

表層コア掘削による利尻山の多年性雪渓の雪氷学的調査

河島克久*・納口恭明**・小林俊市***・佐藤雅彦****

〒 949-6408 新潟県南魚沼郡塩沢町大字塩沢 1108-1 (財) 鉄道総合技術研究所 塩沢雪害防止実験所*

〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1 防災科学技術研究所**

〒 940-0821 新潟県長岡市栖吉町前山 187-16 防災科学技術研究所 長岡雪氷防災実験研究所***

〒 097-0311 北海道利尻郡利尻町仙法志字本町 利尻町立博物館****

Glaciological investigations of the Yamunaisawa perennial snow patch on Mt. Rishiri by means of shallow core drillings

Katsuhisa KAWASHIMA*, Yasuaki NOHGUCHI**, Toshiichi KOBAYASHI*** and Masahiko SATO****

Shiozawa Snow Testing Station, RTRI, Shiozawa, Minami-uonuma, Niigata, 949-6408 Japan*

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-0006 Japan**

Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies, NIED, Suyoshi, Nagaoka, Niigata, 940-0821 Japan***

Rishiri Town Museum, Senhoshi, Rishiri Island, Hokkaido, 097-0311 Japan****

Abstract. Glaciological investigations of the Yamunaisawa perennial snow patch on Rishiri Island, a small island located near the northern end of Hokkaido Island, Japan, were first conducted in September and November 1996 by means of shallow core drillings, with special reference to the internal structure and transformational processes from firn to ice. This snow patch, nourished mainly by snow avalanches in winter, is subject to a rather warm climate accompanied by heavy melting in summer. Core drillings were made at the center of the snow patch using a hand auger, so that we could obtain whole 1-year-old-firn layer with thickness of 4-5 m. The existence of an ice body (continuous mass of ice) could not be ascertained, because debris embedded in the snow patch interrupted the additional drilling. Cores obtained were analyzed for stratigraphy, density, liquid-water content and temperature. Consequently, all the 1-year-old-firn layer was found to be wet and densified to the dry density of 700 kgm^{-3} or more on 21 September. On the other hand, the measurement of temperature profile revealed that the cold wave has already penetrated into the 1-year-old-firn layer up to a depth of at least 2 m on 8 November. Significant increase in the dry density from 700 to 750 kgm^{-3} was seen in this frozen firn layer. The results confirmed that the refreezing of meltwater in firn by cold wave penetration at the beginning of winter contribute to the acceleration of the transformation from firn to ice.

1. 緒言

北海道北端の宗谷岬の西に位置する利尻島は、中央に急峻な山稜の利尻山（標高 1721m）を有する円錐形の火山島である。利尻山には日本最北の多年性雪渓（万年雪）が存在することが知られている。利尻山における多年性雪渓の分布に関してこれまで詳細な調査はなされていないが、利尻山の南東部に位置するヤマナイ（豊仙）沢の上流に存在する雪渓（「ヤマナイ沢雪渓」と称することとする）は現在の気候条件下で確実に越年しており、小岩(1992)は厚さ 45m に及ぶ大雪渓（測定地点や時期は不明）であると報告している。さらに近年、ヤマナイ沢において実施された氷河地形調査によってモレーンの存在が確認されたことから、ヤマナイ沢には氷期に氷河が形成されていた可能性が高いと考えられている（澤口ほか、1994；小崎、1994）。

著者等はこれまで我が国の日本海側の山岳地帯に広く分布する多年性雪渓の内部構造の調査を多数行ってきており、雪渓内の連続的な氷化層（氷体）の有無を明らかにするとともに氷体の形成・維持機構を考察することによって氷河との相違点や共通点について議論してきた（Kawashima *et al.*, 1993; Kawashima, 1997）。日本の多年性雪渓は、主に吹き溜まりによって多量の雪が涵養される吹き溜まり型雪渓と、主に雪崩によって涵養される雪崩型雪渓とに分類できる。これまでの調査から著者等は、吹き溜まり型雪渓については多くの多年性雪渓で氷体の存在を確認し、その主要な氷化機構が初冬の寒気侵入による高含水率状態のフィルン（firm）の再凍結である可能性が高いことを指摘した。一方、雪崩型雪渓については、過去に越後駒ヶ岳の桑ノ木沢雪渓や北アルプスの白馬大雪渓に関して調査を実施したが、未だ氷体の存在は確認できていない。

ヤマナイ沢雪渓は雪崩型雪渓であるが、上記の桑ノ木沢雪渓や白馬大雪渓と比べて極めて高緯度に位置すること、雪渓底部に大規模な流出河川を有しないなど、おかれた環境条件が大きく異なる。した

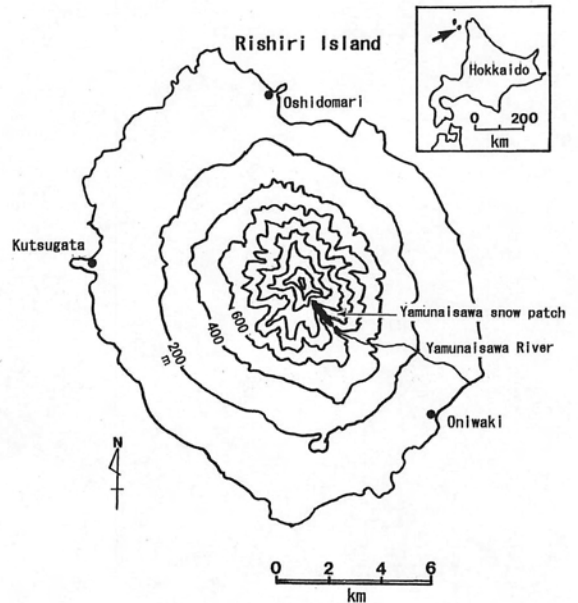


図1 利尻島の地形の概略図。等高線の間隔は 200m。

Fig.1 Topographical map of Rishiri Island. The interval between contour lines is 200 m.

がって、現在の気候条件下でのヤマナイ沢雪渓の内部構造や氷化過程を明らかにすることは、かつて存在した可能性が高い氷河の状況や今後の気候変動に対する雪渓の将来像を探る上で重要であるのみならず、日本の多年性雪渓の地域特性を他との比較から論じる上でも大きな意義がある。

本論文では、これまで雪氷学的調査がなされていなかったヤマナイ沢雪渓において、1996年の消耗期間末期と涵養期間初期に実施した浅層コア掘削の結果について述べ、ヤマナイ沢雪渓の表層フィルンの特徴や氷化過程について考察する。

2. 調査地点

利尻島の概略地形およびヤマナイ沢雪渓の写真（1996年9月21日撮影）をそれぞれ図1、図2に示す。簡易気圧高度計での計測から、1996年の消耗期間末期のヤマナイ沢雪渓（越年規模）は標高約

650m から 1010m にわたって存在しており (標高には数 10m 程度の誤差があり得る)、その全長は約 800m であると考えられる。雪渓の下流方の約半分は、側方の斜面からの土砂崩壊、落石、小規模な土石流などによって数 10cm 程度の厚さの土砂や礫に覆われており、これらの堆積物によって融雪が抑制されている箇所が多い。また、土砂に覆われた雪面には山脈状に 1 ~ 数 m 程度盛り上がった凸部が多数みられる (図 2 の DC 地点の周辺)。これらは dirt corn と呼ばれる堆積物で覆われた氷河上でよくみられる円錐状の表面形態の一種であると考えられ、納口ほか(1998)によってその形成機構が議論されている。浅層コア掘削は雪渓のほぼ中央に位置し、土砂に覆われていない標高約 850m の地点 (図 2 の BS 地点、雪面傾斜 24°) で行った。

3. 掘削およびコア解析の方法

浅層コア掘削には、一回の掘削で直径 8cm、最大長 70cm 程度のコアを得ることができるハンドオー

ガーを用いた。掘削は消耗期間末期の 1996 年 9 月 20-21 日と涵養期間初期の 1996 年 11 月 8 日の 2 回行われた。得られたコアはその場で層位構造の観察と密度、含水率および雪温の測定を行った。密度は、コアを長さ 10cm 程度の円柱状に切断し、その長さ と直径をノギスで測定して求めた体積と電子天秤によって測定した質量とから算出した。含水率の測定には、著者等が開発した熱量計方式の簡易含水率計 (遠藤式含水率計) を使用した (Kawashima *et al.*, 1998)。また、雪温はコアが得られるやいなやコアに小さい穴を開け、そこにサーミスター温度計のプローブを挿入して測定したため、 0.2°C 程度の誤差を含んでいる可能性がある。

4. 調査結果

4.1 消耗期間末期の内部構造

1996 年 9 月 20-21 日に行われた掘削で明らかになったヤマナイ沢雪渓表層部の層位構造、密度および含水率分布を図 3 に示す。深さ 0.94m までの掘削

図 2 消耗期間末期 (1996 年 9 月 21 日) のヤマナイ沢雪渓 (BS: コア掘削地点、DC: dirt corn、TE: 雪渓末端)。

Fig.2 Photograph of the Yamunaisawa snow patch on 21 September 1996. Cores were taken at the site labeled BS. DC and TE represent dirt corns formed at the surface of the snow patch and the terminus of the snow patch, respectively.



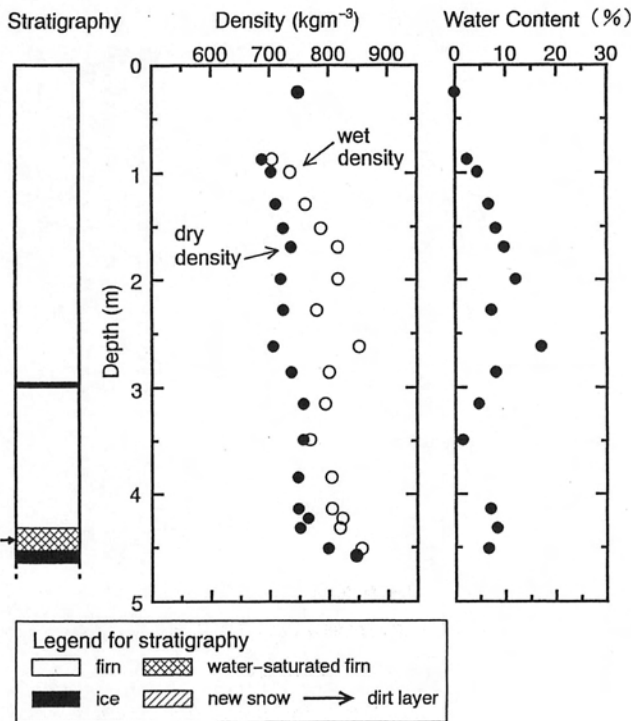


図3 1996年9月20-21日におけるヤムナイ沢雪渓表層部の層位構造、密度および含水率分布。

Fig.3 Stratigraphy, density and liquid-water content profiles at the Yamunai-sawa snow patch on 20-21 September 1996.

は9月20日に、それ以深の掘削は9月21日になされたものである。掘削時の気温は10~16℃であった。表面からの深さ4.62mまで掘削した時点で礫を含んだ氷化層に遭遇したため、それ以上の掘削は不可能であった。

得られたコアは全て水を含んでおり、雪温は全層0℃と考えられるので温度計による雪温の測定は行っていない。深さ4.54mまでは比較的均一なフィルンであったが、2.94~3.00mの深さに厚さ6cmの氷板がみられた。フィルン層下端(深さ4.54m)から掘削した最下端(深さ4.62m)までは氷化していた。この氷化層の直ぐ上のフィルン(深さ約4.30~4.54m)は水でほぼ飽和した状態にあり(帯水層(firm aquifer)と称する)、掘削の約1時間後には掘削孔が約4.30mの深さまで水で満たされた。さらに深さ4.39m以深のフィルンおよび氷化層は小さな土砂を含んでおり汚れ層を形成していた。この汚れ

層は1995年の消耗期間の終わりの雪面を表す年層境界と考えることができる。すなわち、この汚れ層より上に位置するフィルン層が1995/96年冬季間にもたらされた降雪から成っていることを意味する。濡れ密度は含水率の違いに対応し、700~850kgm⁻³の間で変動している。濡れ密度と含水率とから求められる乾き密度は、表面から深さ約3mまでが700kgm⁻³程度であるのに対し、深さ約3m以深では750kgm⁻³程度まで、帯水層が形成されている深さでは800kgm⁻³まで増加している。最下部の氷化層では、フィルン内の空隙が孤立し通気性が失われる氷化密度(約830kgm⁻³)を上回る850kgm⁻³に達している。

4.2 涵養期間初期の内部構造

1996年11月8日の調査結果を9月20-21日の層位構造と乾き密度分布とともに図4に示す。11月8日の掘削時の気温は約-3℃であった。この掘削で

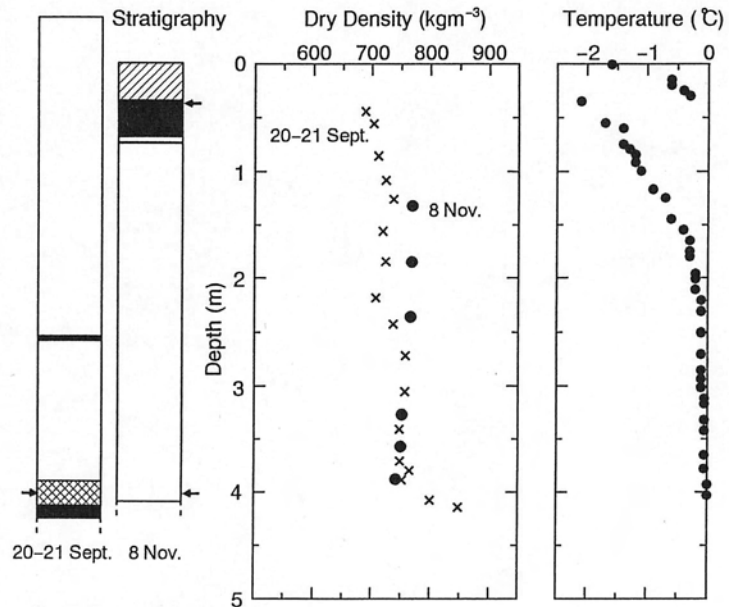
も深さ 4.08m に達した時点でフィルン中に含まれた砂礫のために掘削の続行が不可能となった。

掘削の2日前の11月6日に新たな降雪があったため、雪溪の表面には密度 230kgm^{-3} のこしまり雪が0.3mの厚さで堆積していた。この新たな積雪の直下には厚さ約0.35mの氷化層がみられ、その下は深さ4.08mまで比較的均一なフィルン層であった。フィルン層は全体的に乾いた状態にあると判断されたため含水率の測定は行っていない。仮に水を含んでも極めて少量であると考えられるので、ここでは測定した密度を全て乾き密度として取り扱う。氷化層の上部(深さ0.3~0.4m)には、1996年の消耗期間の終わりの雪面を示す新たな汚れ層(年層境界)が形成されていた。また、深さ3.96m以深のフィルン層にも砂礫を含んだ汚れ層がみられる。この汚れ層は、9月20-21日の掘削でみられた汚れ層(1995年の消耗期間の終わりの雪面を表す年層境界)に対応するものと考えられる。図4では、9月20-21日の層位構造と乾き密度分布を1995年と1996年との年層境界が同じレベルになるように配置して

いる。両方の層位構造の比較から、9月20-21日に降さらに約0.7mのフィルンの融解が起こったこと、および11月8日の時点では帯水層は消滅している可能性が高いことがわかる。雪温のプロファイルから明らかのように、11月8日には少なくとも深さ2m程度まで寒気が侵入し凍結している。しかも表面の新たな積雪とその下のフィルンとの境界で雪温が不連続に変化していることから、フィルン内への寒気侵入は11月6日の降雪の以前に既に生じていたと考えられる。フィルンの乾き密度は深さによらずほぼ一定の約 750kgm^{-3} であり、深さ1~2.5mでは9月20-21日に比べて約 50kgm^{-3} の増加がみられた。これは寒気の侵入に伴ってフィルン内に含まれていた水が凍結したことによる密度増加と考えられる。この 50kgm^{-3} の密度増加は、約7%の含水率を有する乾き密度 700kgm^{-3} のフィルンが凍結したことを意味する。一方、深さ3~4mの乾き密度は9月20-21日とほとんど同じであることから、深さ3m以深では寒気侵入による凍結は生じていないと判断できる。

図4 1996年11月8日におけるヤムナイ沢雪溪表層部の層位構造、乾き密度および雪温分布。比較のため、1996年9月20-21日における層位構造と乾き密度分布も同時に示す。層位構造の凡例は図3と同じ。

Fig.4 Comparisons between the stratigraphy and dry density profile obtained on 20-21 September 1996 and those on 8 November 1996. The temperature profile was obtained on 8 November 1996. Legend for stratigraphy is the same as in Fig.3.



5. 考察

5.1 沓形の気象データからみた調査結果の解釈

ヤマナイ沢雪溪の東方約 8.9km に位置する気象庁のアメダス沓形 (標高 14m) の気象データを用いて、コア掘削によって明らかになった雪溪表層部の内部構造を考察する。図 5 に 1996 年 9 ~ 11 月の沓形における気温 (日平均気温および日最低気温) と日降水量の変動を示す。日平均気温の変動をみると、沓形では 15 ~ 20℃ の狭い範囲で推移している 9 月に比べて、10 月初旬からは急激な低下傾向が顕著にみられ、11 月にはマイナスになる日も出現する。気温減率を $6^{\circ}\text{C}/\text{km}^{-1}$ と仮定すると、ヤマナイ沢雪溪の掘削地点 (標高 850m) における気温は沓形よりも約 5°C 低いことになる。したがって掘削地点

では 10 月中旬頃から日最低気温がマイナスに転じ、雪溪への寒気侵入が始まったものと解釈される。しかし 10 月中下旬では日平均気温はプラスの場合が多く融解が生じるので、雪溪表層では融解と凍結が繰り返し起こり、その結果 11 月 8 日の掘削でみられた約 35cm の厚さの氷化層が形成されたと考えられる。

沓形では 10 月には合計 187mm もの降水がもたらされている。一般に、降雨が出現する気温と降雪が出現する気温との境界は $0 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 程度の領域にあるので、10 月中旬以降は雪溪上に降雪がみられた日があった可能性が高い。しかし、11 月 8 日に観察された厚さ 0.3m のこしまり雪はその層位、密度、粒径などから判断して明らかに 11 月 6 日の降雪が堆

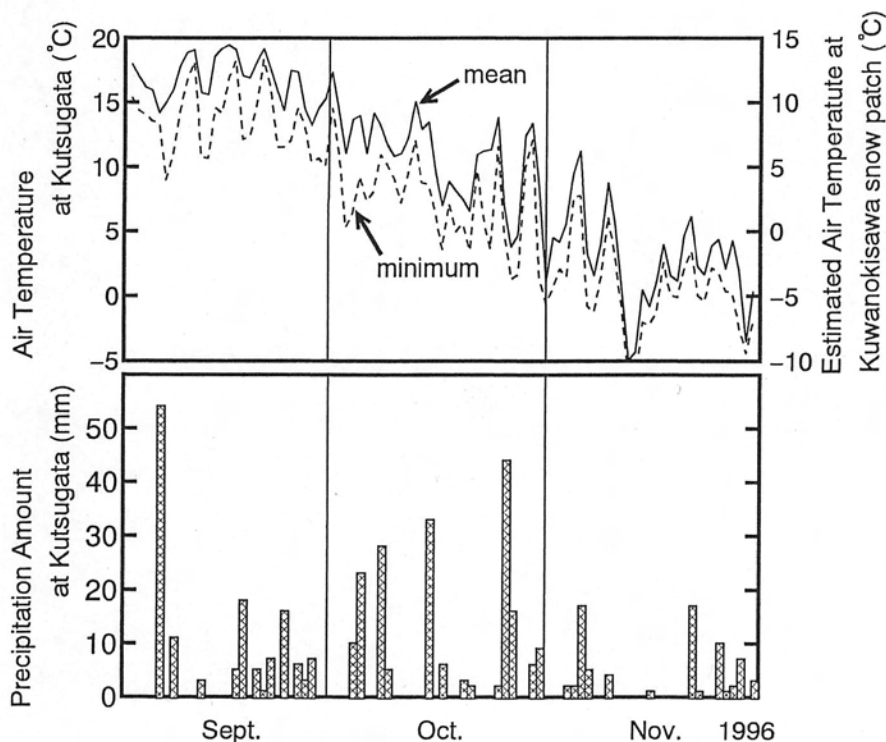


図 5 沓形における 1996 年 9 ~ 11 月の気温 (日平均気温および日最低気温) と日降水量の変動。

Fig.5 Variations in daily mean air temperature, daily minimum air temperature, daily amount of precipitation at Kutugata from September to November 1996.

積したものである。すなわち、10月中の降雪は量的にはそれほど多くなく、気温上昇時に完全に融解したのであろう。一方、10月の雪渓における多量の降雨は、融雪強度が低下した時期にフィルン内の含水率低下を防ぐ効果を有し、その結果、寒気侵入による氷化層の形成や凍結によるフィルンの密度増加に大きく貢献しているものと考えられる。11月には、降水量は多くないものの、雪渓上では気温の低下によりほとんどの降水が降雪としてもたらされることになる。その結果、雪渓表面はフィルンに比べて密度の小さい積雪に徐々に覆われることになり、この積雪層の断熱効果のためフィルン内への寒気の侵入は抑制されるであろう。

5.2 ヤムナイ沢雪渓におけるフィルンの氷化機構の検討

本調査からは、ヤムナイ沢雪渓における氷体の存在の有無を明らかにすることはできなかった。しかし表層コア掘削の結果から、ヤムナイ沢雪渓におい

ても桑ノ木沢雪渓や白馬大雪渓など他の雪崩型雪渓と同様に、前涵養期間に堆積した雪がその次の涵養期間初期までに完全に氷化する現象はみられなかった。吹き溜まり型雪渓においては、多くの場合、前涵養期間に堆積した雪のうち、消耗期間に融け残った部分(厚さ1m程度)は次の涵養期間初期の寒気侵入に伴うフィルン内の水の凍結によってほぼ完全に氷化する(Kawashima, 1997)。すなわち、吹き溜まり型雪渓では、雪が堆積後1年以内に氷に転化するという極めて効率的な氷化プロセスが現在の気候条件下で実現している。雪崩型雪渓において吹き溜まり型雪渓と同様な氷化過程がみられない最大の原因は、雪渓が存在する標高が低く涵養期間初期の気温が比較的高いことにあると考えられる。Kawashima(1997)は、吹き溜まり型雪渓に多くみられるように涵養期間初期の寒気侵入によって雪渓表層の高含水率フィルン(厚さ1m)が氷化するためには、雪渓表面が新たな積雪に連続的に覆われ始める以前に

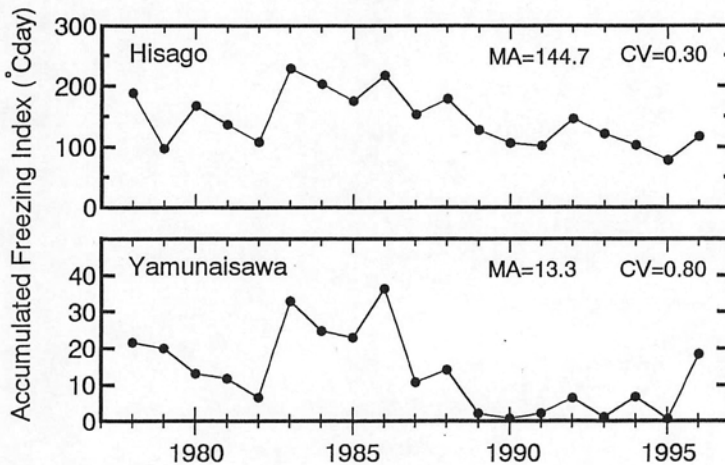


図6 10月31日における accumulated freezing index (API)の年変動のヒサゴ雪渓とヤムナイ沢雪渓との比較。MAとCVはそれぞれAPIの平均値と変動係数(標準偏差と平均値との比)を表す。

Fig.6 Yearly variations in accumulated freezing index(API) at the end of October from 1978 to 1996 at the Hisago snow patch and the Yamunaisawa snow patch. MA and CV respectively represent the mean value of API and the coefficient of variation, which is the ratio of standard deviation to MA.

(多くの場合 10 月末日頃までに)、accumulated freezing index (AFI)と名付けられた気温から算出される一種の積算寒度が約 86°Cday に達している必要があることを Stefan モデルによる 1 次元熱伝導計算によって示した。ヤムナイ沢雪溪の掘削地点における 1996 年 10 月 31 日時点での AFI を杓形の気温データから気温減率を 6°Ckm^{-1} として推定すると 18.4°Cday であり、 86°Cday よりも大幅に小さい。吹き溜まり型雪溪との比較のため、大雪山のヒサゴ雪溪(吹き溜まり型雪溪、標高 1750m)とヤムナイ沢雪溪の 10 月 31 日における AFI の年変動を 1978～1996 年についてアメダスデータ(ヒサゴ雪溪ではアメダス忠別の気温データを使用)から推定し図 6 に示す。ヒサゴ雪溪では 1995 年(77.7°Cday)を除く全ての年で 86°Cday を上回り、平均値が 144.7°Cday であるのに対し、ヤムナイ沢雪溪では 1986 年の 36.2°Cday が最大であり、年に依らず 10 月 31 日時点での AFI の値は 86°Cday を大きく下回っている。

上記のようにヤムナイ沢雪溪では、涵養期間初期における気温が吹き溜まり型雪溪に比べて高いため、寒気侵入に伴うフィルン表層部内の水の凍結のみでは連続的な氷化層(氷体)を形成することは困難である。仮にヤムナイ沢雪溪が氷体を有するとしたら、その氷化機構としてはフィルンの自重による圧密氷化機構が最有力と考えられる。これは温暖氷河涵養域のフィルンの主要な氷化機構と同じであり、その氷化深度(フィルンから氷へと転化する深さ)は吹き溜まり型雪溪よりも大きく、20～30m となる可能性がある(Kawashima and Yamada, 1997)。

6. 結語

利尻山のヤムナイ沢雪溪は、北海道の雪溪としては最大規模の多年性雪溪であり、しかも利尻山という日本では地理的、気候的諸条件が特異な場所に存在している。本調査はヤムナイ沢雪溪における最初の雪氷学的調査であり貴重なデータが得られた。

しかし、ヤムナイ沢雪溪のみならず、利尻山における雪氷や気象に関する基礎的データは皆無に等しく、利尻山の多年性雪溪の実体を把握するには不十分である。今後、利尻山の多くの地点で気温、降水量、積雪深などの通年データが得られ蓄積されることが期待される。ヤムナイ沢雪溪についても、深部までのコア掘削によりその内部構造の全容の解明が望まれる。さらに、雪溪の形状、厚さ、質量収支(涵養量、消耗量)などの測定や、場合によっては流動の調査を行うことによって氷河学的見地からも貴重な情報が得られる可能性がある。

謝辞

1996 年 9 月 20-21 日の現地調査において、新潟大学理学部の山田高嗣氏(現在、北海道大学低温科学研究所)と北海道大学低温科学研究所の Stefan Keller 博士(現在、SFI Technology Services Corporation)からご協力を得た。ここに記し、深く感謝の意を表す。なお、本研究に要した費用の一部は利尻町立博物館の平成 8 年度利尻島調査研究報償費(研究課題名:利尻山豊仙沢雪溪の内部構造と氷化過程に関する雪氷学的研究)から支弁された。

参考文献

- Kawashima, K., Yamada, T. and Wakahama, G., 1993; Investigations of internal structure and transformational processes from firn to ice in a perennial snow patch. *Annals of Glaciology*, **18**, 117-122.
- Kawashima, K., 1997; Formation processes of ice body revealed by the internal structure of perennial snow patches in Japan. *Bulletin of Glacier Research*, **15**, 1-10.
- Kawashima, K. and Yamada, T., 1997; Experimental studies on the transformation from firn to ice in the wet-snow zone of temperate glaciers. *Annals of Glaciology*, **24**, 181-185.
- Kawashima, K., Endo, T. and Takeuchi, Y., 1998; A portable calorimeter for measuring liquid-water con-

- tent of wet snow. *Annals of Glaciology*, **26**, 103-106.
- 小崎尚, 1994; 対照的な島利尻島と礼文島. 小崎尚・福田正己・石城謙吉・酒井昭・佐久間敏雄・菊地勝弘編「日本の自然地域編 1 北海道」, 岩波書店, 東京, 112-113.
- 小岩清水, 1992; やせていく火山利尻岳. 小泉武栄・清水長正編「山の自然学入門」, 古今書院, 東京, 30-31.
- 納口恭明, 河島克久, 小林俊市, 竹内由香里, 1998; 粉粒体堆積物で覆われた氷河・氷床の融解を支配する力学的効果. 第 47 回応用力学連合講演会講演予稿集, 69-70.
- 澤口晋一, 長谷川裕彦, 三枝茂, 佐々木明彦, 三浦英樹, 1994; 利尻岳豊仙沢の氷河地形. 日本地理学会予稿集, 45, 32-33.