

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05721

研究課題名(和文) 森林流域の土壌水分時空間変動が硝化速度と硝酸イオン流出に及ぼす影響

研究課題名(英文) Effects of spatiotemporal fluctuations in soil moisture in forest catchments on nitrification rate and nitrate discharge

研究代表者

小田 智基 (Oda, Tomoki)

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：70724855

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：NO₃-濃度が異なる3つの森林流域を対象に、斜面上部、中部、下部において土壌含水率、土壌物理性(土壌水分特性曲線、粒径分布)、NO₃-イオン濃度、微生物量、硝化量の計測を行い、土壌水分と土壌におけるNO₃-生成量の関係を明らかにした。また土壌物理性の空間分布が土壌水分の空間分布形成に影響を与えることにより、NO₃-生成量の空間分布を決定することを示した。これらの結果から、土壌物理性の空間分布が土壌の硝化量やNO₃-の輸送に関わる水文プロセスを決定し、溪流NO₃-濃度形成に大きく寄与していることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動や森林攪乱による森林生態系における物質循環変動がNO₃-流出・水質悪化を引き起こすことが懸念されているが、森林流域からのNO₃-流出の正確な予測は、未だに困難である。本研究によって、森林流域の土壌水文特性の空間分布が土壌水分の空間分布や微生物活動に影響を与えることにより、NO₃-生成量を決定する重要な要素であることを明らかにした。また、火山灰土壌の被覆が日本の森林流域における土壌水分、NO₃-生成量の分布と溪流NO₃-濃度形成に影響を与えていることを示した。これらの知見は森林流域からのNO₃-濃度形成の予測に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：Soil moisture content, soil physics, NO₃- concentration, microbial content, and nitrification rate were measured in the upper, middle, and lower slopes of three forest catchments. We found the relationship between soil moisture and the NO₃- production rate in surface soil. We also found that the spatial distribution of soil physics influences the formation of the spatial distribution of soil moisture, thereby determining the spatial distribution of NO₃- production rate. From these results, it was suggested that the spatial distribution of soil physics determines the NO₃- production rate in surface soil and the hydrological process involved in the transport of NO₃- and contributes significantly to the formation of streamwater NO₃-concentration.

研究分野：森林水文学

キーワード：土壌水分 硝化 森林斜面 NO₃-濃度 渓流水質

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

森林生態系では、リターから生じる有機窒素化合物は、無機化・植物による吸収・同化を通じて窒素循環が閉じており、窒素(硝酸イオン: NO_3^-)流出がほとんど生じない、いわゆる水質浄化機能が働いている。しかし、大気からの窒素負荷の増加や森林攪乱によって、森林生態系が“窒素飽和”状態に陥り、溪流での NO_3^- 流出・水質悪化が起こることが国内外で報告されている(Aber et al. 1998)。また、気候変動による降水の量や頻度の変化は、変化する土壤水分に対する微生物活動の応答を通じて、森林生態系における窒素循環に影響を与える。よって、森林生態系の窒素循環過程の環境変化に対する感受性・抵抗性を明らかにし、どの程度の環境変化によって NO_3^- 流出に関連する水質悪化が引き起こされるのか、また、回復にかかる時間はどれほどなのか、を検討することが社会的に重要な課題となる。

河川の NO_3^- 濃度は、その上流の森林生態系の健全性を把握するための指標となる。森林生態系における窒素・炭素循環を駆動する微生物・植物の環境応答が NO_3^- 流出に大きく影響することは知られているが、これまでの科学的知見によっても流域からの NO_3^- 流出を正確に予測することは、いまだに困難である。既往の研究では、溪流沿いの微生物活動と NO_3^- 流出量との関連付け(Ross et al. 2012)、地形・斜面位置・樹種分布による土壤中窒素循環の差異の検討など、森林流域からの NO_3^- 流出に関して、微生物による無機化・硝化などの窒素代謝が特に重要な役割を果たしている知見が得られている。

2. 研究の目的

森林生態系における窒素・炭素循環を駆動する微生物・植物の環境応答が NO_3^- 流出に大きく影響することは知られているが、流域からの NO_3^- 流出を正確に予測することは、いまだに困難である。本研究では、森林流域の土壤水文特性が流域からの NO_3^- 流出に与える影響を明らかにするため、1) 森林流域内の土壤物理特性の空間分布が土壤水分時空間分布を支配することで硝化菌量、硝化速度の空間分布を決定していることを明らかにすること、2) 硝化速度の空間分布が流域全体の NO_3^- 生成量を決定することを確認し、3) 流域内の土壤水分・微生物量(硝化菌量)・ NO_3^- 生成の空間分布を考慮した森林流域からの流出 NO_3^- 濃度予測モデルを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では東京大学千葉演習林袋山沢試験地(袋山沢)、神奈川県丹沢山地大洞沢流域(丹沢)、農工大 FM 大谷山試験地(大谷山)の3つの森林流域を対象として、森林斜面の尾根から谷部にかけて100mのプロットを設置し、斜面上部、中部、下部における土壤水分と硝化量(NO_3^- 生成量)、 NO_3^- 濃度の関係を明らかにし、渓流水 NO_3^- 濃度形成への影響を検討した。

(1) 土壤水分と微生物応答・ NO_3^- 生成量の関係

3 流域それぞれの斜面上部・中部・下部から土壌を採取し、含水率・ NO_3^- 、 NH_4^+ 濃度、微生物量、 NO_3^- 生成量を計測し、土壤水分の空間分布と NO_3^- 濃度、微生物量、硝化量との関係を調べた。

土壤水分変化に対する微生物量(硝化菌量)・硝化量・ NO_3^- 濃度の応答特性を調べるため、袋山沢試験地における斜面上部の土壌(含水率 23%)に対して、水を加えることによって含水率を 43%に変化させて(斜面下部と同様の含水率)、84 日間培養し、水分状態を変えない土壌と比較することで土壤水分が硝化量に与える影響を検討した。

(2) 森林斜面における土壤水分及び土壤物理性の計測

3 流域の斜面プロット上部・中部・下部において、100cc のコアを用いて土壌サンプリングを行い、土壌物理性(土壌水分特性曲線、飽和透水係数)の計測、粒径組成、火山灰含有測定試験を行った。

森林斜面の上部、下部に土壤水分センサーを設置し、30 分ごとの連続計測を1年以上継続することにより実際の土壤水分の変動を観測した。現地観測によって得られたデータと土壌特性のパラメータを基に、HYDRUS-2D を用いて斜面における土壌中の水の動きをシミュレーションすることにより、各流域における土壤水分の空間分布の形成要因を検討した。

(3) 多地点の NO_3^- 流出データに基づく NO_3^- 流出濃度形成要因の検討

森林流域からの NO_3^- 流出濃度形成要因を明らかにするため、本研究対象地だけでなく、日本やアメリカの森林流域からの NO_3^- 流出濃度、土壌における硝化量、流域の地形、地質、集水面積など流域特性のデータを収集し、メタ解析を行うことにより、渓流水 NO_3^- 濃度形成要因を検討した。

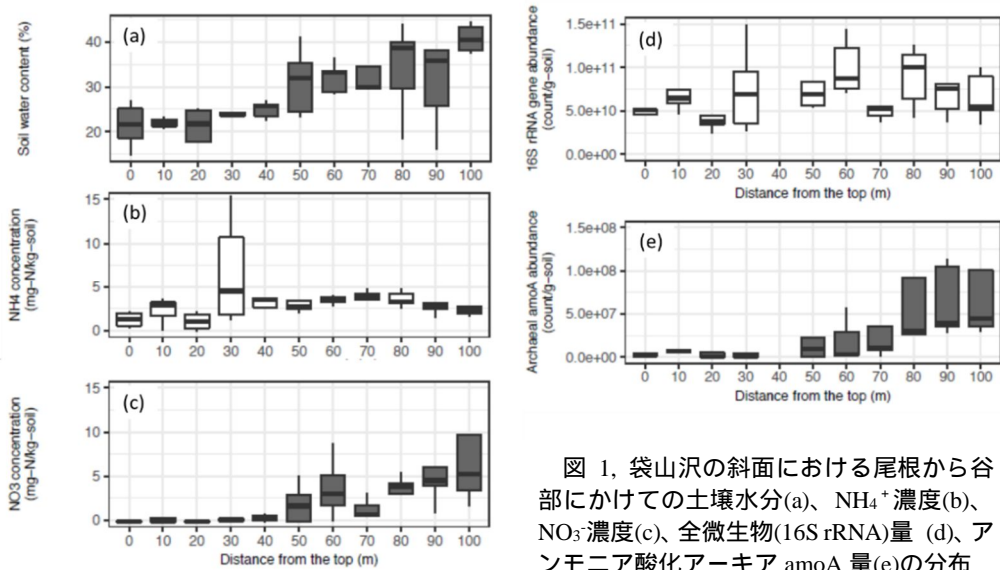


図 1、袋山沢の斜面における尾根から谷部にかけての土壌水分(a)、NH₄⁺濃度(b)、NO₃⁻濃度(c)、全微生物(16S rRNA)量 (d)、アンモニア酸化アーキア amoA 量(e)の分布

4. 研究成果

(1) 森林斜面における NO₃⁻濃度、NO₃⁻生成量の分布と土壌水分との関係

袋山沢流域の斜面では、尾根部から斜面下部にかけて土壌水分が増加し、それと共に土壌中 NO₃⁻濃度が増加した(図 1a,c)。これは、硝化菌であるアーキア量と対応していた(図 1e)。一方、NH₄⁺濃度は地点によらず同程度であり、土壌水分との対応は見られなかった。また、全微生物量も NH₄⁺濃度と同様に斜面位置による変動傾向は見られなかった(図 1b,d)。この結果は多様な微生物機能群がもたらす NH₄⁺生成は特定の土壤微生物がもたらす NO₃⁻生成に比べて、土壤環境の変化に対してより安定的であることを示している (Isobe et al., 2020)。

また、斜面上部の乾燥土壌への水分添加実験の結果、土壌水分が増加した状態で 30~40 日経過すると、硝化菌の増加、NO₃⁻濃度の上昇が確認され、土壌水分が硝化を決定する重要な要素であることが明らかになった (Isobe et al., 2020)。

袋山沢、丹沢、大谷山において、斜面上部、中部、下部の NH₄⁺、NO₂⁻、NO₃⁻生成量の分布を計測したところ、袋山沢では斜面上部で NO₃⁻生成が確認されなかったが、他の 2 流域では上部においても NO₃⁻生成が確認された(図 2)。

(2) 森林斜面における土壌水分の空間分布に与える土壌特性の影響

森林斜面における、上部、中部、下部における土壌特性を調べた結果、袋山沢の上部で下部よりも明らかに保水性が低い性質を示した。それに対して、丹沢、大谷山では斜面上部でも保水性が高く、斜面位置によって大きな違いは見られなかった(図 3)。また袋山沢の斜面上部では火山灰土壌は含まれず、丹沢、大谷山では全域で火山灰土壌の性質を有しているという結果が得られた。

それぞれの斜面位置における土壌水分の連続観測の結果、袋山沢では上部では降雨後乾燥し 20%程度にまで低下するが、下部では 35%以上の土壌水分を維持していた。大谷山、丹沢では斜面上部と下部で差は見られず、斜面上部においても 30%以上の土壌水分が維持されるという結果が数年の連続データによって確かめられた。

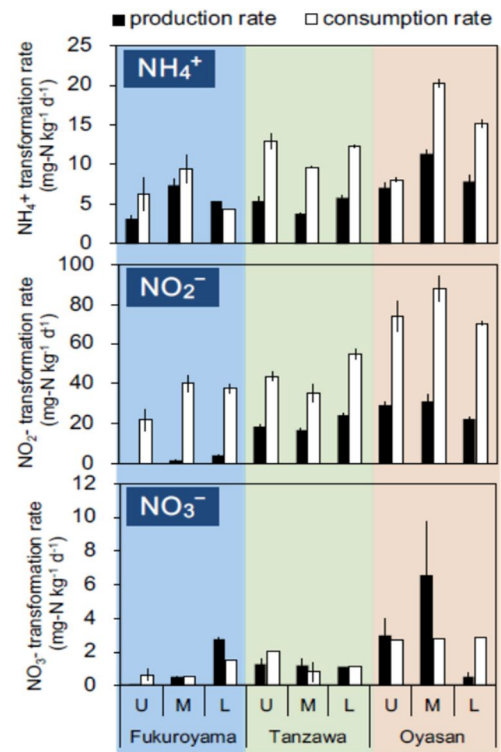


図 2、袋山沢 (Fukuroyamasawa)、大洞沢 (Tanzawa)、大谷山 (Oyasan) における斜面上部 (U)、中部 (M)、下部 (L) の NH₄⁺・NO₂⁻・NO₃⁻の生成、消費速度

土壌中の水移動モデルを用いた結果から、森林斜面における土壌物理性の空間分布によって土壌水分の空間分布が決定されることが示された（図4）。この土壌水分の分布が微生物量、微生物相の斜面における空間変動を支配し、 NO_3^- 生成量の空間分布に影響を与えていることが示された。

(3) 渓流水 NO_3^- 濃度の形成要因の検討

本研究の3流域において、渓流水の NO_3^- 濃度は流域斜面全域における NH_4^+ 生成量に対する NO_3^- 生成量比と相関が見られ、渓流水 NO_3^- 流出を予測する為に斜面における NO_3^- 生成分布が重要であることが示唆された。

また日本とアメリカの35の森林流域における流出 NO_3^- 濃度のデータを収集し、土壌中硝化量の関係を調べた結果、土壌中の硝化量と流出 NO_3^- 濃度に正の相関が見られた。さらに日本の森林流域ではアメリカの流域に比べて渓流水中 NO_3^- 濃度が高く、渓流水 NO_3^- 濃度と土壌硝化量とのより高い相関が見られた。これは、急峻な地形により水移動に伴う土壌からの NO_3^- の輸送の影響が大きいことや河川での NO_3^- 吸収が小さいことが考えられた。

これらの結果から、日本の森林流域では土壌における NO_3^- 生成量が渓流水 NO_3^- 形成に与える影響が大きく、特に土壌物理特性の空間分布と水文プロセスが土壌の硝化量、輸送を決定し、渓流 NO_3^- 濃度に大きく寄与していることが示唆された。

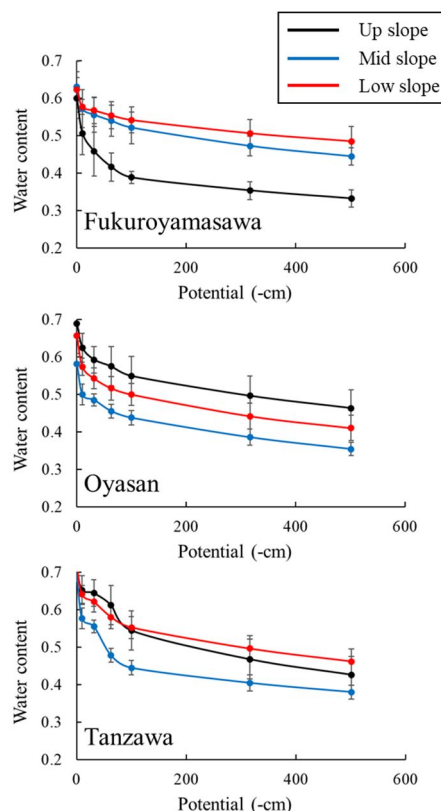


図3、袋山沢、丹沢、大谷山における斜面上部、中部、下部の表層土壌の土壌水分特性曲線

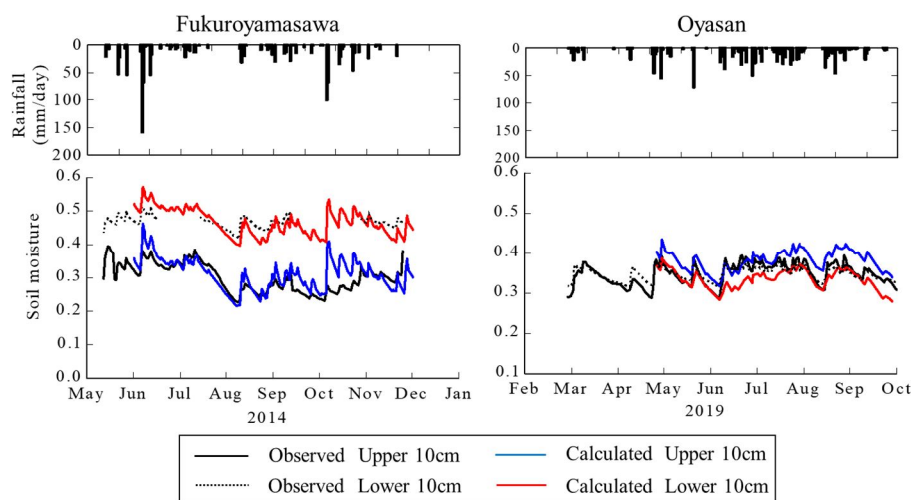


図4、袋山沢、大谷山における斜面上部、下部の表層土壌の土壌水分変動とHYDRUS-2Dを用いた土壌水分の計算結果

引用文献

Aber, J., W. McDowell, K. Nadelhoffer, A. Magill, G. Berntson, M. Kamakea, S. McNulty, W. Currie, L. Rustad, and I. Fernandez. 1998. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems—hypotheses revisited. *BioScience* 48:921–934.

Ross, D. S., Shanley, J. B., Campbell, J. L., Lawrence, G. B., Bailey, S. W., Likens, G. E., Wemple, B. C., Fredriksen, G., and Jamison, A. E. 2012. Spatial patterns of soil nitrification and nitrate export from forested headwaters in the northeastern United States, *J. Geophys. Res.*, 117, G01009.

Isobe, K., Ise, Y., Kato, H., Oda, T., Vincenot, CE., Koba, K., Tateno, R., Senoo, K., Ohte, N. 2020. Consequences of microbial diversity in forest nitrogen cycling: diverse ammonifiers and specialized ammonia oxidizers. *The ISME journal* 14 (1), 12-25.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tomoki Oda, Naohiro Imamura, Tomohiro Egusa, Nobuhito Ohte	4. 巻 448
2. 論文標題 The effects of canopy alteration induced atmospheric deposition changes on stream chemistry in Japanese cedar forest	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Forest Ecology and Management	6. 最初と最後の頁 85-93
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.foreco.2019.05.058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazuo Isobe, Yuta Ise, Hiroyu Kato, Tomoki Oda, Christian E Vincenot, Keisuke Koba, Ryunosuke Tateno, Keishi Senoo, Nobuhito Ohte	4. 巻 14
2. 論文標題 Consequences of microbial diversity in forest nitrogen cycling: diverse ammonifiers and specialized ammonia oxidizers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The ISME journal	6. 最初と最後の頁 12-25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41396-019-0500-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Oda Tomoki, Egusa Tomohiro, Ohte Nobuhito, Hotta Norifumi, Tanaka Nobuaki, Green Mark B., Suzuki Masakazu	4. 巻 35
2. 論文標題 Effects of changes in canopy interception on stream runoff response and recovery following clear cutting of a Japanese coniferous forest in Fukuroyamasawa Experimental Watershed in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 e14177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/hyp.14177	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tomohiro Egusa, Tomo'omi Kumagai, Tomoki Oda, Nobuhito Ohte	4. 巻 35
2. 論文標題 Effects of bedrock groundwater discharge on spatial variability of dissolved carbon, nitrogen, and phosphorous concentrations in stream water within a forest headwater catchment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 e13993
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/hyp.13993	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Tomoki Oda, Tomohiro Egusa, Naohiro Imamura, Nobuhito Ohte
2. 発表標題 Recovery of stream runoff and chemistry after clear-cutting of small-scale forest catchment
3. 学会等名 Gordon Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Oda, Megumi Kuroiwa, Naoya Fujime, Kazuo Isobe, Naoya Masaoka, Kazumichi Fujii, Hiroto Toda, Nobuhito Ohte
2. 発表標題 Spatial variation in soil physical properties and effects on N ₀₃ - production in soil on forest hillslopes
3. 学会等名 EGU General Assembly 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒岩恵、川合洸、田中直人、小田智基、諏訪裕一
2. 発表標題 Production rates of NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ in forest surface soils- Comparison of patterns of spatial variation on a slope in three temperate forests
3. 学会等名 日本生態学会第66回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Oda, Tomohiro Egusa, Naohiro Imamura, Nobuhito Ohte
2. 発表標題 Hydrological and biogeochemical responses and recovery processes after forest clear-cutting: The effects of small-scale forest management
3. 学会等名 American Geophysical Union (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoki Oda, Mark B Green, Lawrence E Band, Todd M Scanlon, Takanori Shimizu, Stephen D Sebestylen, Kevin J McGuire, Mary B Adams, Masanori Katsuyama, Nobuhito Ohte
2. 発表標題 日本と米国の森林伐採試験から見える森林の水源涵養機能
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井一至、小田智基、徳地直子、稲垣善之、早川智恵、井手淳一郎、Jan Frouz
2. 発表標題 Predicting soil water retention using soil chemical properties
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大手 信人 (Ohte Nobuhito) (10233199)	京都大学・情報学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	磯部 一夫 (Isobe Kazuo) (30621833)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・助教 (12601)	
研究分担者	熊谷 朝臣 (Kumagai Tomo'omi) (50304770)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	戸田 浩人 (Toda Hiroto)	東京農工大学・農学研究院・教授 (12605)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関