



Title	森林土壌からの栄養塩流出
Author(s)	山田, 俊郎; 橘, 治国
Description	第9回衛生工学シンポジウム (平成13年11月1日 (木) -2日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 2 環境保全 . P2-3
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 9, 93-98
Issue Date	2001-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7151
Type	departmental bulletin paper
File Information	9-2-3_p93-98.pdf



2-3

森林土壌からの栄養塩流出

山田俊郎(豊橋技術科学大学)、橘治国(北海道大学)

1. はじめに

森林土壌は森林河川への水質成分の主要な供給源¹⁾である。森林土壌、特に表層の有機質土壌は物質を貯蔵・変換する場として重要な役割を果たしており、森林から流出する栄養塩の多くもその表層土壌部に存在し、そこを中心に森林内を循環していると考えられる^{2) 3) 4)}。しかし、森林内での物質循環系外への特に栄養塩成分の流出や、その流出と河川水質との関わりについては明確にされているとは言えない。本研究は森林河川の水質形成に対する森林土壌の基本的な役割を解明することを目的とし、森林生態系の活動と密接に係る窒素成分に着目して森林土壌を用いた室内カラム実験およびフィールド調査結果から、栄養塩流出に対する森林流域の状況の影響について検討した。以下に、研究対象ごとに、説明と結果の考察を行う。

2. 各土壌層からの栄養塩流出量

2.1 供試土壌および実験概要

森林土壌は性質の大きく異なる土壌層からなる。各土壌層からの栄養塩流出量を確認するため、層別に採取した森林土壌に対して室内カラム実験を行った。実験に用いた森林土壌は、北海道恵庭市漁川水系モイチャン川上流部の河川近傍の南向き斜面で採取した。土壌表層約2~4 cmは植物遺体(リターフォール)で覆われている。採土した地点の土壌層位を図1に示す。厚さ1~3 cmの未分解の落葉や落枝といったリターの層が最上部にあり、これをL層とした。その下に1~3 cmの厚さで、リターの分解が進み、団粒構造が発達した有機物中心の黒褐色の層があり、F層とした。さらにその下は鉱質土壌が中心の茶褐色の層が5~20 cmあり、A層とした。その下は黄色の火山灰土であった。これをB層とした。以上、森林土壌を大きく4つに分けて採取した。各層の土壌の含水比、強熱減量、炭素含量、窒素含量、CN比を表1に示す。これらの土壌の化学性は日本の森林土壌⁵⁾と同程度で、L層は炭素含量260 mg・g⁻¹、窒素含量12 mg・g⁻¹と他の層位よりも多量に含まれている。火山灰土のB層は表層に比べて炭素含量、窒素含量ともに少ない。

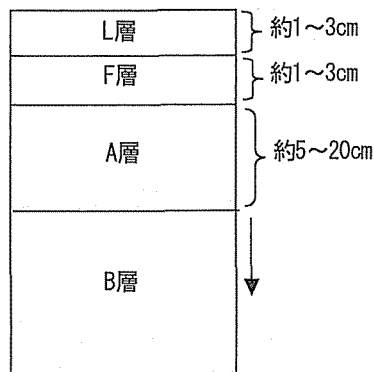


図1 土壌採取現場の土壌層位

表1 供試森林土壌の層位別含水比、強熱減量、C含有量、N含有量、CN比

土壌層位		L	F	A	B
含水比	%	238	80	42	29
強熱減量	%	525	179	58	29
C含量	mg・g ⁻¹	267	71	9.0	1.2
N含量	mg・g ⁻¹	12.1	3.9	0.55	0.10
CN比		22.1	18.3	16.3	11.8

L、F、A、Bの各層位の土壌を、直径10 cm高さ約15 cmの円筒塩化ビニール性パイプの下部に充填し、実験カラムとした。充填した土壌重量は乾燥重量でL、F、A、B層それぞれ100g、290g、650g、720gである。各カラム上部から滴下強度約20 mm・h⁻¹で約3時間、500 mlの脱イオン水をカラムに滴下した。1週間を1サイクルとし、1日目、2日目に滴下操作を行い、残りの5日間は無降雨期間とした。実験は4サイクル行った。流出水を0.45 μmのメンブランフィルターでろ過処理後、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、全窒素(DN)を分析した。

2.2 結果と考察

表2に流出した単位土壌乾燥重量あたりの窒素成分量を示した。1サイクル目のNO₃⁻-NやNH₄⁺-Nの流出水中の濃度は他の滴下時と比べて高く、これは土壌を採取するときやカラムに充填するときに土壌を攪乱した影響と考えられるため、土壌層が一様になった2サイクル目以降の流出水からの流出した単位重量あたりの窒素成分量を求めた。どの土壌層からも窒素の多くがNO₃⁻-Nとして流出する。NO₃⁻-NやDONと比較してNH₄⁺-N流出量は少ないが、特にA層やB層からの流出量はL層やF層からの流出水と比べて少ない。窒素源となる植物リターがA層やB層にないことに加え、正電荷を持つNH₄⁺は鉍質土壌に吸着されやすいため⁶⁾、鉍物を多く含むA層B層から流出されにくいと考えられる。単位重量あたりの窒素成分流出量はL層で最も多く、F層、A層、B層と下層になるほど低くなる。L層、F層とA層、B層の間に大きな差があり、実際の森林では数cm程度の厚さで堆積する森林表層土壌が窒素源となることがわかる。

表2 単位土壌乾燥重量あたりの窒素流出量

		L	F	A	B
乾重量	kg	0.10	0.29	0.65	0.72
累計滴下水量	ml	3000	3000	3000	3000
累計流出水量	ml	2878	2746	2898	2903
DN	mg・kg ⁻¹	81	13	1.4	1.4
NO ₃ ⁻ -N	mg・kg ⁻¹	63	8.0	1.0	0.7
NO ₂ ⁻ -N	mg・kg ⁻¹	0.05	0.04	0.03	0.02
NH ₄ ⁺ -N	mg・kg ⁻¹	1.0	0.6	0.02	0.06
DON	mg・kg ⁻¹	17.2	4.2	0.3	0.6

3. 表層土壌水分状態と栄養塩流出

3.1 実験概要

栄養塩負荷発生量が多い森林表層土壌の溶存態窒素成分の流出は、降雨量や温度、そして土壌中の溶存態窒素成分含量など、土壌の状況で変化すると考えられる。特に土壌中の生物活動に影響を与える要素を考慮する必要がある。生物活動に影響を与える要素としては温度や含水率、土壌のCN比などがある⁷⁾が、夏期の短期流出を考える場合、温度や土壌CN比の時間的な変動は小さい⁸⁾ため、降雨履歴、すなわち土壌中の水分量が土壌の状況を変化させていると考えられる。そこで土壌の水分含量が窒素流出に与える影響を検討した。

本実験には 2 節の実験で用いた L 層と F 層を混合したもの（森林表層土壌）を用いた。土壌内を均質にするため、乾燥土壌 12g に対して 250 ml 脱イオン水の通水したのち 24 時間で風乾したものを実験に用いた。直径 6.5 cm (面積 33.2 cm²)、高さ約 7 cm の円筒の底部にポリプロピレン製の網を接着し、網の上に有効径 2.7 μm のグラスファイバーフィルター (GF/D) を敷いたカラムに、高さ約 5 cm であらかじめ含水率を測定した森林表層土壌 (前述した L 層と F 層) を乾重量 11.0g、高さ約 4 cm で充填した。比較的乾燥した時期における現場土壌の含水比は 100% 前後であり、供試土壌の最大容水量が 420~450% であったため、培養中の土壌の水分条件を乾燥 (含水比 100%)、湿潤 (含水比 250% (最大容水量の 60%))、飽和 (含水比 420% (最大容水量)) の 3 段階に設定し、水を加えて含水率を調整した。25°C の恒温室内で培養を行い、一定の含水率を保つよう約 3 日に 1 度、水分調整した。培養期間がそれぞれ 2 日、7 日、14 日、21 日、28 日経ったカラムについて約 2 時間で 250 ml の脱イオン水を滴下し、流出水を得た。流出水は有効径 0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過後、分析を行った。また初期通水および土壌水分条件調整に用いた脱イオン水のかわりに 5% ATU (アリルチオ尿素) 水溶液を用いて同様の操作も行った。

3.2 結果と考察

図 2~4 に各カラムからの流出水の窒素成分濃度を示した。カラムから流出する窒素成分の多くは DON であった。2 節における実験結果と異なるが、実験前の通水によって溶出しやすい無機態窒素が洗い出されたためと考えられる。DON 濃度は湿潤、飽和条件下で培養時間の経過とともに若干の増加が見られるが、1 ヶ月の培養期間ではほとんど濃度の変化はなく、約 2 mg · l⁻¹ 程度であった。NH₄⁺-N 濃度は NO₃⁻-N 濃度や DON 濃度と比べて低く、NO₂⁻-N の流出はほとんどない。乾燥条件では土壌から流出する NO₃⁻-N 濃度は培養時間とともに指数関数的 ($y = 4.3 \exp(-0.1x)$, $R^2 = 0.94$) に減少した (図 2)。土壌が乾燥しているため、硝化菌の活動が抑制⁹⁾されたものと思われる。湿潤カラムからの流出水の NO₃⁻-N 濃度は、培養初期は時間の経過とともに低下し、その後時間が経過すると NO₃⁻-N 濃度は上昇した。カラム内での土壌は好气的状態にあり、また表層土壌の CN 比が高いため NO₃⁻-N の不動化 (有機化) が生じている¹⁰⁾と推察される。培養 14 日目以降の NO₃⁻-N 流出濃度は、ATU 添加カラムで小さいことから、培養 14 日目以降の湿潤カラムでは硝化が活発になり、硝化によって生成される NO₃⁻-N 量が不動化される量を上回ったため流出濃度が上昇したといえる。飽和カラムでは無機態窒素成分の濃度は変化が小さく、DON 濃度が時間の経過とともに若干増加した。水分飽和条件下では窒素の無機化は生じないと思われる。ATU 添加を行ったカラムから流出する窒素濃度やその構成の経日変化は、ATU を添加していないカラムと比較すると乾燥条件および飽和条件では大きな差がみられなかった。過剰な水分や乾燥などの水分条件は表層土壌における硝化を抑制し、硝化に最適な水分条件が存在することが確認できた。どのカラムにおいても培養 7 日目で流出する NO₃⁻-N 濃度は減少したが、含水比の大きいカラムほど流出水中の NO₃⁻-N 濃度の減少傾向は強い。Davidson らは森林土壌での硝化速度の低さは、従来考えられていたように硝化そのものの速度のみでなく、NO₃⁻-N の不動化の寄与が大きい場合があることを示しており¹¹⁾、本実験においても土壌微生物による NO₃⁻-N の取り込みなどの不動化が流出 NO₃⁻-N 濃度の初期減少の要因として考えられる。14 日目以降は窒素無機化が顕著に現れ、14 日目以降の窒素無機化速度を概算すると 32 mgN · kg⁻¹ · week⁻¹ であり、既報の森林土壌を対象とした測定値¹²⁾¹³⁾と同程度であった。以上の結果より、森林表層土壌からの窒素の流出に土壌水分が大きく影響するといえる。

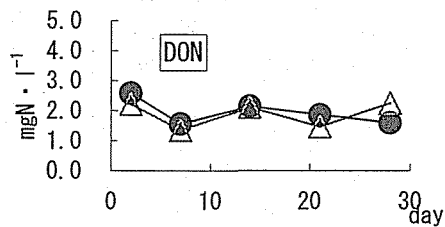
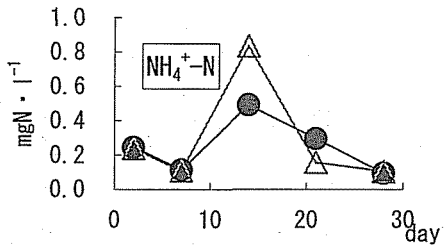
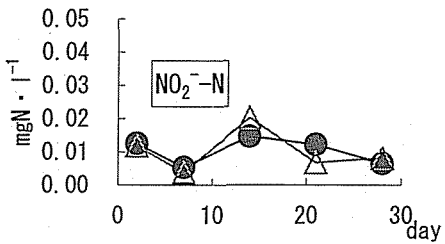
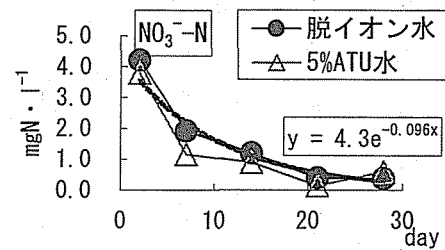


図2 土壤カラム実験結果
乾燥条件(含水比100%)培養カラムからの流出水中の窒素成分濃度変化

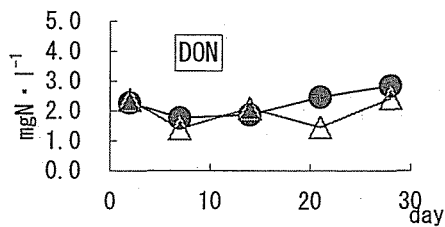
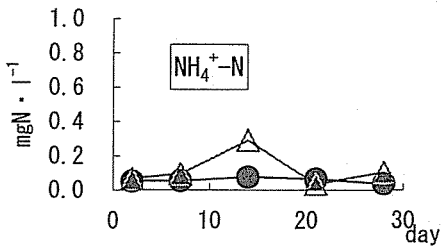
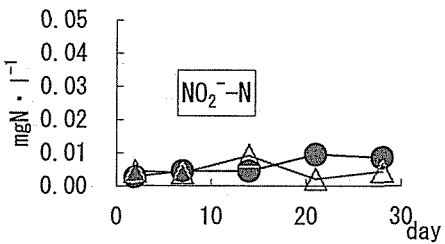
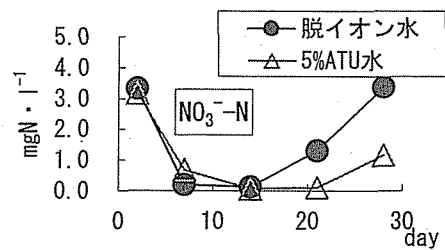


図3 土壤カラム実験結果
湿潤条件(含水比250%)培養カラムからの流出水中の窒素成分濃度変化

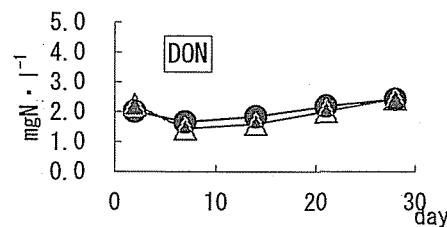
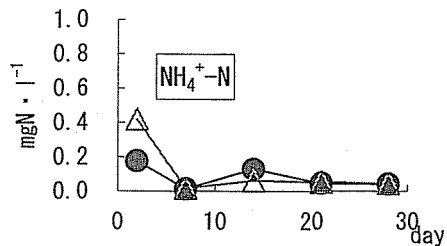
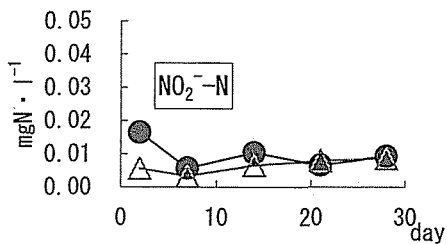
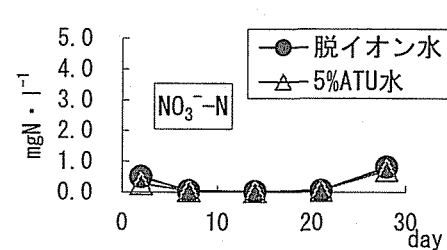


図4 土壤カラム実験結果
飽和条件(含水比420%)培養カラムからの流出水中の窒素成分濃度変化

4. 流域の状態と河川からの NO₃-N 流出

モイチャン川と、隣接する漁川を調査対象とし、1997年夏期に生じた5回の降雨イベント時に1～2時間間隔で採水を行った結果から、降雨時における比流量と比水質成分負荷流出量の関係を求めた。比流量と比水質成分負荷流出量の経験式(LQ式)は、Qは比流量(m³・km⁻²・s⁻¹)、Lは水質成分比負荷流出量(g・km⁻²・s⁻¹)、Cとnを係数として $L = C \times Q^n$ で表される。係数nは水質成分発生負荷量の流量との対応を示し、どのように流出してくるかという流出の特性を示す。一方係数Cは、負荷量の絶対量を決めるパラメーターであり、流域ごと、また成分ごとの特徴を示しているといえる。調査期間中の漁川、モイチャン川の最小比流量 Q₀ (漁川:0.067 m³・km⁻²・s⁻¹・モイチャン川:0.054 m³・km⁻²・s⁻¹)で比流量 Q を割ったものを単位比流量 Q' (Q' = Q / Q₀)とし、この単位比流量 Q' と比負荷流出量 L の関係を求めると、新たに係数 k を用いて $L = k \times Q'^n$ と表すことができる。この k 値は基底流量に対応する負荷量で、流域における水質成分の存在量(蓄積量)、すなわちその水質成分についての流域の特性を示している係数といえる。設定した最小比流量は2河川間で差が小さく、k 値の大きさを河川間で比較することが可能である¹⁴⁾。

漁川とモイチャン川における NO₃⁻-N 負荷流出に関する k 値を、調査した5回の降雨イベント毎に求め、流域の水分状態の指標となる晴天日数(降雨量5mm以下の期間)との関係を図5と図6に示した。NO₃⁻-N の k 値は、漁川で晴天日数と負の相関があり、晴天日数の指数関数で k 値は表現できた。

$$k_{\text{NO}_3} = 0.69 \times \exp \{ -0.12 \times t \}$$

ここで、k_{NO₃}:漁川における NO₃⁻-N の k 値(kg・km⁻²・day⁻¹)、t:晴天日数(降雨量5mm以下の期間)(day)である。モイチャン川では漁川と異なり、NO₃⁻-N の k 値の変動は小さく、ほぼ一定(k = 0.5 kg・km⁻²・day⁻¹)であった。k 値が小さくなりやすいということは、室内カラム実験の結果から土壌での NO₃⁻-N の不動化が進行しやすい乾燥状態にあると考えられる。一方、k 値が一定であるのは、土壌中で硝化と NO₃⁻-N の不動化が同時に生じている状況、土壌が湿潤状態を保ち、乾燥しにくい状態にあると考えられる。このことから、漁川流域の土壌は晴天が続くと乾燥しやすい状況にあり、モイチャン川流域は晴天期間が続いても乾燥しにくい状況にあると推察される。このように森林河川からの NO₃⁻-N の流出には、流域の土壌水分状態と密接に関係することがわかった。

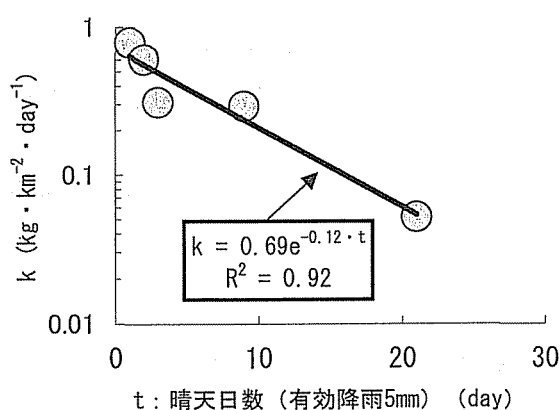


図5 漁川における晴天日数と硝酸態窒素のk値との関係

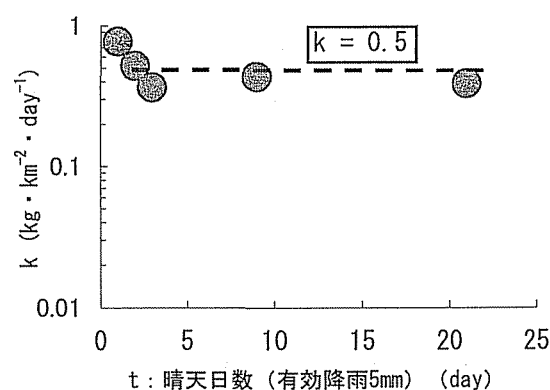


図6 モイチャン川における晴天日数と硝酸態窒素のk値との関係

5. まとめ

本研究では森林生態系の物質循環において重要な森林表層土壌に注目して、森林土壌を用いた室内カラム実験を行い森林土壌からの溶存態窒素成分の流出量およびその特性を検討した。その結果、森林土壌において表層の有機質土壌が主たる窒素供給源であることを確認した。森林表層土壌からの窒素流出特性は土壌の水分状態で異なり、特に NO_3^- -N 流出には影響することが明らかになった。すなわち土壌が乾燥している状態では硝化が抑制され窒素有機化が緩やかに進行するため NO_3^- -N 濃度は時間とともに減少し、湿潤な状態では窒素の有機化が進行するが同時に硝化を含む無機化も進行するので流出する NO_3^- -N 濃度は大きく変化する。このことはフィールド調査結果で得られた森林河川からの NO_3^- -N の流出特性からも確認できた。漁川のような乾燥しやすい森林流域からは生物利用可能な窒素成分である NO_3^- -N としての流出は小さくなり、モイチャン川のような湿潤な状態を保つ流域からは豊富に NO_3^- -N が流出される。このように流域土壌水分の状況、つまり森林の管理状況が森林河川からの NO_3^- -N 流出に大きく影響することが示唆された。

本研究を遂行するにあたり、北海道大学大学院工学研究科清水達雄教授、北海道森林管理局石狩森林管理署恵庭事務所藤生浩史所長、北海道開発局漁川ダム管理所の皆様の御指導、御協力をいただいた。ここに記し謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 塚本良則(1992) 森林水文学, 文永堂出版, 215-237
- 2) 大類清和, 生原喜久雄, 相場芳憲(1992) 降雨イベントでの 流水の溶存物質の流出特性と流出成分の分離, 日本林学会誌, 74(3), 203-212
- 3) 高橋輝昌, 生原喜久雄, 相場芳憲(1994) スギ・ヒノキ造林地での斜面位置別の表層土壌の窒素無機化量, 森林立地, 36, 15-21
- 4) 河原輝彦, 堤利夫(1968) 森林土壌中の無機態窒素量に関する研究(1)その季節変化について, 京都大学演習林報告, 40, 157-168
- 5) 河田弘(1989) 森林土壌学概論, 博友社
- 6) 日本化学会(1989) 土の科学, 学会出版センター, 50-65
- 7) 戸田浩人, 生原喜久雄(1994) 森林土壌中における窒素無機化の反応速度論的解析(1), 日本林学会誌, 76, 144-151
- 8) 戸田浩人(1994) 森林土壌中における窒素無機化の反応速度論的解析(2), 日本林学会誌, 76, 540-546
- 9) 吉田重明, 三宅大浄, 仁王似智夫(1979) 森林土壌中の窒素の動態(1)森林表層土壌における硝化細菌の分布と硝化活性, 日本林学会誌, 61, 21-25
- 10) Hart S. C., Nason G. E., Myrold D. D. and Perry D. A. (1994) Dynamics of gross nitrogen transformations in an old-growth forest, *Ecology*, 75, 880-891
- 11) Davidson, E. A., Hart, S. C., and Perry, D. A. (1994) Dynamics of gross nitrate in soils of a mature coniferous forest: the carbon connection. *Ecology*, 75,
- 12) 保原達, 徳地直子(1998) スギ人工林の有機物層における無機態窒素の導体と水に伴う養分移動量の把握, 京都大学演習林報告, 69, 1-13
- 13) 戸田浩人, 杉崎浩史, 生原喜久雄(1998) 森林の A0 層における窒素無機化・有機化速度への含水比の影響, 日本林学会誌, 80, 262-269
- 14) 山田俊郎, 清水達雄, 井上隆信, 橘治国(1999) 降雨時における森林集水域からの水質成分負荷流出特性, 環境工学研究論文集, 36, 217-224