

北海道演習林における濁度の異なる隣接した流域の 渓流水中の懸濁態窒素・リン濃度の比較

智和, 正明
九州大学大学院農学研究院環境農学部森林環境科学講座

中村, 琢磨
九州大学農学部附属演習林

<https://doi.org/10.15017/7344002>

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 106, pp.1-6, 2025-03-24. The Kyushu University Forests
バージョン：
権利関係：



北海道演習林における濁度の異なる隣接した流域の渓流水中の 懸濁態窒素・リン濃度の比較

智和 正明*¹, 中村 琢磨²

森林からの窒素・リン流出の計測において、懸濁態物質の測定は重要である可能性があるにもかかわらず、測定事例は限られている。そこで本研究では、北海道東部の森林域において、濁度が異なる2つの隣接した渓流水において、濁度、主要イオン成分、懸濁態を含めた窒素・リンの分析を行い、濁度の程度が懸濁態窒素・リン濃度に与える影響を評価した。また、時間（季節）変動を評価するために、季節毎に採取した。その結果、懸濁態窒素・リンが全窒素・全リンに占める割合は、濁度の低い渓流水（濁度平均 0.11FTU）ではそれぞれ 2.4%、1.9% と低かったが、濁度の高い渓流水（濁度平均 6.3FTU）ではそれぞれ 28%、68% と高かった。懸濁態窒素・リン濃度は濁度と正の相関がみられた。また、時間変動は溶存成分よりも懸濁成分のほうが大きい傾向にあった。これらの結果は、窒素・リンの流出量を計測する上で、懸濁態窒素やリンの計測を行う必要性はその河川水が有する濁度に依存し、懸濁態物質の流出量を見積もる際に必要な採水頻度は溶存態の流出量を計測する際に行う頻度よりも多く行う必要があることを示唆した。

キーワード：渓流水質；濁度；懸濁態成分；季節変動

Limited information is available on the particulate forms of nitrogen and phosphorus in runoff from forests. Nonetheless, assessment of particulate content may be crucial for accurately quantifying nitrogen and phosphorus runoff from forested areas. In this study, we examined turbidity, major ionic constituents, and particulate nitrogen and phosphorus in two adjacent streams with different turbidity levels within the Ashoro Research Forest and assessed how turbidity influences particulate nitrogen and phosphorus concentrations. To investigate seasonal variations, samples were collected at different times of the year. The results showed that in low turbidity stream water (mean turbidity 0.11 FTU), the proportions of particulate nitrogen and phosphorus relative to total nitrogen and phosphorus were low (2.4% and 1.9%, respectively), whereas in high turbidity stream water (mean turbidity 6.3 FTU), these proportions were substantially higher (28% and 68%, respectively). Concentrations of particulate nitrogen and phosphorus were positively associated with turbidity levels. Temporal variability was more pronounced for the suspended component than for the dissolved component. These results suggest that the need to measure particulate nitrogen and phosphorus concentrations is influenced by river water turbidity, and that a higher frequency of water sampling may be required to estimate particulate matter discharge compared to that required for dissolved matter discharge.

Key words: Stream water quality; turbidity; suspended matter; seasonal variation

1. はじめに

森林は水源涵養機能などの多面的機能を有しており、その機能評価を行うために様々な観測が行われている。例えば、水源かん養機能の一つである水質浄化機能によって雨水中に含まれる窒素やリンといった富栄養化物質が森林やその下の土壌に保持される。しかし、近年、人工林の管理放棄（武田 2002abc; Ide *et al.* 2009）や大気汚染による窒素循環の攪乱（Chiwa *et al.* 2019）などによる水質浄化機能の低下が懸念されている。このような背景から、世界中で多くの森林流域において物質収支観測が行われており（例えば Johnson *et al.* 2000）、国内でも渓流水質の長期観測が行われている（例えば, Nakahara *et al.* 2010; Chiwa *et al.* 2015; Sase *et al.* 2019; Chiwa 2021）。

これまで森林域における渓流水質の観測では溶存成分の計測が主体であり、懸濁態成分の観測が少なかった。これは、懸濁態に含まれる栄養元素は生物にすぐに利用されないために溶存態に比べて着目されることが少なかったためである（Schlesinger and Bernhardt 2020）。しかし、溶存態に匹敵する量が懸濁態として河川水中に含まれていること（例えば, Ca, Mg など）が報告されている（Martin and Meybeck 1979）。このため、森林流域における物質収支観測で必要な項目である物質流出量を正確に算出する上で、懸濁態物質の計測が重要である可能性がある。しかし、森林からの懸濁態物質の流出に関する報告例は限られている。森林の水質浄化機能を正確に評価するためには、このような懸濁態成分の情報も必要である。

Masaaki Chiwa, Takuma Nakamura. Comparison of suspended nitrogen and phosphorus concentrations in stream water from adjacent watersheds with different turbidity levels in Ashoro Research Forest

* 責任著者 (Corresponding author): Email. chiwa.masaaki.690@m.kyushu-u.ac.jp 〒 811-2415 福岡県糟屋郡篠栗町津波黒 394

1 九州大学大学院農学研究院環境農学部門森林環境科学講座

Division of Forest Environmental Science, Department of Agro-environmental Sciences, Faculty of Agriculture, Kyushu, University

2 九州大学農学部附属演習林

University Forest, School of Agriculture, Kyushu University

そこで本研究は、懸濁態物質の計測の重要性を評価するために、北海道東部に位置する森林域（足寄町の九州大学北海道演習林内約 3711ha）において、濁度の異なる渓流水において、渓流水中の懸濁態物質を含めた化学種を分析した。具体的には、1) 全窒素や全リン、溶存態全窒素、溶存態全リンを分析し、2) 時間変動（季節変動）を評価するために、2014 年 6 月から 2015 年 4 月の夏・秋・冬・春にかけて 2 地点の最上流域で渓流水を採取した。本研究では、濁度の高い渓流水では懸濁態濃度が高く、懸濁態が全物質（溶存態＋懸濁態）に占める割合が上昇し、懸濁態物質の計測を行う必要性が高まるといふ仮説を設定した。さらに、懸濁態物質は水文学的な要因によって時間変動が大きく、より多くの頻度で採水する必要性が高まるといふ仮説を設定した。

2. 方法

2.1. 調査地

調査は北海道足寄町に位置する九州大学農学部附属演習林北海道演習林（以下北海道演習林）の森林域（N 43.272, E 143.505 標高 280 m）で行った。足寄町における年平均降水量と年平均気温は 1979 年から 2018 年でそれぞれ 821mm【最低 505mm（1984 年）、最高 1169mm（2016 年）】、5.9° C【最低 4.7° C（2001 年）、最高 7.2° C（2015 年）】である（智和・中村, 2020）。本調査地では、積雪が例年 11 月～4 月に観測されている。大気窒素沈着量は 2009 年から 2018 年で 4.4 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ であり、国内の中で比較的低い値が観測されている（Chiwa 2020）。

北海道演習林では森林面積の約 3 分の 1 をカラマツ（*Larix kaempferi*）などの針葉樹人工林が占め、残りはミズナラ（*Quercus crispula*）を中心にオオバボダイジュ（*Tilia maximowicziana*）、エゾイタヤ（*Acer pictum subsp. mono*）、アサダ（*Ostrya japonica*）などが混生する冷温帯落葉広葉樹林が優占している。また、林床は大半がミヤコザサ（*Sasa nipponica*）（高さ約 50cm）で覆われている。森林の多くは二次林であるものの、急傾斜地や奥地には比較的自然性の高い林分が残されており継続的に森林動態の調査が行われている（中村ら, 2017）。森林土壌はほとんどがムル型で、南上部のみがモル型である。土壌 pH（H₂O）、全窒素、炭素 / 窒素（C/N）比はそれぞれ 4.8–6.3、0.8–1.3%、12–20 で（Hishi et al., 2014）、凝灰岩と頁岩の層の上に厚く（数十

メートル）火山灰が堆積している（智和ら, 2007）。

2.2. 試料の採取と分析

渓流水の採水は、5 林班の森林の最上流部である A 地点と B 地点で採水を行った（図 1）。両地点の流域は、ミズナラが優占している天然性林である。A 地点の沢はおおむね北西に伸び、B の沢は北東を向いており、採水地点の傾斜は 2 度である。採水は低水時に行い、2014 年から 2015 年にかけて各季節【夏（6–7 月）、秋（10–11 月）、冬（1–2 月）、春（4 月）】に、1 週間～1 ヶ月の間隔で季節ごとに 3 回（年合計 12 回）行った。分析項目は濁度、pH、主要イオン成分（Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺）、全窒素（TN）、溶存態全窒素（DTN）、全リン（TP）、溶存態全リン（DTP）、リン酸（PO₄³⁻）、ケイ酸（SiO₂）である。濁度の計測には濁度計（HI93703-C, ハンナ インスツルメンツ・ジャパン）、pH の計測にはガラス電極（F-21, 堀場製作所）を用いた。試料のろ過は蒸留水で前洗浄されたガラス繊維フィルター（GF/F, ワットマン, GE Healthcare）を用いて行い、陰イオン（Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻）、陽イオン（Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺）を測定した。なお、亜硝酸イオン（NO₂⁻）は検出されなかった。陰イオン・陽イオン成分の分析にはイオンクロマトグラフ（DX-120, 日本ダイオネクス）を用いた。全窒素（TN）、溶存態全窒素（DTN）、全リン（TP）、溶存態全リン（DTP）、溶存無機態リン（DIP）、ケイ酸（SiO₂）の分析は、分光光度計（U-5100, 日立ハイテクサイエンス）を用いて比色定量した。TN, DTN, TP, DTP の分析を行うために、試料にペルオキシ二硫酸カリウム溶液を加えたのち、オートクレーブを用いて 120° C で 45 分間加熱し、酸化分解した。ろ過試料は分析を行うまで冷蔵保存し、TN, TP 分析のための未ろ過試料は冷凍保存した。

NO₃⁻, NH₄⁺, TN, DTN を計測することにより、懸濁態窒素（PTN）、溶存有機態窒素（DON）をそれぞれ以下の式から求めた。

$$PTN = TN - DTN$$

$$DON = DTN - (NO_3^- + NH_4^+)$$

さらに TP, DTP, PO₄³⁻ を計測することにより、懸濁態リン（PTP）、溶存有機態リン（DOP）をそれぞれ以下の式から求めた。

$$PTP = TP - DTP$$

$$DOP = DTP - PO_4^{3-}$$

3. 結果と考察

3.1. 渓流水中の濁度

濁度は、B 地点よりも A 地点で顕著に高い傾向が年中みられた（表 1）。両流域は隣接しており、どちらもミズナラが優占した天然性林である。濁度が B 地点と比べて A 地点で高い理由は現段階では不明であるが、攪乱と水文学的なプロセスによって土壌侵食が起りやすくなり、懸濁態が上昇している可能性が考えられる。その原因を明らかにするためには、攪乱と水文学的なプロセスに関する今後の詳細な研究が必要である。

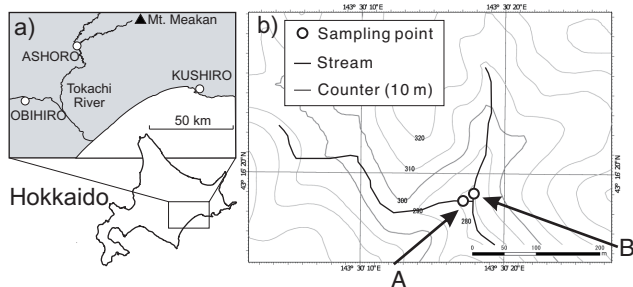


図1a) 研究対象地域とb) 採水地点
Fig. 1 a) Study area and b) Sampling points.

3.2. 渓流水中の窒素成分

人間活動によって生じる大気窒素沈着量の増加は森林生態系の窒素循環を攪乱し (Aber *et al.* 1989), その結果, 渓流水中の NO_3^- 濃度を上昇させることが報告されてきた (Vitousek *et al.* 1997; Chiwa *et al.* 2019)。これまで森林流域からの窒素流出に関しては, 溶存無機態窒素 (DIN), と

りわけ硝酸塩 (NO_3^-) が着目され, その流出経路や輸送機構に関する理解を深めてきた (Hill 1993; Burns *et al.* 1998; Creed and Band 1998; McHale *et al.* 2002; Schiff *et al.* 2002; Inamdar and Mitchell 2006)。本研究では, アンモニウムイオン (NH_4^+) 濃度は検出限界以下であった。これは NH_4^+ が負に帯電した土壤コロイドに吸着されているためと思われる。

PTN の分析を行ったところ, PTN は, 濁度の高い渓流水において, 重要な窒素成分であった。PTN は濁度の高い溪流 (A 地点) において TN の 28% を占めていた (図 2a, 表 1)。PTN は溪流沿いの鉱質土壌から流出する粒子状物質を起源として濃度が上昇する (Ide *et al.* 2007; Lee *et al.* 2016; Lewis 2002)。森林流域における渓流水中の PTN の分析例 (Lewis 2002; Vanderbilt *et al.* 2003; Ide *et al.* 2007) は少ない

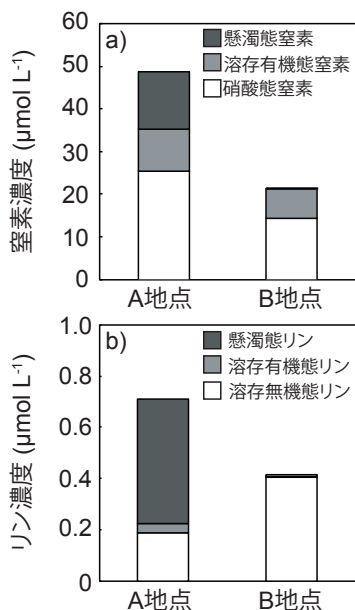


図2 渓流水中のa) 窒素成分, b) リン成分の内訳。2014年から2015年にかけて採水した平均値を示している。

Fig. 2 Components of a) nitrogen and b) phosphorus in stream water. Average values of water collected between 2014 and 2015 were shown.

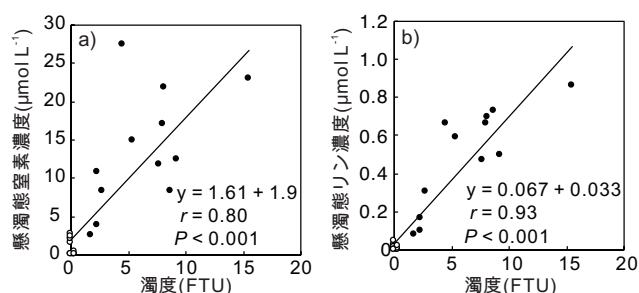


図3 濁度とa) 懸濁態窒素濃度, b) 懸濁態リン濃度との関係。黒丸はA地点, 白丸はB地点を示している。

Fig. 3 Relationships between turbidity (FTU) and particle total nitrogen (PTN) (a) and particle total phosphorus (PTP) (b) concentrations. Black and white circles show the sites A and B, respectively.

表1 A地点, B地点における渓流水中化学成分の季節間変動 (採水地点については図1参照)
Table 1 Seasonal variation in chemical species in stream water collected in site A and B (see Fig. 1 for sampling location).

地点	季節	濁度	全窒素 (TN)	溶存態窒素 (DTN)	懸濁態窒素 (PTN)	溶存有機態窒素 (DON)	全リン (TP)	溶存態リン (DTP)	溶存無機態リン (DIP)	懸濁態リン (PTP)	溶存有機態リン (DOP)
		FTU					$\mu\text{mol/L}$				
A地点	夏 (n=3)	6.0	58.7	37.4	21.3	11.3	0.95	0.31	0.29	0.65	0.02
	秋 (n=3)	2.2	41.7	34.7	7.1	11.2	0.33	0.17	0.11	0.16	0.06
	冬 (n=3)	8.8	46.2	34.6	11.6	5.8	0.77	0.18	0.14	0.59	0.04
	春 (n=3)	8.3	48.0	34.3	13.7	10.7	0.78	0.24	0.21	0.54	0.03
	平均	6.3	48.7	35.2	13.4	9.7	0.71	0.23	0.19	0.49	0.03
	CV (%)	47	15	4	44	27	37	27	41	45	49
B地点	夏 (n=3)	0.01	22.3	25.6	0.5	12.0	0.43	0.41	0.41	0.02	0.00
	秋 (n=3)	0.08	23.4	23.1	0.7	8.7	0.44	0.43	0.39	0.01	0.03
	冬 (n=3)	0.28	14.3	14.8	0.1	0.4	0.40	0.40	0.41	0.00	0.00
	春 (n=3)	0.08	21.3	21.4	0.8	6.7	0.40	0.39	0.42	0.00	0.00
	平均	0.11	20.3	21.2	0.5	6.9	0.42	0.41	0.41	0.01	0.01
	CV (%)	100	20	22	55	70	5	3	3	109	219
地点	季節	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SiO ₂
							$\mu\text{mol/L}$				
A地点	夏 (n=3)	7.0	55.2	26.1	19.7	274.4	DL	84.3	18.0	36.9	763
	秋 (n=3)	7.2	52.4	23.5	20.4	285.4	DL	76.7	18.5	35.3	753
	冬 (n=3)	6.9	53.9	28.8	16.6	259.9	DL	87.4	21.3	40.7	755
	春 (n=3)	7.1	48.0	23.7	17.3	237.6	DL	82.8	11.2	17.7	723
	平均	7.1	52.4	25.5	18.5	264.3	—	82.8	17.2	32.7	748
	CV (%)	1.6	6.0	9.7	9.9	7.8	—	5.4	24.7	31.3	2.4
B地点	夏 (n=3)	7.1	41.6	13.6	16.7	254.2	DL	82.9	14.8	29.3	867
	秋 (n=3)	7.2	42.1	14.5	18.9	259.1	DL	76.6	13.7	21.2	851
	冬 (n=3)	6.9	39.9	14.5	18.0	228.7	DL	87.3	16.2	23.4	856
	春 (n=3)	7.2	38.8	14.8	17.9	220.2	DL	83.7	12.1	19.8	838
	平均	7.1	40.6	14.3	17.9	240.6	—	82.6	14.2	23.4	853
	CV (%)	2	4	4	5	8	—	5	12	18	1

DL: 検出限界以下

が、本研究は濁度の高い渓流水において、渓流水中の窒素流出量を正確に見積もるためには PTN の分析を行う必要があることを示している。一方で、濁度の低い渓流水では、PTN の寄与は小さく（図 2a, 表 1）、2.4% であった。このことは、濁度の低い渓流水では PTN の分析の必要性は低いことを示している。

懸濁態物質濃度の指標である濁度は、PTN が渓流水中の窒素成分に大きな割合を占めるかどうかを判断する上で重要な情報となりうる。本研究では、濁度が高い渓流水で PTN 濃度が高く（図 2a）、濁度と PTN 濃度との間には正の相関関係がみられた（図 3a, $P < 0.001$ ）。道南部に位置する河川水中の懸濁態を含めた窒素・リン濃度と懸濁物質濃度（SS）を計測した水垣ら（2015）も懸濁物質濃度と懸濁態窒素、懸濁態リンとに強い正の相関関係を報告している。

なお、DON は濁度の程度に関わらず、両溪流（A 地点、B 地点）においてそれぞれ TN の 20、34% を占めていた（図 3a）。このことは、濁度の高い A 地点の方が B 地点の方が DON が TN に占める割合は低いものの、渓流水中に含まれる TN に対する DON の寄与は両地点とも無視できないことを示している。渓流水中において DON は窒素の構成成分として重要であり（Campbell *et al.* 2000; McHale *et al.* 2000; Willett *et al.* 2004; Vanderbilt *et al.* 2003）、主要成分にもなりうる（Hedin *et al.* 1995; Perakis and Hedin 2002）。

3.3. 渓流水中のリン成分

リン成分についても窒素の場合と同様、濁度の高い溪流（A 地点）で PTP 濃度が高く（図 2b）、PTP が TP 占める割合は 68% であり、PTP が TP の主要成分であった。同様な結果が Li *et al.*（2015）でも得られており、TP に対する PTP の割合は 65% と報告している。彼らはそのような高い割合が生じるのはほとんどのリンが土壌浸食によって輸送されているためとしている（Li *et al.* 2015）。リン酸は鉄（Fe）、カルシウム（Ca）、アルミニウム（Al）といった金属元素と強い親和性があることから、リン酸は土壌と結合した形態を示すことが知られている（Mainstone and Parr 2002）。三上ら（2001）は日本の攪乱されていない森林においては、DTP が渓流水中の TP の主要形態であることを報告している。一方で、土壌侵食が起りやすい森林では PTP が高濃度で流出することが報告されている（Ide *et al.* 2007; 井手ら 2008; Ide *et al.* 2009）。橘（1993）も攪乱の小さい流域においては DTP が TP の主要形態であったのに対して、攪乱された流域では PTP が主要形態であったことを報告している。同様な結果がハーバードブルック試験林においても報告されている（Yanai 1998）。本研究においても PTP は濁度の高い渓流水中の TP の構成成分において重要であることが示された。一方で、窒素の場合と同様、濁度の低い地点（B 地点）では、PTP の寄与は小さく（図 2b, 表 1）、1.9% であり、リン流出量を正確に見積もるために PTP を計測する必要性は低いことを示している。

窒素の場合と同様、濁度と PTP 濃度との間に正の相関関係がみられた（図 3b）。他の報告例でも濁度と PTP に強

い正の相関関係が報告されている（水垣ら 2015; Ide *et al.* 2007）。このことから、渓流水のリン成分のうち PTP が懸濁物質に与える影響は大きいと考えられた。

3.4. 季節変動

表 1 に A 地点、B 地点における化学種の季節変動（季節間の変動係数）を示す。季節変動が小さい（A、B 地点両方とも変動係数 10% 未満）化学種は pH、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、K⁺、SiO₂ であった。季節変動が大きい化学種（A、B 地点両方とも変動係数 10% 以上）は、濁度、Mg²⁺、Ca²⁺、TN、PTN、DON、PTP、DOP であった。これらのことから、季節変動は概ね溶存成分で小さく、懸濁態物質で大きい傾向を示すことが分かった。このことから、懸濁態物質の流出量を見積もる際に必要な採水頻度は溶存態の流出量を計測する際に行う頻度よりも多く行う必要があることがわかった。

4. 結論

本研究では、北海道道東部の落葉広葉樹林流域（九州大学北海道演習林）において、濁度の高い渓流水では懸濁態濃度が高く、懸濁態が全物質（溶存態＋懸濁態）に占める割合が上昇し、懸濁態物質の計測を行う必要性が高まることや、懸濁態物質は水文学的な要因によって時間変動が大きく、より多くの頻度で採水する必要性が高まるという仮説を検証するために、1) 窒素やリンの懸濁態成分と有機態成分を分析し、2) 時間（季節）変動や 3) 空間（地点間）変動を評価した。その結果、1) 懸濁態成分の割合は濁度が高い渓流水で大きかった。DON の寄与は濁度の程度に関わらず大きかったが、DOP の寄与は小さかった。2) 時間変動については、懸濁態成分の割合が高い化学種で変動が大きい傾向にあった。

謝辞

本研究の一部は、九州大学 3 演習林共通課題プロジェクト（水質モニタリング）および文部科学省科学研究費補助金（JP17H03833, JP20K21338, JP22H02386, 22H02386）の助成を受けて行われた。

引用文献

- Aber JD, Nadelhoffer KJ, Steudler P, Melillo JM (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *Biosci* 39: 378–386
- Burns DA, Murdoch PS, Lawrence GB, Michel RL (1998) Effect of groundwater springs on NO₃⁻ concentrations during summer in Catskill Mountains streams. *Water Resource Res* 34: 1987–1996
- Campbell JL, Hornbeck JW, McDowell WH, Buso DC, Shanley JB, Likens GE (2000) Dissolved organic nitrogen budgets for upland, forested ecosystems in New England. *Biogeochem* 49: 123–142
- Chiwa M (2020) Ten-year determination of atmospheric phosphorus deposition at three forested sites in Japan. *Atmos*

Env 223: 117247

- Chiwa M (2021) Long-term changes in atmospheric nitrogen deposition and stream water nitrate leaching from forested watersheds in western Japan. *Environ Pollut* 287: 117634
- Chiwa M, Inoue S, Tashiro N, Ohgi D, Uehara Y, Shibata H, Kume A (2015) Assessing the role of forests in mitigating eutrophication downstream of pasture during spring snowmelt. *Hydrol Processes* 29: 615–623
- Chiwa M, Tateno R, Hishi T, Shibata H (2019) Nitrate leaching from Japanese temperate forest ecosystems in response to elevated atmospheric N deposition. *J For Res* 24: 1–15
- 智和正明・井手淳一郎・扇大輔・田代直明・古賀信也・柴田英昭・佐藤冬樹・大槻恭一 (2007) 北海道演習林及び福岡演習林における降水、渓流水中の化学成分の特徴. 九州大学農学部演習林報告 88: 33–43
- 智和正明・中村琢磨 (2020) 九州大学北海道演習林の異なる斜面方位における気温、積雪深、地温の経時変化. 九州大学農学部演習林報告 101: 7–11
- Creed IF, Band LE (1998) Export of nitrogen from catchments within a temperate forest: Evidence for a unifying mechanism regulated by variable source area dynamics. *Water Resour Res* 34: 3105–3120
- Hedin LO, Armesto JJ, Johnson AH (1995) Patterns of nutrient loss from unpolluted, old-growth temperate forests - Evaluation of biogeochemical theory. *Ecology* 76: 493–509
- Hill AR (1993) Nitrogen dynamics of storm runoff in the riparian zone of a forested watershed. *Biogeochem* 20: 19–44
- Hishi T, Urakawa R, Tashiro N, Maeda Y, Shibata H (2014) Seasonality of factors controlling N mineralization rates among slope positions and aspects in cool-temperate deciduous natural forests and larch plantations. *Biol Fertil Soil* 50: 343–356
- Ide J, Kume T, Wakiyama Y, Higashi N, Chiwa M, Otsuki K (2009) Estimation of annual suspended sediment yield from a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantation considering antecedent rainfalls. *For Ecol Manag* 257: 1955–1965
- Ide J, Nagafuchi O, Chiwa M, Kume A, Otsuki K, Ogawa S (2007) Effects of discharge level on the load of dissolved and particulate components of stream nitrogen and phosphorus from a small afforested watershed of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*). *J For Res* 12: 45–56
- 井手淳一郎・智和正明・大槻恭一 (2008) 出水時における河川水中リン濃度上昇を考慮したヒノキ人工林流域におけるリン収支. 水文・水資源学会誌 21: 205–214
- Inamdar SP, Mitchell MJ (2006) Hydrologic and topographic controls on storm-event exports of dissolved organic carbon (DOC) and nitrate across catchment scales. *Water Resour Res* 42: W03421
- Johnson CE, Driscoll CT, Siccama TG, Likens GE (2000) Element fluxes and landscape position in a northern hardwood forest watershed ecosystem. *Ecosyst* 3: 159–184
- 国土地理院 (2019) 基盤地図情報ダウンロードサービス. URL: <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> 2020 年 12 月 23 日参照
- Lee M-H, Payeur-Poirier J-L, Park J-H, Matzner E (2016) Variability in runoff fluxes of dissolved and particulate carbon and nitrogen from two watersheds of different tree species during intense storm events. *Biogeosci* 13: 5421–5432.
- Lewis WM (2002) Yield of nitrogen from minimally disturbed watersheds of the United States. *Biogeochem* 57: 375–385
- Li Z, Zhang G, Yu X, Liu Q, Zhang XC (2015) Phosphorus loss and its estimation in a small watershed of the Yimeng mountainous area, China. *Environ Earth Sci* 73: 1205–1216
- Mainstone CP, Parr W (2002) Phosphorus in river - ecology and management. *Sci Total Environ* 282-283: 25–47
- Martin JM, Meybeck M (1979) Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Mar Chem* 7: 173–206.
- McHale MR, McDonnell JJ, Mitchell MJ, Cirimo CP (2002) A field-based study of soil water and groundwater nitrate release in an Adirondack forested watershed. *Water Resour Res* 38: 1031
- McHale MR, Mitchell MJ, McDonnell JJ, Cirimo CP (2000) Nitrogen solutes in an Adirondack forested watershed: Importance of dissolved organic nitrogen. *Biogeochem* 48: 165–184
- 三上一・坂崎俊璽・工藤幾代・野澤久志・神穀統・今俊夫・前田寿哉 (2001) 十和田湖の負荷量調査 (1999-2000 年). 国立環境研究所研究報告 167: 1–14
- 水垣 滋・杉原 幸・大橋 正・平井 康・浜本 聡 (2015) 出水時の存在形態別栄養塩濃度の推定法. 水文・水資源学会研究発表会要旨集 28: 100088
- Nakahara O, Takahashi M, Sase H, Yamada T, Matsuda K, Ohizumi T, *et al.* (2010) Soil and stream water acidification in a forested catchment in central Japan. *Biogeochem* 97: 141–158
- Perakis SS, Hedin LO (2002) Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds. *Nature* 415: 416–419
- Sase H, Takahashi M, Matsuda K, Sato K, Tanikawa T, Yamashita N, *et al.* (2019) Response of river water chemistry to changing atmospheric environment and sulfur dynamics in a forested catchment in central Japan. *Biogeochem* 142: 357–74
- Schiff SL, Devito KJ, Elgood RJ, McCrindle PM, Spoelstra J, Dillon P (2002) Two adjacent forested catchments: Dramatically different NO₃- exports, *Water Resources Research* 38: 1292
- Schlesinger WH, Bernhardt ES (2020) *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change 4th edn*, Elsevier, New York.

- 橘 治国 (1993) 森林河川における栄養塩の流出と懸濁物質の役割, 水環境学会誌, 16: 450–456
- 武田育郎 (2002a) 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 (I). 水利科学 46: 1–22
- 武田育郎 (2002c) 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 (III). 水利科学 46: 63–84
- 武田育郎 (2002b) 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 46: 47–71
- Vanderbilt KL, Lajtha K, Swanson FJ (2003) Biogeochemistry of unpolluted forested watersheds in the Oregon Cascades: temporal patterns of precipitation and stream nitrogen fluxes. Biogeochem 62: 87–117
- Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW, Likens GE, Matson PA, Schindler DW, *et al.* (1997) Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. Ecol Appl 7: 737–750
- Willett VB, Reynolds BA, Stevens PA, Ormerod SJ, Jones DL (2004) Dissolved organic nitrogen regulation in freshwaters. J Environ Qual 33: 201–209
- Yanai RD (1998) The effect of whole-tree harvest on phosphorus cycling in a northern hardwood forest. For Ecol Manag 104: 281–295