

論文

伊吹山頂上の残雪表面の雪氷藻類

竹内 望^{1)*}, 角川咲江²⁾, 武藤恭子²⁾

要 旨

雪氷藻類とは、雪や氷の表面で繁殖する光合成微生物である。2005年から2010年にかけて、滋賀県の伊吹山の山頂（標高1377m）付近の残雪で、雪氷藻類の調査を行った。藻類の大繁殖を示す赤雪や緑雪のような肉眼で見える着色雪はみられなかったが、残雪表面から採取した積雪の顕微鏡観察の結果、形態の異なる主に2つのタイプの雪氷藻類細胞を確認した。この藻類は、日本をふくめ世界各地で報告されている *Chloromonas nivalis* に形態がほぼ一致し、二つのタイプはこの種のそれぞれ発達段階の異なる休眠胞子と考えられる。観測を行った各年4月下旬の残雪には、ほぼすべてにこの藻類細胞が含まれていたことから、毎年この時期に残雪上に現れるものと考えられる。藻類バイオマスおよびクロロフィル量の測定の結果、それぞれ他の地域で報告されている赤雪等の着色雪と比べ低い値を示した。2007年4月に二回の調査を行った結果、この藻類の繁殖時期は、3月中旬から5月上旬までの1ヶ月半の融雪期間のうち、消雪直前のわずか1-2週間であることがわかった。

キーワード：伊吹山，雪渓，雪氷藻類，クロロフィル

Key words: Mt. Ibuki, snow patch, snow algae, Chlorophyll

1. はじめに

氷河や雪渓の雪や氷の表面には、雪氷藻類（または氷雪藻）と呼ばれる光合成微生物が繁殖する。雪氷藻類が大繁殖すると、肉眼でもわかるほど積雪表面が緑や赤に色づく。この現象は彩雪現象または赤雪現象として世界中で知られている。雪氷上には、藻類のほかにも、微小動物や昆虫、バクテリアなどの従属栄養生物が生息している。雪氷藻類は、雪氷上の食物連鎖の中で、一次生産者としての役割を担う生物である（幸島，1994）。世界中の雪氷に広く分布する雪氷藻類は、極限生物としての生態、雪氷の融解への影響、アイスコア研究における過去環境指標など、生物学だけでなく氷河や雪渓の研究にも重要な意味をもつ微生物である。

日本の積雪でも彩雪現象は古くから知られ、数種の雪氷藻類の繁殖が報告されている。小林・福島（1952）は、尾瀬ヶ原と北アルプスの残雪から日本ではじめて赤雪と緑雪の中の藻類について報告した。その後、Fukushima（1963）によって、全国各地の高山の残雪の雪氷藻類について報告された。Fukushima（1963）では、北は北海道大雪山の旭岳から、南は四国石鎚山まで、全国49か所の残雪サンプルを採取し、観察された雪氷藻類を詳細に記載している。この論文によれば、雪氷藻類はほぼ全国の高山の残雪に現れ、記載された種数は10種類以上にもおよぶ。また、藻類が繁殖した雪は、赤雪だけではなく、緑雪、黄色雪など、さまざまな色のものが存在することを述べている。この色の違いは、藻類の種類や細胞中の色素量が繁殖条件によって変化するためと考えられている。この論文以降の日本の雪氷藻類の研究は非常に限られているが、最近、立山での季節変化に関するもの（Segawa *et al.*, 2007）、尾瀬のアカシボ現象（山本ら，2006）、月山の残雪の藻類（Muramoto *et al.*,

1) 千葉大学大学院理学研究科地球科学コース
〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

* 連絡先

2) 西堀榮三郎記念探検の殿堂
〒527-0135 滋賀県東近江市横溝町 419

2008) 等の論文が, 少しずつ発表されている. しかしながら, 日本の雪氷藻類に関する情報はまだ断片的で, 分類や生態を含め, 赤雪のような藻類の繁殖がどのような条件でどんな場所でおこるのかなど, わかっていないことが多い. 日本列島の雪氷藻類の地理的な分布, とくに西日本における雪氷藻類の報告は, 白山, 大山, 石鎚山であるのみである. 藻類の生態を理解することおよび地理分布を把握することは, 雪氷藻類の起源や生活史, 最終氷期から現在までの気候変動との関係, さらに今後予想されている温暖化による日本列島の雪氷圏の変化や酸性雪等の積雪汚染が雪氷藻類に及ぼす影響を評価する上でも重要である.

2005 年から 2010 年にかけて, 滋賀県の伊吹山の山頂付近の残雪で雪氷藻類の調査を行った. 伊吹山の積雪の雪氷藻類の報告はこれまで全くない. 伊吹山は, 毎冬の積雪量が多いことや, 山頂付近まで車道が伸びていることから, 継続的な雪氷藻類の調査地として適していると考えた. 本論文では, 伊吹山の積雪に雪氷藻類の存在を確かめることと, その形態の記載と定量的な評価をすることを目的とした.

2. 調査地

伊吹山は, 滋賀県と岐阜県の県境に位置する伊吹山地最南端の山である (図 1). 冬期には日本海からの季節風が若狭湾から琵琶湖を経て伊吹山に直接あたるため, 比較的大量の雪が積もる. 頂上の標高は 1377 m で, 現在 8 合目 (1260 m) まで伊吹山ドライブウェイが通じ, 車でアクセスするこ

とができる. このドライブウェイは, 冬期には雪のため通行止めになり, 例年 4 月下旬に開通する. 今回の調査は, このドライブウェイの開通の直後に行ったものである.

伊吹山山頂では, 気象庁の測候所が 1919 年から 2001 年まで運用されていた. その中の限られた期間ではあるが, 山頂の気象条件や積雪条件の観測値が気象庁ホームページで公開されている. それによると, 平均年間降水量は 2332 mm (1919–1942), 最深積雪の平均は 542 cm (1962–1988) である. 年平均気温は 6.3°C (1972–2000) で, 12 月から 3 月までは月平均気温が氷点下となる. 季節風のパターンははっきりと表れており, 冬期は比較的強い北北西の風が卓越するのに対し, 夏期には南東の風が卓越する. 1971 年から 2000 年の平年値で, 日最高気温が氷点を上回るのは 3 月 10 日以降, 日平均気温では 3 月 27 日以降, 日最低気温では 4 月 9 日以降である. したがって, 山頂付近では 3 月中旬より徐々に融雪が始まり, 4 月中旬以降は気温も氷点下になることもなくなり融雪が加速すると考えてよい. 観測期間の経年変動をみる限り, 顕著な温暖化傾向は現れていない.

調査を行ったのは, 2005, 2007, 2008, 2010 年の 4 月下旬である. 2009 年は積雪量が少なく, 伊吹山ドライブウェイの開通前にほとんど頂上付近の雪がなくなっていたので調査は行わなかった. 2007 年の調査は, 4 月 10 日と 4 月 29 日の 2 回行った.

調査の一部は, 滋賀県の博物館, 西堀榮三郎記念探検の殿堂の雪氷藻類による赤雪探しという子供向けイベントとして行った.

3. 分析方法

残雪に含まれる雪氷藻類を観察するために, 図 1 に示した伊吹山頂上部の残雪表面の雪を採取した. 頂上付近の残雪は, パッチ状に存在しており (図 2), その分布は年によって異なったが, 場所によっては毎年存在するものもあった. 積雪深の確認はしていないが, パッチの大きさと地形から判断すれば, おそらくどの残雪も 50 cm 未満と思われる. 雪を採取した残雪は, 図 1 の S1 から S8 である. 各年に採取した場所は, 表 1 にまとめた. ステンレススコップで, 表面から深さ約 2 cm ほどの雪を採取した. 採取した雪は冷蔵または冷凍

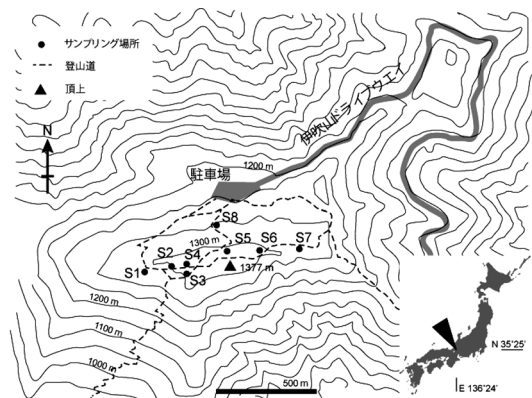


図 1 伊吹山の位置および山頂付近の地図. 積雪サンプルの採取場所 (S1–S8) を示した.

(a)



(b)



(c)



図 2 調査を行った伊吹山山頂付近の残雪 3 か所の写真 (2008 年 4 月 27 日). (a) S2, (b) S5, (c) S6

のまま千葉大学の実験室に輸送し、光学顕微鏡 (Olympus, BH-51) で含まれる雪氷藻類の観察を行った。

2008 年には、雪の上の雪氷藻類を定量するためのサンプルを採取した。雪氷藻類の定量は、細胞濃度およびクロロフィル *a* (葉緑素, 以下クロロフィル) 濃度を分析し、単位面積当たりおよび単位水当

量あたりの値として表現した。定量用サンプルの採取を行ったのは S2, S5, S6 の残雪である。各残雪で、細胞濃度用サンプルとクロロフィル分析用サンプルをそれぞれ 5 つずつ採取した。採取の際にはそれぞれで採取面積を記録した。サンプルは、冷凍のまま千葉大学に持ち帰り、分析を行った。細胞濃度用サンプルは、実験室で雪を解かしたあと、そこから一部をとって (0.1 mL), その中に含まれるすべての藻類の数を顕微鏡で数え、積雪水当量あたりの細胞数を細胞濃度 (cells mL^{-1}) として求めた。求めた細胞濃度と採取面積から、単位面積あたりの藻類細胞数 (cells m^{-2}) を求め、さらに各藻類細胞の体積 (回転楕円体に近似) から細胞体積バイオマス ($\mu\text{L m}^{-2}$) を求めた。

クロロフィル分析用サンプルは、重量を計測後、融解し、ろ紙 (ガラスフィルター, Whatman GF/F 25 mm) に吸引濾過した。そのろ紙から *N-N*-ジメチルホルムアミド (DMF) 6 mL を抽出溶媒として、24 時間冷暗所にてクロロフィルを抽出した。その後、クロロフィル分析用蛍光光度計 (Turner Trilogy, USA, 励起波長 485 nm, 放射波長 685/10 nm) で、DMF の蛍光値を計測し、あらかじめ作成した検量線からクロロフィルの濃度を求めた (Welschmeyer 法)。測定したクロロフィル量とろ過した水の量から、積雪水当量あたりのクロロフィル濃度 ($\text{Chl } \mu\text{g L}^{-1}$), また採取面積から面積あたりのクロロフィル量 ($\text{Chl } \mu\text{g m}^{-2}$) を計算した。以上の分析は、各場所で採取した 5 つのサンプルすべてについて行い平均値を求めた。

4. 結 果

4.1 観察された雪氷藻類

残雪サンプルの顕微鏡観察の結果、主に形態の異なる 2 つのタイプ (A, B) と、ごくわずかにもうひとつのタイプ (C) の雪氷藻類の細胞が含まれていた。

A タイプは、長さ 22–34 μm (平均 27 μm), 幅 14–22 μm (平均 17 μm) の楕円形の細胞である。細胞内の中心部付近に葉緑体が存在し、細胞質はオレンジ色の色素で満たされている (図 3a, b)。細胞外被は透明で、長軸の頂点には突起がある。長軸に沿って数本の襞があり、襞は緩く曲線を描き、分枝している所もある (図 3c)。

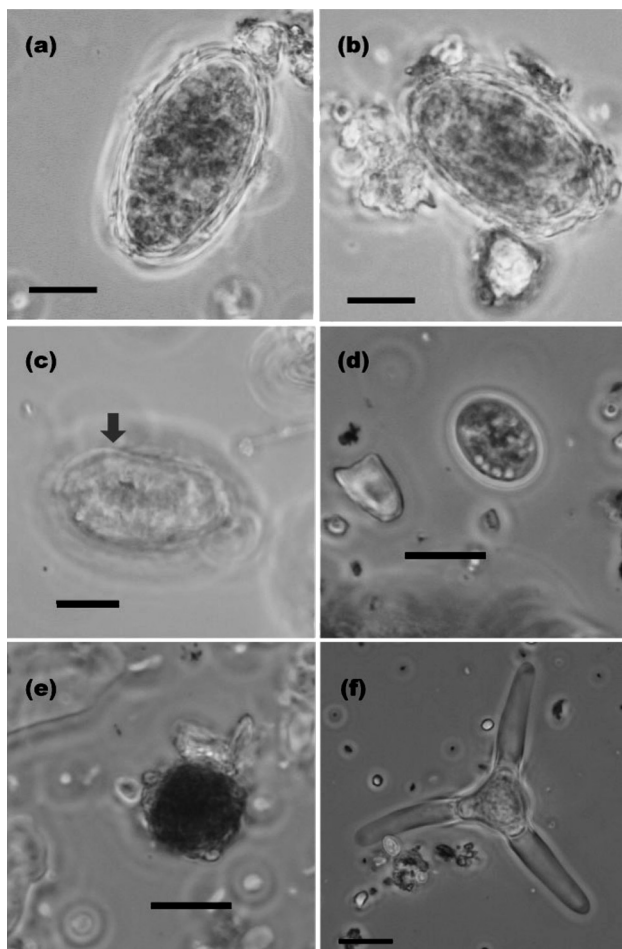


図 3 伊吹山頂上付近の残雪に含まれていた雪氷藻類と微生物。位相差顕微鏡により撮影。スケールバーはすべて $10\mu\text{m}$ 。(a), (b), (c) タイプ A の藻類細胞, 矢印は細胞外皮の襞, (d) タイプ B の藻類細胞, (e) タイプ C の藻類細胞, (f) 菌類 (*Chionaster nivalis*)

B タイプは、長さ $11\text{--}18\mu\text{m}$ (平均 $13\mu\text{m}$)、幅 $9.4\text{--}14\mu\text{m}$ (平均 $11\mu\text{m}$) の緑色の細胞である (図 3d)。A タイプのようなオレンジ色の色素は見られない。細胞の形は楕円形で、長軸と短軸の比は変異が大きい。細胞外被は薄くほとんど目立たない。

C タイプは、直径約 $14\mu\text{m}$ の赤い球形の細胞である。この細胞は観察数が非常に少なく、含まれていたのは、2007 年 4 月 29 日の S6 のサンプルにのみであった (図 3e)。

藻類ではないが積雪表面によく見られるという菌類 *Chionaster nivalis* も、ほぼすべてのサンプルにみられた (図 3f)。

4.2 雪氷藻類の出現場所と出現時期

各年の各採取場所での雪氷藻類の有無を示したものが表 1 である。2005 年 5 月の調査では、積雪が残っていたのが、S2 と S5 の 2 か所のみで、両方の残雪から雪氷藻類が確認された。

2007 年の調査は、4 月 10 日と 4 月 29 日の二回行った。4 月 10 日の調査では、S1 から S7 までのすべての場所に積雪が残っていたが、採取された雪の中に雪氷藻類は全く含まれていなかった。4 月 29 日には、S1, S2, S3, S4, S7 の 5 か所の残雪は消滅し、残っていた S5, S6, S8 のサンプルを観察したところ、雪氷藻類が含まれていた。

表 1 伊吹山頂上付近の調査を行った表面積雪における雪氷藻類の有無.

採取地点	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
2005/5/8	—	○	—	—	○	—	—	・
2007/4/10	×	×	×	×	×	×	×	・
2007/4/29	—	—	—	—	○	○	—	○
2008/4/27	—	○	—	—	○	○	—	—
2010/4/26	—	○	○	—	○	○	×	・

○：雪氷藻類は含まれていた，×：雪氷藻類は含まれていなかった，—：残雪なし，・：未調査

2008 年の調査では，S2，S5，S6 の 3 か所のみ積雪が残っており，そのすべての場所から雪氷藻類細胞が観察された。

2010 年の調査では，S2，S3，S5，S6，S7 の 5 か所で積雪が残っていて，そのうちの S7 を除いた 4 か所のサンプルに，雪氷藻類が含まれていることが確認できた。

4.3 藻類の定量分析

2008 年に採取した 3 か所の残雪の藻類の細胞濃度の分析結果を表 2 に示す。細胞濃度は，サンプルによってばらつきが大きく，1 mL あたり数細胞から 1 万細胞を超えるものもあった。タイプ A とタイプ B のそれぞれの細胞濃度は，どのサンプルでもタイプ B のほうが濃度は高く，2 倍から 5 倍の差

があった。各サンプル場所での平均値を比較すると，最も細胞濃度が高かったのは S5 で，タイプ A が $1.4 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ ，タイプ B が $6.3 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ であった。反対に最も低かったのは S2 で，タイプ A が $7.1 \times 10 \text{ cells mL}^{-1}$ ，タイプ B が $3.2 \times 10^2 \text{ cells mL}^{-1}$ であった。細胞濃度から求めた細胞体積バイオマスは，S2 が $9.0 \times 10^{-1} \mu\text{L m}^{-2}$ ，S5 が $2.3 \times 10 \mu\text{L m}^{-2}$ ，S6 が $3.4 \mu\text{L m}^{-2}$ であり，S2 と S5 の差は約 26 倍であった。

各サンプルのクロロフィル濃度の分析をした結果を表 2 に示す。S5 でクロロフィル濃度が高く（平均： $2.1 \times 10 \mu\text{g L}^{-1}$ ），S2 では比較的低かった（平均： $1.1 \times 10 \mu\text{g L}^{-1}$ ）。面積あたりのクロロフィル量でみても両者の関係はほぼ同じであった。

5. 考 察

5.1 伊吹山の雪氷藻類

伊吹山の残雪で観察された雪氷藻類のタイプ A は，Fukushima (1963) が日本各地の雪渓にみられたとしている緑藻の *Scotiella nivalis* の休眠胞子の形態とよく一致する。Fukushima (1963) の記載によると，*Scotiella nivalis* の休眠胞子は紡錘形で細胞外皮に襷が存在し，細胞の長径が $12\text{--}36 \mu\text{m}$ ，短径 $6\text{--}18 \mu\text{m}$ とあり，本研究で観察されたタイプ A とよく一致する。この種は，のちに Hoham and Mullet (1978) によって，*Chloromonas nivalis* (Chodat) Hoham & comb. nov. に組み替えられている。月山の残雪で報告されている藻類も同種であり，サンプルの分析から遺伝子配列および細胞外皮の形状が異なるさらに 2 つのタ

表 2 2008 年の伊吹山山頂の残雪で採取した積雪試料中の雪氷藻類（タイプ A および B）の細胞濃度と細胞体積バイオマス，およびクロロフィル濃度（平均±標準偏差）。

採取 地点	細胞濃度			細胞体積 バイオマス	クロロフィル 濃度	
	Type A cells mL^{-1}	Type B cells mL^{-1}	Total cells m^{-2}	Total $\mu\text{L m}^{-2}$	Chl $\mu\text{g L}^{-1}$	Chl $\mu\text{g m}^{-2}$
S2	7.1 ± 6.5 $\times 10$	3.2 ± 5.0 $\times 10^2$	3.9 ± 5.3 $\times 10^2$	9.0 ± 9.0 $\times 10^{-1}$	1.1 ± 0.9 $\times 10$	5.0 ± 3.0 $\times 10$
S5	1.4 ± 1.1 $\times 10^3$	6.3 ± 4.5 $\times 10^3$	7.7 ± 5.4 $\times 10^3$	2.3 ± 1.9 $\times 10$	2.1 ± 1.3 $\times 10$	9.6 ± 6.8 $\times 10$
S6	2.3 ± 1.5 $\times 10^2$	6.0 ± 3.8 10^2	8.2 ± 5.2 $\times 10^2$	3.4 ± 2.0	n.a.	n.a.

n.a.: 分析データなし

イブの存在が確認されている (Muramoto *et al.*, 2008). Fukushima (1963) によれば, この種は北海道から本州, 四国の残雪に広く分布し, 赤茶雪の優占種になると報告されている. 細胞形態に多少の変異があるものの, 北米や北極圏をふくむ世界各地でも報告されている. ヨーロッパアルプスでは, オレンジ~黄色の着色雪の優占種となっている (Remias *et al.*, 2010). 細胞内に見られたオレンジ色の色素は, 雪氷藻類によくみられるカロチノイドの一種で強い日射から細胞を守るための物質と考えられている. 特にこの種では, 日射の強い場所ほど細胞内に多く蓄積される傾向にあると報告されている (Fukushima, 1963).

タイプ B の藻類細胞は, 形態に特別な特徴が見られないため, 種を同定することはできないが, おそらくタイプ A と同種の生活史の異なる細胞であると考えられる. 一般に藻類は繁殖や休眠といった生活史の中で大きく形態を変化させる. *Chloromonas nivalis* は, 積雪の表面下で栄養細胞となり無性生殖によって繁殖していると考えられているが, その繁殖の期間はごく短く栄養細胞を観察することは難しいとされている (Remias *et al.*, 2010). タイプ B には鞭毛や眼点がみられなかったことなどから, 接合後すぐの休眠胞子になる前の状態の細胞と考えられる.

タイプ C の藻類細胞は, 赤雪中に一般に含まれる雪氷藻類 *Chlamydomonas nivalis* var. Kobayashi または *Chloromonas* sp. であると思われる. *Chlamydomonas nivalis* var. Kobayashi は, 日本各地の赤雪に含まれ, その休眠胞子は, 直径 13–22 μm の赤い球形の細胞である (Fukushima, 1963). *Chloromonas* sp. は, 富山県の立山の残雪ではほぼ毎年 5 月から 7 月にかけてみられる赤雪に含まれる藻類で, 同様にほとんどは赤い球形の休眠胞子である (Segawa *et al.*, 2007). しかしながら, 本研究で観察されたこの細胞は 2007 年 4 月 29 日の S6 のサンプルにわずかに含まれていたのみであり, 同定するには観察例が少ない. 日本各地にみられるこれらの藻類が, 伊吹山の残雪ではあまり繁殖せず, 赤雪現象も起きない原因は不明である.

5.2 雪氷藻類のバイオマス

今回採取した積雪の多くに藻類細胞が確認され

た一方, 採取したどの積雪表面も赤や緑に着色していることはなかった. 採取を行った残雪表面は, 黒や茶色に少し汚れていたが, 赤雪や緑雪などの着色現象は見られなかった. これは, 残雪上に繁殖する藻類量が少ないためと考えられる.

報告されている赤雪など着色雪の藻類の細胞濃度と比較すると, 伊吹山の細胞濃度は顕著に少ない. 北米のロッキー山中の赤雪の細胞濃度は, $8.8\text{--}1270 \times 10^2 \text{ cells mL}^{-1}$ (Thomas and Duval, 1995), アラスカの氷河上の残雪の赤雪では, $45\text{--}231 \times 10^2 \text{ cells mL}^{-1}$ (Takeuchi, 2001) であり, 今回求めた伊吹山の細胞濃度 $4.0\text{--}70 \times 10^2 \text{ cells mL}^{-1}$ はそれらに比べ, おおよそ一桁小さい.

伊吹山残雪表面のクロロフィル濃度も, 報告されている赤雪のクロロフィル濃度に比べ, 少ない. 北米で報告されている雪氷藻類の赤雪現象のクロロフィル濃度は, 約 $130\text{--}140 \mu\text{g L}^{-1}$ (Thomas, 1972) であり, これは伊吹山の約 7–12 倍である. クロロフィル濃度は葉緑素の量を示しているので, 藻類の細胞数濃度と同様に, 伊吹山の残雪では一般の着色雪に比べ, 藻類の繁殖量が少ないことを示している.

伊吹山の積雪表面の細胞体積バイオマスは, 立山で観測されている春から初夏の雪氷藻類バイオマスにはほぼ一致する. 立山の積雪表面の雪氷藻類 (緑藻) は, 4 月から徐々にバイオマスが増加し, 8 月に最大値の約 $150 \mu\text{L m}^{-2}$ に達する (Segawa *et al.*, 2007). 今回の伊吹山での測定値 ($0.9\text{--}23 \mu\text{L m}^{-2}$) は, この立山の観測値の 3 月から 5 月頃の値と一致する. 立山にはっきりと着色した赤雪が現れるのは, その後の 5 月から 7 月頃であることから, 伊吹山で雪が着色するほど藻類が繁殖しないのは, 消雪時期が早すぎるためなのかもしれない.

雪の着色現象がみられないにもかかわらず, 雪氷藻類細胞が確認できたことは, 着色現象がない日本各地の残雪でも, かなり広範囲に雪氷藻類は存在している可能性を示唆している.

5.3 雪氷藻類の繁殖時期と生活史

2007 年 4 月の二回の調査の結果からは, 伊吹山の雪氷藻類は, 消雪直前のわずかな期間だけに雪渓表面に現れることがわかった. 同地点で採取したサンプルには 4 月 10 日には雪氷藻類は全く含まれていなかったが, 4 月 29 日には大量に含まれ

ていた (表 1)。このことは、雪氷藻類は二回の調査の間の 19 日間で雪の上で繁殖したことを示している。本研究で雪氷藻類が観察された 4 月下旬の残雪は、どれも直径数メートルの規模の小さい残雪のパッチであった。これらの残雪は、おそらくサンプル採取後 1 週間前後で融解して消滅したと思われる。したがって、雪氷藻類の繁殖期間は、4 月から 5 月にかけての消雪の直前のわずか 1 から 2 週間であると思われる。

一方、雪氷藻類の繁殖条件の一つである融雪は、藻類の繁殖時期よりもかなり前に始まっている。気温の平年値の記録から推定すれば、伊吹山山頂で雪の融解が始まるのは、毎年 3 月中旬ころである。したがって、3 月中旬から 5 月上旬の約 1 カ月半の期間は、融雪がおこっており雪氷藻類の繁殖は可能なはずである。それにもかかわらず、消雪の直前まで雪氷藻類が現れないのは、融雪以外の繁殖に必要な条件がそろわないためと考えられる。

雪氷藻類の繁殖に必要な条件として、十分な日射や栄養塩があるが、どちらも繁殖が 4 月下旬に開始する原因とは考えにくい。日射量は 3 月から 4 月にかけて大きく違うことはない。また栄養塩も融雪中ではほとんどすぐに流出してしまうのでこの間に大きく変化があるとは考えにくい。

考えられる 4 月下旬の繁殖の原因として、雪の含水率または藻類の供給源がある。雪氷藻類は、積雪中の液体の水 (間隙水) の中で繁殖する (e.g. Fukushima, 1963) ことから、積雪は単に融解しているだけでなく、ある程度の液体の水を含むことが必要となる。現時点では具体的なデータはないが、4 月下旬になって積雪表面の含水率が繁殖可能な量に達したのかもしれない。積雪表面で繁殖する雪氷藻類の供給源として、大気を介して孢子が表面に堆積し繁殖したもの、または積雪下の土壌で休眠していた孢子が融解水の供給で繁殖を開始し積雪表面に移動してきたもの (Hoham *et al.*, 1983) が、一般に考えられる。本研究で藻類が観察された残雪は、どれも消雪直前の薄く規模の小さい残雪であることから、雪氷藻類は積雪下の土壌から積雪表面に移動してきたものと思われる。そうだとすれば、藻類が現れる 4 月下旬は、積雪下の土壌から藻類が移動可能となるほど積雪が十分

に薄くなる時期なのかもしれない。

毎年 4 月下旬に積雪表面に観察されるという事実から推測される伊吹山の雪氷藻類の生活史は、Hoham *et al.*, (1983) に述べられている北米の *Chloromonas* 属の雪氷藻類の生活史とほぼ一致すると考えられる。積雪表面の藻類の休眠孢子は、積雪の消滅とともに土壌中に堆積する。その休眠孢子は、積雪のない夏から秋、融解水のない冬は休眠し、春になって土壌表面に降り積もった積雪から融解水が浸みてきたときに活動を開始する。その後、活動を開始した栄養細胞は光を求めて土壌面から積雪表面に遊泳して移動し、表面で光合成をして繁殖する。繁殖後再び休眠孢子となって、消雪とともに土壌中に再び堆積する。

以上の藻類の繁殖の原因、供給源、および生活史は、本研究で得た数少ない事実から推定したものにはすぎない。今後、積雪条件の詳しい分析をおこない、伊吹山の藻類の繁殖の原因と生活史を明らかにすることが必要である。雪氷藻類は、様々な積雪の物理条件や化学条件に影響を受けると考えられている。中でも酸性雪などの積雪の pH は藻類の繁殖に大きく影響することが明らかになっている (Hoham and Mohn, 1985)。伊吹山の藻類の生活史を明らかにすることは、日本各地の残雪の雪氷藻類の生態の理解、そして今後予想される気候の温暖化による積雪条件の変化や、人為起源物質による積雪の汚染などの雪氷藻類への影響の理解に重要な役割をもつことは間違いない。

6. 結 論

伊吹山山頂付近の 4 月下旬の残雪の調査の結果、雪氷藻類が繁殖していることがはじめて確認された。観察された藻類は主に二つのタイプがあり、その細胞の形態からどちらも世界および日本各地の積雪で報告されている *Chloromonas nivalis* だと考えられる。藻類バイオマスおよびクロロフィル量は、一般の赤雪等の着色雪と比べ低い値を示した。伊吹山では雪が着色しているのは観察されず、これは藻類の繁殖量が少ないためと考えられる。2007 年 4 月の二回の調査の結果からは、伊吹山の雪氷藻類は、消雪直前のわずかな期間のみ残雪表面に現れることがわかった。伊吹山の雪氷藻類は、夏から冬にかけて土壌表面で休眠し、融雪

のおこるわずかな期間, 表面に現れて繁殖するという生活史を持つものと考えられる。

今後, 伊吹山で毎年継続的な調査をつづけ, 年による変動と気象条件や積雪の化学条件との関係を明らかにしていきたい。

謝 辞

伊吹山で子供向けイベントとして雪の調査を行うに際し, たくさんの方にお世話になった。西堀榮三郎記念探検の殿堂の館長小川正道さん, 伊吹山文化資料館学芸員高橋順之さん, 伊吹山自然保護員の大橋邦夫さん, イベントに協力いただいた脇 徹さん, 山口典子さん, 参加してくれたキッズ探検隊の子供たちと保護者の方々に, ここに心より感謝する。2名の査読者(幸島司郎さんと匿名)および担当編集委員の倉元隆之さんからは有益なコメントをいただいた。

文 献

- Fukushima, H., 1963: Studies on cryophytes in Japan. Yokohama Municipal University Series C. Natural Sciences. **43**, 1-146.
- Hoham, R.W. and Mohn, W.W., 1985: The optimum pH of four strains of acidophilic snow algae in the genus *Chloromonas* (Chlorophyta) and possible effects of acid precipitation. J. Phcol., **21**, 603-609.
- Hoham, R.W. and Mullet J.E., 1978: *Chloromonas nivalis* (Chod.) Hoh. & Mullet. comb. nov., and additional comments on the snow alga, *Scotiella*. Phycologia, **17** (1), 106-107.
- Hoham, R.W., Mullet, J.E. and Roemer, S.C., 1983: The life history and ecology of the snow alga *Chloromonas polyptera* comb. nov. (Chlorophyta, Volvocales), Canadian. J. Botany, **61**, 2416-2429.
- 小林義雄, 福島 博, 1952: 日本に於ける赤雪と緑雪に就て I. 植物学雑誌, **65** (765-766), 77-85.
- 幸島司郎, 1994: 氷河生態系, 日本生態学会誌, **44** (1), 93-98
- Muramoto, K., Kato, S., Shitara, T., Hara, Y. and Nozaki, H., 2008: Morphological and genetic variation in the cosmopolitan snow alga *Chloromonas nivalis* (Volvocales, Chlorophyta) from Japanese Mountainous Area. Cytologia, **73** (1), 91-96.
- Remias, D., Karsten, U., Lütz, C. and Leya, T., 2010: Physiological and morphological processes in the Alpine snow alga *Chloromonas nivalis* (Chlorophyceae) during cyst formation. Protoplasma, **243**, 73-86.
- Segawa, T., Miyamoto, K., Ushida, K., Agata, K., Okada, N. and Kohshima, S., 2007: Seasonal change in bacterial flora and biomass in mountain snow from the Tateyama Mountains, Japan, analyzed by 16S rRNA gene sequencing and real-time PCR. Appl. Envir. Microbiol., **71** (1), 123-130.
- Takeuchi, N., 2001: The altitudinal distribution of snow algae on an Alaska glacier (Gulkana Glacier in the Alaska Range), Hydrol. Proc., **15** (18), 3447-3459.
- Thomas W.H., 1972. Observation on snow algae in California. J. Phycol., **8**, 1-9.
- Thomas, W.H. and Duval, B., 1995: Sierra Nevada, California, USA, Snow algae: snow albedo changes, algal-bacterial interrelationships, and ultraviolet radiation effects. Arc. Alp. Res., **27** (4), 389-399.
- 山本鎔子, 林 卓志, 落合 正, 福原晴夫, 大高明史, 野原精一, 福井 学, 菊地義昭, 尾瀬アカシボ研究グループ, 2006: 尾瀬ヶ原のアカシボ現象に関する研究—赤雪の垂直分布と藻類との関わり—。陸水学雑誌, **67** (3), 209-217.

Snow algae at the summit of Mt. Ibuki, Shiga-Prefecture, Japan

Nozomu TAKEUCHI^{1)*}, Sakie SUMIKAWA²⁾ and Kyoko MUTO²⁾

*1) Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Chiba University,
1-33, Yayoicho, Inageku, Chiba-city, Chiba, 263-8522*

**Corresponding author*

*2) Nishibori Exploration Museum,
419, Yokomizochō, Higashiomi-city, Shiga, 527-0135*

Abstract: Snow algae at the summit of Mt. Ibuki, Shiga Prefecture, Japan, were investigated in the spring of 2005, 2007, 2008, and 2010. Although red or green snow surfaces were not visible, a microscopic analysis revealed that the snow on the surface mainly contained two morphological types of algal cells (Chlorophyta). Both these algal cell types are most likely to be *Chloromonas nivalis*. The algal volume biomass and chlorophyll a concentration were significantly lower than those reported in the case of red-colored snow in Japan or North America. Observations revealed that the algae appeared on the snow surface in late April, only 1-2 weeks before the disappearance of the snow patch at the summit, even though snow thawing, which is one of the essential processes required for algal growth, started in the middle of March. The snow algae of Mt. Ibuki possibly remain dormant on the soil during summer, autumn, and winter, and appear on the snow surface in late April for approximately a week.

(2011 年 4 月 5 日受付, 2011 年 5 月 23 日改稿受付, 2011 年 6 月 30 日最終改稿受付,
2011 年 6 月 30 日受理, 討論期限 2012 年 3 月 15 日)