

降雨強度と雨水の水質が土壤浸透流出水の水質へ及ぼす影響

森澤太平¹・森也寸志²・井手淳一郎²・宗村広昭²・武田育郎²・井上光弘³

Characterizing infiltrated soil water quality as affected by rainfall condition

Taihei MORISAWA¹, Yasushi MORI², Jun'ichiro IDE², Hiroaki SOMURA², Ikuo TAKEDA² and Mitsuhiro INOUE³

Abstract: Recent increases in rainfall acidity and intensity have generated interest in their effect on soil-bound ions (i.e. mineral cations or nutrient anions) in drainage. A soil column experiment was conducted under field conditions to characterize infiltrated soil water quality resulting from simulated rainfall treatments. Two rainfall treatments (neutral rain and acid rain) and four rainfall intensities (2, 4, 20, 80 mm hr⁻¹) were investigated. Water draining through the soil column was sampled and analyzed for electrical conductivity (EC) and dissolved ion concentration. Results showed the acidic rain treatment caused more solute discharge than did neutral rain treatment. Infiltrated soil water quality was much higher than rain water, suggesting that changes in ionic concentration are due to leaching processes rather than ion exchanges. Moreover, highest solute concentrations was resulted from 80 mm hr⁻¹ rain, being affected by rainfall intensity. Surprisingly, 80 mm hr⁻¹ intensity when combined with acid rain treatment caused higher discharge solute concentrations than either treatment independently.

Key Words : infiltration water, rain intensity, acid rain, solute leaching

1. はじめに

高度経済成長期以来、化石燃料の燃焼に伴う大気中の硫酸化合物や窒素化合物の増加といった人間活動の結果として発生した酸性雨や、地球温暖化の結果とも言われる 50 mm hr⁻¹ 以上の強雨の増加などの諸問題 (Parry et al., 2007) を背景として、降雨条件が水や土壤環境に与える影響を評価することが環境政策の一端として挙げられるようになった。環境資源の一つであり様々な物質の濾過機能を持つ土壤環境に降雨が与える影響を評価し、対策を立てることができれば、科学技術基本政策 (内閣府, 2006) に掲げられた健全な水循環の実現にも貢献することができると思われる。

これまで水環境にかかわる排出負荷や水質形成過程の

評価には、河川水や暗渠排水などを採取・分析する方法が一般に用いられてきた。(例えば、武田, 2002; 伊藤ら, 2004)。しかし従来の方法では、水質汚濁の要因の一つであるとされている土壤中からの溶質流出については、過程が複雑なためにその成因を明らかにすることは難しい。このような現状の中、土壤浸透水を採水・分析し、肥料成分のリークの過程を解明したり (Higashi et al., 2005) 森林における雨水浸透を精査したり (小杉, 2000) する研究が行われ始めている。また、筆者らもこれまでに、島根県東部の森林において流域調査を行い、20.5 mm 10 min⁻¹ を含む豪雨があると、土壤からの TOC と TN の排出量が増加することや、土壤水分が不飽和であっても地表から 500 mm の深さで採取した土壤浸透水の TOC と TN の濃度が高くなる現象を報告した (森澤ら, 2007; 2008)。これらの現象は、雨水による土壤水の希釈効果 (豊島, 1998; Green et al., 2006) では説明できないため、これまでの知見を精査し土壤浸透水の水質の成因を詳細に解明することが重要な課題であるといえる。

本研究では降雨条件が土壤浸透水の水質の成因に影響を及ぼしていると考え実験を行った。すなわち、土壤充填カラムに異なる強度・水質の降雨を行い、土壤を通過した流出水を採水・分析した。土壤浸透実験に土壤充填カラムを用い、溶液を流入して溶質の移動や濃度を調べる手法は多くの研究で用いられている (例えば、Ozturk and Ozkan, 2002; 宮本・取出, 2004; Li et al., 2008)。しかし、これらの研究では土壤中の化学変化や溶質移動を評価対象としているため、流入する溶液の水質や量が現場では実際に生じることがほとんどない特別な条件であるほか、実験準備のためにいったん試料を飽和させ、その後排水させることが多く、実験開始前に重力排水による溶質のリークが起こってしまう。そのため、降雨による土壤中からの溶質流出を正しく評価することはできない。そこで、降雨の強度と水質を現場で実際に観測され得る範囲のものとし、初期設定で溶質をリークさせないよう工夫した。

2. 実験方法

2.1 試料土

土壤の採土については筆者らが流域調査を行った森林で行うことが望ましいが、当該流域は私有地であり、実

¹The United Graduate School of Agricultural Sciences, Tottori University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane 690-8504, Japan. Corresponding author: 森澤太平, 鳥取大学大学院連合農学研究科

²Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane 690-8504, Japan

³Arid Land Research Center, Tottori University, 1390 Hamasaka, Tottori, Tottori 680-0001, Japan

2009年9月10日受稿 2010年1月22日受理
土壤の物理性 114号, 3-10 (2010)

Table 1 試料土の基礎的性質 .

Physical and chemical properties of soil tested.

	密度 (g cm^{-3})	pH (H_2O)	*ECEC (cmol kg^{-1})	含有 炭素量 (%)	含有 窒素量 (%)	粒径分布			土性
						砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	
試料土	2.56	5.27	8.59	16.32	0.84	61.03	31.40	7.56	砂壤土

* 交換性陽イオン Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} から算定した有効陽イオン交換容量 .**Table 2** 雨水濃度 .

Contained materials in artificial rains.

	pH	溶質濃度 (mg L^{-1})									
		DOC	TN	NO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	NH_4^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
人工雨水	5.05	0.17	0.14	0.20	0.12	0.13	0.07	0.23	0.34	0.22	0.64
人工酸性雨水	3.95	0.55	2.41	1.69	0.93	1.15	0.46	0.50	1.58	0.38	2.08

現しなかった．そこで，管理状態や植生が類似した森林から採土した．すなわち，島根大学生物資源科学部附属生物資源教育研究センター森林科学部門演習林のスギ・ヒノキ人工林斜面を採土地とした．採土地は定期的に間伐され，表層土壌は下層植生で覆われていた．また，下層植生はシダ類が優先していた．深さ 100 ~ 400 mm から採土し，2 週間以上風乾した後に 2 mm ふるいを通過させ，試料土として使用した．試料土は褐色森林土壌であった．なお，乳鉢・乳棒による団粒のときほぐしは行わなかった．試料土の基礎的性質を Table 1 に示した．

2.2 雨水

本研究では降雨条件に着目しており，雨水は現場で観測され得る濃度である必要がある．天水を使用することが望ましいが，天水は有機物を含んでおり，継続実験をすると腐敗などの影響が出る恐れがある．また，内容物が日によって異なり特定できないため，再現性がない．そこで，雨水として人工雨水と人工酸性雨水の 2 種類を調整し，実験に供した．人工酸性雨水を実験に供することで，雨水の水質が土壌浸透流出水に及ぼす影響を精査した．雨水濃度は第 4 次酸性雨対策調査取りまとめ（環境省，2002）を参考に調整した（Table 2）．本稿では，人工雨水と人工酸性雨水を総じて雨水と表記した．また，微量定量ポンプで雨水を滴下することを降雨と表記した．

2.3 試料土の含有陽イオン量

土壌からの溶質流出を精査するに当たり，試料土に含まれる溶質量を測定する必要がある．そこで，試料土の含有陽イオン量を原子吸光分光光度計（AA-680，SHIMADZU）によって分析した．110 °C で 24 hr 炉乾燥した試料土を約 7 g 秤量し，1 mol L⁻¹ 酢酸アンモニウムを 80 g 添加してスターラーで 5 min 以上攪拌した．攪拌後，ろ過を行い，0.02 mol L⁻¹ 塩化ストロンチウムで 2 倍希釈したものを分析に供した． Na^+ ， K^+ ， Mg^{2+} ， Ca^{2+} 濃度を測定し，次式によって試料土 100 g 中の含有陽イオン量を算定した．

$$m_i = C_i \times 2 \times 0.08 \times \frac{100}{m_s} \quad (1)$$

ここに， m_i ：含有陽イオン量 ($\text{mg } 100 \text{ g - soil}^{-1}$)， C_i ：各陽イオン濃度 (mg L^{-1})， m_s ：土壌質量 (g)．

2.4 カラム実験

2.4.1 カラム下端からの不飽和浸透による土壌充填カラムの調整

直径 50 mm，高さ 150 mm のステンレス製円筒カラムの下端に 0.5 μm のメンブレンフィルタを敷き，圧力セルに装着した．圧力セル（SK-7100，サンケイ理化）は下端中央に外径 6 mm のナイロンチューブを接続できる構造になっており，土壌浸透水を排水させて土壌浸透流出水を採水できる（Fig. 1）．

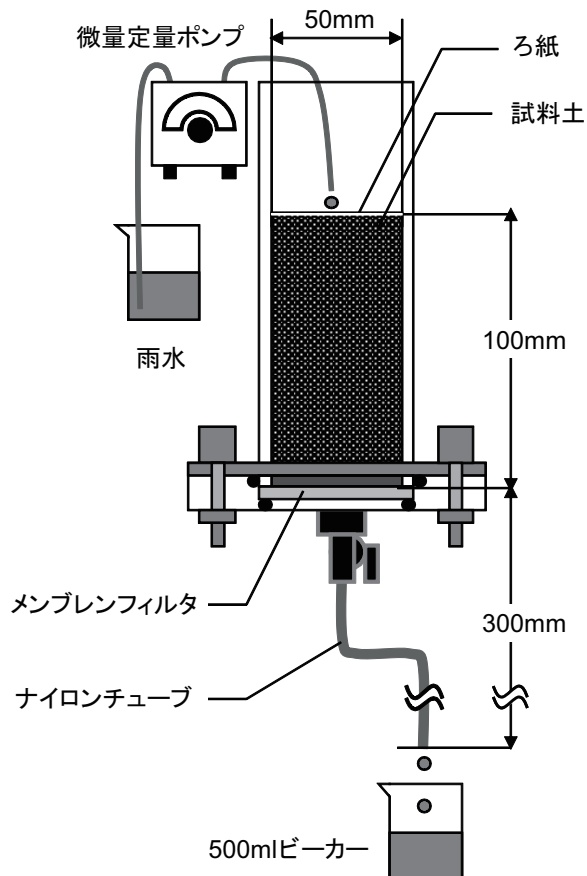


Fig. 1 土壌充填カラム .
The laboratory column unit.

一般にこのようなカラム実験では、初期条件の設定に、風乾土壌を充填し、カラム下端から溶液を浸透させて飽和した後に排水をさせるという操作を行う（例えば、Ozturk and Ozkan, 2004; Li et al., 2008）。しかしこの方法では、飽和状態を経ることで重力排水による溶質の早い流出が発生し、実験結果に操作上の誤差（系統誤差）を含んでしまう。従って今回の実験では、溶液の浸透は下端から行うが、常時 3 kPa のサクシオンがかかった不飽和上方浸透で準備するように工夫した。

まず、下端に接続したナイロンチューブを通じて、孔径 0.5 μm のメンブレンフィルタ（MEMBRANE FILTER, ADVANTEC）が十分に濡れるまで、下方から空気を追い出しながら水を満たした。メンブレンフィルタはいったん濡れると空気浸入値（この場合 70 kPa）までは空気の浸入を許さない。ナイロンチューブの排水端にイオン交換水を満たしたマリOTTタンクを接続し、この状態で乾燥密度 0.85 g cm^{-3} で試料土を充填し始めた。一方でマリOTTタンクを徐々に下げてサクシオンをかけ、マリOTTタンクの大気圧面とカラム下端の高低差を調節することで、カラム下端より 300 mm 低いところから水供給が行われるようにした。このようにサクシオンをかけ、飽和を防ぎながら試料土を高さ 100 mm まで充填した。すなわち、土壌のマトリックポテンシャルが -3 kPa の状態で常に水供給が行われることで土壌の飽和を防ぐようにした。この状態で 3 日間静置した。静置後の土壌の体積含水率は 0.45 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ であった。

2.4.2 降雨と土壤浸透流出水の採水・分析

自然の降雨には強弱があり、また断続的であるため、一定の強度で長期にわたって雨が降り続けることはない。しかしながら、降雨強度が土壤からの溶質流出に与える影響を評価するためには、降雨強度を一定にする必要がある。そこで、降雨量の総量を合わせ、現場で実際に観測され得る降雨強度と持続時間で雨水を土壤充填カラムに降らせた。すなわち、雨水の総降雨量が 320 mm となるように、降雨強度 2, 4, 20, 80 mm hr^{-1} の降雨を、それぞれ 160, 80, 16, 4 hr 継続して降らせた。本実験では、80 mm hr^{-1} の降雨を強雨と定義した。総降雨量は、筆者らの流域調査中に観測された豪雨の総降雨量が 317 mm であったことから 320 mm とした。降雨は微量定量ポンプ（MP-1000, EYELA）を用いて行った。一般に人工降雨は複数の注射針を用いて土壤表面に雨水が均等に降るようにして行う。本実験では雨滴による土壤表面への衝撃を防ぐために土壤表面に紙を敷き、雨水が紙から土壤表面へ均等に浸透するようにした。そのため、降雨に複数の注射針は使用せず、1 本のチューブから滴下した。排水端をカラム下方から 300 mm 下げることによって 3 kPa のサクシオンをかけ、降雨量 80, 160, 240, 320 mm の時点で土壤浸透流出水を採水した。土壤浸透流出水の pH を pH メータ（D-54, HORIBA）によって測定した。土壤浸透流出水中の溶存有機炭素（DOC）と全窒素（TN）の濃度を、全有機態・全窒素分析器（TOC-V_{CSN}, SHIMADZU）によって分析した。また、土壤浸透流出水

中の NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 濃度をイオンクロマトグラフ（PIA-1000, SHIMADZU）によって分析した。

土壤中の溶質の変化量を調べるために、試料土の含有陽イオン量に対する流出した陽イオン量の割合（以下、流出割合と表記した）を次式によって算定した。

$$F_r = \frac{(C_{\text{Ru}} \times Q_v) - \left(C_{\text{Ra}} \times \frac{A \times \frac{R_i}{10} \times T}{1000} \right)}{m_i \times 1.7} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 F_r ：流出割合（%）、 m_i ：各含有陽イオン量（ $\text{mg } 100 \text{ g - soil}^{-1}$ ）で係数 1.7 とは物質量を実際に充填した試料土 170 g に合わせるためのもの、 C_{Ru} ：流出水の各溶質濃度（ mg L^{-1} ）、 Q_v ：土壤浸透流出水量（L）、 C_{Ra} ：雨水の各溶質濃度（ mg L^{-1} ）、 A ：カラム断面積（ cm^2 ）、 R_i ：降雨強度（ mm hr^{-1} ）、 T ：降雨時間（hr）。

2.4.3 含水比試験

本実験では飽和、不飽和の区別を重視し、実験終了時に含水比の測定を行った。

降雨終了後に深さ 50 ~ 70 mm から採土した土壌を 20 g ほど蒸発皿に移し、電子天秤で秤量した。110°C の炉で 24 hr 炉乾燥させた後、電子天秤で秤量し、含水比を求めた。また、飽和含水比を測定するために、内径 50 mm、高さ 51 mm の円筒 100 cc サンプラに試料土を 0.85 g cm^{-3} で充填し、イオン交換水を満たしたバット容器内で 72 hr 飽和させた後、含水比試験を行った。降雨量 80 mm 毎の土壤浸透水の浸透距離を次式によって算定した。

$$H = \frac{80}{\theta} \quad (3)$$

ここに、 H ：浸透距離（mm）、 θ ：体積含水率（ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ）。降雨による土壤浸透水の平均間隙浸透流速を次式によって算定した。

$$F_w = \frac{0.1 \times H}{T \times 3600} \quad (4)$$

ここに、 F_w ：平均間隙浸透流速（ cm s^{-1} ）、 T ：降雨時間（hr）。

3. 結果と考察

3.1 含水比試験

降雨終了時の体積含水率を Table 3 に示した。各降雨において降雨量 80 mm 以外では降雨量と土壤浸透流出水量はほぼ同量で、実験中に湛水することはなかった。このことから、降雨量 160 mm から実験終了時までの土壤水分量はほぼ同量であることが推察された。さらに、(3) 式より、土壤浸透水は 80 mm 降る毎に 116 ~ 126 mm 下方へ浸透することが分かった。なお、飽和体積含水率は 0.74 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ で、土壤水分は各降雨条件におい

Table 3 実験終了後の体積含水率 .
Volumetric water content after end of the experiments.

降雨強度 (mm hr ⁻¹)	体積含水率 (m ³ m ⁻³)	
	人工雨水	人工酸性雨水
2	0.69	0.56
4	0.63	0.73
20	0.68	0.66
80	0.70	0.73

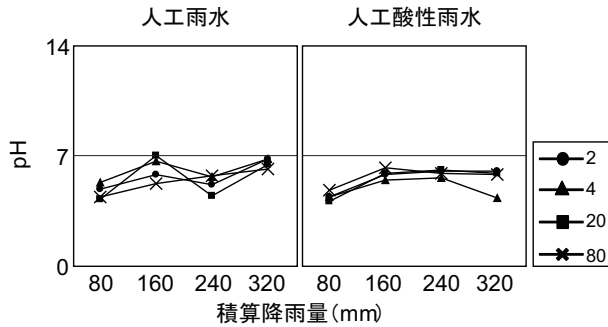


Fig. 2 土壌浸透流出水の pH の変動 .
Fluctuation of runoff water pH.

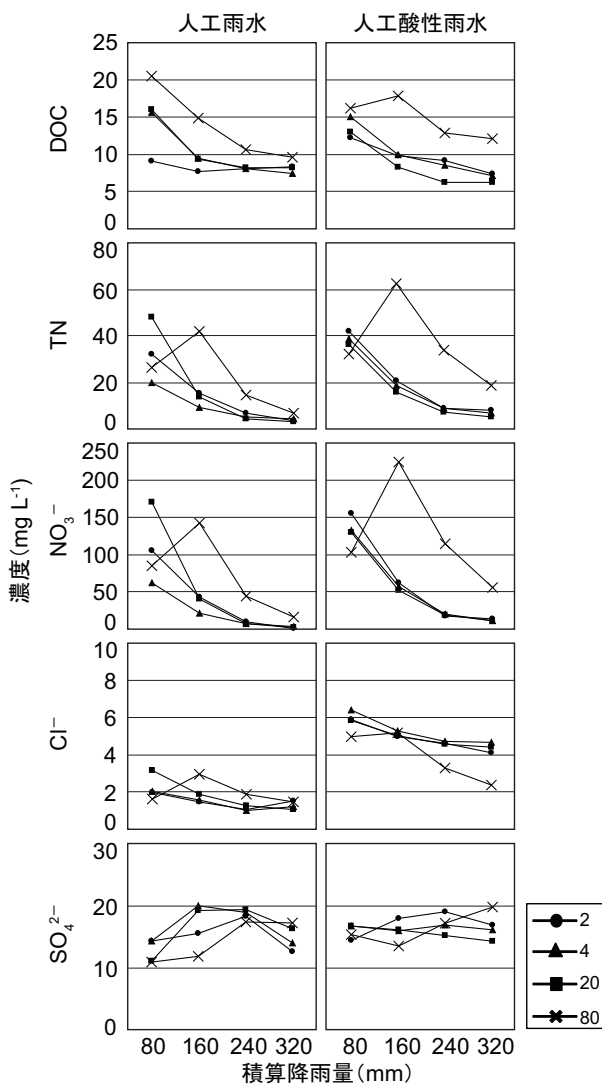


Fig. 3 土壌浸透流出水濃度の変動 . DOC, TN, 陰イオン .
Fluctuation of runoff water concentration. DOC, TN and anions.

て不飽和、もしくは飽和に近いものの湛水しない状態であったと考えられた。

3.2 溶質流出のタイプ

土壌浸透流出水の pH は、人工雨水を降らせた場合には pH 4.19 ~ 6.98 で変動しており、人工酸性雨水を降らせた場合には pH 4.16 ~ 6.15 で変動した (Fig. 2)。

土壌浸透流出水の溶質濃度の変動は、積算降雨量 80 mm で最も高く積算降雨量 160, 240, 320 mm では漸減するタイプ (タイプ 1) と、積算降雨量 80 mm から 160 mm で高くなり、240, 320 mm で漸減するタイプ (タイプ 2) の大きく 2 種類に分かれた (Fig. 3, 4)。2, 4, 20 mm hr⁻¹ の降雨強度では、DOC, TN, NO₃⁻, Cl⁻, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ は雨水の水質に関係なくタイプ 1 に分類された。しかし、80 mm hr⁻¹ の降雨強度では、人工雨水を降らせた場合の TN, NO₃⁻, Cl⁻, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ と、人工酸性雨水を降らせた場合の DOC, TN, NO₃⁻, Cl⁻, K⁺, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ がタイプ 2 に分類された。なお、SO₄²⁻ はタイプ 1, 2 のどちらの傾向も示さなかった。

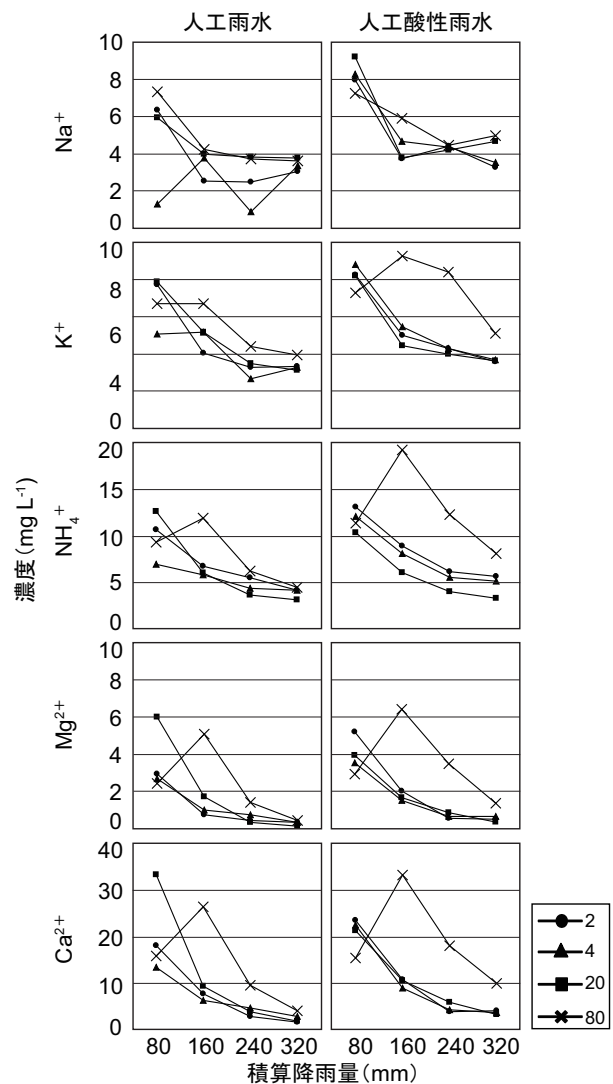


Fig. 4 土壌浸透流出水濃度の変動 . 陽イオン .
Fluctuation of runoff water concentration. Cations.

Table 4 雨水と流出水の溶質量の差の比較。
Comparison of artificial rain and runoff water solute.

	降雨強度 (mm hr ⁻¹)	*C _{AR} - C _R (mg 471 mL ⁻¹)			
		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
溶質の流出量の差	2	0.55	0.38	0.24	1.01
	4	0.73	0.38	0.11	0.49
	20	0.17	0.07	0.10	0.68
	80	0.59	1.24	0.68	3.27
雨水中の溶質量の差		0.19	0.13	0.08	0.68

* C_{AR}: 人工酸性雨水を降らせた場合の流出量, C_R: 人工雨水を降らせた場合の流出量

Table 5 陽イオンの流出割合。
Ratio of runoff cations from the soil.

降雨強度 (mm hr ⁻¹)	流出割合 (%)							
	人工雨水				人工酸性雨水			
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
2	19.36	10.69	0.61	0.67	15.02	12.43	1.30	0.81
4	19.28	11.26	1.03	0.77	27.77	13.02	1.15	0.69
20	28.13	12.00	1.05	0.87	27.94	11.58	1.16	0.87
80	28.22	15.54	4.31	2.48	34.61	23.27	6.91	3.56

含水比試験より、土壤浸透水は降雨が 80 mm 降る度に 116 ~ 126 mm 浸透する。土壤充填カラムの土壤高さが 100 mm であることから、80 mm の降雨が降るとそれまで貯留されていた土壤水が押し出されて流出すると考えられる。ここで 1 ポアボリュームは 74 mm である。したがって、積算降雨量 80 mm で採水された排水はほとんどが静置中の土壤水で、積算降雨量 160 mm 以降に採水された土壤浸透流出水は全て降雨が始まってから形成された土壤浸透水であると考えられる。このことからタイプ 2 は、降雨強度の影響で濃度が高くなったと考えられた。逆に言えば、タイプ 1 を示す溶質は降雨強度の影響による濃度上昇はみられず、順次濃度が低くなるものと考えられた。

3.3 溶質流出のプロセス

雨水と土壤浸透流出水の溶質濃度を比較すると、溶質によって差はあるものの、流出水の溶質濃度が数倍から数十倍と高かった (Table 1, Fig. 3, 4)。この現象は、筆者らが流域調査で観察した現象を再現しており (森澤ら, 2008)、土壤浸透水として高い濃度の負荷が形成される場合があることを示している。溶質の流出が主に土壤の化学的な緩衝能であるイオンの吸着交換反応によるものであれば、雨水と土壤浸透流出水の溶質濃度がほぼ等しくなる。また、イオンの吸着交換反応は瞬間的に起こり、その後は平衡に向かうためタイプ 1 のような変動を示す。しかし雨水濃度と比較して土壤浸透流出水の濃度がかなり高いほか、タイプ 2 を示す溶質がある。これは、化学反応ではなく主に物理的プロセスとしてのリーチングに近い現象が起こっていると考えると合理的である。

3.4 降雨の水質が溶質の流出割合へ与える影響

雨水の種類の違いによる土壤浸透流出水の溶質濃度の違いについては、概して人工雨水より人工酸性雨水を降らせることで土壤浸透流出水の溶質濃度が高くなった

Table 6 土壤浸透水の平均間隙浸透流速。
Relations between rain intensity and pore water velocity.

降雨強度 (mm hr ⁻¹)	平均間隙浸透流速 (cm s ⁻¹)	
	人工雨水	人工酸性雨水
2	8.1 × 10 ⁻⁵	9.9 × 10 ⁻⁵
4	1.7 × 10 ⁻⁴	1.5 × 10 ⁻⁴
20	8.1 × 10 ⁻⁴	8.4 × 10 ⁻⁴
80	3.2 × 10 ⁻³	3.0 × 10 ⁻³

(Fig. 3, 4)。ここで人工酸性雨水を降らせた場合の積算降雨量 160 mm 以降の土壤浸透流出水 (471 mL) に含まれる溶質量と人工雨水を降らせた場合に含まれる溶質量との差をとり、人工酸性雨水に含まれる溶質量と人工雨水に含まれる溶質量の差と比較した。陰イオンは一般的に、変異荷電の影響を受けやすく、実験方法に左右される。陽イオンは変異荷電の影響を受けるものの陰イオンに比べて小さい。そこで、原子吸光度計で測定可能な陽イオンである Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ について考察した (Table 4)。すると、K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ は 2, 4, 20 mm hr⁻¹ の降雨強度では人工酸性雨水を作るために加えた溶質量の増加と比較して流出端での溶質量の増加は 3 倍程度であった。それに対して 80 mm hr⁻¹ の降雨では土壤浸透流出水の溶質量の差のほうが明らかに大きく、流出端での増加が 5 ~ 10 倍であった。これらのことから、人工酸性雨水を降らせると 80 mm hr⁻¹ の降雨強度で流出量の増加があることが分かった。しかし本実験の結果からは、人工酸性雨水を降らせることで溶質の流出量が増加する要因を精査することはできなかった。Na⁺ は 80 mm hr⁻¹ の降雨強度で特徴的な増加はなかった。

3.5 降雨強度が溶質の流出割合へ与える影響

降雨による土壤からの溶質の流出を精査するために、(2) 式より流出割合を求めた (Table 5)。降雨強度、溶質によって大小はあるものの概して降雨による流入量より流出量が大きいことが示された。また、溶質ごとの流出割合については、Na⁺ が特に大きく、次いで K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ の順で小さくなった。このことは土粒子に対する陽イオンの吸着性が Na⁺ < K⁺ < Mg²⁺ ≤ Ca²⁺ であること (中野, 1991) と矛盾しない結果であった。人工雨水を降らせた場合の Mg²⁺, Ca²⁺ と人工酸性雨水降雨を降らせた場合の K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ の流出量割合が、土壤浸透水の平均間隙浸透流速が大きくなる 80 mm hr⁻¹ 降雨 (3.2 × 10⁻³, 3.0 × 10⁻³ cm s⁻¹) で特徴的に大きくなった (Table 6, Fig. 5)。これは、土壤浸透水の流速が速くなると、土壤への吸着性が大きく流出しにくい Ca²⁺ や Mg²⁺ であっても、流出割合が大きくなることを示していた。さらに、流出割合と体積含水率の関係を Fig. 6 に示した。人工酸性雨水を 80 mm hr⁻¹ で降らせると体積含水率は 0.73 m³ m⁻³ と飽和に近くなり、流出割合も大きくなった。しかし、人工雨水を 80 mm hr⁻¹ で降らせた場合にも、体積含水率が 0.70 m³ m⁻³ と不飽和であるにもかかわらず流出割合が大きくなった。また、人工酸性雨水を 4 mm hr⁻¹ で降らせると体積含水率は 80

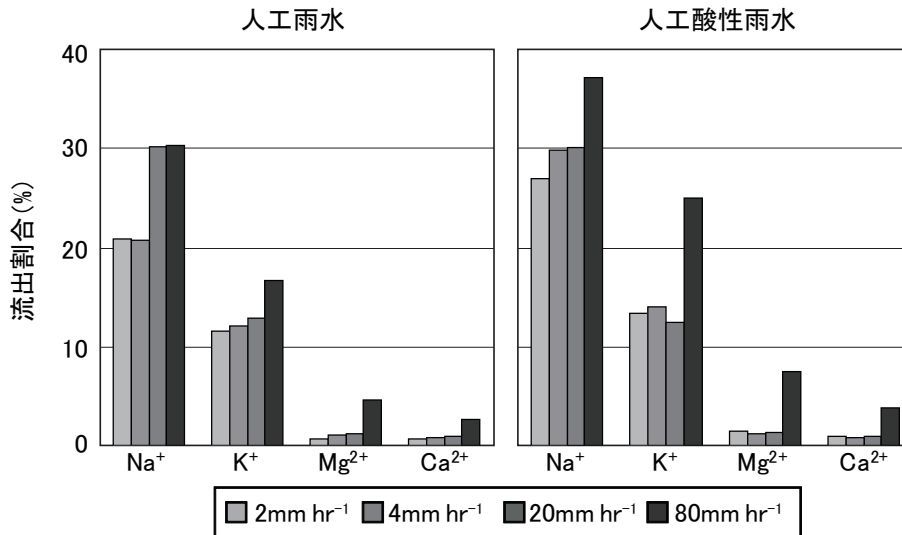


Fig. 5 降雨強度ごとの流出割合。
Ratio of runoff cations from the soil at each rainfall intensity.

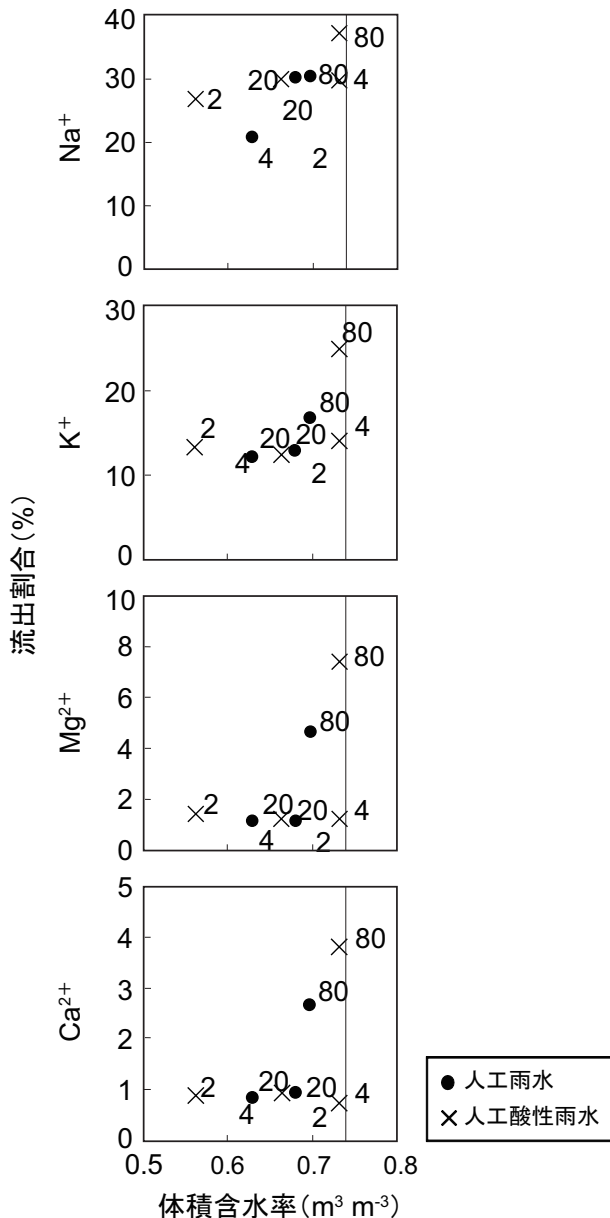


Fig. 6 流出割合と体積含水率の関係。数字は降雨強度，バーは飽和体積含水率 ($0.73 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) を表す。
Correlation between ratio of runoff cations from the soil and volumetric water content. Numbers mean rainfall intensities. Bars mean saturated volumetric water content ($0.73 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)

mm hr^{-1} と同じ $0.73 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であったが，流出割合は大きくならなかった。これらのことから，少なくとも今回得られたデータの範囲からは，流出割合が大きくなる要因は飽和・不飽和というよりは，土壤浸透水の平均間隙浸透流速が大きくなることであると推察された (Table 6, Fig. 6)。

さらに，Fig. 6 に示すように人工酸性雨水の降雨では， K^+ ， Mg^{2+} ， Ca^{2+} の流出割合が 2，4，20 mm hr^{-1} に対して 80 mm hr^{-1} の降雨強度で増大した。つまり人工酸性雨水の降雨があると，同じ 80 mm hr^{-1} の降雨強度でも，溶質の流出に対してより大きな効果が観察された。

これらの結果より，強雨，特に人工酸性雨水の強雨があると土壤浸透水の溶質濃度が高くなることが示された。その要因の一つは，土壤浸透水の平均間隙浸透流速が大きくなることによると推察された。Fig. 3, 4 を見ると，タイプ 2 を示す溶質の中で NO_3^- は特徴的に濃度が高い。団粒の外側は酸化状態で硝化が起こるため，内側に比べれば NO_3^- が多いと考えられる。土壤浸透水の分散については水分依存性があり (例えば，徳本ら，2005)，水みちが変化することが考察されている。80 mm hr^{-1} で人工酸性雨水を降らせた場合，体積含水率が大きくなる ($0.73 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) ことで土壤浸透水が団粒の外側を流れやすくなり，高い濃度の NO_3^- が流出すると説明できる。しかし体積含水率が同じ $0.73 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった 4 mm hr^{-1} で人工酸性雨水を降らせた場合には，80 mm hr^{-1} の降雨ほどの高濃度は観察できず， NO_3^- がタイプ 2 を示す理由は体積含水率からだけでは説明できなかった。

一方，80 mm hr^{-1} の降雨強度では，土壤浸透水の平均間隙浸透流速が大きくなり，土壤は飽和しないまでも重力水の影響が卓越し，土壤浸透水がバイパス流として団粒間を流れることが十分考えられる (Mori et al., 1999; Mori et al., 2001)。すると NO_3^- 濃度の高まりをより合理的に説明できる。つまり，タイプ 2 を示す NO_3^- の溶質流出については，体積含水率よりむしろ平均間隙浸透流速が要因となると考えられた。また，試料土に多量に含まれる Ca^{2+} や Mg^{2+} は NO_3^- に対する陽イオンとし

て同時に流出するために、 NO_3^- と同様にタイプ2を示したと考えると合理的である。これは、筆者らの流域調査で観察された、豪雨があると土壤浸透水の溶質濃度が高くなる現象とも矛盾しない。しかし、 Cl^- や NH_4^+ についてはタイプ2を示す理由を説明できなかった。また、雨水の水質によるタイプ1と2の違いについても明らかにすることができなかった。

4. 終わりに

本研究では、土壤充填カラムの初期条件を、不飽和下方浸透によって土壤構造を維持し、さらに実験開始前の重力排水による系統誤差を排除するよう工夫して準備した。この土壤充填カラムに現場で観測し得る条件の雨水を人工的に降らせることで、降雨の強度と水質が土壤浸透流出水の水質へ及ぼす影響を評価することを試みた。つまり、水質の異なる2種類の雨水を2, 4, 20, 80 mm hr^{-1} の降雨強度で降らせ、土壤充填カラムからの土壤浸透流出水を採水し、土壤浸透流出水中の溶質濃度を分析した。その結果をまとめると、次の通りである。

1. 含水比試験の結果、どの降雨条件であっても不飽和または飽和に近いものの湛水しない状態であった。また、降雨の強度と水質の影響を受けた流出水は降雨量160, 240, 320 mmのもので、土壤浸透水が押し出されたものであることが言えた。
2. 80 mm hr^{-1} で人工雨水を降らせるとTN, NO_3^- , Cl^- , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 濃度が降雨量160 mmで最高濃度となる傾向を示し、降雨強度の影響を受けて高くなることが分かった。人工酸性雨水を降らせるとDOC, K^+ 濃度が同様の傾向を示した。
3. 土壤浸透水平均間隙浸透流速が大きくなると、不飽和であっても Mg^{2+} と Ca^{2+} の流出が特徴的に大きくなること分かった。また、80 mm hr^{-1} の降雨強度で人工酸性雨水を降らせると、溶質の流出量は80 mm hr^{-1} の降雨強度の降雨と人工雨水を個別に降らせた場合の増加量より大きくなること示された。この土壤浸透流出水の濃度は雨水の濃度より高く、化学反応ではなく物理プロセスであるリーチングが優勢であると考えられた。

以上の結果から、近年増加傾向にあると言われる50 mm hr^{-1} 以上の強雨(IPCC, 2007)や酸性雨の条件下では、土壤浸透水の水質と溶質の流出が特徴的に大きくなること示唆された。

謝辞

本研究の成果の一部は、学術振興会科学研究費(19201017(國井), 20380179(武田), 18510074(森)), 島根大学プロジェクト研究推進機構「地域資源循環型社会の構築」,(財)クリタ水・環境科学振興財団, 島根県土地改良事業団体連合会, 鳥取大学乾燥地研究センター共同利用研究の補助を受けて行われた。また、農業環境技術研究所の江口定夫様には貴重なご意見を頂いた。ここに謝意を表します。

引用文献

- Green, R, Macdonald, B.C.T., Melville, M.D. and Waite, T.D. (2006): Hydrochemistry of episodic drainage waters discharged from an acid sulfate soil affected catchment. *Journal of Hydrology*, 325: 356–375.
- Higashi, N., Mori, Y. and Inoue, M. (2005): Measurement of fertilizer leaching from the root zone using an automated infiltration soil water sampler in an unsaturated sandy field. *Soil Science and Plant Nutrition*, 51(7): 1023–1033.
- 伊藤優子, 三浦覚, 加藤正樹, 吉永秀一郎(2004): 関東・中部地方の森林流域における渓流水中の NO_3^- 濃度の分布. *日本森林学会誌*, 86: 275–278.
- 環境省(2002): 第4次酸性雨対策調査取りまとめ, pp. 30–31.
- 小杉賢一郎(2000): 不飽和土壌中の鉛直浸透水の不攪乱採取手法の開発. *水文・水資源学会誌*, 13(6): 462–471.
- Li, Z., Liu, X., Zhang, X. and Li, W. (2008): Infiltration of melting saline ice water in soil columns: Consequences on soil moisture and salt content. *Agricultural Water Management*, 95: 498–502.
- 宮本英揮, 取出伸夫(2004): Na・Ca混合溶液の飽和浸透に伴う粘土の透水性変化について. *農業土木学会論文集*, 230: 37–45.
- 森澤太平, 森也寸志, 江草直和, 宗村広昭, 井上光弘(2007): 管理状態の異なる森林からの集中豪雨に伴う汚濁負荷流出特性—土壤浸透水直接採取からの観察—. *応用水文*, 20: 11–20.
- 森澤太平, 森也寸志, 江草直和, 宗村広昭, 武田育郎, 井上光弘(2008): 人工林の土壤浸透性の違いが豪雨時の水質形成過程に及ぼす影響. *水文・水資源学会2008年度研究発表会要旨集*, 190–191.
- Mori, Y., Maruyama, T. and Mitsuno, T. (1999): Soft X-ray radiography of drainage patterns of structured soils, *Soil Science Society of America Journal*, 63(4): 733–740.
- Mori Y., Takeda, I. and Fukushima, A. (2001): Soft X-ray radiography of structure-induced macropore flow in clayey soils. *Clay Science for Engineering*. pp. 297–302, Balkema, Rotterdam.
- 内閣府(2006): 第3期科学技術基本政策 分野別推進戦略. p. 3.
- 中野政詩(1991): 土の物質移動学. pp. 56–58, 東京大学出版会, 東京.
- Ozturk, H.S. and Ozkan, I. (2002): Solute movement in large soil columns under different water flow velocities. *Die Bodenkultur*, 53: 183–189.
- Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. and Hanson, C.E. (eds) (2007): Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 武田育郎(2002): 針葉樹人工林の間伐遅れが面源からの汚濁負荷量に与える影響(II). *水利科学*, 266: 47–71.

徳本家康, 取出伸夫, 井上光弘 (2005): 団粒構造を持つ黒ボク土の溶質分散について. 水文・水資源学会誌, 18 (4): 401-410.

豊島正幸 (1998): 畑地における窒素肥料成分のゆくえ. p. 85, 東北農試たより.

要 旨

流域調査において, 豪雨後に土壌浸透水の溶質濃度が高くなる現象が捉えられたが, その要因については精査できなかった. 本研究では降雨条件に着目し, 土壌充填カラムに人工雨水と人工酸性雨水を 2, 4, 20, 80 mm h r⁻¹ の降雨強度でそれぞれ 320 mm ずつ降らせ, 下方から流出した土壌浸透水 (流出水) 中の DOC, TN, NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ 濃度を分析した. その結果, 80 mm hr⁻¹ の降雨強度では溶質濃度が高くなり, 溶質の流出量が大きくなった. この濃度は雨水より高く, 物理プロセスであるリーチングが優勢であると考えられた. 人工酸性雨水では 80 mm hr⁻¹ の降雨強度で溶質の流出が大きくなり, 降雨強度に酸性物質が加わることでさらなる流出が観察された.

キーワード: 土壌浸透水, 降雨強度, 酸性雨, 溶質流出