

北海道中央部の小流域における溶存有機炭素・無機態窒素の流出特性 －高齢級トドマツ人工林・天然生落葉広葉樹林の比較より－

長坂晶子¹・長坂 有¹・石川 靖²

Export of stream dissolved organic carbon and inorganic nitrogen at two headwater catchments with different forest types in central Hokkaido, Japan

Akiko NAGASAKA¹, Yu NAGASAKA¹ and Yasushi ISHIKAWA²

要 旨

北海道中央部の林相の異なる森林溪流2カ所（高齢級トドマツ人工林・落葉広葉樹林）において溶存有機炭素（DOC）と無機態窒素（DIN：硝酸態窒素とアンモニア態窒素）の採水分析を行い、平水時の濃度の季節変動特性や出水時の流出特性等について把握した。平水時の季節変化のパターンを見ると、DOCについては2流域の違いは見られなかったが、硝酸態窒素濃度は、トドマツ人工林流域において冬期に濃度上昇し、全国的に見ても高い値（0.6mgN/L）を示した。出水時の物質の流出特性は、融雪期と夏期大雨時では異なっており、融雪期はDOC、DINいずれも流量増加に応じて濃度上昇する関係が明瞭に見られたのに対し、夏期大雨時には、いずれも流量増加による希釈効果がみられ、溪流に流出する溶存物質の貯留量が季節により異なることが示唆された。2流域の物質輸送機構の違いは、①林床植生タイプの違いによる養分吸収量の違いが窒素溶脱量の差異をもたらし、②主要構成樹種の違いによる樹冠遮断および遮断蒸発量の違いが溶存物質を運搬する溪流水量の差異をもたらしていると考えられた。落葉広葉樹林流域はトドマツ人工林流域よりも流出率（流出高と降水量の比）が高く、豊富な水量を系外に流出しているが、集水域内部の窒素保持が堅固であり、集水域外への窒素流出は抑制されていることがわかった。

キーワード：小流域，流出特性，無機態窒素，溶存有機炭素，トドマツ人工林，落葉広葉樹林

はじめに

森林のもつ公益的機能のなかで、水資源や水質形成に関わる「水源涵養機能」は広く知られ、森林管理上も重要視されてきた。近年では、「森は海の恋人」というキャッチフレーズによって、森林が海の生物に何らかの栄養を供給するというイメージも先行し、森林へのある意味過度な期待も高くなっている。『水質』といった場合、一般的にカルシウムやマグネシウムなどのミネラル類は土壌母材である地質の影響を受けるのに対し、硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）やアンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）などの無機態窒素（DIN）は土壌微生物による無機化や、植物による養分吸収の程度など、生物的要因を反映したものとして溪流水中に流出する。土壌中の粘土鉱物は一般的に負に帯電するため、陽イオンであるアンモニウムイオン（ NH_4^+ ）は土壌に吸着・保持されやすいのに対し、陰イオ

ンの硝酸イオン（ NO_3^- ）は粘土鉱物と反発して溶脱しやすいため、溪流水中で計測される無機態窒素は多くの場合 $\text{NO}_3\text{-N}$ である（福島2012a）。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は林相や地表攪乱などの影響を受けやすく、森林生態系の物質循環を評価する指標として有効（柴田ほか2009）と考えられている。ただし通常、森林生態系は窒素制限とされ、植物と土壌間の内部循環系が創出する窒素保持能力によって系外に流出する窒素の量は低く抑制されるため、森林からの窒素流出はきわめて少ない。日本では多くの場合源流域が森林で覆われているため、上流域から清澄な水を供給することにより、中・下流の農地や都市域で増大する負荷を希釈しているとも言える（福島2012b）。

一方で、森林溪流の生物生産は、河畔林（河畔林）から供給される外来性有機物（allochthonous organic matter）に大きく依存している。供給形態としては、落葉・落枝などの粗粒有機物（CPOM: Coarse Particulate Organic Matter）と地下水

*¹ 北海道立総合研究機構林業試験場 Hokkaido Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, Bibai, Hokkaido, 079-0198

*² 北海道立総合研究機構環境科学研究センター Institute of environmental Sciences, Hokkaido Research Organization, Sapporo, Hokkaido, 060-0819
[北海道林業試験場報告 第52号 平成27年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No.52, March, 2015]

や地表水に溶存した状態で供給される溶存態有機物 (DOM: Dissolved Organic Matter) が主体となっている (Allan 1995)。DOMは、渓流水中でのバクテリア活性を促しDOMの粒状化 (flocculation) に貢献する (Wiegner et al. 2005) など、溪流生態系への関与が大きいことが知られており、その評価には溶存有機炭素 (DOC: Dissolved Organic Carbon) がよく用いられる。これはDOMの50%が炭素で構成されるため (Wallace et al. 1997)、DOCの動態研究は欧米を中心に多くの蓄積がある (Tank et al. 2010)。また、DOCは河川生態系だけでなく、フミン酸・フルボ酸などの腐植酸の主要構成元素として、鉄などの金属イオンと有機錯体を形成し、それらを沿岸河口域まで運ぶキャリアーとして、汽水域の生態系にも影響を及ぼすことが明らかとなってきた (白岩2012)。また、地球温暖化などの気候変動に伴い、土壤中に蓄積されてきた炭素の分解・溶出や河川を通じての系外への流出が懸念されるなど、DOCは陸上生態系における炭素循環を評価する指標としても注目されている (Aitkenhead and McDowell 2000, 大手2011)。したがってDOCも、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と同様に森林の質 (林相や樹齢など) や攪乱の程度 (森林施業の有無など) を評価する指標として、あるいは溪流の生産力を評価する指標として活用できる可能性があるが、国内における観測例、報告例は著しく少ない (ただし長坂ほか2003, 2006, 大手2011など)。

そこで本研究では、北海道中央部の林相の異なる森林溪流2カ所においてDOCと無機態窒素 (DIN: 硝酸態窒素とアンモニア態窒素) の採水分析を行い、基礎知見を蓄積することとした。調査地は林相以外の条件 (流域面積, 地形, 地質等)

が可能な限り等しくなるように選定し、林相によってこれら溶存物質の流出特性がどのように異なるのか比較できるようにした。また、大雨などによる出水イベントは、平水時に比べ $10^1\sim 10^3$ 倍もの流量増加を伴うため、下流への物質輸送機会として非常に重要である。とくに積雪寒冷地においては、融雪出水期のDOC流出量が年間総流出量の50~60%を占めることも報告されている (坂本ほか1998)。これらを踏まえ本研究では、平水時に加え出水時の調査も行い、平水時の濃度の季節変動特性と出水時の流出特性、ならびに各態の流出量について、これまでに得られた知見を報告する。

調査流域と方法

調査地概要

採水および水文観測は、北海道岩見沢市東部に位置する利根別自然休養林 (空知森林管理署管内) 内の小流域2カ所で行った。2流域は直線距離で300m以内に近接しており、地形・地質条件がほぼ等しく、林分の植生のみが異なる (図-1)。2流域の一方は1941年、1958年植栽のトドマツ (*Abies sachalinensis*) が流域面積の約80%を占める高齢級トドマツ人工林流域 (流域面積7.05ha, 平均傾斜9.7%, 平均標高85m)、もう一方は施業履歴のない天然生落葉広葉樹林 (流域面積8.25ha平均傾斜12.0%, 平均標高80m) とした。トドマツ人工林流域の植栽木は管理簿上では林齢が55年生、72年生と高齢級であることを示しているが、胸高直径は20~40cmとサイズにばらつきが大きく、間伐が不十分なためか密生しており林内は暗い。林床植生は乏しく、侵入広葉樹の稚樹が散在して



図-1 調査対象流域位置図。

高齢級トドマツ人工林流域 (流域面積7.05ha) と天然生落葉広葉樹林流域 (8.25ha)。図中網掛け部分がトドマツ植栽地 (1941, 1958年植栽) を示す。

Fig. 1 Location of study catchments at the Sorachi National Forest.

Hatched area indicates Todo fir (*Abies sachalinensis*) planted in 1941 and 1958, whose catchment area is 7.05 ha. The area of natural deciduous forest is 8.25 ha.

いる。一方、天然生落葉広葉樹林は胸高直径が50cmを越えるような大径木で構成される。主要樹種はミズナラ (*Quercus crispula*), アサダ (*Ostrya japonica*), イタヤカエデ (*Acer pictum*), ハリギリ (*Kalopanax septemlobus*), シナノキ (*Tilia japonica*), オオバボダイジュ (*Tilia maximowicziana*) などで、林床にはクマイザサ (*Sasa senanensis*) が優占し、ハイヌガヤ (*Cephalotaxus harringtonia var. nana*) が混在する。なおトドマツ人工林流域の河畔は施業の痕跡がなく、広葉樹林流域と同様に大径の落葉広葉樹が生育している。河畔の湿性地には、ヨブスマソウ (*Parasenecio hastatus*) やオニシモツケ (*Filipendula camtschatica*) などの高茎草本のほか、一部ミズバショウ (*Lysichiton camtschaticense*) が群生する。地質図幅上の地質区分はトドマツ人工林流域が更新世の茂世丑層、落葉広葉樹林流域には茂世丑層に加え新第三紀中新世の川端層が分布する。いずれも砂、シルトを主体とする堆積岩類であり、土壌物理性やイオン吸着能などには大きな違いはないと考えられる。近接する岩見沢気象観測所の記録では、当地域の年平均気温は7.4℃、年間降水量は1,217mmで積雪期の最深積雪は216cmになり、道内有数の多雪地となっている(気象庁気象統計1960~2014年の平均値、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)。

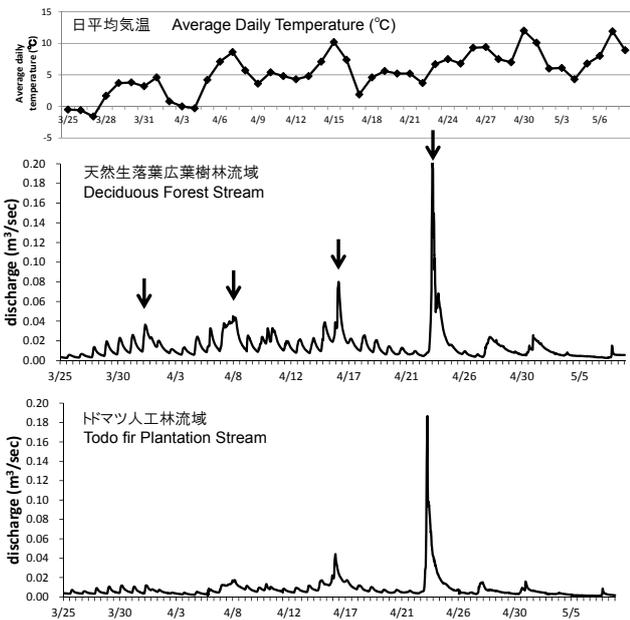


図-2 調査流域2カ所における融雪期(2011年3月25日~5月8日)の流量変動。

上段:日平均気温(アメダス岩見沢)、中段:天然生落葉広葉樹林のハイドログラフ、下段:トドマツ人工林流域のハイドログラフ、を示す。図中の矢印は増水を伴う融雪出水を観測した日を示す。

Fig. 2 Hydrographs during snow melt (2011/3/25-5/8).

Upper panel: average daily temperature at the nearest metrological station (AMeDAS Iwamizawa), middle: hydrograph of deciduous forest, lower: Todo fir plantation. Arrows indicate snow melt event with discharge increase.

調査方法

この2流域の下流地点にそれぞれ直角三角流量堰を設置し、2010年10月1日より水文観測と採水を開始した。流量堰における水位は、静電容量式水位計(Trutrack社製)を用い30分インターバルで連続観測した。2週間毎にVノッチの越流深を記録し、水位計と越流深の回帰式から堰ごとの流量公式(JIS B8302)を作成し、流量計算を行った。

採水は、平水時と出水時にそれぞれ行った。平水時の採水は2010年10月~2013年9月末までの間、ほぼ2週間毎に、原則として2日以上無降雨が継続した日に実施した。厳冬期は月1回とした。出水時の採水は、融雪期と夏期の大雨を対象に自動採水器(ISCO社製3700スタンダードサンプラー)を用い、融雪期は1時間インターバルで、夏期大雨時は30分インターバルで自動採水を行った。融雪期の採水は2011年3月25日から開始し、気温上昇、天候などの状況を見ながら、試料回収と自動採水器の設定を繰り返し、最終的に2011年5月8日まで観測を行った。この間、大きな水位上昇を伴う明瞭な融雪出水は4回観測された(図-2)。また夏期大雨時の採水は2011年8月14日~17日にかけて実施した(図-3)。この間断続的に降水があり、4日間の総降水量は137mmを記録した(アメダス岩見沢)。

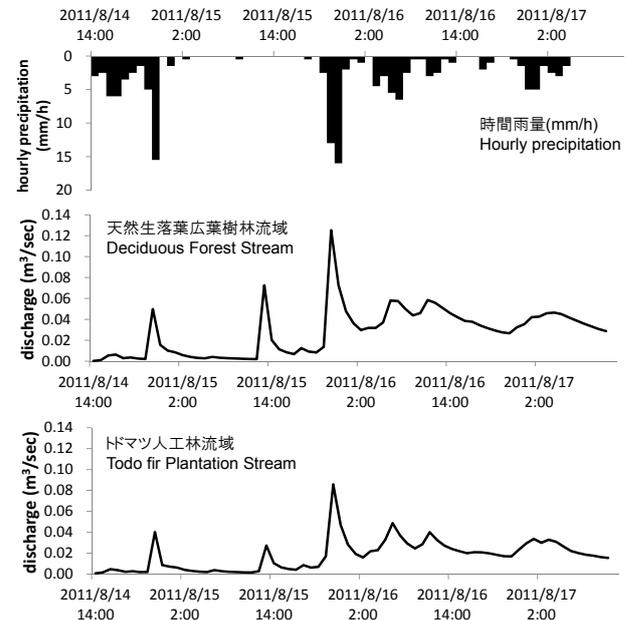


図-3 調査流域2カ所における夏期大雨時(2011年8月14~17日)の流量変動。

上段:時間雨量(アメダス岩見沢)、中段:天然生落葉広葉樹林のハイドログラフ、下段:トドマツ人工林流域のハイドログラフ、を示す。

Fig. 3 Hydrographs during summer storm event (2011/8/14-17).

Upper panel: hourly precipitation at the nearest metrological station (AMeDAS Iwamizawa), middle: hydrograph of deciduous forest, lower: Todo fir plantation.

表-1 広葉樹林とトドマツ人工林における融雪期と夏期大雨出水時のL-Q式。

Table 1 L-Q equation of each stream water quality at deciduous and Todo fir plantation stream during snow melt (2011/3/25-5/8) and summer storm event (2011/8/14-17).

観測期間 observation period	観測対象 stream water quality	林相 forest type	L-Q式 L-Q equation	R ² R ²
融雪期 snow melt 3月25日～5月8日 (44日間) 3/25-5/8 44 days	DOC	広葉樹林 deciduous	$y = 2.67x^{1.15}$	0.92
		トドマツ人工林 Todo fir plantation	$y = 6.17x^{1.20}$	0.98
	DIN	広葉樹林 deciduous	$y = 0.27x^{1.09}$	0.77
		トドマツ人工林 Todo fir plantation	$y = 1.11x^{1.13}$	0.96
夏期出水 summer storm-event 8月14日～17日 (3日間) 8/14-8/17 3 days	DOC	広葉樹林 deciduous	$y = 2.11x^{0.79}$	0.89
		トドマツ人工林 Todo fir plantation	$y = 6.57x^{0.91}$	0.95
	DIN	広葉樹林 deciduous	$y = 0.08x^{0.65}$	0.61
		トドマツ人工林 Todo fir plantation	$y = 0.28x^{0.78}$	0.79

試料の処理と分析

採水試料はクーラーボックスに入れ低温を維持したまま実験室に持ち帰り、ガラス繊維フィルター（Whatman GF/F, 粒子保持能：0.7μm）で吸引濾過し、分析まで2℃の冷蔵庫で保存した。DOCは全有機炭素計SHIMADZU TOC-V_{CH}で分析した（JIS-K0805に基づく）。DINは、分析前さらに0.2μmのシリンジフィルターで濾過してからイオンクロマトグラフィーDionex ICS-1100（Thermo Scientific社製、アニオン・カチオン同時システム）により分析した。この段階で硝酸イオン（NO₃⁻）とアンモニウムイオン（NH₄⁺）として検出された値をそれぞれ硝酸態窒素（NO₃-N）、アンモニア態窒素（NH₄-N）に換算し、出水時の解析ならびに積算負荷量の算出においてはNO₃-NとNH₄-Nを合わせてDINとした。

融雪期、夏期大雨出水時それぞれのDOC・DINの積算負荷量および比負荷量（haあたり負荷量）を算出するために、観測時流量と濃度のデータからL-Q式を求めた（表-1）。ここで得られたべき乗の回帰式は「経験式」と呼ばれ（環境庁1990）、集水域の物質流出量（負荷量）を計算するための方法として一般的に用いられる。

$$L = aQ^b \quad (1)$$

L：負荷量（濃度と流量の積）、Q：流量、a、b：回帰式から得られた係数、をそれぞれ表す。同時に、観測期間中の積算流量、流出高、流出率も求めた。

結果

平水時のDOC・DINの季節変化

図-4にDOC、NO₃-N、NH₄-Nの季節変化を示した。DOC

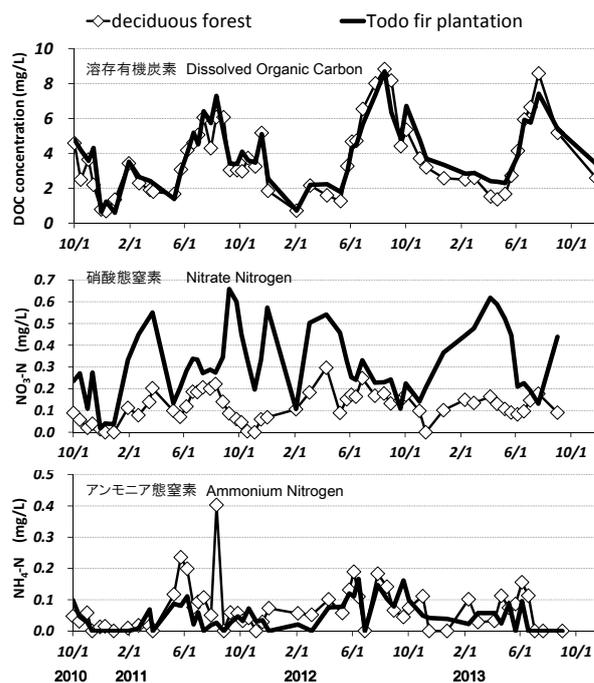


図-4 天然生落葉広葉樹林流と高齢級トドマツ人工林流域における渓流水中の溶存有機炭素濃度（上）、硝酸態窒素濃度（中）、アンモニア態窒素濃度（下）の季節変化。

観測期間：2010年10月1日～2013年9月25日で平水時、ほぼ2週間ごとに採水分析したもの。

Fig. 4 Seasonal variation of DOC concentration (upper panel), NO₃-N concentration (middle), and NH₄-N concentration (lower) in natural deciduous forested stream (◇) and Todo fir plantation stream (—).

Study period: 2010/10/1- 2013/9/25. Sampling was conducted every two weeks in normal stage of water.

濃度の季節変化は2流域で酷似しており、濃度の範囲もほぼ同程度(0.6–8.8mg C/L)だった。季節変化の傾向として、融雪出水終了後の5月から気温・水温が最も高くなる8月にかけて濃度が上昇し、9月から冬期にかけて減少するというパターンが3年間共通していた。一方NO₃-N濃度についてみると、落葉広葉樹林流域で観測された値(0.01–0.2mg N/L)は一般的な森林溪流の値と考えてよいが(戸田ほか2000)、トドマツ人工林流域で観測された0.2–0.6mg N/Lという値は、大気汚染などによる窒素沈着増加に伴う濃度上昇が指摘される関東北部や四国北部に近い値(柴田ほか2010)であった。トドマツ人工林流域では季節的な値の変動も大きく、特に冬期には明瞭な濃度上昇の傾向を示した。またNH₄-N濃度はNO₃-N濃度に比べ概して低濃度であり、2流域で大きな違いはなかった。

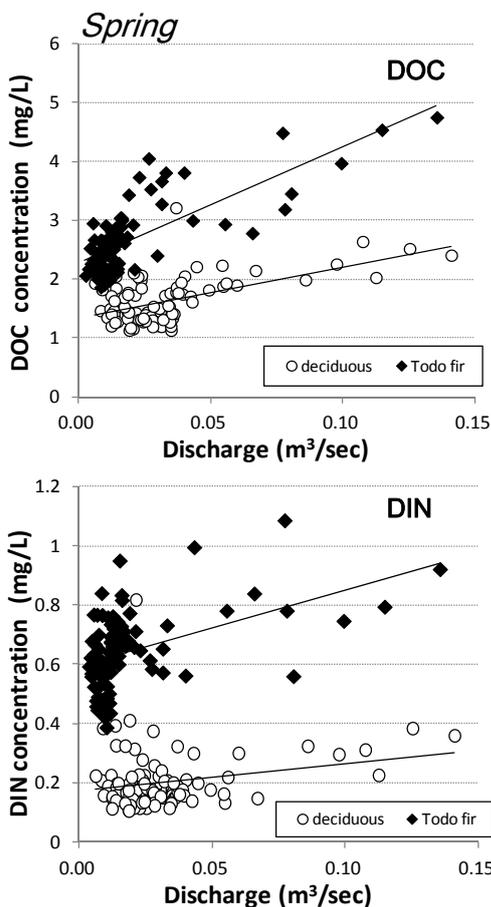


図-5 天然生落葉広葉樹林流域と高齢級トドマツ人工林流域における融雪期の濃度—流量の関係。上：DOC、下：DIN。観測期間：2011年3月25日～2011年5月8日の44日間。
Fig.5 Relationships between DOC (upper panel) / DIN (lower) concentration and stream discharge in natural deciduous forested stream (○) and Todo-fir plantation stream (◆) during snow melt (2011/3/25-5/8).

出水時の流量変化に対するDOC・DINの反応

図-5に融雪出水時、図-6に夏期大雨出水時のDOC、DIN濃度と観測時流量との対応関係を示した。融雪出水時、DOC、DINともに濃度—流量の関係(C-Q関係)は有意な正の相関を示し(p<0.001)、流量増加に応じて濃度上昇していることが示された。同じ流量に対してはトドマツ人工林の濃度が高く、林相の違いによって溶存物質の供給能力に差異があることも示唆された。この差異はDINではさらに顕著であり、トドマツ人工林流域は平水時のみならず、融雪期にもDIN濃度が高いことを示した。一般的に無機態窒素は、流量増加に伴い希釈効果により濃度上昇が頭打ちもしくは低下する(田村ほか2009、篠宮ほか2014)と言われるが、ここでは流量が増加しても渓流水への窒素流出が持続することを示していた。一方、夏期大雨出水時は、DOC・DINともに有意な負の相関を示し(p<0.001)、融雪期とは異なり流量増加時に濃度希釈が起きていることがわかった。

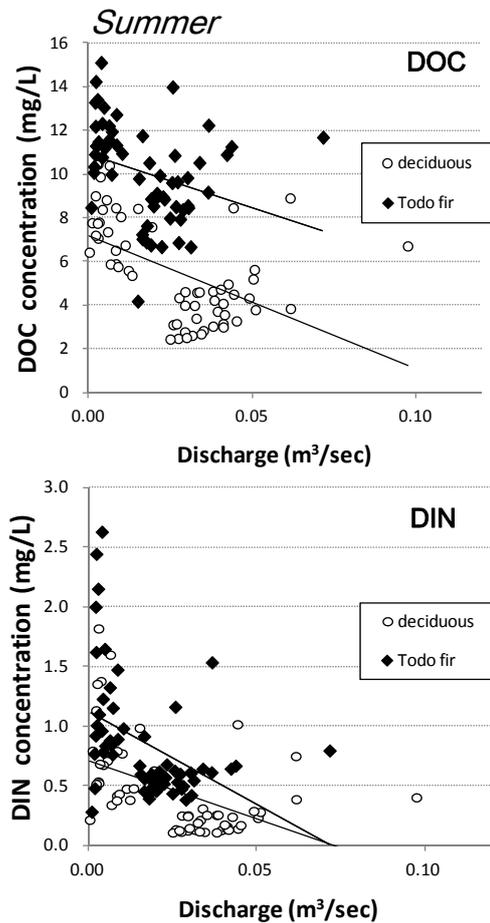


図-6 天然生落葉広葉樹林流域と高齢級トドマツ人工林流域における夏期大雨時の濃度—流量の関係。上：DOC、下：DIN。観測期間：2011年8月14日～17日。
Fig.6 Relationships between DOC (upper panel) / DIN (lower) concentration and stream discharge in natural deciduous forested stream (○) and Todo-fir plantation stream (◆) during storm event (2011/8/14-17).

表-2 広葉樹林とトドマツ人工林における融雪期と夏期大雨出水時の溪流からの流出量(累積流量と積算DOC流出量・積算DIN流出量)。

Table 2 Exports of DOC and DIN from deciduous and Todo fir plantation stream during snow melt and summer storm-event.

観測期間 observation period	林相 forest type	流量 discharge			DOC流出量 DOC export		DIN流出量 DIN export	
		積算流量(m ³) cumulative discharge (m ³)	流出高(mm) runoff (mm)	流出率 ¹⁾ runoff rate ¹⁾	積算負荷量(kg) cumulative DOC load (kg)	比負荷量(kg/ha) specific DOC load (kg/ha)	積算負荷量(kg) cumulative DIN load (kg)	比負荷量(kg/ha) specific DIN load (kg/ha)
融雪期 snow melt 3月25日～5月8日 (44日間)	広葉樹林 deciduous	56547	684	1.24	86	10.4	10.5	1.3
	トドマツ人工林 Todo fir plantation	30785	437	0.79	80	11.3	19.4	2.8
夏期出水 summer storm-event 8月14日～17日 (3日間)	広葉樹林 deciduous	7023	85	0.62	30	3.6	1.8	0.2
	トドマツ人工林 Todo fir plantation	4467	63	0.46	41	5.8	2.9	0.4

- 1) 流出率 = 流出高 / 降水量。融雪期：根雪となった12月15日～観測終日の5月8日までの総降水量515.5mm、夏期出水時：8月14日～17日の総降水量137mmを用いた。
 1) runoff rate expressed as the ratio of runoff to precipitation. Precipitation during snow melt was 515.5mm, and those of summer storm-event was 137mm, respectively.

出水時のDOC・DIN負荷量

表-2に融雪期、夏期大雨出水時それぞれのDOC・DINの積算負荷量および比負荷量 (haあたり負荷量), 観測期間中の積算流量, 流出高, 流出率を示した。融雪期は、広葉樹林流域からの出水が多く、流出率が1を超えた。融雪期44日間のDOC積算負荷量は広葉樹林流域で若干多かったが、比負荷量にすると広葉樹林流域で10.4kgC/ha、トドマツ人工林流域で11.3kgC/haと、トドマツ人工林流域からのDOC流出が若干多くなる結果となった。これに対しDINはトドマツ人工林流域からの流出が多く、比負荷量が広葉樹林流域で1.3kgN/ha、トドマツ人工林流域で2.8kgN/haとなり、積算負荷量も広葉樹林流域の2倍以上になっていた。夏期大雨出水時には、広葉樹林流域の流出率が0.62、トドマツ人工林流域が0.46であり、いずれも融雪期よりも値が小さくなったものの、同様にトドマツ人工林流域が広葉樹林流域の7割程度の流出率を示し、同じ降水量に対し、渓流水として流出していく割合が少ないことを示した。DOC、DIN比負荷量については、広葉樹林流域で3.6kgC/ha、0.2kgN/ha、トドマツ人工林流域で5.8kgC/ha、0.4kgN/haと、それぞれ広葉樹林流域の1.6倍、1.9倍になった。

1年間に流出するDOC・DINの量

出水時の負荷量を加味し、2流域それぞれの年間積算負荷量を計算した(図-7)。この年、降雨に伴う出水イベントは4回(2011年7月14日、8月14日～16日、9月2日～4日、9月22日～24日)あり、これら流量増加時の負荷量計算には前述のL-Q式(夏期)を用いた。融雪期を除くそれ以外の期間は2週間毎の定期採水で得られた分析値を当てはめ、時間積算して期間負荷量を求めた。その結果DOCの年間流出量は、広

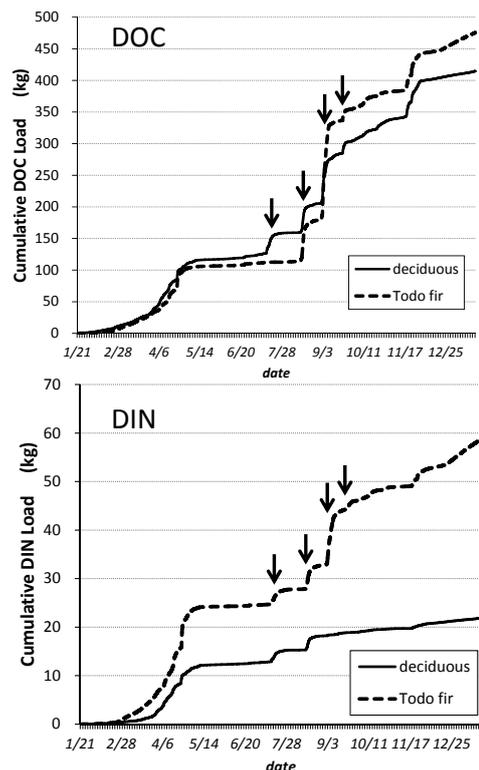


図-7 天然生落葉広葉樹林流域(実線)と高齢級トドマツ人工林流域(破線)における年間累積負荷量。

上：DOC、下：DIN。観測期間：2011年1月21日～2012年1月20日。

図中矢印は降雨による出水イベントがあった日を示す。Cumulative DOC (upper panel) and DIN (lower panel) load in natural deciduous forested stream (solid line) and Todo-fir plantation stream (dashed line) in 2011.

Arrows indicate storm event occurred in 7/14, 8/14-16, 9/2-4, 9/22-24.

葉樹林流域で415kgC, トドマツ人工林流域で475kgCとほぼ同程度で、年間流出量に占める融雪出水の割合は広葉樹林で21%, トドマツ林では17%であった。比負荷量は広葉樹林流域で50.3kgC/ha, トドマツ人工林流域で67.5kgC/haとなった(表-3)。DINは広葉樹林流域で21.9kgN, トドマツ人工林流域で58.8kgNとなり、トドマツ人工林流域からの流出量が2倍以上になった。年間流出量に占める融雪出水の割合は広葉樹林で48%, トドマツ林では33%となり、DOCに比べ融雪流出の寄与が大きくなった。比負荷量は広葉樹林流域で2.7kgN/ha, トドマツ人工林流域で8.3kgN/haとなった(表-4)。

考察

DOC・DINの季節変動を生じさせる要因

DOC濃度の季節変化を報告した国内事例は著しく少ないため、本調査地でみられた季節変動の普遍性についてはさらなる事例蓄積が必要である。しかし本調査地では初夏に濃度上昇し、夏期の大雨水後から冬期にかけて濃度低下するというパターンが3シーズン共通して見られ、再現性が高い現象と考えられた(図-4)。北米・北欧の報告ではDOC濃度を規定する要因として、①DOCが渓流水へ運搬されるプロセス:河畔域での流量変動(流量増でDOC濃度増加)、②DOC生成が促進されるプロセス:河畔域の地温上昇(バクテリアや菌の活性が高まり、未分解の有機物が溶存態有機物として溶出)を挙げ、モデル化のパラメータとして数多く論じている(Freeman et al. 2001; Kohler et al. 2009; Winterdahl et al. 2011; Schelker et al., 2013)。本調査地では、初夏、気温上昇の効果を強く受け土壌表層に多く蓄積されている有機物が溶出し、高濃度のDOCを観測したものと考えられる。この時期DOCは渓流水へ流出するだけでなく、DOC生成が促進されることで河畔域にDOCのシンクを形成し(Perdrial et al. 2013)、後述するように夏期の大雨水によって一気にフラッシュされると考えられた。一方、気温、水温が低下していく9月以降は、DOCの生成速度が遅く、渓流へのDOC供給量が減少するため濃度も減少すると考えられる。これらのことは、出水時のDOC流出も、秋期においてより鈍くなる可能性を示唆しているが、今回の観測では秋期の降雨出水イベントのデータは取得しておらず、積算負荷量の算出には反映させることができなかった。本調査地のように、DOC濃度の季節変動が観測される流域では留意すべき点である。

一方、筆者らが過去に道内の他渓流で観測した事例では、DOC濃度は本調査地に比べ低濃度(1.0mg C/L前後)で、季節変化もほとんどみられなかった(長坂ほか2003)。濃度の高低を左右する要因のひとつに地形条件が挙げられ、傾斜が緩やかな流域ほどDOC濃度が高くなる傾向があることが報告されている(Ogawa et al. 2006)。これは集水域全体の傾斜が緩いことで間隙水および渓流水の滞留時間が長くなることや、谷底に平坦な河畔域を多くもつため土壌水分が豊富な湿潤環

境が形成されやすく、DOCが溶出しやすいことを反映している。本調査地の傾斜は、国内の一般的な森林水文試験地(たとえば35度, 定山溪;阿部ほか2013, 24度, 宝川;藤枝ほか1996)に比べ10-12%とかなり緩く、森林渓流における値としては比較的高いDOC濃度が観測されたと思われる。また渓流水の滞留時間が長くなることで地温の影響を受けやすくなり、明瞭な季節変動を示したといえる。

NO₃⁻濃度の季節変動について大手・徳地(2010)は、報告例が多い北米、ヨーロッパでは降水量に季節変動がない、あるいは冬雨型であるため、モンスーン夏雨型の日本でみられる季節変動パターンとは異なることに留意すべきであると述べている。すなわち、NO₃⁻の流出過程を規定する要因には、①植物や微生物による窒素利用の有無と、②溶質の運搬に関わる水文条件の2つが大きく関わっていると考えられるが、夏に降水量が少ない欧米では前者のプロセス(植物や土壌微生物によるアップテイク)が卓越するため夏期に濃度低下するパターンが生じるが、日本では、アンモニア化成、硝酸化成を担うアンモニア酸化細菌や亜硝酸酸化細菌などの活性が高い時期と降水量の多い時期が重なるため、高い細菌活性によって生成されたNO₃⁻が植物や土壌微生物に利用される以上に、降水により土壌から洗脱され、渓流水のNO₃⁻濃度を上昇させる方向で働く(徳地ほか2011)。本調査地において、林相に拘わらず2流域共通して初夏にNO₃⁻濃度が上昇する傾向が見られたのはその反映と見ることができる。一方、本調査地における平水時のNO₃⁻濃度は、落葉広葉樹林流域では一般的な森林渓流の値と同程度であったが、トドマツ人工林流域では冬期に高濃度のNO₃⁻を観測した。この要因として、微生物や植物によるNO₃⁻の吸収活性の低下(Barnes et al. 2008)が大きく示唆される。とくに林床植生に着目すると、本調査地のトドマツ人工林流域は林冠閉鎖により林床にはほとんどササが生育していないが、落葉広葉樹林流域では林床にクマイザサが密生しており2流域の状況は大きく異なっていた。北海道北部の針広混交林で土壌中の根系分布を調査した例では、深さ60cmまでの土壌中に含まれる細根バイオマスの約70%がササであることが報告され(Fukuzawa et al. 2007)、さらに、森林伐採によって樹木の養分吸収が停止しても、林床にササが残存していた場合、土壌から河川への窒素溶脱が軽減されることが報告されている(Fukuzawa et al. 2006)。このように本調査地においては、林相および林床植生の違いによる植物の窒素利用プロセスの違いが、冬期積雪下においてNO₃⁻濃度の差異として強く現れた可能性が示唆される。但し脱窒の効果(楊ほか2004, 楊2014, 柴田ほか2010)や微生物活性への影響などについても検討の余地がある。すなわち本調査地の河畔域では脱窒によるNO₃⁻除去が不十分なのか、また、林相や林床植生の違いが土壌微生物の活性に影響しているかどうかといった点については、現時点で十分に議論できる材料がなく、今後の課題である。

積雪寒冷地における融雪出水時の物質輸送特性

出水時の溶存物質の流出特性は、季節によって異なっており、融雪期には流量増加に応じて濃度上昇する関係が明瞭に見られた(図-5)。DOCについてみると、森林土壌に蓄積される有機炭素はリター層からA₀層にかけての浅い層で最も濃度が高いことが一般的であり(Peichl et al. 2007, 大手2011)、今回の観測で得られたC-Q関係も、融雪水がリター層を通過する際、有機炭素を溶脱し、渓流水へ持続的にDOCを供給していることを示している(林ほか1995)。また同じ流量に対して常にトドマツ人工林流域でDOC濃度が高くなった要因としては、落葉広葉樹林に比べ針葉樹林の林内雨(throughfall)のDOC濃度が相対的に高いこと(Inamdar and Mitchell 2006)、針葉樹リターの分解速度が遅く土壌表層のDOC濃度が高いことなどが考えられ、融雪時あるいは降雨時に洗い流されるため、集水域全体からDOCが供給されると見ることができると。さらに、DINでも融雪期と夏期大雨時で流量増加に対する反応の違いが明瞭であった。融雪期は、融雪にとともに大量の水が土壌中を浸透、流下することで、蓄積されていた窒素の溶脱が一気に進行することが示唆された。北海道北部では土壌からの窒素溶脱の約6割が融雪期に生じているという観測例もあり(柴田・福澤2010)、本研究の結果も、積雪寒冷地における融雪出水が物質循環過程に大きな影響を及ぼしていることを示している。これに対し夏期は、林相による差異は見られるものの、窒素流出の反応は鈍くなり、流量増加に対して濃度希釈が起きていた。基本的に森林生態系は窒素制限下にあり、無機化された窒素は土壌微生物や植生によって速やかに利用され、系外に流出する窒素の量は極めて少ない(柴田・福澤2010)。夏期はこの作用が卓越するため、窒素のシンクに限りがあることを示していると考えられる。

本論で取り上げた2流域では、集水域の林相をそれぞれ反映し、落葉広葉樹林流域において融雪期・夏期大雨時いずれも流出率が高く、降水量に対し渓流水として流出していく水の割合が高いことを示した(表-2)。本調査地のように地形、地質がほぼ等しく地下構造の違いがないと仮定できる場合には、林相による流出率の差異は主に樹冠遮断によるものと考えられる。常緑針葉樹林による樹冠遮断および遮断蒸発量は流域の水収支に大きな影響を与えると考えられており(小松ほか2007)、とくに冬期の降雪遮断と遮断蒸発は、林相による違いが大きい。閉鎖したスギ・アカマツ林では降雪遮断率が43%(國崎・甲田2006)、トドマツ林では50%にのぼり(中井ら1993)、落葉広葉樹林は10%(國崎・甲田2006)程度である。すなわち、林相の違いは樹冠遮断の違いをもたらす、イベント時の水文流出特性にまで影響波及するといえる。結果として、本研究で調査した落葉広葉樹林流域では、L-Q式を見る限りトドマツ人工林流域に比べ同じ流量に対するDOC負荷量は少なかったが、融雪出水時には、その水量の多さから、トドマツ人工林流域より積算負荷量が多い結果となった。しかしDINに関しては、出水量の違いでは相殺できないほどトドマツ人工林流域のDIN濃度が高く、積算負荷量・比負荷量ともにトドマツ人工林のほうが多いという結果となったといえる。

小流域からさらに下流への物質輸送を考える際、絶対量としてどの程度のDOCやDINが流出していくのかといった定量的な評価も重要であり、表-3、4に本研究で算出された値に加え、冷温帯を中心とした世界各地の森林水文試験地におけるDOC・DIN比負荷量を示した。DOCについて国内で観測された値としては、濃昼川(長坂ほか2006)の24.8 kgC/ha・yrが他地域の観測値と比較的近い値である。冷温帯の中でも、よ

表-3 本研究および冷温帯(北半球)を中心としたさまざまな森林タイプの流域における年間 DOC流出量(kg ha⁻¹ yr⁻¹)の概要。
Table 3 Description of the annual riverine DOC export by Biome.

林相 Biome/forest type	流域名 Watershed	地域・国名 Country	比負荷量 (kg/ha*年) specific DOC load (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	流域面積 (ha) catchment area (ha)	出典 Data Source
冷温帯落葉広葉樹林 Cool Deciduous	利根別広葉樹林 Tonebetsu deciduous	Central Hokkaido, Japan	50.3	8.25	本研究 This study
	濃昼川 Gokibiru stream	Central Hokkaido, Japan	24.8	2.06 ×10 ³	長坂ほか2006 Nagasaka et al. 2006
	Bear Brook	New Hampshire, USA	17.8	100	Fisher and Likens 1973
	Bear Brook	New Hampshire, USA	20.8	100	Mcdowell and Likens 1988
	Augusta Creek	Michigan, USA	45.3		Webster and Meyer 1997
	Augusta Creek	Michigan, USA	27.7	3.64 ×10 ³	Moeller et al. 1979
	Augusta Creek	Michigan, USA	18.7	6.27 ×10 ³	Moeller et al. 1979
	Smith Creek	Michigan, USA	22.1	78	Moeller et al. 1979
	Hubbard Brook (W6)	New Hampshire, USA	8.5	13	Hobbie and Likens 1973
	冷温帯針広混交林 Mixed Northern Forest	Storgama	Norway	38.0	60
CN1 Crosson Dorset LTR		Ontario, Canada	43.6	456	Dillon and Molot 1997
DE10 Dickie Dorset LTR		Ontario, Canada	65.7	79	Dillon and Molot 1997
Hubbard Brook (W7)		New Hampshire, USA	24.9	76	Aitkenhead and Mcdowell 2000
Hubbard Brook (W8)		New Hampshire, USA	44.7	59	Aitkenhead and Mcdowell 2000
Hubbard Brook (W9)		New Hampshire, USA	101.7	68	Aitkenhead and Mcdowell 2000
Lye Brook (W8)		Vermont, USA	65.4	130	Aitkenhead and Mcdowell 2000
冷温帯常緑針葉樹林 Cool Conifer	利根別トドマツ Tonebetsu Todo-fir	Central Hokkaido, Japan	67.5	7.05	本研究 This study
	Kelly River	Nova Scotia, Canada	35.9	6.3 ×10 ³	Clair and Ehrman 1994
	Birkness	Norway	58.8	41	Lydersen and Henriksen 1994
	Tollinja	SouthWest Finland	43.0	340	Kortelainen et al. 1997
	Heinajoki	South Finland	58.0	950	Kortelainen et al. 1997

表-4 本研究および国内を中心としたさまざまなタイプの森林流域における年間 DIN流出量 (kg ha⁻¹ yr⁻¹) の概要。

Table 4 Description of the annual riverine DIN export by Biome.

林相 Biome/forest type	流域名 Watershed	地域・国名 Country	比負荷量 (kg/ha*年) specific DIN load (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	流域面積 (ha) catchment area (ha)	出典 Data Source
冷温帯落葉広葉樹林 Cool Deciduous	利根別広葉樹林 Tonebetsu deciduous	Central Hokkaido, Japan	2.7	8.25	本研究 This study
	Baldwin Creek	SouthWest Pennsylvania, USA	3.6 ³⁾	535	Dewalle et al. 2005
	Linn Run	SouthWest Pennsylvania, USA	2.1 ³⁾	1.1 × 10 ³	Dewalle et al. 2005
	Benner Run	Northcentral Pennsylvania, USA	1.7 ³⁾	1.1 × 10 ³	Dewalle et al. 2005
	Stone Run	Northcentral Pennsylvania, USA	1.0 ³⁾	1.1 × 10 ³	Dewalle et al. 2005
	Roberts Run	Northcentral Pennsylvania, USA	0.1 ³⁾	1.1 × 10 ³	Dewalle et al. 2005
冷温帯針広混交林 Mixed Northern Forest	Caribou Poker Creeks (High permafrost ¹⁾)	Alaska, USA	0.4	570	Petrone, et al. 2006
	Caribou Poker Creeks (Medium permafrost)	Alaska, USA	1.4	1.00 × 10 ³	Petrone, et al. 2006
	Caribou Poker Creeks (Low permafrost)	Alaska, USA	0.9	520	Petrone, et al. 2006
冷温帯常緑針葉樹林 Cool Conifer	利根別トドマツ Tonebetsu Todo-fir	Central Hokkaido, Japan	8.3	7.05	本研究 This study
	H.J. Andrews Experimental Forest W10	Oregon, USA	4.3 ⁴⁾	10	Triska et al. 1984
	Tollinja	SouthWest Finland	0.5	340	Kortelainen et al. 1997
	Heinajoki	South Finland	0.5	950	Kortelainen et al. 1997
温帯常緑針葉樹林 Boreal Conifer	筑波森林試験地 Tsukuba	Ibaragi, Japan	21.1 ⁴⁾	67.5	国立環境研究所 2014
	筑波試験地 Tsukuba	Ibaragi, Japan	10.0	3.8	森林総合研究所 2012
	桂試験地 Katsura	Ibaragi, Japan	2.0	2.7	森林総合研究所 2012
	貝沢対照流域試験地 Kaizawa W1	Kanagawa, Japan	6.3	6.70	辻ほか2013
	貝沢対照流域試験地 Kaizawa W2	Kanagawa, Japan	7.6	9.20	辻ほか2013
	貝沢対照流域試験地 Kaizawa W3	Kanagawa, Japan	8.8	15.20	辻ほか2013
	鷹取山試験流域 Takatori-yama catchment ²⁾	Kochi, Japan	3.8-5.3 ⁵⁾	18.7	篠宮ほか2014

- 1) permafrost：永久凍土層
- 2) ツガ、モミ主体の天然生針葉樹林
- 3) 1997年～2001年の平均値
- 4) NO₃-Nのみの値
- 5) 7か年の観測地のレンジ

り高緯度で常緑針葉樹林が混じる、あるいは常緑針葉樹林が優占する流域で相対的にDOC負荷量が多い傾向があり（表-3）、本研究の広葉樹林流域はそれらの流域に近い傾向を示している。但しいずれにしても、DOCに関しては、北半球の他地域で観測された値を大きく外れず、変動の範囲内に位置付けられることがわかった。

一方DINについてみると、広葉樹林流域は平均的な値であったが、トドマツ人工林流域の値は、国内で窒素飽和（徳地ほか2011）が懸念され、現象として既に観測されている地域（筑波：国立環境研究所2014；森林総合研究所2012，神奈川：辻ほか2013）と同程度の値であった。但し、窒素飽和の特徴として、窒素濃度の季節変動がなくなる（徳地ほか2011）ことが指摘されており、本調査地はまだそれには当てはまらない。植栽木の高齢化に伴う窒素要求度の低下や林床植生（とくにササの現存量）の影響など、道内外の事例を蓄積し、DIN流出に関わるメカニズムと要因を明らかにする必要がある。

まとめと今後の課題

以上より、本調査地のトドマツ林と落葉広葉樹林の物質輸送機構の違いをまとめると、林床植生タイプの違いによる養分吸収量の違いが溪流への窒素溶脱量の差異をもたらす、主要構成樹種の違いによる樹冠遮断および遮断蒸発量の違いが、溶存物質を運搬する溪流水量の差異をもたらしていると考えられる。落葉広葉樹林流域はトドマツ人工林流域よりも流出率は高いが、集水域内部の窒素保持が堅固であり、集水域へ

の窒素流出を抑制しているといえる。したがって今回の結果は、下流側から見た場合、「栄養塩を多く供給するのは常緑針葉樹林」であるという見方や「下流域の富栄養化を希釈する緩衝効果が高いのは広葉樹林」という見方など、期待する機能によって異なる評価になる可能性があることを示している。しかし歴史的に見れば、北海道内で常緑針葉樹による単層林が出現、増加したのはこの半世紀ほどの間のことであり、それ以前は針広混交林やササ地、あるいは落葉広葉樹林であったと考えられる。今回調査を行った2流域におけるDOC・DINの物質流出特性の違いを踏まえると、この間、森林溪流における水収支や物質循環にも大きな変化が生じてきたと考えられ、いわゆる「森林の水源涵養機能」をより広域で、歴史的経過も踏まえ評価することも重要な視点になると考えられる。とくにトドマツ人工林に関しては、今後10～20年の間に主伐期を迎える林分も多く、次世代の森林施業、森林管理を考えるうえでこれらの基礎データを活用できる機会が増えることが期待される。また、今回は地形・地質要因は統一し、林相の違いのみに着目して採水分析を実施したが、前述のとおり、本試験地は一般的な森林水文試験地に比べ低標高、緩傾斜の試験地といえ、データからもその特性が読み取れる結果であった。また、人工林においては植栽木の樹齢による養分要求度や林床植生の種組成、バイオマスの変化も十分に予想される。したがって広く森林の水源かん養機能を議論する際には地形特性・林齢にも留意する必要がある、林相と林齢、地形の組み合わせによって複数の集水域を類型化し機能評価

を行うことが有効と考えられる。

引用文献

阿部俊夫・山野井克己・溝口康子 (2013) 定山溪森林理水試験地の長期流出特性. 北方森林研究61 : 125-128.

Aitkenhead, J. A. and McDowell, W.H. (2000) Soil C:N ratio as a predictor of annual riverine DOC flux at local and global scales. *Global Biogeochemical Cycles* 14(1): 127-138.

Allan, J. D. (1995) *Stream ecology: Structure and Function of Running Waters*. Chapman & Hall, London.

Barnes, R.T., Raymond, P.A. and Casciotti, K.L. (2008) Dual isotope analyses indicate efficient processing of atmospheric nitrate by forested watersheds in the northeastern U.S. *Biogeochemistry* 90: 15-27.

Clair, T. A. and Ehrman, J.M. (1994) Variation in discharge and dissolved organic carbon and nitrogen export from terrestrial basins with changes in climate: A neural network approach. *Limnology and Oceanography* 41: 926-927.

Dewalle, D.R., Buda, A.R., Eismeir, J.A., Sharpe, W.E., Swistock, B.R., Craig, P.L. and O'driscoll, M.A. (2005) Nitrogen cycling on five headwater forested catchments in Mid-Appalachians of Pennsylvania. *Dynamics of River Corridors and Wetlands*. (Proceedings of symposium S4 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguacu, Brazil, April 2005) IAHS Publ. 294.

Dillon, P.J. and Molot, L.A. (1997) Effect of landscape form on export of dissolved organic carbon, iron and phosphorus from forested stream catchments. *Water Resources Research* 33: 2591-2600.

Fisher, S.G. and Likens, G.E. (1973) Energy flow in Bear Brook, New Hampshire: An integrative approach to stream ecosystem metabolism. *Ecological Monographs* 43: 421-439.

Freeman, C., Evans, C.D., Monteith, D.T., Reynolds, B. and Fener, N. (2001) Export of organic carbon from peat soils. *Nature* 412 (6849): 785-785.

藤枝基久・野口正二・小川真由美・志水俊夫・坪山良夫・細田育広 (1996) 宝川森林理水試験地水文観測53年間の記録. 森林総研研報370 : 77-120.

福島慶太郎 (2012a) 窒素の循環. 森林立地学会編, 森のバランス 植物と土壌の相互作用. 227-235. 東海大学出版会, 神奈川.

福島慶太郎 (2012b) 森林生態系の物質循環および渓流水質からみた攪乱影響評価の可能性. 森林立地54 (2) : 51-62.

Fukuzawa, K., Shibata, H., Takagi, K., Nomura, M., Kurima, N., Fukuzawa, T., Satoh, F. and Sasa, K. (2006) Effects of clear-cutting on nitrogen leaching and fine root dynamics in a cool-temperate forested watershed in northern Japan. *Forest*

Ecology and Management 225: 257-261.

Fukuzawa, K., Shibata, H., Takagi, K., Satoh, F., Koike, T. and Sasa, K. (2007) Vertical distribution and seasonal pattern on fine-root dynamics in a cool-temperate forested watershed in northern Japan: implication of the understory vegetation, Sasa dwarf bamboo. *Ecological Research* 22: 485-495.

林 誠二・後藤光亀・須藤隆一 (1995) 融雪期の森林域における溶存態有機物の流出特性に関する研究. 環境工学研究論文集32 : 171-178.

Hobbie, J.E. and Likens, G.E. (1973) Output of phosphorous, dissolved organic carbon and fine particulate carbon from Hubbard Brook watersheds. *Limnology and Oceanography* 18: 734-742.

Inamdar, S.P. and Mitchell, M.J. (2006) Hydrologic and topographic controls on storm-event exports of dissolved organic carbon (DOC) and nitrate across catchment scales. *Water Resources Research* 42, W03421, doi:10.1029/2005WR004212.

環境庁 (1990) 非特定汚染源負荷調査マニュアル. 環境庁, 東京.

Kohler, S.J., Buffam, I., Seibert, J., Bishop, K.H. and Laudon, H. (2009) Dynamics of stream water TOC concentrations in a boreal headwater catchment: Controlling factors and implications for climate scenarios. *Journal of Hydrology* 373: 44-56.

国立環境研究所 (2014) 国立環境研究所研究プロジェクト報告第107号「窒素飽和状態にある森林域からの窒素流出負荷量の定量評価および将来予測」. ISSN (online) 2187-9508.

Kortelainen, P., Saukkonen, S. and Mattson, T. (1997) Leaching of nitrogen from forested catchments in Finland. *Global Biogeochemical Cycles* 11: 627-638.

小松 光・久米朋宣・大槻恭一 (2007) 流域水収支データの現代的意義 - 森林蒸発散を考えるために -. 日本森林学会誌89 : 346-359.

國崎貴嗣・甲田朋子 (2006) 林冠疎開度による低地帯森林の降雪遮断率の推定. 岩手大学演習林報告36 : 57-65.

Lydersen, E. and Henriksen, A. (1994) Total organic carbon in streamwater from four long-term monitored catchments in Norway. *Environment International* 20: 713-729.

McDowell, W.H. and Likens, G.E. (1988) Origin, composition and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook valley. *Ecological Monographs* 58: 177-195.

Moeller, J.R., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Petersen, R.C., Cushing, C.E., Sedell, J.R., Larson, R.A. and Vannote, R.L. (1979) Transport of dissolved organic carbon in streams of differing physiographic characteristics. *Organic Geochemistry*

I: 139-150.

- 長坂晶子・河内香織・柳井清治・長坂 有・小野寺賢介 (2003) 海岸山地溪流における有機物動態と源流域の果たす役割. 平成12~14年度重点領域特別研究報告書. 森林が河口域の水産資源に及ぼす影響の評価. 北海道立林業試験場・北海道立中央水産試験場・北海道立水産孵化場.
- 長坂晶子・河内香織・柳井清治 (2006) 河川・沿岸域への森林有機物の供給過程. 山下 洋・田中 克 (編) 森川海のつながりと河口・沿岸域の生物生産. 水産学シリーズ 157. 59-73. 恒星社厚生閣. 東京.
- 中井裕一郎・北原 曜・坂本知己・齊藤武史・寺嶋智巳 (1993) 森林における降雪の遮断蒸発. 日本林学会誌75:191-200.
- Ogawa, A., Shibata, H., Suzuki, M., Mitchell, M.J. and Ikegami, Y. (2006) Relationship of topography to surface water chemistry with particular focus on nitrogen and organic carbon solutes within a forested watershed in Hokkaido, Japan. *Hydrological Processes* 20: 251-265.
- 大手信人・徳地直子 (2010) 森林生態系の物質循環に与える水文過程の影響: 窒素流出に着目して. 土壌の物理性114: 43-47.
- 大手信人 (2011) 森林からのDOMの流出機構とフラックス. 日本土壌肥科学会 (編) 溶存有機物の動態と機能 - 土壌-河川-海を結んで -. 91-118. 博友社, 東京.
- Peichl, M., Moore, T.R., Altaf Arain, M., Daiva, M., Brodkey, D. and McLaren, J. (2007) Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in an age-sequence of white pine forests in Southern Ontario, Canada. *Biogeochemistry* 86: 1-17.
- Perdrial, J.N., McIntosh, J., Harpold, A., Brooks, P.D., Zapada-Rios, X., Ray, J., Meixner, T., Kanduc, T., Litvak, M., Troch, P.A. and Chorover, J. (2013) Stream water carbon controls in seasonally snow-covered mountain catchments: impact of inter-annual variability of water fluxes, catchment aspect and seasonal processes. *Biogeochemistry* DOI 10.1007/s10533-013-9929-y.
- Petrone, K.C., Jones, J.B., Hinzman, L.D. and Boone, R.D. (2006) Seasonal export of carbon, nitrogen, and major solutes from Alaskan catchments with discontinuous permafrost. *Journal of Geophysical Research* 111, G02020, doi: 10.1029/2005JG000055.
- 坂本知己・高橋正通・寺嶋智巳・中井裕一郎・松浦陽次郎 (1998) 山地小流域からの炭素流出量. 日本林学会北海道支部論文集46: 175-177.
- Schelker J., Grabs, T., Bishop, K.H. and Laudon, H. (2013) Drivers of increased organic carbon concentration in stream water following forest disturbance: Separating effects of changes in flow pathways and soil warming. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 118: 1814-1827.
- 柴田英昭・戸田浩人・福島慶太郎・谷尾陽一・高橋輝昌・吉田俊也 (2009) 日本における森林生態系の物質循環と森林施業との関わり. *日本森林学会誌*91: 408-420.
- 柴田英昭・福澤加里部 (2010) 北海道北部の天然林生態系における窒素循環プロセスの特性. *環境科学会誌*23 (4): 277-283.
- 柴田英昭・戸田浩人・稲垣善之・館野隆之輔・木庭啓介・福澤加里部 (2010) 森林源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.
- 森林総合研究所編 (2012) 森林が使い切れなくなった窒素. 36p. 森林総合研究所 平成24年版研究成果選集. ISSN 1348-9828.
- 白岩孝行 (2012) アムール川流域における溶存鉄の挙動-アムール・オホーツクプロジェクトの成果より-. *月刊海洋* 504, 44 (10): 586-593.
- 田村隆雄・岡部健士・星川 豪・末永慶寛・渡辺康之 (2009) 地質の異なる2つの山地森林流域における大雨時のNO₃⁻-N流出機構の比較検討. *水工学論文集*53: 499-504.
- Tank, J.L., Rosi-Marshall, E.J., Griffiths, N.A., Enterkin, S.A., and Stephen, M.L. (2010) A review of allochthonous organic matter dynamics and metabolism in streams. *Journal of the North American Benthological Society* 29(1): 118-146.
- 戸田浩人・笹賀一郎・佐藤冬樹・柴田英昭・野村 睦・市川一・藤戸永志・鷹西俊和・清和研二・塚原初男・飯田俊彰・谷口憲男・中田 誠・桑原 繁・内田武次・春田泰次・井上 淳・八木久義・塚越剛史・蔵治光一郎・二田美穂・小野 裕・鈴木道代・今泉保二・山口法雄・竹中千里・万木 豊・川那辺三郎・安藤 信・中西麻美・西村和雄・山崎理正・長山泰秀・土肥奈都子・片桐成夫・小藤隆一・新村義昭・井上章二・江崎次夫・河野修一・藤久正文・岩松 功・今安清光・中村誠司・塚本次郎・野上寛五郎・榎木 勉 (2000) 全国大学演習林における渓流水質. *日本森林学会誌*82 (3): 308-312.
- 徳地直子・大手信人・白井伸章・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.
- Triska, F.J., Sedell, J.R., Cromack Jr. K., Gregory, S.V. and McCorison, F.M. (1984) Nitrogen budget for a small coniferous forest stream. *Ecological Monographs* 54(1): 119-140.
- 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.

- Wallace, J. B., Eggert, S.L. and Whiles, M.R. (1997) Stream organic matter inputs, storage, and export for satellite Branch at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina, USA. *Journal of the North American Benthological Society* 16: 13-161.
- Webster, J.R. and Meyer, J.L. (1997) Stream organic matter budgets –introduction. *Journal of the North American Benthological Society* 16: 3-161.
- Wiegner, T.N., Kaplan, L.A., Newbold, J.D. and Ostrom, P.H. (2005) Contribution of dissolved organic C to stream metabolism: a mesocosm study using ¹³C-enriched tree-tissue leachate. *Journal of the North American Benthological Society* 24(1) : 48-67.
- Winterdahl, M., Futter, M., Kohler, S., Laudon, H., Seibert, J. and Bishop, K.H. (2011) Riparian soil temperature modification of the relationship between flow and dissolved organic carbon concentration in a boreal stream. *Water Resources Research* 47 (8), W08532, doi:10.1029/2010WR010235.
- 楊 宗興・木平英一・武重祐史・杉山浩史・三宅義則 (2004) 渓流水のNO₃⁻濃度と森林の窒素飽和. *地球環境* 9 (1) : 29-40.
- 楊 宗興 (2014) 流域における窒素除去過程としての脱窒の役割. *日本水文科学会誌* 44 (4) : 185-195.

Summary

We conducted three years' observation of stream DOC and DIN concentration in two forested headwater catchments with different forest types (mature Todo-fir plantation forest and old-growth deciduous forest). Water samples were corrected in normal water stage (two weeks interval) and during storm events (snow-melt and summer rainfall).

Seasonal variations of DOC concentration were similar in two catchments, however, those of NO₃-N in Todo-fir plantation forest were increased particularly during winter and the value indicated higher level (0.6mgN/L) within Japanese archipelago. Characteristics of material transport during storm events were different between snow-melt and summer rainfall. In spring, DOC and DIN concentration were increasing with increasing stream discharge, while in summer, both concentration were decreasing with increasing stream discharge, indicating the difference in storage capacities of dissolved material in riparian zones among season.

Our observation data suggested that difference in material transport between Todo-fir plantation forest and deciduous forest resulted from (1) difference in amount of nitrate leaching caused by difference in amount of nitrate uptake by vegetation due to presence or absence of Sasa bamboo, (2) difference in stream

discharge caused by difference in interception evaporation between deciduous and evergreen forest canopy; in deciduous forest stream, although higher runoff rate (ratio of runoff height to precipitation) drains larger stream water than those of Todo-fir plantation stream, nitrate loss is regulated because nitrogen is strongly retentive due to internal nutrient cycling within the catchment.

Key words

headwaters, runoff characteristics, dissolved inorganic nitrogen, dissolved organic carbon, Todo-fir plantation forest, deciduous forest