

島根県船通山の溪畔林における土壌水の化学的性質

藤巻玲路・柏木裕香・久保満佐子・山下多聞

Chemical characteristics of soil water at a riparian forest in Mt. Sentsu, Shimane.

Reiji FUJIMAKI, Yuka KASHIWAGI, Masako KUBO and Tamon YAMASHITA

Abstract We investigated chemistry of soil water at 10 cm depth, together with bulk precipitation, throughfall and stream water at a deciduous broadleaf forest on Mt. Sentsu, Shimane, the headstream of Hiikawa River. Vegetation in valley bench and lower part of slope was consisted of plant species which are characteristic of riparian forests. Increases of dissolved organic carbon (DOC), NO_3^- , NH_4^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} concentrations were observed in the soil water compared to bulk precipitation and throughfall. Mg^{2+} and Ca^{2+} concentrations were positively correlated to NO_3^- , probably due to ion exchange at the surface of soil particles accompanied with nitrification. NO_3^- , Mg^{2+} and Ca^{2+} concentrations were higher in the valley bench than in the upper slope, indicating active nitrification in the valley bench. Compared to the surface soil water, DOC, NO_3^- , NH_4^+ , and Ca^{2+} concentrations decreased remarkably in the stream water, suggesting presence of removal processes of DOC and these ions in deeper soils and groundwater. Presumably plant uptake of nutrients and denitrification may strongly remove DOC and these ions in deeper soils in the valley bench. Results from our study indicate that the process in riparian forests would contribute to prevent nitrogen leaching to stream and to control water quality in rivers.

Keywords : Mt.Sentsu, riparian forest, soil water chemistry, stream water, vegetation

はじめに

森林は河川の水質形成に重要な役割を果たしている。森林生態系に流入する養分物質は、主に降水や乾性沈着物といった降下物に由来する。降下物は樹冠に一時貯留され、樹幹流や林内雨と共に林床へ流れる。樹冠や樹幹部を通過する際、樹体からの溶脱などにより溶存物質濃度が高くなる。地表に到達し地中へ浸透すると、樹木の利用や土壌微生物による有機物分解、土壌コロイドによる吸着さらに溶脱などの様々な作用を受けて水質が形成されていく(岩坪ら, 1997)。こうした作用を受けて物質濃度が低くなった土壌水は、溪流へと流出していく。このように、溪流の水質形成には森林が関係していると

考えられ、土壌攪乱の多い溪畔域の森林も例外ではない。実際に、水辺域の植生は窒素やリンなどを土壌中に保持することが可能であり、こうした水辺林の機能性は注目されつつある (Fujimaki *et al.*, 2009)。

溪畔林とは、河川上流域の谷底や谷壁斜面に成立する水辺林のことである。一般的にブナの優占する冷温帯落葉広葉樹林の溪流周辺の水辺林に対応する。北日本や日本海側の積雪地帯では、サワグルミ・トチノキ・カツラが林冠木の主要な構成種となる(崎尾・山本, 2002)。溪流域は、勾配が急で河川幅が狭いことから大雨時の増水が生じやすく、土砂礫の侵食・運搬等が頻繁に起こり、時には樹木を根こそぎ流し山崩れなどを引き起こす。こうしたことから、日常的に種類・頻度・規模が異なる様々な攪乱が生じ、土砂崩れ跡地のような急傾斜地

や、氾濫原のような緩傾斜地または平地といった複雑な立地環境が形成される。その結果、河畔域は多様な微地形と環境傾度に対応した生物多様性の高い生態系となっている。しかし、河畔域は攪乱体制が複雑で立地条件も厳しいため、調査が困難とされていた。本格的に研究が始まったのは1980年代後半からであり、植生や水生生物などの研究が主である(崎尾・山本, 2002)。そのため、河畔域の物質循環に関する研究は数少ない。

本研究の目的は、島根県船通山河畔域の立地環境における土壌水の成分構成が、どのような特徴を持つか明らかにすることである。そのために、異なる微地形環境において降水、土壌水および渓流水の水質を分析し、各種の物質濃度の変化を比較・検討した。

材料と方法

調査は島根県仁多郡奥出雲町と鳥取県日野郡日南町の県境(35° 09' 21" N, 133° 10' 43" E)に位置する船通山で行った。船通山一帯は比婆道後帝釈国定公園に指定されており、斐伊川の源流である鳥上滝が存在する。標高は約750m、年間平均気温は12.5℃、降水量は約1780mm(気象庁気象統計情報横田観測所2001-2010年の平均値)である。鳥上滝登山コース沿いの河畔林にて、谷底段丘地と谷壁斜面の2つの土壌水採水地を設けた。2014年7月11日に、谷底段丘にて20m×20m、谷壁斜面下部および谷壁斜面上部にて20m×10mの範囲で植生調査を行った。測定項目は高木層、亜高木層、低木層、草本層ごとの植生率を調査し、各層に出現する植物種とその被度を記録した。

谷底段丘と谷壁斜面のそれぞれに20×20mの調査地を設け、谷壁段丘では斜面下部から溪流際にかけて11地点、谷壁斜面では斜面上部から溪流際にかけて12地点の土壌水採水地を設定し、各地点の溪流からの比高を計測した。各採水地点の土壌深10cmの位置にポーラスカップを設置し、50mLシリンジに接続し約24時間吸引した。採水期間は、2014年8月21日から同年12月12日まで各月1回もしくは2回採水した。採水した試料はポリプロピレン瓶に移し、実験室にて孔径0.45μmメンブレンフィルターで濾過した後冷凍保存した。渓流水は、土壌水の採取の日に谷底段丘周辺の溪流から直接ポリプロピレン瓶で採取した。

降水は林外雨と林内雨を採取した。林外雨は登山道入口付近の開放地に、林内雨は谷壁斜面の調査地にて、直径30cmの円形ポリ漏斗と20Lポリタンクを組み合わせ

た採水装置を設置した。漏斗には不純物が混じらないようにネットをかぶせた。土壌水の採水と同じ日に、貯留した降水をポリプロピレン瓶に採水した。渓流水と降水は実験室に持ち帰った後、孔径0.45μmメンブレンフィルターで濾過し冷凍保存した。採水期間は、渓流水と林外雨・林内雨のいずれも、土壌水と同じである。

採水した試料について、陰イオン(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}), 陽イオン(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), 溶存有機態炭素(DOC)の分析を行った。DOCは、TOC-V CSH(島津製作所)によって、陰イオンと陽イオンは、孔径0.2μmメンブレンフィルターで濾過してから、イオンクロマトグラフィー(ダイオネクス ICS-1600)を用いてそれぞれ分析した。

結果と考察

船通山河畔林の植生

谷底段丘および谷壁斜面下部では高木層の植生率が高く、林冠が閉鎖している(附表)。一方で、谷壁斜面上部では高木層の植生率がやや低く、低木層が発達するという階層構造がみられた。谷底段丘の樹種構成は、高木層ではカツラ、ケヤキ、サワグルミ、亜高木層ではチドリノキ、クマシデ、ミズナラがそれぞれ植生率10%を超えており、低木・草本層ではハイイヌガヤが75%以上の植生率で優占していた。谷壁斜面の上部で10%以上の植生率が認められた樹種は、高木・亜高木層ではミズナラ、ナツツバキ、ヤマボウシ、ヒサカキおよびリョウブ、低木・草本層ではアセビ、ヒサカキおよびコアジサイであった。また、谷壁斜面の下部では、高木・亜高木層にはウリハダカエデ、サワグルミ、ミズキ、ミズナラ、ナツツバキが、低木・草本層にはハイイヌガヤ、ミヤマハハソ、チャルメルソウが10%以上の植生率で出現した。カツラやサワグルミは湿性な生息地を好む河畔林に特徴的な樹種であり、それらが出現していた谷底段丘や下部谷壁斜面は河畔林としての特徴を備えた植生であるといえる。しかし、上部谷壁斜面ではリョウブやアセビなどやや乾性の森林環境に出現する樹種も観察された。

林外雨および林内雨の水質

表1に、林外雨、林内雨、土壌水、渓流水の平均溶存物質濃度を示す。当調査地の林外雨の水質を、第5次酸性雨全国調査(友寄ら, 2011)における湿性沈着の全国平均値と比較すると、 Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} の濃度がやや高いが、その他のイオン類は概ね全国平均値と同等かや

表 1. 林外雨, 林内雨, 土壌水および渓流水の平均溶存物質濃度 (平均値 ± 標準偏差). DOC の単位は (mg/L), その他の単位は (μeq/L).

	林外雨	林内雨*	土 壌 水		渓流水
			谷底段丘	谷壁斜面	
Na ⁺	42 ± 47	47 ± 58	99 ± 106	124 ± 65	202 ± 14
NH ₄ ⁺	12 ± 15	7 ± 4	135 ± 408	183 ± 430	18 ± 12
K ⁺	2 ± 1	26 ± 26	57 ± 44	39 ± 35	15 ± 2
Mg ²⁺	12 ± 12	20 ± 19	139 ± 57	66 ± 47	40 ± 2
Ca ²⁺	11 ± 6	27 ± 14	308 ± 175	111 ± 123	54 ± 5
Cl ⁻	44 ± 53	65 ± 75	106 ± 113	119 ± 101	129 ± 12
NO ₃ ⁻	10 ± 16	13 ± 12	432 ± 362	106 ± 227	29 ± 14
SO ₄ ²⁻	28 ± 26	35 ± 22	61 ± 77	73 ± 74	42 ± 2
DOC	0.82 ± 0.64	2.41 ± 1.82	11.59 ± 9.81	21.75 ± 36.15	1.28 ± 1.29

*谷壁斜面にて採取した林内雨

や低い値であった。

森林に降った雨が樹冠を通過する際、枝葉に蓄積している沈着物質の洗浄や、樹冠部での溶脱・吸収がおり、化学性が変化する。本研究では、林外雨と林内雨の水質変化において、K⁺、Ca²⁺、DOC の濃度上昇が顕著であった。K⁺ や Ca²⁺ は、降水の酸性度が樹冠内で緩衝される際、H⁺ イオンとの交換で植物体内から溶脱されることが知られている (Chiwa *et al.*, 2004)。また、K⁺ は比較的移動性の高いイオンであり、植物体からの溶脱が容易に起こりやすいことがよく知られている。本研究で認められた、林内雨における K⁺ や Ca²⁺ の濃度上昇は、これらの樹冠部での酸交換反応や溶脱によるものと考えられる。さらに、溪畔林での特徴として、DOC の濃度増加があげられるだろう。溪畔林を特徴付けている樹種は概して葉に可溶成分が比較的多く、落葉の分解速度が速いものが多い (武田, 1996)。本研究では落葉期にも採水を行っており、この期間ではおそらく樹上にある内から容易に DOC の溶脱がおきているのかもしれない。

土壌水と渓流水の水質

林内雨が土壌に流入し浸透する過程では、水質はさらに大きく変化する。本研究では、林内雨と比較して土壌水では全ての物質について濃度の増加が認められた (表 1)。特に顕著な濃度上昇が認められた溶存物質は、DOC、NO₃⁻、NH₄⁺、Mg²⁺ および Ca²⁺ であった。ただし、DOC と NH₄⁺ 濃度は空間的な変動が大きく、NH₄⁺ では検出限界以下となる採水地点もあった。NO₃⁻、Mg²⁺ および Ca²⁺ の濃度増加は、谷壁斜面に比べ谷底段丘で大きくなった。Mg²⁺ と Ca²⁺ は NO₃⁻ 濃度と強い正の相関を示し、相関係数は NO₃⁻ と Mg²⁺ との間で 0.766、NO₃⁻ と Ca²⁺ との間で 0.921 であった。またこれら 3 つ

のイオン濃度は、調査地の地形とも関係しており、溪流からの採水地点の比高と負の相関を示した (図 1)。比高との相関係数は、NO₃⁻、Mg²⁺ および Ca²⁺ でそれぞれ -0.477、-0.548、-0.496 (いずれも p < 0.05) であった。

土壌水における NO₃⁻ 濃度の増加は、土壌の硝化活性が高いことを示唆している。硝化はアンモニウムイオンが酸化されて硝酸イオンに変化するプロセスであるが、この過程でプロトンが放出され酸として働く。この際に、土壌粒子の交換座に吸着している Mg²⁺ や Ca²⁺ が、プロトンと交換されうる。土壌水の Mg²⁺ や Ca²⁺ の濃度が NO₃⁻ 濃度と正の相関を示したのは、おそらく硝化活性に伴う土壌粒子表面の陽イオンのイオン交換反応によるものであろう。また、比高と負の相関を示したことは、硝化や土壌粒子表面のイオン交換反応が、谷底段丘で特に盛んであることを示唆している。

土壌水に比して渓流水では、Na⁺ と Cl⁻ をのぞく全ての物質で濃度の減少が認められた。特に減少が顕著であったのは、NH₄⁺、Ca²⁺、NO₃⁻ および DOC であり、これらは谷底段丘の土壌水の濃度に比べて 1/5 以下 (NO₃⁻ では約 1/15) の濃度であった。本調査では土壌水を 10cm の深度で採水しており、この結果は、より深い土壌中においてこれらの物質が浸透水から除去される過程が存在することを示している。窒素やカルシウムは、植物の成長に必須の元素であるので、NH₄⁺、Ca²⁺、NO₃⁻ については、植生による吸収によって濃度が低下していた可能性がある。また、土壌微生物による作用も大きく影響を及ぼしうる。NH₄⁺ は環境中では硝化細菌により酸化されて NO₃⁻ になり、森林渓流水では NH₄⁺ はごく低濃度になることが多い。地下水や土壌団粒内のような嫌気的な条件下では、脱窒過程による NO₃⁻ の除去も大きく関与している。脱窒では電子供与体となる有

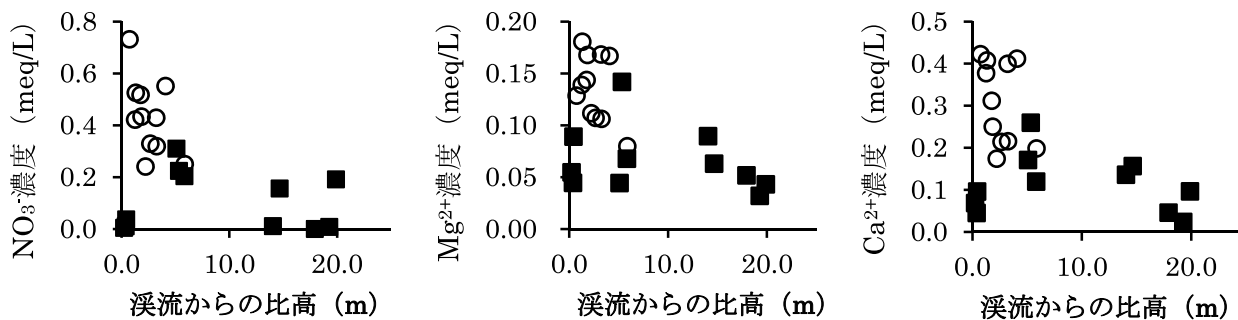


図1. 土壌水の NO_3^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} の平均濃度と採水地点の比高との関係. ○は谷底段丘, ■は谷壁斜面の採水地を示す.

機物が必要であり, DOC の存在が重要であることも報告されている (Schade *et al.*, 2001). 谷底段丘ではなだらかな地形のため比較的土壌水の流れも穏やかになり, 土壌が嫌気条件になりやすくなるであろう. また, 溪畔林では林冠からの DOC の供給と土壌中の DOC の蓄積が大きく, これらの条件により, 土壌深部での脱窒が盛んであることが考えられる.

渓流水質に関しては, 木平ら (2006) によって全国 1278 箇所の渓流水質調査が報告されているが, 本研究における陰イオンおよび陽イオン濃度は, Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} 濃度を除き木平らが報告した全国平均値とほぼ同等の値を示した. Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} の濃度はそれぞれ全国平均値と比べて約 1/2, 1/5, 1/3 の値であった. 近年では森林への大気降水物の影響として, 渓流水に主に NO_3^- の形態として窒素が流出する窒素飽和現象がしばしば報告され, 森林の水質形成機能の劣化が危惧されている (Aber *et al.*, 1998). しかし, 本調査地の渓流水の NO_3^- 濃度はそれほど高くはなく, 窒素飽和現象の明瞭な兆候は認められない. 本研究の結果において, 表層土壌水で高濃度の NO_3^- が観察されたことを考えると, 溪畔林の植生や土壌での NO_3^- の除去が, 渓流水への窒素流出の抑制に大きく関与していることが示唆される.

謝 辞

島根県森林管理署, 島根県, および奥出雲町より入林および調査器具の設置許可をいただいた. また, イオン類の分析では附属教育研究センター森林科学部門の葛西絵里香氏に, DOC 分析では桑原智之准教授にご助力いただいた. ここに記して深く感謝申し上げる.

引用文献

Aber, J., McDowell, W., Nadelhoffer, K., Magill, A.,

Berntson, G., Kamakea, M., McNulty, S., Currie, W., Rustad, L. and Fernandez, I. (1998) Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: hypotheses revisited. *BioScience* **48** : 921-934.

Chiwa, M., Crossley, A., Sheppard, L.J., Sakuragawa, H. and Cape, J.N. (2004) Throughfall chemistry and canopy interactions in a Sitka spruce plantation sprayed with six different simulated polluted mist treatment. *Environmental Pollution*, **127** : 54-62.

Fujimaki, R., Sakai, A. and Kaneko, N. (2009) Ecological risks in anthropogenic disturbance of nitrogen cycles in natural terrestrial ecosystems. *Ecological Research*, **24** : 955-964.

岩坪五郎・徳地直子・仲川泰則 (1997) 降水と森林流出水の水質—降水溶存元素量の 30 年間の変動, 降水と流出水にともなう溶存元素収支と森林流出水質の広域的変動—. *森林立地*, **39** : 63-71.

木平英一・新藤純子・吉岡崇仁・戸田任重 (2006) わが国の渓流水質の広域調査. *日本水文科学会誌*, **36** : 145-149.

崎尾均・山本福壽 (2002) 水辺林の生態学. 224pp. 東京大学出版会, 東京

Schade, J.D., Fisher, S.G., Grimm, N.B. and Seddon, J.A. (2001) The influence of a riparian shrub on nitrogen cycling in a Sonoran Desert stream. *Ecology*, **82** : 3363-3376.

武田博清 (1996) 分解系への有機物の供給と分解過程. (森林生態学. 岩坪五郎編, 文永堂, 東京, 306pp.). 138-154.

友寄喜貴・堀江洋佑・西山亨・中村雅和・辻昭博・木戸瑞佳・松本利恵・山口高志・北村洋子・横山新紀 (2011) 第 5 次酸性雨全国調査報告書 (平成 21 年度). *全国環境研会誌*, **36** : 106-146.

附表 1. 調査地の植被率と被度 1%以上の植物種構成

		谷底段丘	谷壁斜面下部	谷壁斜面上部
高木層	植被率 (%)	80	90	50
亜高木層	植被率 (%)	70	15	80
低木層	植被率 (%)	5	30	50
草本層	植被率 (%)	95	60	70
高木層	カツラ	III	—	—
	ケヤキ	II	—	—
	サワグルミ	II	II	—
	ミズキ	I	II	—
	ウリハダカエデ	—	II	—
	ミズナラ	—	II	II
	ナツツバキ	—	—	II
	ヤマボウシ	—	—	I
亜高木層	チドリノキ	III	—	—
	クマシデ	II	—	—
	ミズナラ	II	—	—
	カツラ	I	—	—
	ナツツバキ	—	II	—
	ヤマボウシ	—	—	III
	ヒサカキ	—	—	II
	リョウブ	—	—	II
	アオダモ	—	—	I
	アオハダ	—	—	I
アズキナシ	—	—	I	
ソヨゴ	—	—	I	
低木層	ミヤマハハソ	+	II	—
	ハイイヌガヤ	—	II	—
	クロモジ	—	I	I
	アセビ	—	—	III
	ヒサカキ	—	—	II
	アオハダ	—	—	I
	リョウブ	—	—	I
草本層	ハイイヌガヤ	V	II	—
	セリ科 sp	+	I	—
	チャルメルソウ	+	II	—
	ヤマアジサイ	—	II	—
	コアジサイ	—	I	II
	キバナアキギリ	—	I	—
	ノブキ	—	I	—
	アセビ	—	—	III
	ヒサカキ	—	—	I

被度階級 + : 植被率 1% 以下で存在 (他の調査地で 1% 以上),
 I : 1~10%, II : 10~25%, III : 25~50%, V : 75~100%.