

森林溪流から流出する窒素になぜ注目するか？

長坂 有

はじめに

通常、森林から流れ出た水は、流量を増しながら農村や都市を経て大きな川へと変わるうちに、様々な物質がとけ込み、水質が変化していきます。そのため下流域では排水などで川の水を汚さないように、浄化施設などを通じて良好な水質を維持するよう努めています。森林溪流と聞くと、一般的にはきれいな清流を思い浮かべる人が多いと思いますが、水質的にきれいとはどういうものなのでしょうか。水源ともいえる源頭部の渓流水質がどのようにして形成されるのか、森林の伐採などにより影響をうけることはないのかなど、ここでは特に窒素という物質に着目して紹介します。

渓流水質を構成する要素

森林に降った雨は、一部は樹冠に受け止められますが、地表、土壌層、基岩層などを経由して溪流に流出してきます(図-1)。この雨水には海水や大気中の物質が溶け込んでいます。したがって溪流の水質とは、降雨に含まれる成分が地中で減少したり、土壌や基岩から溶け出した成分が追加されたりした結果として現れたもの、ということになります。

ここでいう『水質』とは、水に溶け込んだ陰イオン(マイナス)、陽イオン(プラス)の濃度を指します。近くにミネラルウォーターや天然水のペットボトルがあったら、栄養成分表示を見てみましょう(写真-1)。ナトリウム、マグネシウム、カリウム、カルシウムなどの、いわゆるミネラル類と呼ばれる陽イオンが100mlあたり何mg溶け込んでいるかが表示されており、これらを適量含む水がおいしい水ともいわれます。水中のイオンはプラス、マイナスが電気的に等量存在することになっているので、上記の陽イオン量に見合った量の陰イオン(塩素、硝酸、硫酸イオンなど)が同様に含まれています。

栄養成分表示(100mlあたり)	
エネルギー	0 kcal
たんぱく質・脂質・炭水化物	0 g
ナトリウム	1.5 mg
カルシウム	2.2 mg
カリウム	0.4 mg
マグネシウム	0.9 mg

写真-1 市販のミネラルウォーターに表示されている水質

ミネラルは地中の岩石にも多く含まれるため、森林土壌を通過して流出してくる水は、通常、雨水よりもこれらの濃度が高くなります。地下から湧き出る温泉の水は、その特に濃いものと言えるでしょう。一方、アンモニウム態窒素(NH_4^+)や硝酸態窒素(NO_3^-)といった窒素を含むイオンは、土壌層を通過後、ミネラルとは逆にその濃度が減少します。これは、窒素が生物にとって不可欠であるにもかかわらず、森林生態系では不足気味な元素であるため、微生物を含めた森林土壌中に取込まれる、あるいは消費分解されるなどして化学的に変化するためです。

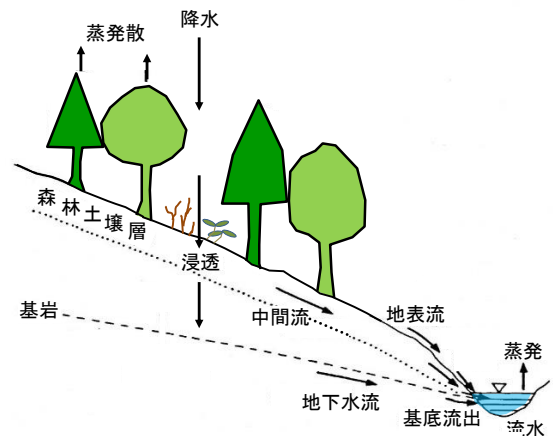


図-1 森林からの水流出

森林の窒素循環

森林内の窒素についてももう少し詳しく見ていきます。植物は森林土壌中にもたらされた窒素を根から吸収して、生存、成長に必要なDNAやタンパク質などの有機物に合成する一方、落葉、落枝などのいわ

ば老廃物の排出、枯死、分解などの過程で、再び一部の窒素を放出します（図-2）。林内には窒素固定菌など、大気窒素（ N_2 ）を植物が利用しやすい無機態窒素（アンモニア態窒素や硝酸態窒素）へと変える微生物もあり、それらを繰り返し利用するリサイクルが常にはたっています。また、湿地のような酸素の少ない嫌気的な土壌環境では、無機態窒素は脱窒菌により大気窒素に戻されるなど、森林内の窒素の生物化学的変化は複雑です。この窒素循環の中で、土壌層を通過した窒素がどのくらい渓流水に流出するかによって、渓流水に含まれる窒素濃度が変わってきます。一般的な森林では、栄養分としての窒素が十分にあるわけではないので、生態系内で保持される傾向にあり、容易には流出しないしくみとなっています。

窒素は陸上生物のみならず、水中の生物にとっても必須元素です。そのため渓流水に溶け込んだ窒素は、藻類やバクテリアなどの微生物にも吸収されます。「三尺流れれば水清し」ということわざがありますが、これは川に流した汚染物（栄養）などを、微生物が吸収、浄化する働きのとえといわれています。そのため渓流水の窒素濃度は低く維持され、生物学的にいえば貧栄養の水（＝きれいな水）ということができます。

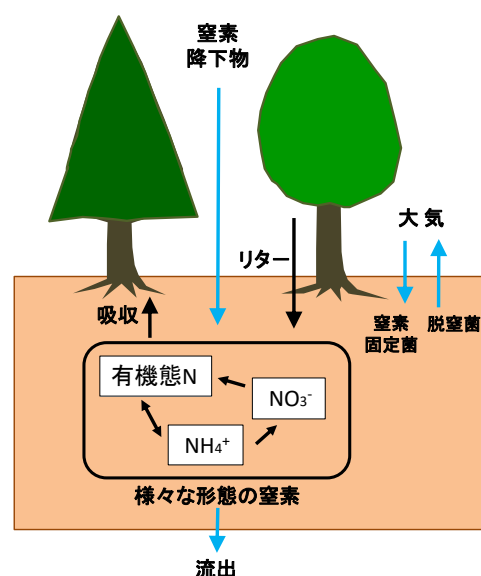


図-2 森林内での窒素の動き

窒素に注目する理由

水質面で気を付けなくてはいけないのは、この窒素が多すぎる場合（富栄養化）です。農業では作物の収穫量を少しでも増やすため、窒素肥料を積極的に土壌に添加します。作物が収穫されることで一部の窒素は農地から回収、すなわち除去されることとなりますが、余剰分は地下を通じて河川に流出します。過剰な窒素は、特定の水草を大繁茂させる、あるいは湖などの止水域ではアオコと呼ばれるラン藻を増殖させることにより、水産生物へ悪影響を生じさせることがあります。平水時の渓流水に含まれる窒素の大部分は硝酸態窒素ですが、河川の下流域では人為的な影響により様々な窒素化合物も流れ込んでくるので、環境省や都道府県が実施する公共水質調査では、これらすべてを合計した『全窒素』という量を測定し富栄養化の指標としています。例えば水産用水基準では、湖沼の全窒素濃度を対象魚種に応じて、コイ・フナでは1.0mg/L以下、ワカサギで0.6mg/L以下、サケ科・アユで0.2mg/L以下、と定めています。また、農業（水稻）用水基準でも、全窒素濃度を1.0mg/L以下と設定しています。このような基準は現在のところ河川水では定められていませんが、下流の人間活動による窒素添加を考慮すると、森林溪流の硝酸態窒素濃度は1.0mg/Lを大きく下回る値であることが望ましいといわれています（福島、2012）。

ところが近年、関東や関西の都市近郊の森林溪流で、この硝酸態窒素の濃度が1.0mg/Lを越える窒素飽和という現象が問題になってきました。これは通常の森林溪流に比べて3倍くらい高い値です。その原因として農業由来のアンモニアや、工業、排気ガスからの窒素酸化物などが、大気、降水を通じて森林にもたらされていることが指摘されています。北海道ではこのような現象はまだ報告されていませんが、最近、戦後の拡大造林で植栽された人工林が一斉に主伐時期を迎えるにあたり、伐採による森林溪流からの窒素流出増加の可能性も出てきました。道内の渓流水質データは箇所数が少なく、大学演習林内など地域的にも限られた場所での調査が実施されていません。また、主要な人工林の樹種はトドマツ、カラマツと、本州と異なることもあり、今後の施業の影響等をモニタリングし、データを蓄積する必要があります。

トドマツ高齢人工林流域の水質

では、北海道の森林溪流はどの程度の窒素濃度なのでしょう。空知管内にあるイルムケップ火山山麓の小流域で調べてみました。イルムケップ山は標高 865m の成層火山で、上部は溶岩や火砕流堆積物などの火山岩が、標高 250m 付近から下にはそれよりも古い時代の堆積岩が横たわっており、標高によって小流域の地質が異なっています。流域の平均傾斜は 11.2~24° と比較的緩く、これら小流域がいくつか合流して、山頂から放射状に流れ出る 1000ha クラスの流域を形成します。トドマツ人工林はこの山塊の標高 500m 付近から下部に広く成林しており、その多くが 50 年生前後と、比較的高齢に達しています(表-1)。

これらの流域で、2014 年 5 月~10 月の無降雨日(平水時)、およそ 2 週間おきに渓流水を採取し、硝酸態窒素の濃度を分析しました。なお、アンモニア態窒素はほとんど検出されなかったためここでは割愛します。

すると流域によって濃度が大きく違うことがわかりました(図-3)。広葉樹天然林では概して濃度が低いのですが、トドマツ人工林ではかなりばらつきがあり、特に濃度が高い流域では 1.0mg/L を超えていました。全国の森林溪流で水質を調べた事例では、硝酸態窒素濃度の平均的な値は 0.35mg/L 程度といわれているので(広瀬ら, 1988)、これと比較してもかなり高い値です。これは前章で述べた窒素飽和現象並みの高い値といえますが、道内の森林で大気汚染由来などの窒素増加は報告されていません。

図-4 は、これら定期観測地点にさらにトドマツ人工林流域 10 箇所あまりを追加して水質の一斉観測を行った結果を示したのですが、地質タイプにかかわらず硝酸態窒素濃度と流域に占めるトドマツ林割合の相関が高いことが示され(長坂・長坂, 2015)、トドマツ高齢人工林において、窒素が保持されにくく流出傾向にあることが示唆されました。詳細なメカニズムについては現在検証中ですが、最近、トドマツの落ち葉からの窒素無機化(放出)が早い、という報告が出てきています。また、本州の老齢スギ、ヒノキ人工林では、窒素の吸収、利用が低下している可能性が指摘されており、ササなどの下層植生が少ないトドマツ高齢人工林では、窒素を吸収、保持する機能が少ないことなども考えられます(柴田・福澤, 2010)。

表-1 調査地一覧

流域 No.	面積ha	地質	林相	林齢	
				トドマツ林割合(%)	年
1	16.8	堆積岩	トドマツ	85	56
2	10.2	堆積岩+火山岩屑	トドマツ	89	56
4	11.9	堆積岩+火山岩屑	トドマツ	83	55
5	10.9	堆積岩+火山岩屑	トドマツ	90	54
7	16.0	火山岩(集塊岩)	トドマツ	64	41
8	6.1	火山岩(集塊岩)	トドマツ	87	50
9	5.4	火山岩(集塊岩)	トドマツ	68	49
10	8.0	火山岩(集塊岩)	トドマツ	86	50
11	9.1	火山岩(集塊岩)	混交	29	55
12	12.3	火山岩(溶岩)	広葉樹	0	-
13	13.3	火山岩(溶岩)	広葉樹	0	-
14	5.4	火山岩(溶岩)	広葉樹	0	-
15	5.8	火山岩(溶岩)	トドマツ	53	55
16	12.5	火山岩(溶岩)	混交	24	49
17	18.1	火山岩(溶岩)	混交	21	45,35
18	51.1	火山岩(溶岩)	広葉樹	0	-
19	14.7	堆積岩+火山岩屑	混交	23	-
20	14.7	堆積岩+火山岩屑	広葉樹	0	-

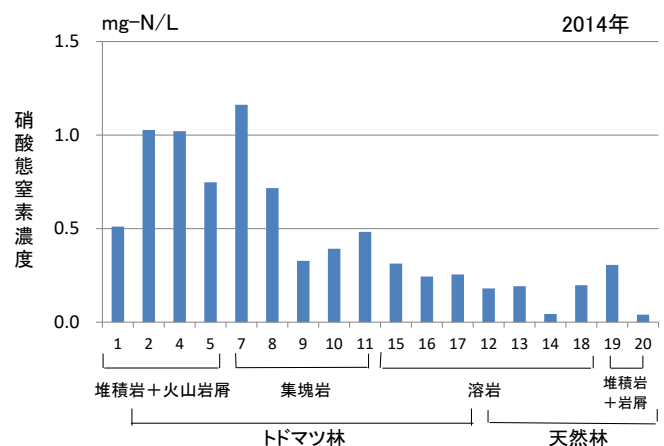


図-3 各流域の平水時の硝酸態窒素濃度

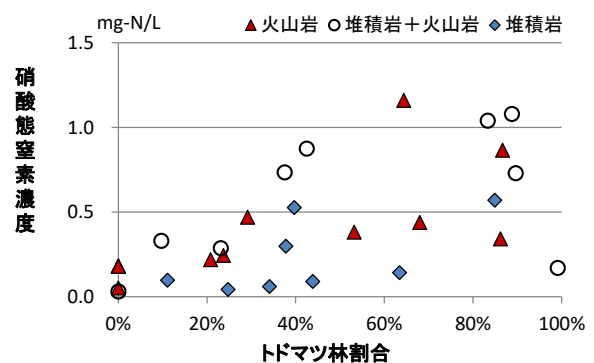


図-4 トドマツ林割合と硝酸態窒素濃度の関係

施業が窒素流出に及ぼす影響を調べる

2015～2016年にかけて、表-1の試験地ではトドマツ人工林の小流域のいくつかを流域単位で伐採して、水質の変化を追跡することになりました。伐採方法としては、通常の皆伐だけでなく、林内に混生していた広葉樹を一定量残す「保残伐」も採用しています(尾崎ら, 2018)。ある流域では皆伐、別の流域では広葉樹少量保残(混生していた広葉樹を10本/ha残す)、広葉樹中量保残(同様に50本/ha残す)、広葉樹大量保残(同様に100本/ha残す)、というように、広葉樹を残す量を変えて伐採が行われました。その際、伐採しない対照流域も残して、施業が水質変化に及ぼす効果を検証します(図-5)。これは今回のように流域サイズがそろった一見よく似た流域でも、水質が大きく異なるため、水質の数値そのものではなく、伐採前後の期間でどれくらい変化したかという相対値で比較する方が適切なためです。

現在、これまでの多くの研究事例に見られるように、施業後に硝酸態窒素濃度が高くなる現象が確認され始めていますが(長坂ほか, 2018)、これら小流域が合流した大流域(森林の出口)では濃度は高くないこともわかってきました。今後、再び植栽されたトドマツの成長、保育の過程でどのように水質が変化していくのか、モニタリングを継続していく予定です。



図-5 トドマツ人工林での保残伐試験地の1例

No. 8流域は広葉樹を10本/ha残した少量保残区

No. 9流域は対照区として非伐採

おわりに

今回、源頭部のトドマツ高齢人工林で溪流の硝酸態窒素濃度がかなり高い場合があることが明らかになり、伐採によってさらに濃度が上がることも示唆されました。これまで北海道有林では1カ所での皆伐面積を1ha程度とするなど、河川下流の水質変化にも気をつけてきましたが、成熟した多量の人工林を計画的に伐採するために、伐採面積を増やす必要性も生じています。上流域での伐採箇所数や面積が下流の水質にどのように波及するのか、その期間はどれくらいなのか、流域サイズの拡大にともなう水質変化も考慮して、下流域への影響を検討する必要があります。

(森林環境部環境グループ)

引用文献

- 福島慶太郎(2012) 森林生態系の物質循環および溪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
- 広瀬 顕・岩坪五郎・堤 利夫(1988) 森林流出水についての広域的考察(1). 京大演報 60:162-173.
- 長坂晶子・長坂 有・速水将人(2018) 保残伐の導入は水土保全機能への影響を緩和できるか. 光珠内季報 187:10
- 長坂 有・長坂晶子(2015) 山地溪流の水質に及ぼす、林相、地質の影響 — イルムケップ山塊の事例 — 北方森林研究 63:59-62
- 尾崎研一・明石信廣・雲野 明・佐藤重穂・佐山勝彦・長坂晶子・長坂 有・山田健四・山浦悠一(2018) 木材生産と生物多様性に配慮した保残伐施業による森林管理—保残伐施業の概要と日本への適用— 日本生態学会誌 68:101-123

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