

ヒマラヤの氷河生態系

幸島司郎

東京工業大学大学院生命理工学研究科

ヒマラヤの標高5千メートルを超える高山域には、氷河という雪と氷の世界が広がっている。氷河や雪渓、積雪など、水が主に雪や氷といった固体として存在する雪氷圏は、その寒冷な環境条件のため、長い間無生物的世界であると見なされ、つい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。特に、変温動物である無脊椎動物の生息環境としては、ほとんど無視されてきた。しかし筆者らの調査によって、実は氷河にも昆虫や甲殻類をはじめとする様々な生物が生息しており、特異な生態系が成立していることが明らかになってきた。本稿ではヒマラヤ域の氷河に生息する生物の生態を紹介するとともに、この地域の氷河生態系の特性を概説する。

氷河とは何か

氷河は「雪からできた水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、降り積もった雪が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、下部の雪は押し固められて氷に変わる。このような水がさらに厚く堆積すると、大きな圧力によって水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のだ。そして、標高が

低く温暖な地点まで流れ下ると融解が盛んになるため、氷河の水は次第に失われて最後にはなくなってしまう。つまり氷河では、雪から形成された水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)。したがって、同じ氷河でも上流部と下流部では環境条件が大きく異なり、生息する生物も異なっている。氷河学では、水の涵養量(生産量)が融解などによる水の消耗量より大きい上流部を「涵養域」、消耗量が涵養量を上回り水が減少する下流部を「消耗域」、涵養量と消

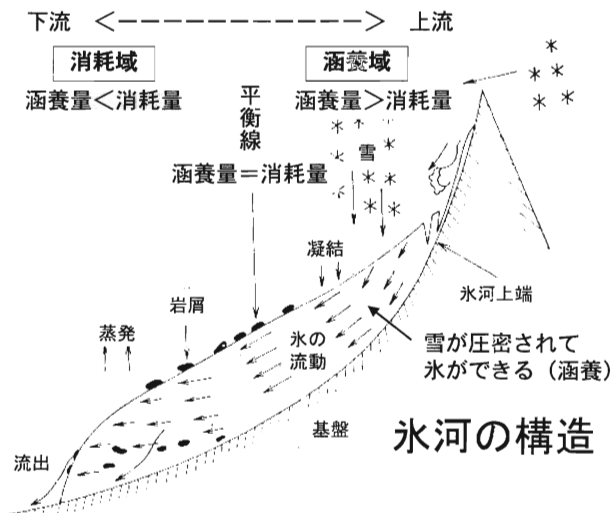


図1 氷河の構造

耗量が等しくなる涵養域と消耗域の境目を「平衡線」と、それぞれ呼んでいる。

ではまず、下流部の消耗域に生息する生物から紹介しよう。

氷河の消耗域に生息する生物

ヒョウガユスリカ

氷河消耗域に生息する生物の例として、筆者がヒマラヤの水河で発見した昆虫、ヒョウガユスリカの生態を見てみよう。この虫が発見されたのは、中部ネパール・ヒマラヤのランタン地方にあるヤラ氷河という小さな氷河である(図2)。標高は末端で約5,100m、上端で約5,700mあり、消耗域と涵養域を分ける平行線の高度は約5,300mであった。最初に訪れた1982年の9月(ポスト・モンスーン期)には氷河下流部の消耗域も全面が厚さ30cm - 1mの真っ白な積雪に覆われていた。この積雪の上をたくさんの小さな昆虫が歩き回っていたのである。発見された虫は体長3mmほどのカによく似た昆虫で、ユスリカの仲間であった(図3)(Kohshima 1984)。そこで私は、この虫をヒョウガユスリカ(*Diamesa kohshimai*)と呼ぶことにした。普通のユスリカの成虫には立派な翅があり自由に空を飛ぶことができるが、ヒョウガユスリカは翅が退化しているために飛ぶことは出来ず、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、調査期間の最低気温であったマイナス16度でも、ゆっくりとではあるが歩き回ることができた。これは低温での昆虫活動の記録としてはおそらく世界最低記録である。逆に高温には非常に弱く、手の平にのせて暖めてやると痙攣をおこして動けなくなってしまう。おそらく低温に適応した特殊な酵素系をもっているのだろう。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。

幼虫もまた氷河の氷の中から見つかった。氷河水の大きな結晶と結晶の間のできる隙間に潜り込んでいたのだ(図4)。幼虫の発見により、この虫は全生活史を氷河上で送ることが証明された最初の昆虫となった。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の底に這い出てきて、水路の底に溜まった泥状の物質を食べてい



図2 ネパール・ヒマラヤのヤラ氷河

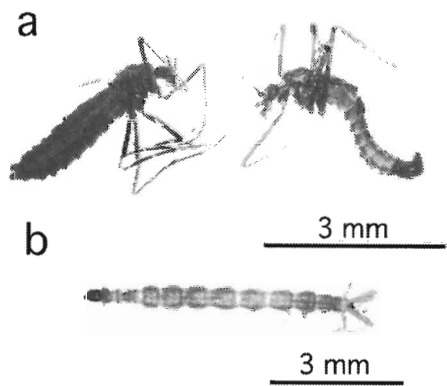


図3 ヒョウガユスリカ (a 成虫 左:メス 右:オス、b 幼虫)

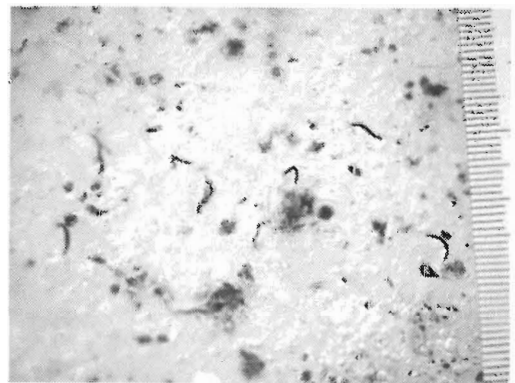


図4 氷の中のヒョウガユスリカ幼虫

ることがわかった。こうして成長した幼虫は、氷河が厚い積雪に覆われる秋になるとサナギを経て成虫になる。面白いことに、氷河表面に出てくるのはメスの個体だけで、オスはほとんど見られなかった。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だ。つまり、オスは一生を雪氷の中だけで過ごすのである。一方、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。

上流への移動

この移動は卵や幼虫が氷河上の流水中で生活することと関係した行動らしい。彼等は、親になるまでに流水や氷河の流動によって必然的に下流方向に運ばれるので、親になった地点ですぐ産卵すれば、何世代か後には氷河の外に流出してしまうだろう。そこで、流下分を補正して氷河上に留まるために、上流方向に移動してから産卵するらしい。幼虫が融解水量の少ない夜間にしか活動しないのも、流水による流下を少なくするための適応

だと考えられる。氷河という氷のベルトコンベアの上で生きる生物たちにとって、下流への流下をどう補正するかという問題は、避けて通れない重大な問題なのである。調査の結果、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、太陽コンパスを使ってまっすぐ歩きながら斜面の最大傾斜方向を計測し、それを手がかりにして上流方向を検出していることなども明らかになった (Kohshima 1985)。

ヒョウガソコミジンコ

ヤラ氷河の消耗域には、小さな甲殻類の一種であるミジンコの仲間も生息していることが明らかになった。体長1mmほどの奇麗なオレンジ色をした新属新種の珍しいソコミジンコ類で、ヒョウガソコミジンコ (*Glaciella yalensis*) と名付けられた(図5)(Kikuchi 1994)。このミジンコも夜行性で、昼間は氷の中の隙間に入り込んでじっとしているが、夜になると融水の中で氷の上を活発に這い回りながら、氷河ユスリカと同じように水路の底にたまった黒い泥のような物質を食べていた。

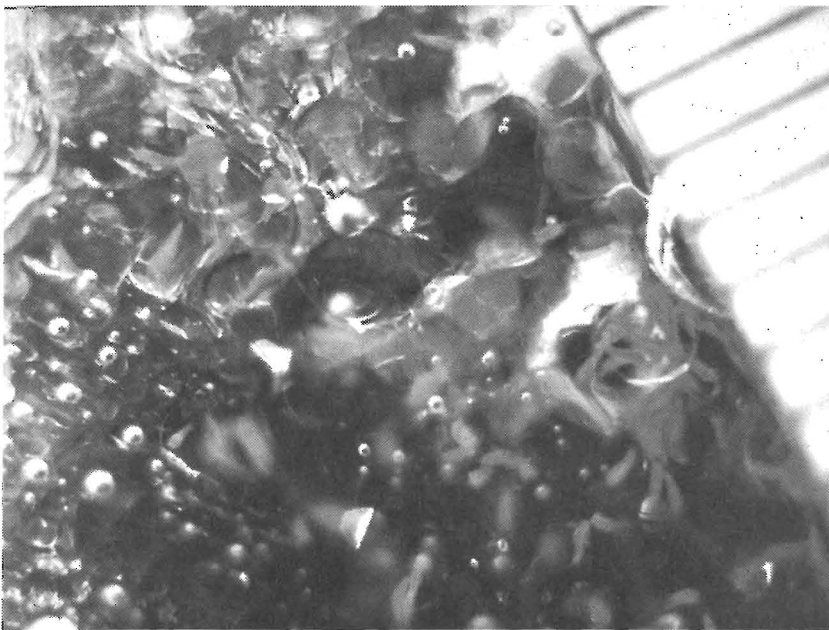


図5 氷の中のヒョウガソコミジンコ

氷河の生態系

分析の結果、この泥状の物質には光合成生物のシアノバクテリアなど、氷河の上で増殖する様々な微生物が含まれていることが明らかになった。つまり、この虫は氷河の上で光合成生産する微生物を食べて生きていたのである。従来、ヒマラヤの高所にある雪氷環境には、植物による一次生産がほとんどなく、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、クモなどの少数の動物が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、これまでほとんど無視されてきたが、実は氷河でも雪氷中で増殖する藻類(雪氷藻類)がかなりの光合成生産を行っており、そこに住む動物群集をささえる重要な一次生産者となっていたのだ。つまり、氷河にも一次生産者や定住性動物群集を含む、比較的閉鎖性の高い独自の生態系が成立していたのである (Kohshima 1987)。

氷河の涵養域に生息する生物

トビムシ類

氷河の上をさらに上流にさかのぼり、平衡線をこえて涵養域に入ると、消耗域よりさらに寒冷で真夏でも雪が降る厳しい世界になる。しかし、真っ白な雪ばかりの氷河の涵養域にも生物の世界があることが明らかになった。涵養域で雪に深さ数メートルの縦穴を掘り積雪の断面を観察すると、白い雪の層の間に黒っぽく汚れた雪や氷の層が数十センチから1m間隔で何層も挟まれている(図6)。この汚れ層の雪や氷の中に、体長1mmほどの小さな昆虫であるトビムシの仲間がたくさん生息していたのである(図7)。実は汚れ層の雪や氷に含まれている黒っぽい粒子には、雪氷中で光合成する雪氷藻類やバクテリアがたくさん含まれており、トビムシたちはこれらの雪氷微生物を食べて生きていたのだ。つまり氷河の涵養域にも光合成する一次生産者とそれを消費する定住性の動物群集が存在していたのである。

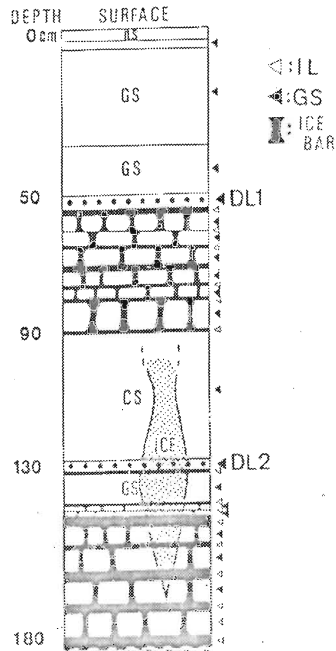


図6 ヤラ氷河涵養域の積雪断面



図7 ヤラ氷河涵養域に住むトビムシ類

雪氷微生物を利用したアイスコア解析

寒冷な涵養域では融解があまりおこらず積雪の上に次々に新しい雪が追加されるため、春から夏にかけて氷河表面で増殖した雪氷微生物は、秋の降雪によって埋められ、毎年氷河内部に取り込まれる。したがって、氷河の深い部分の水には過去に表面付近で増殖した微生物が年層となって保存されている。氷河ボーリングによって採取した氷試料（アイスコア）には、このような過去の雪氷微生物を含んだ氷層が何百年分も含まれていた。調査の結果、氷河のアイスコア中に含まれる雪氷微生物の量や種類組成は、過去の環境条件（例えば夏の気温や融雪量、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して利用できることが明らかになってきた（Yoshimura et al. 2000, 2006）。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、過去の気候変動などが復元されてきたが、雪氷微生物を分析すれば、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。特にヒマラヤなど、融解水の浸透による混合が大きく、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氷河では、古環境復元の有力な手掛かりとなることが明らかになってきた。

生物が氷河融解を加速する

涵養域で生産された水の中に保存されている大

量の微生物や彼らが生産した有機物は、氷河の流動によって下流に運ばれ、最後には消耗域の表面に濃縮される。消耗域表面では、涵養域から流れ下ってきた水が融け、そこに含まれていた微生物や有機物が氷河表面に放出されるからである。こうして微生物や有機物、植物の増殖に必要な栄養塩などが蓄積するため、消耗域表面ではますます生物生産が盛んになり、大量のヒョウガユスリカやヒョウガソコミジンコが生息可能となるらしい。また、このような融解による物質濃縮と高い生物生産によって、微生物と有機物が大量に蓄積されるため、生物生産が盛んな夏（モンスーン期）には、多くのヒマラヤの氷河の消耗域表面は、微生物と有機物を含む黒い泥のような物質に覆われて黒く色付けられるになることが明らかになった（図8）。このような黒い物質は氷河表面のアルベド（反射率）を大きく下げため、氷河の表面融解を加速する効果を持つ。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、その表面が黒い汚れに被われると、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だ。調査の結果、この氷河の表面融解速度は微生物が形成する泥状物質によって約3倍にも加速されていることが明らかになった（Kohshima et al. 1993）。つまり、この氷河では生物の活動が氷河の融解を加速し、氷



図8 夏のヤラ氷河：生物起源の黒い汚れで下流部分が黒く汚されている。

河を縮小させていたのである。

氷河洞窟の生物

ヒマラヤには、ヤラ氷河のような山腹にかかる小型の氷河と谷筋に発達する大型の谷氷河の2つのタイプの氷河があり、前者のタイプは表面にデブリと呼ばれる岩屑がないことからC型氷河(Clean type)、後者のタイプは消耗域の表面が厚いデブリに覆われていることからD型氷河(Debris covered type)と呼ばれてきた。これらのうち、生物活動によって下流部の表面が黒く色付けられていることがわかったのはC型氷河である。つまりC型氷河は岩屑には覆われていないが決してクリーンではなく、夏には消耗域の表面が生物起源の汚れに覆われて黒くなるので、むしろB型氷河(Biologically darkened type)と呼ぶべきかもしれない。その後の調査で、消耗域表面がこのような生物起源の黒い汚れで覆われる氷河は、ヒマラヤやチベット、コンロン、テンシャンなど、アジア高山域に広く見られることがわかってきた。

エベレストの麓にあるクンプ氷河など、厚いデブリに覆われたD型氷河では、消耗域に大きな

岩や石、砂が不安定に堆積しているため、C型氷河のような目立った生物活動はほとんど見られなかった。しかし、この厚いデブリ層の下にある氷の奥にも生物の世界が隠されていた。D型氷河の消耗域の氷の中には融解水が作る大きなトンネル状の水路(氷河洞窟)が発達しており、そこが氷河生物の生息場所となっていたのだ(図9)。クンプ氷河の支流で、氷河表面から数十メートル下に発達したこのような氷河洞窟の内部を調査した所、体長1cmほどの翅のないカワゲラの仲間(図10)やユスリカ類など、C型氷河の表面で見つかったのとは異なるタイプの氷河昆虫が見つかった。このような氷河洞窟は地表のデブリ域の所々に発達する池や湖につながっているため、これらの氷河昆虫はこのような池や湖で生産された有機物や、氷河流動によって涵養域から運ばれてくる氷の中に保存された有機物を利用して生きていると考えられるが、詳しいことはまだ何もわかっていない。いずれにせよ、氷河生態系の生物生息場所は、表面付近ばかりでなく氷河の内部や底面にも広がっているらしい。



図9 氷河洞窟の内部

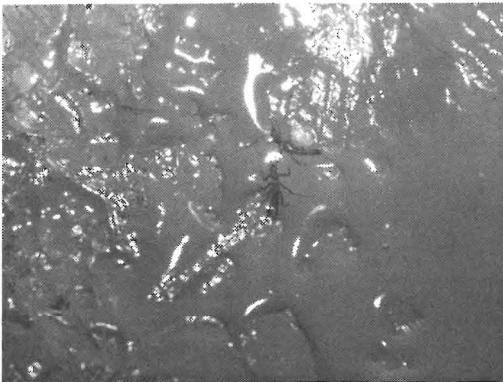


図10 氷河洞窟で発見されたカワゲラ類

今後も、このような視点から氷河生物や氷河生態系の研究を続けてゆきたい。

引用文献

- Kikuchi Y. (1994) *Glaciella*, a new genus of freshwater. *Canthocamptidae* (Copepoda, Harpacticoida) from a glacier in Nepal, Himalayas. *Hydrobiologia*, 292/293.
- Kohshima S. (1984) Novel cold-tolerant insect found in a Himalayan glacier *Nature* Vol.310 pp.225-227.
- Kohshima S. (1985) Migration of the Himalayan wingless glacier midge (*Diamesa* sp.) - Slope direction assessment by sun-compassed straight walk: *J. Ethology* Vol.3 pp.93-104.
- Kohshima S. (1987) Glacial Biology and Biotic Communities: in "Evolution and coadaptation in biotic communities" ed. S. Kawano, J.H. Connell and T. Hidaka, University of Tokyo press, pp.68-72.
- Kohshima S., K. Seko & Y. Yoshimura (1993) Biotic acceleration of glacier melting in Yala glacier, Langtang region, Nepal Himalaya. in *Snow and Glacier Hydrology*, IAHS publ. no.218 pp.309-316.
- Takeuchi, N., Kohshima, S., and Seko, K. (2001): Structure, formation and darkening process of albedo-reducing material (cryoconite) on a Himalayan glacier: a granular algal mat growing on the glacier. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, Vol. 33, No.2, pp.115-122.
- Yoshimura, Y., Kohshima, S., Takeuchi, N., Y. Seko and Fujita, K. (2000): Himalayan ice core dating with snow algae. *J. Glaciology*, Vol.46, No.153, pp.335-340
- Yoshimura, Y., Kohshima, S., Takeuchi, N., Seko, K. and Fujita, K. (2006): Snow algae in a Himalayan ice core: new environmental markers for ice core analyses and their correlation with summer mass balance. *Annals Glaciol.*, 43 pp.148-153.

Summary

Ecological System of the Himalayan Glacier

Shiro Kohshima

Department of Biological Sciences, Graduate School of Bioscience and Biotechnology,
Tokyo Institute of Technology

Biological activity on glaciers has been believed to be extremely limited. However, in Himalayan glaciers, we found biotic communities including various cold-tolerant insects and copepods that were feeding on algae and bacteria growing in the snow and ice. Thus, the glaciers are simple and relatively closed ecosystems sustained by primary production in the snow and ice. Since microorganisms growing on the glacier are stored in the glacial strata every year, ice-core samples contain many layers with these microorganisms. Recently, it was shown that these microorganisms in the ice-core could be new environmental markers for past environment. It was also suggested that the microbial activity on the glacier could affect the mass balance and fluctuation of the Himalayan glaciers because blooms of algae and bacteria on the glacier was found to reduce the surface albedo and significantly affect the glacier melting.