4	3.5	0.0	21.9	25.4	10年以上前	小河川に沿った谷筋
水田流域	0.0	3.9	16.3	20.2	-	水稻耕作中
山林流域	0.0	0.0	3.5	3.5	-	林齢15-20年のスギ人工林

の耕作はなかった。

2. 降雨時調査

水質分析用のサンプルは、図1のすべての採水地点において降雨時に1回採水した。採水にあたり、気象情報などを参考に降雨強度ができるだけ大きい時刻となるようにし、また、同時刻の採水に近くなるように、可能な限り迅速に6地点の流水サンプルを収集した。水質分析は、JIS法（並木編 1999）に準拠して行った。降水量データについては、アメダス（気象庁 2023）で公表されている松江地点のデータを用いた。

3. BAPの測定方法

BAPの測定については、何らかの酸または塩基の溶液に懸濁物質を加えて攪拌し、それによって抽出される $PO_4\text{-P}$ の定量を行う方法がいくつか提案されているが、どの方法も一長一短があるとされている。このことから、本研究では海外において比較的多く用いられている水酸化ナトリウムを用いた方法（Sharpley *et al.* 1991）を採用した。すなわち、ろ過で用いたろ紙を0.1Nの水酸化ナトリウム溶液に入れて17時間攪拌した溶液の $PO_4\text{-P}$ 濃度を測定し、これを採水した流水サンプル（降雨イベント7～10

の4サンプル）の水質（mg/L）に換算した。

4. 可給態リン酸の測定方法

土壌の可給態リン酸は、Bray-2法（日本土壌肥料学会監修 1997）によって定量した。すなわち、0.1Nの塩酸溶液に土壌サンプルを入れて1分間攪拌した後の $PO_4\text{-P}$ 濃度を測定し、これを土壌のリン酸肥沃度として通常用いられている単位（ $mgP_2O_5/100g$ ）に換算した。土壌サンプルは2016年10月24日に流域の7地点で採集したが、放棄地1～4では耕作放棄地のエリア内の7地点にて、水田流域では水田のエリア内の7地点にて採集した。

結果と考察

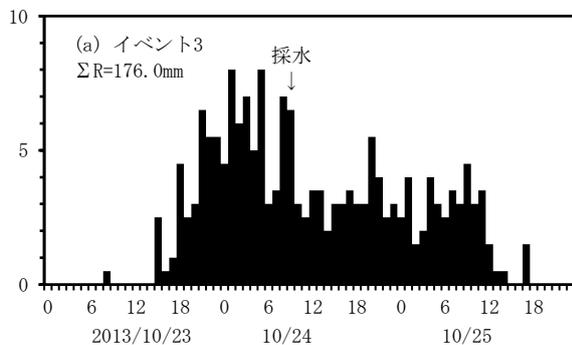
1. 降雨時調査の結果

表2に降雨時調査を行った11回の降雨イベントにおける採水時の降雨強度や総降雨量などを示した。採水は前述のように可能な限り降雨強度の強い時に行うこととしたが、必ずしも想定通りにならない場合もあった（図2）。

表2 降雨イベントの諸元

イベント No.	降雨期間	採水時刻	採水時の降雨強度 (mm/h)	総降雨量 (mm)	平均降雨強度 (mm/h)	最大降雨強度 (mm/h)
1	2013/5/29-30	5/30 6:41-7:20	0.8	21.5	0.82	4.5
2	2013/6/18-19	6/19 10:06-11:31	12.5	106.5	3.67	14.5
3	2013/10/23-25	10/24 8:01-8:41	7.0	176.0	3.38	8.0
4	2014/7/13	7/13 8:11-9:16	3.3	60.5	3.36	10.5
5	2014/8/15-16	8/16 9:04-9:46	0.5	50.0	1.79	7.0
6	2014/11/24-25	11/25 7:09-7:56	1.0	43.0	3.07	9.5
7	2015/5/12	5/12 13:58-14:46	1.5	22.5	2.81	7.5
8	2015/11/17	11/17 14:18-14:49	18.5	51.0	3.40	18.5
9	2016/12/13-14	12/14 9:04-9:30	1.5	30.0	0.97	4.5
10	2017/7/9	7/9 7:14-7:47	13.5	35.5	3.55	13.5
11	2018/4/23-4/24	4/24 10:04-10:54	4.5	42.0	1.82	6.0

降雨強度 (mm/h)



降雨強度 (mm/h)

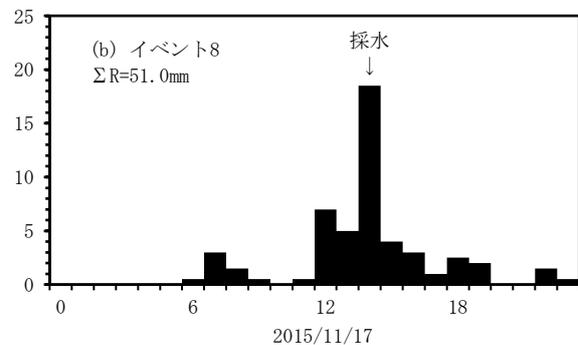


図2 降雨時系列と採水時刻の例

降雨時における耕作放棄地からの汚濁物質の流出

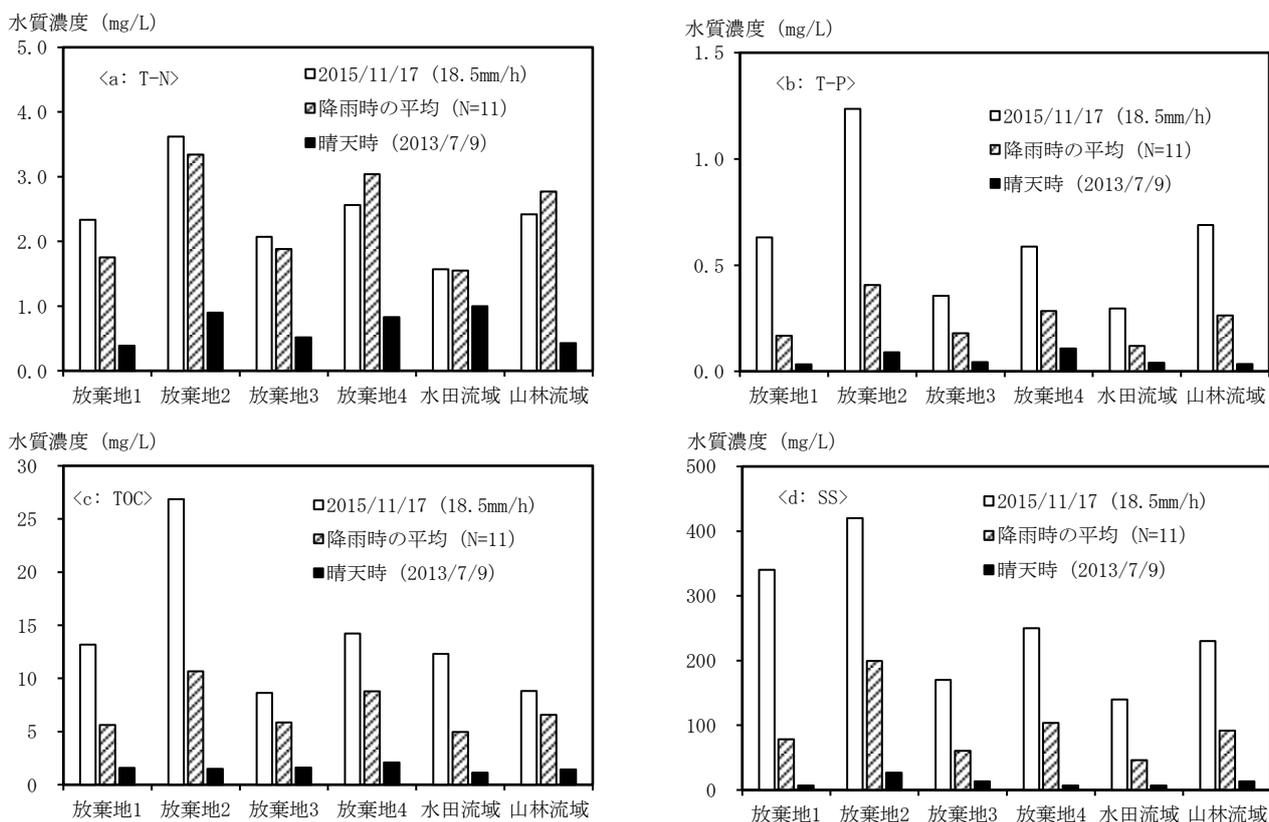


図3 降雨時と晴天時の水質

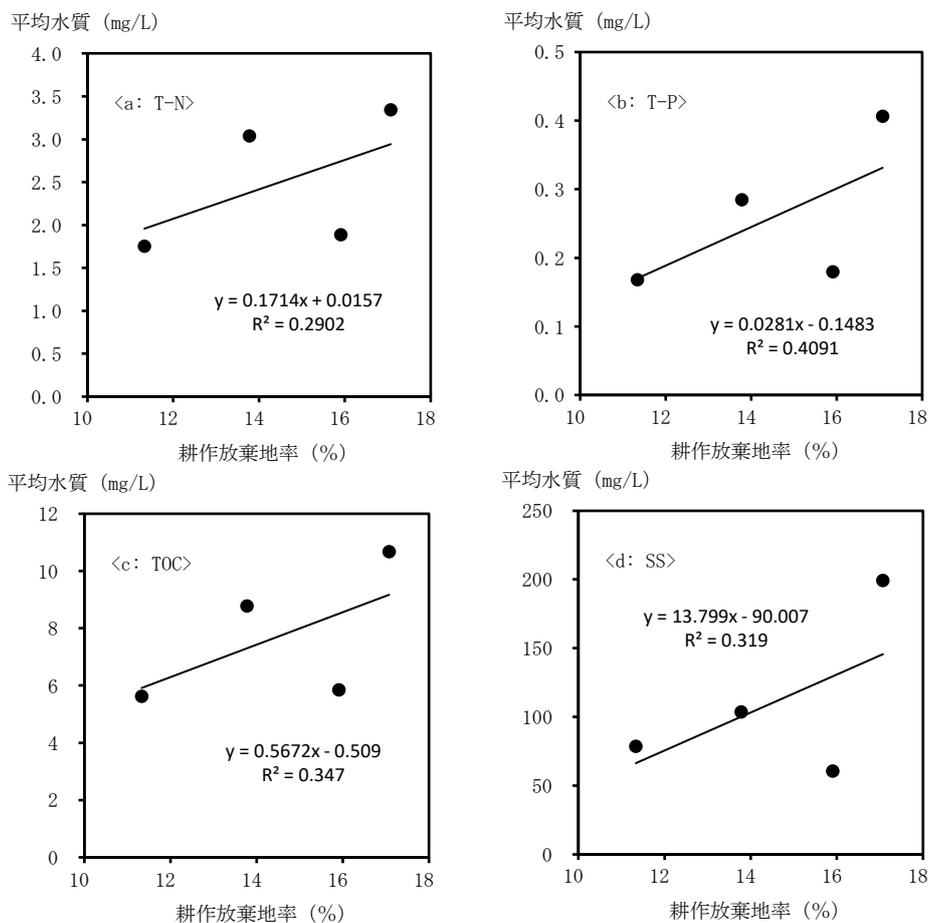


図4 耕作放棄地率と降雨時の平均水質

表2における降雨イベントの採水時の降雨強度は0.5mm/h～18.5mm/hで平均すると5.9mm/hであり、総降雨量は21.5mm～176.0mmで平均すると58.0mmであった。

図3では降雨時調査の結果から、T-N（全窒素）、T-P、TOC（全有機炭素）、SS（懸濁物質）について、採水時の降雨強度が最も強かった2015/11/17の水質、11回の降雨イベントの平均水質、それに晴天時（2013/7/9）の水質を示した。全体を概観すると、降雨時の平均水質は晴天時の水質よりも高くなっていったが、2015/11/17の水質は、T-Nの一部を除くとさらに高くなっていった。

降雨時の平均水質について耕作放棄地と水田流域を比較すると、どの水質項目においても放棄地の水質は水田流域よりも高く、特に放棄地2では水田流域の2.2倍（T-N）、3.4倍（T-P）、2.1倍（TOC）、4.3倍（SS）、であった。ただし、個別の降雨イベントについてみると、たとえば2013/6/18-19（採水時の降雨強度12.5mm/h、総降雨量106.5mm）のT-Nでは、放棄地3の0.112mg/Lに対して水田流域の0.229mg/Lなど、水田流域の方が高くなる場合もあった。2015/11/17の水質は平均値の2～3倍程度にまで上昇するものが多かったが、粒子性成分の影響が少ないT-Nでは平均値と同程度であった。

一方、山林流域の水質についてみると、たとえばT-Nの降雨時の平均値2.77mg/Lに対して水田流域の1.553mg/L、放棄地1の1.753mg/L、T-Pの平均値0.263mg/Lに対して水田流域の0.120mg/L、放棄地3の0.180mg/Lなど、水田流域や耕作放棄地の水質よりも高くなるものも見られた。また、イオン性の物質も含めた平均水質を表3に示した。

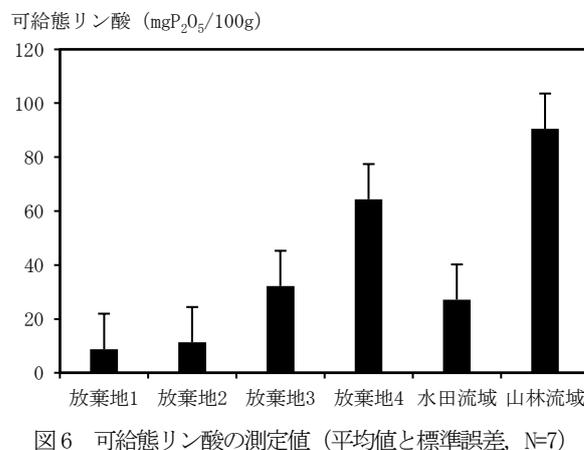
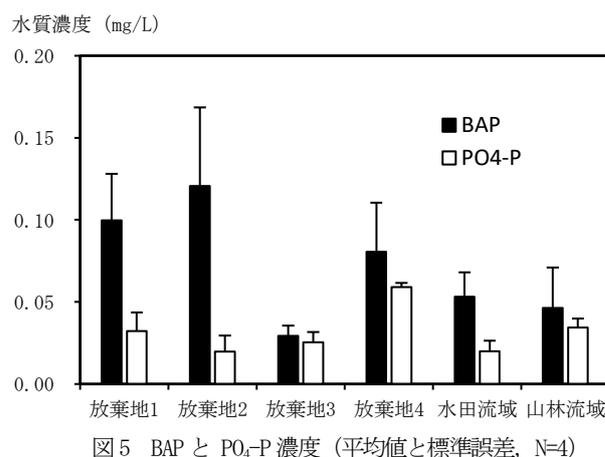
水質項目	放棄地1	放棄地2	放棄地3	放棄地4	水田流域	山林流域
T-N	1.753	3.344	1.885	3.039	1.553	2.770
NH ₄ -N	0.023	0.021	0.023	0.011	0.018	0.031
NO ₂ -N	0.007	0.007	0.004	0.008	0.004	0.010
NO ₃ -N	0.496	1.116	0.230	0.979	0.308	0.855
T-P	0.168	0.407	0.180	0.285	0.120	0.263
PO ₄ -P	0.019	0.013	0.020	0.047	0.012	0.025
TOC	5.62	10.67	5.85	8.77	4.97	6.58
SS	78.5	199.2	60.5	103.5	45.9	91.7

2. 耕作放棄地率と降雨時の平均水質

ここで、放棄地1～4の耕作放棄地率（面積割合）と降雨時の平均水質の関係について整理し、図4に示した。この図ではプロットした点が少なく、また、耕作放棄地率も11%～17%と範囲が狭いものの、耕作放棄地率が大きくなるほど降雨時の水質が高くなる傾向にあった（ただしどの回帰直線も統計的な有意性は認められなかった）。

3. BAP濃度

図5にBAPとPO₄-P濃度を示した。PO₄-PはT-Pの1割程度を占めて0.020mg/L～0.059mg/Lであったが、BAPはそれよりも高くなっていった。耕作放棄地についてみると、BAPの平均値は、放棄地1ではPO₄-Pの3.1倍、放棄地2では6.1倍と高かったが、放棄地3と放棄地4ではPO₄-Pと同程度であった。これらのことから、耕作放棄地から降雨時に流出する水の懸濁物質には生物に利用可能な形態のリンが一定量含まれており、PO₄-P濃度よりも著しく高くなる場合もあることがわかった。



4. 可給態リン酸

図6に可給態リン酸（Bray-2 P）の測定結果を示した。それぞれの地点において7つのサンプルで差異があったものの、平均値についてみると、放棄地1と放棄地2では10mgP₂O₅/100g程度であったが、放棄地3では32.2mgP₂O₅/100gと水田流域よりもわずかに高く、放棄地4では64.3mgP₂O₅/100gとさらに高くなった。耕地土壌における可給態リン酸については、たとえば暖地水田の耕作で必要とされているBray-2 Pは20mgP₂O₅/100g程度であるので（日本土壌肥料学会編 1984）、これを超えている耕作放棄地もある事がわかった。

一方、山林流域のBray-2 Pは予想に反して測定地点の中で最も高くなり、本研究における水質のバックグラウンドとしての位置づけには無理があると考えられた。この理由については判然としなかったが、近隣の山林では、外観はスギやヒノキの人工林であるものの、階段状になった地形や石組み、それにその上部の水を貯留できる窪地など、水稻耕作の痕跡と思われる場所が見られることがある。本研究で対象とした山林流域では、そのような痕跡は観察されず、また、林齢が15~20年スギの人工林であったので、現段階では高いBray-2 Pの測定値の理由はわからなかった。

おわりに

本研究では、耕作放棄地を含む4つの流域と比較のための水田流域と山林流域において、降雨時に増水した水をほぼ同時刻に採水し、これらの地点間の窒素、リン、有機物質等の水質を比較した。その結果、耕作放棄地から流出する水の水質は、耕作中の水田よりもかなり高くなる場合もあった。また、統計的な有意性は認められなかったものの、耕作放棄地率が大きくなるほど降雨時の水質が高くなる傾向にあった。さらに、耕作放棄地から降雨時に流出する水の懸濁物質には生物に利用可能な形態のリンが一定量含まれており、 PO_4 -P濃度よりも著しく高くなる場合もあった。ただし、それぞれの流域には山林が含まれており、また、測定対象とした山林流域は水質のバックグラウンドとするには問題があるなどの課題が残った。

謝 辞

本研究における水質分析には生物資源科学部農業水文学研究室の卒業論文専攻生、修士論文専攻生の協力を得た。記して深甚なる謝意を表します。

引用文献

- 気象庁 (2023) 過去の気象データ検索. <https://tenki.jp/amedas/precip.html>.
- 国土地理院 (2009) 2.5 万分1 地形図, 国土地理院, 東京.
- 小原洋・中井信 (2004) 農耕地土壌の可給態リン酸の全国的変動, 日本土壌肥科学雑誌, **75**: 59-67.
- 並木博編 (1999) 詳解 工場排水試験方法 改訂3版, 507pp. 日本規格協会, 東京.
- 日本土壌肥科学会監修 (1997) 土壌環境分析法, 427pp. 博友社, 東京.

日本土壌肥科学会編 (1984) 水田土壌とリン酸, 173pp. 博友社, 東京.

日本水環境学会 (2012) 非特定汚染源からの流出負荷量の推定手法に関する研究. 平成23年度環境省環境総合推進費成果報告書, 日本水環境学会, 東京.

Sharpley, A. N., Troeger, W. W. and Smith, S. J. (1991) The measurement of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *Journal of Environmental Quality*, **20**: 235-238.

日本語抄録

6つの流域 (4つの耕作放棄地流域, 1つの水田流域, 1つの山林流域) において、降雨時にほぼ同時に流水を集め、水質を比較した。その結果、耕作放棄地の水質は耕作中の水田よりも顕著に高くなる場合もあり、耕作放棄地率が大きくなるほど、11回の降雨イベントの平均水質は高くなる傾向にあった。また、懸濁物質中には一定量の生物利用可能リンが含まれており、リン酸態リンよりも高くなる場合もあった。しかしながら山林流域を水質のバックグラウンドとして用いるには問題が残った。