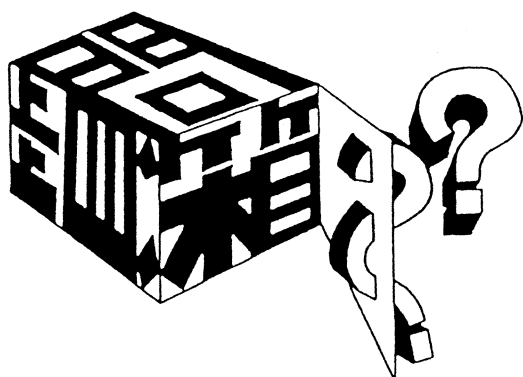




質問 春先の深さ 40 cm ほどの積雪上に写真 (図 1) のような穴を見つけました。氷河上にもクリオコナイトホールという同じような穴ができると学会などで見聞しています。両者の成因は同じものでしょうか？



図 1 山形県大蔵村塩谷の積雪上の穴。直径は約 9 cm (2008.3.25)

回答：

雪面や氷表面に穴があいていると、たしかに不思議に感じます。誰かがあけたものなのか、自然にあられたものなのか。見た目にはただの小さな穴でも、科学的にはとても奥の深い穴である場合もあります。氷河の上を歩くと、氷の表面にクリオコナイトホールと呼ばれる穴があいているのをよくみることができます。実は、この穴は研究者を虜にするとても不思議なものなのです。まずは、このクリオコナイトホールという穴について説明しましょう。

クリオコナイトホールは、氷河の氷の表面にできるきれいな円柱状の小さな穴です (図 2)。大きさは、直径 1 から 30 センチ、深さは 2 から 50 セ

雪氷学にかかわる疑問や技術的な問題など、広く会員の方々の質問に答えるコーナーです。雪氷編集委員会あてに、文書で質問をお寄せ下さい。

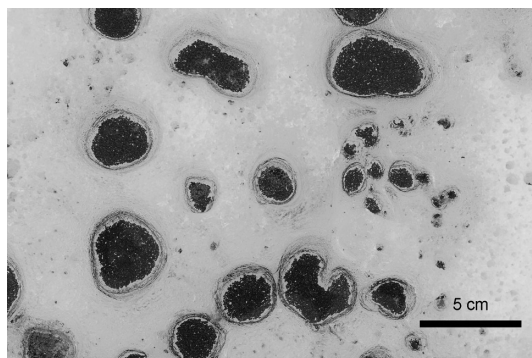


図 2 クリオコナイトホール (アラスカ, グルカナ氷河, 2010.8)

ンチほどです。穴を覗き込むと、氷河内部の透き通る氷の青さに息をのみます。穴の中には水がたまっていて、さらに底には黒い沈殿物があります。

クリオコナイトホールという名前を付けたのは、スウェーデンの有名な北極探検家、アドルフ・ノルデンショルドです。穴の底にたまった黒い沈殿物に対して、ギリシャ語の氷を意味する“クリオ”と、土砂を意味する“コニーデ”を組み合わせ“クリオコナイト”という名前をつけ、穴をクリオコナイトホールと呼びました。この黒い色をしたクリオコナイトが日射を吸収して下部の氷を解かし、円柱状のクリオコナイトホールが形成されるのです (図 3)。

ノルデンショルドがクリオコナイトホールを発見したのは、19 世紀の末のグリーンランド氷床の探検の最中でした。鉱物理学が専門であった彼は、沈殿物クリオコナイトに興味をもちました。純粋な氷でできたグリーンランド氷床に、なぜこのような黒い物質が存在するのか、彼はまずこれは氷床に落下した微小隕石ではないかと考えました。

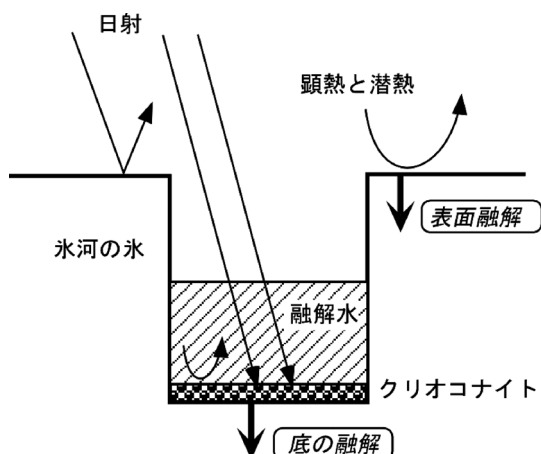


図 3 クリオコナイトホール断面図。

クリオコナイトを大学に持ち帰り、鉍物の分析をした所、ニッケルやコバルトなどの地球地殻にあまり含まれない元素が検出され、たしかに微小隕石が含まれていることが確かめられました。しかし、彼が顕微鏡でクリオコナイトを観察すると、その中に含まれていたのは隕石だけではなく、大量の微生物でした。

クリオコナイトに含まれていたその微生物は、シアノバクテリアと呼ばれる光合成微生物です。この微生物は、球状の細胞が数珠のように連なった糸状のもので、糸の直径は2-5 μm ほどです(図4)。色は緑から藍色をしています。光合成微生物なので、太陽光と二酸化炭素と水、そしてわずかな栄養で、繁殖することができます。この微生物の驚くべきことは、氷点に近い融解水の中で繁殖していることです。一般的な微生物は20-40 $^{\circ}\text{C}$ が繁殖に最適な温度で、それよりも低温ではほとんど繁殖することができません。このシアノバクテリアのように雪や氷といった低温環境で繁殖する生物を雪氷生物と呼んでいます。

分析の結果、クリオコナイトの正体は、微小隕石、風で飛ばされてきた小さな鉍物粒子、そしてこの雪氷生物や生物に由来する有機物であることが明らかになりました。極地の氷床以外の氷河では、微小隕石はほとんどなく、風送鉍物粒子と有機物からなります。有機物の量は、乾燥重量で2-15%ほどです。ただし、有機物は鉍物粒子に比べて密度が小さいので、体積比率でみると20-50%

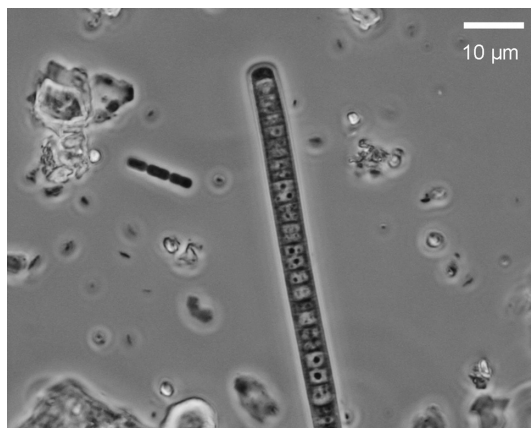


図 4 クリオコナイト中の代表的微生物、シアノバクテリア(中国、七一氷河)

ほどが有機物です。また、クリオコナイトの黒い色は、生物がつくる腐植物質という有機物であることもわかってきました。鉍物粒子の色は一般にうすい茶色ですが、クリオコナイトは有機物を含むことによって黒くなり、それだけ日射を吸収し穴の形成を促進します。これらのことから、クリオコナイトホールの形成には、雪氷生物が大きく関与していることがわかります。つまり、クリオコナイトホールは氷河上にすむ生物が作った穴であるということもできます。

クリオコナイトホールには、シアノバクテリア以外にも、昆虫やミジンコ、ミミズ、酵母、カビ、細菌など、様々な雪氷生物が生息していることが明らかになってきました。一見無生物な環境に見える氷河でも、クリオコナイトホールの中は生物で満ち溢れているのです。穴の中では、シアノバクテリアなどの光合成微生物を動物が食べ、さらにこれらの生物遺体を細菌が分解するという、食物連鎖が成立しています。クリオコナイトホールは、小さな生態系と言っていいでしょう。寒いのが好きな雪氷生物でも、繁殖には液体の水が必要です。氷河上にすむ雪氷生物にとって、融解水がたまっているクリオコナイトホールはオアシスのようなものなのです。ある研究者は、氷期などの氷河拡大期には、クリオコナイトホールは生物の避難場所になっている、と考えています。クリオコナイトホールは、雪氷生物が氷河上で自らの生存のために作り出している構造であると見るこ

ともできます。

クリオコナイトホールは、世界各地の水河で見られますが、穴の大きさや深さは様々です。一般に極域のクリオコナイトホールは深く、低緯度帯の山岳水河のものは浅いことがわかっています。また一つの水河でも、標高によっても大きさや深さが変わります。このような穴の大きさがどのように決まるのかは、水河の気候条件と関係しています。直径は、隣り合ったクリオコナイトホールが融合するごとに大きくなっていくので、長期間存在しているものほど大きくなります。直径はクリオコナイトホールのおおよその年齢を表していることになります。一方、深さは、水河表面の熱収支に関係します。水河表面の融解速度と底の融解速度が等しくなったとき、穴の深さは定常状態に達します。表面の融解速度は、大気からの放射、顕熱、潜熱によって決まりますが、底の融解速度は、水や水を通過して入る日射、水を通して入る顕熱、クリオコナイト中の生物の代謝熱によって決まります。この熱収支の方程式を解くと深さが求まることになります。ただし、このモデルはまだ研究途上で、実際のクリオコナイトホールの深さを完全には再現していません。クリオコナイトホールの大きさや寿命、形成過程は、水河の消耗域の表面アルベドに関与し、水河の質量収支にも大きく影響します。さらに、水河上に生息する雪氷生物の生態にも大きく影響します。したがって、クリオコナイトホールの物理的研究は、水河を理解する上でとても重要なのです。

最近クリオコナイトホールは、思わぬところでも注目されるようになってきました。一つは、地球外生命の探査の研究です。地球外生命の存在場所の候補地として、火星の極冠や木星の衛星エウロパなどの氷が注目を集めていますが、そのような氷の中に微生物が生きているとすれば、融解水のたまったクリオコナイトホールのような場所ではないかと考えられるからです。実際に地球の南極では、一年中表面は解けない場所でも表面下に届くわずかな日射によってクリオコナイトホール

が形成されることがわかっています。現在、地球外生命の探査に関わる研究者が、この南極のクリオコナイトホールの中の生物の生態を注意深く研究しています。もうひとつは、スノーボールアース（全球凍結、雪玉地球）の研究です。スノーボールアースは、数億年前に少なくとも2回、地球全体が氷でおおわれたという事件のことです。当時、地球は赤道付近まで水河や海水に覆われたという様々な証拠が見つかってきていますが、スノーボールアースがどのようにして終結したのか、ということが大きな問題になっています。この終結の原因として、ある研究ではクリオコナイトのようなダストに注目しています。もしかしたら、大量のクリオコナイトホールの形成が、スノーボールアースの終結を導いたということもありえるかもしれません。

このようにクリオコナイトホールは、単なる水河に空いた穴ではなく、まさに水河サイエンスの好奇心に通じる穴と言っていいでしょう。さて、それでは春先の雪面にできる穴とはどんなものなのでしょうか。クリオコナイトホールのように、なにか雪面に黒い物質がたまることによって、穴があいた可能性もあります。砂埃や落ち葉が雪面に集まったのかもしれませんが。しかしながら、クリオコナイトホールの場合と違って氷ではなく日射をあまり通さない積雪にできた穴であることと、一般に日本の春先の積雪の融解熱は日射だけでなく顕熱や潜熱も大きいことなどから、たとえ雪面に黒い物質があってもそれほど深い穴ができるとは考えられません。表面ではなく地面から解けた穴かもしれません。地熱や地中から噴き出るガスなどで、地面から雪がとけて穴ができることもあります。本当の原因は調べてみないとわかりませんが、もしかしたら想像もできなかった原因があるかもしれません。穴を覗き込めば、不思議な国のアリスのような冒険が始まるのです。

(千葉大学大学院理学研究科地球科学コース
竹内 望)

(2010年11月18日受付)