

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32658

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K06339

研究課題名(和文) ミズゴケの陽イオン交換能による湿原酸性化メカニズムの検証

研究課題名(英文) Verification of mechanisms of mire acidification by cation exchange of Sphagnum

研究代表者

中村 隆俊 (Nakamura, Takatoshi)

東京農業大学・生物産業学部・教授

研究者番号：80408658

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：湿原における強酸性環境の存在は、生態系機能や植生分布機構の維持において、極めて重要な位置づけにある。しかし、湿原の強酸性化メカニズムについては、フィールド研究が少なく検証が進んでいない。本研究ではミズゴケの陽イオン交換を通じた酸性化に着目し、湿原に生育するミズゴケ7種の陽イオン交換能と生育地のpH環境について調べた。陽イオン交換能の高いミズゴケ類が生育する立地ほど土壌水のpHが大きく低下したことから、湿原の強酸性環境がミズゴケによって生じている可能性が強く示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでフィールドデータに基づく定量的な検証がほとんど無いまま議論が続いてきたミズゴケ陽イオン交換と湿原酸性化の関係について、本研究ではフィールドでの定量的データに基づくより確実な知見を得ることができた。本研究で得られた成果は、pH環境によって規定される湿原特有の植生分布構造や、強酸性の泥炭土壌として維持される炭素シンク機能において、それらを支える基盤メカニズムの理解に今後大きく貢献するものと思われる。

研究成果の概要(英文)：The presence of strongly acidic environments in mires is critical for maintaining ecosystem functions and vegetation distribution mechanisms. However, there have been few field studies on the acidification mechanisms of mires, and the verification of its mechanism has not progressed.

In this study, we focused on acidification by Sphagnum cation exchange, and examined the cation exchange capacity of seven Sphagnum species growing in the mire and the pH environment of their habitats. The soil water pH showed a significant decline in the habitats where the high cation-exchange capacity Sphagnum species were present, strongly suggesting that the strongly acidic environment in the mires is primarily driven by Sphagnum.

研究分野：植物生態学

キーワード：湿原酸性化 ミズゴケの陽イオン交換

## 1. 研究開始当初の背景

一般に、湿原はスゲやヨシが優占するフェンからミズゴケが地表面を覆うボグへと遷移するが、その遷移に伴う土壌の強酸性化により、炭素蓄積速度の大幅な上昇や植物相の著しい変化等が生じる。ゆえに、湿原における強酸性環境の存在は、生態系機能や植生分布機構の維持において、極めて重要な位置づけにある。

ボグで生じる強酸性化は、ミズゴケによる陽イオン交換との関連性が古くから指摘されてきた (Clymo 1963)。根を持たないミズゴケは、シュートの表面全体が栄養塩類の強力な吸着サイトとなっており、周囲の陽イオンを体内由来の  $H^+$  で置き換えることで吸着・吸収を行っている。その際に放出した  $H^+$  がミズゴケ周囲の強酸性化をもたらしていると考えられている。ミズゴケの陽イオン交換能は、置換可能な陽イオン量の最大値 (Cation Exchange Capacity: CEC) としてシュート重量あたりで評価が試みられてきた。

しかし、ミズゴケ CEC とボグの強酸性化の関係については、比較種数の少なさや、比較した環境・植生レンジの狭さなどが原因で一定の傾向が得られていない。さらに、これまで評価に用いられてきた CEC は最大交換能を表す指標であるため、現場での陽イオン交換量を必ずしも反映しているわけではないことも問題点として挙げられる。陽イオン交換は  $H^+$  が保持された状態の吸着サイトで生じるが、他の陽イオンが既に交換・吸着したサイトでは、それらが体内へ吸収されるまで交換機能は停止状態となる。吸着した  $NH_4^+$  や  $K^+$  は養分として短期間のうちに吸収されるため、それらが吸着したサイトでは交換機能が再生しやすく、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$  等はほとんど吸収されずサイトに留まるため機能不全となる。従って、現場での陽イオン交換能力を評価するには機能不全サイトを除外する必要がある。これらのことに加えて、ミズゴケ陽イオン交換能の季節変化や現場でのミズゴケシュート密度・種組成を考慮した面的な評価も重要であると考えられるが、これまで試みられた事例は無い。

## 2. 研究の目的

本研究は、ミズゴケシュートにおける有効な陽イオン交換サイトに着目し、その量的な季節変動の把握を通じて、ミズゴケによる湿原の強酸性化メカニズムについて検証することを目的とした。これまでは重量あたりで算出されたミズゴケ CEC の一時的な値から酸性化能力の議論が行われてきたが、本研究では現場で機能する陽イオン交換サイトを対象として、ミズゴケのシュート密度や種組成を反映させた面積あたりの年平均値から酸性化能力を評価した。

## 3. 研究の方法

北海道別寒辺牛湿原にて、フェンからボグへの植生変化をカバーする 50 地点の調査定点を設定し、以下の項目について調査・実験を行った。

### (1) ミズゴケ各種の出現環境と生育特性

各調査定点にて表層土壌水を 4・7・10 月に採取し、pH を測定すると共にイオンクロマトグラフィーで各種陽イオン濃度を測定した。各調査定点に 2m 四方のコドラートを設置し、コドラート内の主要な出現種(チャミズゴケ、体ミズゴケ、ムササミズゴケ、ワミズゴケ、材ミズゴケ、クロミズゴケ、エゾコナゴケ)の被度 (%) を記録し、各種のパッチに対して直径 10cm 円内のシュート本数密度を測定した (合計 84 パッチ)。また、それらのパッチからそれぞれ 5 本のシュートを 4・7・10 月に採取した。

### (2) ミズゴケの陽イオン交換容量

採取したシュートは乾燥・秤量の後、0.02M HCl 溶液で 1 時間振盪しシュートの陽イオン交換サイトを全て  $H^+$  で置換するとともに、振盪後の HCl 溶液に含まれる  $NH_4^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$  の濃度を測定した。さらに、HCl 溶液から取り出したシュートは NaCl 溶液で 3 時間振盪することで全サイトを  $Na^+$  で置換し、再び HCl 溶液で 1 時間振盪した後、HCl 溶液に含まれる  $Na^+$  濃度を測定することで CEC を求めた。これらの分析データを用いて、ミズゴケシュートの陽イオン交換サイトを以下のように区分し、それぞれシュート乾重量あたりで算出した。

A : 機能不全サイト =  $Ca^{2+} \cdot Mg^{2+} \cdot Na^+$  の化学当量の合計値

B : 有効サイト = CEC - A

C : フリーサイト ( $H^+$  保持サイト) =  $B - (NH_4^+ \cdot K^+)$  の化学当量の合計値

### (3) 面積あたりの陽イオン交換容量の算出

1 シュート重量およびパッチ内のシュート本数密度、さらにコドラート内に出現した各種の被度データを用いて、(2) で算出した各サイトにおける乾重あたりの陽イオン交換容量を面積あたりに変換した。これらの面積あたりの陽イオン交換容量は、全調査定点を対象に 4・7・10 月それぞれ算出した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 各サイト区分における陽イオン交換能

各種の重量あたりの陽イオン交換能は、CEC と有効サイトで傾向が大きく異なることが明らかとなった (図 1a)。陽イオン交換能力の最大値をあらわす CEC は、フェン種 (クシロミズゴケ、エゾコガネハイゴケ) や中間種 (ムラサキミズゴケ、イボミズゴケ、ワラミズゴケ、オオミズゴケ) よりもむしろボッグ種 (チャミズゴケ) の方がやや低い値となった。重量あたりの CEC が必ずしもボッグ種で高いわけではないことは、欧州の湿原において Soudzilovskaia ら (2010) が指摘しており、ミズゴケによる湿原酸性化仮説に対する懐疑的意見の論拠となってきた。しかし、本研究で着目した有効サイトの値は、フェン種で大幅に低く CEC とは対照的な結果となった。これらの結果は、フェン種では一般に Ca や Mg、Na などのミネラルイオンが多く流れ込みやすく、それらがフェン種のシュートに多く吸着し機能不全サイトの比率が非常に高くなったためであると考えられる。

各種のパッチあたりの陽イオン交換能は、CEC、有効サイトともにボッグ種で最も高くフェン種で低い値となった (図 1b)。パッチ面積あたりのシュート重量は、フェン種のクシロミズゴケ、エゾコガネハイゴケよりもボッグ種のチャミズゴケで 3 倍以上高かったことから、有効サイトだけでなく CEC についてもボッグ種で高くなったと考えられる。

コドラートあたりの陽イオン交換能は、ボッグで CEC 約 160 meq/m<sup>2</sup>、有効サイト約 90 meq/m<sup>2</sup>、フェンで CEC 約 32 meq/m<sup>2</sup>、有効サイト約 7 meq/m<sup>2</sup> となり、特に有効サイトではフェンとボッグで 10 倍以上の差が生じていることが明らかとなった (図 1c)。フェンとボッグのこうした大きな差は、それぞれの湿原タイプに分布するミズゴケの種組成と被度の違いを反映しており、ボッグでは陽イオン交換能の高いチャミズゴケパッチが高い被度で分布することがコドラートあたりの値を大きく上昇させたと思われる。

ミズゴケの陽イオン交換能と湿原酸性化の関係は、これまでシュートの CEC が議論の中心となってきたが、本研究では交換能を発揮可能な状態にある有効サイトに着目することでフィールドでの現象をよりの確に理解することが可能となった。また、ミズゴケの面的な広がりや考慮した陽イオン交換能の定量的データはこれまで報告されておらず、本研究ではじめて提示したそれらのデータは今後の様々な議論において貢献するものと思われる。

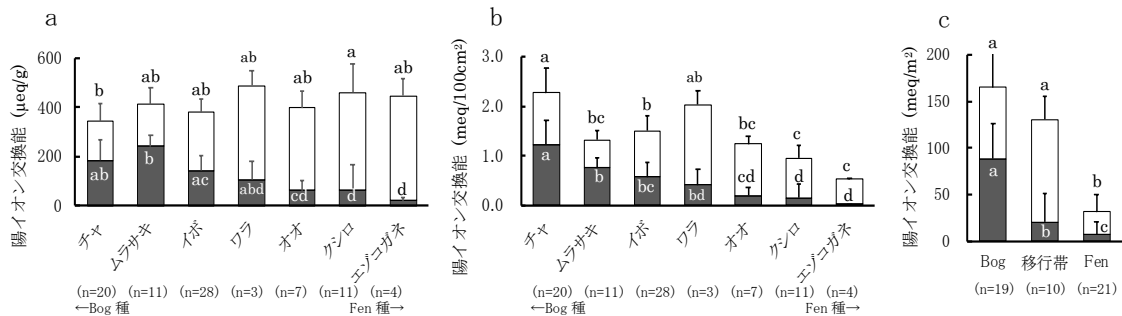


図 1. 重量あたり (a)、パッチあたり (b)、コドラートあたり (c) の陽イオン交換能  
各陽イオン交換能のデータは 4・7・10 月の平均値を用いた。■：有効サイト、□：機能不全サイト、■+□：CEC。図中の異なるアルファベットは各種間または湿原タイプ間に 5% 水準で有意差が認められたことを示す (Tukey-Kramer test)。

##### (2) 有効サイトにおける陽イオン交換能の季節変化

ボッグでは 4 月から 10 月にかけてやや陽イオン交換能の低下がみられたが、大きな季節変化は認められず概ね高い値で推移した (図 2)。フェンにおいても季節変化はほとんどみられず、季節を通じて低い値で推移した。しかし、移行帯では 7 月に陽イオン交換能が大きく上昇する傾向が認められた。

これらのことから、陽イオン交換能の季節変化は湿原タイプ間で大きく異なることが明らかとなった。この原因については今後検証が必要であると思われるが、湿原タイプ間の冠水頻度の違いが関与している可能性がある。常に冠水しやすいフェンでは、冠水を通じたミネラルイオンの吸着 (= 有効サイトの消失) が季節を通じて生じやすく、陽イオン交換能が常に低く推移したと思われる。一方で、季節を通じて冠水することのないボッグでは常に陽イオン交換能が高く維持され、移行帯では水位の低下する夏期のみ冠水が回避され値が上昇したものと考えられる。

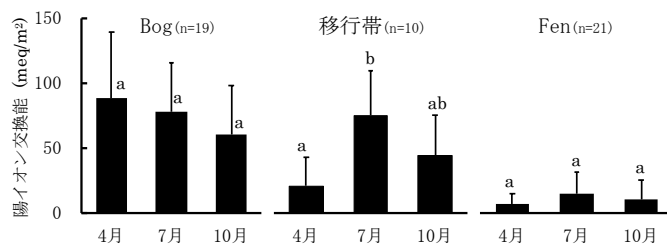


図 2. 有効サイトにおける陽イオン交換能の季節変化  
陽イオン交換能のデータは有効サイトを対象としたコドラートあたりの値を用いた。図中の異なるアルファベットは 5% 水準で有意差が認められたことを示す (Tukey-Kramer test)。

### (3) 土壌水 pH と陽イオン交換能の関係

有効サイトを対象とした陽イオン交換能と土壌水 pH の関係は、重量あたり・パッチあたり・コドラートあたりともに有意な負の相関が認められた (図 3)。同時に、重量あたりの陽イオン交換能からコドラートあたりの陽イオン交換能へとスケールアップするにつれて、pH 環境との相関関係がより密接となる傾向が得られた。また、重量あたりおよびパッチあたりの関係については、pH 環境と陽イオン交換能における種間差によって全体的な相関関係が形成されており、種内での相関関係はほとんど認められなかった。

ミズゴケの陽イオン交換能と湿原 pH 環境の関係については、フィールドデータに基づく直接的な解析・検証がこれまでほとんど進んでいなかった。本研究では、重量あたりからコドラートレベルに至る幅広いスケールにおいて pH 環境とミズゴケの陽イオン交換能との密接な関連性が示された。これらの結果は、ミズゴケ類の陽イオン交換能が高い立地ほど酸性化しやすいことを強く示唆しており、湿原の強酸性環境がミズゴケによって生じていることを裏付けるものでもある。しかし、湿原の pH 環境は  $\text{Ca}^{2+}$  や  $\text{Mg}^{2+}$  などのベースカチオンの供給程度によっても大きく変化することが知られている。従って、幅広い湿原タイプを視野に入れた pH 環境の維持メカニズムを議論するためには、ベースカチオンの供給とミズゴケによる酸性化作用との両者を考慮に入れた調査・解析が今後必要であると考えられる。

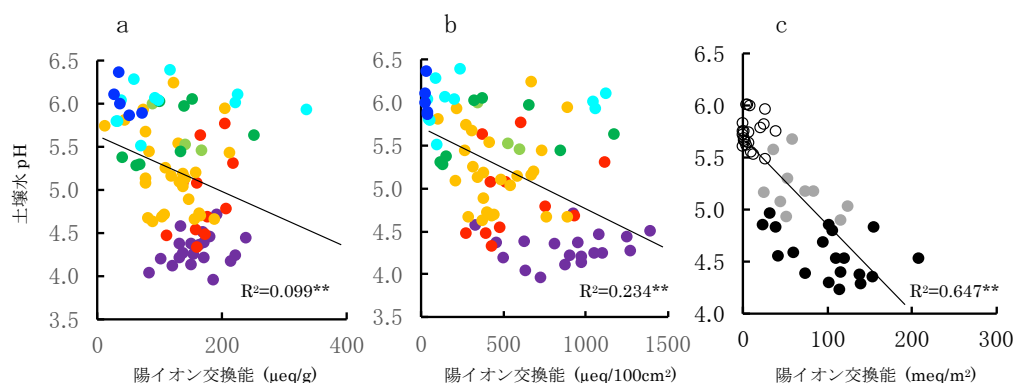


図 3. 重量あたり (a)、パッチあたり (b)、コドラートあたり (c) の陽イオン交換能と土壌水 pH の関係

各陽イオン交換能 (有効サイト) および土壌水 pH のデータは 4・7・10 月の平均値を用いた。●: チャミズゴケ、●: ムラサキミズゴケ、●: イボミズゴケ、●: ワラミズゴケ、●: オオミズゴケ、●: クシロミズゴケ、●: エゾコガネハイゴケ、●: Bog、●: 移行帯、○: Fen

### <引用文献>

Clymo RS, Ion exchange in Sphagnum and its relation to bog ecology. Annals of Botany 27: 309-324.

Soudzilovskaia NA, Cornelissen JHC, During HJ, Van Logtestij RSP, Lang SI & Aerts R (2010) Similar cation exchange capacities among bryophyte species refute a presumed mechanism of peatland acidification. Ecology 91: 2716-2726.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中村隆俊, 杉森奏良, 高橋理子, 山口未乃理, 中村元香
2. 発表標題 湿原におけるミズゴケの陽イオン交換能とその季節変化
3. 学会等名 日本生態学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 隆俊, 石橋 結衣, 小野 元偉, 中村 元香
2. 発表標題 湿原における強酸性環境の分布とミズゴケの陽イオン交換能との関係
3. 学会等名 日本生態学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村隆俊, 白塚潤
2. 発表標題 湿原のpH環境におけるミズゴケの陽イオン交換を通じた酸性化の影響
3. 学会等名 日本生態学会
4. 発表年 2024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
---------	---------