

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03833

研究課題名(和文) 大気窒素沈着が森林流域の窒素循環に与える感受性の地域性評価

研究課題名(英文) Local factors affecting the response of forested watersheds to elevated atmospheric N deposition

研究代表者

智和 正明 (Chiwa, Masaaki)

九州大学・農学研究院・准教授

研究者番号：30380554

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：石油燃焼や肥料による窒素沈着量の増加が森林生態系に悪影響を及ぼすことが懸念されている。このような窒素沈着に対する森林流域の応答は、森林植生、気象、地質といった地域要因で変動する可能性がある。本研究は、窒素沈着が森林流域の窒素流出に与える感受性の地域性を評価することを目的とし、施肥方法や観測方法を統一した全国初の森林生態系における広域施肥試験を行なった。その結果、窒素流出や窒素施肥に対する応答性は、スギ人工林において顕著に高いことが分かった。これはスギ人工林の窒素吸収量が少ないためと考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで欧州や米国で先進的に行われてきた森林生態系における窒素操作実験について、日本初の複数箇所における広域施肥実験サイトを立ち上げた。施肥方法や観測方法を統一することで、窒素沈着量増加に対する生態系応答をサイト間で評価することを可能にした。本研究で得られた、スギ人工林で窒素流出量が多く、窒素施肥に対する窒素流出の応答性も高いという結果は、森林の水質浄化機能という観点から、スギ人工林の管理の重要性を示唆するものである。

研究成果の概要(英文)：Elevated atmospheric nitrogen (N) deposition and its ecological impact is an issue of widespread concern. However, the response of forest ecosystems to elevated N deposition may vary by local factors such as forest type, meteorological condition, and geology. This study set up several sites for N manipulation experiments with same protocols such as N fertilization and measurements across Japan to evaluate the local factors affecting the response of forest ecosystems to elevated N deposition. Results showed that N leaching and its response to N fertilization was obviously higher from Japanese cedar plantation than other forest types including Japanese oak. The relatively low N uptake by Japanese cedar s could be an important contributor to the high N leaching.

研究分野：生物地球化学

キーワード：窒素循環 森林生態系 土壌生態系 地域性

1. 研究開始当初の背景

近年、人間活動の影響で大気窒素汚染が全球レベルで進んでいる (Galloway et al., 2008). 特に、アジアは欧米と比べて窒素排出量が急速に増加しており (Akimoto, 2003), 東アジアから国内への大気汚染物質の長距離輸送が顕在化している (岩本ら, 2008; Chiwa, 2010).

この増加は、森林生態系における窒素循環に影響を及ぼし、渓流水の窒素汚染の原因にもなっている. 通常、窒素は森林生態系で不足しやすいが、窒素沈着の増加によって森林生態系において窒素飽和し (Aber et al., 1989), 森林流域の上流河川水から高濃度窒素が流出する (Vitousek et al., 1997).

このため、森林流域の窒素循環に関する研究の重要性が認識されており、国内外で窒素循環の観測が行われてきた. しかし、窒素沈着に対する森林流域の応答は地域によって様々で、地域スケールでの一般化には至っていない. これは、窒素沈着量が地域で異なることに加えて、森林を構成する植生や地質、さらには、気候や地形といった地域特有の環境条件が異なるためであると考えられる. したがって、地域スケールでの気候特性や流域の水文地形構造の違いが、森林流域からの窒素流出の感受性に大きく影響すると考えられる. しかし、このような感受性の地域性評価はこれまで十分に解明されてこなかった.

2. 研究の目的

本研究は、窒素沈着が森林流域からの窒素流出に与える感受性の地域性を評価するために、以下の研究を行うことを目的とした.

1. 窒素・リン沈着量の長期解析 国内の複数の地点において長期観測データに基づいた窒素収支解析を行う. また、窒素循環に強く影響を与えるリン沈着についても解析を行う.
2. 施肥実験 感受性の地域性が生じる要因やその機構を特定するために、国内の5地域 (図1) で施肥実験を行い、窒素循環におけるパラメータの変化を観測する. さらに、感受性の要因を特定することで、感受性を抑制させる森林管理や森林施業方法についても検討する.

3. 研究の方法

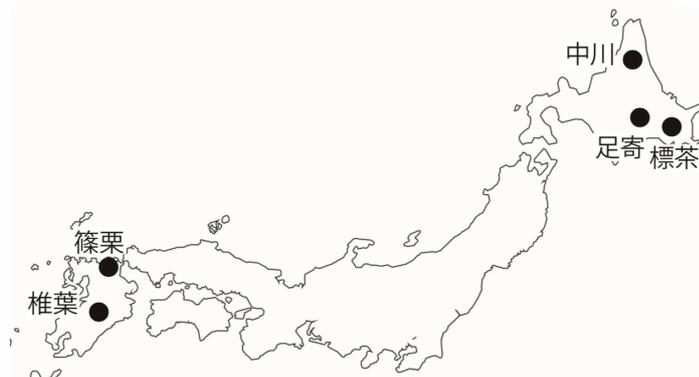
1. 窒素・リン沈着量の解析

九州大学福岡、宮崎、北海道演習林における大気沈着モニタリング10年分のデータ (2009年~2018年) を用いて、窒素・リンの沈着量を解析した. 雨水を毎月2回採取し、イオン成分とリン成分を分析した. また、沈着量のモニタリング手法を検討するための予備実験として、九州大学北海道演習林において、農地に囲まれた森林域と市街域で窒素沈着量を同時計測し (約1年間)、周辺の立地環境の違いが窒素沈着量に与える影響を評価した.

2. 施肥実験

中川 (北海道大学中川研究林), 標茶 (京都大学北海道研究林), 足寄 (九州大学北海道演習林), 椎葉 (九州大学宮崎演習林), 篠栗 (九州大学福岡演習林) の環境勾配の異なる5地域 (図1) において、施肥の方法や測定項目を統一した全国初の広域施肥実験を行った. 本サイトは、下層植生であるササの種類が道東ではミヤコザサ、道北ではクマイザサまたはチシマザサと異なっている. さらに椎葉はスズタケがシカ食害のために消滅している. ミズナラを主体とした林分 (中川, 標茶, 足寄, 椎葉, 篠栗) とスギ人工林 (福岡) において、10m×10mの林分スケールプロットをコントロール区と窒素施肥区でそれぞれ4~5プロット設置した.

施肥は毎年春季に 50 kg N/ha/yr の硝酸アンモニウムを散布した (2017-2020年の3年間). なお、この量は、国内の窒素沈着量の2~



実験サイト	中川 (北大)	標茶 (京大)	足寄 (九大)	椎葉 (九大)	篠栗 (九大)
乾燥	尾根は乾燥	湿润	尾根は乾燥	尾根は乾燥	尾根は乾燥
土壤凍結	無	10-30 cm	10-30 cm	無	無
火山灰 or 非火山灰	非火山灰	火山灰	火山灰	非火山灰	非火山灰
傾斜	急	緩	緩	急	急
年間降水量 (mm)	1150	1189	1007	3837	1769
平均気温 (°C)	4	6.3	6.6	10.8	15.9
最大積雪深 (cm)	200	64	46	NA	NA
窒素沈着 (kgN ha ⁻¹ yr ⁻¹)	7	<5	4.4	7.7	10.3
下層植生	クマイザサ	ミヤコザサ	ミヤコザサ	スズタケ消滅	常緑樹など

図1 国内5地域における施肥試験区の設定

10倍程度に匹敵する. 窒素施肥による土壌や窒素流出の影響を評価するために、表層土壌(A層)における窒素無機化速度や深さ50cmにおける土壌水(系外への流出として)中の硝酸イオン濃度を計測した. また、樹木への施肥影響を評価するために、夏季に樹冠葉を採取し、窒素濃度を

計測した。また、リターフォールを毎月採取し、さらにリターフォール中の窒素濃度を計測することで樹木による窒素吸収量を評価した。

4. 研究成果

窒素・リン沈着

窒素沈着量の観測手法に関する予備的検討

サイト周辺地域の立地環境（農地，市街域）の違いが観測値に与える影響について解析した結果，サイト周辺の立地環境は窒素沈着に大きな影響を与えず，より広域的な周辺の地域要因が窒素沈着量に影響を与えていることが分かった。（智和ら，2018，九大演報）

リン・窒素沈着量の経年変化

九州大学福岡，宮崎，北海道演習林の大気沈着モニタリング10年分のデータ（2009年～2018年）を用いて，窒素・リン沈着量の解析を行った結果，福岡・宮崎・北海道演習林における窒素・リン沈着は表1のようになった。福岡演習林は九州北部の都市近郊域に位置しているため，比較的窒素沈着量が多かった。また，九州山岳地域に位置する宮崎演習林でも比較的高く，東アジアからの越境大気汚染の影響が示唆された。一方，北海道演習林の窒素沈着量は少なかった。

表1 窒素・リン沈着量 (kg ha⁻¹ yr⁻¹)

	N	P
福岡演習林	10.3	0.28
宮崎演習林	7.7	0.21
北海道演習林	4.4	0.12

リンの沈着量データについて主成分分析（PCA）による統計解析を行ったところ，リンはカリウムとの関連性が強く，生物由来の寄与が大きいことが示された。また，都市近郊林では人為的な燃焼由来もリン沈着に寄与している可能性が示された。さらに，福岡演習林ではリン沈着量が年々減少しており，人為起源由来のリン沈着量が低下している可能性が示唆された。（Chiwa, 2020, Atmospheric Environment）

施肥実験

予備的検討

窒素沈着に対する感受性に影響を及ぼす一因として，リンの施肥が樹冠の窒素保持に与える影響を解析した。その結果，リンの沈着量が増加すると樹冠による窒素保持が80%程度高まることが分かった。NO₃⁻の保持によって，溶存有機窒素の溶脱が高まり，NH₄⁺の保持によって樹冠内の必須元素であるマグネシウムやカルシウムの溶脱が促進されることが分かった。（Chiwa et al., 2019, Biogeochemistry）

同様な実験をミズゴケを対象に行った。その結果，ミズゴケの窒素保持はリンの施肥によって長期的には高まらなかった。ミズゴケは本来窒素保持能が高く，窒素施肥によって容易に窒素飽和が起こることが知られているが，本研究結果から，そのようなミズゴケの窒素飽和は，リンの利用性の増加では緩和されないということが分かった。（Chiwa et al., 2018, Environmental Pollution）

全国共通施肥実験による窒素流出の感受性の比較

窒素沈着が森林流域の窒素流出に与える影響について文献レビューした。その結果，スギ・ヒノキ人工林の窒素流出が多く，菌根性の違いが窒素沈着に対する感受性に大きな影響を与えている可能性を示唆した。（Chiwa et al., 2019, JFR）

全国施肥実験を行った結果，スギ林の窒素流出が特異的に高く，施肥後の窒素流出の応答性も高かった。スギ林からの窒素流出が高い一因として，高齢樹による樹木による窒素吸収量の低下が挙げられた。一方で，窒素流出の一因と考えられている硝化速度はスギ林では他サイトと比べて高くなかった。（Yang and Chiwa, 2021, Scientific Reports）

全国5地域のミズナラ林における窒素流出（深さ50cmの土壌水中硝酸イオン濃度）は，各地域によって異なり，その濃度は表層土壌の硝化速度と正の相関があることが分かった（Yang et al., 投稿準備中）。

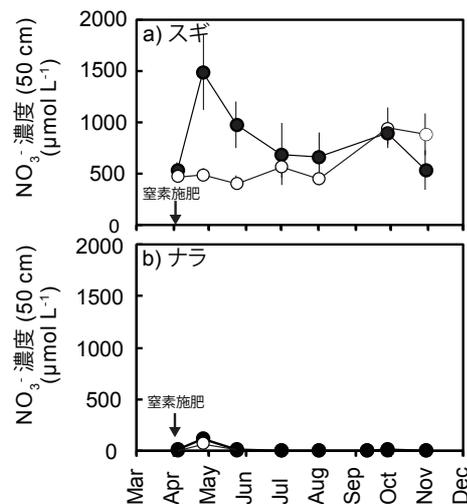


図2 スギ林と隣接するナラ林における土壌水（深さ50cm）中のNO₃⁻濃度の経時変化。黒丸：施肥区，白丸：対照区

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Chiwa Masaaki	4. 巻 223
2. 論文標題 Ten-year determination of atmospheric phosphorus deposition at three forested sites in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Atmospheric Environment	6. 最初と最後の頁 117247 ~ 117247
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.atmosenv.2019.117247	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 Chiwa Masaaki, Utsumi Yasuhiro, Tashiro Naoaki, Yasuda Yuko, Shinozuka Ken'ichi, Ru Yang, Nagano Nao, Murata Shusuke, Nakamura Takuma, Yamauchi Kohei, Kabemura Yuji, Ando Tatsuro, Sawamura Hiroshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Nutrients exported from upland stream water enlarge perennial biomass crops	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2200
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-81191-x	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 該当する
1. 著者名 Yang Ru, Chiwa Masaaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Low nitrogen retention in a Japanese cedar plantation in a suburban area, western Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5335
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-84753-1	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 該当する
1. 著者名 Chiwa M., Sheppard L. J., Leith I. D., Leeson S. R., Tang Y. S., Cape J. N.	4. 巻 142
2. 論文標題 P and K additions enhance canopy N retention and accelerate the associated leaching	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biogeochemistry	6. 最初と最後の頁 413-423
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10533-019-00543-y	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 Chiwa M., Tateno R., Hishi T., Shibata H.	4. 巻 24
2. 論文標題 Nitrate leaching from Japanese temperate forest ecosystems in response to elevated atmospheric N deposition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Forest Research	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/13416979.2018.1530082	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 Chiwa Masaaki, Sheppard Lucy J., Leith Ian D., Leeson Sarah R., Tang Y. Sim, Neil Cape J.	4. 巻 237
2. 論文標題 Long-term interactive effects of N addition with P and K availability on N status of Sphagnum	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Environmental Pollution	6. 最初と最後の頁 468 ~ 472
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.envpol.2018.02.076	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 智和正明, 村田秀介, 中村琢磨	4. 巻 99
2. 論文標題 農耕地に囲まれた市街域とそれに隣接した森林域における大気沈着量の比較 - 北海道足寄町における事例 -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 九州大学農学部演習林報告	6. 最初と最後の頁 35-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 長野菜穂, 智和正明, 久米朋宜, 内海康弘, 田代直明, 大槻恭一
2. 発表標題 大気窒素沈着量増加と下層植生衰退に対する樹木蒸散の応答
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長野菜穂, 智和正明, 久米朋宣, 内海泰弘, 田代直明, 大槻恭一
2. 発表標題 窒素負荷増加に対する樹木蒸散の短期応答
3. 学会等名 日本生態学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楊茹, 智和正明
2. 発表標題 窒素負荷に対するスギの窒素流出の応答性
3. 学会等名 日本森林学会130回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lu Zhang, Masaaki Chiwa, Jeong Seonghun, Jun'ichiro Ide, Kyoichi Otsuki
2. 発表標題 Atmospheric phosphorus deposition in a suburban-forested site, western Japan
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会 (国際学会)
4. 発表年 2018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	福澤 加里部 (Fukuzwa Karibu) (10456824)	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・准教授 (10101)	

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
研究分担者	菱 拓雄 (Hishi Takuo) (50423009)	九州大学・農学研究院・准教授 (17102)	
研究分担者	館野 隆之輔 (Tateno Ryunosuke) (60390712)	京都大学・フィールド科学教育研究センター・教授 (14301)	
研究分担者	柴田 英昭 (Shibata Hideaki) (70281798)	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授 (10101)	

	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
連携研究者	内海 泰弘 (Utsumi Yasuhiro) (50346839)	九州大学・農学研究院・准教授 (17102)	

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