

モレーン堰き止め氷河湖の形成機構に関する一考察

山田知充（北大低温研）坂井亜規子・内藤望（名大地球環境研）

1. 問題の設定

ヒマラヤ山脈東部山域の南北斜面に流れ降りている大規模な谷氷河の末端には、近年の地球温暖化の影響による氷河の急速な融解によって、モレーンで堰き止められた氷河湖が次々と形成され、拡大を続けている。モレーンはダム の堤体としては非常に不安定なため容易に決壊し、氷河湖決壊洪水 (Glacial Lake Outburst Flood, GLOF) と呼ばれる洪水を引き起こす。ネパールの例では 1964 年以来 3 年に 1 度以上の頻度で発生し、下流域の自然やインフラ、人々の暮らしに甚大な被害をもたらしている。

モレーン堰き止め氷河湖は岩屑で覆われた大きな谷氷河の氷舌と呼ばれる舌のように伸びた消耗域の末端に形成されている。同じ気候条件下にあり、同じような形態を持つ氷河でも、氷河湖が形成されているのは、今のところ、その一部にすぎない。なぜ一部の氷河にのみ氷河湖が形成されているのであろうか？未だ氷河湖が形成されていない氷河にも、将来氷河湖が形成され得るのであろうか？それとも、ごく一部の特殊な氷河にのみ氷河湖が誕生するのであろうか？この疑問に回答を与えるための作業仮説を提示してみよう。

2. モレーン堰き止め氷河湖はなぜ出来るか？

ヒマラヤの氷河は多量の岩屑を含んでいる点で、アラスカやヨーロッパの氷河に比べて際立った特徴がある。ヒマラヤの谷氷河涵養域は 6000m を超える峰々の急峻な斜面に囲まれている。斜面は凍結破碎帯高度にあるため、多量の岩屑が生産されている (例えば、Shiraiwa, 1992)。急峻な斜面に降る降雪は、絶えず雪崩となって斜面の岩屑を巻き込みながら氷河を涵養している。氷河の涵養域 (堆積域) には、多量の岩屑が内部に取り込まれている。岩屑を含んだ氷河は、斜面を削りながら流れ下り、多量の岩屑が下流に運ばれる。消耗域に達した氷河は表面から融解し、内部に含まれていた岩屑が析出して氷舌表面を覆い始める。流れ降りにつれて表面を覆う岩屑は厚さを増す。この様に氷舌表面が厚い岩屑 (デブリ) に覆われている氷河をデブリ氷河と言う。氷舌端まで運ばれたデブリは、氷河が融け切って解放され、氷舌末端にモレーンを形成する。氷舌の前面に出来るモレーンをエンドモレーンまたはターミナルモレーン、氷舌の両側面に出来るモレーンをサイドモレーンまたはラテラルモレーンと言う。モレーンは、谷底からの比高が数 10m から 300m にも達する規模にまで成長を遂げ、まるで城壁のように切れ目なく谷氷河の氷舌を馬蹄形に取り囲んでいる。

モレーン堰止氷河湖は、この様なデブリ氷河にのみ形成されている。モレーンは最近の氷河拡大期であった 16-19 世紀の小氷期と呼ばれる氷河拡大期に形成された岩、礫、砂、粘土鉱物から成る氷河堆積物であり、植生はなく、まだ固結していない新鮮な岩屑が積み上がった、きわめて不安定な構造物である。氷舌を取り囲んだモレーンが、天然のダムとなって氷河湖形成の場を提供し、決壊の主役を演じているのである。

ヒマラヤのデブリ氷河はこの 100 年ほど前から縮退に転じた。縮退すると氷舌は薄くなって行く。即ち氷舌表面は低下する。表面が低下を続けると、遂には氷舌がモレ

ーンで囲まれた窪地となる。行き場を失った水が窪地を満たすことになる。これがモレーン堰き止め氷河湖である。従って、末端に水を通さないモレーンを氷舌前面に持つあらゆる氷河の縮退過程でモレーン堰き止め氷河湖は形成される。但し、氷河湖が出現するか否かは、氷舌表面の低下速度が速いか遅いかに依っており、表面低下速度が速い氷河では氷河湖は早く形成され、遅い氷河では未だ氷河湖の形成が見られない。もっと遅い氷河では、氷河湖が形成されないまま次の拡大に転じることもあろう。地球温暖化は表面低下速度を加速し、氷河湖の形成を早めていると考えられる。

3. デブリ氷河の表面低下

デブリで覆われた氷河表面の上昇や低下、即ち氷河が厚くなったり薄くなったりするのは：

- ① 氷河の表面質量収支、 b
- ② 氷河の動力学過程による氷厚の増減、 Δh

で決まる。 b は氷舌が消耗域にあることから、負であり、降り積もる雪の量を超える融解によって表面は低下している。氷河を横断面で区切ったある体積の氷体を考えたとき、上流側から流れてくる氷の量から下流に流れ去る氷の量の差が正の時は圧縮流となり、上昇流（湧昇流）が生じて表面は上昇する。負の時は伸張流となって、下降流（沈降流）が生じ、表面は低下する。消耗域は一般に圧縮場にあるので表面は上昇し、 Δh は正である。従って、 $b < 0 < \Delta h$ であり、 b の絶対値が Δh のそれより大きいと低下するし、小さいと上昇することになる（内藤望、2001）。

現在のモレーン頂部(crest)と氷河表面との比高は、氷河が縮退に転じてから100年ほどの間に、最大比高部分で60-100mに達している。たとえ $\Delta h > 0$ であっても、 b の絶対値が大きかったために表面は低下したのである。

表面低下速度は氷舌表面の質量収支（主に融解速度）と湧昇流との綱引きで決まる。氷河によってこれらにどのような違いがあるのだろうか？

4. デブリ氷河の融解

氷河表面のデブリの厚さが10mm以内までは、融解を促進するが、これを超えるると融解を抑制する。デブリ氷河は、融解を抑制するに十分な厚さのデブリを表面に載せているため、融解が著しく抑制されている。デブリがなければ、氷河末端が上流へと後退していたであろう氷舌部分が、未だエンドモレーンに接しているのがデブリ氷河の大きな特徴である。

氷舌を覆うデブリの厚さは均一ではない。だから融解速度も均一ではないため、氷舌表面には数mから10数mもの大きな凹凸が形成される。凹部と凸部を結ぶ斜面勾配は時間と共に大きくなり、斜面上のデブリは凹部に落下し、氷が露出した氷壁が出現し、一夏に10mもの高速で融解する。凹部には融け水が集まり、池が形成される。池はデブリ域よりも熱を効率的に吸収し、その下にある氷の融解を促進する。温まった池の水が氷河内水路に流れ込んで水路を拡大し、遂には天井が陥没し、新たに池と氷壁のセットが出現することもある（坂井亜規子、2001-a）。氷舌上の池は安定的に長期間、維持されることはなく、できては消え、消えてはまた別の場所に形成されている。デブリ氷河氷舌表面に形成される氷崖と池が氷河の融解を促進している。そのため、氷が厚さ1mを超えるデブリに覆われるとほとんど融解はなくなるが、実際のデブリ

氷河では、全体として平均的なデブリの厚さから期待される以上の融解が起こっているのである（坂井亜規子、2001-b）。

デブリは融解を抑制するが、氷崖と池はその抑制効果を薄めている。デブリの厚さが薄い氷河ほど、また融解を促進する池と氷壁が多数分布している氷河ほど融解による表面の低下速度は大きい。

池と氷壁が発達している氷河とそうでない氷河があり、これらの出現位置と数密度がどのように決まるのかはまだよく分かっていない。

5. 氷河の表面傾斜と流動

他の条件が同じであれば、表面傾斜が急な氷河ほど流動速度は大きく、緩いほど小さい。流動速度は氷河末端では0となる。だから、急な氷河ほど末端に向かうにつれて流速の減る割合が大きいから、強く圧縮され、上昇流が大きくなる。これが融解による表面低下を相殺するため、表面低下に長い時間がかかるであろう。逆に表面傾斜が緩く、流動が不活発な氷河ほど表面低下には有利であり、氷河湖が出来やすい。ブータンのルナナ山域とチョモラリ山域の氷河では、氷河の表面傾斜が 2° 以下の氷河にのみ氷河湖ができています（Reynolds, 2001）という観察結果は、上の推論を支持している。

氷河の表面傾斜の緩急は氷河湖の形成条件の重要な一要素である。

6. 水浸しの氷舌

ゆっくりと表面が低下しつつあるデブリ氷河に、氷河湖がいかなるタイミングで形成されるのであろうか。その推論のために、氷河流域からの排水システムと氷河内地下水について考察してみる。

これまでの観察によると、全てのデブリ氷河流域には表流河川が見られない。デブリ氷河集水域からの融解水と雨水は、一旦氷河内に張り巡らされている氷河内水系に取り込まれ、最終的には氷舌末端域で氷河上に湧出し、氷河上の河川となってモレーンの最低部から排水されている。このような水系を通して排水される水量は、集水域面積が77.6平方kmのツォー・ロールパ氷河湖を例にとると（Yamada, 1998）、年間およそ1億トンに達する。

多量の水が氷河の中を流れて下流し、モレーンを乗り越えて排水されているということは、氷河上の河川やモレーン流出口の水面レベルより下部にある氷体内の空隙やムーラン、クレバス、氷河底や氷河内水路、三叉粒界等が水で満たされていると考えないわけには行かない。冬期に表層数mは凍結するであろうが、融解が始まってからまもなく、氷舌は水浸しになり、その水面の連なりである氷河内地下水面は、下流から上流へと緩い動水勾配をもって分布することになるだろう。事実、ヒマラヤのヤラ氷河やカムチャッカのカレータ氷河、シベリアのN0.31氷河、パタゴニア北氷陸の氷原部など、世界中の氷河で、消耗域の裸氷体を掘削すると、地下に水面が現れる。モレーンに縁取られたデブリ氷河氷舌を掘削すると、地下水面が現れるに違いない。地下水に関する十分な情報は未だなく、今後の観測を待たねばならない。

7. 氷河湖の形成仮説

デブリ氷河の氷舌表面が、動力学的過程による表面上昇に打ち勝って、融解によっ

て低下を続け、表面が遂に地下水面まで達した時、氷河表面に池が安定して存在し続けることが出来るようになる。水面が地下水面に一致してしまった池は、もはや消える理由は無い。池は長期に維持されることとなる。池は効率よく短波放射を吸収し、拡大の一途を辿る。氷河湖が誕生した瞬間である。

氷河湖の形成が開始されるのは、氷河表面が一番早く地下水面に達するような場所である。消耗域では上流ほどデブリの厚さは薄い、気温が低いため（融解時期が短い）、融解速度は遅い。一方、下流ほど気温が高く融解には有利であるが、デブリの厚さが厚くなるため、融解速度は減少する。その中間に、デブリの厚さの割には気温が高く、融解による表面低下速度の最も大きい領域がある。一方、圧縮流による表面の上昇速度にも、氷河の流動方向にある分布をもつ。両者の和で表面低下の最も大きな地点が決まるので、これを予測することはそれほど単純ではない。ともかく、氷舌の上流と末端との間のどこかに、表面低下速度の最も大きな領域が出現し、そこに氷河湖が誕生する。

氷河の表面傾斜が小さく、平坦なほど、氷河表面レベルの低下につれて、同時に広範囲に池が地下水面に到達する。一斉に池が安定的に維持されるようになり、時間の経過と共に拡大して互いに繋がり、池から湖へと短時間に成長するであろう。一般に、氷河表面は下流に傾斜しているから、地下水面の氷河表面からの深さは下流ほど浅く、上流ほど深いと考えられるので、表面傾斜が急な氷河ほど、一斉に池が出来ることは無く、池から湖への初期の拡大には不利で拡大速度は遅いであろう。

以上はこれまでに得られた知識と観察結果をもとにして、若干の物理的常識を加味して描いた氷河湖の形成機構に関する作業仮説である。これを検証するためには、氷河湖を持たないデブリ氷河と既に氷河湖を持つ氷河とをいくつか選択し、比較しつつ観測・観察するのが近道であろう。形成機構を量的に記述できれば、ある任意のデブリ氷河に氷河湖が形成されるかどうか予測可能となる。現場での観測には困難な観測項目もあろうが、今後のより一層の情報の収集が待たれる。

文献

- 内藤望 (2001) : ネパール・ヒマラヤの近年の氷河縮小に関する数値実験的研究。名古屋大学大学院理学研究科博士論文主論文
- 坂井亜規子 (2001-a) ヒマラヤにおける岩屑に覆われた氷河の融解過程に関する研究。名古屋大学大学院理学研究科博士論文主論文
- 坂井亜規子 (2001-b) 岩屑に覆われた氷河の融解過程。雪氷、63(2)、191-200.
- Shiraiwa, T. (1992) Freeze-thaw activities and rock breakdown in the Langtang Valley, Nepal Himalaya. *Environ. Sci. Hokkaido Univ.*, 15(1), 1-12.
- Reynolds, J. M. (2000) On the formation of supraglacial lakes on the debris-covered glaciers. *IAHS*, 264, 153-161.
- Yamada, T. (1998) Glacier lake and its outburst flood in the Nepal Himalaya. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and ice. Monograph No. 1. pp96.