

# とやまと自然

第47巻 春の号

No.184 2024

立山の赤い雪のひみつ

中島 ともみ 智美 (とやまし 富山市科学博物館ボランティア)



あらわ 残雪期に現れた立山の赤雪 あかゆき

2022年7月3日撮影 さつえい

# 立山の赤い雪のひみつ

中島 智美

## 1. はじめに

皆さんは雪の色としてどんな色を思い浮かべますか。白い雪や少し汚れた黒い雪を想像する人が多いのではないのでしょうか。初夏の頃、高い山の雪原を歩いて足元をよく観察してみると、雪がほんのり赤く色づいているところがあることに気がつくかもしれません（表紙写真）。実はこの赤い雪は単なる汚れではなく、地球環境にも影響を及ぼす可能性を秘めている特別な雪なのです。この赤い色のついた雪が何なのか探ってみることにしましょう。

## 2. 赤雪とは

赤い雪は、その見た目のとおり赤雪と呼ばれています。赤雪は、寒冷な極地や春や夏まで積雪が残っているような国内外の標高が高い山岳地域でよく見られます。赤雪はかすかに、スイカの香りがすることから、英語ではウォーターメロンスノー（スイカ雪）と呼ばれることもあります。

赤雪は、一個体では目には見えないくらい小さな生き物である藻類という微生物が雪の上で繁殖することによって発生します（図1）。藻類は、一般に池や海など、水があるところに生息している生物です。海でしばしばみられる赤潮も藻類の大繁殖によって引き起こされる、赤雪と似たようなメカニズムの自然現象です。雪氷上の低温環境で繁殖する

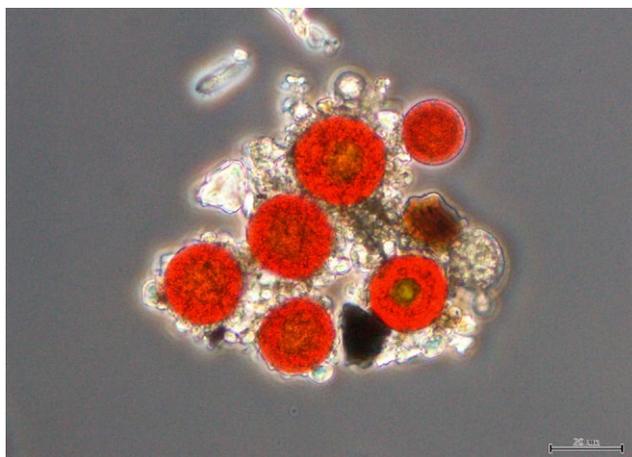


図1. 赤雪をつくる雪氷藻類。

藻類の仲間は、一般的に雪氷藻類または氷雪藻と呼ばれています。雪氷藻類は、その名のとおり冷たい雪や氷の上でしか繁殖できません。

雪氷藻類と一言で言っても、その仲間に入る種は100種以上の報告があります。赤雪を作る雪氷藻類は、分類学的には主に緑色植物門緑藻綱のサンゲイナ属やクロロモナス属と呼ばれるグループに入っており、ほとんどは一つの細胞でできている単細胞生物です。雪氷藻類には、他にも雪が黄色に見える種（黄金色藻）、氷の上で繁殖して黒い泥だんごを作る種（藍藻）などもあります。

赤雪を作る雪氷藻類が、どこから雪面に来るとかは、まだ詳しくわかっていません。しかし、主に二つのルートがあると考えられています。一つは積もった雪の下の土の表面から雪の粒の周りがあるとけた水を泳いで雪面にたどり着いて繁殖するルート、もう一つは大気から藻類の胞子が降ってきて雪面で繁殖するルートです。

## 3. 雪氷藻類の赤い色

赤雪を作る雪氷藻類は、なぜ赤い色をしているのでしょうか。それには「色素」という色をもっている物質が関わってきます。雪氷藻類は私たちがよく見かけるアサガオやサクラなどの植物と同じく、光合成をする生物です。そのため雪氷藻類は、繁殖に必要な光エネルギーを受けるための色素を体内にもっています。赤雪を作る雪氷藻類がもつ代表的な色素を、表1にまとめました。雪氷藻類がもつ色素は、主にクロロフィルとカロテノイドと呼ばれる種類に分けられます。クロロフィルは緑色の色素でクロロフィルaやクロロフィルbなどに細かく10種類ほどに分けられ、種類によって機能が異なります。植物の葉が緑色であるのは、クロロフィルの色によるものです。クロロフィルaは、光合成の反応中心となる重要な色素で、光合成を行う生物であれば必ずもっています。

カロテノイドは、β-カロテンやルテインなど、さらに150種類ほどに分けられ、種類によって体内で果たす機能が異なります。色は、黄色やオレンジ色、赤色です。赤雪を作る雪氷藻類が多くもっているのは、アスタキサンチンという赤色のカロテノイドです。光合成をする生物にとって太陽光は必要なものですが、あまりにも強すぎると体に害になります。アスタキサンチンは強すぎる光から体を守る役割があると考えられています。

雪氷藻類は様々な色素を体内にもっていますが、どの色素を多くもっているかによって体全体の色が異なり、それにより雪の色も変化します。赤色の色素を多くもっている藻類が繁殖すれば雪は赤色に、緑色の色素を多くもっている藻類が繁殖すれば雪は緑色になります。緑色の雪は緑雪と呼ばれ、主に森の中で見ることができます。赤雪や緑雪の他にも黄色雪などがあります。

藻類の体に含まれる色素は、積もった雪の上の環境によって変化すると考えられています。藻類はクロロフィルをもともともっていますが、悪条件になるとカロテノイドを新たに合成します。雪表面の栄養分がたくさんあり、光の強さがちょうどよい場合、カロテノイドよりもクロロフィルを多くもち、光合成をたくさんする藻類が繁殖するため、緑雪が現れます。一方、雪表面の栄養分が少ないときや光が強すぎる場合、藻類はお休みの状態（休眠）になりクロロフィルよりもカロテノイドを多くもつようになるので、赤雪が現れます。

藻類の種によっても体に含まれる色素が異なり、積雪の色が異なることがあります。カロテノイド色素を多く合成する藻類は、赤色やオレンジ色の体

になり赤雪を作りますが、カロテノイド色素をあまり合成しない藻類であればクロロフィルの色の緑色の体になり緑雪を作ります。

#### 4. 赤雪と地球環境

私は現在、富山市科学博物館でボランティアをしています。大学生のときは赤雪を研究していました。そのきっかけは大学での授業でした。大学では地球科学を専門に勉強しており、ある授業の中で、ジェームズ・ラブロック博士が提唱したガイア仮説を学びました。ガイア仮説とは、地球と生物がお互いに影響しあい、地球がまるでひとつの生き物のように自己調整機能をもつというものです。自己調整機能とは、例えば人間が風邪を引いたとき病原体を体内でやっつけるために熱を出すように、地球も大気や気温のバランスが崩れたときには温暖化や異常気象を引き起こすイメージです。また地球にすむ生物は地球環境に一方的に影響されるのではなく、環境に応じて進化し、自らも環境を調整して、地球とお互いに関わり合うことで安定した環境を維持しています。私はこの初めて聞く考え方に当時とても大きな衝撃を受けました。

地球上で雪と氷に覆われた場所のことを、雪氷圏といいます。雪氷圏は冷たく何も生物が存在しない世界だと思える人も多いかと思いますが、実は雪氷の環境に合った生物（雪氷生物）がすんでいます。雪氷生物は、地球の気候システムにも影響を及ぼす力をもっています。雪や氷は白く、太陽の光をよく反射します。晴れた日にスキーをしていて日焼けした経験があるかもしれませんね。しかしながら、赤雪のように雪氷上で生物が繁殖

表1. 雪氷藻類がもつ代表的な色素とその機能。

色素の種類 (色)	色素名	機能
クロロフィル (緑色)	クロロフィル a	光合成の反応中心
	クロロフィル b	光合成を行うために光を集める
カロテノイド (黄色～赤色)	β-カロテン	害となる活性酸素の発生を防ぐ
	ルテイン	光合成を行うために光を集める
	アスタキサンチン	強い日射から体内の DNA を守る

し、白い雪氷が汚れると、太陽の光を吸収し雪氷が解けやすくなります。雪氷が解けると、雪氷が存在していた時に比べて太陽の光を反射する量が少なく、より光を吸収してしまい地球は暖かくなるのです。私はこのような雪氷生物と地球環境との相互作用に興味をもちました。また雪氷生物の研究はこれまで限られたものしかなく、未知の分野であることにも魅力を感じていました。そして大学4年生のとき、当時一番人気であった研究室(千葉大学理学部地球科学科 生物地球化学研究室)に念願かなって入ることができ、赤雪をテーマに研究をしてきました。調査対象は、日本国内の山岳地域に積もった雪や海外の氷河の雪でした。中でも富山県の立山連峰は、アクセスしやすく、赤雪がよく現れるので毎年調査に行っていました。ここからは、立山で見られる赤雪について、私自身が学生の頃に研究した成果を交えて解説します。

## 5. 立山の赤雪

富山県の東部にそびえる立山連峰は、世界でも有数の豪雪地帯です。立山連峰には富山県立山町と長野県大町市を結ぶ、立山黒部アルペンルートという観光ルートがあります。立山黒部アルペンルートで最も標高が高く、立山登山の玄関口である室堂平(標高2,450m)では、春先には「雪の大谷」と呼ばれる高さ10mを超える厚く積もった雪の壁を誰でも気軽に見ることができます。富山県の平野部では積雪が1mを超えることがほとんどないので、室堂平での積雪がいかに多いかがわかりますね。室堂平は例年10月頃には初雪が降ります。冬に降った雪は、翌年の7月頃までは解けずに残っています。

立山では、例年6月から7月にかけて室堂平周辺で赤雪を見ることができます。赤雪は通常、数cm四方のパッチ状に現れることが多いですが、年によっては非常に広範囲に現れることもあります。

## 6. 立山の赤雪の分布と藻類種

雪氷藻類の繁殖によって色づく雪の色は、環境条件や藻類の種の違いによって変化しますが、いつどこでどんな雪氷藻類が繁殖するのかはまだよ

くわかっていませんでした。そこで私は、毎年赤雪が現れる立山の室堂平で、赤雪の色の違いと赤雪を作る藻類の種の違いを調べることで、赤雪がどのように発生するのかを明らかにするための研究に取り組みました。赤雪サンプルは、2015年6～7月と2016年6月に立山の7地点で合計54サンプル採取しました。赤雪が多く現れていた地点では、多くのサンプルを採取しており、地点によってサンプル数に偏りがあります。サンプルは解けないように研究室に持ち帰り、藻類を顕微鏡で観察したり、色の成分やDNAを調べたりしました。

### 6.1 顕微鏡で藻類の形と色を調べる

光学顕微鏡を使って、解かした赤雪のサンプルにどのような藻類が含まれているか観察しました。その結果、色と形の異なる様々な藻類が含まれていることがわかりました。藻類は色と形から7つのタイプに分けられました(図2)。確認できたのは、球形と楕円形の藻類でした。さらに、球形の藻類には、赤色、オレンジ色、緑色の3色があり、楕円形の藻類には、赤色、オレンジ色、緑色に加え、黄色の4色がありました。7タイプの藻類の色と形の割合は、サンプルごとに異なっていました。球-赤、球-オレンジ、球-緑、楕円-緑の各タイプは、採取したサンプルの多くに含まれていました。一方で楕円-赤、楕円-オレンジ、楕円-黄の各タイプは、特定の場所で採取したサンプルにのみ含まれていました。なお、藻類の色と形は、違う種でもそっくりな場合があります。そのため、今回7タイプがみつかったとはいえ、そのまま「7種類の藻類がいた!」と考えることはできないのです。何種類になるかは、DNAを調べる必要があります。DNAの分析は、6.3節でお話します。

### 6.2 色の成分を調べる(色素の分析)

採取した赤雪サンプルが同じ色なのか違う色なのかを調べるために、どのような色素がどのくらい含まれているかを分析しました。解かした赤雪サンプルをHPLC(High Performance Liquid Chromatography: 高速液体クロマトグラフィー)という分析装置にかけました。HPLCは1つのサ

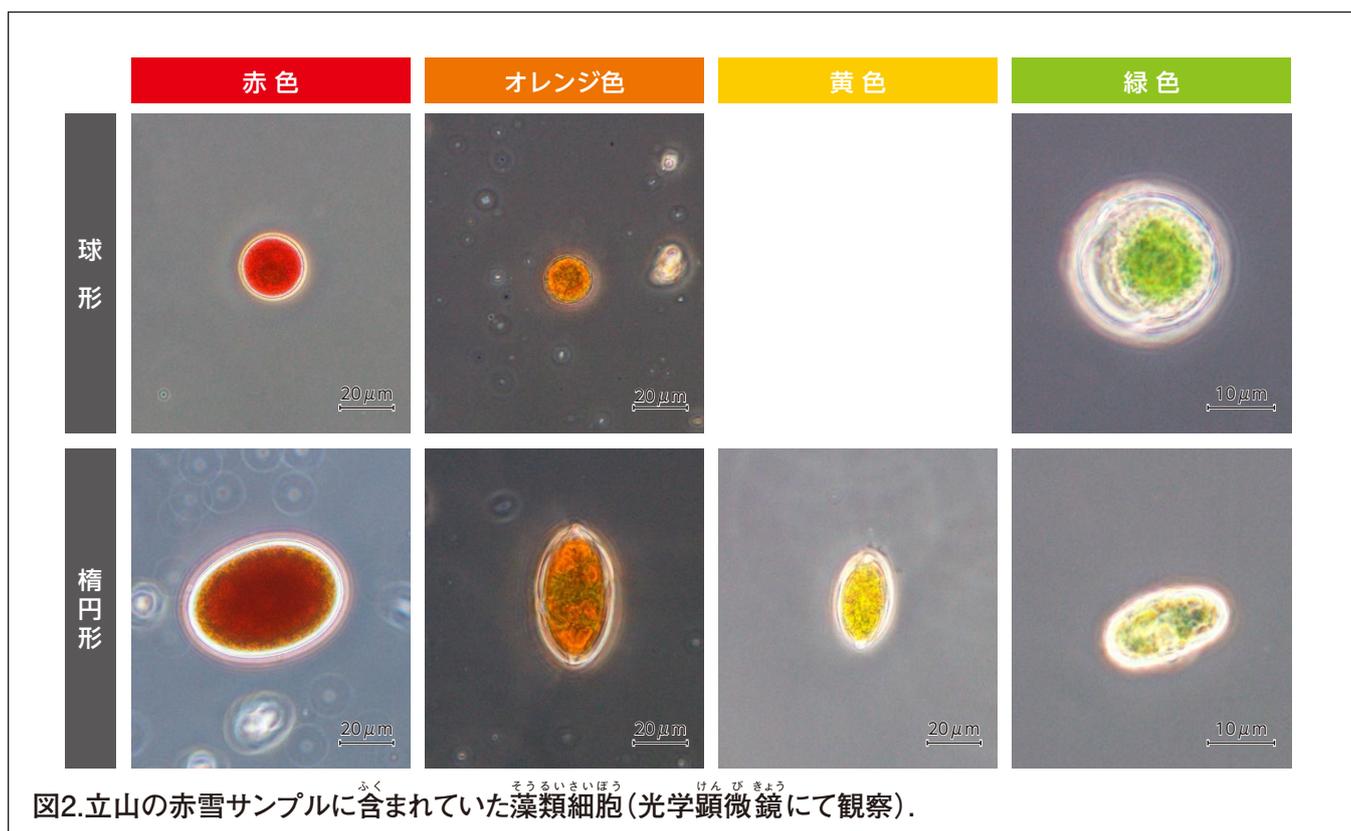


図2.立山の赤雪サンプルに含まれていた藻類細胞(光学顕微鏡にて観察).

サンプルの中に含まれている様々な色素(色の成分)をバラバラに分離し、色素の種類ごとに量を測ることができる装置で、人間の目では区別できない微妙な色の違いを調べることができます。分析を行った結果、サンプルには2種類のクロロフィルと6種類のカロテノイドが含まれていることがわかりました。6種類のカロテノイド類の色素のうち、3種類は赤い色素であるアスタキサンチンでした。この3種類は、ほぼ同じ赤色ですが、色素の形(分子構造)が違うので区別しました。体内のアスタキサンチンは、アスタキサンチンだけで存在するよりも、脂肪酸という油を構成する物質とくっつくことで安定して存在できると言われています。この3種類はアスタキサンチンだけで存在しているか、脂肪酸と1つもしくは2つと結合しているかの違いです。

立山で採取した全54サンプルの分析結果を比べてところ、それぞれの色素量の割合の違いによってタイプA~Dの4種類にわけることができました(図3)。タイプAはアスタキサンチンが多く含まれているもの、タイプBはアスタキサンチンが比較的少ないものでした。タイプAとBのアスタキサンチンは、1つの脂肪酸とくっついたアスタキサンチンで

した。タイプCは脂肪酸がくっついていないアスタキサンチンとルテインが多いもの、タイプDは2つの脂肪酸とくっついたアスタキサンチンが多く含まれていました。本稿では簡単に、タイプAを「濃い赤色型」、タイプBを「薄い赤色型」、タイプCを「やや黄色型」、タイプDを「紅色型」と名付けましょう(肉眼では色の違いはほぼわかりません)。

表2は、サンプルを採った場所ごとに、色のタイプの数をまとめたものです。濃い赤色型と薄い赤色型は、立山室堂平周辺の広範囲に現れる一方で、やや黄色型と紅色型は、それぞれ室堂平と室堂山の限られた地点でのみ現れることがわかりました。このように、一見同じように見える赤雪でも、場所によって色のタイプが異なることがわかりました。では、なぜこのような違いがあるのでしょうか。それは次の章でお話するDNA分析です。

### 6.3 DNAを調べる

立山の赤雪にはどのような種類の藻類が含まれているのか、色と形だけでは見分けられない種の違いを調べるため、DNAの分析を行いました。DNAはすべての生物がもっている遺伝情報を担う物質

表2.採取場所の色のタイプ数.

採取場所名	標高 (m)	色のタイプ				合計
		濃い赤色型	薄い赤色型	やや黄色型	紅色型	
ハマグリ雪渓	2,720	2	0	0	0	2
室堂山	2,670	4	1	0	1	6
内蔵助雪渓	2,650	3	0	0	0	3
室堂平	2,450	0	3	2	0	5
雷鳥荘斜面	2,360	0	4	0	0	4
称名川沿い	2,350	2	3	0	0	5
雷鳥沢	2,300	12	17	0	0	29
合計		23	28	2	1	54

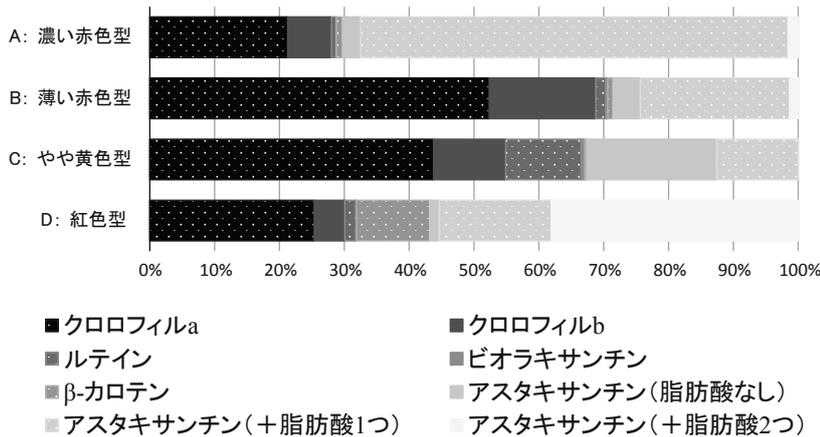


図3.4つの色のタイプに含まれる色素.

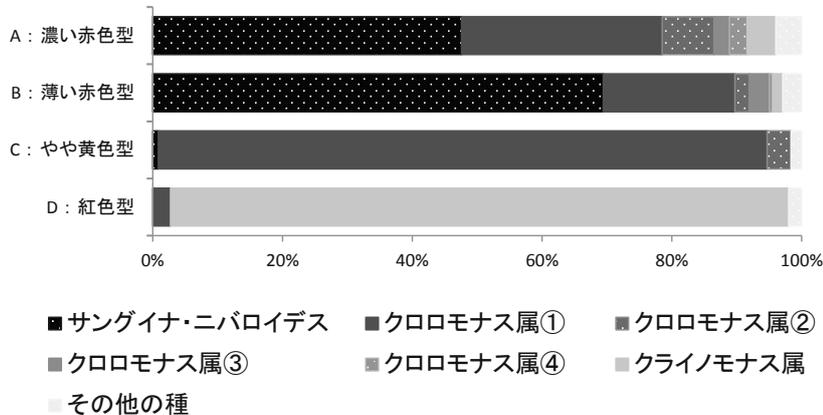


図4.4つの色のタイプに含まれる藻類種の割合.

で、2本の鎖が絡まった二重らせん構造になっています。遺伝情報はその鎖に沿って4種類の「塩基」という物質が順番に配列することで保存されています。この4種類の塩基の配列を読むことによって、色や形に惑わされず生物の種を見分けることができます。DNA分析の際には、まず藻類のDNAのコピーを増やすPCRという作業を行います。PCRは、コロナウイルスの検査手法としてもよく聞くのではないかと思います。PCRの次に、電気泳動という方法で実際に目的のDNAが増えたかどうかを確認します。DNAがうまく増えていたら、次世代シーケンサーという機械をつかって、配列を読み取ります。DNAが増えていないと最初の作業からやり直さなければならないので、電気泳動の作業を行うときはいつも緊張の瞬間でした。たくさんのサンプルを、分析がうまくいくまで何回も

繰り返し作業を行ったため、毎日朝早くから夜遅くまで研究室に張り付き、とても大変な思いをしましたが、最終的にDNA配列を読むことができたときは達成感がありました。

採取したすべてのサンプルに含まれている藻類のDNA分析を行い、読んだ配列を仲間わけしたところ、687種類に分けることができました。これは、立山の赤雪には687種もの藻類が含まれていると言い換えることもできます。こんなに多くの種がいるとは、色と形だけで7タイプしか分けられなかったことを考えると、驚くべきことです。ただし、PCRではごくわずかな数の細胞でもDNAを増やすことができるので、この中にはたまたま雪の上に風で飛んできたものなど、雪の上で繁殖しているわけではない(赤雪とあまり関係のない)藻類も多く含まれている可能性があります。この中で実際に繁殖している(赤雪を作る)藻類種を特定するには、数が多く入っている配列や以前どこか別の場所で赤雪を作ると報告されている藻類に一致する配列を探す必要があります。まずは、配列の一部をつかって藻類の大きな分類群を確認したところ、687種のうち99.9%以上は緑藻に分類されることがわかりました。緑藻は赤雪を作ることがすでにわかっている藻類のグループです。分析した赤雪中に各配列が検出された数を比較すると、実際に繁殖している種はこの中の6種に絞られることがわかりました。その中で、もっとも数の多かった配列がサングイナ・ニバロイデスでした。この種は、世界各地の赤雪の藻類として知られています。立山の赤雪に含まれる主な藻類種は、北極や南極で見られる赤雪の種と同じであることがわかりました。次に数が

多かった種はクロロモナス属の一種でした。この種は、ヨーロッパや日本国内で赤雪を作る藻類といわれている種と近い種でした。残りの3種も、クロロモナス属の一種でしたが、2番目に多かった種とは別種でした。残りの1種は、クライノモナス属の一種で、特定の地域でのみ見つかる種でした。

さらに色素構成が異なった4タイプについて、どの種がどれくらい含まれているのか比較したところ、図4のようになりました。どの色素タイプにおいても、サングイナ・ニバロイデス、クロロモナス属、クライノモナス属の種が全体の95%以上を占めていました。濃い赤色型と薄い赤色型はサングイナ・ニバロイデスが多く含まれているのに対し、やや黄色型はクロロモナス属、紅色型はクライノモナス属が多く含まれました。このことは、濃い赤色型と薄い赤色型は同じ藻類の種が作っているが、やや黄色型と紅色型は別の種の藻類が作っているということを示しています。

#### 6.4 研究でわかったこと

今回の調査で明らかになったことは、立山の赤雪と一言でいっても、色がすべて同じではなく4タイプもあることです(表3)。論文の中では述べていませんが、各タイプは色だけでなく、藻類の色や形の構成比も異なっていました。濃い赤色型では球-赤と球-緑、薄い赤色型では球-オレンジと球-緑、やや黄色型では楕円-オレンジ、紅色型では楕円-赤の藻類がそれぞれ多く含まれていました。色のタイプの濃い赤色型と薄い赤色型は立山の広範囲で現れた一方で、やや黄色型と紅色型は局所的に現れました。さらに濃い赤色型と薄い赤色型

表3.立山の赤雪のタイプまとめ。

色タイプ	現れた地点数 (7地点中)	現れた場所	サンプル数	赤雪を作る藻類の種
濃い赤色型	5地点	立山全域	23	サングイナ・ニバロイデス
薄い赤色型	5地点	立山全域	28	サングイナ・ニバロイデス
やや黄色型	1地点	室堂平	2	クロロモナス属の一種
紅色型	1地点	室堂山	1	クライノモナス属の一種

を作る種はどちらもサンゲイナ・ニバロイデスという種であるのに対し、やや黄色型を作る種はクロロモナス属、紅色型を作る種はクライノモナス属の藻類と、それぞれ異なっていました。

南極や北極などの赤雪との共通種であるサンゲイナ・ニバロイデスは、おそらく胞子が大気中を舞うことで世界中に広がっており、立山の雪に落ちたものが繁殖して赤雪になったものと考えられます。色素タイプが濃い赤色型か薄い赤色型のどちらになるかは、ちょっとした雪の環境の違いが原因であると考えられます。

クロロモナス属の藻類は、サンゲイナ・ニバロイデスが多く含まれている赤雪にも含まれており、立山の赤雪で広く存在する種でした。クロロモナス属の藻類は世界各地にいますが、地域ごとに種が違います。地域内で広がるクロロモナス属の藻類が多く含まれる赤雪では、やや黄色型という濃い赤色型や薄い赤色型と異なる色の赤雪になると考えられます。

なぜ立山で4タイプの赤雪が現れるのかその理由を知るためには、藻類のどの種がどのように雪の上で繁殖しているか、雪の上の環境がどのように違うのかを調べて理解する必要があります、さらに研究を行う必要があります。

## 7. 雪氷生物の面白さ

今回紹介した研究から、立山の赤雪は多様な藻類によって引き起こされていること、色素タイプも場所によって異なることがわかりました。一見何も生物がいなさそうな積雪に、多様性に富んだ藻類が存在すること、立山の室堂平周辺という比較的狭いエリアで、4タイプの赤雪が存在することには驚きました。さらに、立山にいる藻類には地域内で広がる種の他、立山から遠く離れた南極やヨーロッパにいる種と共通の種の藻類がいることも不思議だと思いませんか。私たちが住む富山県に、このようなおもしろい世界があることを知ってもらえたら嬉しい限りです。

雪氷の世界には、雪氷藻類の他にも多くの低温環境に適した生き物たちがいることが明らかになっています。例えば、積もった雪の上にすむセッケイ

カワゲラという昆虫がいます。セッケイカワゲラは、雪の上で藻類を食べて生活しています。このように、近年では雪氷上に食う、食われる関係をもった生物の食物連鎖があること、これらの生物による雪氷生態系が成立していることもわかってきました。雪氷生物についてさらに詳しく知りたい人は、竹内望、植竹淳、幸島司郎著『雪と氷にすむ生きものたち』(丸善出版、2023年)をおすすめします。

現在、進む地球温暖化は、高い山の雪や極地の氷河の状況を大きく変化させています。このような状況下では、将来雪氷生物が見られなくなる可能性があります。雪氷生物がなぜそこにいるのか、雪氷生物が地球環境にどのような影響を与えるのか等々、まだわからないことだらけです。小さな雪氷生物を研究することで、地球環境の変化の理解や地球外生物の発見にもつながることが期待されています。したがって、今しっかりと現地で観察し、研究することはとても重要なことなのです。皆さんも興味をもったらぜひ調べてみてください。

## 謝辞

本稿の執筆にあたり、千葉大学の竹内望教授には有益なコメントをいただきました。カルデラ砂防博物館の飯田肇氏には赤雪調査にご協力いただきました。お礼を申し上げます。

## 引用文献

Nakashima T, Uetake J, Segawa T, Procházková L, Tsushima A and Takeuchi N (2021) Spatial and Temporal Variations in Pigment and Species Compositions of Snow Algae on Mt. Tateyama in Toyama Prefecture, Japan. *Front. Plant Sci.* 12 : 689119. doi: 10.3389/fpls.2021.689119

