

氷河生態系—雪と氷の世界の生物たち

京都大学野生動物研究センター教授 幸島司郎

1. はじめに

冷たい雪と氷の世界である氷河は、その寒冷な環境条件のため、長い間無生物の世界と見なされ、最近まで本格的な生物学研究の対象とはされてこなかった。しかし氷河にも、実は昆虫やミミズ、ミジンコ、藻類、菌類、バクテリアなど、様々な生物が生息し、特異な生態系が成立していることがしだいに明らかになってきた。本稿では、氷河生物の生態とその生息環境について概説するとともに、氷河生物に関する最近の研究成果を簡単に紹介する。

2. 氷河昆虫の発見—雪虫の研究から

大学生のころ、冬山の雪の上をごそごそ歩き回っている雪虫(セツケイカワゲラ, *Eocapnia nivalis*)に出会い、「寒いのになぜ動けるのか?何を食べているのか?雪の上で何をしているのか?」不思議でたまたま、動物行動学者の日高敏隆先生(故人)の指導を受けながら研究を開始した。この虫は幼虫時代を溪流中ですごすカワゲラという水生昆虫の仲間だが、成虫が真冬の雪の上で活動する不思議な昆虫である。成虫は体長8mmほどの黒い虫で、翅がなく、雪の上を活発に歩き回っている。研究の結果、彼らは0℃付近の低温では活発に活動できるが、20℃以上の「高温」では麻痺して動けなくなることや、雪の中の微生物や有機物を食べていること、数ヶ月間も雪の上を歩いて川の上流方向へ移動するなど、積雪という環境をうまく利用した見事な生活史を送っていることが明らかになった。

こうして雪虫を研究するうちに「氷河にも虫がいるかも知れない」という妄想に取りつかれるようになった。しかし、いくら調べても氷河に昆虫が生息しているという報告は見つからなかった。そこで、自分で氷河に行って虫を探すことにした。そして運良く、1983年にヒマラヤで氷河の雪と氷の中だけに住む昆虫を世界で初めて発見することができた¹⁾。

3. 氷河とは

氷河生態系の生物を紹介する前に、まず氷河につ

いて説明しておこう(図1)。地球物理学では、氷河は「雪からできた氷が流動しているもの」と定義されている。極地や高山等の寒冷地では、冬に降り積もった雪が夏の間に全て融けきらずに残雪となり、その上に翌年の雪が毎年追加されることになる。こうして積雪が厚く堆積すると、下部の雪が上部の雪の重さで押し固められて氷に変わる。そして、このような氷がさらに厚く堆積すると、大きな圧力によって氷の結晶が塑性変形をおこし、固体である氷が液体のようにゆっくり下流に向かって流れだす。このような状態のものが氷河と呼ばれる。つまり、氷河では雪から形成された氷が、上流から下流に向かって常に流動しているのである。

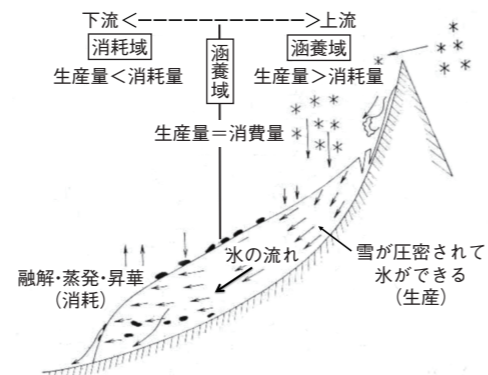
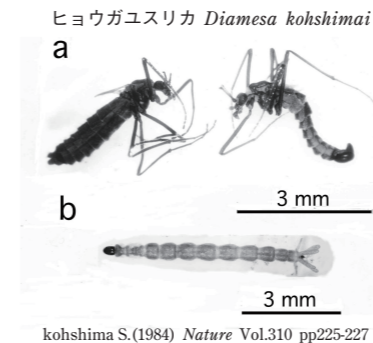


図1 氷河の構造

4. 氷河昆虫の発見

最初に発見された氷河昆虫は、筆者がネパール・ヒマラヤのヤラ氷河(標高5,100m—5,700m)で発見したヒョウガユスリカ(*Diamesa kohshimai*)¹⁾(図2,表紙写真)である。体長3mmほどの、カによく似た姿のユスリカという昆虫の仲間で、翅が退化しているために飛ぶことはできず、氷河の表面を歩いたり、積雪や氷の隙間に潜り込んだりして生活している。低温に強く、調査期間中の最低気温であった-16℃でも、ゆっくりとではあるが歩くことができた。これはおそらく低温での昆虫活動の世界記録だろう。逆に高温には非常に弱く、手のひらにのせて暖めてやると痙攣を起こして動けなくなってしまう

う。つまり彼らは「低温でも生きられる」のではなく、「低温でない」と生きられないのである。最近、南極の土壤に住む好冷菌が低温で高い活性を示す特殊な酵素を持つことが明らかになり²⁾、これらの酵素が低温でも柔軟性と基質との高い結合性を維持できる構造を持つことが報告されている^{3,4,5)}。氷河生物の酵素に関してはまだ何もわかっていないが、彼らもまた、このような酵素を持っている可能性が高い。



kohshima S.(1984) *Nature* Vol.310 pp225-227

図2 ヒマラヤの氷河で発見された氷河昆虫「ヒョウガユスリカ」。左上がメス成虫、右上がオス成虫、下が幼虫。

5. 上流への移動

ヒョウガユスリカの幼虫は、昼間は氷河上の融水路周辺の水の隙間に潜り込んでじっとしているが、夜になって水量が減ると水路に這い出てきて、水路底に溜まった泥状の物質(氷河上で増殖する藻類やシアノバクテリアなどの微生物を含む)を食べて成長する。そして氷河が厚い積雪に覆われる秋になると、幼虫はサナギを経て成虫になる。面白いことに、オスは積雪中でメスと交尾するとすぐに死んでしまうのに対して、メスたちは少なくとも1か月以上生存し、その間に氷河上を歩いて上流方向に移動してから産卵することがわかった。この移動中、メスたちが太陽コンパスを利用して方向を維持していること、また、斜面の最大傾斜方向を手がかりにして上流方向を検出していることも明らかになった(図3)⁶⁾。移動中のメスから太陽が見えないように板を置き、同時に、鏡を使って実際とは逆方向から太陽の鏡像を見せてやると、移動方向が逆転したのだ。斜面の最大傾斜方向が変わると、数十メートル歩いた後に徐々に新しい最大傾斜方向に移動方向を修正することも明らかになった。

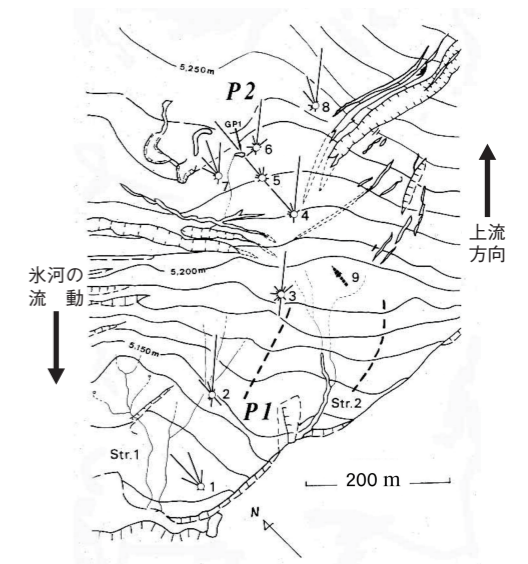


図3 ヒョウガユスリカのメスは氷河の上流に歩いて移動する。氷河上の各地点で10m四方の区画内で発見したメスの移動方向の分布を示してある。

6. 氷河生態系

ヒョウガユスリカの発見まで、氷河上で見つかる動物は、風によって他の生態系から運ばれてくる有機物を食物として、一時的に滞在しているに過ぎないと考えられてきた。しかし、この発見によって、これらの動物の多くが、雪氷環境に適応した定住者であること、また、従来ほとんど無視されてきたが、氷河では雪氷中で光合成する藻類(雪氷藻類)が、重要な一次生産者となっていることがわかってきた。例えば、ヒマラヤの同じ氷河で見つかった水生甲殻類、ヒョウガソコミジンコ(*Glaciella yalensis*)や、南米パタゴニアの氷河で見つかった翅の無いカワゲラ類(*Andiperla willinki*,表紙写真)、またアラスカ西海岸の氷河に住むコオリミミズ(*Mesenchytraeus solifugus*,表紙写真)も、やはり雪氷藻類やバクテリアなどの微生物を食物としていた。これらの動物は、その全生活史を雪氷中で完結させており、氷河の環境に対してそれぞれ特殊な適応をとげていた。つまり、氷河は、雪氷藻類の一次生産に支えられた特殊な定住性動物が生息する、比較的閉鎖性の高い生態系として捉えられることが明らかになった⁷⁾。

氷河では、上流域と下流域で環境条件が大きく異なる。標高によって気温が異なり、雪から形成される氷の生産量と融解による消費量のバランスが異なるからである(図1)。氷河学的には、氷の生産量が

融解を上回る上流部を涵養域^{かんよう}、融解量が生産量を上回る下流部を消耗域、そして両者の境界線を平衡線と呼んでいる。したがって、同じ氷河でも消耗域と涵養域では、異なったタイプの生物が見られる。例えばヒマラヤの氷河では、平衡線より下の消耗域には、ヒョウガユスリカなどの水生昆虫と、ヒョウガソコミジンコなどの水生甲殻類が生息していたのに対して、涵養域には、体長1mmほどの土壤動物であるトビムシ類が積雪層内に生息していた。アラスカの氷河に生息するコオリミズも涵養域の積雪内に多いことがわかっている。これは、融解水が大量に存在する消耗域が、河川や湖などの淡水環境に近く、融解の少ない涵養域の積雪環境が土壤環境に似ていることに対応しているのだらう。

7. 氷河生物の活動が氷河の融解を加速する

氷河の生物群集は、氷河の物理環境にも大きな影響を及ぼしている。例えばヒマラヤやグリーンランドの一部の氷河は、夏になると、氷河上で増殖する藍藻類(シアノバクテリア)とバクテリアを主成分とする大量の黒い泥状物質に覆われるため、下半分が黒く色付けられる(図4)。これらの物質は氷河表面の反射率(アルベド)を大きく下げため、ヒマラヤでは氷河の表面融解が3倍近く加速されていることがわかった⁸⁾。雪や氷は地球上で最も白い、つまりアルベドの高い物質であり、太陽からの入射エネルギーのほとんどを跳ね返してしまう。ところが、表面が黒い汚れに覆われると、アルベドが下がり入射エネルギーの吸収効率が上がるため、融解が加速されるのである。調査の結果、この氷河の黒い泥状物



図4 グリーンランド北西部の氷河。氷河上で増殖する微生物によって表面が黒くなっている。

質(cryoconite)は、直径数mmの粒状構造を持っており、糸状藍藻が微粒子を捕捉しながら成長することによって形成されるストロマトライトと同じ構造であること、黒い色は藻類の光合成産物がバクテリアによって暗色の腐植物質に変換されるためであることなどが明らかになった⁹⁾。つまり、これらの氷河では生物活動が氷河の融解を加速し、氷河を縮小させているのである。このような効果の大きさは、微生物相によって大きく異なる。例えば単細胞緑藻が主な一次生産者となっているパタゴニアの氷河は、糸状藍藻が優占するヒマラヤの氷河とは対照的に汚れが少なく、高いアルベドを保っている。筆者らは現在、特にグリーンランド氷河に注目して、微生物活動がアルベドに及ぼす影響について研究を進めている。グリーンランド氷河は、南極氷河に次いで大きく、地球上の淡水の約10%に相当するため、その融解量の変動は近い将来の温暖化による海面上昇に大きく影響する。微生物活動の変化が近年のグリーンランド氷河の急速な縮小の原因である可能性があるからだ。

8. 雪氷微生物を利用した古環境復元

氷河の涵養域では、春から夏にかけて表面で増殖した雪氷微生物が、秋の降雪によって埋められて、毎年氷河内部に取り込まれる。したがって、氷河の深い部分の氷には過去の雪氷微生物が年層となって保存されている。ヒマラヤや北極、パタゴニアの氷河ボーリングで採取したアイスコア(柱状氷試料)には、このような層が多数含まれていた。調査の結果、アイスコア中の雪氷藻類の量や種組成は、過去の環境条件(夏の気温や光条件など)を反映しており、古環境復元の新しい情報源となることが明らかになってきた¹⁰⁾。従来のアイスコア解析では、酸素同位体比や化学成分などの物理・化学指標だけを環境指標として古環境復元が行われてきた。しかし、アイスコア中の氷河微生物を利用すれば、これまで得られなかった環境情報が得られる可能性が高い。例えば、中低緯度の温暖な氷河のアイスコアでは、融解水の浸透による混合が大きいため酸素同位体比や化学成分を環境指標として利用できない。しかし、雪氷微生物を利用することによって、このようなアイスコアからも古環境情報を引き出すことができる。パタゴニアのチンダル氷河では、雪氷藻類を利用し

たアイスコア解析によって、この氷河が年間10数メートルを越える世界最大級の降水量によって維持されていることが初めて明らかになった¹¹⁾。

9. 南極氷床下の湖に生物がいる？

現在、氷河生物の生息環境として最も注目されているのは、南極大陸を覆っている氷床の下にある湖である。これまでに80近い湖が発見されているが、最も大きいのが広さ約14000平方km、水深約670mのポストーク湖で、ロシアのポストーク基地直下の厚さ3750mの氷の下に広がっている。氷床表面では氷温は-56℃だが、底付近では地熱の影響で-3℃前後と高く、400気圧以上の高圧のため水が存在すると考えられている。したがって、何らかの生物が生息する可能性がある。氷床下の湖での生物活動を調べる唯一の方法は、氷床に穴をあけて湖の水を調べることだ。掘削は順調に進み、湖に近い部分の水を回収することに成功している。

最近、この氷が、ポストーク湖の水が凍結したものであることが、結晶構造や同位体分析から明らかとなり話題になっている。この氷の微生物分析が2つの研究グループによって行われ、結果がサイエンス誌の同じ号に発表された^{12,13)}。それによると、1mL当り数百〜数万のバクテリアが含まれており、少なくともその一部はまだ増殖可能だったという。さらに、少量だが微生物の増殖に必要な栄養物質も確認されたことから、両グループともポストーク湖に微生物が存在する可能性は高いと結論している。また、氷床底部では高い圧力と地熱によって、氷の結晶間の隙間に微生物の生存に適した微細生息場所が形成されるとも指摘されている^{14,15)}。

10. 地球外生命の生息場所？

もし、氷床下の湖や氷床底部の微小空隙で生物の生息が確認されれば、厚さ150kmもの氷の下に水が存在すると考えられる木星の惑星エウロパや火星の北極にある氷床にも、生物が存在する可能性が高くなる。また最近、地球上で最も寒冷な南極点の雪から多くのバクテリアが検出され、その一部は-12から-17℃でも代謝活動できる可能性が高いことが報告された¹⁶⁾。こうして雪氷環境での生物活動が従来の予想をはるかに超えて活発であることが明らかになるにつれ、雪氷環境が地球外生命の有力な

生息場所としてますます注目されるようになっていく。

参考文献

- 1) Kohshima S. (1984) Nature, 310, 225-227
- 2) Aghajari, N. et al. (1998) Protein Sci., 7, 564-572
- 3) Gerike, U. et al. (1998) Acta Crystallogr. D54, 1012-1013
- 4) Russell, N. J. (2000) Extremophiles. 4, 83-90
- 5) 幸島司郎 (2000) 宇宙生物科学, 14 (4), 353-362
- 6) Kohshima S. (1985) J. Ethology, 3, 93-104
- 7) Kohshima S. (1987) "Evolution and coadaptation in biotic communities", University of Tokyo press, pp. 68-72
- 8) Kohshima S. et al. (1993) Snow and Glacier Hydrology, IAHS publ. no.218, 309-316
- 9) Takeuchi, N. et al. (2001) Arctic, Antarctic and Alpine Research, 33, 2, 115-122.
- 10) Yoshimura, Y. et al. (2000) J. Glaciology, 46, 153, 335-340.
- 11) Kohshima, S. et al. (2007) Global and Planetary Change. 59, 236-244.
- 12) Karl, D. M. et al. (1999) Science 286, 2144-2147
- 13) Priscu, J. C. et al. (1999) Science 286, 2141-2144
- 14) Price, P. B. (2000) Proc. Natl. Acad. Sci. 97, 1247-1251
- 15) Skidmore, M. L. et al. (2000) Appl. Environ. Microbiol. 66, 3214-3220
- 16) Carr, M. H. et al (1998) Nature, 391(6665), 363-5