

研究資料 Research Notes

コナラ林流域における降水, 林内雨, 土壌水, 地下水, 河床間隙水,
及び河川水の栄養塩濃度遠藤祐子¹・佐野貴洋¹・林 文音¹・芳賀弘和^{1*}Nutrient concentrations of precipitation, throughfall, soil water, groundwater,
hyporheic water and stream water in a konara oak (*Quercus serrata*) forestYuko Endo¹, Takahiro Sano¹, Ayane Hayashi¹ and Hirokazu Haga^{1*}¹ 鳥取大学農学部生物資源環境学科 (〒680-8553 鳥取市湖山南 4-101)Department of Biological resource and environment, Faculty of Agriculture, Tottori University,
Tottori, 680-8553, Japan

* E-mail: haga@muses.tottori-u.ac.jp

要 旨

中国山地中央部に位置する鳥取大学・蒜山の森のコナラ林流域において, 降水, 林内雨, 土壌水, 地下水, 河床間隙水, 及び河川水の濃度分布を調べた. 2010年4月から2012年8月まで間に, 月に1~5回の頻度でこれらの水を採取し, 窒素とリンの濃度を分析した. 中央値に着目すると, 溶存態窒素の濃度は, 降水 (0.39~0.59 mg/l) よりも林内雨 (0.60~0.67 mg/l) はわずかに高く, 土壌水 (1.92~2.93 mg/l) はさらに高かったのに対し, 地下水 (0.13~0.07 mg/l), 河床間隙水 (0.23~0.31 mg/l), 及び河川水 (0.20 mg/l) は低かった. 溶存態リンの濃度は, 降水 (0.003~0.004 mg/l) よりも林内雨 (0.015~0.039 mg/l) で顕著に高かったのに対し, 土壌水 (0.002 mg/l), 地下水 (0.001~0.002 mg/l), 河床間隙水 (0.001 mg/l), 及び河川水 (0.002 mg/l) で低かった. 懸濁態の濃度については, 窒素もリンも林内雨で高く, 河川水で低かった. 全窒素と全リンについては, いずれも降水 (全窒素: 0.47~1.08, 全リン: 0.007~0.019 mg/l) よりも河川水 (全窒素: 0.27, 全リン: 0.006 mg/l) の方が低かった. これらの結果は, 当該地域の物質循環や水環境の研究にとって重要なバックグラウンドデータとなりうる.

キーワード: 窒素, リン, 降水, 河川水, 森林流域, 濃度分布, 蒜山の森, 中国山地

I . はじめに

従来から, 流域の水資源や水環境の形成に果たす森林の役割が注目されている (例えば, 谷, 2007; 大手, 2007; 恩田, 2008). しかし, その役割を定量化することは難しく, 水資源管理や水環境保全の実務面において森林に関連するデータは不十分である場合が多い. 例えば, 閉鎖性水域の富栄養化問題を検討する際には森林から流出する栄養塩の負荷量を評価することが重要であるが, 水質総量規制制度や湖沼水質保全特別措置法で指定される海域や湖沼であっても, 上流域の森林において降水や河川水に含まれる栄養塩の濃度が年

間を通じて把握されていることはほとんどない (水環境学会, 2012).

鳥取大学・蒜山の森は, 岡山県の北部にあり中国山地中部の豪雪地帯に位置している. 中国山地中部を源流域とする河川には, 瀬戸内海へ流れ込む旭川 (岡山県) や日本海に流れ込む日野川 (鳥取県) や斐伊川 (島根県) がある. このうち旭川と斐伊川は, それぞれ児島湾, 中海・宍道湖といった富栄養化の問題を抱える水域に流入する. したがって, 蒜山の森における降水や河川水の栄養塩濃度のデータは, これらの水域に対する森林からの流出負荷量を評価する際に参考になると思われる.

また, 近年中国山地ではナラ枯れの被害が顕在化

しており、今後コナラが優先する蒜山の森の広葉樹林流域にその被害が出た場合には、流域での水・物質循環過程が大きく変化すると考えられる。すなわち、降水の条件が同じであっても、林内雨、土壌水、地下水、あるいは河床間隙水等の流域内部の水の条件が変化することにより、河川水の量や質が変化すると考えられる。この点においても、蒜山の森において、降水や河川水の栄養塩濃度のデータを蓄積しておくことには重要な意味がある。

以上を踏まえ、蒜山の森のコナラ林流域において、水の流出過程に着目して採取した水試料について、その栄養塩濃度を分析した結果を報告する。具体的には、約2年半の間に採取した降水、林内雨、土壌水、地下水、河床間隙水、及び河川水の窒素とリンについて、溶存態と懸濁態を区別して濃度分布を整理した結果を示す。

II. 調査地

調査は、鳥取大学・蒜山の森の第22林班に設定されている水文試験流域で行った(芳賀ら, 2011)。流域面積は5.9ha、流域の地質は大山凝灰角礫岩層で、土壌は黒色火山灰土である(田中ら, 1981)。植生は林床がチマキザサに覆われたコナラ林である。流域の下流部右岸側の一部については、ヒノキ人工林(約30年生)となっている。2009年の植生調査によると(芳賀, 2011)、コナラの樹高は8~18m、胸高直径は15~60cm、立木密度は800本/haであった。チマキザサの稈長は1~1.5m、地際直径は0.4~1.2cm、稈密度は15~44本/m²であった。また、地形測量によると、流域内を流れる河川は流域の中央部に端を発し、流路長227m、流路の高低差は30.9m、流路勾配は10.2%、平均流路幅は1.0mであった。

III. 方法

1. 採水地点、及び採水方法

森林流域において斜面に降った雨が河川に流出してくるまでの過程では、あるいは流域末端に達するまでの過程では、植生、土壌、岩盤、河床堆積物に代表されるような流域を構成するコンパートメントに一旦取り込まれることになる。コンパートメント内では、水は様々な生物地球化学的作用を受けながら、その内部に保持されたり、コンパートメント間を移動したり、あるいは流出したりする。この点を考慮し、今回は各コンパートメントの

水として、降水、林内雨、斜面末端における土壌水と地下水、流路内における河床間隙水、及び流域末端の河川水を分析対象とした。

降水は、降雨(2か所)と積雪表面の雪(1か所)を対象とした。まず、降雨は、尾根部と谷部においてそれぞれポリタンクとポリビンを地上高1mに設置して採水した(ridge rain waterとvalley rain water; 図1)。尾根部では、採水期間は2010年7月1日から2012年8月1日までであり、採水は月に1回の頻度で行った。ただし、2010年12月から2011年3月まではタンクが雪に埋まっており、この間は降雨と雪が混在した1つの試料となった。谷部では、採水期間は2011年4月15日から2012年8月1日までであった。採水は、積雪の無い時期に2週間に1回の頻度で行った。ただし、2週間間隔で採り始めたのは2011年7月19日からであり、それ以前は調査中に降雨があった時のみ数時間分の雨を採水した。また、2011年12月14日から2012年4月26日の試料は、降雨と雪が混在した1つの試料となった。次いで、積雪表面の雪については、1か所(surface snow)で採取した。

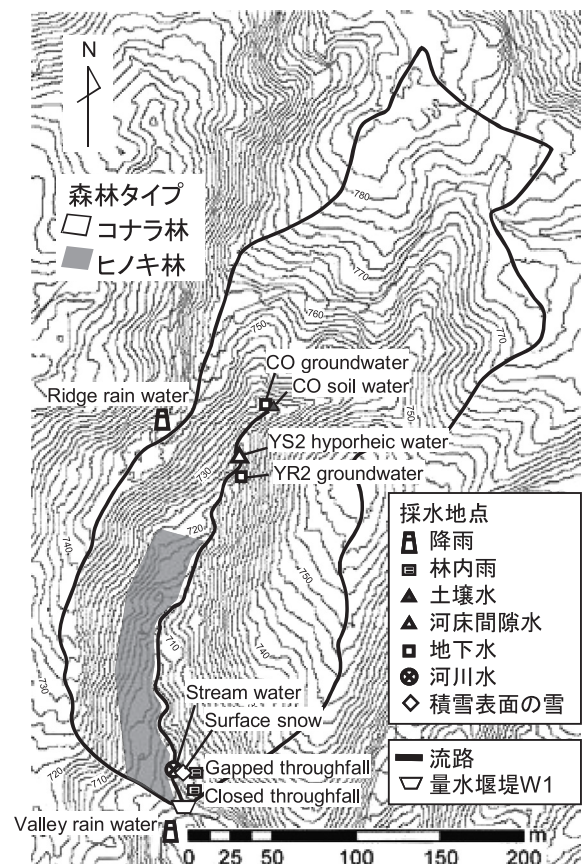


図1 調査地の地形と採水地点の位置
地形図は、長澤・大木場(2011)を参照した。
等高線の間隔は2mである。

ポリビンで表面の雪をすくって、500 ml 用ポリビン数本分の雪を採取した。雪の採取は、調査中に初めて積雪を観測した日から完全に積雪がなくなるまでの期間に、1 週間に 1 度の間隔で行った。

林内雨は、それぞれ林冠がギャップとなっている地点と林冠が閉鎖している地点の 2 カ所で採取した (gapped throughfall と closed throughfall)。いずれも下層植生のチマキザサの下にロート付きのポリタンクを設置して採水した。採水期間は 2011 年 6 月 29 日から 2012 年 8 月 16 日までであった。採水は、積雪の無い時期に 2 週間に 1 回の頻度で行った。2011 年 12 月 14 日から 2012 年 4 月 26 日の雪解けまでの試料については、降雨と雪が混在した 1 つの試料となった。

土壌水は、流域中央部の斜面下端 (CO soil water) の深さ 10cm と 50cm において、それぞれテンションライシメータ (DIK-8390-11, 大起理化学工業) を 2 本 (#1 と #2) 設置し、個別にシリンジで約 3 時間吸引することにより採取した。採水期間は、2011 年 6 月 3 日から 2012 年 8 月 16 日までであった。採水は、積雪の無い時期に 2 週間に 1 回の頻度で行うとともに、降雪のある時期に 1 回だけ (2011 年 12 月 14 日) 行った。

地下水は、斜面下端の 2 カ所 (CO groundwater と YR2 groundwater) において、それぞれ深さ 1.6 m, 0.8 m で採取した。採水期間は、2011 年 4 月 28 日から 2012 年 8 月 16 日までであった。採水は主に積雪の無い時期に、2 週間に 1 回の頻度で行った。ただし、2012 年 2 月 16 日から 2012 年 4 月 26 日までは、積雪のある時期にも 1 週間間隔で採水を行った。

河床間隙水は、流路の中央部の 1 カ所 (YS2 hyporheic water) の深さ 10 cm において、テンションライシメータ (DIK-8390-11, 大起理化学工業) を 2 本 (#1 と #2) 設置し、個別にシリンジで約 3 時間吸引することにより採取した。採水期間は、2011 年 6 月 3 日から 2012 年 8 月 16 日までであった。採水は、積雪の無い時期に 2 週間に 1 回の頻度で行った。

河川水は、流域下端にある量水堰堤 W1 の堆砂地の直上部 (stream water) において採取した。河床の土砂を巻き上げないように注意しながら、流水をポリビンで採取した。採水期間は、2010 年 4 月 19 日から 2012 年 8 月 16 日までであった。採水は週に 1 回、主に無降雨時に行った。なお、2010 年 12 月 24 日から 2011 年 2 月 23 日の期間については、採水できなかった。

2. 濾過, 及び濃度分析

採取した水の試料は、実験室に持ち帰った後、分析項目に応じてすぐに濾過し、分析まで冷蔵庫 (6°C 未満) で保存した。分析項目は、全窒素 (TN)、溶存態窒素 (DN)、懸濁態窒素 (PN)、全リン (TP)、溶存態窒素 (DP)、懸濁態窒素 (PP) とした。

(1) TN, DN, PN 濃度

TN については、試料にアルカリ性ペルオキシ二硫酸カリウム溶液を加えて窒素化合物を硝酸イオンに酸化分解した後、硝酸イオンによる紫外部の吸収を測定して濃度を求める紫外吸光度法 (工場排水試験法 JIS K 0102 45.2) を用いることとした。まず、試料と検量線用のスタンダードをテフロンビンに入れて用意し、その中に水、水酸化ナトリウム、ペルオキシ二硫酸カリウムを 100 : 4 : 3 の割合で調合した分解液を注入した。それらをオートクレーブで加熱分解 (121°C で 30 分間) した後、1+16 塩酸 (水 16 : 塩酸 1) を加えて pH を 2 ~ 3 に調整した。最後に、分光光度計 (U1900, HITACHI) を用いて、波長 220 nm の吸光度を測定し、検量線に基づいて試料の濃度を求めた。DN については、粒子保持能 0.7 μm の濾紙 (GF/F, Whatman) で濾過後、TN と同様の方法を適用した。PN は、TN から DN を引くことによって算出した。

(2) TP, DP, PP 濃度

TP については、試料をペルオキシ二硫酸カリウム分解法 (工場排水試験法 JIS K 0102 46.3.1) でリン化合物をリン酸イオンに分解後、モリブデン青 (アスコルビン酸還元) 吸光度法 (工場排水試験法 JIS K 0102 46.1.1) を用いることとした。青色に呈色した試料の吸光度は、波長 880nm で測定した。まず、試料と検量線用のスタンダードをねじ口試験管に入れて用意し、その中に水とペルオキシ二硫酸カリウムを 100 : 4 の割合で調合した分解液を注入した。それらをオートクレーブで加熱分解 (121°C で 30 分間) した後、モリブデン酸アンモニウム (七モリブデン酸六アンモニウム四水和物、酒石酸アンチモニルカリウム、2 + 1 硫酸、及びスルファミン酸アンモニウムを調合したもの) とアスコルビン酸を混合して作成した発色試薬を注入した。なお、オートクレーブから取り出した際に試料に色が付いていた場合には、活性炭粉末を加えて一旦濾過し、色を取り除いてから発色試薬を加えることとした (実際に使用したのは 2011 年 8 月 1 日に採水した河床間隙水の 1 試料のみ)。その後、発色に必要な時間 (20 分間) をおいて、分光光度計 (U1900, HITACHI) を用いて、波長 880nm の吸光度を測定し、検量線

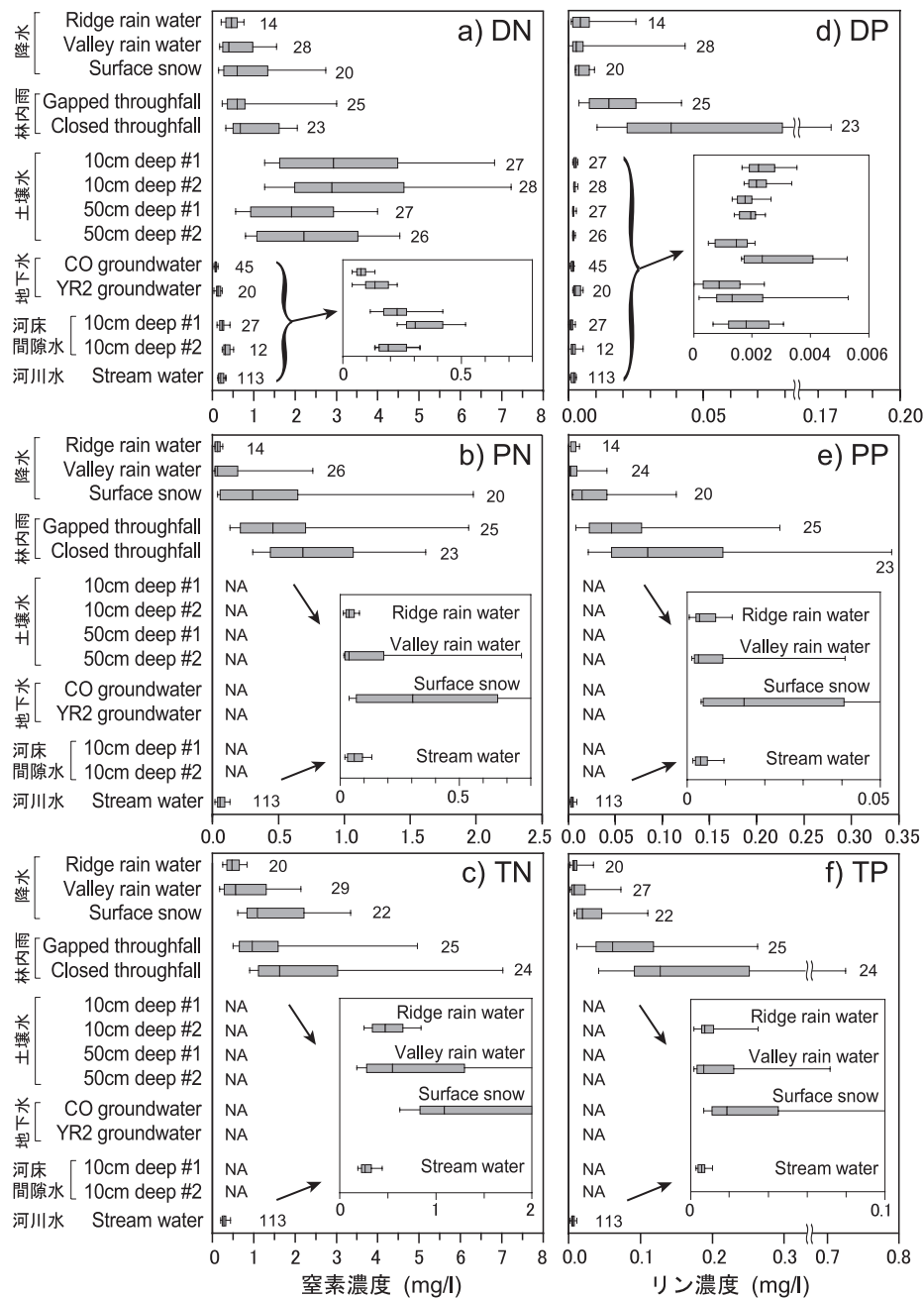


図2 降水、林内雨、土壌水、地下水、河床間隙水、及び河川水の窒素とリンの濃度
箱ヒゲは、10, 25, 50 (中央値), 75, 90 パーセントイルを示している。箱ヒゲの右横の数字はサンプル数を示している。NA は分析の対象でないことを意味している。

に基づいて試料の濃度を求めた。DP については、粒子保持能 $0.7 \mu\text{m}$ の濾紙 (GF/F, Whatman) で濾過後、TP と同様の方法を適用した。PP は、TP から DP を引くことによって算出した。

IV. 流域における栄養塩濃度の分布

DN と DP については、降水、林内雨、土壌水、地下水、及び河川水の全ての項目において分析値を

得た。しかし、TN, PN, TP, PP については、降水、林内雨、及び河川水のみで分析値を得た。これは、土壌水と地下水の採取において、それぞれテンションライシメータや塩ビパイプを介していたため、分析対象としなかったことによる。

DN 濃度の中央値に着目すると (図 2a), 降水 ($0.39 \sim 0.59 \text{ mg/l}$) よりも林内雨 ($0.60 \sim 0.67 \text{ mg/l}$) はわずかに高く、土壌水 ($1.92 \sim 2.93 \text{ mg/l}$) はさらに高かったのに対し、地下水 ($0.07 \sim 0.13$

mg/l), 河床間隙水 (0.23 ~ 0.31 mg/l), 及び河川水 (0.20 mg/l) は低かった。

PN 濃度については (図 2b), 降水 (0.04 mg/l; 積雪表面の雪を除く) と比較して, 林内雨 (0.47 ~ 0.70 mg/l) は顕著に高く, 河川水 (0.06 mg/l) は同程度であった。

TN 濃度についても同様に (図 2c), 降水 (0.47 ~ 0.55 mg/l; 雪を除く) と比較して, 林内雨 (0.95 ~ 1.64 mg/l) で顕著に高く, 河川水 (0.27 mg/l) で低かった。積雪表面の雪の PN と TN 濃度については (図 2b,c), 降雨と較べて高い傾向にあった。

DP 濃度については (図 2d), 降水 (0.003 ~ 0.004 mg/l) よりも林内雨 (0.015 ~ 0.039 mg/l) で顕著に高かったのに対し, 土壌水 (0.002 mg/l), 地下水 (0.001 ~ 0.002 mg/l), 河床間隙水 (0.001 mg/l), 及び河川水 (0.002 mg/l) で低かった。

PP 濃度については (図 2e), 降水 (0.003 mg/l; 雪を除く) と比較し, 林内雨 (0.046 ~ 0.085 mg/l) は顕著に高く, 河川水 (0.004 mg/l) は同程度であった。

TP 濃度についても同様に (図 2f), 降水 (0.007 mg/l; 雪を除く) と比較して, 林内雨 (0.061 ~ 0.128 mg/l) は顕著に高く, 河川水 (0.006 mg/l) は同程度であった。積雪表面の雪の PP と TP 濃度については (図 2e, f), 降雨と較べて高い傾向にあった。

各項目の DN 濃度の変動に着目すると (図 2a), 降水よりも河川水の変動幅はかなり小さかった。また河川水 DN 濃度の変動幅は地下水と河床間隙水のそれと同程度であった。これらは, DP 濃度についても同じであった (図 2d)。しかし, 土壌水の DN 濃度と DP 濃度の特徴は大きく異なっていた。すなわち, 土壌水は DN 濃度の変動幅が最大となる項目であったのに対し, DP 濃度のそれは最小となる項目であった。

V. おわりに

本研究では, 蒜山の森のコナラ林流域において, 降水, 林内雨, 土壌水, 地下水, 河床間隙水, 及び河川水の窒素とリンの濃度を分析し, その分布を整理した。その結果, 降水が樹冠や土壌を通過する際に, 大きな濃度変化が起こりうること, 及び河川水の濃度変動は降水のそれよりも小さいことが確認できた。これらの濃度形成には, 植生, 土壌, 岩盤における生物地球化学的な作用が強く関わっており, そのメカニズムの把握には, 水文学的な過程のみならず, 窒素とリンに対する土壌の吸着特性,

植生による吸収, 硝化や脱窒, 土壌の流亡と流路内での輸送等の過程が重要である。今回の報告では, これらの点については触れていないが, 箱ヒゲ図として示した栄養塩濃度データは, 中国山地中部の豪雪地帯に位置する森林流域のデータとして貴重であり, 当該地域での水環境や物質循環に関する調査や研究にとって参考になると思われる。ただし, 今回の河川水のデータには, 降雨に伴う出水時のデータがほとんど含まれていないことには注意が必要である。

謝 辞

サンプルの採取および分析では, 緑地防災学研究室の窪田哲蔵君, 古志野豪君, 伊原佳輝君に協力していただいた。蒜山の森のスタッフである松原研一さん, 小谷好正さん, 福富昭吾さん, 楨本小百合さん, 米田亜沙美さんには, 現地調査や宿舎利用に際して色々ご配慮いただいた。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- (1) 芳賀弘和 (2011) 広葉樹林流域における降雨流出と流路内の流れ. (広葉樹資源の管理と活用. 鳥取大学広葉樹研究刊行会編, 242pp, 海青社, 大津), 117-138.
- (2) 芳賀弘和・米原朱音・清水笑子・山中貴裕・辻本佳奈 (2011) 蒜山の森・W1 量水堰堤における水位-流量曲線. 広葉樹研究 14: 21-24.
- (3) 長澤良太・大木場紫 (2011) 高分解能衛星画像と航空機 LiDAR を用いた森林情報の抽出. (広葉樹資源の管理と活用. 鳥取大学広葉樹研究刊行会編, 242pp, 海青社, 大津), 191-208.
- (4) 日本水環境学会 (2012) 非特定汚染源からの流出負荷量の推計手法に関する研究. 平成 23 年度環境省環境研究総合推進費成果報告書, <http://www.hokosha.jp/beta/hitokutei/index.html> (日本水環境学会・ノンポイント汚染研究委員会 <http://jswe-nonpoint.com/index.html> からリンク)。
- (5) 大手信人 (2007) 良質の水の源としての森林. (森林の再発見. 太田誠一編, 京都大学学術出版会, 京都), 185-220.
- (6) 恩田裕一 (2008) 人工林荒廃と水・土砂流出の実態. 245pp, 岩波書店, 東京.
- (7) 田中一夫・奥村武信・井上 昌・下野 清 (1981)

- 広葉樹林における水源かん養機能に関する研究
(I). 鳥取大学農学部演習林報告 13: 37-48.
- (8) 谷誠 (2007) 水の循環における森林の役割. (森林の再発見. 太田誠一編, 京都大学学術出版会, 京都), 133-184.