

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22780145

研究課題名（和文） 森林生態系における窒素流出メカニズムの解明と窒素飽和の将来予測

研究課題名（英文） Factors determining stream nitrate concentration and nitrogen loss in Japanese forest ecosystems: toward a better prediction of nitrogen saturation

研究代表者

福島 慶太郎 (FUKUSHIMA Keitaro)

京都大学フィールド科学教育研究センター・特定研究員

研究者番号：60549426

研究成果の概要（和文）：本研究は、森林から流出する硝酸の濃度や季節性を制御する要因を明らかにすることを目的とし、気象条件の異なる日本各地の森林溪流を対象に調査を行った。硝酸濃度の平均値は年降水量や窒素流入量との間に明瞭な関係が認められなかったが、季節性の規定要因として夏季の降雨や冬季の積雪が重要であった。物質循環モデルを用いて窒素流出の規定要因を検討した結果、日本の森林生態系では降雨流出過程の他に、過去 100 年程度の土地利用履歴も重要であることが分かった。

研究成果の概要（英文）： This study aimed to elucidate the factors controlling stream nitrate concentration and its seasonality, and annual nitrogen loss in several forested watersheds with various climatic conditions. Nitrate concentration in streamwater was not related with annual rainfall and atmospheric nitrogen deposition, while its seasonality was controlled by rainfall and snowfall pattern. Simulating nitrogen cycling and loss using PnET-CN model, which was developed in northern America and modified with data collected in this study, revealed that not only hydrological processes, but also land use history until at least 100 years can be important for more precise prediction of nitrogen loss.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：森林集水域・溪流水質・窒素飽和・硝酸態窒素・広域比較・土壌窒素動態

1. 研究開始当初の背景

21 世紀の環境問題を解決するに当たり、最重要課題の一つとして炭素固定機能、水源涵養・水質浄化機能などの公益的機能(生態系サービス)が十分に発揮される森林生態系の創出が掲げられている(Millennium Ecosystem Assessment 2005; IPCC 2007)。河川源頭部にあ

たる水源地はその多くが森林で占められているため、良好な水資源を持続的に確保するためには森林生態系における物質循環を把握し、生態系外へと流出する溪流水の水質形成機構を解明する必要がある。中でも、窒素は森林生態系において植物の成長を制限する元素であり、一般に生態系外への流出は少ない。しかしながら欧米では 1980 年代より、

降雨による大量の窒素負荷によって、窒素が流入量以上に流出する「窒素飽和現象」が報告された(Aber et al. 1989 など)。この現象は土壤有機物の分解促進と窒素無機化速度の上昇、土壤酸性度の上昇に伴う植物の成長速度・窒素吸収量の低下など、主に植物-土壤間の窒素内部循環系が変化し、生態系の窒素保持能力が低下したことが原因と考えられている。窒素が多量に流出すると河川下流域が富栄養状態となり、水圏生態系や下流域に暮らす人間活動にも深刻な影響を与える。そのため、森林生態系での窒素保持能力を高く保つことが、生態系サービスの一つである水質浄化機能の発現に不可欠であるといえる。

欧米では、これまでの研究から森林生態系における窒素ステータス(窒素制限ないしは飽和状態の程度)の簡易指標として、土壤の炭素・窒素比や窒素流入量・流出量の比の他、渓流水の硝酸濃度のレベルや季節変化が用いられている(Stoddard 1994, Gundersen et al. 2006 など)。近年日本でも、水源に近い森林源頭部で渓流水の硝酸濃度が高い地域が存在することが報告されており、窒素飽和現象が疑われ始めている(Ohrui & Mitchell 1997, 木平ら 2006, Zhang et al. 2008, 吉永ら 2012)。しかし一方で、日本は欧米とは渓流水質を規定する生物地球化学的要因が異なることが指摘されている(Ohte et al. 2010)。日本の気象条件が国土面積の割に多様であることを考えると、各地域の森林生態系における硝酸濃度の分布やその季節性に地域性が見られる可能性がある。したがって、単に渓流水の硝酸濃度レベルや季節変動だけでは、窒素ステータスを判定できないものと考えられる。今後、アジア地域の工業発展に伴い、窒素酸化物が日本に越境輸送され、森林地域への高窒素負荷が予測される。安定的な水源水質の確保に向けた今後の森林生態系管理を考えていくうえでも、日本の森林生態系の窒素ステータス(窒素制限・飽和状態)を簡易的に把握できる渓流水質を用いた手法の確立が望まれる。

2. 研究の目的

本研究課題では、気象条件が様々である日本各地の森林生態系を対象に、渓流水中の硝酸及び窒素流出量に着目した。そのうえで、硝酸濃度レベルとその季節変化に加え、大気から溪流に至るまでの硝酸の挙動の指標として、硝酸の窒素・酸素安定同位体比を各地で比較解析し、それらの規定要因を明らかにすることを目的とした。また、本研究結果を欧米で開発された物質循環モデル(PnET-CN; Aber et al. 1997)に適用し、窒素降下物量に対する窒素流出の応答から、窒素飽和の予測モデルを構築することを目的とし

た。

3. 研究の方法

本研究では、北海道標茶町の落葉広葉樹林、青森県七戸町のスギ人工林、富山県富山市・射水市の落葉広葉樹林、奈良県十津川村のスギ人工林、岡山県真庭市蒜山町の落葉広葉樹林、島根県太田市三瓶町の落葉広葉樹およびスギ人工林、福岡県糟屋郡篠栗町のヒノキ人工林、沖縄県国頭村の常緑広葉樹林において、降水及び渓流水を2週間から1ヶ月に1度の頻度で採取し、硝酸濃度、窒素・酸素安定同位体比を測定した(一部の流域は硝酸濃度の測定のみである)。これらの結果に加え、これまでに報告されている千葉県鴨川市のスギ人工林、滋賀県高島市の落葉広葉樹林、和歌山県有田川町のスギ人工林、鹿児島県垂水市のスギ人工林の渓流水・降水の結果も用いて解析を行った。

日本の森林における PnET-CN モデルによる窒素流出量の予測精度を向上させるために、奈良県十津川村のスギ人工林、滋賀県大津市のヒノキ人工林、滋賀県高島市の落葉広葉樹林で窒素流入量、窒素流出量、窒素内部循環量(年間のリターフォール量、肥大成長量、土壤窒素無機化速度)、土壤窒素現存量、葉の窒素含量を測定した。これらの結果を PnET モデルに適用し、感度分析を行ってパラメータを決定した。得られたモデルを各流域に適用し、窒素流出を規定する環境要因を検討した。

4. 研究成果

渓流水中の硝酸濃度の年平均値は、年降水量の多い地域で低い傾向が見られたが、濃度の高い地域には共通した気象条件が見られなかった。硝酸濃度の季節性に関しては、太平洋側に典型的な夏雨型地域では、降雨時に濃度が上昇し、年間を通して一定の季節性が見られなかった。それに対して、日本海側に典型的な冬季積雪型で春先に融雪出水がみられる地域で、渓流水の硝酸濃度が冬に高く、夏に低い傾向を示した。ただ、日本海側であっても梅雨や台風の時期に降雨の多い地域では、融雪期だけではなく、降水量の多い時期にも高い傾向が見られた。Ohte ら(2010)は、欧米と日本の渓流水の硝酸濃度の季節性を比較し、夏季に雨の多いモンスーン型気候の日本では、降雨流出過程がより重要であることが示された。本研究では、夏雨型の気象条件だけでなく、日本海側の多雪地帯の森林流域においても、融雪や降雨流出といった水文過程が硝酸濃度の季節性を決定する重要な要因であることが示された。

また、渓流水の硝酸濃度と窒素安定同位体

比との間には有意な相関は認められなかったのに対して、酸素同位体比とは弱い正の相関が認められた。このことは、降水由来の硝酸が土壤微生物や植物に利用されず流亡しやすい森林ほど渓流水の硝酸濃度が高いことを示し、生物活動と水文過程の相互作用によって濃度が規定されることを示唆する。

溪流への窒素の年間流出量は、大気から流入する窒素流入量の年間積算値と正の相関がみられたものの、統計的には有意でなかった。また、流入量を流出量が上回る窒素飽和現象が強く懸念される流域は、富山県の落葉広葉樹林の溪流以外は見られなかった。

窒素収支の観点から窒素飽和の定義に該当しない地域でも、季節性が見られない森林集水域が存在した。Zhang ら(2008)は、硝酸態窒素の季節性が見られないことから窒素飽和の可能性を言及した。硝酸濃度の季節性は、先に示した通り、気象条件に強く規定されることから、日本の森林では硝酸濃度の季節性が窒素飽和の簡易指標とならないといえる。Zhang ら(2008)が指摘した流域において窒素飽和に関する別の判断基準が必要であるといえる。

本研究結果をもとに、PnET-CNのパラメータを調整し、奈良県十津川村のスギ人工林、滋賀県大津市のヒノキ人工林、滋賀県高島市の落葉広葉樹林に適用した。その結果、窒素の年間流出量や内部循環量については再現性が高かったのに対し、硝酸濃度の季節変化を精度よく再現することができなかった。PnET モデルは、植物の窒素吸収や土壤微生物による窒素無機化過程については複数の素過程を組み込んで評価されているのに対して、土壌からの窒素流出に関しては降雨流出過程が高い時間分解能で評価されていない。したがって、降雨流出過程が硝酸濃度の季節性を強く規定している日本の森林流域では、物質循環モデル PnET に、水文過程を組み入れた統合モデルを構築する必要があるといえる。

さらに、PnET を用いた窒素の内部循環量や窒素流出の推定のためには、少なくとも過去 100 年程度までの土地利用履歴や森林施業履歴の入力が不可欠であることが分かった。今後の窒素降下物量に対する窒素流出を精度よく予測するために、対象となる森林の土地利用履歴が重要であるといえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

① Mizuki I, Sakaguchi S, Fukushima K, Sakai M, Takayanagi A, Fujiki D, Yamasaki M. Among-year variation in deer population density

index estimated from road count surveys. *Journal of Forest Research*, in press. 査読有

② Fujii S, Yamada A, Fukushima K, Saitoh S, Kitayama K, Takeda H. Relationships among distribution of fine roots, soil DOC concentration and Collembola. *Plant Root*, in press. 査読有

③ Sakai M, Natuhara Y, Fukushima K, Imai K, Imanishi A, Kato M. Ecological functions of persistent Japanese cedar litter in structuring stream macroinvertebrate assemblages. *Journal of Forest Research* 18: 190-199, 2013. 査読有

④ Sakai M, Natuhara Y, Fukushima K, Naito R, Miyashita H, Kato M, Gomi T. Responses of macroinvertebrate communities to 4 years of deer exclusion in first- and second-order streams. *Freshwater Science* 32: 563-575, 2013. 査読有

⑤ 福島慶太郎. 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: 51-62, 2012. 査読有

⑥ 稲垣善之・稲垣昌宏・三浦覚・小林政広・伊藤優子・吉永秀一郎・戸田浩人・福島慶太郎・館野隆之輔・徳地直子. 針葉樹人工林流域における窒素負荷と窒素流亡の関係, 関東森林研究 63(2): 97-100, 2012. 査読有

⑦ Sato T, Egusa T, Fukushima K, Oda T, Ohte N, Tokuchi N, Watanabe, K, Kanaiwa M, Murakami I, Lafferty KD. Nematode parasites indirectly alter the food web and ecosystem function of streams through behavioral manipulation of their cricket hosts. *Ecology Letters* 15:786-793, 2012. 査読有

⑧ 阪口翔太・藤木大介・井上みずき・山崎理正・福島慶太郎・高柳敦. ニホンジカが多雪地域の樹木個体群の更新過程・種多様性に及ぼす影響, 森林研究 78: 57-69, 2012. 査読有

⑨ 阪口翔太・藤木大介・井上みずき・山崎理正・福島慶太郎・高柳敦. 日本海側冷温帯性針広混交林におけるニホンジカの植物嗜好性, 森林研究 78: 71-80, 2012. 査読有

⑩ 鎌内宏光・佐藤修一・林大輔・岡部芳彦・勝山智憲・福島慶太郎・吉岡歩・佐藤拓哉・徳地直子・仲岡雅裕. 北海道東部における初冬のホツチャレ消費者, 森林研究 78: 81-87, 2012. 査読有

⑪ Fukushima K, Tateno R, Tokuchi N. Soil nitrogen dynamics along stand development after clear-cutting in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations. *Journal of Forest Research* 16: 394-404, 2011. DOI: 10.1007/s10310-011-0286-1. 査読有

⑫ 徳地直子・大手信人・臼井伸章・福島慶太郎, 窒素負荷が森林生態系の窒素環境に及ぼす影響. 日本生態学会誌 61: 275-290, 2011. 査読有

⑬ Tobar Y, Koba K, Fukushima K, Tokuchi N, Ohte N, Tateno R, Toyoda S, Yoshioka T, Yoshida

N. Contribution of atmospheric nitrate to streamwater nitrate in Japanese coniferous forests revealed by oxygen isotope ratio of nitrate. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 24: 1281-1286, 2010. 査読有

〔学会発表〕(計 29 件)

- ① 松山周平・福島慶太郎・河村耕史・鈴木伸弥・吉岡崇仁, 冷温帯スギ人工林の間伐林・未間伐林における土壌細菌群集の比較, 第 124 回日本森林学会, 岩手大学, 盛岡, 2013 年 3 月 27 日
- ② 浦川梨恵子・柴田英昭・黒岩恵・稲垣善之・館野隆之輔・菱拓雄・福澤加里部・平井敬三・戸田浩人・小柳信宏・中田誠・中西麻美・福島慶太郎・榎木勉・木庭啓介・諏訪裕一, 森林生態系における土壌の窒素動態に冬季気候変動にともなう凍結融解サイクルの変化が及ぼす影響, 第 124 回日本森林学会, 2013 年 3 月 27 日, 岩手大学, 盛岡
- ③ 日高 渉・福島慶太郎・向 昌宏・西岡裕平・福崎康司・大槻あずさ・鈴木伸弥・吉岡崇仁, 由良川流域における土地利用形態が水質に与える影響: 鉄と硝酸態窒素からの考察, 第 124 回日本森林学会 (テーマ別シンポジウム「森林資源の積極的な利用に伴う生態系サービス間のトレードオフ: 森林管理と流域管理のバランスポイントを探る」), 2013 年 3 月 26 日, 岩手大学, 盛岡
- ④ 福島慶太郎・鈴木伸弥・福崎康司・日高渉・大槻あずさ・池山祐司・上野正博・徳地直子・向昌宏・吉岡崇仁, 森林から沿岸までの河川流下過程に伴う栄養塩濃度の規定要因, 第 60 回日本生態学会, 静岡, 2013 年 3 月 7 日
- ⑤ 藤巻玲路・笹尾庸嵩・橋本美紀・尾崎嘉信・福島慶太郎, 島根県三瓶山の落葉広葉樹林下層に密生するチュウゴクザサの土壌養分動態への影響, 第 60 回日本生態学会, 静岡, 2013 年 3 月 7 日
- ⑥ 福島慶太郎・金子有子・徳地直子・籠谷泰行・浜端悦治・尾坂兼一・國松孝男, 過去の草原利用が現在の森林生態系の物質循環に与える影響: PnET モデルを用いた長期影響評価から, 日本陸水学会第 77 回大会, 名古屋大学, 愛知, 2012 年 9 月 16 日
- ⑦ 落合夏人・徳地直子・福島慶太郎, 奈良県護摩壇山試験地における渓流水質の長期変動, 日本陸水学会第 77 回大会, 名古屋大学, 愛知, 2012 年 9 月 16 日
- ⑧ 大槻あずさ・福崎康司・鈴木伸弥・福島慶太郎・吉岡崇仁, 由良川流域における溶存有機物の蛍光特性, 日本陸水学会第 77 回大会, 名古屋大学, 愛知, 2012 年 9 月 16 日
- ⑨ Fukushima K., Suzuki S, Fukuzaki K, Ueno M, Tokuchi N, Yoshioka T. Spatial pattern and its controlling factors of the nitrate concentration in

river water in the Yura river basin, Japan. ASLO Aquatic Sciences Meeting 2012. Shiga, Japan, 2012/7/12

- ⑩ 福島慶太郎, 森林生態系における物質循環の時間変化から見える森林立地学の現状と課題, 第 123 回日本森林学会大会・森林立地学会シンポジウム, 2012 年 3 月 29 日, 宇都宮大学, 栃木
- ⑪ 小出和彰・中島皇・福島慶太郎・中村真介・藤木泰斗・山中典和・大島誠一, 芦生幽仙谷集水域天然林の動態(III), 第 123 回日本森林学会大会, 宇都宮, 2012 年 3 月 28 日
- ⑫ 勝山正則・福島慶太郎・徳地直子, 堆積岩山地における渓流水の平均滞留時間の決定と水質変動との関連性, 第 123 回日本森林学会大会, 2012 年 3 月 27 日, 宇都宮大学, 栃木
- ⑬ 鈴木伸弥・吉岡崇仁・福島慶太郎・福崎康司・白澤紘明・大槻あずさ, 硝酸の酸素と窒素同位体比を用いた由良川流域における窒素供給源の評価, 日本生態学会第 59 回全国大会, 大津, 2012 年 3 月 20 日
- ⑭ Fukushima, K., Nakashima, T., Fujiki, Y., Nakamura, S., Koide, K., Yamanaka, N, Tokuchi, N., Oohata, S. Gradual changes in stream nitrate discharge along with nitrogen deposition, forest biomass and productivity in a headwater catchment of a natural cool-temperate forest, 5th EAFES, Shiga, Japan, 2012/3/20
- ⑮ Ishii, K., Fukushima, K., Ishihara, M., Yoshioka, T. Soil carbon and nitrogen dynamics changes associated with vegetation recovery in a deer enclosure at a heavy grazed *Miscanthus sinensis* grassland. 5th EAFES, Shiga, Japan, 2012/3/19
- ⑯ Hashimoto T, Fukushima K., Sakai M. The effects of deer overbrowsing, on the dynamics of stream water chemistry during rainfall events. 5th EAFES, Shiga, Japan, 2012/3/19
- ⑰ Fukushima, K., Sakai, M., Sakaguchi, S., Iwai, Y., Hasegawa, A., Nishioka, Y., Fujii, H., Tokuchi, N., Yoshioka, T., Takayanagi, A. Deer over-browsing of forest understory vegetation alters the pattern of nitrate loss to streamwater in forested watersheds in Ashiu, Japan: B13G-0649. 44th AGU Fall Meeting 2011, San Francisco, USA, 2011/12/5
- ⑱ 福島慶太郎・境優・徳地直子・長谷川敦史・西岡裕平・藤井弘明・高柳敦, シカは森林の渓流水質を変えるか?-芦生ブナ天然林に設置したシカ柵集水域における 5 年間の水質結果から, 日本陸水学会第 76 回大会, 松江, 2011 年 9 月 23 日
- ⑲ 福島慶太郎・徳地直子・井上泰男・大塚泉・福崎康司・吉岡崇仁, 皆伐・再造林されたスギ人工林の成立に伴う溶存態有機物の変化, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会,

幕張, 2011年5月22日

⑳ 稲垣善之・三浦寛・中西麻美・大浦典子・戸田浩人・市川貴大・福島慶太郎・館野隆之輔, 林齢の異なるスギとヒノキ林におけるリターフォール窒素量の変化, 第122回日本森林学会, 静岡, 2011年3月

21. 勝山正則・福島慶太郎・徳地直子, 堆積岩山地における渓流水の平均滞留時間決定機構, 第122回日本森林学会, 静岡, 2011年3月

22. 福島慶太郎・臼井伸章, 緯度系列で比較するモウソウチクの葉の形態的可塑性, 第58回日本生態学会, 札幌, 2011年3月9日

23. 臼井伸章・米田聡美・福島慶太郎・徳地直子・尾坂兼一, モウソウチクの広葉樹二次林への侵入が窒素循環に与える影響, 第58回日本生態学会, 札幌, 2011年3月9日

24. 米田聡美・臼井伸章・徳地直子・大手信人・勝山正則・福島慶太郎, ヒノキ林における土壤無機態窒素の制御要因, 第58回日本生態学会, 札幌, 2011年3月9日

25. 江草智弘・大手信人・福島慶太郎・徳地直子・佐藤拓哉・谷尾陽一, 森林溪流における栄養塩吸収に関する研究, 第58回日本生態学会, 札幌, 2011年3月9日

26. 徳地直子・大手信人・臼井伸章・福島慶太郎, 森林生態系における窒素負荷の影響 発表学会; 第58回日本生態学会, 札幌, 2011年3月10日

27. 福島慶太郎・大槻あずさ・河本晴恵・吉岡崇仁・徳地直子・今西亜友美・向昌宏・谷尾陽一・白澤紘明, 由良川流下過程に伴う溶存有機物および溶存鉄の濃度変化, 日本地球惑星科学連合2010年大会, 幕張, 2010年5月26日

28. 勝山正則・福島慶太郎, 森林伐採に伴う溪流からの窒素流出 -PnET-CNモデルを用いた検討-, 日本地球惑星科学連合2010年大会, 幕張, 2010年5月26日

29. 小原章裕・大手信人・小田智基・江草智弘・谷尾陽一・福島慶太郎・徳地直子・鈴木雅一, 山地森林溪流における溶存有機物の流出特性に関する研究, 第121回日本森林学会, つくば, 2010年4月2日

[図書] (計3件)

① 福島慶太郎, 第21章 窒素の循環 p.227-235. In 森のバランス-植物と土壌の相互作用 pp316, 森林立地学会編, 東海大学出版会, 2012.

② 徳地直子・福島慶太郎, 第2章 森林の管理と沿岸域管理 第4節 人工林化と河川水質, 森と海をむすぶ川, 京都大学学術出版会 pp335. 112-126. 2012.

③ Tokuchi N, Hirobe M, Kondo K, Arai H, Hobara S, Fukushima K, Matsuura Y. Soil nitrogen dynamics in larch ecosystem. Osawa A,

Zyryanova OA, Matsuura Y, Kajimoto T & Wein RW. (eds.) Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests, Ecological studies vol. 209, pp.229-243. Springer. 2010.

6. 研究組織

(1)研究代表者

福島 慶太郎 (FUKUSHIMA Keitaro)
京都大学フィールド科学教育研究センター・特定研究員
研究者番号: 60549426