

アルプス永久凍土の研究

加賀美 英 雄

第4回国際地形学会が1997年8月にイタリアのボローニャ大学で開催された機会にアルプスのフィールド・トリップが企画された。フィールド・トリップのテーマは、「アルプスの周氷河域の山岳永久凍土と斜面安定の研究」というもので、イタリア雪氷学会のフランセスコ・ドラミス教授（ローマ第三大学）とスイス科学アカデミーのウィルフリード・ヘーベルライ教授（チューリヒ大学）が案内者であった。訪れた所は、スイス側はベルニナ・アルプスのサンモリッツ周辺と、イタリア側はステルビオ国立公園のボルミオ周辺などであった。

参加者は13カ国から50名であった。日本からは都立大学の岩田修二教授（当時）や筑波大学の松岡紀数講師（当時）であった。松岡さんはこの時期、チューリヒ大学理学部地形学講座のヘーベルライ先生の研究室に滞在中で、このフィールド・トリップの案内者の一人でもあった。

1. チューリヒからサンモリッツへ

チューリヒ市はチューリヒ湖に面した、落ち着いた街である。中央駅の西の高台に住宅地に囲まれたチューリヒ大学がある。大学は1833年に創立された。1908年に連邦工科大学（ETH）と統合し、スイス唯一の国立大学となる。1921年にETH出身のアルバート・アインシュタインがノーベル物理学賞を受賞する頃までは物理学に関して著名であったが、その後は化学や薬学の研究で受賞者を出している。

フィールド・トリップはチューリヒ中央駅からバスで出発した。バスは東に向かい、チューリヒからウォーレンゼーの西縁までは中新世のモラッセ盆地である。そこからウォーレンシュタートまでは褶曲した石灰岩よりなるヘルベチア帯が発達している。チューリヒからここまで約80 kmである。

マイエンフェルト手前のサルガニスの町でライン川の源流のアルペンライン川を渡る。ここで、チューリヒから来る東西のルートと南北に通るアルペンライン川のルートが交差するのである。南北のルートはボーデン湖畔のプレゲンツからほぼ真南に向かい、リヒテンシュタイン侯国の首都ファドゥーツや、マイエンフェルトを通り、この付近のグラウビュンデン州の州都であるクールを経て、シュプリューゲン峠（2,113 m）を越えれば、イタリア側のコモ湖に達する。このい

わゆるアルプス越えのドイツルートはクールに司教区聖堂が設けられており街道が安全であったことと、水運が利用できて便利なことから、ローマ時代から交通の要路として重視されてきた。

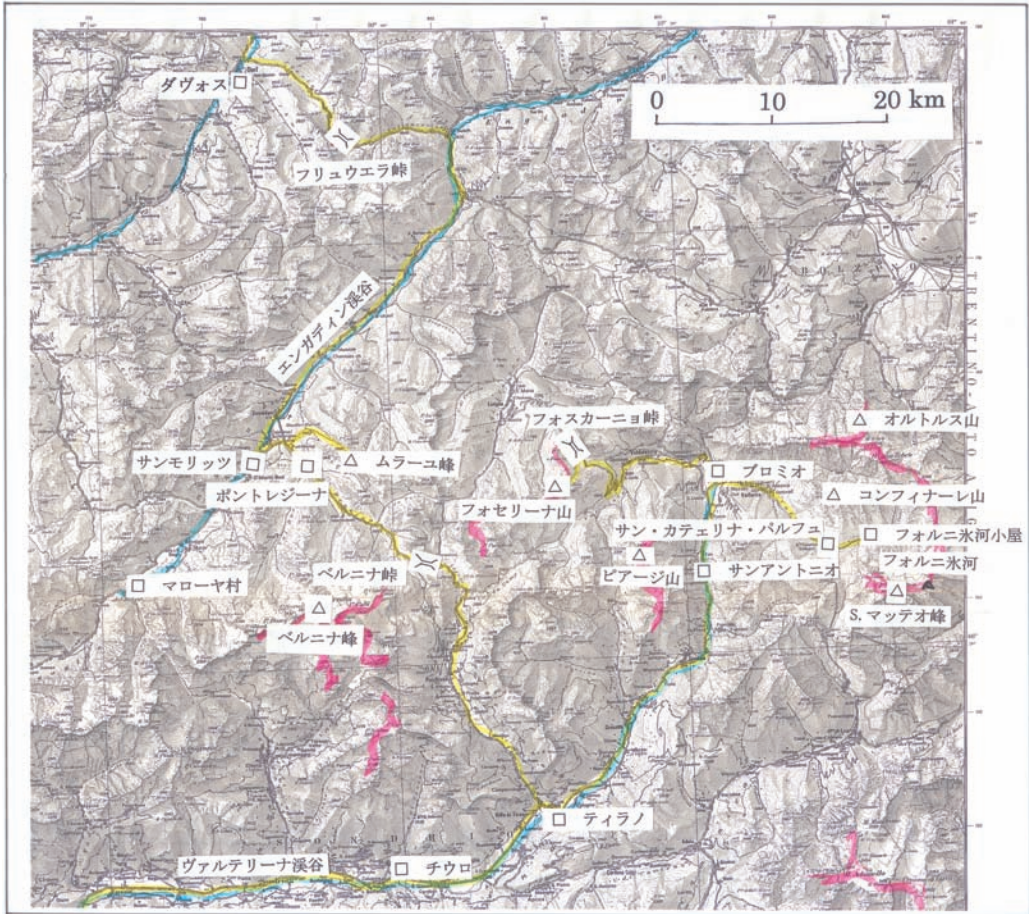
マイエンフェルトの付近は赤ワインの産地として有名である。1635年にフランスのローハン侯爵がバーガンジー地方のぶどうを移植してワイン作りをもたらしたという。スイスの氷河特急の食堂車で提供するワインはヴァリス産が75clで44フランであるが、マイエンフェルト産も70clで42フランと表示されており、健闘している。ちなみに、その名称はMalanser Blauburgunderであり、ラヴェルの説明によると、その長引く残り味と果実の香りが魅惑的であると述べている¹⁾。

マイエンフェルトに良いぶどうが栽培されるのは、気象現象のフェーンと深い関係があるといわれている。フェーンは特に春先にアルプス北麓の谷に吹き荒れる激しい南風の名称である。南から吹いてくる強い風がアルプスの高所を越えて、北斜面を下るときに気圧の低下による大気の断熱膨張で急激に温度が上がり、乾燥した強風を吹きつけるのである。従って、もし火事が起これば手の付けようがない惨事となるのである²⁾。しかし、このことが他の地域より早く春を呼ぶことになり、植物の生育にプラスとなるといわれている。地形の関係からフェーンがよく通る谷と、通らない谷に分かれる。よく通る谷は南北に伸びた谷である。アルペンライン川の谷筋は将にこの条件に合った、フェーンの通り道であったので、ぶどう栽培に適していたのである。

マイエンフェルトを語るときに逃すことが出来ないもう一つの話がある。それは、児童文学の優れた作品の一つとされる「ハイジ」の故郷ということである。1880～81年にチューリヒ在住のヨハナーナ・スパッレ（1827-1901）が書いた物語である。彼女は1870年頃、マイエンフェルト東南のワインの村イエーニンスにある友人宅に滞在してこの物語の構想を得たという³⁾。

アルペンライン川の谷をラントコートで分かれて、東に向かいダヴォスへの道に入ると道沿いに立派な露頭があり、ベンニン帯の深海性互層が見られた。互層の挿みに白雲岩を観察するようになった。クロスターズを過ぎた辺りから変成岩が分布するようになる。オーストロアルプス帯に入ったとみられる。ダヴォスの付近では雲母片岩が分布していた。アルプスの地質構造帯区分については、スイスの国家プロジェクトとして行われたアルプス横断地震探査を議論した筆者の論文を参照されたい¹⁵⁾。

ダヴォスからサンモリッツに越える道に入ると、角閃岩～グラニュライト相の変成岩が分布しているのが観察された。このあたりから添付したアルプスの地形図の範囲に入る（第一図版）。頂上のリュウエラ峠（2,389 m）に達する。サルガニスから約48 kmである。ここはラエティア・アルプスに属し、ハーベルライ先生の古戦場である（図1）。先生は1972年にここの永久凍土の研究で博士論文を書いた。山登りが好きであったので、当時教授であったローリングトン先生の指導で永久凍土の問題に取り掛かった。夏に雪が残るのは、斜面上部ではなく、斜面下部から湖水面に接するところで、その地下2 mには30 mの厚さで氷塊が存在することが地震探査の



第一図版 スイス東部・イタリア北東部の地勢図

Landeskarte der Schweiz, 4. (1 : 200,000) Bundesamt für Landestopographie, 1985

結果明らかになった（図2）。冬の初めになり初雪が積もったときに、雪と地面の境界の温度を測定すると、斜面上部では 0°C であったが、斜面下部では $-2\sim-3^{\circ}\text{C}$ であった。永久凍土が存在するところは地面が過冷却していたのである。こうして積雪初期に地中温度を測定することにより永久凍土の分布図を描くことが可能になった。これを BTS (Bottom Temperature of the Snow-cover) 法と呼んでいる⁴⁾。

フリュウエラ峠を東に下るとサンモリッツの谷である。ドナウ川上流のイン川の流域をエンガディン地方というが、谷に沿って澄んだ水をたたえた湖が連なる景観と、シャレー風（木造で切妻屋根構造）の家々の内側にくぼんだ窓辺に飾られた綺麗な花が美しい雰囲気を提供している地域である⁵⁾。ベルニナ・アルプスの中心地として、1,822 m の標高のサンモリッツはホテルその他の施設で総計 13,000 ベッドを提供する高級保養地である。従って、行政当局は岩盤崩落などに極度に神経を使っており、その理由でここがチューリヒ大学の研究の中心となっている。フリュ



図1 フリュウエラ峠の崖錐の前で説明をする
ヘーベルライ・チューリヒ大学教授



図2 フリュウエラ峠の崖錐が作る斜面。これが岩
石氷河であることがヘーベルライ教授の研究で
明らかにされた（雪を被った部分）



図3 シャーフベルグから南西方に見
えるサンモリッツの町。その左遠
方にマローヤ村さらにプレガグリ
ア渓谷が続く



図4 シャーフベルグから南東方に見
えるベルニナ渓谷のU字谷

第二図版

ウエラ峠からサンモリッツまで46 kmである。

サンモリッツからベルニナ渓谷に入り、もう一つの高級リゾートであるポントレジナのプント・ムラーユからケーブルカーに乗り、頂上のムオッタス・ムラーユ(2,453 m)に上がる。ムラーユ谷を南東にさかのぼり、南に分岐するコースに入り、ムラーユ沢を渡るとベスチャ山(2,647 m)に登る心臓破りの急坂がある。ベスチャ山から尾根伝いに南東に辿ると、標高2,731 mのセガンティーニ・ヒュッテに至る。現在は山小屋となっているが、アルプス画家のジョヴァンニ・



図5 ラス・スールスの崩壊した石塁（手前）と、遠方に見られるのはフレーム防御柵。フレーム防御柵は落石と雪なだれ防護のための新施設である



図6 ラス・スールスの崩壊した石塁群とその直下に見えるポントレジナの町



図7 ムラーユ峰の圏谷に発達する岩石氷河。左遠方にベルニナ峰が見える



図8 ムラーユ峰の圏谷に発達する岩石氷河を研究するためにチューリヒ大学が設置したNo.2観測井。温度計や歪み計が設置されている

第三図版

セガンティーニ（1858-1899）がここで41歳の生涯を閉じた場所である。小島烏水によれば、セガンティーニの描く山はあくまでも人間、家畜、草花などから離れない、高原の自然をみているという。特に、セガンティーニの山について注目すべきことはアルプスの雪の光、高原の澄み切った大気を心洗われるすがすがしさで描きだしていることであると述べている⁶⁾。セガンティーニの傑作のうち「アルプスの真昼」や晩年の三部作「生」、「自然」、「死」はサンモリッツのセガンティーニ美術館に飾られている。エンガディンの付近は乾燥した高気圧が卓越する氷河地域であるために、澄み切った高原の光の景観が楽しめたのである。画家はそれを直感的に理解していたのである。

セガンティーニ・ヒュッテから南西を展望すると、断層に沿って形成された氷食谷のサンモリッツ湖やその先にあるセガンティーニの墓地のあるマローヤ村、さらにその先に延びるオーバー・



図9 ムラーユ峰北壁に見られるガレー（上部）と崖錐コーン（下部）



図10 崖錐コーン下部に発達するムラーユ岩石氷河の先端部に見られる典型的な波動円弧模様。これは岩石氷河を決定する重要な特徴である



図11 イタリアのボルミオ北西にあるフォスカーニョ峠 (2,291 m) の案内板



図12 南東斜面のフォスカーニョ岩石氷河には波動円弧模様は観察されるが、永久凍土は確認されず相当以前から非活動的であると判断された

第四図版

エンガディンの谷が見渡せる（図3）。また南東を遠望するとベルニナ峰（4,049 m）やそこから流れ下るモルテラッチュ氷河の壮大な景観を含むベルニナ渓谷のU字谷を見ることが出来る（図4）。まさに、画家が秘蔵した思い出の山の景観である。

セガンティーニ・ヒュッテから南東へ、ムラーユ峰（3,157 m）、ランガート峰（3,262 m）と連なるあたりを土地の人々はシャーフベルグ（羊の山）と呼んでいた。羊の放牧をしていたのだろう。セガンティーニもシャーフベルグへ荷物を上げたと言っている。ムラーユ峰に至る斜面にラス・スールズと呼ばれるところがある。この場所の南側の真下にポントレジナ町があり、町から見上げればこの斜面はオーバーハングした斜面の肩の部分に相当する。標高2,500～2,700 mの斜面に何列にもわたって石塁が作られている。これは土石流防止の目的で1930年代のいわゆる不況時代に、失業対策として行われた事業であったそうである（図5）。この辺りの基盤岩



図13 フォルニ氷河に取り付く手前で通ったマルガ・ダイ・フォルニ村のチーズ作り



図14 ステルビオ国立公園の中で最大のフォルニ氷河の全景。マルガ・ダイ・フォルニ村から登った標高2,500 m地点からの遠望



図15 キャディニィ峰直下から流下するフォルニ氷河の主流部。表面に発達する縞模様（フォリエイション）が氷河を横断している



図16 S.マッテオ峰の北東尾根の露岩地帯から下る第二中モレーンを下流方向に見る

第五図版

はオーストロアルプス帯のランガート片麻岩で、白雲母片岩やクロリトイド片岩などからなっている。その石を積み上げて幅1 m、高さが2.5 mの壁を作り、それが等高線に沿って何列も谷を横断している様子は壮観である。石塁の総延長は15 kmに達するという説明であった。ところが建設後70年も経つと、この石塁自身が崩壊して土石流となる危険性がでてきたのである（図6）。また、このような築堤方式（ダム壁）では小さな崩壊で埋まってしまうと、次の機会にはオーバーフローして役に立たないのである。従って、近年では鉄棒を組んだフレームだけの防御柵が考案されていて、斜面に設置されている。防御柵は土石流と雪なだれに対して有効なのである⁹⁾。

チューリヒ大学の観測井はこの斜面上部に当たるムラーユ峰の圏谷中の標高2,740 m（2号井）と2,760 m（1号井）に建設されていた（図7, 8）。圏谷とは氷食山地の山頂直下の山腹に見られる腕形の谷である。ここでは永久凍土は標高2,715 mより上に観察されており、1号井では地表



図17 フォルニ氷河西部の氷原。岩石の散乱で灰褐色を呈する氷河



図18 フォルニ氷河の末端部。氷河谷階段と呼ばれる片岩類が作る谷棚が大規模に露出している



図19 ティラノより18 km 上流のソンドロ地域でのアダ川斜面大崩壊(1987)の跡



図20 ティラノの街で出会ったポントレジナ行きベルニナ急行列車

第六図版

から70 m までの地温は 0°C 以下のマイナスで、永久凍土が存在していると判断される。深度12~16 m には80%以上が氷よりなる層が確認された。歪み計による水平方向の変化では深度11~15 m において4 cm/年という移動速度値が観測されている。航空写真による表面の移動速度計測によると、1号井では3 cm/年であり、1号井と2号井の中間の谷筋部では5 cm+/年と最大になっている。このような研究から判ったことは、氷を含む崖錐(崩れ岩の塊)がゆっくりと流下していることであり、そのような運動する崖錐を岩石氷河と呼んでいる。ポントレジナ町の真上に、現在氷の氷河はないが、斜面全体がゆっくりと移動する岩石氷河は存在していたので

ある。最近7年間の観測井の温度変化をみると、永久凍土の温度は -2.7°C から -1.5°C に上昇している。永久凍土の温度が -1.5°C をこえて高い温度を示すものを温暖永久凍土とよび、このような状態になると斜面安定が難しくなり、斜面崩壊の危険性が增大するという。永久凍土は埋没している氷塊の上部から溶けて行くから、永久凍土より上の自由になった崖錐層（これを活動層 Active layer と呼ぶ）は厚さを増し、斜面はいっそう不安定になる。この不安定な活動層が崩落する危険があることがこの観測井での研究によって証明されたのである。

ここで思い出すのは、ペルーで地震と火山が引き金となり、氷河堆積物や永久凍土層よりなる〈岩屑なだれ〉が生じた例である⁷⁾。1970.5.31のペルー地震（マグニチュード7.8）はリオ・サンタ河口沖20 kmの海底で発生した。ところがこの地震が契機となり中央ペルー地域を南北に走るアンデス山脈ネヴァドス・ファスカラン峰（6,764 m）の4,700 mにある火山が噴火し、付近に発達している氷河や基盤の流紋岩崩壊を伴って崩落した。〈岩屑なだれ〉は5 km下にあるリオ・シャクシャ川の谷に入り、15 km下にあるリオ・サンタ川に達して谷を埋めた。この間の谷の傾斜 $0.1\sim 0.2$ （ $6\sim 12^{\circ}$ ）を土石流は69 m/秒（250 km/時）の高速で駆けぬけた。なだれた容積は1億 m^3 と計測されている。なだれ量が0.1億 m^3 を超えるものを巨大崩壊と呼ぶが、このような規模になると移動速度も移動距離も飛躍的に延びるといふ。〈岩屑なだれ〉は激しい乱流状態にあるので岩屑粒子相互の衝突が分散力を卓越させて高速の流動状態を維持するからであるといわれている。

この時の〈岩屑なだれ〉はリオ・シャクシャ川右岸高所にあったユンガイ町を完全に埋没し、左岸高所にあったランライルカ町を半壊したのをはじめ、埋没したリオ・サンタ川の再決壊で生じた泥水流で下流の町を洪水災害として破壊した。死者4万人以上と建物の全半壊186,000戸というのが全被害であった。この時、温暖化の影響が巨大崩壊を招いたのではないかということが話題となった。

スイスでは1806年のロスベルグの岩盤すべりや、1881年のエルムの岩盤崩落が知られている。また、イタリアでは1963年のバイヨント・ダムの岩盤すべりが著名である。これらはどちらかといえば、低地の岩盤すべりであった。ところが温暖化に伴う永久凍土の融解という新しい問題が発生して研究が急展開しているのである。高級リゾート地を抱えるアルプスでは考慮しなければならない緊急の課題なのである。

ムラーユ峰を北側に下り、ムラーユ谷におりる。ムラーユ峰の北斜面の上部は岩石が直接露出し細い尾根と谷を刻んでいるガレーと呼ばれる急斜面である。下部は崖錐がコーン状に堆積している円錐形崖錐と呼ばれる斜面を構成している（図9）。この崖錐コーン内部に永久凍土が存在すると、岩石氷河という流状形態をとり、溪谷底に流れ下る。ここに見られるのをムラーユ岩石氷河と呼んでいて、活動層は最下部付近で20 mの厚さに達している。この流れの最先端の部分は周囲との摩擦で減速するので圧縮流となり、表面が波打った波動円弧模様を形成している。こ

れを見ると岩石氷河は将に、流れているのだということを実感できる。航空写真による観測によると、中軸部分での水平流動速度は21 cm/年であった（図10）。このムラーユ岩石氷河は綺麗な円弧の形態と研究された実績から、各種の雑誌や教科書などで紹介されており、いわば岩石氷河の最高の名所となっているのである。

2. サンモリッツからボルミオへ

ポントレジナからベルニナ渓谷を南東にさかのぼり、ベルニナ峠（2,328 m）を越えるとイタリアのポー川の流域に属するポスキアーヴォ谷を下ることになる。スイス・イタリア国境はティラノに近いポスキアーヴォ谷の出口付近にある。ティラノの町はポー川支流のアダ川とポスキアーヴォ谷の間に広がっている。ここはロンバルディーア（州都はミラノ）の地籍である。

このルートを走るベルニナ急行はクールとティラノを結んでいるが、ポントレジナとティラノ間を2時間で走るローカル線である。途中にベルニナ峰より流れ下るモルテラッチェ氷河や、パリュ峰より流れ下るパリュ氷河が見られるうえに、ループ式のトンネルやオープンループ式の鉄橋などがあり、鉄道ファンに人気が高い。我々はバスの旅であったが、モルテラッチェに停車してベルニナ・アルプスの景観を楽しみながらお茶を飲んだ。ここには白雲岩の大露頭があり、写真に収めた。

ロンバルディーアなどに属するオルトレス・アルプスには305の氷河が存在し、その総面積は113 km²に達する。岩石氷河は498が数えられるが、このうち活動中は18%、疑わしいが19%、判らないのが5%、非活動中が58%と集計されている⁸⁾。永久凍土の存在は著しく限られていることが判る。

アダ川上流のボルミオを中心に3か所の見学をした。最初に訪れたのは、ボルミオ北西のフォスカーニョ峠（2,291 m）周辺にある岩石氷河である（図11）。フォスカーニョ谷の支谷を南西にさかのぼるとフォセリーナ山（3,087 m）に達する。途中に何箇所にも砂防用のダムが建設されていたが、いずれも岩屑に埋もれていた。この山頂付近に東に開いた圏谷がある。また、山頂を西側に越えたところに、北に開いた圏谷があり、ホッパの谷に続いている。東に開いた圏谷のフォスカーニョ岩石氷河は標高が2,500～2,730 mにわたり発達している。BTS法測定では連続した永久凍土は観察されなかったので、非活動的なものと考えられた（図12）。一方、北に開いた圏谷に発達するホッパ岩石氷河は標高2,670～2,830 mにわたり存在し、BTS法測定では-3°Cの連続する永久凍土が確認された。このような違いは、日射量に関係する北向きの地形的な理由と外気温に関係する標高の違いが関係すると考えられる。この辺りでは標高が100 m登る毎に0.6°C下がるといわれている。また、年平均気温が-1°C以下であると氷塊が土中であって越冬するという。従って上述の違いは標高が2,700 m付近にあって活動的と非活動的永久凍土を分けて

いるようである。もう一つ興味あることは岩石氷河中の植物性土壌を使った C¹⁴ 年代測定によると、ホッパ岩石氷河では 1,120 年 BP (Before Present) である、つまり現代に形成されたものというのに対して、フォスカーニョ岩石氷河の形成年代は 2,700 年 BP 以前としか判らなく、事実は相当以前にできた古いものということになったのである。そうすると、現代の温暖な気候によって永久凍土は融解し、消失したというシナリオのほかに、後氷期温暖化の流れの中で消失していった別系統の岩石氷河もあったということになるのである⁴⁾。自然は誠に奥が深いということである。

次に訪れたのは、ボルミオ南東のステルビオ国立公園のフォルニ氷河である。ステルビオ国立公園はオルトルス (3,905 m) ~セベダーレ (3,769 m) 山群を中心とする山岳公園である。公園はボルミオを中心とするロンバルディーア域、ペイオを中心としたトレンティーノ域、ステルビオから入るオルトルス山の北麓などのアルト・アーディジェ自治州 (州都ボルツァーノ) 域よりなる。1935 年にアルプスの高山環境を保護するために国立公園となった。特に、南チロル地方は住民が多く住むことで、自然と生活の共存が問題となる特別な例となった。総面積は 1,350 km² である⁹⁾。

地学的にここはオーストロアルプス帯の中心である。オーストロアルプス帯はペンニン帯ナップ群の根っこに当たる部分に相当し、この辺りの東アルプスでは幅広く分布している。オルトルス山より北にはヴェノスタ片岩類が分布する。オルトルス山はジュラ~白亜紀の白雲岩類が分布する。コンフィナーレ~セベダーレ山には大理石が分布する。それより南のフォルニ氷河域にはボルミオ片岩類が分布する。一方、ボルミオより南でソングラより北のアダ川沿いには基盤の二畳紀の流紋岩~花崗岩が分布している。

アダ川が作る東西方向の渓谷はアルプス南帯を限る周アドリア海構造線 (インスブルック構造線) を示している。ここを境界としてアドリア海プレートの変成岩が南側に分布するのであり、北側にはヨーロッパプレートのナップが分布する。それらを貫いてアダメルロ山群には広範囲に 30~40 Ma 年代を示す花崗閃緑岩が露出する特異な分布を示している¹⁰⁾。

フォルニ氷河はステルビオ国立公園で最大の氷河であり、面積は 13 km² を占めている。氷河は積雪が固まって氷となり、その積み重なった重みと、斜面の傾斜に由来する地球の重力の作用によって流動が始まる。氷河が流動する理由は、主に氷の塑性変形 (固体の流れ) と、底面に水が存在する場合に生じる底面すべりによって生じる。氷河の流動速度は年間数十 m から数百 m 程度である¹¹⁾。氷河が谷地形に沿って流動すると基盤を侵食して氷成 (食) 谷を形成する。谷壁は氷河の強い下刻作用によって鉛直に削られて急崖となり、谷底は氷成堆積物が存在する場合は平坦となり、深くえぐられた場合は氷成湖となる。谷の横断形状は U 字形を呈することから、U 字谷ということがある。氷成谷の形状は水流によって作られた谷より直線的になり、遠方まで連続する。例えば、ライン川ではボーデン湖まで、イン川ではミュンヘン近傍のパートチルツまで、

アダ川ではコモ湖までと、驚くほど遠方にまで達している。

フォルニ氷河の最高点は標高 3,678 m で、最低点は標高 2,420 m である。氷河の涵養域は三ヶ所あり、西から S. マッテオ峰 (3,678 m) の圏谷、キャディニィ峰 (3,524 m) の圏谷、およびパロン・デ・ラ・マーレ峰 (3,685 m) の谷である。東西に伸びた涵養域の全幅は 6,500 m になる。この複合氷河がフォルニ谷に懸かる末端までの南北の長さは 3,800 m にすぎない。記録のある 18 世紀以来の氷河の後退は 2,000 m に達するという。北に面した地形上の配置と広い涵養域が幸いして、氷河がかろうじて現在も残存しているのである。

プロミオを早朝にバスで出発した我々は南東に向かい、サン・カテリナ・バルフェを目指す。この町はコスタ・ソプレッタ山 (3,053 m) の広大な北麓に多数のリフト類を展開しており、トレッキング客で溢れていた。ここからは四輪駆動の小型車に乗り換えてフォルニ氷河小屋 (2,178 m) まで行く。ここがフォルニ氷河横断トレッキングの出発点であり終点である。我々のためにアルプス登山ガイドのプロが待機してしてくれた。なお、18 世紀にはこの辺りまで氷河末端は達していたそうである。現在の氷河末端に比べ 2,000 m 以上も前進していたのである。19 世紀末には、氷河はセデッチェ川の出会いまで後退した。そしてマルガ・ダイ・フォルニ村に上がる分岐点 (2,242 m) まで氷河が後退したのは 1925 年頃であった。後退速度が一段と速まっているのが読み取れる。

マルガ・ダイ・フォルニ村に登り、農家の庭先に展開しているチーズ作りを写真に収める。この辺りで作られているのは、Bluna Alpina という種類の牛のミルクに、山羊のミルクを混ぜた Britto Dot というチーズである (図 13)。

ここから一気に 2,500 m まで登る。この高さがフォルニ氷河最盛期 (1 万 5 千年前) の側モレーンの尾根筋に当たる。谷氷河ではその縁に側壁から供給される岩屑帯が形成され側氷堆石 (ラタル・モレーン) を作る。この辺りの谷底の標高は 2,200 m であるから、当時は 300 m を越す厚さの谷氷河が流れていたことになる。このモレーン上から見るフォルニ氷河は最も見栄えの良いものの一つである (図 14)。正面左にキャディニィ峰の尖峰が、右に S. マッテオ峰の岩峰があり、その下に見事な氷河が発達している。氷河末端は三筋に分岐して流下している。涵養域三ヶ所を分ける尾根筋に由来する中モレーンの形成が顕著であるからである。氷河の合流によって結合した側氷堆石は岸から遠ざかると、氷河の真中に岩石の筋を作る。これを中氷堆石 (メディアン・モレーン) という。

マルガ・ダイ・フォルニ村とセザーレ・ブランカ小屋の中間地点の山側に乾いた草地付きの岩石氷河が見られる。イナッチィボ岩石氷河という。今は非活動的であるが、崖錐コーンの形態がはっきりと残っている。ブランカ小屋 (2,487 m) は北東から流れ下るロソーレ谷との出会いにある。小屋の直下には 18 世紀頃の側モレーンの瘦尾根が見られる。このモレーン上を遡るのであるが、ロソーレ谷を渡ったところにあるロソーレ池はモレーンによって作られた堰き止め湖の

名残である。2,600 m 付近まで遡ると、新しいモレーンに乗り移る。1870 年代に氷河が一時拡大した時に作られた新規のモレーンである。この辺りで谷底をみると、著しい段差が存在するのが見られる。氷河谷階段といわれるものである。やがて、モレーンのガラ場を下り、ようやく氷河側壁が手に触れる場所に到達する。この部分の氷河はパロン・デ・ラ・マーレ峰の谷を下る氷河である。氷河側壁を見ると、水面全体にこぶし大のやや角張った小石が入っており、側モレーンの一部であることが観察された¹²⁾。この氷河側壁を這い上がると氷河上に出る。

いよいよ、氷河のトラバース開始である。氷河表面は意外と凸凹していて、最初に心配していたような滑って転ぶようなことやガイドの人の助けを借りるようなことはなかった。間もなくキャディニ峰北東のペイオ山の北斜面に由来する、かなり規模の大きい中モレーンに遭遇する。径が 1 m に達するような大きな片岩状の割り石が 30 m 幅で積み重なっている。これを越えるとキャディニ峰の圏谷から流下する氷河本体の氷原を渡る。第一と第二（現在渡っているところ）氷河の我々の上流側には傾斜が急になる所があり、それを下ったところにはセラック（氷のブロック）が形成され、それが再固着すると氷河を横断する割れ目状の縞模様（フォリエイション）が発達しているのが見られるのである。丁度、その模様に沿って我々は氷河を横断することになる（図 15）。

フォルニ氷河の中央で記念写真をとる、標高 2,660 m である。そのやや西よりに融水水穴（ムーラン）が開いている。のぞいて見ると内部は青氷となっている。融水水は氷河底に落ち込み、氷底流路を形成しているとみられる。やがて、S. マッテオ峰の北東尾根の露岩地帯から下ってくる第二の中モレーンに達する。径 2 m 大の巨石が運ばれてきている。モレーン帯の幅は 20 m 程度である（図 16）。これを越えると、最も西側の氷河帯に入る。S. マッテオ峰およびその西側の圏谷から流下する氷河である。ここは表面のみの分布であるが、岩石片が散乱しており、汚い氷河という印象を受ける。このような状態になるとアルベド（太陽光反射能）が著しく下がり融解を促進する。いわば、氷河の末期状態になるのである（図 17）。

ようやく対岸の新規モレーンのガラ場に到着する。その先を上がると、露岩が作る尾根（2,500 m）があり、大きなケルンが作られている。振り返ると、トラバースしてきた氷河全体が見渡せる。下流側から見ていくと、対岸のブランカ小屋より上流側に見事な氷河谷階段が見られ、その谷棚をなす片岩類が綺麗に露出しているのが望まれた（図 18）。また、山頂付近を見ると氷壁が所々で大きく岩肌を露出しているのが観察された。フォルニ氷河は中モレーンの大きな成長を見るに付け、涵養域と消耗域の境界線（均衡線）が上昇しており、特に西側は不健康な氷河に移行しつつあるという強い懸念を抱いたのである。このような条件下では、氷河は融解温度の近くにあり、これを温暖氷河という。この場合、氷舌端は谷棚を越えて永久凍土のない斜面を垂れ下がる状態になるが、それが観察できた。

夕刻、我々全員は無事にフォルニ氷河小屋に帰着し、お茶を楽しむことが出来た。

最後に訪れたのは、ボルミオの南で、アダ川の作る氷食谷のソングロ地域に生じた大崩壊の跡である。ここではアダ川はほぼ南北に走るので、崩壊した斜面は東に面している。斜面直下にはサンアントニオ村落があり、その標高は1,071 mである。この辺りはベルニナ・アルプスの東続きの山脈で、最高点はピアージ山(3,439 m)である。斜面の肩の標高はほぼ2,500 mであり、そこから谷底までの平均傾斜は40°である。崩壊した斜面の基盤は二畳紀の流紋岩～花崗岩で構成されている。

事件は1987年7月17～19日に激しい豪雨が続いたことに始まる。アダ川は洪水となった。7月27日に破局的な岩石崩壊が発生し、0.01億m³の土砂がアダ川を堰止めた。この崩壊で27人が死亡し、堰止湖の決壊を避けるために2万人が避難させられた。この時の経済的損失は11億リラと推定された。現在では、川岸に関しては5段のテラスが構築されて、洪水対策は万全のようであるが、1,500 mの落差のある山腹斜面は崩れたままで、草地も付いているようには見えなかった(図19)。巡検指導者の発言によると、崩壊前には上部の方に永久凍土が存在しており、その上の活動層が厚くなっていたという。また、凍結による岩石剥離も斜面上で進行していたということであった。

イタリア全体で20世紀の100年間に、3人以上の死者がでた地すべり災害は227あり、年率でいえば2.3回/年となる。しかし、経済的損失が1987年災害を上回るのは、次の2件であるといわれる。1994年11月2～6日に西部ピエモンテ地域で、アルバ付近のタナロ川が降雨による洪水と地すべりが発生したことにより氾濫し、死者70人、10の橋が流失し、100以上の橋が損壊を受けた。経済的損失は80～130億リラと推定された。また、2000年10月13～16日にはモンブラン南側のアオスタ渓谷でポー川上流が長引いた降雨と地すべりで氾濫を起し、死者35人、避難した住民4万人に達した。この時の経済的損失は50億リラと見積られている¹³⁾。これらは共に近年の発生であることが注目された。

このように記録を見ると、いずれの災害もアルプスの雪氷現象と関係しているといえる。それは1)永久凍土層の消失に伴う崖錐の不安定化(活動層の厚化)である。2)氷河の保水能力の低下→新雪を氷として保持する氷河の作用のことで、氷河が後退するのは能力低下が顕著に進行していることを示しており、その分だけアルプスの河川は増水しているという問題である。3)基盤岩石の割れ目に染み込んだ水は冬季に凍結し、夏季には融解するのを繰り返すが、液体の水が固体の水になるときに体積が10%増加する。これが岩石を破壊し、崩落を起こす原因となる。この限界高度が上昇しているという問題である。以上、温暖化の時代を迎えて、アルプスの自然災害は高位山腹斜面の不安定化という一つの転機を迎えたといえるのである。なお、最近の世界の巨大崩壊に関心のある方は文献(14)を参照されたい。

ティラノより下流のアダ川の谷をヴァルテリーナ渓谷というが、ここにはNino Negriというワイナリーがある。ベルニナ急行(図20)の終点のティラノより15 km下流にあるチウロ町に

その主貯蔵所があり、味見をさせてもらうことになった。ぶどうは主として Chiavennasca という種類を使い赤ワインを作っている。特にチウロ町付近では、ドライで風味のある Fracia と呼ばれる銘柄を提供していた。

我々はその後、コモ湖を通り、一路ボローニャに帰着した。

謝 辞

このフィールド・トリップへの参加は城西大学の援助によって可能になった、便宜を計って頂いた大学当局に対して深甚な感謝を表す。

本論文の初出は城西大学理・薬学部学生を対象とした「地圏環境」講義において 2005 年 4 月に発表されたものである。

文 献

- 1) railgroumino swissalps. www.rgswissalps.ch, 1997.
- 2) 紅山雪夫：ライン川を巡る旅. 実業之日本社, 2004.
- 3) 荒井満・荒井紀子：ハイジ紀行. 白泉社, 1994.
- 4) F. Dramis, W. Haeberli and others: Guide for the excursion, Mountain permafrost and slope stability in the periglacial belt of the Alps. *Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat.* III, T2, 181-203, 1997.
- 5) 池田光雅：スイス・アルプス旅の宿. 晶文社, 1993.
- 6) 小島烏水：アルピニストの手記. 平凡社, 1996.
- 7) 金子史朗：世界災害物語 II. 胡桃書房, 1983.
- 8) M. Guglielmin, *et al.*: Rock glaciers, Lombardy Italy, 1998. <http://nsidc.org/data>. National Snow and Ice Data Center, University of Colorado at Boulder. Also, *Natura Bresciana*, 26, 35-47, 1989.
- 9) Parco Nazionale Dello Stelvio: <http://www.parks.it/parco.nazionale.stelvio>, 1994.
- 10) Structural Model of Italy: Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy, 1983.
- 11) 若浜五郎：氷河の科学. 日本放送協会, 1978.
- 12) Claudio Smiraglia: Il Ghiacciaio dei Forni in Valfurva. *Lysis*, 1995.
- 13) F. Guzzetti, *et al.*: Information system on historical landslides and floods in Italy. Urban Hazards Forum by United State Federal Emergency Management Agency (FEMA) and the City of New York, January 2002.
- 14) C. Huggel, J. Caplan-Auerbach and R. Wessel: Recent extreme avalanches, triggered by climatic change. *EOS*, v. 89, n. 47, 18 Nov. 2008, 469-470.
- 15) 加賀美英雄：アルプスの形成とその岩石. 季刊水路, 30, 2, 2001, 18-22.

(2008 年 2 月 29 日 原稿受理)

Field study on Alpine permafrosts and rock glaciers at St Moritz, Swiss and Bormio, Italy

Hideo KAGAMI

Abstract

In 1972, Professor Haeberli of the Zurich University discovered permafrost presence inside the Alpine talus by measuring overcooled temperature at the bottom of the new snow-cover in the beginning of winter. This is called BTS (Bottom Temperature of the Snow-cover) method to detect permafrost.

One of the observation well set up by the Zurich University at the rock glacier in the Muragl glacier cirque (2,740 m) near Pontresina indicates that the temperature of the permafrost increased from -2.7°C to -1.5°C for the last 7 years. This may be due to the global warming by green house effect of carbon dioxide.

The rock glacier at east facing glacier cirque of Foscagno (2,730 m), Stelvio National Park indicates distinct characteristic of rock glacier, but its permafrost had melted down by 2,700 year BP or much older time. This is another example of warming in the post glacial period.

The Forni glacier in Stelvio National Park shows rapid retreating of its glacier front, indicating decrease of its ability to keep glacier mass-balance between ice and water because of the global warming.

Alpine areas surrounding many glaciers are popular resort areas for tourists from many countries of the world. Therefore, municipal governments are very keen for the stability of the mountain slopes. This is the reason for organizing the field study trip for world research groups.