

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：23401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12137

研究課題名（和文）大気からの窒素汚染が生態系に与える影響の評価：コケ植物からのアプローチ

研究課題名（英文）Evaluation of atmospheric nitrogen deposition on ecosystem: the special role of moss

研究代表者

大石 善隆 (Oishi, Yoshitaka)

福井県立大学・学術教養センター・教授

研究者番号：80578138

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：コケは亜高山帯や高層湿原において重要な窒素プール機能を担っていることを明らかにした。また、コケは倒木の窒素含有量を上昇させることでその分解を促進し、森林の窒素循環にも影響していることも解明した。しかし、一部の生態系ではコケの衰退を招くレベルの窒素汚染が生じており、今後の動向に注視する必要がある。さらに、気候変動に伴う環境の変化がコケの窒素負荷の増加への応答を複雑にする可能性も示唆された。この一連の研究成果はコケを介して窒素負荷が生態系に与える影響の評価に大きく貢献すると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土壌を介して窒素分を与える維管束植物と異なり、コケは大気降下物に含まれる窒素分を直接、吸収する。そのため、本研究成果で明らかにしたコケの窒素プールとしての機能や窒素循環に果たす役割は生態系における窒素の動態を理解するうえで重要な成果となる。

また、コケは窒素汚染に敏感に反応するため、優れた指標生物としても利用されている。この指標性から、本研究で解明した窒素負荷に対するコケの応答は、窒素汚染に対する生態系の初期応答の解明や、生態系のモニタリングにも応用できる。今後、気候変動の影響で生態系が大きく変わると予想されており、コケを利用した生態系のモニタリングはより重要になると期待される。

研究成果の概要（英文）：Bryophytes accumulate large amounts of nitrogen in subalpine zones and bogs, thereby contributing to the nitrogen-pool in forest ecosystems. Additionally, bryophytes affect nitrogen cycling by promoting the decomposition of decaying wood by enhancing its nitrogen content. However, nitrogen pollution has been shown to reach levels that can drive a decline of bryophyte communities in some ecosystems. Notably, environmental changes associated with climate change may further complicate bryophyte responses to increased nitrogen pollution.

研究分野：生態学

キーワード：コケ植物 生物指標 窒素降下物 窒素循環 越境大気汚染 森林生態系 気候変動

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

急速なアジアの発展に伴って近隣諸国から日本へ飛来する汚染物質が増加している。なかでも、窒素を含む化合物(窒素降下物)は植生を変化させ、生態系へ深刻な影響を与えるとされる。こうした中、コケは窒素汚染に敏感に反応するとともに、窒素降下物を効率よく吸収することから、コケが生態系の窒素プールに果たす機能や窒素降下物に対する応答は生態系の窒素循環を理解するためのカギの一つとされる。

### 2. 研究の目的

そこで、本研究ではコケを介して窒素汚染が生態系に及ぼす影響について検討する。そのために、まず、コケが窒素吸収や蓄積に担う機能や、その窒素負荷に対する応答を明らかにする。これらの結果に基づき、窒素負荷の増大がコケの機能をどう変化させ、また生態系の窒素循環にどのような影響を与えるのかを考察する。

### 3. 研究の方法

本研究では、野外調査・分析によって、(1)-(4)の課題を検討し、コケを介して窒素汚染が生態系に与える影響の評価を試みる。

#### (1) コケが窒素蓄積に果たす機能とその脆弱性の評価

まず、日本の代表的な植生が成立している地点において、コケ植物に含まれている窒素蓄積量を算出し、コケの窒素プール機能を評価する。また、コケの窒素含有量や窒素安定同位体比を利用して、窒素降下物がコケに与えている影響についても検討する。

#### (2) 生態系の窒素循環におけるコケの役割

倒木は分解されることで林床に窒素を供給し、この分解速度は倒木内の窒素含有量と関係がある。そこで、倒木上のコケに着目し、コケが倒木の窒素含有量にどのような影響を与えるか解析する。

#### (3) 窒素負荷の増加に対するコケの応答

窒素濃度の異なる人工雨を作成し、窒素供給量の違いによるコケの生理活性の変化(クロロフィル蛍光・バイオマス)に与える影響について検討する。この際、窒素降下物の増加と温暖化の相互作用がコケの生理活性に与える影響についてもあわせて分析する。

#### (4) 窒素降下物の沈着におけるコケの役割

大気降下物モニタリングデータを利用し、調査地点における年間の窒素降下物量を算出する。次にこの窒素降下物量とコケに含まれる窒素含有量との関係を分析することで、コケの窒素降下物に対する吸収特性について考察する。

### 4. 研究成果

#### (1) コケが窒素蓄積に果たす機能とその脆弱性

日本の代表的な植生でコケに蓄積されている窒素量を算出した結果、亜高山帯針葉樹林や高層湿原において、コケは窒素プールとして大きな役割を果たしていることが明らかになった。しかし、同じ植生帯であっても、森林タイプや生育基物の相違によってコケの窒素量は大きく異なることも示唆された。今後、より詳細は森林区分を設けることで、コケの窒素プール機能をより正確に評価できるだろう。

コケの窒素プール機能の脆弱性については、窒素汚染の影響を受けやすいとされる高山帯において評価を行った。高山帯の優占種の1種(シモフリゴケ)の窒素含有量を分析したところ、一部の地域では窒素含有量が生育を阻害するレベルにまで高まっており、降水中の窒素濃度の増加がコケ群落の衰退につながることが指摘された(図1)。この影響は大陸側で顕著であったことから、越境大気汚染などの影響により、コケの窒素含有量が上昇している可能性が示唆された。

#### (2) 生態系の窒素循環におけるコケの役割

コケが倒木の窒素含有量に与える影響を分析したところ、コケは群落直下の倒木の窒素量を増加させていることが明らかになった。窒素安定同位体比を利用して倒木内の窒素量の増加に関与した要因を解析した結果、この増加は窒素固定細菌によってもたらされていることが明らかになった(図2)。コケは生育基物の水分を増加させる働きがあることから、この水分が窒素固定細菌の活性を上昇させ、倒木内の窒素含有量の増加につながっていたと考察された。

#### (3) 窒素負荷の増加に対するコケの応答

降水の窒素濃度の増加がコケの生長・生理活性に与える影響について、窒素降下物の増加に脆弱である高層湿原の主要種であるミズゴケ(イボミズゴケ)を対象にして解析した。その結果、人工雨中の窒素濃度を上昇させるだけではコケのクロロフィル蛍光・バイオマスに有意な変化が現われなかった。しかし、温暖化と窒素濃度の上昇を同時に行うことで、コケのクロロフィル蛍光・バイオマスともに有意に上昇することが明らかになった。これは気温の上昇がクロロフィ

ル合成に関する酵素などの活性を促し、供給された窒素を有効に利用できるようになったためであると推察された。本実験だけから考察すれば、今後、温暖化・窒素降下物の増加が進むことで、イボミズゴケの生長が促されると予想される。しかし、窒素降下物の総量が閾値を超えるとコケのバイオマスが減少するという報告もあり、また、窒素降下物の増加によって維管束植物などとの競争も激しくなり、イボミズゴケの生長に負の影響を与える要因も大きくなる。そのため、長期的な視点でコケの窒素応答を評価する必要がある。

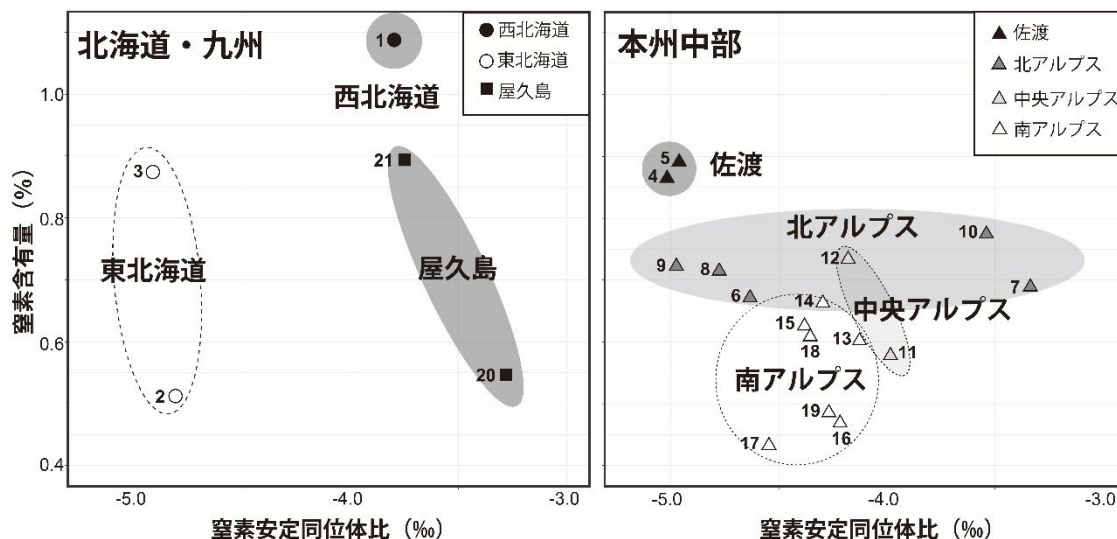


図1 日本の山域におけるコケの窒素含有量とその窒素同位体比

図上の番号は調査地を示す。調査地は大石 (2022) の図1を参照。  
大石善隆 (2022) 蘚苔類研究 12 (8): 205-214 の図3を改変

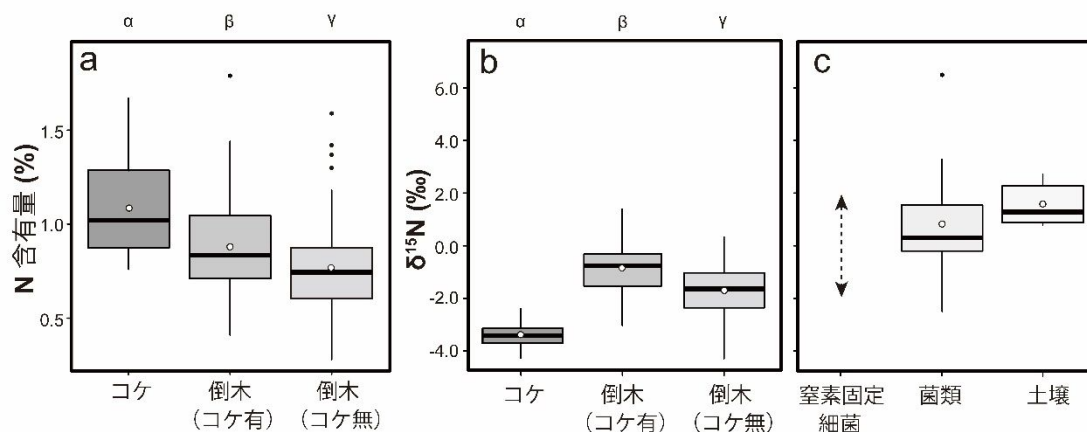


図2 コケ・倒木の窒素含有量とコケ・倒木、主な窒素源の窒素同位体比

a. 窒素含有量 b. 窒素同位体比 c. 主な窒素源の窒素同位体比。図上の記号は有意差を示す  
Oishi (2024) Ecosphere. 15: e4755 の Fig. 2 を改変

#### (4) 窒素降下物の沈着におけるコケの役割

降水に含まれる窒素成分がコケの窒素含有量に与える影響を分析した結果、コケの窒素含有量は降水に含まれる窒素の総量よりも、その窒素濃度と強い相関があることがわかった。さらに太平洋側・日本海側でコケの窒素吸収パターンが異なることも明らかになった。太平洋側・日本海側ともに降水量が多く、雨水中の窒素濃度が低い夏季においては、雨水中に含まれる窒素濃度とコケの窒素含有量との相関は低くなった(図3)。しかし、これに加えて日本海側では冬季においても窒素濃度とコケの窒素含有量との相関は低くなる傾向があった。これは積雪によってコケが雪に埋もれ、雪中に含まれる窒素成分をコケが直接吸収できないためであると推察された。以上の結果より、秋～春期にかけて(ただし、日本海側では秋・春期)、コケは降水に含まれる窒素成分を効率よく沈着していることを明らかにした。

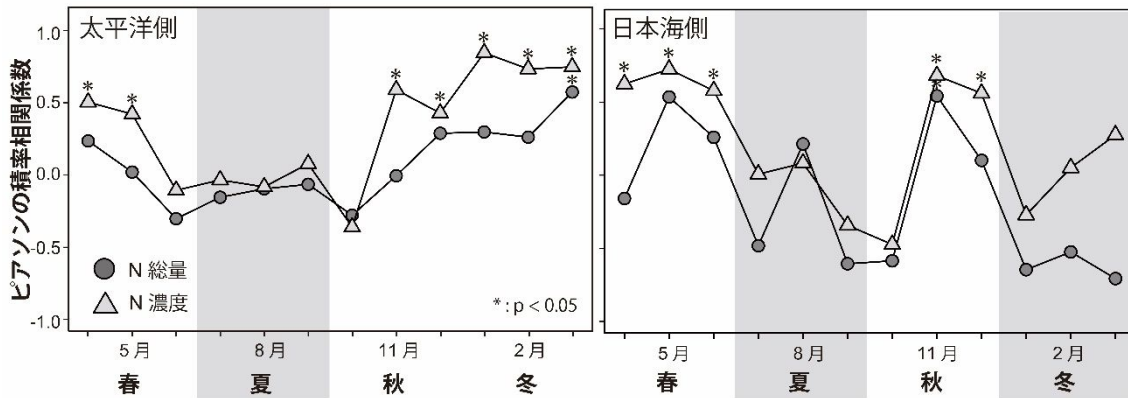


図3 降水中の窒素成分（総量・濃度）とコケの窒素含有量との相関の季節変化

Oishi (2023) Environ. Nanotechnol. Monit. Manag. 20: 100783 の Fig. 3 を改変

### 結論 コケを介して窒素負荷が生態系に与える影響の評価

コケは亜高山帯や高層湿原において重要な窒素プール機能を担っていること、また、倒木内の窒素含有量を上昇させることで倒木の分解を促進し、森林の窒素循環に対しても重要な機能を担っていることが明らかになった。しかし、高山帯の一部などでは優占種のコケ(シモフリゴケ)の衰退を招くレベルの窒素汚染が生じており、今後の動向について注視すべきであることも示唆された。その一方、室内実験の結果からは、窒素降下物の増加は高層湿原の優占種(イボミズゴケ)の生長に負の影響を与えず、むしろ温暖化と窒素汚染が同時に生じることで正の影響を与えるという結果も得られた。ただ、窒素降下物の総量が閾値を超えるとコケの生長に負の影響を与えるという報告もあり、長期的な視点でコケの窒素応答を評価する必要がある。さらに、コケの降水中の窒素の吸収効率は降水の窒素濃度に影響されることから、温暖化に伴う降水パターンの変化は窒素負荷がコケの生育に与える影響にも作用する可能性がある。

以上のように、一連の研究は、コケが生態系の窒素プール・循環機能に果たす役割を明らかにするとともに、その脆弱性や気候変動における応答についても重要な知見を得ることができた。これらの成果はコケを介して窒素負荷が生態系に与える影響の評価に大きく貢献すると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 大石 善隆	4. 巻 12
2. 論文標題 高山のコケは窒素汚染に曝されているのか？ 越境大気汚染に着目して	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 蘚苔類研究	6. 最初と最後の頁 205～214
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24474/bryologicalresearch.12.8_205	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 Yoshitaka Oishi	4. 巻 20
2. 論文標題 Seasonal differences in nitrogen deposition affect nitrogen content in mosses: Implications for biomonitoring	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management	6. 最初と最後の頁 100783～100783
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.enmm.2023.100783	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 Yoshitaka Oishi	4. 巻 15
2. 論文標題 Bryophytes enhance nitrogen content in decaying wood via biological interactions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Ecosphere	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/ecs2.4755	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2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大石善隆
2. 発表標題 森林生態系におけるコケ・地衣類の窒素プール機能
3. 学会等名 日本生態学会第70回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大石善隆
2. 発表標題 コケの魅力
3. 学会等名 日本蘚苔類学会（招待講演）
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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------