

矢作川上流の森林河川における溶存有機・無機窒素の年間流出負荷量の把握

Estimation of Annual Dissolved Organic Nitrogen and Dissolved Inorganic Nitrogen Load in Upper Stream of Yahagi River

江端一徳・松本嘉孝

Kazunori EBATA and Yoshitaka MATSUMOTO

要約

愛知県豊田市の矢作川上流に位置する御内流域において、2019年から2021年の3年間、自動採水器を用いた日毎の採水を行い、DONおよびDINの季節による濃度変化ならびにL-Q法による年間流出負荷量の算出を行った。DON濃度は年間を通じて季節変動が少なく、8月に最大、10月に最小となった。一方、DIN濃度は9月に最大、4月に最小となり、季節変動が見られた。また、DONおよびDINの年間流出負荷量は、降水量が最も多い2020年にそれぞれ $0.49 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $0.81 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と最大値となった。DONとDINの流出負荷量は流量の増加とともに増加しており、降雨による流量の増加がDONとDINの河川への流出を促進していることが示唆された。

キーワード：森林流域、溶存有機窒素、溶存無機窒素、年間流出負荷量

1. はじめに

これまで森林生態系の物質循環に及ぼす伐採や酸性降下物の影響を把握するため、森林集水域での降水や河川水の水質に関する研究が西欧諸国を中心に行われている(Likens et al., 1977; 堤, 1987)。中でも窒素は、樹木の成長に必要な不可欠な栄養元素であり、森林生態系において、樹木の成長の制限要因になっていると言われている(Vitousek and Reiners, 1975)。一方で、化石燃料の燃焼や、化学肥料の生産に伴う窒素降下物の増大が懸念されており(Aber et al., 1989)、窒素降下物として生態系に供給される窒素が、生態系が利用する量を超えると、余剰の窒素は溶脱して河川へと流出する。特に、森林から高濃度の硝酸態窒素が河川へと流出する窒素飽和(Aber et al., 1998)と呼ばれる現象が1980年代後半から欧米で注目され、日本でも大都市近郊で発生が確認されている(長谷川・小葉竹, 2006; 木平ら, 2006; 青井, 2010)。

森林河川での硝酸態窒素濃度の上昇による硝酸態窒素流出量の増大は、水源水質の悪化、湖沼や内湾といった閉鎖性水域の富栄養化を引き起こすと考えられる。今後、窒素飽和が進行すると下流の河川・湖沼等への窒素流入量の増加につながり、更なる水質悪化が進むと予想される。わが国において都市近郊の森林域の窒素飽和が

顕在化していることが明らかとなっているものの、それらは濃度での評価にとどまっており、それに続く河川や湖沼等の流入水域への溶存窒素の年間流出量の推定まで行っている研究例が乏しいのが実情である。さらに、窒素流出の形態を考えた場合、欧米では溶存有機窒素(Dissolved Organic Nitrogen: DON)が、硝酸態窒素を中心とした溶存無機窒素(Dissolved Inorganic Nitrogen: DIN)より多く、窒素流出の大部分を占めることが報告されており(Goodale et al., 2000; Campbell et al., 2000)、DON流出負荷量を無視することができない。DONは落葉や落枝に含まれる有機態窒素が溶存した形でDINと同様に土壌表層に多く分布しており(柴田ら, 2010)、土壌中の無機化によりアンモニア態窒素となり、さらに硝化を受けて硝酸態窒素へと形態を変化させる。それゆえ、窒素飽和現象を考えた場合、硝酸態窒素の起源であるDONを含めて河川への窒素流出を考慮する必要があると考えられる。ただ、日本でのDON流出負荷量に着目すると、DIN流出負荷量を算出した結果(例えば、辻ら, 2013; 篠宮ら, 2014; 長坂ら, 2015)と比較して、観測例はほとんどなく、山田ら(1998)が、北海道の石狩川水系の森林河川を対象に6月から10月の5ヶ月間で平水時と出水時の日平均流出負荷量を算出した結果があるほか、DINも含めて年間DON流出負荷量を推定した結果については、小柳

ら (2002) が、スギ・ヒノキの人工林流域において観測しているのみである。

近年、大陸からの大気降下物の越境汚染が確認されており (宮廻ら, 2014), 現在, 窒素飽和となっていない都市郊外や奥山での森林河川においても, 窒素流出量が増大することが考えられる。また, 戦後に植林された国内の人工林で材齢 60 年前後の成熟林の割合が増加し, 森林の窒素吸収量が低下しているとの指摘がある (林野庁, 2004)。本研究の対象地は, 大都市圏である名古屋市が近く, 2021 年時点で材齢が 60 年生のスギ・ヒノキ人工林であることから, 現状での窒素流出量をモニタリングし, 把握しておくことは, 将来的な窒素汚染を評価する上での基礎資料となることから大変意義が大きい。

以上のことを踏まえ, 本研究では, 矢作川上流の森林河川における溶存窒素流出量の把握・評価することを目的に調査を行った。

2. 方法

2-1 調査地

調査は, 愛知県豊田市北東部に位置する御内流域 (図 1) で行った。御内流域は, 豊田市御内町の神越川源流域にあり, 流域面積は 2.04 km^2 である。標高は 657 m から 1126 m で, 植生は, スギ (*Chamaecyparis obtusa*), ヒノキ (*Cryptomeria japonica*) の人工林, 基岩は, 河川右岸側は花崗岩, 左岸側は泥質片岩, 河川部は変成チャートとなっている (松本・江端, 2020)。

2-2 水文観測

河川水位は流域末端にある砂防堰堤の直上に, 水位計 (HM-500, Field Pro) を設置し, 10 分インターバルで連続観測した。また, 2, 3 週間に一回の頻度で調査地に赴いた際に, 河川流量を測定した。流量は, 砂防堰堤上の横断方向 1 m おきに水位を測定し, 断面積を求め, さらに, 水位測定の間地点で水面から水深の 6 割の位置で電磁流速計 (VE-30, ケネック) による流速を測定

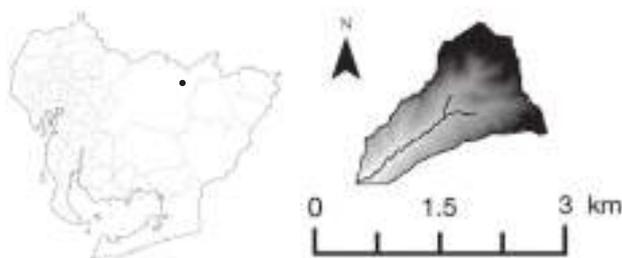


図 1 御内流域の場所および流域界

した。最終的に, 得られた断面積と流速を掛け, 足し合わせ, 実測の河川流量を求めた。そして, 水位計の水位と実測の河川流量との関係から水位・流量曲線を作成し, 河川流量の算出を行った。また, 降水量は, 河川近傍に雨量計 (Rain Collector II, Davis Instruments) を設置し, 水位と同様に 10 分おきに観測を行った。流出率は, 河川流量を年間降水量で割ることで算出した。

2-3 分析方法

河川水は自動採水器 (6712 Portable Samplers, TELEDYNE ISCO) を河川左岸に置き, 毎日 1 L ほど, 定時に採水を行い, それを 2, 3 週間に一回の調査時に回収した。採水期間は 2019 年 1 月より 2021 年 7 月までで, 冬季は採水チューブの凍結により, 採水できない日もあった。採水した水試料は, 実験室に持ち帰り, $0.45 \mu\text{m}$ のガラス繊維ろ紙 (Whatman GF/F) で吸引ろ過し, 分析まで冷蔵庫で保存した。

全溶存窒素 (TDN: Total Dissolved Nitrogen) 濃度は, 全有機炭素計 (TOC and TN analyser, Analytik Jena multi N/C 3100) を用いて測定した。また, イオンクロマトグラフィー (ICS-1100, Thermo Fisher Scientific) により硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$), 亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$), アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) を測定し, それらの合計を溶存無機窒素 (DIN: Dissolved Inorganic Nitrogen) 濃度とした。各形態別窒素の検出限界として全溶存窒素は, 0.05 mg/L , 硝酸態窒素と亜硝酸態窒素が 0.03 mg/L , アンモニア態窒素が 0.04 mg/L であった。なお, 本研究で分析したサンプルの溶存無機窒素のほとんどが硝酸態窒素であり, 亜硝酸態窒素は検出されなかった。そして, 溶存有機窒素 (DON: Dissolved Organic Nitrogen) 濃度は TDN と DIN の差分により求めた。

DON および DIN 流出負荷量は, まず採水時の DON 濃度, DIN 濃度と河川流量を掛け合わせ流出負荷量を算出し, 算出した DON および DIN 流出負荷量と河川流量との関係式 (L-Q 式) を導出した。そして, 得られた L-Q 式に河川流量を入力することで, 日毎の DON と DIN 流出負荷量をそれぞれ求めた (田淵・林, 1987)。

3. 結果および考察

3-1 御内流域における水文結果

図 2 は, 2019 年から 2021 年における日降水量と日流量の時間変化を示している。各年 6 月から 9 月は雨が多

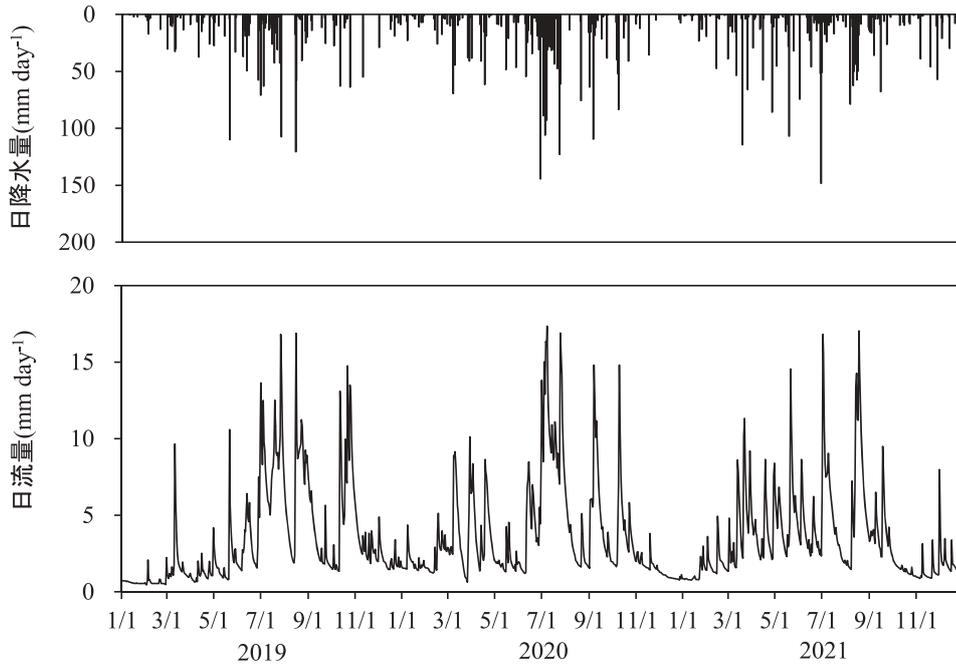


図2 2019年から2021年の日降水量と日流量の時間変化

く、日降水量が100 mmを超える日が毎年見られ、2021年7月2日は148.5 mmを記録した。また、年間降水量は、2019年が1996 mm、2020年が2660 mm、2021年は2515 mmであった。

各年の流量は、1月から2月に値が低く、6月から10月は、梅雨や台風出水による降水量の増大に合わせて流量が大きく変動している。年最大日流量は、どの年も8月ないし9月に発生し、2019年から2021年において、それぞれ16.9 mm、17.3 mm、17.0 mmであった。

そして、各年の降水量と流量の関係より流出率を計算すると、2019年が53.7%、2020年が43.7%、2021年が42.9%と平均して46.8%であった。

また、松本・江端(2020)の同一流域での水文結果と比較すると、降水量は2019年がこれまでの観測期間において最も小さく、2020年と2021年は2016年から2018年の3年間での平均降水量よりも大きい結果となった。また、気温は、3年間の平均気温が10.9°Cで、これまでの観測結果と同様に3月から気温上昇が始まり、8月に最大となり、冬季にかけて気温が低下した。一方、流量については、これまでの観測結果と同様に3月から10月までは比較的流量も多く、それ以外の期間は少ないという傾向は同じであった。さらに、流出率については、降水量の少なかった2019年が最も高く、2020年と2021年は、これまでの結果よりも小さい結果となった。以上のことから、本試験流域は、春季から秋季にかけて梅雨や台風による降水量が多く、流量が高く

維持されるアジアモンスーン域の特徴を有した水文環境を有しているといえる。

3-2 御内流域におけるDONおよびDIN濃度の季節変化

図3は2019年から2021年のDON濃度とDIN濃度を示している。3年間の観測期間において、DON濃度は、0.01 mg L⁻¹から0.19 mg L⁻¹の範囲で変動し、最大値は2020年8月23日に記録した。また、同様にDIN濃度は、0.03 mg L⁻¹から0.24 mg L⁻¹の範囲で変動し、2019年9月23日に最大値を記録した。そして、3年間のDONおよびDIN濃度の平均値は、それぞれ、0.03から0.05 mg L⁻¹、0.05から0.10 mg L⁻¹となった(表1)。小柳ら(2002)が、群馬県にあるスギ・ヒノキの人工林で年間を通じた調査を行った結果、DON濃度は0.1 mg L⁻¹以下、NH₄-N濃度が0.1から0.5 mg L⁻¹、NO₃-N濃度が0.8から1.6 mg L⁻¹で変動したとしている。DON濃度については、最大値は、2019年を除いて文献値を超えたものの、平均値については、文献値を下回る結果となった。また、DIN濃度は、NH₄-N濃度だけでも文献値と同等か下回る結果となった。さらに、伊藤ら(2004)が関東・中部地方の森林流域のNO₃-N濃度を調べた結果、中部地方の中央値を0.9 mg L⁻¹、また、広瀬ら(1988)が、全国の34か所の森林流域で行ったNO₃-N濃度とNH₄-N濃度の平均値の合計は0.36 mg L⁻¹としており、いずれも本試験流域のDIN濃度の方が小さい結果となった。また、長坂(2020)は、

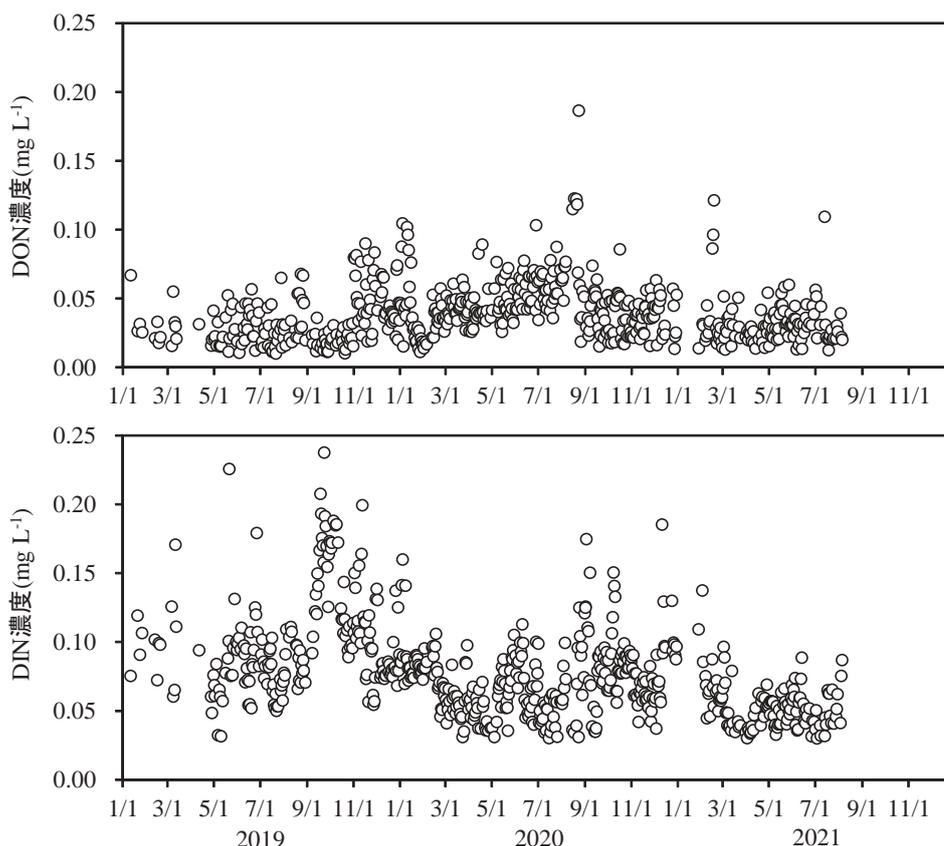


図3 2019年から2021年のDONとDIN濃度の経年変化

表1 観測期間におけるDONとDIN濃度の最小値・平均値・最大値のまとめ

	DON濃度(mg L ⁻¹)			DIN濃度(mg L ⁻¹)			n
	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	
2019	0.01	0.03	0.09	0.03	0.10	0.24	200
2020	0.01	0.05	0.19	0.03	0.07	0.19	312
2021	0.01	0.03	0.12	0.03	0.05	0.14	132

硝酸態窒素濃度が 1.0 mg L^{-1} を超える場合を窒素飽和と定義しており、この定義を用いると本試験流域では硝酸態窒素濃度が 1.0 mg L^{-1} より低く、窒素飽和とはなっていないと考えられた。

続いて、各年のDON濃度とDIN濃度の平均値を比較すると、どの年もDIN濃度の方がDON濃度よりも大きい結果となり、小柳ら(2002)と同様の結果が得られた。一方で、アメリカの森林流域では、Vanderbilt et al. (2003) や Perakis and Hedin (2007) の観測例が示すようにDON濃度がDIN濃度より高い結果となっており、日本とアメリカで、溶存窒素の流出形態が異なることがわかった。そして、各年のDON濃度とDIN濃度それぞれの最大値と最小値を比較するとDONは、2020年に16.6倍、DINは2019年に7.5倍と、DONの方がDINよりも最大値と最小値の差が大きい結果と

なった。DONの方がDINよりも濃度差が大きくなった理由として、本試験流域では、各年の平均DON濃度がDIN濃度よりも低く、DINがDONよりも溶存窒素の主要な形態として存在することに加え、降雨時の河川流量が多い期間でDON、DIN濃度どちらも同程度の最大値をとったためだと考えられた。

図4に月別のDON濃度とDIN濃度の箱ひげ図を示す。DON濃度の中央値は、年間を通じ明瞭な季節変化はみられず、ほぼ一定の濃度で推移した。また、最大値は1月に最大をとり2月に減少、その後3月から8月にかけて上昇する傾向がみられた。一方で、DIN濃度の中央値は、4月から濃度が上昇し、7月に一時的に濃度低下が見られるものの、9月に最大値をとった。その後、3月にかけて濃度が低下する傾向となった。DIN濃度が夏場に高くなる理由として、硝化を担う微生物活性の高い時期と夏場の降雨出水が多い時期に重なるため、河川水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が上昇すると指摘されている(徳地ら, 2011)。本試験流域でも4月から8月にかけて気温上昇が観測されていることに加え、6月から10月の流量増加による飽和帯の拡大が土壌表層部に高濃度で分布しているDINを河川へと押し流す(熊谷ら, 2000)ことでDIN濃度が高くなったと考えられた。

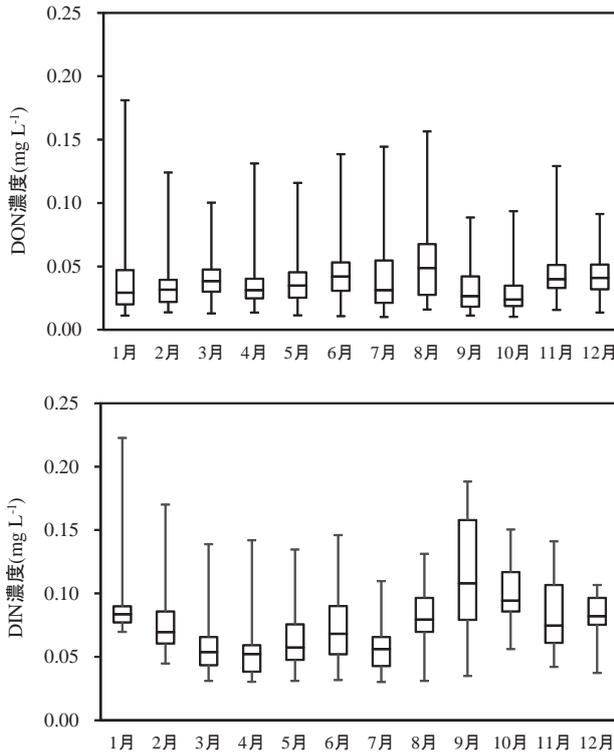


図4 月別のDONとDIN濃度の箱ひげ図（エラーバーは最大値、最小値を示し、箱の上部から75%値、中央値、25%値を示す）

3-3 御内流域におけるDONおよびDIN流出負荷量の季節変化と年間流出量の算出

日本の森林流域において、比較的簡単に物質の流出量を把握できることからL-Q式を適用し、窒素流出負荷量を把握している事例は多く、篠宮ら（2014）は、L-Q式の精度として適用した12の事例のうち8つの事例で決定係数は0.90以上であったと報告している。本試験流域におけるL-Q式の決定係数はそれぞれ0.67と0.61とデータ数が多いものの低い結果となった（図5）。ただ、相関係数が、0.82、0.78と0.7以上あることから両者には強い正の相関があるとみなし、流出負荷量を算出した。

図6に流量とDONとDINの月別流出負荷量を示す。DON流出負荷量は、2019年と2020年は7月に、2021年は8月に最大値をとった。そして、DIN流出負荷量は、各年ともDONと同様の月に最大値をとった。DON、DIN流出負荷量は年間を通して、流量が増大する夏場にかけて流出負荷量が増加し、流量が減少する冬季にかけて減少する傾向となった。年間DONおよびDIN流出負荷量を各年で比較すると、降水量が最も多かった2020年にDON・DIN流出負荷量それぞれ、 $0.49 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $0.81 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と最大値をとった。小柳ら（2002）の結果と比較すると、DON流出負荷量

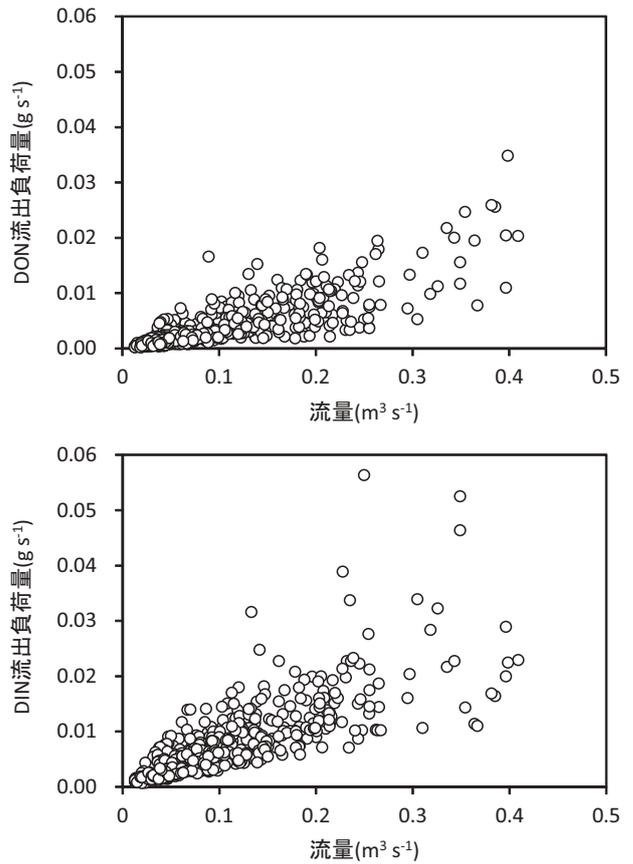


図5 流量とDON・DIN流出負荷量との関係

は $0.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 以下と、同様の結果となったが、DIN流出負荷量は、 $13.8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と、本試験流域との結果と大きく異なっていた。一方で、釣田ら（2009）は、九州北部の森林流域にてDIN流出負荷量を0.8から $2.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ としており、その最低値と本試験流域の最大値が同程度の結果となった。

次に、窒素形態別の流出負荷量の大きさを比較するため、DONとDIN流出負荷量を足し合わせたTDN流出負荷量におけるDON流出負荷量の割合を算出した結果、3年間の観測期間において、33.6%から34.7%と、平均して34.2%であった。北米の森林流域では、溪流からの流出窒素の45から50%がDONであると報告（Lewis et al., 1999; Binkley et al., 2004）があり、その結果と比較すると小さいが、年間の溶存窒素流出負荷量の4割近くをDONが占めていることから、窒素流出の収支を考えた場合、無視することができないといえる。

図7は、累加流量と累加DON・DIN流出負荷量の変化を示している。累加流量は、2020年が最大であり、1375 mmであった。次いで、2021年が1271 mm、2019年が1253 mmの順となった。また、2019年は、2020年や2021年と比較して7月まで緩やかに流量増加がみられ、7月の累加流量を比較すると2019年は302.4 mm、

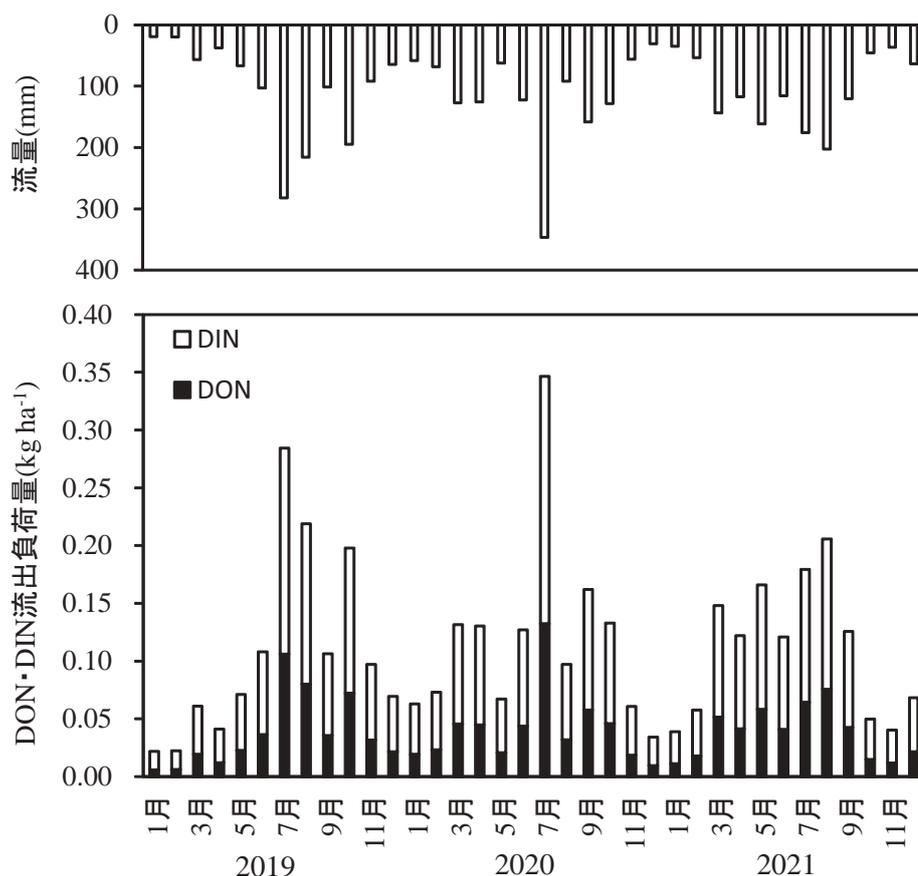


図6 流量とDON・DIN流出負荷量の月別変化

2020年と2021年は563.9 mm, 626.3 mmとそれぞれ、1.86倍、2.07倍と大きく異なった。ただ、7月以降は、降雨量の増大とともに流量が上昇した結果、最終的に2020年と同程度の累加流量となった。累加DON、DIN流出負荷量は、累加流量と同様の推移をとり、流量の増加に合わせて、流出負荷量も増大する結果となった。このことは、図4の結果と合わせて考えると、夏季のDON、DIN濃度が高い時期と流量増加に伴う地下水位の上昇が重なることで、土壌表層に蓄積したDONやDINが河川への流出を促していると考えられた。釣田ら(2009)は、DIN流出量が最大だった年は、流出水量が多い年であったとしており、本試験流域でもその結果を支持する結果が得られた。今後、年間流出負荷量を評価する際には、降雨流出による出水時の影響が大きく寄与するため、降雨時の連続採水データを拡充し、降雨時の窒素流出の評価を負荷量計算に組み込む必要があると考えられる。

4. 結論

本研究では、矢作川上流域の御内流域から流出する

DONおよびDIN流出負荷量の把握を目的に調査を行った。御内流域では、6月から9月は雨が多く、日降水量が100 mmを超える日が毎年見られ、降水量の増加に伴い流量も増大し、年最大日流量は、どの年も8月ないし9月に発生した。河川のDON濃度は、年間を通じて季節変化はあまり見られず、8月に最大、10月に最小となった。一方、DIN濃度は、季節変化が見られ、9月に最大、4月に最小となり、両者の季節変化には差異があった。また、年間DONおよびDIN流出負荷量は、降水量が最も多かった2020年にDON・DIN流出負荷量それぞれ、 $0.49 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、 $0.81 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と最大値をとった。また、DON流出負荷量はTDN流出負荷量において約4割を占める結果となった。そして、DONおよびDIN流出負荷量は、流量の増加に合わせて、流出負荷量が増大する結果となったことから、降雨に伴う流量増加が河川へのDON、DIN流出を促しており、年間流出負荷量を評価する際には、降雨流出による出水時の影響が大きく寄与すると考えられた。今後は、降雨時の連続採水データを拡充し、降雨時の窒素流出の評価を負荷量計算に組み込む必要があると考えられる。

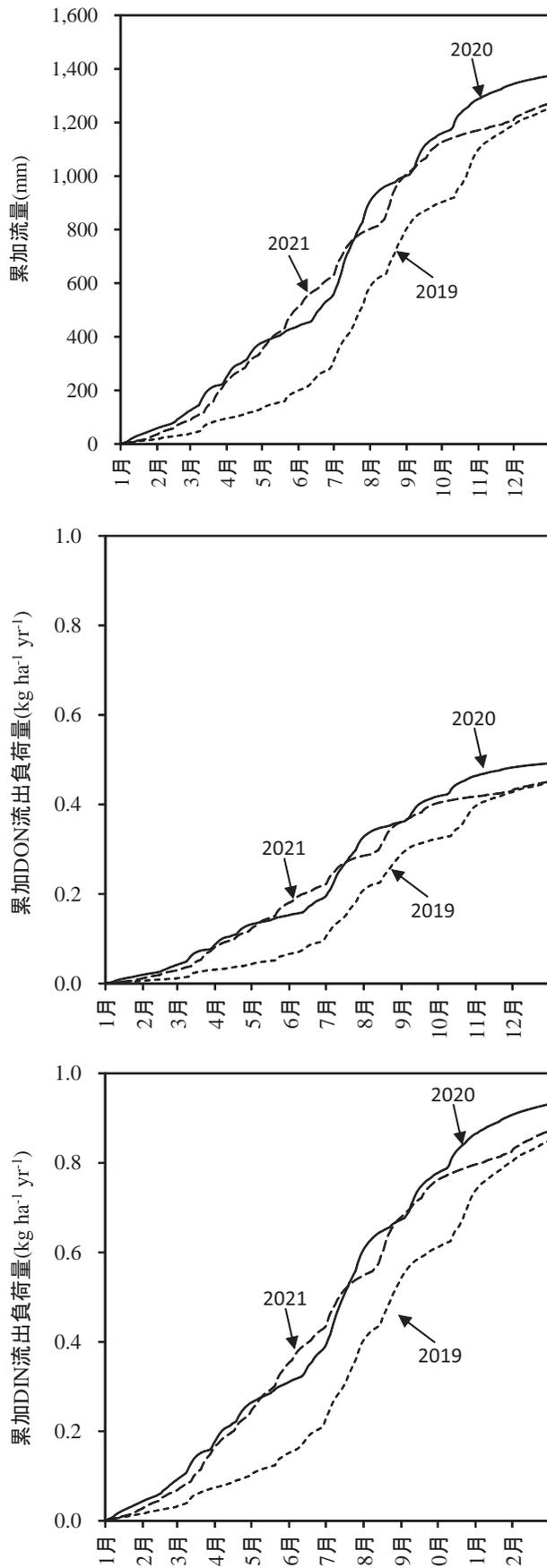


図7 累加流量および累加DON・DIN流出負荷量の変化

謝 辞

本研究は、日本学術振興会科学研究補助金若手研究 B No. 2582054（代表：松本嘉孝，2013年から2017年）の補助を受けて行われた。また、無機態窒素濃度の測定には、山梨大学の中村高志准教授の支援を基に実施した。ここに記して謝意を表す。

Abstract

This study was conducted to understand the DON and DIN load from the Miuchi watershed in upper stream of Yahagi River. In the Miuchi watershed, rainfall was heavy from June to September, with daily precipitation exceeding 100 mm every year, and the maximum daily flow occurred in August or September every year. DON concentration showed little seasonal variation throughout the year, with a maximum in August and a minimum in October. On the other hand, DIN concentration showed seasonal changes, with a maximum in September and a minimum in April. The annual DON and DIN runoff load reached their maximum values of $0.49 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ and $0.81 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ in 2020, respectively, when precipitation was the highest. The DON runoff load accounted for about 40% of the TDN runoff load. The DON and DIN runoff load increased with the increase in flow rate, suggesting that the increase in flow rate due to rainfall promotes the DON and DIN into the river. In the future, it will be necessary to expand the continuous water sampling data during rainfall and incorporate the evaluation of nitrogen load calculation.

Keywords: Forested watershed, Dissolved Organic Nitrogen, Dissolved Inorganic Nitrogen, Annual runoff load

引用文献

- Aber, J. D., Nadelhoffer, K. J., Steudler, P. and Melillo, J. M. (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *Bioscience*, 39: 378–386.
- 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. *BioScience*, 48, 921-934.
- 青井透 (2010) 人為的な汚濁源のない利根川上流域における窒素汚染. *地球環境*, 15 (2) : 145-152.
- Binkley, D., Ice, G. G., Kaye, J., Williams, C. A. (2004) Nitrogen and phosphorus concentrations in forest stream. *Journal of the American Water Resources Association*, 40: 1277-1291.
- Cambell, J. L., Hornveck, J. W., McDowell, W. H., Buso, D. C., Shanley, J. B., and Likens, G. E. (2000) Dissolved organic nitrogen budgets for upland, forested ecosystems in New England. *Biogeochem.*, 49: 123-142.
- Goodale, C. L., Aber, J. D., and McDowell, W. H. (2000) The long-term effects of disturbance on organic and inorganic nitrogen export in the white mountains, New Hampshire. *Ecosystems*, 3: 433-450.
- 長谷川香織・小葉竹重機 (2006) 関東平野北西部における森林からの渓流水中の硝酸態窒素濃度の地域分布特性. *日本森林学会誌*, 88 (6) : 534-540.
- 広瀬顕・岩坪五郎・堤利夫 (1988) 森林流出水の水質についての広域的考察 (1). *京大演報*, 60 : 162-173.
- 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. *日林誌*, 80 : 287-294.
- 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. *日本水文学会誌*, 36 : 145-149.
- 小柳信宏・浦川梨恵子・生原喜久雄・戸田浩人 (2002) スギ・ヒノキ壮齢人工林小流域における降雨の移動に伴う溶存有機態窒素および溶存有機態炭素の動態. *森林立地学会誌 森林立地*, 44 (1) : 11-20.
- 熊谷明子・塚越剛史・田中友里・蔵治光一郎 (2000) 山地小流域における渓流水質の変動特性. *東京大学演習林報告*, 103 : 1-20.
- Lewis, W. M., Melack, J. M., McDowell, W. H., McClean, M., Richey, J. E. (1999) Nitrogen yields from undisturbed watersheds in the Americas. *Biogeochemistry*, 46: 149-162.
- Likens, G. E., Bormann, F. H., Pierce, R. S., Eaton, J. S. and Johnson, N. M. (1977) *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. Springer-Verlag, 146.
- 松本嘉孝・江端一徳 (2020) 豊田市北東部の人工林域から流出する平均溶存有機炭素濃度および年間流出量の算出. *矢作川研究*, 24 : 15-22.
- 宮廻隆洋・田林雄・大城等・小山維尊・中島結衣・佐藤紗知子・野尻由香里・岸真司・藤原敦夫・神谷宏 (2014) 日本海側河川に対する中国大陸からの越境窒素汚染. *陸水学雑誌*, 75 : 27-34.
- 長坂晶子・長坂有・石川靖 (2015) 北海道中央部の小流域における溶存有機炭素・無機態炭素の流出特性. *北海道林業試験場研究報告*, 52 : 11-22.
- 長坂有 (2020) 森林溪流から流出する窒素になぜ注目するのか? *光珠内季報*, 196 : 7-11.
- Perakis, S. S. and Hedin, L. O. (2007) State factor relationship of dissolved organic carbon and nitrogen losses from unpolluted temperate forest watersheds. *Journal of Geophysical Research*, 112: G02010 1-7.
- 林野庁 (2004) I 次世代へと森林を活かし続けるために. 平成 16 年度林業・森林白書
- 柴田英昭・戸田宏人・稲垣善之・館野隆之輔・木庭啓介・福澤加里部 (2010) 森林原流域における窒素の生物地球化学過程と渓流水質の形成. *地球環境*, 15 (2) : 133-143.
- 篠宮佳樹・山田毅・稲垣善之・吉永秀一郎・鳥居厚志 (2014) 四万十川源流部の森林における硝酸態窒素の年間流出負荷量とその流出機構. *水環境学会誌*, 37 (3) : 91-101.
- 田淵俊雄・林寛司 (1987) 流量・負荷量関係式の信頼性について. *農業土木学会論文集*, 131 : 11-18.
- 徳地直子・大手信人・臼井伸章・福島慶太郎 (2011) 窒素負荷に伴う森林生態系の窒素循環過程の検討. *日本生態学会誌*, 61 : 275-290.
- 辻千智・戸田浩人・崔東寿 (2013) 神奈川県の大沢試験流域における窒素動態特性. *神奈川県自然環境保全センター報告*, 10 : 91-99.
- 釣田竜矢・大貫靖浩・清水貴範 (2009) 北部九州の森林小流域における窒素収支の年々変動. *九州森林研究*, 62 : 148-149.
- 堤利夫 (1987) *森林の物質循環*. 東京大学出版会, 東京.
- Vanderbilt, K. L., Lajtha, K. and Swanson, F. J. (2003) Biogeochemistry of unpolluted forested watersheds in the Oregon Cascades: temporal patterns of precipitation and stream nitrogen fluxes. *Biogeochemistry*, 62: 87-117.
- Vitousek P. M. and Reiners W. A. (1975) Ecosystem succession and nutrient retention: a hypothesis. *Bioscience*, 25: 376-381.
- 山田俊郎, 大江史恵, 清水達雄, 橘治国 (1998) 森林集水域からの栄養塩負荷流出とその特性に関する比較研究. *環境工学研究論文集*, 35 : 85-93.

(豊田工業高等専門学校 環境都市工学科
〒 471-8527 愛知県豊田市栄生町 2-1)

付録

表1 DON・DINの月別流出負荷量のまとめ

	2019			2020			2021		
	降水量 (mm)	流出負荷量(kg ha ⁻¹)		降水量 (mm)	流出負荷量(kg ha ⁻¹)		降水量 (mm)	流出負荷量(kg ha ⁻¹)	
		DON	DIN		DON	DIN		DON	DIN
1月	64.1	0.006	0.016	197.3	0.019	0.044	119.1	0.011	0.028
2月	66.4	0.006	0.016	232.1	0.023	0.050	181.8	0.018	0.040
3月	192.8	0.019	0.042	432.0	0.046	0.086	487.1	0.052	0.096
4月	126.7	0.012	0.029	426.7	0.045	0.086	397.9	0.041	0.081
5月	226.4	0.023	0.048	211.2	0.021	0.046	548.1	0.058	0.108
6月	350.5	0.036	0.072	415.7	0.044	0.083	393.2	0.041	0.080
7月	959.1	0.106	0.178	1177.0	0.132	0.214	596.4	0.064	0.115
8月	732.8	0.080	0.139	312.6	0.032	0.065	688.8	0.075	0.130
9月	345.1	0.036	0.071	536.9	0.058	0.104	409.4	0.042	0.083
10月	661.7	0.072	0.126	435.7	0.046	0.087	153.9	0.015	0.035
11月	312.0	0.032	0.065	190.6	0.019	0.042	123.3	0.012	0.028
12月	218.9	0.022	0.048	103.5	0.010	0.025	216.0	0.021	0.047