

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24710029

研究課題名(和文)生物指標を利用した地球温暖化による生態系の脆弱性の評価

研究課題名(英文)Evaluation of the vulnerability of ecosystems to climate changes by using bryophytes as bio-indicators

研究代表者

大石 善隆(Oishi, Yoshitaka)

北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・博士研究員

研究者番号：80578138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：亜高山～高山帯の生態系は、温暖化に最も脆弱な生態系の1つであり、保全への取り組みが緊急の課題となっている。山岳地域において高い多様性を有するコケ植物は環境変化に敏感に反応するため、地球温暖化が亜高山～高山帯生態系に与える影響への有用な指標になると期待される。そこで、本研究ではこうしたコケ植物の利点を活かし、温暖化に対するコケ植物の応答を指標として亜高山～高山帯生態系の変化や脆弱性を評価する手法を開発し、効果的な生態系の保全計画の提案を行った。

研究成果の概要(英文)：The ecosystem of the subalpine and alpine zones is vulnerable to climate changes such as global warming. Bryophytes can be useful indicators of vulnerability, because they are sensitive to their surrounding environments. In this study, we examined an effective method of using bryophytes as bio-indicators to evaluate the vulnerability of subalpine and alpine ecosystems. The study site was the Yatsugatake Mountains in the central part of Japan. We examined changes in the bryophyte diversity along an altitudinal gradient as well as response of bryophytes to temperature increase by conducting experiments at different temperatures. On the basis of the results, we identified the bryophyte species that are useful indicators and sensitive to climate changes. We, further, proposed an ecosystem monitoring system for the subalpine and alpine zones. Our study results can contribute to the conservation of ecosystems in subalpine and alpine zones.

研究分野：環境動態

キーワード：alpine zone bio-indicator bryophyte conservation global warming ecosystem subalpine zone

## 1. 研究開始当初の背景

亜高山～高山帯の生態系は、我が国の重要な景観・観光資源であるとともに、これらの地域にしか分布しない特有の生物種も多い。

しかし、これらの生態系は、温暖化に最も脆弱な生態系の1つとされており、その保全が緊急の課題となっている。効果的な生態系の保全計画をデザインするためには、温暖化に伴う生態系の劣化プロセスの把握とその評価のための指標が必要である。

### 指標生物

近年、環境変化に敏感な種(指標生物)の分布状況などを指標として環境条件や生態系を評価する手法(生物指標)が注目されている。生物指標の利点として、「物理化学的な環境要因が気象条件等によって日々変化するのに対し、生物の分布にはその生存期間中の総合的な環境条件が反映されているため、より安定した評価ができること」、「環境を構成する個々の物理・化学的要因が生物に対して及ぼす総合的、あるいは複合的な影響を評価することができること」などがある(大石 2011)。

それでは温暖化が亜高山～高山帯の生態系に与える影響を評価するための指標としてはどのような生物が適しているのだろうか?この指標生物が満たすべき条件として、(1) 亜高山帯～高山帯に広く分布していること(2) 温暖化に敏感に反応すること(3) 温暖化以外の要因(捕食-被食関係など)に左右されにくいこと、が挙げられる。これらの条件を満たす生物群の一つとしてコケ植物がある。

### 山岳域のコケ多様性

朝露や霧が高頻度で発生し、空中湿度が高い亜高山帯～高山帯においては、しばしば林床にコケ群落が発達する。さらに、厳しい気候や急峻な地形のために人為的影響が少なく、氷河遺存種(氷河期に分布していた種の生き残り)を含む高い多様性が維持されている(大石・山田 2008)。こうした多様なコケ植物が形成する景観は、近年、重要な観光資源としても注目されている。

以上のように、亜高山～高山帯において高い多様性を有するコケ植物は環境を評価する際の指標生物として非常に有用である。

### コケ指標の利点

コケ植物は単純な体制をもつため各細胞が外部環境と直接物質交換を行っており、外部環境にさらされている葉細胞の割合も高い。こうした体制から、コケ植物は外部環境の変化に極めて敏感に反応する有用な指標生物として知られている(大石 2011)。さらに、野生鳥獣や昆虫類の食害を受けることは

極めて稀であることも指標生物として優れた点である。

## 2. 研究の目的

亜高山～高山帯において多様性が高く、環境の変化に敏感に反応するコケ植物の特性を利用して温暖化に対する生態系の脆弱性を評価し、効果的な生態系の保全計画の提案につなげることは可能だろうか?本研究では野外調査・実験を通じて以下の項目を検討し、コケ植物の環境応答を利用した温暖化による生態系の脆弱性を評価する手法を開発することを目指す。

- (1) 標高傾度に沿ったコケ群落変化パターン(コケ群落の垂直分布)の把握
- (2) 野外実験によるコケ群落・種の温暖化への応答の解明
- (3) 温暖化に伴うコケ群落の劣化プロセスの予測
- (4) コケ植物指標を利用した生態系の脆弱性の評価

## 3. 研究の方法

### (1) 標高傾度とコケ多様性

本研究では、標高傾度に沿ってコドラートを設置し、環境の変化に伴ってコケ群落がどのように変化するか検討した。一般に標高が上昇すると気温が低下するため、「コケ群落の垂直分布」は、温暖化に対するコケ群落の応答と強く関連していると考えられる。

調査地は八ヶ岳一帯(長野県)とした(図1)。八ヶ岳はコケの多様性が高いため、環境要因がコケ多様性に与える影響の検討に適していると考えられた。

まず、コケ植物の垂直分布を明らかにするため、標高200ごとにコドラート(10m×10m)を設置し、コケ植物の出現種・被度の記録、環境条件の測定を行った。調査ルートは八ヶ岳を東西に貫く4ルート(標高1800～2800m)とした。さらに各コドラート内に2m×2mのサブコドラートを3～6個程度設置し、コケ群落と環境要因との関係について考察した。

コドラート内で記録・測定した環境条件は、標高・斜面方位・傾斜角・植生被度(高木・亜高木層、低木層、草本層、コケ層)・生育基物面積(土・岩・倒木)・胸高直径断面積の合計である。なお、2ルート(12コドラート)では温湿度も測定した。この温湿度の測定には、HOB0 Pro v2 U23-001(Onset社製)を用いて行った。

### (2) 解析

まず、標高傾度に沿ったコケ多様性( $\alpha$ 多様性、 $\beta$ 多様性)の変化を把握した。 $\alpha$ 多様性はコドラート内の種数とし、 $\beta$ 多様性について各標高帯のコドラートの総出現種数とその標高帯における平均出現種数で除すことで算出した。

次に温湿度がコケ多様性に与える影響を把握するため、温湿度を測定した 12 地点において、サブコドラート内の種組成と環境要因との関係を DCA によって解析した。DCA 結果の解釈は DCA 軸と環境条件・生態特性との Pearson の相関係数を算出することで行った。ここで用いた生態特性は、セン類・タイ類それぞれの総種数と被度、および各生育形の種数と被度である。

コケの生育形は光・水などの環境条件と密接な関係があるため、生育形の変化をみることで、環境条件がコケ多様性に与える影響を把握できると考えられる。ここでは Bates (1998)に基づく生育形を用いて分析を行った。

### (3) コケ群落の温暖化への応答

コケ群落の温暖化への応答を解明するため、Open top chamber (OTC) を用いて気温の上昇が林床のコケの種数・被度に与える影響について検討した。

調査地は信州大学西駒演習林（長野県）の標高 2600m 付近のダケカンバーハイマツ帯とした。本調査地に OTC を用いた温暖化区（6 コドラート）と対照区（6 コドラート）を設置し、2012～2014 年の 2 年間のコケの種数・被度の変化を比較した。

## 4. 研究成果

### (1) 標高傾度と種多様性

八ヶ岳に設置したコドラートからは、221 種のコケ植物が確認された。調査地の温度の測定結果を図 2 に、相対湿度の測定結果を図 3 に示した。

標高傾度に沿ったコドラート内の種多様性の変化を図 4 に示した。全体として、種数は標高に沿って緩やかなつり鐘状の曲線を描き、標高 2400m で最大になった。被度も同様の傾向を示した（図 5）。

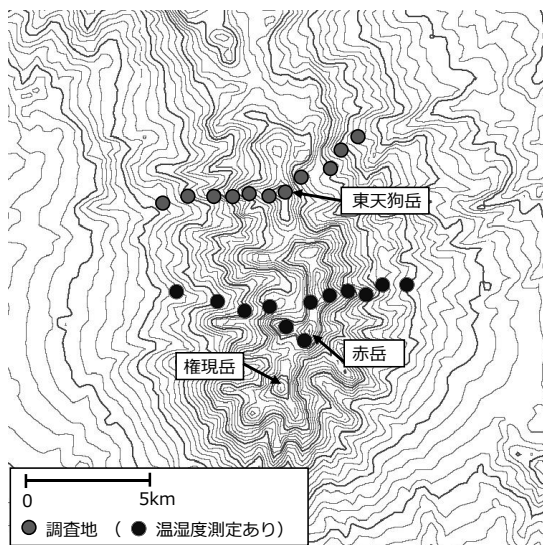


図 1 調査地（八ヶ岳）

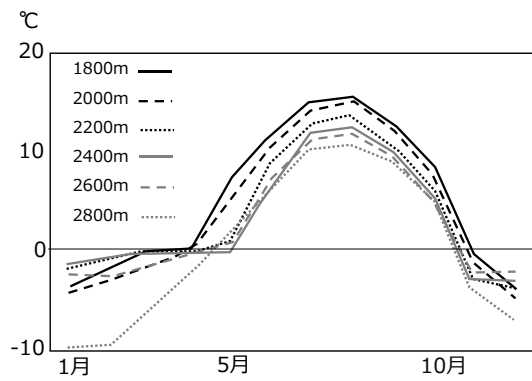


図 2 各標高における平均気温の年変化

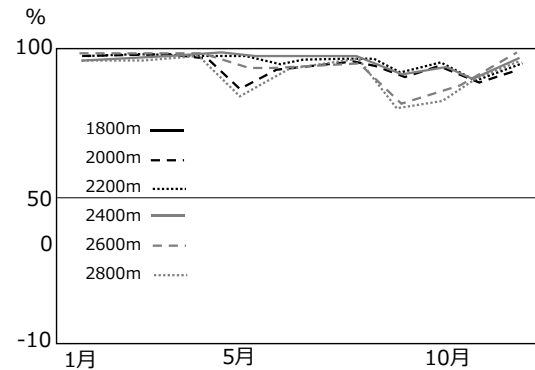


図 3 各標高における平均相対湿度の年変化

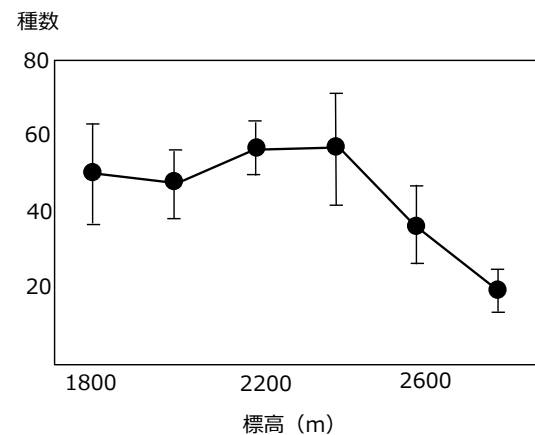


図 4 標高傾度と種数の変化（平均±SD）

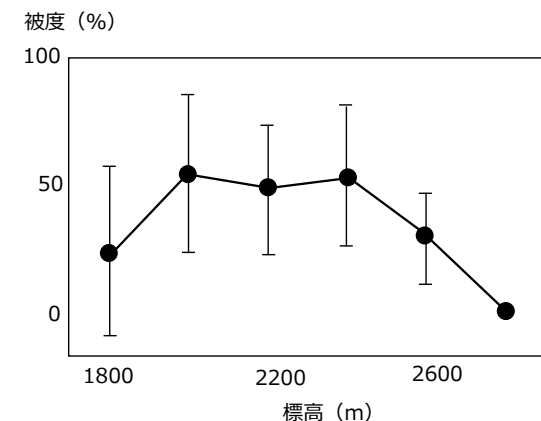


図 5 標高傾度と被度の変化（平均±SD）

次に各標高帯における $\alpha$ 、 $\beta$ 多様性を表1に示した。 $\alpha$ 多様性と異なり、 $\beta$ 多様性は高標高域(2600、2800m)で高くなる傾向がみられた。

表1 標高と $\alpha$ ・ $\beta$ 多様性

標高	出現種数	$\alpha$ 多様性	$\beta$ 多様性
1800	123	49.8	2.47
2000	110	47.3	2.33
2200	117	56.3	2.08
2400	131	56.3	2.33
2600	96	36.5	2.63
2800	102	19.5	5.23

以上の結果より、コケ多様性は標高傾度ごとに異なり、総出現種数・ $\alpha$ 多様性ともに亜高山帯(標高2200-2400m)で高くなる傾向が明らかになった。

既存の研究より、コケの種多様性は湿度の高い地域で高くなる傾向が報告されている。ここで、標高2200-2400mで高い相対湿度が測定されていることを考慮すれば(図3)、亜高山帯の湿度環境がコケの多様性に強く関係していると考えられる。なお、亜高山帯で高い相対湿度が維持されている理由として、亜高山帯では気温の日較差が大きいため霧や露が発生しやすく、かつ、高木・亜高木層が発達しているため、湿度を保持しやすいことが挙げられる。

さらに、亜高山帯で高い種多様性がみられた理由として、亜高山帯は低山帯の種の分布域の上限になるとともに、高山帯の種の分布域の下限にあたることも(Boundary effect)考えられる。

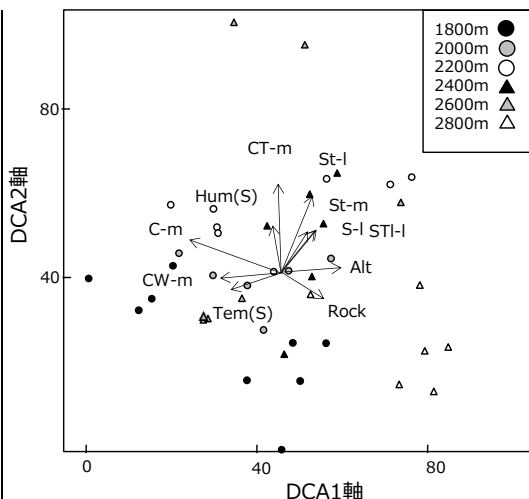
その一方、 $\beta$ 多様性については、高標高域で高い値がみられた。これは、森林が発達しない高標高域では環境緩和機能が乏しく、同標高域においても斜面方位などの影響によって環境条件が大きく異なるためであると推察される。

## (2) 種組成と環境要因

温湿度を測定した12地点について、サブコドラート内のコケ多様性と環境条件との関係をDCAによって解析した(図6)。

その結果、DCA1軸は、標高とコドラート内の岩面積と強い正の相関( $r=0.52$ ,  $r=0.45$ )があり、夏期の気温とは負の相関( $r=-0.49$ )があった。また、DCA1軸はセン類の被度とは強い負の相関があり( $r=-0.65$ )、生育形の中でもW形のセン類の被度と強い負の相関を示した( $r=-0.53$ )。その一方、タイ類の種数とは正の相関がみられた( $r=0.40$ )。

DCA2軸については、夏期の相対湿度と強い正の相関があり( $r=0.53$ )、DCA2軸に沿って、T形のセン類の被度が増加する傾向がみられた( $r=0.64$ )。また、DCA2軸はタイ類の種数とも正の相関がみられた( $r=0.44$ )。



Alt; 標高、Hum(S); 夏季の相対湿度、Tem(S); 夏季の気温  
Rock; コドラート内の岩面積

S-I; タイ類の種数、C-m; セン類の被度

CT-m; T形のセン類の被度、CW-m; W形のセン類の被度  
St-I; t形のタイ類の種数、STI-I; TI形のタイ類の種数  
St-m; t形のセン類の種数

図6 DCA結果(1軸-2軸)

以上のDCA結果について、生態特性との関係を踏まえて検討する。まず、DCA1軸は「標高傾度の上昇に伴う気温の低下と森林の減少」を表していると考えられた。さらに、DCA1軸と生態特性との相関関係から、標高が上がると林床で広い面積を被う大型のセン類(W形)の被度が減少し、タイ類の種数が増加する傾向がみられた。これは、厳しい環境条件のために草原や岩場が広がる高山帯では、亜高山帯林床のように大型セン類が優占せず、その一方、Marsupellaceaeなどの小型のタイ類が岩の隙間などに多く生育しているためだと考えられる。

DCA2軸には、「夏期の相対湿度」が反映され、相対湿度が高くなるにつれて、タイ類の種数が増加する傾向がみられた。この理由として、一般にタイ類はセン類よりも湿度環境に敏感な種が多いことが挙げられる。また、T形の種は高い湿度環境を好むため、2軸に沿ってその被度が増加したと推察される。

## (3) 温暖化実験

2012年9月~2014年7月にかけてコケの種数・被度の変化を比較した。その結果、対照区ではコケの被度が有意に増加していた一方( $t$ -value = 3.01,  $df = 5$ ,  $p < 0.05$ )、温暖化区ではコケの被度が有意に減少していること( $t$ -value = -2.60,  $df = 5$ ,  $p < 0.05$ )が明らかになった(図7)。種数については温暖化区・対照区とも有意な変化はみられなかった(図7)。

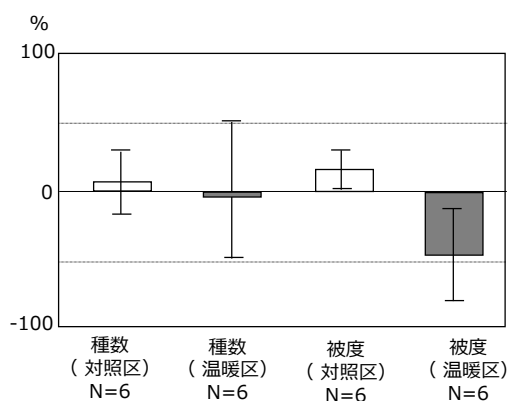


図7 温暖化実験による種数・被度の変化率

種数・被度の変化率は以下の式で算出した。

- ・種数の変化率；  
 $(2014 - 2012 \text{ 年の種数}) / 2014 \text{ 年の種数} \times 100$
- ・被度の変化率；  
 $(2014 - 2012 \text{ 年の被度}) / 2014 \text{ 年の被度} \times 100$

コケの被度が温暖化区で減少した理由として、①気温の上昇によって相対湿度が低下し、コケの生育を妨げたこと、②気温の上昇により他の林床植物の成長速度が速まってリター量が増加し、このリターがコケを覆ってその光合成を妨げたこと、が考えられる。

#### (4) 温暖化に伴うコケ多様性の変化

DCA と温暖化実験の結果に基づき、温暖化がコケ多様性に与える影響について考察する。温暖化の影響で森林限界が上昇すると、高標高域では大型セン類 (W 形) の被度が高くなるが、その一方、高山帯の岩場に分布する種の多様性が大きく低下することが予想される。

温暖化予測モデルでは、気温の上昇に伴って相対湿度も下降すると考えられている (気象庁 2013)。DCA 結果は、相対湿度の低下によって、一部のセン類 (T 形) やタイ類の多様性が減少することを示唆している。さらに温暖化実験の結果を考慮すれば、温度の上昇・相対湿度の低下が同時に起こることで、コケの被度が大きく減少することが危惧される。

#### (5) コケ指標による生態系脆弱性の評価

以上の結果より、まず「高山の岩場に出現する種群」は、温暖化に伴う環境の変化 (気温・森林限界の上昇、林床植生の変化など) の影響を受けやすく、生態系の変化を評価する際の有効な指標になると考えられる。高標高域ではコケ植物の  $\beta$  多様性が高いことから、こうした種群は、山岳環境の多様性を図る指標にもなると期待される。

さらに、生態系機能の変化を把握する上で「亜高山帯林床に出現する種群」が重要な指標になると考えられる。図5で示したように、コケの被度は亜高山帯で非常に高く、森林の水・栄養塩類の循環に大きく寄与している。

一部のセン類やタイ類は乾燥化に敏感に反応することから、亜高山帯林床に分布するこれらの種群を指標とすることで、コケを介した生態系機能の変化を早期に検出できるだろう。

ここで提案した指標の動態に着目することで、気温の上昇や乾燥化が生態系に与える影響を効果的にモニタリングできると期待される。

#### 引用文献

- Bates, J.W. (1998) Is “life-form” a useful concept in bryophyte ecology? *Oikos*, 82: 223-237.
- 気象庁 (2013) 地球温暖化予測情報 第8巻; <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vol8/pdf/all.pdf> (2015.4.15 参照)
- 大石善隆 (2011) 都市の生物多様性指標としての蘚苔類. *日本緑化工学会誌*, 36 (3) : 381-382.
- 大石善隆・山田耕作 (2008) 利尻島産のタイ類とツノゴケ類. *利尻研究*, 27 : 63-72

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計1件)

- ①大石善隆・小林元・福山研二 (2014年12月12日) 温暖化でコケが減る? 中部山岳地域環境変動研究機構 2014年度年次研究報告会. 信州大学農学部 (長野県南箕輪村)

[図書] (計2件)

- ①Oishi, Y. (2015) Differences in bryophyte diversity between subalpine *Abies* forests and *Larix* plantations. *Advances in Environmental Research. Volume 37*, pp.147-158, Nova Science Publishers Inc. (U.S.A.).
- ②大石善隆 (2014) 蘚苔類. 長野県版レッドリスト(2014) ~長野県の絶滅のおそれのある野生動植物~ 植物編 (長野県環境部自然保護課編), pp. 104-116, 長野県環境部自然保護課, 長野市.

[その他]

- ①ホームページ等  
 大石善隆. 山岳生態系の保全  
<http://www.moss-ecology.jp/cont5/17.html>

#### 6. 研究組織

- (1)研究代表者  
 大石 善隆 (Oishi, Yoshitaka)  
 北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・博士研究員  
 研究者番号 : 80578138