

財団法人国土地理協会 第 14 回（平成 26 年度）学術研究助成 研究成果報告書

石灰岩地域における蘚苔類による生物風化の実態と  
その風化プロセスに関する基礎的研究

平成 28 年 8 月

研究代表者：羽田 麻美（日本大学商学部）

共同研究者：乙幡 康之（ひがし大雪自然館）

# 目次

I	はじめに	1
II	地域概要	
1.	山口県秋吉台	3
2.	福島県阿武隈高地仙台平	4
III	調査地の選定と調査方法	
1.	調査地の選定：調査地域における植生変遷の把握	5
2.	地形断面図の作成	8
3.	蘚苔類の同定	9
4.	ドリーネ内における気象観測	9
5.	生物風化に関する分析	10
IV	調査結果	
1.	ドリーネ内における蘚苔類の分布と特徴	10
2.	秋吉台と仙台平ドリーネにおける気象観測結果	16
3.	岩石表面の顕微鏡観察	19
4.	蘚苔類の体内 Ca 量の測定	21
V	考察	
1.	蘚苔類の種組成と生育環境からみた秋吉台と仙台平ドリーネの比較	22
2.	蘚苔類による生物風化作用	24
VI	まとめ	25
	謝辞	26
	参考文献	26

## I はじめに

生物により、岩石が物理的・化学的に風化されていく作用を生物風化とよぶ。生物風化には、バクテリアによる硫黄・鉄などの酸化、菌糸・地衣類などによる鉱物の破碎、藻類・蘚苔類により鉱物の変質、木の根の根圧により岩石の割れ目の拡大、穿孔貝による海岸の岩石への穿孔などが挙げられる（松倉，2008）。しかし、これら生物が及ぼす具体的な風化作用については未知の部分が多い。

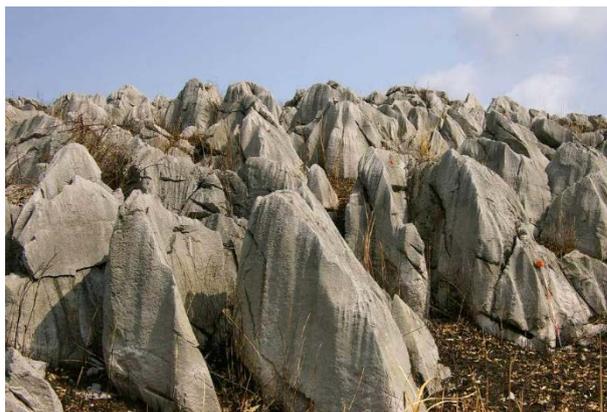
これまでの生物風化に関する研究では、地衣類やバクテリアによる風化を対象とした事例が多くみられる。地衣類による岩石風化は Chen, *et. al.* (2000) によってまとめられており、地衣類の成長に伴って鉱物の風化が加速することが述べられている。また、物理的風化として地衣類菌糸の侵入や拡張・収縮によって生じる岩石の機械的な破壊、化学的風化としてミネラルや陽イオンの溶解、各種有機酸の分泌（特にシュウ酸）による岩石表面の腐食を挙げている。McCarroll and Viles (1995) や Matthews and Owen (2008) は、寒冷地の年代既知のモレーン上に生育する地衣類を対象に調査をおこなっている。これらの研究では、シュミットハンマーの反発値を測定すると、露岩状態の部分よりも地衣類被覆下で反発値が低く、モレーンの年代とともに反発値が低い傾向が明らかとされている。また、Song, *et.al.* (2007) では、バクテリアによる花崗岩の風化実験をおこない、バクテリアにより岩石表面の穴の拡大や穴の新規形成が確認され、特に斜長石において風化による穴の形成が顕著であることが明らかとされた。

これら地衣類や微生物による風化の影響が明らかにされる一方、岩石に直接生育できる生物として最も生物量の大きい蘚苔類（コケ植物）の風化に言及した例は少ない。例えば、Lenton, *et. al.* (2012) は、ヒメツリガネゴケを花崗岩と安山岩に被覆させる風化実験を行ない、ヒメツリガネゴケの被覆下では花崗岩・安山岩ともに岩石から Ca, K, Mg が風化されることを明らかにした。朽津 (2007) ではカンボジアの遺跡を構成する砂岩を覆う蘚苔類に着目し、エコーチップ硬さ試験機による強度測定をおこなった結果、新鮮な砂岩よりも蘚苔類繁茂下で 30% 近く強度が低下することが確かめられた。さらに、この蘚苔類被覆下の岩石剥片を作成し偏光顕微鏡で観察すると、蘚苔類周辺では外来性の細粒な石英粒子から成り、その下層では砂岩の空隙率が大きいことが示された。しかし、表層の風化状況と蘚苔類が及ぼす作用との因果関係については、言及できない課題として残されている。

このように、従来の研究では、地衣類や蘚苔類被覆下にある岩石は新鮮な岩石に比べて、より風化が進行している事実は明らかとなっている。しかし、その具体的な風化プロセスについては未解明な点が多い。また、風化を引き起こしている生物体そのものの生育特性にまで言及した例はなく、前提として、その生物が空間的にどのような自然環境を好み、そこで風化を進めていくのかが不明である。風化に関与する生物が、岩上に生育し群落を構成していくことが可能な自然環境条件を把握することは、風化の始まりと進行を考える上で重要な点であると考えられる。

そこで本研究では、湿潤環境に広く分布し、生物量の大きい蘚苔類に着目し、岩石風化に対する蘚苔類の作用の実態と蘚苔類の生育環境特性を明らかにすることを目的とした。対象とした地域は、山口県秋吉台のカルスト台地である。台地上には、ドリーネやウバーレなどの凹地形と、石灰岩の露岩であるピナクルが多数露出し（写真 1）、日本における温暖湿潤型カルストの模式地となっている。ここでは江戸時代以降、人工的に維持されてきた草地が近年縮小傾向にあり、森林化し湿潤環境となった台地上では、岩上に蘚苔類群落が発生し始めている（写真 2）。草地面積の縮小過程（すなわち、森林化の過程）を把握することで、本地域では風化に関与する蘚苔類群落が発生するまでのおよその風化継続年数が推定可能である。それに加え、ドリーネ地形はその形状から狭い範囲で乾湿に差がある多様な環境を形成していることが推測され、蘚苔類群落の構成種と生育環境との関係性を調べるのに適していると考えた。また、蘚苔類の生育場となる石灰岩は鉱物組成の大半が方解石で、水に溶解しやすいという性質があり、蘚苔類の被覆により水との反応時間が持続され、生物による風化の影響を受けやすいと考えた。

以上の理由から、山口県秋吉台のカルスト台地上のドリーネを対象に、蘚苔類の分布特性と生育環境を把握し、それらが石灰岩にどのような風化作用を与えるかを明らかにすることを目的とした。また、秋吉台の結果を踏まえ、大理石からなる福島県阿武隈山地のドリーネを対象に、岩質の違いによる風化作用の差を考察した。



(2008年3月16日撮影)

写真1 秋吉台カルスト台地上の  
草原植生におけるピナクル



(2014年3月31日撮影)

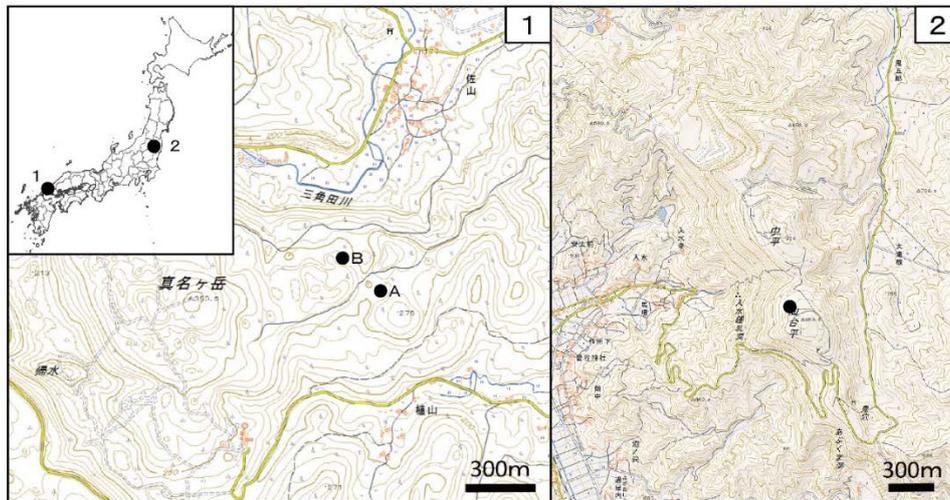
写真2 秋吉台カルスト台地上における  
森林植生下のピナクル

## II 地域概要

### 1. 山口県秋吉台

山口県にある秋吉台では、面積約 130km<sup>2</sup>の石灰岩台地が広がり、日本で最も広くまとまった面積を持つカルスト地域である（図 1-1）。標高約 100～400m のカルスト台地から成り、古生代石炭期前期からペルム紀後期の化石を多く含む石灰岩が広く分布する（太田，1986）。台地は厚東川をはさんで東の台と西の台に二分されるが、東の台は昭和 30

（1955）年に国定公園に指定され、特別天然記念物である秋芳洞や地獄台等がある。国定公園内は草原景観が広がっているが、これは年に一度の山焼きにより維持されている。台地上はピナクルが多数露出したカレンフェルト地形が広がる。この東の台にある真名ヶ岳東斜面にある 2ヶ所のドリーネを、後述する理由により調査対象とした。



1：山口県秋吉台 2：福島県阿武隈

図 1 調査地域

表 1 調査地域の概要

	秋吉台ドリーネA・B	仙台平ドリーネ
標高(m)	250～260	850
年平均降水量(mm)	1994.7	1245.1
年平均気温(°C)	13.6	8.3
最暖月の平均気温(°C)	25.0	20.7
最寒月の平均気温(°C)	2.8	-3.1
岩質	石灰岩	大理石
地質年代	石炭紀前期～ペルム紀後期	白亜紀に花崗岩が貫入し、大理石化

この地域の気候は、秋吉台科学博物館前（北緯 34° 14′，東経 131° 18′，標高 240 m）のアメダス資料（1981～2010 年）によれば、年平均気温は 13.6℃，年平均降水量は 1994.7mm である（表 1）。冬季には降雪がある。

台地上の草原を構成する植生は、塩見・中村（1981）の現存植生図によると、ネザサやスキ群落，または牧草地となっており，現在も同様の景観が広がる。喜多（1999）によれば，江戸時代の宝永小村絵図等の資料により，カルスト台地の窪地は百姓の畑地で，周囲の山野は採草地として利用されていたことがわかっている。岡本・藤川（2013a, b）では，台地上が草地として初めて記録された史料として 1729 年の地下上申絵図を挙げている。栗崎ほか（2006, 2013）では，石筍試料を用いて，台地上の北山や帰り水の横穴では 1700 年頃から草原植生であったことが示されている。これらの研究から，秋吉台では少なくとも江戸時代以降から草原景観が広がり，牧草や堆肥，屋根材を取るための採草地として，人為的に草原が維持されてきた地域であると考えられる。しかし，近年は草の需要低下や，山焼きを実施する地域住民の高齢化や人手不足により，草地面積は縮小傾向にある。

このように，山焼き範囲の縮小に伴いカルスト台地では，台地縁辺部から徐々に草原の森林化が進行している。放置された草原は，現在スギやヒノキの植林地や，落葉広葉樹や常緑樹の混交林へと変化している。

## 2. 福島県阿武隈高地仙台平

福島県阿武隈高地は南北に連なる小起伏の準平原面で，地質のほとんどは花崗岩からなる。この阿武隈高地の中央部に位置する福島県田村市（旧田村郡滝根町）には，大理石（結晶質石灰岩）地域が一部存在する。この大理石は，中生代ジュラ紀とされている滝根層群の石灰岩が，白亜紀前半の花崗岩の貫入によって大理石化したものと考えられている（滝根町編さん委員会編，1990）。田村市の仙台平（標高約 870m）は大理石からなる山地で，この地域で唯一のドリーネ地形がみられる場所である。このドリーネは仙台平ドリーネと命名され，天然記念物に指定されている。このドリーネを調査地とした（図 1-2）。

この地域の気候は，アメダスの小野新町（北緯 34° 17.2′，東経 140° 37.5′，標高 433m）のデータ（1981～2010 年）を使って気温の遞減率を用いて計算すると，年平均気温は 8.3℃，年平均降水量は 1245.1mm である（表 1）。12～4 月の日最低気温は 0℃を下回る。

仙台平ドリーネは，現在ミズナライタヤカエデ林の二次林で覆われている。この地域では少なくとも明治 44（1911）年の 1:50,000 地形図では森林となっており，ドリーネが森林に覆われて 100 年以上の時間が経過していることがわかる。

### Ⅲ 調査地の選定と調査方法

本研究では、図 2 に挙げた流れで研究を進めた。

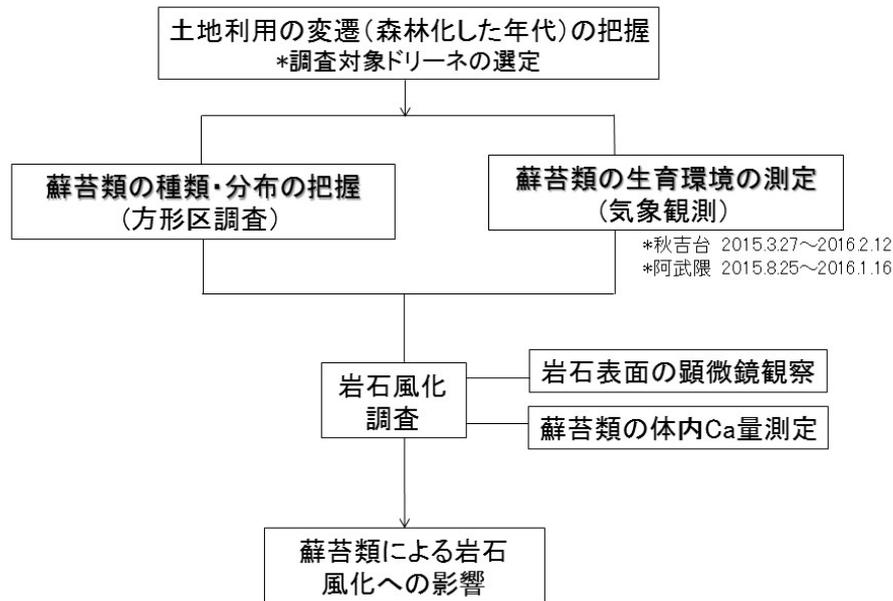


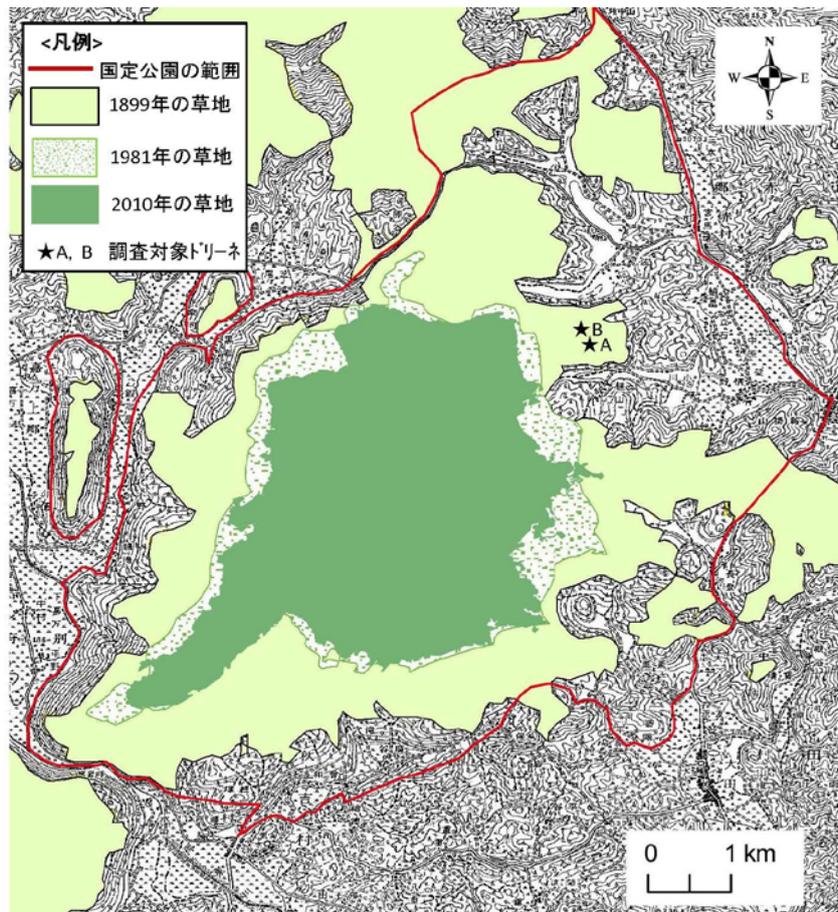
図 2 本研究の流れ

#### 1. 調査地の選定：調査地域における植生変遷の把握

調査地を選定するにあたって、はじめに秋吉台国定公園における土地利用（草地）の変遷を旧版地形図から調べた。その上で、森林化したおよその年代がわかり、現在岩上に蘚苔類が繁茂するドリーネを調査地を選定することにした。

草地面積の計算には、次の 3 種の資料を用いた。i) 陸地測量部による明治 32 (1899) 年測図、同 36 (1903) 年に発行された 1 : 50,000 地形図、ii) 塩見・中村 (1981) による「秋吉台現存植生図」、iii) 太田 (2011) による「秋吉台地域の相観植生図」である。秋吉台国定公園の範囲は、山口県自然保護課による資料を用いた。これらの地図資料に対して、ArcGIS を用いてコントロールポイントを 4 箇所取り、幾何補正をおこなった。その後、草地と国定公園の範囲のポリゴンを作成し、各ポリゴンを i) の地形図上に重ね合わせ、草地面積と国定公園面積を算出した。1899 年、1981 年、2010 年における国定公園内の草地面積は、1899 年以降、縮小傾向にある (図 3)。1899 年は 29.5km<sup>2</sup>、1981 年は 13.8 km<sup>2</sup>、2010 年は 11.5 km<sup>2</sup>であった (表 2)。この値は、1899 年の面積を 100%とすると、1981 年は 46.8%、2010 年は 39.0%となり、明治時代に存在した草地は半分以下へと激減している。減少率は、1899 年から 1981 年にかけてが 0.19km<sup>2</sup>/yr、1981 年から 2010 年にかけてが 0.08 km<sup>2</sup>/yr であった。

これらの結果に基づき、1899 年時点では草地利用されており、その後森林化したドリー



資料：草地の範囲は、1899年測図の1:50,000地形図、塩見・中村(1981)と太田(2011)による植生図を基に作成した。

図3 秋吉台における草地面積の変化（1899年～2010年）  
（羽田・乙幡，2016）

表2 秋吉台国立公園内における草地面積の推移（1899年～2010年）

	草地面積(km <sup>2</sup> )	1899年の草地面積を100%とした時の面積割合(%)	国立公園の面積に対する草地面積の割合(%)
1899年	29.5	100	65.8
1981年	13.8	46.8	30.8
2010年	11.5	39.0	25.7

※ 国立公園の面積:44.8km<sup>2</sup>

（羽田・乙幡，2016）

ネを2ヶ所選定した(図3)。選定したドリーネの名称は、ドリーネA、ドリーネBとした。いずれもドリーネ底からドリーネ内壁斜面上部までの比高は約10m、長径60m程度で、ドリーネの規模に大きな違いはない。

なお、1899～1981年の間の時期については、国定公園内の植生界が記載された地形図が得られなかった。ただし、昭和35(1960)年発行の1:50,000地形図では、秋吉台北部地域のみ植生界が描かれており、本調査地域はこの地形図では草地であることが確認できた。また、国土地理院により1968年に撮影された空中写真を見ると、調査地域は森林化していた。一方、現地調査によれば、ドリーネAにおいては、2013年7月に植林されたスギの伐採がおこなわれており、伐採されたスギの年輪を測ると樹齢は概ね50年であった。これらの結果から、対象地域のドリーネは、1960～1968年の間に森林化した地域だと推測した。

秋吉台のドリーネA、Bともに森林の構成は、スギの植林地が広い面積を占める。ドリーネAの斜面と底部では、2013年7月にこれらスギの大規模伐採がおこなわれた(写真3)。斜面上部は北向き斜面がスギ林、南向き斜面がスギ林と落葉樹林で構成される。ドリーネBは、2015年9月現在も植林されたスギに覆われた状態のドリーネである(写真4)。

阿武隈では人為的に整地されたドリーネもあり、現在自然状態で残っているのは仙台平ドリーネのみである(写真5)。したがって、このドリーネを調査地に選定し、秋吉台との比較に用いた。



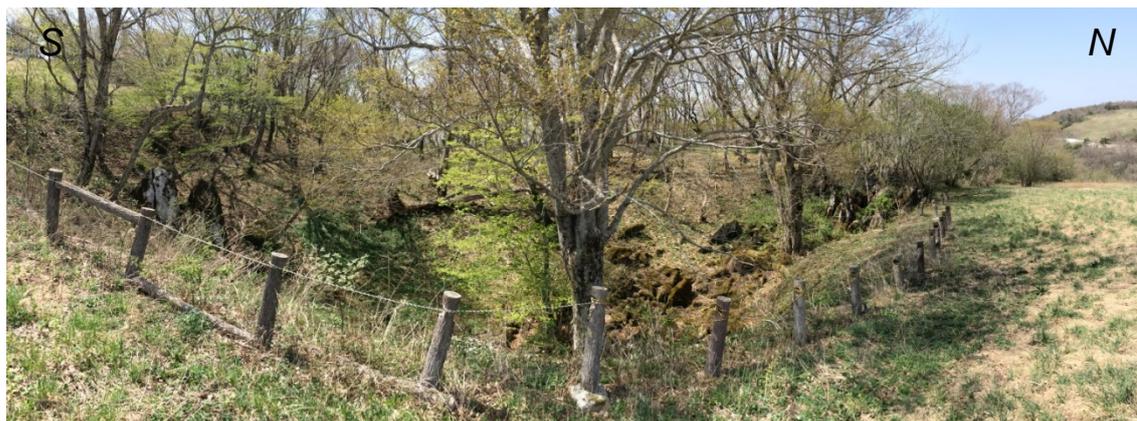
(2014年1月7日撮影)

写真3 秋吉台ドリーネAの景観



(2015年2月21日撮影)

写真4 秋吉台ドリーネ B 底部と南向き斜面の景観



(2015年4月27日撮影)

写真5 仙台平ドリーネの景観

## 2. 地形断面図の作成

ハンドレベルを用いた簡易測量により、ドリーネの南北方向を測線とする地形断面を計測した。測線上の南向き斜面と北向き斜面において、ドリーネ底からの比高別にドリーネ底部 (0~3.0m)・中部 (3.1m~6.0m)・上部 (6.1m 以上) の計 3 つの地形区分をおこなった。

### 3. 蘚苔類の同定

ドリーネの各地点において、測線上に露出する高さ 1m 以上のピナクルの N 面・S 面に 20×20cm の方形区を 6 つ（地面から高さ 0～20cm, 40～60cm, 80～100cm にそれぞれ 2 つ）設けた。すなわち、1 地点の方形区数は最大 12 となる。方形区に出現した蘚苔類は全て持ち帰り、岩月（2001）に従って種の同定をおこなった。採集標本は全てひがし大雪自然館に収蔵している。

出現した蘚苔類は、岩月（2001）、岩月・水谷（1972）、Noguchi（1987, 1988, 1989, 1991, 1994）、及び田中（2012）を参考に生育環境の区分をおこなった。生育環境の区分は、既存研究によって明らかにされている生態的特徴を参考にして、乾燥した環境に出現する種を「乾燥環境種」、湿った環境に生育する種を「湿潤環境種」として区分した。さらに石灰岩地域に良く見られる「石灰岩性の種」も区分した。

### 4. ドリーネ内における気象観測

蘚苔類の生育環境を把握するため、ドリーネ内での気象観測を実施した。観測期間は、秋吉台のドリーネ B では 2015 年 3 月 27 日 19:30～2016 年 2 月 12 日 10:30、仙台平ドリーネでは 2015 年 8 月 25 日 17:30～2016 年 1 月 16 日 13:00 である。なお、設置許可申請の都合上、秋吉台と仙台平で同時期に観測を開始することはできなかった。

観測に用いた機器は、T&D 社製おんどとり Jr. RTR-503 温湿度ロガーである。測定範囲は、気温が 0～55℃、湿度が 10～95%RH、測定分解能は気温 0.1℃、湿度 1%RH、測定間隔は 30 分である。ロガーは断熱シートでシェルターを作成し、これを地表面から 1m の高さの樹幹に、シェルターの長辺が南北を向くように設置した（写真 6）。観測地点は、秋吉台ドリーネ B が 5 地点、仙台平ドリーネが計 4 地点である（観測地点は後掲）。



写真 6 気象観測用の温湿度ロガー設置例（秋吉台ドリーネ B, 地点②）

## 5. 生物風化作用に関する分析

蘚苔類による生物風化作用の実態を把握するため、調査ドリーネ内の蘚苔類の付着した岩石表面と、草地における露岩表面のサンプルを採取し、樹脂固定した後に剥片を作成し、偏光顕微鏡にて観察をおこなった。

また、ハンドヘルド型蛍光 X 線分析装置 (HORIBA, MESA-330) を用いて、岩上に付着した蘚苔類の体内 Ca 量と、粉末化した基物の Ca 量を測定した。蘚苔類の測定方法は、現地にて採取した試料を実験室に持ち帰り、付着した落葉落枝や泥を蒸留水で洗浄し、その後、自然乾燥させたものを専用容器に詰め、検量線法にて Ca 量を測定した。

## IV 調査結果

### 1. ドリーネ内における蘚苔類の分布と特徴

#### 1) 秋吉台ドリーネ A

秋吉台ドリーネ A では 20 種の蘚苔類が出現し、その他につる性植物のキヅタが石灰岩上に見られた (表 3, 写真 7)。出現頻度が 10% を超える優占種は、アツブサゴケモドキ、カヤゴケで、出現頻度はそれぞれ 14.3%, 10.4% であった。

中西 (1977) によれば、蘚苔類の生育形は匍匐形 [葉状体状 (Th), 小型圧着状 (Ap), 細糸状 (Tl), 平滑マット状 (Sm), 粗生マット状 (Lm)], 斜上形 [樹状 (D), ブラシ状 (Br)], 懸垂形 [懸垂糸状 (P)], 直立形 [低形芝生状 (t), 団塊状 (Cu)] と区分され、匍匐形を基本形として光及び乾燥に対する忍耐性の増大と対応しながら斜上形、直立形へ、また空中湿度の高い環境における懸垂形への傾向性が考えられている。この区分によれば、秋吉台のドリーネ A における優占種の生育形は、斜上形 (Br) もしくは匍匐形 (Lm) の蘚苔類であった。

秋吉台ドリーネ A では湿潤環境種が 7 種 (タニゴケ, キダチヒダゴケ, ナガサキホウオウゴケ, ツクシナギゴケ, ヒラヤスデゴケ, オオクラマゴケモドキ, カハルクラマゴケモドキ) 確認され、乾燥環境種は 3 種 (エゾキシタゴケ, シナチジレゴケ, ギボウシゴケ) 出現した。一方、石灰岩性の種は 5 種 (キスジキヌイトゴケ, ヒメタチヒラゴケ, シナチジレゴケ, ギボウシゴケ, カハルクラマゴケモドキ) 見られた。なお、ヒメタチヒラゴケはタチヒラゴケの変種で環境省 (2015) では絶滅危惧 I 類に指定されている希少種である (乙幡・羽田, 2014)。湿潤環境種は、ドリーネ底である P4 から北向き斜面上部の P1 にかけて分布する傾向があった。反対に乾燥環境種はドリーネ底には分布せず、東向き斜面の日当たりが良い P5~P6 に分布する傾向があった (図 4)。

#### 2) 秋吉台ドリーネ B

秋吉台ドリーネ B では 18 種の蘚苔類が確認され、その他に石灰岩上にテイカカズラ、キヅタの 2 種につる性植物が確認された (表 4, 写真 8)。その他に地衣類も出現した。ドリーネ B で出現頻度が 10% を超える優占種はツクシナギゴケモドキ, アツブサゴケモドキ

表 3 秋吉台ドリーネ A における蘚苔類の種組成と分布

地点	P6	P5	P4	P3	P2	P1	生育型	出現頻度 %	腐植土 %
比高 (m)	8.0	5.0	0.8	1.6	5.5	8.1			
区分	上	中	下	下	中	上			
ピナクル数	1	2	2	2	1	1			
ピナクル高度(m)	1.5	2.2	1.2	1.0	2.6	1.8			
コドラート数 N面	6	6	-	6	6	6			
S面	6	6	6	-	6	6			
1 Palamocladium leskeoides アツブサゴケモドキ		+				+	Br	14.3	9.1
2 Rhynchostegium inclinatum カヤゴケ	+		+			+	Lm	10.4	-
3 Brachythecium rivulare タニゴケ					+		Lm	7.8	16.7
4 Homalothecium laevisetum アツブサゴケ	+	+				+	Br	7.8	50.0
5 Thamnobryum plicatulum キダチヒダゴケ				+			D	7.8	100
6 Anomodon viticulosus キスジキヌイトゴケ			+		+		Br	6.5	-
7 Brachythecium populeum アオギヌゴケ		+	+		+		Lm	6.5	-
8 Thuidium kanedae トヤマシノブゴケ				+	+	+	Lm	6.5	40.0
9 Fissidens geminiflorus ナガサキホウオウゴケ						+	t	3.9	-
10 Homaliadelphus targionianus var. rotundatus ヒメタチヒラゴケ		+					D	3.9	-
11 Taxiphyllum taxirameum キャラハゴケ			+				Sm	3.9	-
12 Brachythecium plumosum ハネヒツジゴケ					+		Lm	2.6	-
13 Homomallium connexum エソキヌタゴケ	+						Lm	2.6	-
14 Plagiomnium acutum コツボゴケ						+	Lm	2.6	-
15 Ptycomitrium gardneri シナチジレゴケ	+	+					Cu	2.6	-
16 Schistidium apocarpum ギボウシゴケ	+						Cu	2.6	-
17 Eurhynchium hians ツクシナギゴケモドキ				+			Lm	1.3	-
18 Frullania inflata ヒラヤスデゴケ				+			Ap	1.3	-
19 Porella grandiloba オオクラマゴケモドキ						+	Sm	1.3	-
20 Porella stephaniana カハルクラマゴケモドキ				+			Sm	1.3	-
21 Hedera rhombea キツタ						+		2.6	-
蘚苔類の出現種数	5	5	7	2	5	7			-

腐植土 = 腐植土を伴う出現回数 / 出現回数 × 100

(凡例) ■: 湿潤, ■: 乾燥, 赤字: 石灰岩性及び石灰岩地域で良く見られる(岩月 2001)

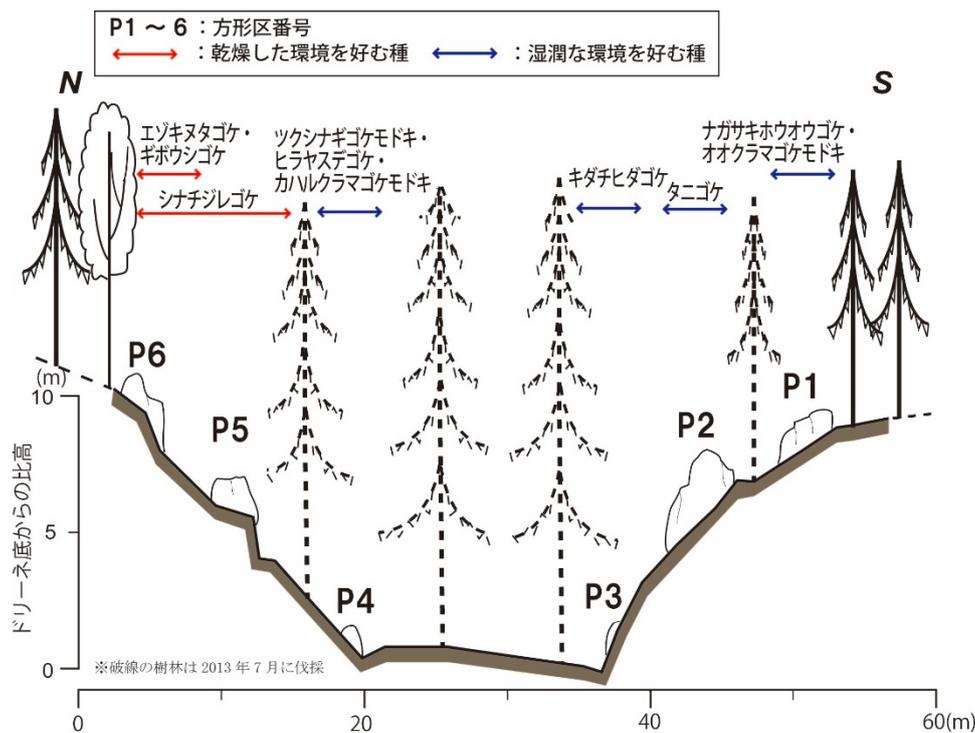


図 4 ドリーネ A における地形断面と蘚苔類 (乾燥種・湿潤種) の分布



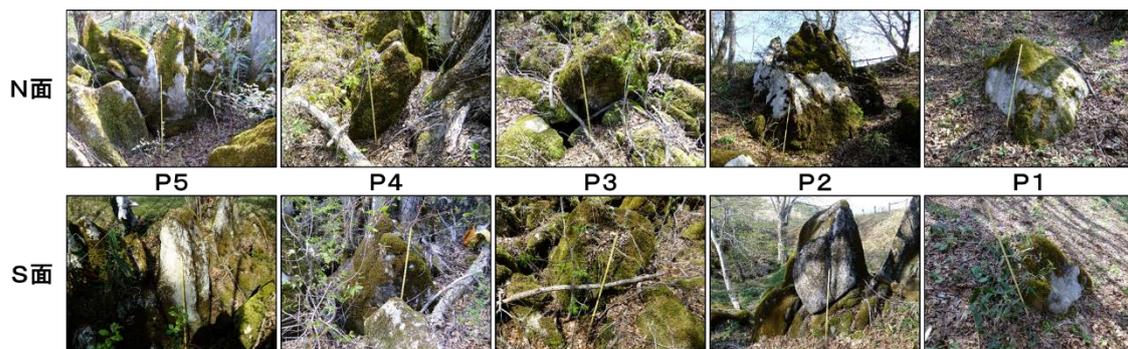
(撮影日2014年1月6日)

写真7 秋吉台ドリーネ Aにおける蘚苔類の植被状況



(撮影日2015年2月19日～2月21日)

写真8 秋吉台ドリーネ Bにおける蘚苔類の植被状況



(撮影日2015年4月27日～4月28日)

写真9 仙台平ドリーネにおける蘚苔類の植被状況

表 4 秋吉台ドリーネ B における蘚苔類の種組成と分布

地点	P6	P5	P4	P3	P2	P1	P0	生育型	出現頻度 %	腐植土 %
比高 (m)	7.6	4.5	0.5	0	4.3	6.0	11.2			
区分	上	中	下	下	中	中	上			
ピナクル数	1	1	2	1	1	1	2			
ピナクル高度 (m)	1.1	2.4	1.1	3.5	1.6	2.0	1.3			
コードラート数 N面	6	4	-	6	6	6	6			
S面	6	6	6	-	-	6	6			
1 <i>Eurhynchium hians</i> ツクシナギゴケモドキ		+	+	+		+		Lm	12.0	41.7
2 <i>Palamocladium leskeoides</i> アツブサゴケモドキ	+		+			+	+	Br	10.0	・
3 <i>Homalothecium laevisetum</i> アツブサゴケ					+	+		Br	9.0	33.3
4 <i>Heteroscyphus coalitus</i> オオウロコゴケ				+	+			Sm	8.0	・
5 <i>Hypopterygium japonicum</i> ヒメクジャクゴケ	+	+	+	+	+	+		D	7.0	28.6
6 <i>Ctenidium capillifolium</i> クシノハゴケ					+	+		Lm	6.0	33.3
7 <i>Rhynchostegium inclinatum</i> カヤゴケ	+							Lm	6.0	・
8 <i>Fissidens dubius</i> トサカホウオウゴケ		+			+		+	t	4.0	25
9 <i>Thuidium kanedae</i> トヤマシノブゴケ					+	+		Lm	4.0	25
10 <i>Neckeropsis calcicola</i> セイナンヒラゴケ				+				P	3.0	・
11 <i>Thamnobryum plicatulum</i> キダチヒダゴケ				+				D	3.0	・
12 <i>Glaopodium prionophyllum</i> ナガスジハリゴケ				+	+			TI	2.0	50
13 <i>Entodon challengerii</i> ヒロハツヤゴケ	+							Sm	2.0	・
14 <i>Taxiphyllum taxirameum</i> キャラハゴケ			+					Sm	2.0	50
15 <i>Conocephalum conicum</i> ジャゴケ				+				Th	1.0	100
16 <i>Frullania inflata</i> ヒラヤステゴケ						+		Ap	1.0	・
17 <i>Thamnobryum subseriatum</i> オオトラノオゴケ				+				D	1.0	・
18 <i>Thuidium contortulum</i> イボエチャボシノブゴケ					+			TI	1.0	・
19 <i>Trachelospermum asiaticum</i> テイカカズラ	+						+		10.0	・
20 <i>Hedera rhombea</i> キヅタ			+			+	+		6.0	・
21 地衣類							+		2.0	・
蘚苔類の出現種数	4	1	6	8	8	7	2			

腐植土 (%) = 腐植土を伴う出現回数 / 出現回数 × 100

(凡例) ■: 湿潤, ■: 乾燥, 赤字: 石灰岩性及び石灰岩地域で良く見られる (岩月 2001)

P0 ~ 6 : 方形区番号 ① ~ ⑤ : 気象観測用ロガー設置地点  
 ← → : 湿潤環境を好む種

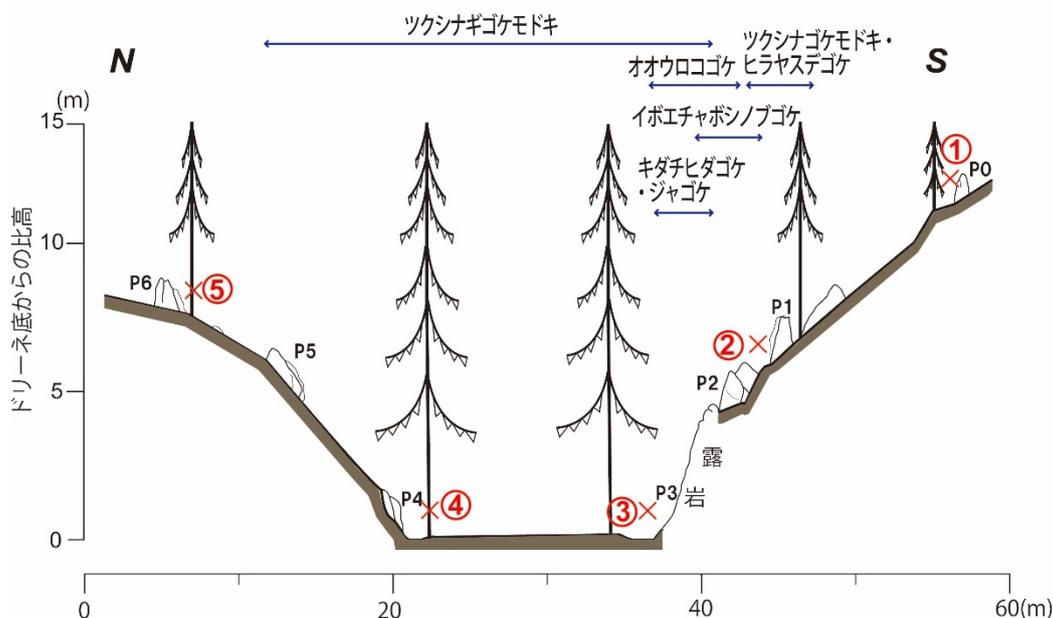


図 5 ドリーネ B における地形断面と蘚苔類 (湿潤種) の分布

であり、出現頻度はそれぞれ 12.0%、10.0%であった。これら優占種は秋吉台 A ドリーネ同様に生育形が匍匐形 (Lm) もしくは斜上形 (Br) の蘚類であった。

秋吉台 B ドリーネでは、湿潤環境種が 5 種 (ツクシナギゴケモドキ, オオウロコゴケ, キダチヒダゴケ, ジャゴケ, ヒラヤスデゴケ) 確認された。しかしながら、乾燥環境種は 1 種類も出現しなかった。湿潤環境種の分布は、斜面の向きに関わらずドリーネ底からドリーネ中部にかけて分布する傾向あり、ドリーネ上部には分布しなかった (図 5)。一方、石灰岩性の種はドリーネ底部から中部の狭い範囲に 3 種 (セイナンヒラゴケ, ナガスジハリゴケ, イボエチャボチャボシノブゴケ) が出現した。なお、セイナンヒラゴケは生育形が懸垂形である懸垂糸状 (P) であるため、秋吉台 B ドリーネ底の空中湿度は高い環境にあることがわかる。

### 3) 仙台平ドリーネ

仙台平ドリーネでは 41 種の蘚苔類が確認され、つる性植物や地衣類は石灰岩上に見られなかった (表 5, 写真 9)。仙台平ドリーネで出現頻度が 10% を超える優占種はオオギボウシゴケモドキのみで、出現頻度はそれぞれ 18.0% とオオギボウシゴケモドキが飛びぬけて優占する環境であることが明らかになった。また本種の匍匐形は斜上形 (Br) の蘚類である。

仙台平ドリーネでは湿潤環境種が 5 種 (キダチヒダゴケ, オオクラマゴケモドキ, オオバチョウチンゴケ, ミヤマギボウシゴケモドキ, ヒメシノブゴケ) が確認された。一方、乾燥環境種は 2 種 (ギボウシゴケ, エゾキヌタゴケ) 出現した。湿原環境種はドリーネの底部から中部にかけて分布する傾向が見られ、ドリーネ上部には分布しない。一方、乾燥環境種の分布は、ドリーネの中部から上部に限られていた。また、石灰岩性の種は 8 種 (ホソクラマゴケモドキ, キスジキヌイトゴケ, タチヒラゴケ, カハルクラマゴケモドキ, ギボウシゴケ, ナガスジハリゴケ, ホソヒラゴケ, ツジベゴヘイゴケ) 確認されたが、分布に傾向は見られなかった。

湿潤環境種と乾燥環境種の分布が明瞭に分かれる秋吉台ドリーネ A・B と異なり、仙台平ドリーネでは、湿潤環境種と乾燥環境種の分布が一部重複する (図 6)。湿潤環境種はドリーネ底からドリーネ中部に分布する傾向があり、乾燥環境種はドリーネ中部から上部にかけて分布する傾向があった。

表 5 仙台平ドリーネにおける蘚苔類の種組成と分布

地点	P5	P4	P3	P2	P1	生育型	出現頻度 %	腐植土 %
比高 (m)	3.0	0	0	6.0	9.0			
区分	中	下	下	中	上			
ピナクル数	1	1	1	1	1			
ピナクル高度 (m)	1.7	1.0	1.2	2.5	1.1			
コードラート数 N面	6	6	6	6	6			
S面	6	6	6	6	3			
1 Anomodon giraldii オオギボウシゴケモドキ	+	+	+	+	+	Br	18.0	7.3
2 Bryhnia trichomitria キンモウヤノネゴケ	+	+	+			Lm	7.9	.
3 Porella gracillima ホソクラマゴケモドキ	+	+	+			Sm	7.0	.
4 Porella caespitans var. cordifolia ヒメクラマゴケモドキ	+	+	+			Sm	5.7	.
5 Thamnobryum plicatulum キダチヒダゴケ	+		+	+		D	5.3	.
6 Anomodon viticulosus キスジキヌイトゴケ	+	+	+	+		Br	4.8	.
7 Porella grandiloba オオクラマゴケモドキ	+	+	+	+		Sm	4.8	.
8 Homalothecium laevisetum アツブサゴケ	+	+	+			Br	3.9	.
9 Thuidium kanedae トヤマシノブゴケ	+				+	Lm	3.9	.
10 Thamnobryum alopecurum キツネノオゴケ	+	+				D	3.1	.
11 Brachythecium populeum アオギヌゴケ					+	Lm	2.2	.
12 Homaliadelphus targionianus タチヒラゴケ	+					D	2.2	.
13 Lejeunea japonica ヤマトコシミゴケ	+	+	+			Ap	2.2	.
14 Plagiomnium vesicatum オオバチョウチンゴケ		+	+			Lm	2.2	.
15 Porella japonica ヤマトクラマゴケモドキ	+		+			Sm	2.2	.
16 Porella stephaniana カハルクラマゴケモドキ	+	+		+		Sm	2.2	.
17 Taxiphyllum aomoriense アオモリサナダゴケ				+	+	Sm	2.2	.
18 Brachythecium helminthocladum ヒメヒツジゴケ					+	Lm	1.8	.
19 Schistidium apocarpum ギボウシゴケ	+			+	+	Cu	1.8	.
20 Plagiochila sciophila コハネゴケ	+		+			D	1.8	.
21 Thamnobryum subseriatum オオトラノオゴケ				+	+	D	1.3	.
22 Thuidium pygmaeum ミジンコシノブゴケ	+				+	TI	1.3	.
23 Anomodon abbreviatus ミヤマギボウシゴケモドキ	+	+				Br	0.9	.
24 Anomodon longifolius キヌイトゴケ			+			Br	0.9	.
25 Bryhnia novae-angliae ヤノネゴケ					+	Lm	0.9	.
26 Homalia trichomanoides var. japonica ヤマトヒラゴケ	+		+			D	0.9	.
27 Homomallium connexum エゾキヌタゴケ				+		Lm	0.9	.
28 Plagiomnium acutum コツボゴケ					+	Lm	0.9	.
29 Plagiothecium curvifolium ナンブサナダゴケ	+					Sm	0.9	.
30 Porella vernicosa ニスピキカヤゴケ	+					Sm	0.9	.
31 Thuidium cymbifolium ヒメシノブゴケ			+	+		Lm	0.9	.
32 Anomodon thraustus コマノキヌイトゴケ	+					Br	0.4	.
33 Brachythecium buchananii ナガヒツジゴケ				+		Lm	0.4	.
34 Brachythecium reflexum アラエノヒツジゴケ			+			Lm	0.4	.
35 Glaopodium prionophyllum ナガスジハリゴケ				+		TI	0.4	.
36 Fissidens gymnogynus ヒメホウオウゴケ	+					TI	0.4	.
37 Frullania muscicola カラヤステゴケ		+				Ap	0.4	.
38 Myuroclada maximowiczii ネズミノオゴケ				+		Lm	0.4	.
39 Neckera muratae ホソヒラゴケ	+					D	0.4	.
40 Radula japonica ヤマトケビラゴケ	+					Ap	0.4	.
41 Tuzibeanthus chinensis ツジベゴヘイゴケ			+			Sm	0.4	.
蘚苔類の出現種数	25	13	17	13	10			

腐植土 = 腐植土を伴う出現回数 / 出現回数 × 100

(凡例) ■: 湿潤, ■: 乾燥, 赤字: 石灰岩性及び石灰岩地域で良く見られる(岩月 2001)

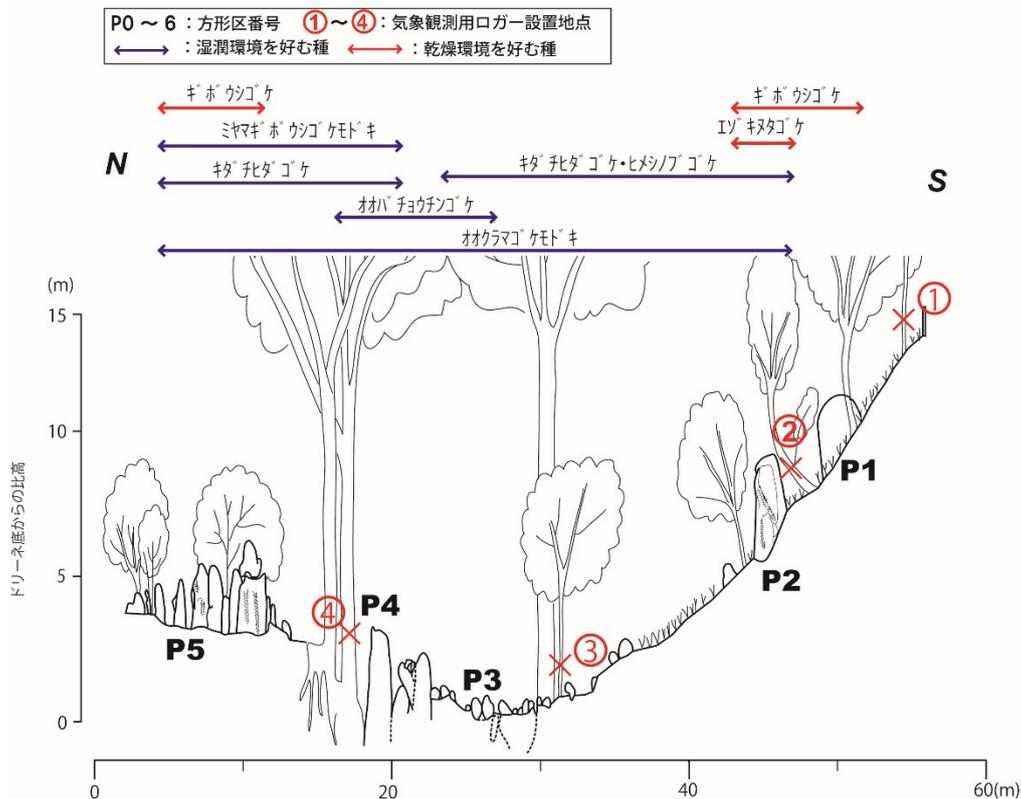


図 6 仙台平ドリーネにおける地形断面と蘚苔類（乾燥種・湿潤種）の分布

## 2. 秋吉台と仙台平ドリーネにおける気象観測結果

秋吉台のドリーネ B と仙台平ドリーネにおいて、気温と相対湿度の観測をおこなった。観測用のロガーを設置した場所は、秋吉台ドリーネ B は図 5（地点①～⑤）、仙台平ドリーネは図 6（地点①～④）に示した。

### 1) 秋吉台ドリーネ B

蘚苔類は一般的に湿潤環境を好む種が多く、空中の湿度は生育するための重要な要素である。そこで、両地域の相対湿度の出現頻度をみると、秋吉台ドリーネ B では地点②～⑤で調査期間中の約 6 割が 90%RH 以上であり、年間を通じて高湿環境に置かれていることがわかった（図 7）。なお、地点①は 2015 年 9 月より追加で設置したため、本データからは除外した。また、蘚苔類の生育にとって乾燥は大きな障害の一つであり、晴天時で降水のない乾燥状態においてどの程度湿度が保たれるのかが、生育の可否や乾燥環境種の出現に影響を与えると考えた。そこで、9 月（夏季）と 12 月（積雪の影響のない冬季）について、

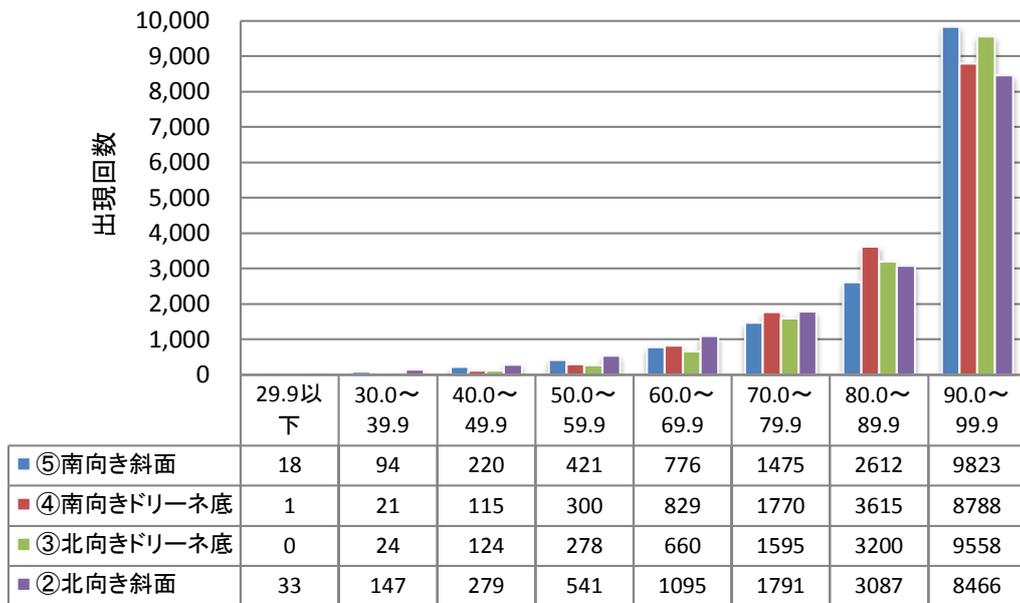


図7 秋吉台ドリーネ Bにおける相対湿度の出現限頻度分布  
(2015年3月27日～2016年2月12日)

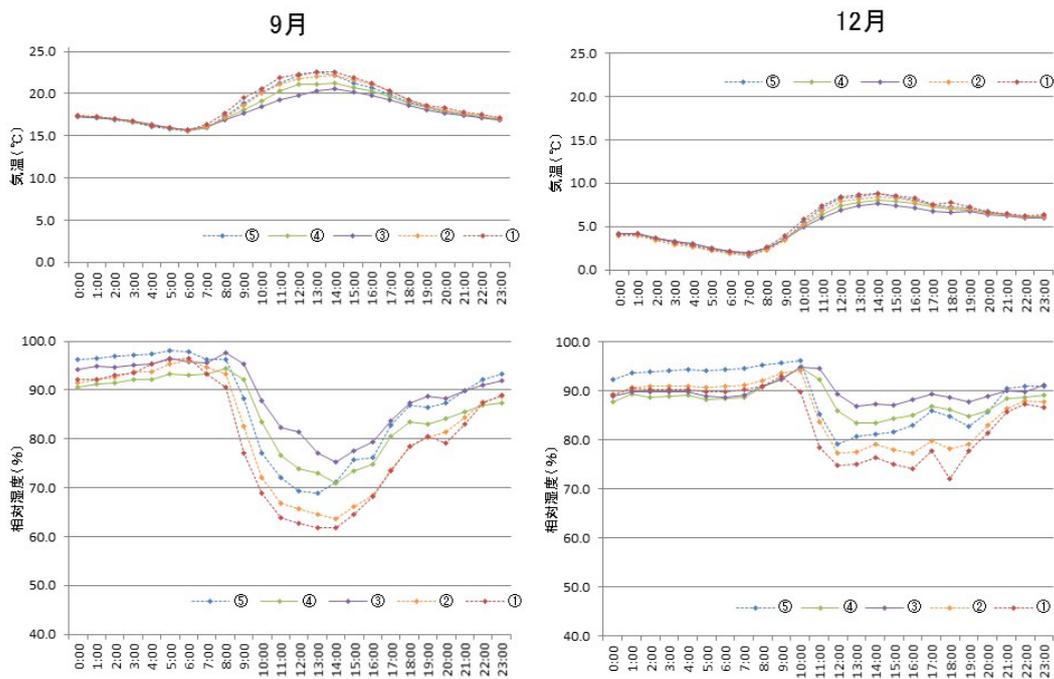


図8 秋吉台ドリーネ Bにおける晴天日の気温と相対湿度の日変化

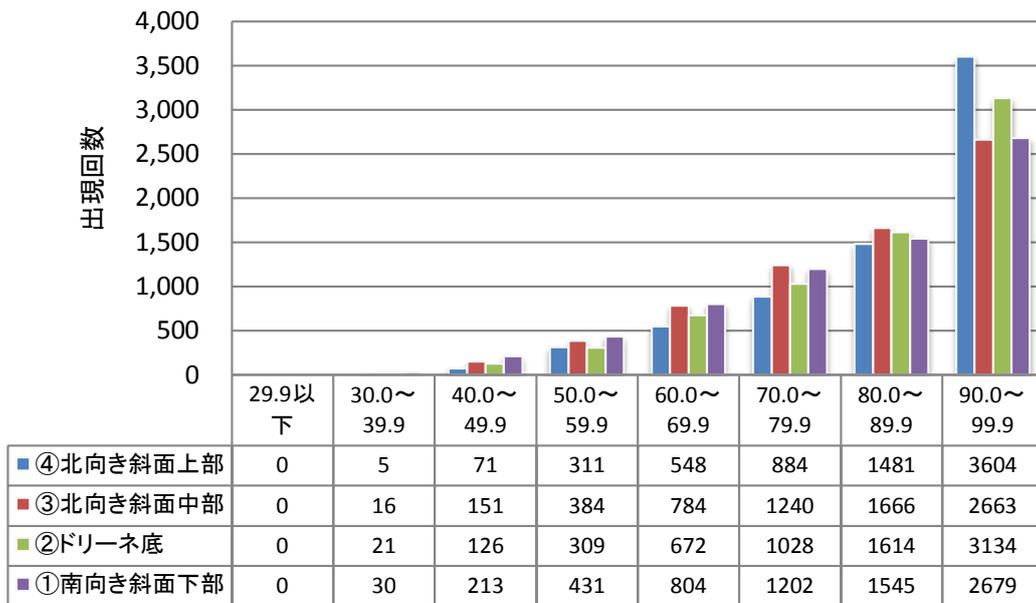


図9 仙台平ドリーネにおける相対湿度の出現限頻度分布  
(2015年8月25日～2016年1月16日)

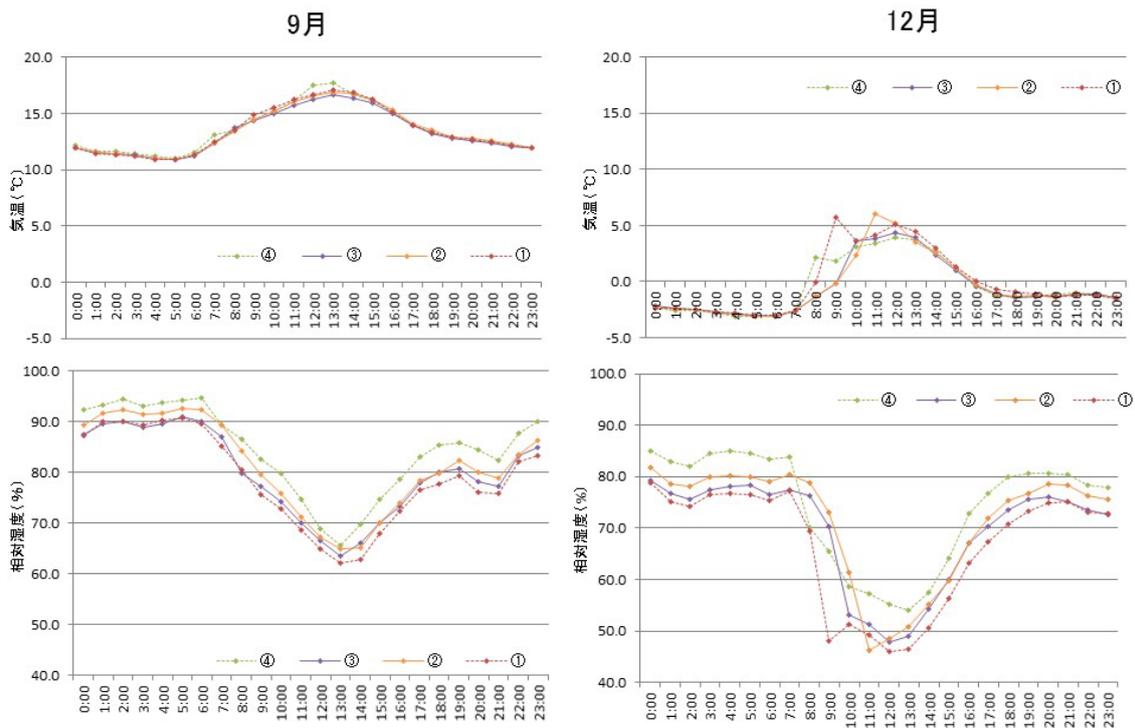


図10 仙台平ドリーネにおける晴天日の気温と相対湿度の日変化

前 2 日間における降雨量が 0mm の晴天日を抽出し、時間別の気温・相対湿度の変化を調べた。晴天日は、9:00～15:00 までの日照時間が 5 時間以上の日を選んだ。抽出条件に合致した日は、各月ともに 3～6 日間である。図 8 が秋吉台の結果であるが、夏季の昼間はドリーネの上部と底部で最大 20% 近く湿度が異なる。その時の湿度は、ドリーネ底の地点③の約 80%RH に対し、斜面上部の地点①では 60%RH 近くまで下がる。一方、冬季にもドリーネ上部と底部の湿度差は生じているが、一日を通じてどの地点でも 70%RH の高湿度環境を形成している。

## 2) 仙台平ドリーネ

仙台平ドリーネにおける相対湿度の出現頻度分布 (図 9) をみると、調査期間中の約 4～5 割が 90%RH を超えていた。前述の秋吉台と同様に、夏季と冬季について、前 2 日間における降雨量が 0mm の晴天日を抽出し、時間別の気温・相対湿度の変化をみた (図 10)。その結果、夏季の相対湿度はドリーネ上部から底部に至るまで、大きな違いはみられない。冬季には、落葉の影響を受け、ドリーネ内の湿度は 50%RH 以下まで低下する。

## 3. 岩石表面の顕微鏡観察

### 1) 秋吉台

秋吉台ドリーネ B 内で採取したアツブサゴケモドキが付着した岩石表面と、台地上の草地における露岩表面を顕微鏡で観察した。写真 10 左は蘚苔類の付着がない草地の露岩表面で、写真 10 右は植林後約 50 年経過したドリーネ B 内の岩石表面である。両者を比較すると、蘚苔類が表面を覆っている岩石表面では、0.05mm の風化層が覆っている。ここでは蘚苔類の仮根が石灰岩を構成する方解石粒子の粒界に入り込み、方解石が細粒化している。このような細粒化した風化層は、写真 10 左の露岩ではみられない。

### 2) 仙台平

仙台平ドリーネ脇で採取したオオギボウシゴケモドキが付着した岩石表面と、仙台平山頂における露岩表面を顕微鏡で観察した。写真 11 左は蘚苔類の付着がない草地の露岩表面で、写真 11 右は仙台平ドリーネ周辺を広く覆う落葉樹林下の蘚苔類が覆った岩石表面である。両者を比較すると、蘚苔類に覆われた岩石表面では、0.3mm 程の風化層が存在する。秋吉台と同様に、方解石の粒子が細粒化され、仮根が岩石内部に侵入している。一方、仙台平山頂部は草地になっているが、ここに露出したピナクルには蘚苔類が付着していない。この岩石表面には、写真 11 左のように細粒化した風化層はみられない。

大理石からなる仙台平では、ピナクル頂部に生育するオオギボウシゴケモドキを故意に剥がした結果、岩石内部への仮根の侵入が目視レベルでも観察され (写真 12)、著しく表層の風化が進んでいることがわかった。さらに樹脂固定した薄片の顕微鏡観察では、表層から垂直・水平方向に 3mm 以上の深さで仮根の侵入が複数確認された (写真 13)。

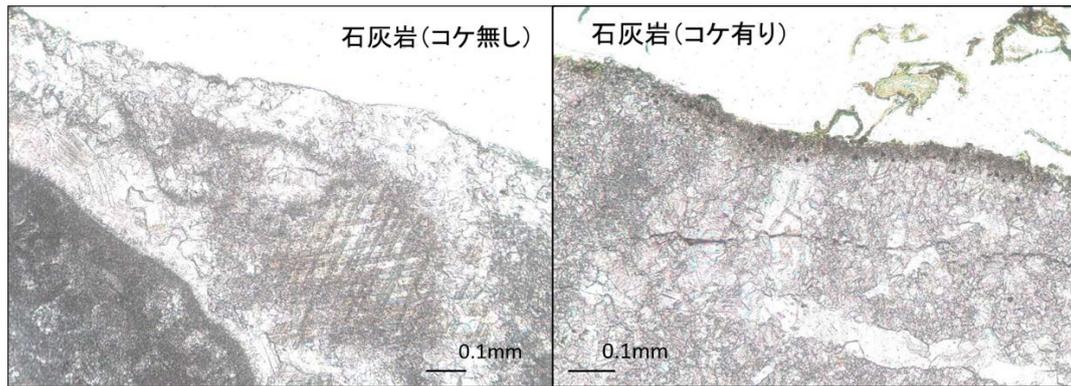


写真 10 秋吉台の石灰岩における顕微鏡写真  
(左：蘚苔類の被覆無，右：蘚苔類の被覆有)

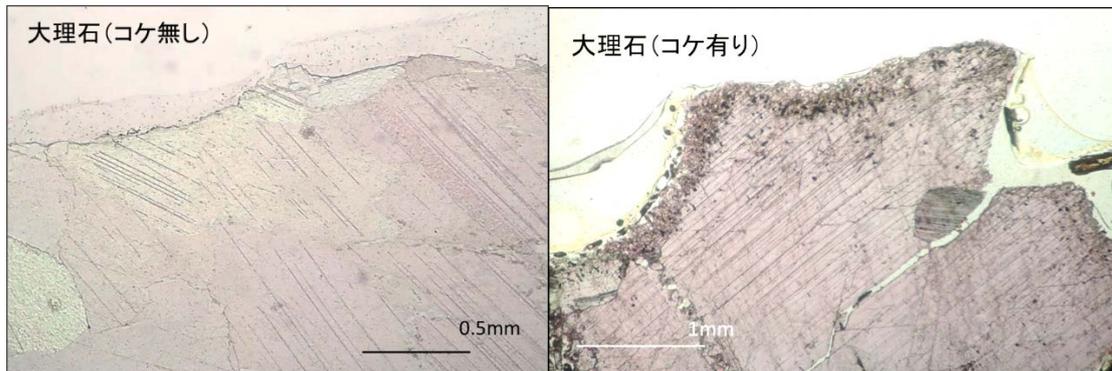


写真 11 仙台平の大理石における顕微鏡写真  
(左：蘚苔類の被覆無，右：蘚苔類の被覆有)



写真 12 仙台平に優先するオオギボウシゴケモドキによる風化

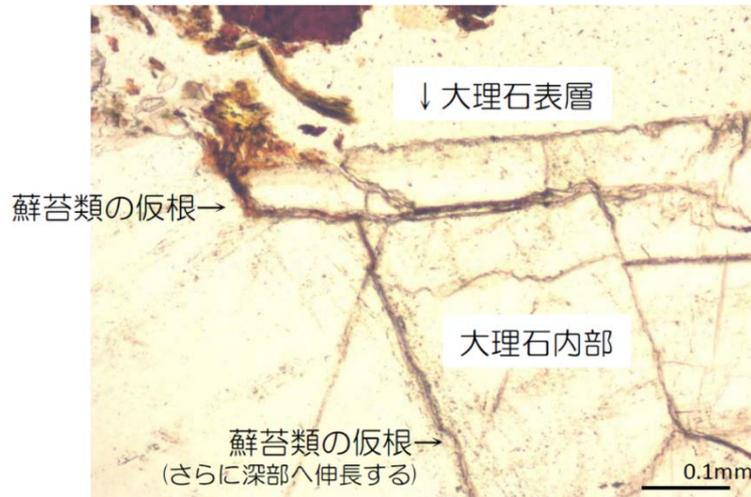


写真 13 大理石の粒子間に侵入するオオギボウシゴケモドキの仮根

#### 4. 蘚苔類の体内 Ca 量の測定

##### 1) 秋吉台

秋吉台ドリーネ A に分布する蘚苔類の体内 Ca 量と、その蘚苔類が生育する基物（この場合、石灰岩）のカルシウム量を測定した（図 11）。蘚苔類の種類や生育環境毎に差異はあるが、秋吉台ドリーネ A では 1.3～8.1%の範囲であった。また非石灰岩地域においても、石灰岩地域と同種の蘚苔類の体内カルシウム量を測定した。採取場所は、秋吉台西の台の江原地区（チャート地域）、東の台東部の鞍掛山（輝緑岩、砂岩地域）、同じく東の台東部の中山（輝緑岩地域）である。これらの場所における蘚苔類の体内カルシウム量は 1.3～2.3%であった（図 11）。石灰岩地域と非石灰岩地域を比べると、石灰岩を基物として生育する蘚苔類の方がカルシウムの値が高く、基物の影響を受けていることがわかった。

##### 2) 仙台平

仙台平ドリーネに分布する蘚苔類の体内 Ca 量と、その蘚苔類が生育する基物（この場合、大理石）のカルシウム量を測定した（図 11）。蘚苔類の種類や生育環境毎に差異はあるが、仙台平ドリーネでは 1.9～6.6%の範囲であった。一方、仙台平北東にある非石灰岩地域の鬼五郎溪谷（花崗岩地域）においても、同種の蘚苔類の体内カルシウム量を測定した。その結果、蘚苔類の体内カルシウム量は 1.4～3.4%であった（図 11）。石灰岩地域と非石灰岩地域を比べると、秋吉台同様に大理石を基物として生育する仙台平ドリーネの蘚苔類の方が、体内カルシウムの値が高いことがわかった。

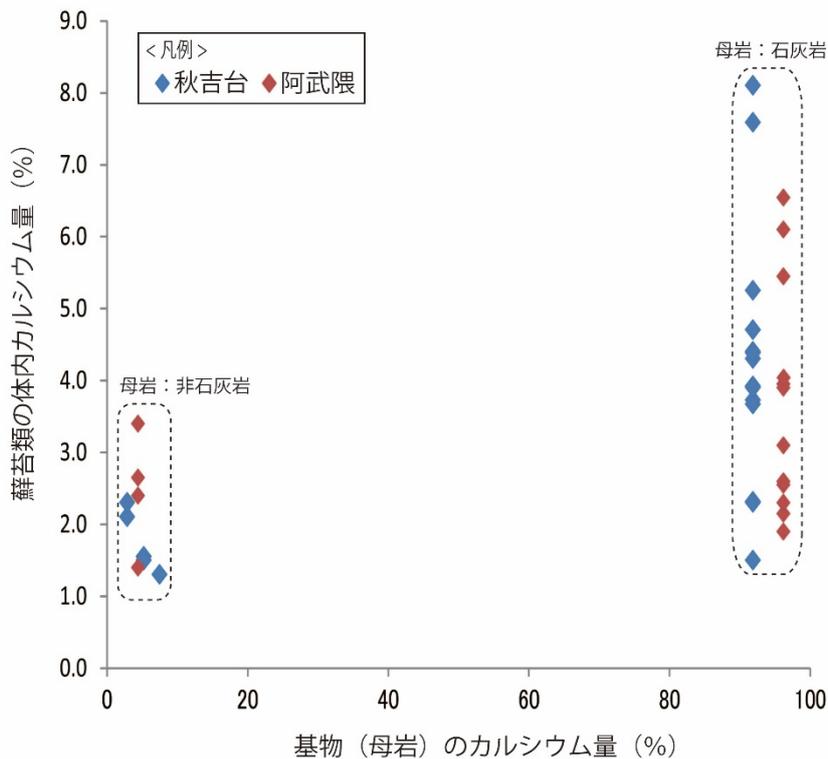


図 11 蘚苔類の体内 Ca 量と基物の Ca 量との関係

## V 考察

### 1. 蘚苔類の種組成と生育環境からみた秋吉台と仙台平ドリーネの比較

2 地域, 3 ドリーネで石灰岩上の蘚苔類を調査した結果, 仙台平ドリーネの出現種数が 41 種と最も多かった (表 6)。また, 地域的に近かつドリーネの規模もほぼ同じ秋吉台ドリーネ A・B の種数には, ドリーネ A が 20 種, ドリーネ B が 18 種と大きな差はみられなかった。

ドリーネ内における湿潤環境種の数は, 秋吉台ドリーネ A が 7 種, ドリーネ B が 5 種, 仙台平ドリーネが 5 種と, 3 つのドリーネで大きな差は見られなかった。しかし, 乾燥環境種の数に違いが見られた。すなわち, 秋吉台ドリーネ A と仙台平ドリーネでは乾燥環境種がそれぞれ 3 種, 2 種と出現しているが, 秋吉台ドリーネ B には存在しないことが大きな特徴である。また, 秋吉台ドリーネ B では懸垂形の種であるセイナンヒラゴケが出現することからも, 3 つのドリーネで最も湿潤な環境であることが示唆される。このことは, 仙台平ドリーネよりも, 秋吉台ドリーネ B の方が年間を通じて湿潤環境であるという気象観測結果からも明らかである。

表 6 3つのドリーネにおける蘚苔類の種数と優占種

地点	秋吉台ドリーネA	秋吉台ドリーネB	仙台平ドリーネ
標高	250m	260m	850m
大きさ（長径）	60m	55m	63m
大きさ（深さ）	10m	12m	13m
優占植生	スギ植林	スギ植林	ミズナラ
種数	20種	18種	41種
湿潤種	7種(35.0%)	5種(27.8%)	5種(12.2%)
乾燥種	3種(15.0%)	0種	2種(4.9%)
石灰岩性種	5種(25.0%)	3種(16.6%)	8種(19.5%)
優占種	アツブサゴケモドキ	ツクシナギゴケモドキ	オオギボウシゴケモドキ

表 7 3つのドリーネにおける蘚苔類の共通種

秋吉台ドリーネA	秋吉台ドリーネB	仙台平ドリーネ
アツブサゴケ	アツブサゴケ	アツブサゴケ
トヤマシノブゴケ	トヤマシノブゴケ	トヤマシノブゴケ
キダチヒダゴケ	キダチヒダゴケ	キダチヒダゴケ
ツクシナギゴケモドキ	ツクシナギゴケモドキ	
ヒラヤスデゴケ	ヒラヤスデゴケ	
アツブサゴケモドキ	アツブサゴケモドキ	
カヤゴケ	カヤゴケ	
キャラハゴケ	キャラハゴケ	
オオクラマゴケモドキ		オオクラマゴケモドキ
エゾキヌタゴケ		エゾキヌタゴケ
ギボウシゴケ		ギボウシゴケ
キスジキヌイトゴケ		キスジキヌイトゴケ
カハルクラマゴケモドキ		カハルクラマゴケモドキ
コツボゴケ		コツボゴケ
アオギヌゴケ		アオギヌゴケ
	ナガスジハリゴケ	ナガスジハリゴケ
	オオトラノオゴケ	オオトラノオゴケ

■ : 湿潤  
 ■ : 乾燥  
 赤字 : 石灰岩性

3つのドリーネすべてに出現する共通種は、3種（アツブサゴケ、トヤマシノブゴケ、キダチヒダゴケ）であった（表 7）。また、地域的に近くかつ規模も同じドリーネである秋吉台ドリーネA・Bの共通種は5種（ツクシナギゴケモドキ、ヒラヤスデゴケ、アツブサゴケモドキ、カヤゴケ、キャラハゴケ）であった。最も共通種が多かったのは、秋吉台ドリーネ

Aと仙台平ドリーネの7種（オオクラマゴケモドキ、エゾキヌタゴケ、ギボウシゴケ、キスジキヌイトゴケ、カハルクラムゴケモドキ、コツボゴケ、アオギヌゴケ）であり、特に乾燥環境種と石灰岩性の種において共通種が見いだされたことは興味深い。この理由として、秋吉台ドリーネ B と仙台平ドリーネでは落葉樹林が一部もしくは全域に発達しているため、秋～冬季の落葉時においてドリーネ中部から上部が乾燥することが影響すると考えられる。気象観測をおこなった仙台平ドリーネを例に挙げると、図 10 に示したように落葉時の 12 月にはドリーネ下部で湿度が 50%RH 以下まで下がっており、これは図 8 の針葉樹林で覆われた秋吉台ドリーネ B ではみられない結果である。このように、落葉時の光環境が、秋吉台ドリーネ A と仙台平ドリーネにおける蘚苔類の共通性を生み出したのであろう。

また、仙台平ドリーネに出現した蘚苔類の種数が、秋吉台よりも 2 倍近く多いことも特徴的である。ほぼ同じ規模のドリーネでありながら多くの種が出現することは、以下の 2 つの要因が考えられる。

ひとつはドリーネ内の樹木種数の違いが挙げられる。杉村・沖津（2002）によると、高等植物種数が多い環境では蘚苔類種数が多い傾向があり、多種類の高等植物が分布する環境は、蘚苔類にとっても適した環境であると論じている。秋吉台ドリーネ A・B はスギ・ヒノキ植林で樹種の多様性に乏しく、比較的暗い環境である。一方、仙台平ドリーネはミズナラ・イタヤカエデを主体とした落葉広葉樹林で、高等植物種数が多く、秋吉台に比べて明るい環境である。低木～高木の樹種は秋吉台ドリーネ A で 9 種、秋吉台ドリーネ B で 8 種、仙台平ドリーネで 16 種と、蘚苔類と同様に仙台平ドリーネは秋吉台ドリーネよりも 2 倍の種数が出現している。

もうひとつの要因は、蘚苔類群落の成立年代の違いである。秋吉台ドリーネ A・B はともに約 50 年間経過した蘚苔類群落であり、今後様々な蘚苔類がドリーネに侵入する遷移が予想される。一方、仙台平ドリーネの蘚苔類群落の成立年代は不明であるが、石灰岩表面の風化状態（写真 11）からみても、秋吉台よりも多くの時間を有している。さらに仙台平ドリーネではオオギボウシゴケモドキの優占度合（表 5）を見ても、秋吉台より遷移が進んでいると考えられる。

## 2. 蘚苔類による生物風化作用

蘚苔類が石灰岩表面を被覆することにより、岩石表層の破碎と、蘚苔類の被覆による岩石中の Ca の吸収が生じることがわかった。

はじめに、岩石表層の破碎についてその要因を考えていく。岩石表層の顕微鏡観察をおこなった結果、表層の破碎要因は蘚苔類の仮根の侵入によるものと考えた。蘚苔類に被覆された岩石表層では、方解石が細粒化した風化層が形成されていた。この風化層は蘚苔類の被覆がない露岩では存在しないかごく薄く、蘚苔類に被覆された岩石において顕著にみられた。すなわちこの風化層は、風雨に曝され自然に風化していく過程で形成されたものと考えよりも、蘚苔類が付着し、仮根を伸ばし成長していく過程で破碎されていったものだと考え

る。

特に、この破碎は大理石からなる仙台平ドリネのピナクルで著しく観察された。仙台平ドリネではオオギボウシゴケモドキが最も優占し、広く群落を形成していた。本種に覆われたピナクル表面では、方解石の粒子が数 mm 単位で粒状剥離する様子が顕著にみられた。方解石が粒状に結晶した大理石では、石灰岩よりも蘚苔類は根を張りやすいと考えられる。オオギボウシゴケモドキにより被覆された岩石表層を顕微鏡で観察すると、表層から垂直・水平方向に 3mm 以上の深さで仮根の侵入が複数確認された。すなわち、蘚苔類が岩石を被覆すると方解石の粒界に沿って仮根が侵入し、隙間を広げながら内部へと侵入する。その結果、物理的に岩石が破碎され、方解石が粒状に剥離する風化が生じる。

次に、蘚苔類の体内 Ca 量と風化との関係を考えてみる。蘚苔類の体内 Ca は、蘚苔類が生育する基物（ここでは岩石）のもつ Ca 量が多いほど高い。すなわち、石灰岩地域の蘚苔類は、基物の石灰岩から多くの Ca を栄養分として吸収している。

蘚苔類の種別にみると、特にヒラゴケ類や好石灰岩性の種で高い Ca 濃度を示した。好石灰岩性の種で高い値を示す理由は、他の蘚苔類よりも特異な環境に生育できる体内のしくみによるものと考えられる。一方、ヒラゴケ類の Ca 量が高い理由は、その平らな形状がもつ葉面積の広さと基物への付着の仕方が影響すると考えられる。葉面積は岩石表面との接触面積でもあり、これが大きいと岩石表面に存在する Ca が溶解した水を多く吸収すると考えられる。また、ヒラゴケ類は名前の通り平らな形状で岩石にへばり付くように生育する。これら蘚苔類の被覆があることにより、降雨後の岩石表面における水分の保持時間も長くなり、被覆があることによる溶食促進効果も生まれるのであろう。また、藤井（2015）では蘚苔類が有機酸を出し、栄養分を得るために岩石を溶かしていることが示唆されている。そのメカニズムや実態は未知な部分もあるが、この考えに基づけば、本研究における蘚苔類の体内 Ca 量の高さは、岩石表面の水分が保たれ溶食時間が長くなったことに加え、有機酸による溶食作用が効いている可能性がある。いずれにしても、石灰岩地域における蘚苔類の体内 Ca 量の高さは、蘚苔類が要因となって生じた溶食作用の結果であることが推察される。

## VI まとめ

蘚苔類による岩石風化への影響を調べた結果、以下の結果が得られた。

1) 蘚苔類が付着した石灰岩では、蘚苔類の仮根が岩石内部に侵入する様子がみられ、岩石表層には細粒化した方解石から成る風化層が見られた。この風化層は、石灰岩地域よりも結晶化した大理石地域で発達が著しい。また、風化層は蘚苔類が被覆していない露岩ではごく薄いか存在せず、蘚苔類は物理的な風化に影響を及ぼすと考えられる。

2) 蘚苔類の体内 Ca 量は、非石灰岩地域よりも石灰岩地域の方が高い傾向があり、蘚苔類は基物の Ca を栄養源として吸収している。蘚苔類の被覆があることにより、降水後の水分の保持時間は長くなり、蘚苔類の被覆により溶食促進効果が生じることが推察される。

今後の課題として、草原の縮小年代が既知な秋吉台において、森林の成立年代が異なるド

リーネを複数選び、蘚苔類群落の遷移とそこでの風化状況を比較し、蘚苔類による風化プロセスの検討をおこないたい。

## 謝辞

本研究は、平成 26 年度国土地理協会学術研究助成により実施した。気象観測をおこなうにあたり、山口県農林事務所ならびに宮田宏志氏からは秋吉台のドリーネ B での観測許可を、福島県ならびに菅谷早稲川共同牧野利用農業協同組合代表理事組合長の佐藤政一氏からは仙台平ドリーネでの観測許可を頂いた。元素分析については、日本大学文理学部地球科学科の竹村貴人先生から携帯型 XRF をお借りした。GIS 分析については、日本大学文理学部地理学科の関根智子先生にご教示頂いた。以上の方々に、ここに記して厚く御礼を申し上げます。

## 参考文献

- 岩月善之助編 (2001) : 『日本の野生植物 コケ』 平凡社.
- 岩月善之助・水谷正美 (1972) : 『原色日本蘚苔類図鑑』 保育社.
- 環境省編 (2015) : 『レッドデータブック 2014 —日本の絶滅のおそれのある野生生物— 9 植物 II (蘚苔類・藻類・地衣類・菌類)』 ぎょうせい.
- 太田正道 (1968) : 地向斜型生物礁複合体としての秋吉石灰岩層群. 秋吉台科学博物館報告, 5 号, 1-44.
- 太田陽子 (2011) : 秋吉台地域の相観植生図. 秋吉台科学博物館報告, 46 号, 37-44.
- 岡本 透・藤川将之 (2013a) : 江戸時代の史料からみた秋吉台の土地利用と植生. 洞窟学雑誌, 37 号, 1-20.
- 岡本 透・藤川将之 (2013b) : 山口県秋吉台の植生と土地利用の歴史. 月刊地球, 409 号, 577-584.
- 乙幡康之・羽田麻美 (2014) : 山口県秋吉台のヒメタチヒラゴケ. 蘚苔類研究, 11(2), 40-41.
- 喜多朝子 (1996) : 秋吉台の土地利用. 漆原和子編『カルスト』 大明堂, 45-56.
- 朽津信明 (2007) : カンボジア・タ・ネイ遺跡における蘚苔類の繁茂と砂岩の風化. 保存科学, 47 号, 111-120.
- 栗崎弘介・中村 久・川村秀久・畑江久美・吉村和久 (2006) : 鍾乳石に記録された山口県秋吉台カルスト地域の植生変遷. 地球化学, 40 号, 245-251.
- 栗崎弘介・中尾武史・富田麻井・藤川将之・岡本 透・能登征美・吉村和久 (2013) : 石筍が語る山口県秋吉台の土地利用と植生の変遷. 月刊地球, 409 号, 585-593.
- 塩見隆行・中村 久 (1981) : 秋吉台の現存植生図. 秋吉台科学博物館報告, 16 号, 71-93.
- 杉村康司・沖津 進 (2002) : 筑波山の森林の林床における蘚苔類の種多様性と上層木およ

- び落葉, 岩との関係. 植生学会誌, 19, 113-124.
- 中西 哲 (1977): 群落の生育形構造. 伊藤秀三編『群落の組成と構造』, pp.193-251. 朝倉書店.
- 滝根町編さん委員会編 (1990): 『滝根町史 第1巻 自然編』 滝根町.
- 田中敦司 (2012): 日本の石灰岩性蘚類. *Naturalistae*, 16号, 47-82.
- 羽田麻美・乙幡康之 (2016): 秋吉台における草地縮小に伴う岩上蘚苔類群落の侵入とその構成種. 地理誌叢, 57(2), 13-23.
- 松倉公憲 (2008): 『地形変化の科学—風化と侵食—』 朝倉書店.
- Chen, J., Blume, H. and Beyer, L. (2000): Weathering of Rocks Induced by Lichen Colonization —A Review. *Catena*, 39, 121-146.
- Lenton, T., Crouch, M., Johnson, M., Pires, N. and Dolan, L. (2012): First plants cooled the Ordovician. *Nature Geoscience*, 5, 86-89.
- Matthews, M. and Owen, G. (2008): Endolithic Lichens, Rapid Biological Weathering and Schmidt Hammer R-Values in Recently Exposed Rock Surfaces: Storbreen Glacier Foreland, Jotunheimen, Norway. *Geografiska Annaler*, 90(4), 287-297.
- McCarroll, D and Viles, H (1995): Rock-weathering by the lichen *Lecidea auriculata* in an Arctic alpine environment. *Earth Surface Processes and Landforms*. 20(3), 199-206.
- Noguchi, A. (1987). *Illustrated Moss Flora of Japan, Part 1*: Hattori Botanical Laboratory.
- Noguchi, A. (1988). *Illustrated Moss Flora of Japan, Part 2*. Hattori Botanical Laboratory.
- Noguchi, A. (1989). *Illustrated Moss Flora of Japan, Part 3*. Hattori Botanical Laboratory.
- Noguchi, A. (1991). *Illustrated Moss Flora of Japan, Part 4*. Hattori Botanical Laboratory.
- Noguchi, A. (1994). *Illustrated Moss Flora of Japan, Part 5*. Hattori Botanical Laboratory.
- Song, W., Ogawa, N., Oguchi, C. T. Hatta, T. and Matsukura, Y. (2007): Effect of *Bacillus subtilis* on granite weathering: A laboratory experiment. *Catena*, 70(3), 275-281.