

樹幹流の安定同位体比および溶存化学成分の 1 降雨中の時間変化

久保田多余子¹

1 森林総合研究所

要旨：樹幹流の 1 降雨中の安定同位体比と溶存無機イオン濃度の時間変化を調べることにより、溶存無機イオン濃度からは、樹幹流に含まれる乾性降水物量と樹体からの溶脱量を分離でき、かつ乾性降水物が流出し終わるタイミングが分かること、安定同位体比からは樹幹流の発生機構を推定できた。このことから、樹幹流の安定同位体比および溶存無機イオン濃度の高時間分解能データを用いることにより、樹幹流が物質循環、酸緩衝機能や降雨流出過程へ果たしている役割をよりよく理解できる。

キーワード：樹幹流・溶存無機イオン濃度・水の安定同位体比・降雨中の時間変化

Intra-storm trends of water stable isotopes and dissolved inorganic ion concentrations in stemflow

Tayoko KUBOTA¹

Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract: Using intra-storm trends of dissolved inorganic ion concentrations in stemflow, we were able to separate dry deposition washoff and leaching flux, and determine the timing when dry depositions stop to flowing. Using water stable isotopes in stemflow, we were able to estimate stemflow generation mechanisms. We showed that high time resolution data of dissolved inorganic ion concentrations and water stable isotopes in stemflow could become useful tools to clear the roll of stemflow for material cycle in the forest, acid buffering capacity of the forest soil, and rainfall-runoff processes.

Key-word: stemflow, dissolved inorganic ion concentrations, water stable isotopes, intra-storm trends

I はじめに

樹幹流は森林生態系における物質循環 (4)、酸性雨に対する森林の緩衝機能 (12)、降雨流出過程 (3, 8) に重要な役割を果たしていると認識されている。それにもかかわらず、樹幹流量 (mm) を降雨量 (mm) に対する割合にすると 0.5~12.1% と少ないため (15)、樹幹流の影響は小さいとして無視されることが多かった。しかし、樹幹流は体積で見れば多量な水量で根元に集中して流れ込み、樹冠通過雨よりも効率的に地中に浸透すると考えられ、近年再び注目されている (11)。

樹幹流の溶存無機イオン濃度と水の安定同位体比の 1 降雨中の時間変化についての研究は少ないが、どちらも降雨の降り始めで大きく、徐々に小さくなるという変化をすることが報告されている (3, 8, 10)。しかし、両者の変化の原因は異なっている。樹幹流の溶存無機イオン濃度は降水に含まれる成分に大気中、樹冠や樹幹での乾性降水物の洗い出しと樹体からの溶脱分を加え、樹体へ吸収される分を差し引いて決まる。このことから、樹幹流の溶存無機イオン濃度は林内への乾性降水物の流入量

を評価する (5, 7, 10, 13) ことに利用されている。一方で、水の安定同位体比は水が蒸発したり、凝縮したりする三相変化のときと、同位体比の異なる水同士が混合するときに変化する。水の安定同位体比は水そのものであり、途中で溶脱や吸着がないため、降雨流出過程を調べるための理想のトレーサと考えられている (6)。

本研究ではまず、1 降雨中の樹幹流の溶存無機イオン濃度と水の安定同位体比の時間変化を明らかにする。そして、これらを調べることにより、樹幹流が物質循環、酸緩衝機能、降雨流出過程へ果たしている役割についてよりよく理解できるのかどうか検討する。

II 方法

1. 調査地 調査は茨城県常陸太田市にある茨城森林管理署管内堂平国有林 (36° 34' N, 140° 35' E) 内の 1924 年植栽のスギとヒノキの人工林において行った。

2. 調査項目 降雨を気象露場にて、樹冠通過雨をスギの樹冠下、および樹幹流をスギの幹において、自作の採水装置 (8) を用いて 1 降雨を細かく分割して採取し

た。また、気象露場において降雨量を転倒マス式雨量計（池田計器製作所、RT-1、1 転倒 0.1mm）で観測した。採水地点の周辺にあるスギ 17 本の平均胸高直径は 430 mm であった。樹幹流を採取したスギは胸高直径が 280 mm であり、樹冠投影図より求めた樹冠占有面積は 13.3 m² であった。降雨と樹冠通過雨は直径 200 mm のポリプロピレンの漏斗で集め、200 mL ごとにポリ瓶で採水した。ポリ瓶の容量である 200 ml を漏斗の断面積 70650 mm² で除して水頭にすると 3.5 mm である。樹幹流は幹にウレタンマットを巻いて集め、500 mL ごとにポリ瓶に採水した。容量 500 mL は上述の樹冠占有面積で除して水頭にすると 0.038 mm である。

ボトルに採取された水の採水時刻を決定するために、同じ林分において過去に決定された、降雨量 (P) と樹冠通過雨量 (T) または樹幹流量 (S) との関係式 (14) を用いた。この関係式は 1990 年～1995 年にかけて観測された測定値 (9) をもとにしている。

$$T=0.891P-0.801 \quad (1)$$

$$S=0.081P-0.629 \quad (2)$$

この関係式より気象露場で観測した降雨量から樹冠通過雨量および樹幹流量を求め、計算による樹冠通過雨または樹幹流の発生時からの累積水量とボトルの貯留量とを対応させて採取時刻を決めた。

採取した水の溶存無機イオン濃度 (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+}) と酸素と水素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, δD) を分析した (8)。

3. 対象降雨の特性

解析の対象とした降雨の特徴を表-1 に示した。2000 年 6 月から 2001 年 1 月までの観測期間中に総降雨量 0.5 mm 以上の降雨は 60 回あった。ただし、降雨と降雨の間が 5 h 以上開いた場合を 1 降雨とした。このうち降雨、樹冠通過雨および樹幹流をすべてセットで採水した降雨は 6 回であった。さらにこのうち、水の安定同位体比はすべて分析したが、溶存無機イオン濃度については表-1 に示した 3 回のみであった。

表-1. 対象降雨の特徴

Table 1 Characteristics of the target rainfall events in 2000

年月日	総雨量	継続時間	降雨強度	
			max	ave.
2000 年	mm	h	mmh ⁻¹	mmh ⁻¹
7/25-26	31.7	24.5	4.2	1.3
10/20-21	32.3	12.7	4.4	2.5
10/28-29	22.0	21.3	2.7	1.0

III 結果と考察

1. 降雨の溶存無機イオン濃度と林地への供給量

対象降雨の平均溶存無機イオン濃度および林地への平均供給量を、表-2 に示すとともに、図-1 にレーダーグラフで示した。溶存無機イオン濃度はアニオンとカチオンともに降雨、樹冠通過雨、樹幹流の順で高くなるが、林地への供給量は樹冠通過雨が最も多かった。本試験地は海からの距離が 7 km と近いため、降水の Cl^- と Na^+ の濃度は海塩粒子の影響を受けていると考えられた (2)。アニオンは降雨、樹冠通過雨および樹幹流すべてが相似に近い三角形のレーダーグラフで示された。カチオンは降雨では Na^+ の濃度および供給量が相対的に高いが、樹冠通過雨と樹幹流では K^+ と Ca^{2+} の濃度および供給量も高くなり、樹体からの溶脱があることを示していた。

表-2. 対象降雨の平均溶存無機イオン濃度と供給量

Table 2 Mean dissolved inorganic ion concentrations and flux in the target rainfall events

	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}
平均溶存無機イオン濃度 mgL ⁻¹							
降雨	0.4	0.3	1.3	0.3	0.1	1.4	0.0
樹冠通過雨	3.8	3.2	4.5	2.1	1.7	2.1	0.4
樹幹流	9.2	16.1	21.2	2.2	4.2	4.2	1.3
平均供給量 kgm ⁻²							
降雨	0.4	0.3	1.0	0.3	0.1	1.2	0.0
樹冠通過雨	2.8	2.3	3.3	1.5	1.3	1.5	0.3
樹幹流	0.5	0.9	1.1	0.1	0.2	0.2	0.1

2. 溶存無機イオン濃度と水の安定同位体比の時間変化

以降は 7 月 25 日の降雨について示す。雨は 7 月 25 日の 19:00 より降り始めたが、樹冠通過雨は降雨開始より 2 時間遅れて 21:00 より、樹幹流は降雨開始より 10 時間遅れて 7 月 26 日 5:00 より発生した (図-2)。降雨の最初のサンプルは、その前に降った雨が混じったため対象外とした。また、樹幹流は流量が多く、7 月 26 日 7 時以降の樹幹流は 5 L のタンクにまとめて貯留した。

降雨と樹冠通過雨の塩化物イオン濃度が、降雨の降り始めから緩やかに減少しているのに対し、樹幹流では樹幹流の発生時に高く、急激に減少した (図-2)。他の溶存無機イオン成分も同様に变化した (図-3)。

図-3 に示した、1 降雨中の溶存無機イオン濃度の変化をもとに Kazda (5) と Levia *et al.* (10) の方法を使用し、乾性降下物による供給量と溶脱量を分離した。この方法は樹幹流の 1 降雨中の溶存無機イオン濃度の時間変

化を指数関数で近似して、降雨の終了時にかけて一定値となった部分を、降雨に元々含まれていた成分に溶脱を合わせた分として、指数関数的に減少している部分から差し引き、残りを乾性降水物量とする方法である (5)。分離した結果を成分ごとに時間変化として示した (図-4)。この結果、乾性降水物量と溶脱量を分離でき、乾性降水物が流出し終わるタイミングを明らかにできた。

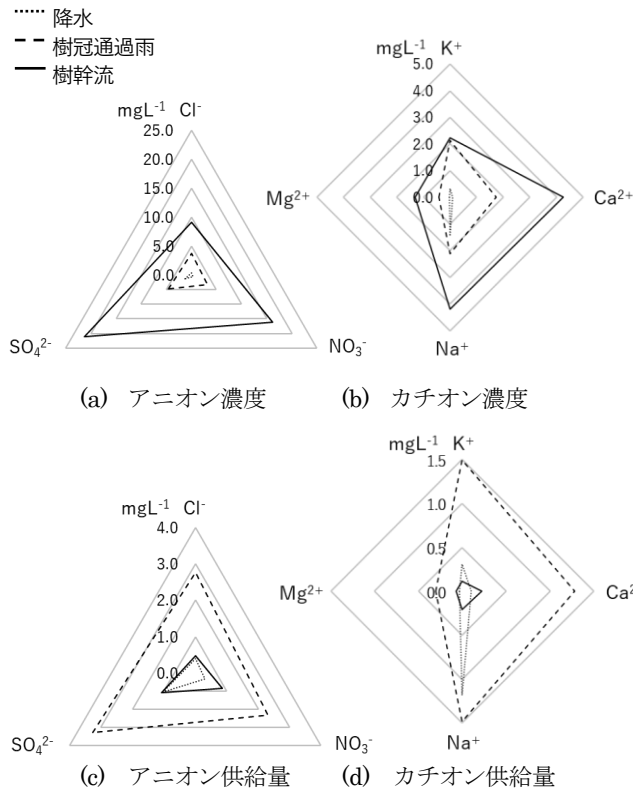


図-1. 対象降雨の平均溶存無機イオン濃度 (a, b) と平均供給量 (c, d)

Fig. 1 Mean dissolved inorganic ion concentrations (a, b) and mean flux (c, d) in the target rainfall events.

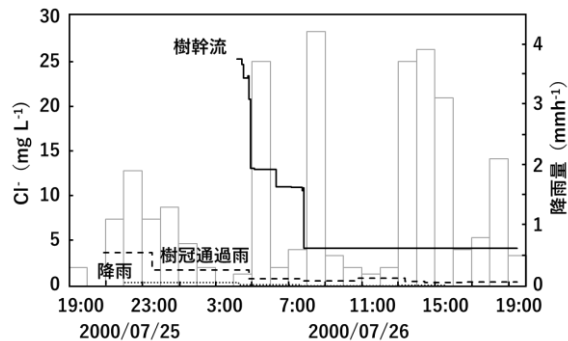


図-2. 降雨中の降雨、樹冠通過雨および樹幹流の塩化物イオン濃度の時間変化

Fig. 2 Intra-storm trends of chloride ion concentration in rainfall, throughfall, and stemflow

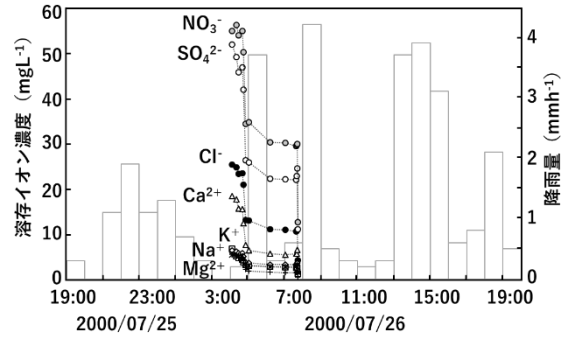


図-3. 降雨中の樹幹流の溶存無機イオン濃度の時間変化

Fig. 3 Intra-storm trends of dissolved inorganic ion concentrations in stemflow

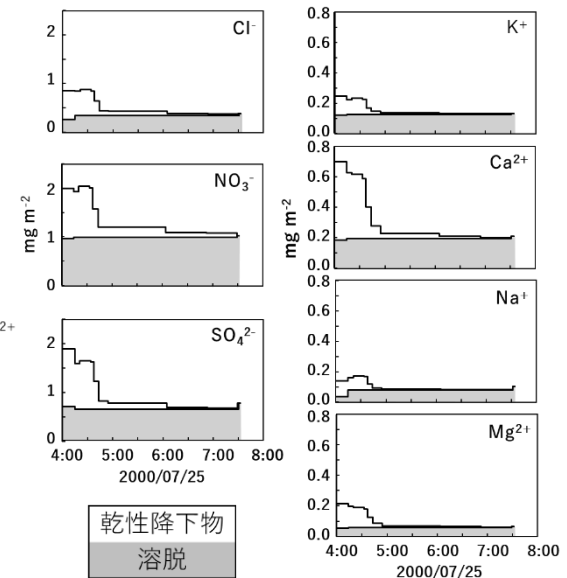


図-4. 乾性降水物量と溶脱量の時間変化

Fig. 4 Intra-storm trends of dry deposition washoff and leaching flux

次に、降雨の安定同位体比の時間変化については、酸素と水素安定同位体比の間に線形的な関係があるため (1)、酸素同位体比についてのみ示した (図-5)。降雨の同位体比は、降雨の降り始めで高く、降り終わりにかけて低くなった。降雨開始時では樹冠通過雨の酸素同位体比は降雨よりも高く、樹幹流の同位体比はさらに高かった。そして、降雨の後半では樹冠通過雨と樹幹流の酸素同位体比は降雨のそれと同じくらいの値となった。樹幹流発生時に樹幹流の同位体比が高いのは、樹幹流は樹冠通過雨よりも発生までに時間がかかっていることから、樹幹流が発生するまでに、樹冠や樹幹に貯留された降雨が蒸発を受けたためと考えられる。そして、7月26日7時以

降、樹幹流の同位体比は減少しているが、これは乾性降水物の洗い出しが終了したと考えられる時刻とほぼ一致しており(図-4)、幹が十分湿って定常的に水が流下するようになったためではないかと考えられる。このことから、一旦、樹幹流が発生すると樹冠で集められた水が、貯留されず蒸発されることなく速やかに流下すると考えられた。

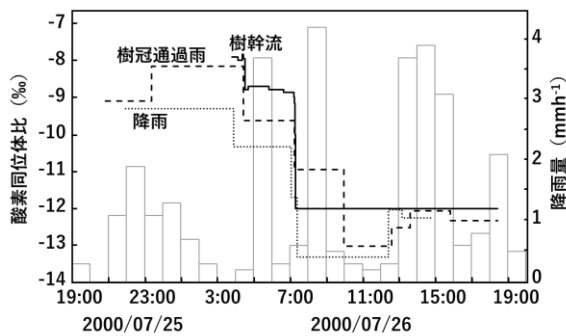


図-5. 降雨中の樹幹流の酸素同位体比の時間変化
Fig.5 Intra-storm trends of oxygen-18 isotope composition in stemflow

IV まとめ

1 降雨中の樹幹流を細かく採水して調べることにより、林内への乾性降水物による供給量と溶脱による供給量を精度よく分離できる可能性を明らかにできた。また、樹幹流の安定同位体比からは、樹幹流の発生機構を明確にできる可能性が示された。このように、樹幹流を1降雨中に高時間分解能で測定することは、樹幹流の役割をより明確にするために必要である。

引用文献

- (1) Craig, H. (1961) Isotope variations in meteoric waters. *Science* 133 : 1702-1703
- (2) 藤本浩平 (1997) 樹幹流および林内雨に溶存する海塩由来物質に関する研究. 高知大学農学部演習林報告 24 : 148-185
- (3) Ikawa, R., Yamamoto, T., Shimada, J., and Shimizu, T. (2011) Temporal variations of isotopic compositions in gross rainfall, throughfall, and stemflow under a Japanese cedar forest during a typhoon event. *Hydrological Research Letters* 5 : 32-36
- (4) 岩坪五郎 (1975) 森林生態系での植物養分物質の循環 : そこでの雨水のはたす役割について. 京都大学博士論文 : 48pp
- (5) Kazda, M. (1990) Sequential stemflow, sampling for estimation of dry deposition and crown leaching in beech stands.

In : Harrison, A. F., Ineson, P., and Heal, O. W.(Eds), *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*. Elsevier, New York, pp. 46-55

(6) Kendall, C. and Caldwell, E. A. (1998) *Fundamentals of isotope geochemistry*. In : Kendall, C. and McDonnell, J. J. (Eds), *Isotope tracers in catchment hydrology*. Elsevier, The Netherlands, pp. 51-86

(7) 小林檜樹・中川吉弘・玉木元則・平木隆年・正賀充 (1995) 森林樹冠への酸性沈着の影響評価—乾性沈着と溶脱の分離評価法の検討—. *環境科学会誌* : 8(1) : 25-34

(8) Kubota, T., and Tsuboyama, Y. (2003) Intra- and inter-storm oxygen-18 and deuterium variations of rain, throughfall, and stemflow, and two-component hydrograph separation in a small forested catchment in Japan. *Journal of Forest Research* 8 : 179-190

(9) 村上茂樹・坪山良夫・志水俊夫・藤枝基久・野口正二 (1996) 樹冠遮断量の観測とモデル計算との比較. *水文・水資源学会誌* 9 : 31-37

(10) Levia, D. F., Van Stan, J. T., Siebert, C. M., Inamdar, S. P., Mitchell, M. J., Mage S. M. and McHale, P. J. (2011) Atmospheric deposition and corresponding variability of stemflow chemistry across temporal scales in a mid-Atlantic broadleaved deciduous forest. *Atmospheric Environment* 45 : 3046-3054

(11) Levia, D. F., and Germer, S. (2015) A review of stemflow generation dynamics and stemflow environment interactions in forests and shrublands. *Review of Geophysics* 53 : 673-714

(12) 酒井正治 (1997) 森林土壌の酸性度に及ぼす降水の影響. *環境技術* 26(10) : 43-47

(13) 佐々木重行 (2005) 数種の落葉広葉樹とスギの幼齢林分における乾性沈着量と溶脱量について. *森林立地* 47(1) : 1-7

(14) 坪山良夫・久保田多余子・野口正二・村上茂樹・志水俊夫・藤枝基久・細田育弘 (1999) 集水規模と林齢の異なる森林流域間における流出特性と溶存無機イオン濃度及び酸素安定同位体比の比較. *水文・水資源学会 1999年研究発表要旨集* : 19-26

(15) 田中延亮・藏治浩一郎・白木克繁・鈴木祐紀・鈴木雅一・太田猛彦・鈴木誠 (2005) 袋山沢試験地流域のスギ・ヒノキ壮齢林における樹冠通過雨量、樹幹流量、樹冠遮断量. *東京大学農学部演習林報告年研究発表要旨集* : 19-26