

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：23401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00566

研究課題名（和文）生物指標を用いた窒素降下物の広域評価と動態把握

研究課題名（英文）Moss as a bioindicator of atmospheric nitrogen pollution

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・准教授

研究者番号：80578138

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、コケ植物を指標として、時空間スケールで日本における窒素汚染の影響を明らかにした。その結果、山岳域では高標高域の西斜面において、大陸由来の窒素化合物による汚染が進行しつつあることが明らかになった。その一方、日本全域を対象とした分析では、窒素汚染の空間パターンを検出することができなかった。この理由として、コケの窒素成分には、大気降下物だけでなく、土壌の窒素成分の影響も強く受けていたことが挙げられる。そのため、土壌タイプが大きく異なる地域間では、窒素汚染の評価が難しくなったのだろう。また、過去の標本を利用してこの70年間における窒素汚染の変遷の評価を試みたが、明確な傾向はみられなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義として、（1）調査が容易な指標生物を利用することで、低コストで窒素降下物の汚染が評価できること、（2）金属同位体比も同時に利用することで、多角的に大気降下物による汚染を評価することができること、が挙げられる。

また、生物指標は機器を設置する必要がないことから長期モニタリングに最適であり、生物指標を利用した環境動態モニタリングの提案にもつながることが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study evaluated the spatial and temporal patterns of atmospheric nitrogen pollution in Japan using moss as a bioindicator. In mountainous areas, western slopes are more seriously affected by nitrogen pollution, as western slope aspects are subject to transboundary pollutants carried to Japan via westerly winds. This influence varies based on elevation because domestic nitrogen pollution decreases with increasing elevation. However, moss did not clearly reflect national-scale spatial patterns of nitrogen pollution, likely because moss is influenced by both atmospherically derived and soil-derived nitrogen. The usefulness of moss as an indicator was therefore reduced when it was applied to areas with more varied soil properties. Similar to the results regarding national-scale spatial patterns, no clear trends were detected concerning the temporal patterns of nitrogen pollution over the past 70 years.

研究分野：生態学

キーワード：コケ植物 生物指標 窒素汚染 窒素安定同位体 越境大気汚染 広域スケール 山岳 金属同位体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、窒素降下物による汚染(以下、窒素汚染)が自然環境に及ぼす影響が危惧されており、その実態の解明・評価が急務となっている。しかし、窒素降下物の濃度は測定日時や気象条件によって大きく変化し、その計測には多くの時間や費用が必要である。

日本においては、アジアから大量に飛来する窒素化合物が生態系などに与える影響が強く懸念されており、その影響を広域に評価することが緊喫の課題となっている。

こうした中、低コストで広域の環境負荷を評価できる生物を利用した環境評価(生物指標)が注目されている。とくに、コケ植物は大気降下物を効率よく吸収することから、窒素降下物に対する優れた指標になることが知られている。

なお、コケを利用して窒素汚染を評価する際、コケに含まれる窒素の重量パーセント(Moss %N)ならびに、窒素安定同位体比(Moss ^{15}N)が指標として広く利用されている。Moss %Nは窒素降下物の総量と強い相関があり、窒素汚染の深刻度の指標となる。窒素安定同位体比(^{15}N)については、一般に、アンモニア態窒素よりも硝酸態窒素で高い値を示す。そのため、Moss ^{15}N はコケに含まれる窒素の由来を考察するカギとなる。なお、越境由来の粒子状物質に含まれる窒素化合物では、 ^{15}N が高くなることが報告されている。

2. 研究の目的

本研究では、コケ植物を生物指標として利用し、窒素降下物の影響を評価するとともに、過去の植物標本を利用することで、近年の窒素汚染の動態の把握を試みる。この結果に基づいて、窒素汚染が空間的・時間的にどのように進行しているか明らかにする。

さらに、以下の3つの仮説を検討することで、とくに越境大気汚染の影響を評価し、生物指標の効果的な利用についても考察する。

(仮説1) 越境大気汚染の影響を受けやすい日本海側では、Moss ^{15}N が高くなる

(仮説2) 国内汚染の影響が小さい高標高域では、越境大気汚染の影響が相対的に強くなる。そのため、高標高域において、Moss ^{15}N は上昇する。

(仮説3) 近年、越境大気汚染の影響が強くなっていることから現在のコケの Moss %N・ ^{15}N は過去に採取された標本よりも高い値となる。

3. 研究の方法

(1) 空間スケールの窒素汚染の解明

空間スケールにおける窒素汚染の解明については、広域、山岳、の2つのスケールで研究を進め、それぞれの結果から仮説1、仮説2の妥当性を検証した。

広域における窒素汚染

東アジア酸性雨モニタリングネットワーク、ならびに環境省により、現在、日本の23カ所(2019年現在)で定期的に湿性沈着する窒素降下物がモニタリングされている(環境省 2019)。そこで、これらの調査地において、広く分布するハイゴケ(*Hypnum plumaeforme*)に含まれる Moss %N・ ^{15}N を分析し、環境条件との関連について検討した。

分析に用いた環境条件は、湿性沈着した年間の NO_3^- 、 NH_4^+ の総量(Total NO_3^- 、Total NH_4^+ ; 単位 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$)と平均濃度(Conc NO_3^- と Conc NH_4^+ ; $\mu\text{mol/L}$)、土壌の硝酸態窒素濃度とアンモニア態窒素濃度(Soil NO_3^- と Soil NH_4^+ ; $\text{mg}/100\text{g}$)である。このうち、Total NO_3^- 、Total NH_4^+ 、Conc NO_3^- と Conc NH_4^+ については、環境省による公表データ(2013 - 2017年平均)を利用した(環境省 2019)。また、Moss %N・Moss ^{15}N と各環境条件との関係の分析にはRandom forestを用いた。

山岳における窒素汚染

標高傾度、斜面方位との関係を検討するため、各斜面に登山道が整備されている八ヶ岳を調査地とし、八ヶ岳の東斜面(2ルート)、北斜面(1ルート)、西斜面(2ルート)、南斜面(3ルート)を調査プロットとした。各ルートで標高1800 - 2800mの区間で標高200mおきにイワダレゴケ(*Hylocomium splendens*)を採取した。これらのサンプルに含まれる Moss %N・ ^{15}N を分析し、標高・斜面方位との関係について検討した。

(2) 時間スケールの窒素汚染の解明

1950年以降にコケ標本が採取されている複数の地点において、過去から現在に至るまでに採取されたシモフリゴケ(*Racomitrium lanuginosum*)の Moss %N・ ^{15}N を分析した。この分析結果から、過去約70年間に起こった窒素降下物汚染の動態の把握を試みた。

(3) 空間スケールにおける金属同位体を利用した越境大気汚染の影響評価

空間スケールにおける窒素汚染の解明を進めるにあたり、越境大気汚染の優れた指標となる金属元素(ストロンチウム・鉛)の同位体比の分析も同時に行った。この結果も利用して、越境大気汚染に対するコケ植物の指標性について考察を加えた。

なお、調査地は3(1)と同じ地域とし、各調査地で採取されたコケのストロンチウム同位体比($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)ならびに鉛同位体比($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)を分析した。これらの同位体比は

越境由来の大気降水物で高くなることが報告されている (Mukai et al. 1999; Nakano et al. 2001)。そこで、仮説 1 に基づけば、大陸に近い日本海側で金属同位体比の値も高くなると予想される。

4. 研究成果

(1) 空間スケールの窒素汚染の解明

広域における窒素汚染

調査対象とした 23 カ所のうち、14 カ所からハイゴケが採取された (図 1)。そこで、得られたサンプルの Moss %N・ ^{15}N を分析し、各環境条件との関係について、Random Forest を用いて分析した。その結果、Moss %N は用いた環境変数で分散の 71.18 % が説明され、Moss %N には土壌の窒素成分 (Soil NO_3^- 、Soil NH_4^+) が強く関わっていることが明らかになった (図 2 a)。一方、Moss ^{15}N は分散の 31.36 % が説明され、Soil NH_4^+ が大きな影響を及ぼしていることが示唆された (図 2 b)。以上の結果より、Moss %N・Moss ^{15}N にはいずれも土壌の影響が強く反映されており、仮説 1 で予想された越境大気汚染が関連する地理的な相違は明確には確認されなかった。

この理由として、調査地間で土壌タイプの違いが大きかったこと、および、今回分析に利用したハイゴケは地上に這うようにして生育するため、雨などによる土壌の跳ね返りなどによって土壌がコケに付着し、その影響を受けやすかったことが挙げられる。

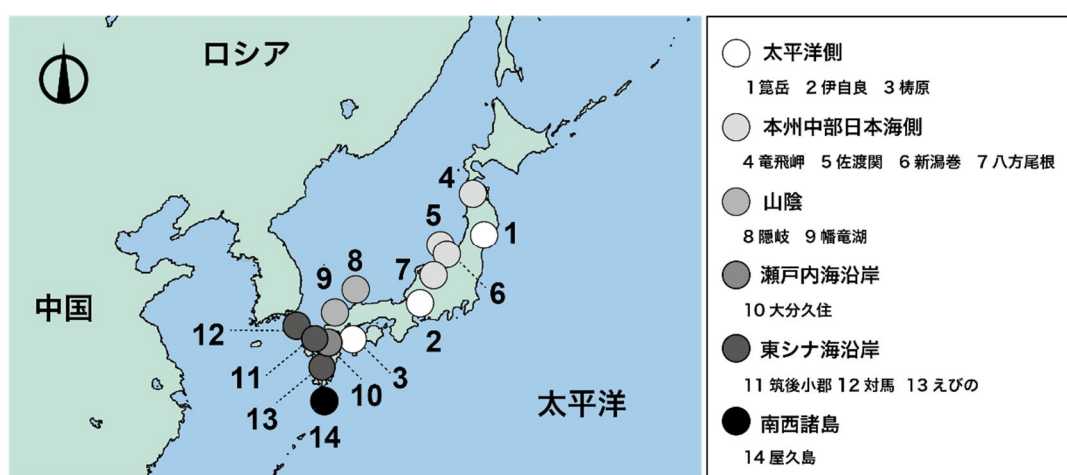


図 1 調査地 (番号はサンプルが採取された 14 カ所)

環境省 (2019) に基づき、各調査地は太平洋側、本州中部日本海側、山陰、瀬戸内海沿岸、東シナ海沿岸、南西諸島の 6 つにグループ化される。本州中部日本海側・山陰では越境大気汚染の影響が強いことが明らかになっている

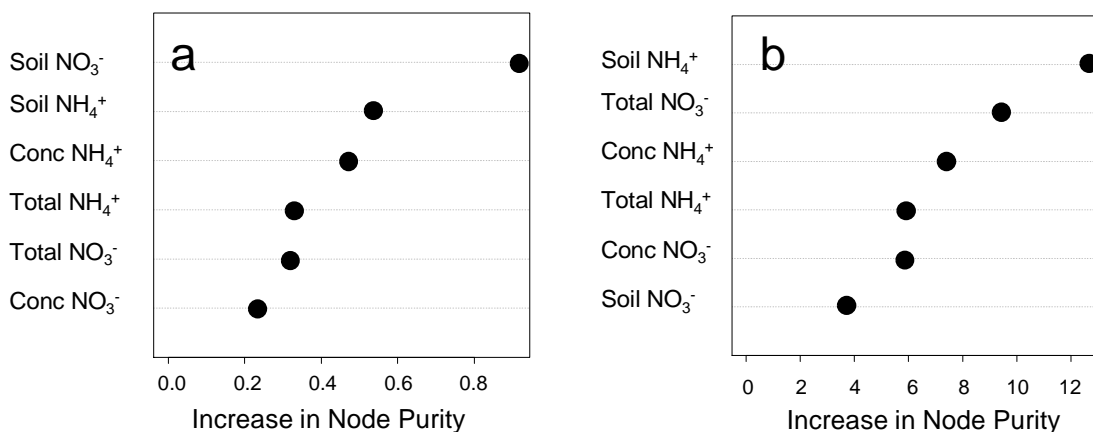


図 2 RandomForest によるコケの窒素量・安定同位体比に関わる変数の重要度

(a) コケの窒素量 (%) (b) コケの窒素安定同位体比 (‰)

Total NO_3^- : 湿性沈着した年間の NO_3^- 、Total NH_4^+ : 湿性沈着した年間の NH_4^+ の総量、Conc NO_3^- : 湿性沈着した年間の NO_3^- の平均濃度、Conc NH_4^+ : 湿性沈着した年間の NH_4^+ の平均濃度、Soil NO_3^- : 土壌の硝酸態窒素濃度、Soil NH_4^+ : 土壌のアンモニア態窒素濃度

山岳における窒素汚染

八ヶ岳における Moss $\delta^{15}\text{N}$ の変化について、標高傾度・斜面方位ごとに分析を行った。

その結果、Moss $\delta^{15}\text{N}$ は高標高・西斜面で高くなる傾向がみられた(図3)。これはアジア大陸由来の汚染物質が西風によって日本に運ばれてくること、ならびに、高山域では国内都市からの影響が小さく、越境大気汚染の影響が反映されやすいためであると考えられる。これは仮説2を支持する結果である。

ここで、広域における分析結果と異なり、山岳では越境由来の窒素汚染の影響が強く現れた理由としては、以下の要因が考えられる。

- ・山岳域は国内の都市から排出される窒素化合物の影響を受けづらく、相対的に越境大気汚染の影響が大きくなったこと
- ・一つの山域で調査を行ったため、土壌などの環境の違いが反映されにくかったこと
- ・山岳における窒素汚染の分析で用いたコケ植物種は大型だったため、土壌に含まれる窒素化合物の影響を受けづらかったこと

なお、山岳域ではコケが水涵養などの生態系機能を担っている。そのため、窒素汚染が進行し、コケ層が劣化することで、生態系におよぼす影響が危惧される。

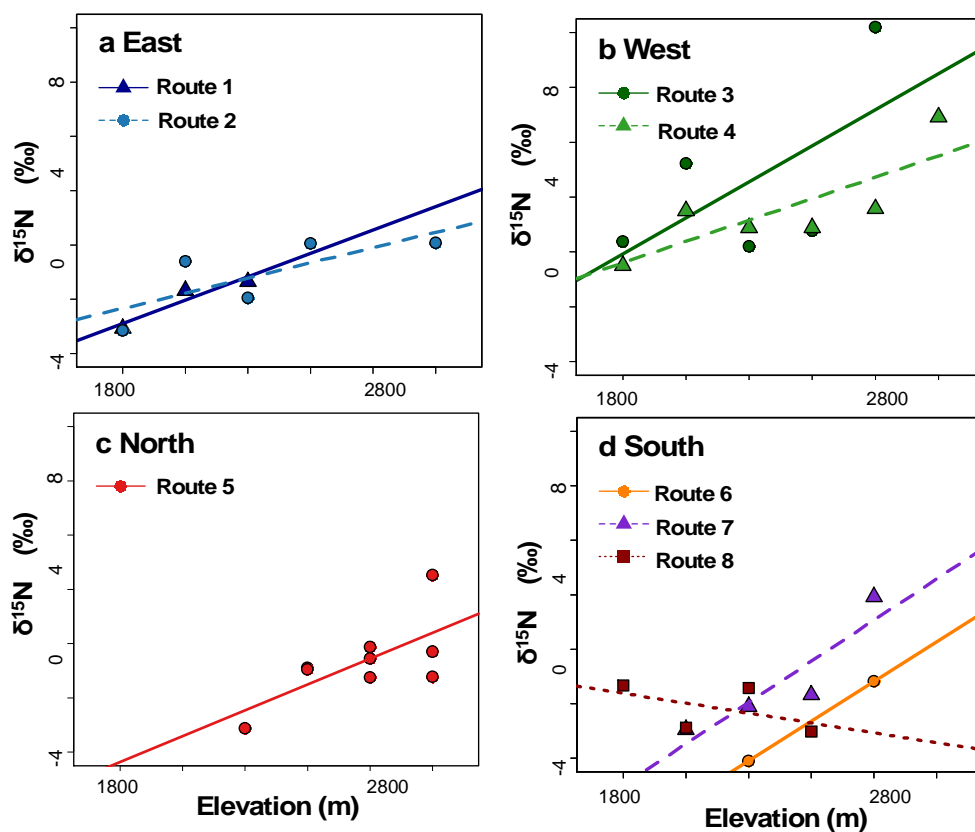


図3 標高・斜面方位とコケの窒素同位体比との関係

(2) 時間スケールの窒素汚染の解明

シモフリゴケの Moss $\text{N} \cdot \delta^{15}\text{N}$ の時系列的な変化を分析した。その結果、一部の地域では近年、Moss $\delta^{15}\text{N}$ が高くなる傾向がみられた。しかし、値のバラつきが大きく、仮説3の妥当性は確認できなかった。そこで、今後、新たに過去の標本を入手し、標本数を増やして分析を進める必要がある。

(3) 金属同位体比を利用した越境大気汚染の影響評価

広域における越境大気汚染

まず、コケのストロンチウム同位体比 (Moss $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) を利用して、調査地(図1)における越境大気汚染の影響について解析した。その結果、日本海側で越境大気汚染の影響が強く表れるという仮説1に反し、Moss $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の値は日本海側で高い値とはならなかった。

その一方、Moss $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は Soil $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ と強い正の相関があり、Moss $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ には土壌の影響が強く反映されていることが明らかになった。

次に、コケの鉛同位体比 (Moss $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) を分析したところ、この値は、山陰や

一部の本州中部日本海側の調査地で高くなり、大陸由来の鉛化合物の同位体比に近い値を示した。このことから、鉛同位体比を利用した分析結果は仮説 1 を支持し、越境大気汚染の影響が強く反映されていたと考えられる。

また、コケの鉛同位体比と土壌の鉛同位体比の間には有意な相関はみられず、土壌に含まれる鉛化合物がコケに与えている影響は小さかった。この理由としては、鉛は土壌粒子に強く吸着されており、土壌に含まれている鉛化合物はコケに吸収されにくかったことが考えられる。その結果、ストロンチウム同位体比の結果とは異なり、コケの鉛同位体比には大気降下物の影響が反映されやすかったと推察される。

山岳における越境大気汚染

ここでは、標高・斜面方位がコケのストロンチウム・鉛同位体比に与える影響について分析した。その結果、いずれの同位体比も母岩や国内由来の大気降下物が示す値の範囲にあり、越境大気汚染の影響はほとんどみられなかった。これは、調査を行った八ヶ岳は内陸部にあり、日本海側と比べて越境大気汚染の影響がもともと小さかったためであろう。

興味深い結果として、調査地とした八ヶ岳において、越境大気汚染の影響は窒素安定同位体には現れていたが、鉛同位体比にはみられなかったことが挙げられる。この相違が生じた理由として、越境由来の鉛化合物は水への溶解度が低く、コケ植物に与える影響が小さかった可能性がある。

(4) コケを利用した窒素汚染の影響評価への提案

本研究結果より、コケは大気から窒素化合物を吸収していても、コケが土壌に接して生育している場合、土壌に含まれる窒素成分の影響も強く受けることが明らかになった。そのため、コケを利用して窒素降下物による汚染を評価する場合、樹幹や岩上など、土壌から離れたところに生えるコケを利用する、もしくはシュートの先端が土から離れた大型の種を使うなどの工夫が必要であろう。とくに、広域で窒素汚染を評価する際には、土壌タイプが調査地間で異なる可能性が高く、指標として用いる種や採取場所の選択に細心の注意を払う必要がある。

また、今回、窒素安定同位体比と金属同位体比を利用したコケモニタリングの結果を比較することで、コケの大気降下物に対する指標性についても考察を深めることができた。この成果から、今後、複数の同位体比を同時に利用することで、多角的な視点から大気汚染の影響を評価できると期待される。

謝辞

窒素安定同位体比・金属同位体比の分析については、総合地球環境学研究所の同位体環境学共同研究事業の支援により行った。

引用文献

環境省 (2019) 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング報告書 (平成 25 ~ 29 年度)
<http://www.env.go.jp/air/acidrain/monitoring/rep4.html> (2020 年 6 月 26 日閲覧)

Mukai, H., Tanaka, A., Fuji, T. (1999) Lead isotope ratios in snow collected in Japan and their relations to long-range transport of air pollutants. *Journal of Japan Society for Atmospheric Environment* 34, 86-102.

Nakano, T., Yokoo, Y., Yamanaka, M. (2001) Strontium isotope constraint on the provenance of basic cations in soil water and stream water in the Kawakami volcanic watershed, central Japan. *Hydrological Processes* 15, 1859-1875.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Oishi, Y.	4. 巻 9
2. 論文標題 Evaluation of water-storage capacity of bryophytes along an altitude gradient from temperate forests to the alpine zone	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Forest	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/f9070433	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 Oishi, Y.	4. 巻 208
2. 論文標題 Moss as an indicator of transboundary atmospheric nitrogen pollution in an alpine ecosystem	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmospheric environment	6. 最初と最後の頁 158-166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.atmosenv.2019.04.005	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5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大石善隆
2. 発表標題 コケ植物を指標とした山岳域における越境大気汚染の評価 室素編
3. 学会等名 第8回同位体シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大石善隆
2. 発表標題 コケ植物を指標として山岳地域の窒素汚染を評価する
3. 学会等名 日本生態学会第66回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大石善隆
2. 発表標題 しゃがむと見える：コケ生物学への誘い
3. 学会等名 日本種生物学会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大石善隆
2. 発表標題 コケで環境を分析する
3. 学会等名 生体機能関連化学部会若手の会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Oishi, Y.
2. 発表標題 Bryophytes as indicators for nitrogen pollution
3. 学会等名 Special Lecture
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 大石善隆	4. 発行年 2019年
2. 出版社 NHK出版	5. 総ページ数 286
3. 書名 コケはなぜに美しい	

1. 著者名 陀安一郎、申基澈、藤吉麗編	4. 発行年 2020年
2. 出版社 総合地球環境学研究所	5. 総ページ数 100
3. 書名 同位体環境学がえがく世界：2020 年版	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>コケの生態学 http://www.moss-ecology.jp/index.html</p>
--

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