

雪に宿る生命：雪氷藻類

竹 内 望

(千葉大学)

はじめに

雪に覆われた広大な地に立つと、その限りなく純粋に近い白い色の美しさに圧倒される。その白さは反面、生命の存在が許されない非情な冷たい色にも見える。白色は雪氷の世界を象徴する色であり、一切の汚れのない純潔さ、生物を寄せ付けない厳しさを表す色でもある。しかし、雪は時として白ではない異常な色を見せることがある。例えば、今年（2012年）私が訪れたグリーンランドの氷河では、雪は完全な白ではなく所々赤く染まっていた。赤雪と呼ばれる現象である。この雪を赤く染めるものの正体は、雪氷藻類と呼ばれる微生物である。大きさ50分の1ミリほどの小さな赤い細胞が、表面の雪粒にまぎれて大量に繁殖し雪を赤く染めているのである（写真1）。

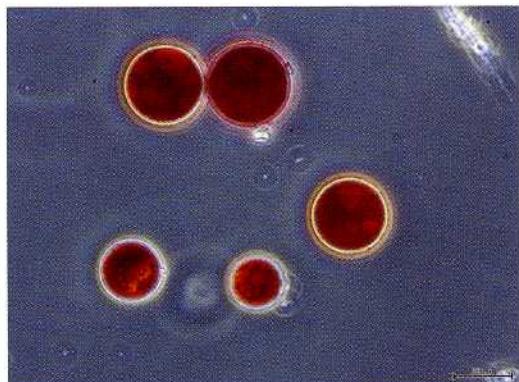


写真 1. 赤雪の雪氷藻類 *Chlamydomonas nivalis* の顕微鏡写真（グリーンランド）

低温、強い紫外線、ほとんどない栄養分という、一般常識からすれば雪の表面は生命にとって厳しすぎる環境である。しかし、グリーンランドだけではなく、南極やヒマラヤ、日本の雪渓まで、世界各地の雪氷には驚くほどたくさんの微生物が繁殖していることが最近わかつってきた。この雪氷藻類という微生物は、いったいどんな生物なのか、なぜそんな所に生きているのだろうか。ここでは、雪氷藻類の発見の歴史をたどりながら、雪に宿る不思議なこの生物について紹介する。

北極探検と雪氷藻類の発見

雪氷藻類が発見されたのは、意外と古く19世紀の初め、今から約200年前のことである。19世紀と言えば、人類が未踏の北極に果敢に挑んだ時代である。雪氷藻類の発見は、その探検史の幕開けとなる記念すべき最初の航海のことであった。ヨーロッパ中を巻き込んだナポレオン戦争が終結したのが1815年、その後、力を持て余していた英國海軍が北西航路の開拓に目を向けて北極探検が始まる。1818年、グリーンランド周辺の海氷が減少傾向にあるという捕鯨船から情報を受けて、イギリス海軍中佐ジョン・ロス（1777-1856）は、海軍省から最初の北西航路の探検を命じられる。4月にロンドンを出航したイザベラ号とアレクサンダー号の2艦は、グリーンランド

西方のバ芬ン湾を北上し、8月末に北西航路の入り口、ランカスター海峡にたどり着く。しかし、ジョン・ロスはここで蜃気楼をみて海峡の先が行き止まりだという誤った判断して引き返してしまう。北西航路の発見はできなかったものの、航海の途中、ジョン・ロスは極北の様々な珍しい生物や鉱物を記録し、たくさんの標本を持ち帰った。その中の一つが赤雪である。

ジョン・ロスが赤雪を発見したのは、グリーンランド北西部のヨーク岬から北西にのびる海岸線に沿って航行中のことであった。その位置は、冷戦時代に有名になった米国チューレ基地のすぐ南側の海岸になる。その海岸は、高さ約200mの崖が約12kmにわたって続いている。その崖のガリーに残ったいく筋もの雪渓が、真っ赤に染まっていたのである。この赤雪の発見から、この崖にはクリムソン・クリフ（深紅の崖）という名前をつける。ジョン・ロスは、早速ボートを出して、その赤雪の正体を探ろうと試みる。その時の記録「A Voyage of Discovery」の文章からは、彼の赤雪への非常に強い興味がうかがえる。特に、クリムソン・クリフと題した崖沿いの赤く染まっ

た雪を美しく描いたスケッチは見事である（図1）。しかし、当然のことながら初めて見る赤雪の原因是、この時はまだ全くわからない。この周辺を飛びまわっているたくさんの鳥の糞とも考えたが、実際の糞はそんな色はしていない。赤いものの正体はいったいなんなのか、記録にはそれを探るために行った試行錯誤が書かれている。赤雪を採取し解かすと、濁ったポートワインのような水になり、しばらくすると赤い小さな粒状のものが沈殿した。その沈殿物を倍率110倍の顕微鏡で観察したところ、粒は透明な膜に覆われた球で、その膜の中に赤い物質が含まれていることがわかった。赤い物質は油のようなもので、水には溶けないが、蒸留酒にはよく溶けた。赤い色は水を沸騰させても消えることはなく、さらに蒸発させると赤い油のような物質が残り、アンモニア臭がした。最初に考えたこの赤い粒の正体は、波で雪面に打ち上げられた小さなエビの卵であった。グリーンランド周辺には確かにエビが大量にいる。しかし、それにしては波の届かない内陸地まで分布しているし、赤雪中にその抜け殻のようなものは見当たらない。誰もはっきり

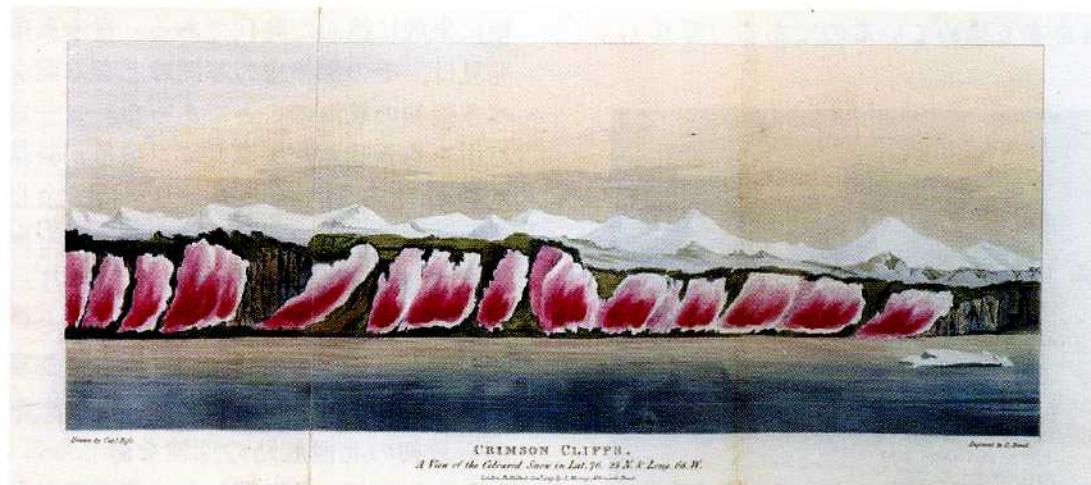


図1. 1818年、北極探検中、英國海軍中佐ジョン・ロスがみた、グリーンランド北西部クリムソン・クリフの赤雪
(*A Voyage of Discovery*, 1819)

とした結論は出せなかつたが、おそらく崖の上に繁茂していた植物に由来する物質ではないかと考えたのである。

ジョン・ロスは、その年の11月半ばに採取した赤雪とともに本国へ帰国する。赤雪という珍しい現象は人々の興味を誘つたのか、その発見は当時の新聞ロンドン・タイムズにも掲載されるほどであった（1818年12月4日号）。持ち帰られた極北の未知の物体である赤雪は、その後、様々な専門家の手にわたり、その正体の探求が行われた。しかしながら、それが雪氷藻類という微生物であるとわかるまでには、かなり時間を要することになる。まず分析を行つたのは、二人の植物学者、ロバート・ブラウンとフランシス・パウラーである。二人は、ジョン・ロスが持ち帰った大量の植物サンプルの鑑定を行つてゐた。しかし、この未知の生物に対しては、両者で全く異なる分類結果になつたのである。まずブラウンは、顕微鏡による形態観察の結果、この赤雪は紅藻のチノリモ（*Porphyridium*）の仲間ではないかと考えた。紅藻はテングサなどの海産性の大型藻類を含む赤い藻類の仲間で、その中のチノリモは淡水性の单細胞性藻類のグループである。赤い色はフィコビリンタンパク質という物質のため、これは特定の光の波長のエネルギーを集める機能がある。一方パウラーは、この赤雪はサビ菌類という植物の葉に寄生する菌類（キノコ・カビの仲間）の一種であると結論づけた。そのサビ菌の胞子がちょうどよく似た赤い球形をしてからである。パウラーは、この赤雪に新種として *Uredo nivalis* という学名をつける。その属名 *Uredo* は既存のサビ菌類の名称で、種名 *nivalis* は雪を意味する。

丁度そのころ、白い石灰岩が赤くなる現象がみつかり、それは石灰岩上で繁殖する

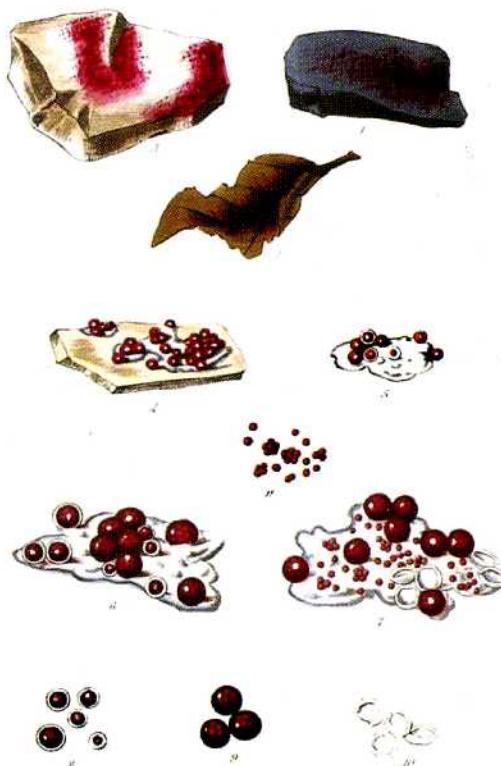


図2. 赤雪の藻類によく似た石灰岩上の藻類
(Scotish floraより)

新種の赤い藻類（地衣類）であることが発見された（図2）。植物学者ランゲルによって発見されたその藻類は、学名 *Lepraria hermesina* と名付けられた。赤雪のサンプルの顕微鏡観察をしていたまた別のスウェーデンの植物学者アガードは、この石灰岩の上で見つかった藻類の報告を見た時、赤雪の形態によく似ていることに気がつく。パウラーによる赤雪が菌類であるとの判断に、アガードは疑問をもっていたのである。パウラーが報告したサビ菌類に特有の糸状の柄が、アガードの観察する赤雪の中に全く見つかなかったからである。そこでアガードは、赤雪はこの石灰岩の上で繁殖した藻類が、雨で流されて雪の上にたまつたものではないか、と考えたのである、アガードが出した結論は、赤雪は菌類ではなく藻類であること、*Uredo nivalis* と

Lepraria kermesina は同じものであること、というものだった。その後も、赤雪は菌類なのか藻類なのか、という問題に多くの学者が関心を寄せた。しばらくの論争を経た後、最終的にはアガードの主張した藻類に決着する。赤雪の藻類は、石灰岩上の藻類が流れてたまつたものかというと、実はそうではないこともわかつてきた。その藻類は石灰岩に強く付着していて、そう簡単にそこから離れることはなかったからである。そこで赤雪は、雪の上で繁殖する藻類であると考えられるようになり、このとき雪の上で繁殖する雪氷藻類の存在がはじめて認知される。アガードはこの藻類に、*Protococcus nivalis* という学名をつける。20世紀に入ると藻類学者ウィレによって、赤雪の藻類の詳しい分析が行われた結果、紅藻ではなく緑藻の仲間であることが判明し、*Chlamydomonas nivalis* となった。この種は現在、赤雪の藻類として最も一般的な種として知られている。

雪氷藻類はどこからくるのか？

北極探検とともに一躍有名となった雪氷藻類であったが、その後は意外にも注目されることは少なく、その発見から20世紀の後半までの約150年以上の間、わずかな研究者が分類的な研究をする程度で、その藻類がどのような生態をもつかなどは謎のままであった。これほど不思議な生物の存在が明らかになったのに、なぜ生態的な研究が進まなかったのか、その理由の一つは、赤雪がいつどこでも見られるわけではないことかもしれない。赤雪が出現するのは、春から夏の融雪期である。雪氷藻類の繁殖には、液体の水が必要なので、氷点下で雪が解けることのない真冬に繁殖することはない。しかしながら、雪が解ければ必ず赤雪が現れるかというと、そうでもない

のである。事実、日本の雪渓にも赤雪が現れるが、それは高山帯の積雪など、ごく限られた場所でのみである。極地や高山の限られた時間と場所でしか見られない赤雪は、人々の目に留まることも少なく、研究が進まなかったのかもしれない。赤雪は一体いつどんなところに現れるのか、そのことを理解するには、赤雪の藻類の細胞がどこから雪面に来るのか、どのように繁殖するのか、を明らかにしなくてはならない。

これらの謎は現在も完全に理解されたわけではないが、雪氷藻類の生態については、20世紀後半から少しずつわかつてきた。雪氷藻類は、一般の藻類同様に繁殖と休眠をくりかえす生活史をもち、繁殖段階に合わせて自分の細胞の姿を大きく変える。周囲の環境が繁殖に適さない時は休眠状態となり、細胞は休眠胞子と呼ばれる細胞膜の厚い大きい球形ものになる。環境が繁殖に適した状態になると、休眠胞子は栄養細胞となり無性生殖による細胞分裂を開始する。この細胞は、鞭毛で遊泳が可能な小型の楕円形のものである。雪面の雪氷藻類がどこから来たかについての一つの説は、もともと雪の下の地面で休眠していた藻類細胞が、雪解け水によって休眠から目を覚まし、解け水をつたって泳いで上がってくるというものである。藻類細胞は雪の表面に到達したのち、日射を受けながら大繁殖し赤雪になる。たしかに、赤雪がみられるのは融解期、ある程度積雪の深さが浅い場所で、さらに含水率が高いところが多い。しかしながら、中には積雪深が数メートル以上の雪面にも、赤雪がみられることがある。小さな藻類細胞が下から泳いで表面に到達するにはあまりにも深すぎる。そこで藻類が雪面に現れるもうひとつの説は、大気を介して飛んでくるというものである。休眠胞子は風に飛ばされるくらい十分に小さ

く、長期間乾燥にも耐えることができる。赤雪が解けて消滅後、地面に残った雪氷藻類の休眠胞子のいくつかは、風に巻き上げられることがあるだろう。胞子は、大きな大気循環によって世界に分散し、再び運よく雪面に降下したものが、雪面で繁殖し赤雪を形成するのかもしれない。しかし、大気循環によって世界中に分散しているならば、すべての雪面に赤雪が現れてもおかしくはないが、実際は限られた場所でしか赤雪は見ることはできない。また、まだ誰も雪の中を泳ぐ藻類や、大気中を飛んでいる胞子を確認したことではなく、藻類が実際にどのように雪面に現れるのかは、大きな謎のままなのである。

雪氷藻類の赤い色の正体と多様性

ジョン・ロスが船上で油のような物質とした赤雪の赤い成分については、いろいろなことがわかってきてている。はじめは紅藻の仲間ではないかと考えられた赤雪であるが、この赤い物質は紅藻の赤い成分であるフィコビリントンパク質とはまったく別の物質だったのである。赤雪の赤い成分は、カロチノイドの一種アスタキサンチンと呼ばれる物質である。最近、アスタキサンチンという言葉は、身近なところでも耳にするようになった。ここ数年、化粧品やサプリメントに使われるようになったからである。アスタキサンチンは、強い抗酸化作用があり、生体内で発生する活性酸素を除去する効果をもつとされている。雪氷藻類がこのアスタキサンチンを生成するのは、紫外線から身をまもるためにだと考えられている。丁度日焼け止めのような役割である。実際、紫外線が強ければ強いほど、藻類はこの物質を生成して赤くなることがわかっている。アスタキサンチンは紫外線が強い雪の上で生きていくには、なくてはならない

い物質なのである。

赤い色をした *Chlamydomonas nivalis* は代表的雪氷藻類であるが、その後の調査で氷河の表面には、さらに多様な雪氷藻類が存在することもわかつてきただ。19世紀後半、北極海の北東航路を初めて横断したことで有名なスウェーデンの探検家アドルフ・ノルデンショルドは、同世代のスウェーデンの植物学者スペン・ベルグレンとともに、スバルバルやグリーンランドを探検する。氷河の裸氷域の表面で彼らがみつけたものは、赤雪の藻類とは全く違った形をした細胞で、小型の俵型の細胞で深紅から茶色をした藻類、中型の俵型の細胞がいくつも数珠のようにつながった茶色をした藻類であった(写真2)。彼らの名前をとってそれぞれ、*Mesotaenium berggrenii*, *Ancylonema nordensholtii* という学名がついている。この2種は、今も北極圏の氷河表面に優占する重要な雪氷藻類である。これらの藻類のもつ茶色い色素もまた、強い紫外線に対する防御の役割があると考えられている。さらに二人は、グリーンランド氷床上の氷に無数の円柱状の小さな穴があいていることを発見する。クリオコナイトホールと名付けたこの穴の底には、黒い



写真2. グリーンランド氷床裸氷域表面の雪氷藻類(複数の細胞が連なっているのが *Ancylonema nordensholtii*, 少し小型の単体の藻類が *Mesotaenium berggrenii*)

沈殿物（クリオコナイト）がたまっている。顕微鏡観察の結果、このクリオコナイトには、糸状のシアノバクテリア（藍藻）という原始的な藻類（実際にはバクテリアの仲間）が大量に含まれていたのである。このシアノバクテリアは、現在、特に中緯度帯の氷河で優占する雪氷藻類である。その後20世紀に入って、少しづつであるが雪氷藻類の発見は増え続け、現在は100種をこえる種が世界各地の氷河や積雪上で確認されている。融解期の雪氷表面は、実に多様な微生物の世界が広がっているのである。

生きている氷河

さらに最近になって、雪氷藻類の繁殖は氷河にとって非常に大きな意味をもつことがわかつってきた。もともと白い色をした氷河の雪氷表面は、日射エネルギーのほとんどを反射する性質をもっている。しかし、雪氷藻類が繁殖して雪面が赤く色づくと、その分日射を吸収することになり、雪の融解が速まる。つまり雪氷藻類の繁殖は、雪や氷の融解を促進する効果をもっているのである。さらに雪氷藻類は、死んだあと腐植物質と呼ばれる色の黒い有機物になる。

腐植物質というのは藻類の遺骸が雪氷上でバクテリアの分解をうけて、最後まで分解されず残った成分である。黒い色は赤よりも太陽光を吸収するので、この腐植物質によってさらに雪氷が解けるのは速くなる。したがって、藻類は繁殖すればするほど、その遺骸からできる黒い有機物が蓄積し、雪氷表面は融解が促進されることになる。

以上のこととは、氷河上でどんな種類の雪氷藻類がどれくらい繁殖しているのかが、氷河の拡大や縮小に関わってくることを意味している。現在、地球温暖化によって世界各地の氷河が縮小していることが明らかになっている。しかし、氷河の縮小は単に気温上昇によるものではなく、表面に繁殖する雪氷藻類の変化による可能性もあるのである。実際、今年私が調査を行ったグリーンランドでは、最近になって表面の色が変化してきていることが明らかになってきた（写真3）。衛星画像でみるとその変化ははっきりと見ることができる。以前は白い氷床の表面が、ここ数年で黒い色に変化しているのである。その原因は、雪氷藻類の繁殖量の増加である可能性が高い。温暖化によって融解日数が増加し、藻類の繁殖期間

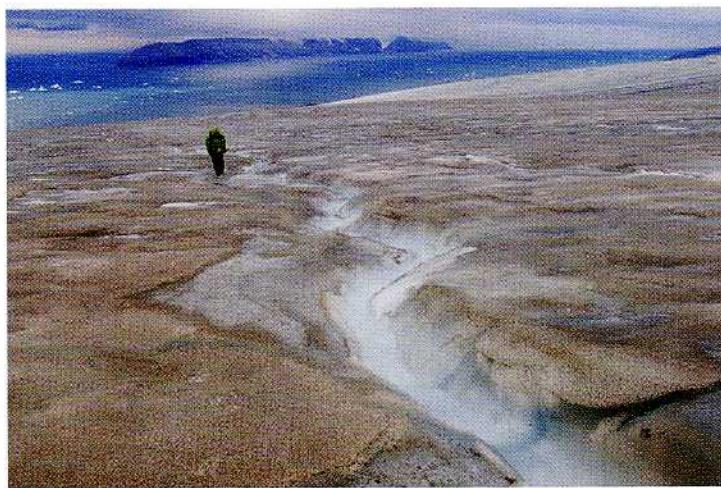


写真3. 藻類によって色づいた氷河（グリーンランド）

が長くなり、藻類が増加しているのではないかと考えている。もともと極域の氷河は、雪氷藻類の繁殖量が比較的少なく、見た目も白くきれいなものが多いと考えていた。近年の環境の変化は、雪氷上の微生物を介して、氷河に思わぬ影響を及ぼしてきているのである。

過去数十万年という歴史を見返してみれば、氷河は氷期間氷期サイクルのような気候変動にあわせて拡大と縮小を繰り返してきた。しかし、その歴史の中では、雪氷藻類も繁殖の増減を繰り返し、氷河の変動に影響してきたかもしれない。雪氷藻類の存在は、氷河変動に対する全く別の見方を与えてくれる。雪氷藻類によって拡大と縮小をする氷河の姿は、あたかも生きているかのように見える。雪氷藻類は、氷河という

巨大な雪氷の塊に生命を吹き込んでいる存在であるといってよいかもしれない。

おわりに

白くみえる雪も、決して純粋な水であることはなく、実は極微量の様々な物質が含まれている。雪氷藻類は、その雪に含まれるわずかな元素を集積、濃縮して、自らの赤い体を作るのである。そして、無数の雪粒の間の小さな空間で、環境の変化を敏感に感じ取って、条件が許せば大量に繁殖し雪を赤く染める。したがって、我々が目にする赤雪は、雪の性質のわずかな変化を、藻類が可視化してくれている現象といつていいだろう。それは、氷河または地球から我々に向けられた何かのメッセージなのかもしれない。