

劔岳，三ノ窓氷河の内部構造

飯 田 肇* 福井 幸太郎*

Internal Structure of Sannomado Glacier, Mt. Tsurugi, Northern Japanese Alps

Hajime IIDA* and Kotaro FUKUI*

[Received 31 October, 2023; Accepted 4 April, 2024]

Abstract

On September 25–26, 2013, core drilling was conducted at the Sannomado Glacier, Mt. Tsurugi, in the northern Japanese Alps. The ice core obtained is 20 m in length. The ice core consists of a firn layer from the core top to the dirty layer laid down in 2012 (520–532 cm in depth), alternating layers of glacier ice and firn from the dirty layer laid down in 2012 to the dirty layer laid down in 2011 (660–670 cm in depth), and glacier ice from a depth of 660 cm to the core bottom. The glacier ice consists of bubble ice, clear ice, and interbedded dirty layer. Eight distinct dirty layers, estimated to be annual layer boundaries, are found in the core. The Sannomado Glacier is in an environment with extremely thick snow cover in winter and significant snow melt in summer. Analysis of grain size of ice core shows no growth of grain size with icing. Therefore, it is assumed that the glacier ice was formed by densification of water-saturated firn within two years after snow deposition. Elongated bubbles are more pronounced below 1,278 cm in depth, and the dip of the elongated bubbles is roughly in line with the dip of the glacier flow. These are taken to be evidence that internal deformation is currently occurring in this glacier.

Key words : glacier, transformation of firn to ice, air bubbles, glacier flow, Mt. Tsurugi

キーワード : 氷河, 氷化過程, 気泡, 流動, 劔岳

I. はじめに

最終氷期が終わり、温暖な気候が続く現在の日本には、数百もの多年性雪渓が存在するものの氷河は存在しないと長年考えられていた。近年、電波で氷の厚さを測る小型の地中レーダーや誤差数 cm で位置がわかる小型で省電力の測量用 GPS など、新しい観測機器を使った観測が飛騨山脈北部の多年性雪渓で行われるようになり、いくつかの雪渓は流動する氷体をもつ氷河であると判明した (福井・飯田, 2012; 福井ほか, 2018)。現在、氷河として学術的に認められているのは、劔岳の

三ノ窓氷河、小窓氷河、池ノ谷氷河、立山の御前沢氷河、内蔵助氷河、鹿島槍ヶ岳のカクネ里氷河、唐松岳の唐松沢氷河の 7 つである (福井ほか, 2018; 有江ほか, 2019; Arie *et al.*, 2022)。いずれの氷河も面積が 0.5 km² 以下で世界的には Very Small Glacier (VSG) と呼ばれている氷河に分類される (Huss, 2010; Huss and Fischer, 2016)。

日本のような温暖地域で氷河が形成・維持されているメカニズムを明らかにするため、2013 年 9 月 25～26 日に三ノ窓氷河で 20 m、同年 10 月 4 日に御前沢氷河で約 7 m の浅層コア掘削と現場でのコア解析を実施した。このうち、御前沢

* 富山県立山カルデラ砂防博物館

* Tateyama Caldera Sabo Museum, Toyama, 930-1405, Japan

氷河のコア解析結果（層位と密度）は福井ほか（2018）で報告済みである。本論文では、三ノ窓氷河のコア解析結果（層位、密度、結晶粒径、気泡の伸長度）について報告し、積雪の氷化過程および気泡の伸長と氷河の流動について考察した。

II. 調査地域

三ノ窓氷河は、劔岳北方稜線から東南東に伸びる三ノ窓尾根とハッ峰に挟まれた氷食谷を埋めている氷河（面積は約 0.13 km^2 ）である（図 1, 2A）。末端の標高は約 1760 m, 上端の標高は約 2500 m, 長さは約 1600 m, 幅は最大 100 m, 氷河表面の平均傾斜は約 25° である。

福井・飯田（2012）はこの氷河で 2009～2011 年にかけて地中レーダーを用いた氷厚観測と測量用 GPS を用いたステークの位置測定による流動観測を行った。その結果、厚さ約 40 m 以上、長さ約 1200 m の氷体をもつこと、氷体は 1 か月あたり約 30 cm 流動していることがわかり（図 1B）、現存する氷河であると判明した。なお、氷厚は 2013 年 8 月 27 日の地中レーダー観測で最大で 70 m に達していることがわかった（福井・飯田, 2023）。

2011 年 6 月 4 日と 2012 年 5 月 31 日に実施した地中レーダー観測によると氷河上の積雪深は上流部が 15 m 前後、下流部が 25 m 前後であった（福井・飯田, 2012）。地中レーダー探査時、氷河表面は雪崩のデブリに厚く覆われていたこと（図 2B）や立山室堂平の降雪による積雪深が 7 m 程度（飯田ほか, 2016）であることから、この膨大な量の積雪の大半は雪崩によって集積したものと推測される。この膨大な量の積雪も 10 月になると大部分が融解し、氷体が一部露出、クレバスやムーラン、融水水流路が出現する（福井・飯田, 2012）。

Arie *et al.* (2022) は 2015～2019 年にかけて三ノ窓氷河全域を撮影した空撮画像から Digital Surface Model (DSM) を作成し、氷河表面高度の変化から相対的な体積変化を求め質量収支を計算した。その結果、三ノ窓氷河は冬期に氷河全域が涵養域になり、夏期に氷河全域が消耗域になる

ことが定量的に示された。

III. 方法

三ノ窓氷河の中流部の標高 1920 m 地点（図 1B, 2A）において、2013 年 9 月 25～26 日にコア掘削を行った。掘削地点の表面傾斜は約 25° 、氷厚は約 40 m（2013 年 8 月 27 日の地中レーダー観測による値）である。

コア採取には、（株）地球工学研究所製の特注品ハンドオーガを使用した。本機は人力による手回しでの掘削のほかに充電式ハンマドリル（MAKITA 製 HR262DRDX）を接続して半自動掘削が可能となっている。バレルの内径は 7.2 cm, バレル長は 120 cm で、1 回の掘削で最大 40 cm 程度のコア採取が可能である（図 3）。採取したコアは、輸送が困難なため主に現地でコア解析を行った。解析項目は以下のとおりである。

- (1) 層位：コアより各層構造とその深度を読み取る。目視によってフィルンと氷を識別する。
- (2) 密度：コアを円柱状に切り出し、長さと重量は現地にて測定、コア径は画像解析ソフトウェア Image J¹⁾ を用いてスケールが入ったコアの写真から測定し、体積を算出して密度を求めた。なお、今回計測している密度は濡れ密度（水の質量を含む密度）であり、乾き密度よりも高めの値（例えば、Kawashima, 1997）を示している可能性がある。
- (3) 結晶粒径：コアの鉛直断面の薄片（厚さ 0.5～1 mm）を作製し、薄片を偏光板に挟んで直交ニコル状態で撮影し、得られた写真から粒界が明瞭なすべての単結晶（40 粒以上、平均 80 粒）をグラフィックソフトウェア Adobe illustrator CS6 を使用してトレースし、Image J を用いて粒径を測定する。
- (4) 気泡の伸長度：コアの鉛直断面の薄片（厚さ 0.5～1 mm）を作製して顕微鏡で写真撮影を行い、得られた写真から判読可能なすべての気泡（26 個以上、平均 44 個）を Adobe illustrator CS6 を使用してトレースし、Image J を用いて気泡の長径、短径、長軸の水平面からの角度を測定する。なお、本論文では気泡の長

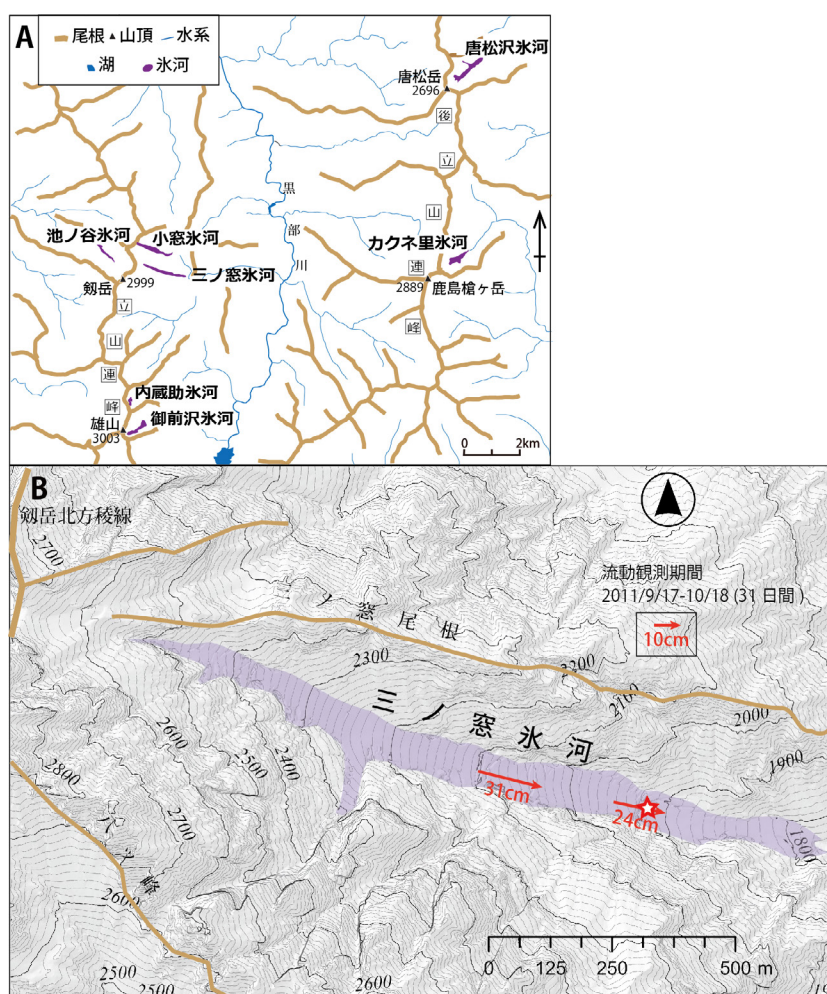


図 1 調査地域. A: 飛騨山脈北部の水河分布. B: 三ノ窓氷河の水平方向の流動量. 赤い星印が掘削地点を示す. 福井・飯田 (2012) の図 5 をもとに作成. 等高線間隔は 10 m. 等高線図は国土地理院の数値標高モデル (5 m メッシュ) を使って作成.

Fig. 1 Study area. A: Distribution of glaciers in northern Japanese Alps. B: Horizontal flow of Sannomado Glacier. Red star indicates drill site. Figure is based on Fig. 5 in Fukui and Iida (2012). Contour intervals are 10 m. Contour map was created using 5 m-mesh digital elevation model of Geographical Survey Institute.

径/短径比を気泡の伸長度, 気泡長軸の水平面からの角度を気泡長軸の傾斜と呼ぶ。

IV. 結 果

1) 層位

採取したコアの全長は 20 m である。図 4 にコア解析から得られたコアの層位, 密度, 結晶粒径, 気泡の伸長度, 気泡長軸の傾斜, 図 5 にコアの

鉛直断面の薄片写真を示す。

表面から深度約 520 cm まではフィルン層であった (図 3A, 4A)。深度約 520 ~ 約 660 cm がフィルン層と氷河水の互層で, 深度 520 ~ 560 cm 付近では気泡が完全に独立していて氷化していることを薄片写真から確認できた (図 5A)。深度約 660 cm からコア底までは氷河水が続いていた (図 4A)。



図2 三ノ窓氷河全景と5月末の三ノ窓氷河。A: 2013年10月14日撮影。赤い星印が掘削地点（標高1920 m）。B: 2012年5月31日撮影。掘削地点は写真中央右付近。氷河表面は雪崩のデブリに厚く覆われているのがわかる。

Fig. 2 Panoramic view of Sannomado Glacier and Sannomado Glacier at the end of May. A: Photograph taken on October 14, 2013. Red star indicates drill site (elevation 1920 m). B: Photograph taken on May 31, 2012. Drill site is center right in the photograph. Surface of glacier is covered with a thick layer of avalanche debris.



図3 2013年9月25～26日に掘削した三ノ窓氷河コア。A: 深度520～532 cmの汚れ層付近の写真。B: 深度1510～1525 cmの汚れ層付近の写真。

Fig. 3 Sannomado Glacier ice core drilled on September 25-26, 2013. A: Photograph of ice core near the dirty layer at 520-532 cm in depth. B: Photograph of ice core near dirty layer at 1510-1525 cm in depth.

氷河水は、気泡氷、透明氷、汚れ層の互層となっている（図3B）。汚れ層は消耗期（5～10月）末期の雪面に集積した砂礫や植物片などの堆積物で構成され、この上に次の涵養期（11～4月）の降雪が堆積するため、年層境界層とみなせる。顕著な汚れ層は8層みられ（図4A）、その深度は520～532 cm（図3A）、660～670 cm、720～730 cm、1150～1180 cm、1410～1420 cm、1510～1525 cm（図3B）、1540～1550 cm、1565～1585 cmである。

汚れ層は、立山連峰の氷河の場合、毎年1層必ず形成されるかどうかは不明である。涵養量が消耗量を上回った年には1層の年層が形成されるが、消耗量が涵養量を上回った年はそれまで数年分の涵養量が一気に融解し年層が消失してしまうことも考えられる。2011年9月に今回のコア掘削地点付近に埋め込んだ流動観測用ステーク（長さ4.6 m）が2012年10月3日と2013年9月下旬には積雪表面に出てこなかった。このため、2011/2012年と2012/2013年は涵養量が消耗量を上回っていた可能性が高い。したがって、深度

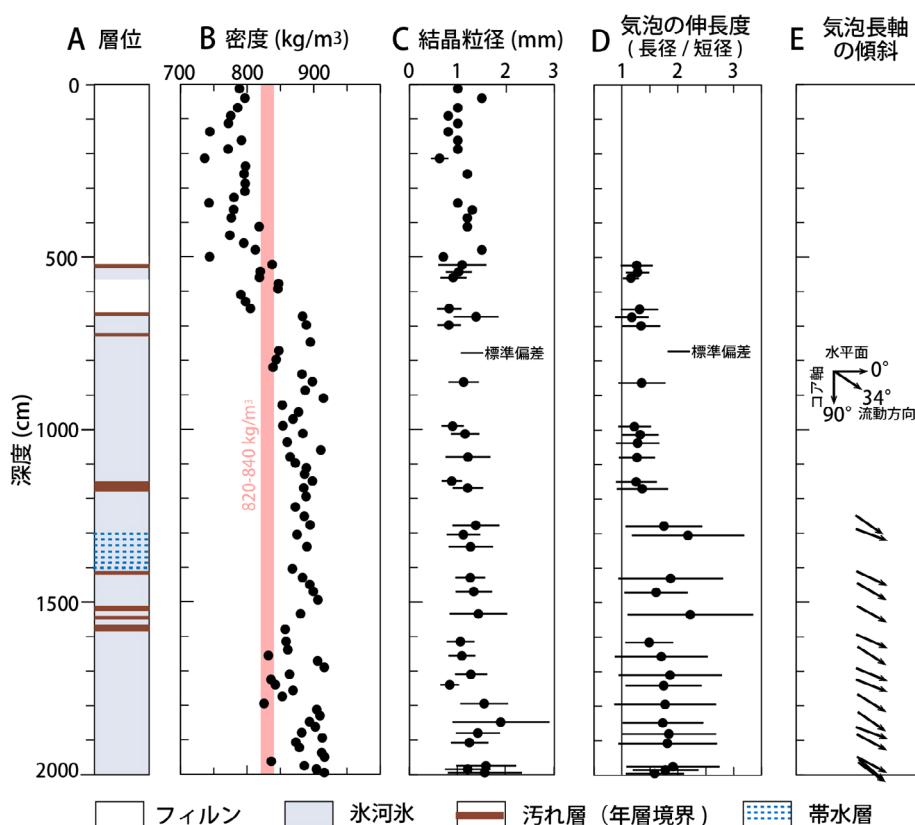


図 4 三ノ窓氷河コアの現場解析結果. A: 層位. B: 密度. C: 結晶粒径. D: 気泡の伸長度 (長径/短径). E: 気泡長軸の傾斜 (気泡の長軸の水平面からの角度).

Fig. 4 Results of in-situ analysis of ice core of Sannomado Glacier. A: Stratigraphy. B: Density. C: Grain size. D: Ratio of long diameter to short diameter of air bubbles. E: Dip of long axis of air bubbles.

520～532 cm の汚れ層 (図 3A) は前年 (2012 年) 秋, 深度 660～670 cm の汚れ層は前々年 (2011 年) 秋に形成された年層境界層であると考えられる。

深度 1300～1400 cm にかけて明瞭な透明氷が形成されていて, コアが濡れていた。これは, この領域に帯水層が存在していることを示している (図 4A)。実際に, 掘削後のボーリング孔で帯水層の水位が観測された。

水温は表面～コア底まで全層 0°C であった。このことから, 三ノ窓氷河は水体が融点に達している温暖氷河である可能性が高い。

2) 密度

図 4B に密度分布を示す。一般的に積雪は乾

き密度がおおよそ $820 \sim 840 \text{ kg m}^{-3}$ を超えると通気性を失って氷化する (前野・黒田, 1986)。表面～深度約 520 cm のフィレン層の密度は 780 kg m^{-3} 前後であった。深度約 520～約 660 cm のフィレン層と氷河水の互層の密度は, 深度 610～650 cm 付近で 800 kg m^{-3} を下回ったが, これらを除くと氷化している密度に達していた。深度約 660 cm～コア底の氷河水の平均密度は 873 kg m^{-3} であった。

3) 結晶粒径

図 4C に各深度の平均粒径分布, 図 5B にコアの薄片の偏光写真を示す。表面から深度約 520 cm 付近までのフィレン層の平均粒径は 1 mm 前後, 深度約 520～約 660 cm のフィレン層と氷河

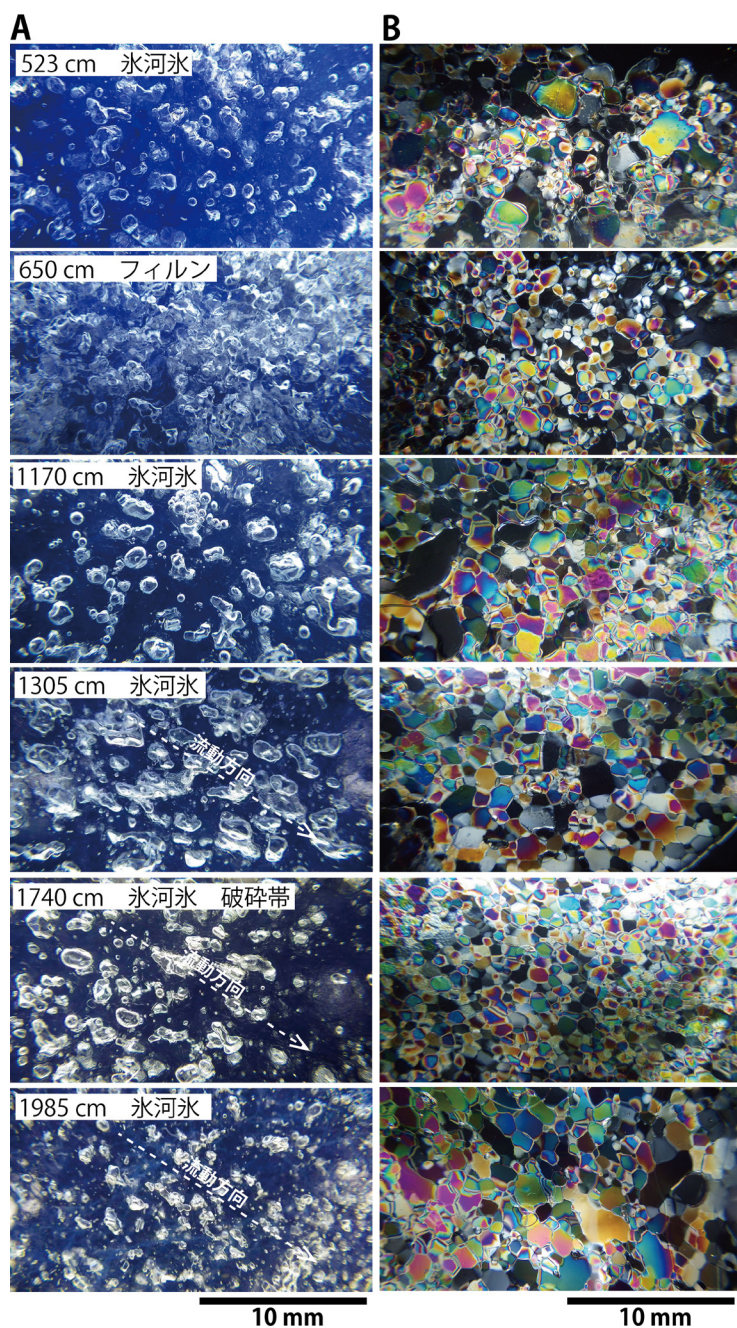


図 5 三ノ窓氷河コアの鉛直断面の薄片写真。A：気泡を映した写真。写真のスケールを図の下に示した。写真中の点線矢印は氷河の流動方向（傾斜）を示す。スケールを図の下に示した。B：偏光写真。単結晶ごとに異なる色で見える。スケールを図の下に示した。

Fig. 5 Photographs of vertical thin sections of Sannomado Glacier ice core. A: Photographs showing air bubbles. Dotted arrows in photographs indicate dip of glacier flow. Scale of photographs is shown below the figure. B: Polarized light photographs. Each individual crystal appears in a different color. Scale of photographs is shown at the bottom of the figure.

氷の互層の平均粒径も 1 mm 前後であった。深度 660 ~ 1000 cm 付近の氷河水の平均粒径も 1 mm 前後でフィルン層と変わらなかった (図 4C)。深度 1000 cm 以深の平均粒径は 1.2 mm 前後とやや大きくなったが、深度 1740 cm 付近の平均粒径は約 0.8 mm と局所的に小さかった。

4) 気泡の伸長度

図 4D に気泡の平均伸長度, 図 4E に伸長度 2.0 以上の気泡長軸の傾斜の中央値を, 図 5A に気泡を映したコアの薄片写真を示す。深度 1278 cm 付近までの気泡の平均伸長度は 1.2 前後で (図 4D), 気泡の形は球形に近く伸長はほとんどみられなかった。1278 cm 以深から気泡の伸長がみられるようになり, 深度 1278 cm からコア底までの平均伸長度は 1.8 前後に達した (図 4D)。

深度 1278 cm 以深の伸長度 2.0 以上の気泡長軸の傾斜の中央値は 29° 前後であった (図 4E)。かつての積雪表面を示す汚れ層の水平面からの傾斜は 34° 前後であり, 氷河の流動方向 (傾斜) を積雪表面の傾斜と平行と仮定すると, 伸長度 2.0 以上の気泡長軸の傾斜は氷河の流動方向 (傾斜) とほぼ同じとみなせる。

V. 考 察

1) 氷化過程

層位および密度の観測から三ノ窓氷河のコアは, 表面~前年 (2012 年) 秋の汚れ層 (深度 520 ~ 532 cm) までフィルン層, 前年秋の汚れ層~2 年前 (2011 年) 秋の汚れ層 (深度 660 ~ 670 cm) まで氷河水とフィルンの互層となっていた (図 4A)。2 年前秋の汚れ層より下は全層氷河水で平均密度は 873 kg m^{-3} であった (図 4B)。これらのことから, 三ノ窓氷河でフィルン層が完全に氷化するには 2 年程度の時間を要するといえる。

海外の温暖氷河の主要な氷化過程は水飽和したフィルン層の圧密氷化であり (例えば, Iida *et al.*, 1984), 圧密氷化に要する年数は 4 ~ 31 年程度と考えられている (Kawashima *et al.*, 1993; Kawashima and Yamada, 1997)。井上ほか (2023) は, 水体をもつ雪崩涵養型の多年性雪溪

である利尻岳ヤムナイ沢雪溪の氷化過程について, この雪溪から採取した約 10 m のコア解析と雪の圧密実験から検討した。その結果, この雪溪の氷層はフィルン層が二度の消耗期に水飽和して急速に圧密されることによってわずか 2 年間で形成されることを明らかにした。

三ノ窓氷河はヤムナイ沢雪溪と同じく冬期の積雪量がきわめて大きく, 夏期の融雪量も大きい環境下にある。このため, 融雪期にフィルン層の下部が水飽和して圧密を受ける状態になっていることが推測される。また, 水飽和することで圧密氷化した氷河水の結晶粒径は, 氷化直前のフィルンと同程度で, 氷化に伴う結晶粒径の成長がみられないという特徴がある (Iida *et al.*, 1984; Yamada, 1987)。今回採取したコアのフィルン層とその下のフィルン層・氷河水の互層, さらにその下の氷河水上部にかけての粒径は 1 mm 前後で氷化に伴う結晶粒径の成長がみられなかった。以上のことから三ノ窓氷河の氷河水は消耗期にフィルン層下部が融雪水で水飽和し, そこに厚い積雪の上載荷重が加わることによって急速に圧密氷化して形成されている可能性が高いと考えられる。

2) 気泡の伸長と流動

三ノ窓氷河のボーリング地点付近では 2011 年 9 月 17 日~10 月 18 日の 31 日間で 24 cm の流動が観測されている (図 1B)。三ノ窓氷河のコアでは深度 1278 cm 付近まで気泡は球形で伸長がみられなかったが, 1278 cm 以深から気泡の伸長がみられるようになり, 深度 1278 cm からコア底までの気泡長軸の伸長度は平均 1.8 前後に達した。また, 深度 1278 cm 以深の伸長度 2.0 以上の気泡長軸の傾斜は氷河の流動方向 (傾斜) とほぼ同じであった。

Kizaki (1969) は東南極ラングホプデ南部の平頭氷河での調査から気泡の伸長が氷河流動に伴う強い剪断作用によって生じ, 気泡の伸長方位は氷河の流動方向と一致すると述べている。中尾 (1978) もネパールヒマラヤ, ヒドゥンバレーでの氷河調査から伸長気泡は氷河の流動に伴って球形気泡が変形して形成され, 流動がなくなって底

力解放されると伸長気泡が球形気泡に変化すると指摘している。これらのことから三ノ窓氷河のコアの1278 cm以深で気泡の伸長が顕著になり、伸長度2.0以上の気泡長軸の傾斜が氷河の流動方向（傾斜）とほぼ同じであったことは、現在、この氷河で流動に伴う氷の内部変形が生じていることを示唆していると考えられる。

深度1740 cm付近には局所的に結晶粒径が小さい層が存在した（図4C）。中尾（1978）は氷河水試料の剪断破壊実験をおこなったところ、剪断破壊が起きた部分では再結晶が起こり、結晶粒径が小さくなることを確認している。したがって、深度1740 cm付近では流動に伴う氷河水の剪断破壊が起こっている可能性がある。

VI. おわりに

- (1) 三ノ窓氷河で、日本の氷河としては初めて深度20 mに達するアイスコア掘削を行った。表面～前年（2012年）秋の汚れ層（深度520～532 cm）までフィルン層、前年秋の汚れ層～2年前（2011年）秋の汚れ層（深度660～670 cm）まで氷河水とフィルンの互層、2年前秋の汚れ層より下はコア底まで氷河水であった。これらのことから、三ノ窓氷河でフィルン層が完全に氷化するには2年程度の時間を要するといえる。氷河水は、気泡水、透明水、汚れ層の互層となっていた。顕著な汚れ層はコア全体で8層みられた。
- (2) 三ノ窓氷河は冬期の積雪量がきわめて大きく、夏期の融雪量も大きい環境下にあるため、融雪期にフィルン層の下部が水飽和して圧密を受ける状態になっている可能性が高い。また、コアの結晶粒径の解析では氷化に伴う結晶粒径の成長が認められなかった。このことから、三ノ窓氷河では夏期にフィルン層下部が融雪水で水飽和し、そこに厚い積雪の上載荷重が加わることによって急速に圧密氷化して氷河水が形成されていると推測された。
- (3) 三ノ窓氷河のコアでは、1278 cm以深で気泡の伸長がみられるようになり、伸長度2.0以上の気泡長軸の傾斜は氷河の流動方向（傾斜）

とほぼ同じであった。これらのことは、現在、この氷河で流動に伴う氷の内部変形が生じていることを示唆する。

謝 辞

本研究を進めるにあたり山岳ガイドの上田幸雄氏と前原 徹氏には現地調査の際にルート工作や安全管理面で強力にサポートしていただいた。環境省立山自然保護官事務所と富山森林管理署には中部山岳国立公園内の国有林での調査を許可していただいた。2名の匿名査読者には、原稿について貴重なご意見をいただいた。以上の皆様に心より感謝申し上げます。

本研究は2013～2016年度文部科学省科学研究費補助金・若手研究（A）（代表者 福井幸太郎、課題番号：25702016）と2021～2023年度文部科学省科学研究費補助金・基盤研究（C）（代表者 福井幸太郎、課題番号：21K01026）の一部を使用した。

注

- 1) 画像解析ソフトウェア Image J
<https://imagej.net/ij/> [Cited 2023/10/31]。

文 献

- 有江賢志朗・奈良間千之・福井幸太郎・飯田 肇・高橋一徳（2019）：飛騨山脈北部、唐松沢雪渓の氷厚と流動。雪氷，**81**，283-295。[Arie, K., Narama, C., Fukui, K., Iida, H. and Takahashi, K. (2019): Ice thickness and flow of the Karamatsuzawa perennial snow patch in the northern Japanese Alps. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, **81**, 283-295. (in Japanese with English abstract)]
- Arie, K., Narama, C., Yamamoto, R., Fukui, K. and Iida, H. (2022): Characteristics of mountain glaciers in the northern Japanese Alps. *Cryosphere*, **16**, 1091-1106, doi:10.5194/tc-16-1091-2022.
- 福井幸太郎・飯田 肇（2012）：飛騨山脈、立山・剣山域の3つの多年性雪渓の氷厚と流動—日本に現存する氷河について—。雪氷，**74**，213-222。[Fukui, K. and Iida, H. (2012): Identifying active glaciers in Mt. Tateyama and Mt. Tsurugi in the northern Japanese Alps, central Japan. *Journal of Japanese Society of Snow and Ice*, **74**, 213-222. (in Japanese with English abstract)]
- 福井幸太郎・飯田 肇（2023）：飛騨山脈北部の現存氷河の特性。日本地理学会発表要旨集，**2023s**，48。[Fukui, K. and Iida, H. (2023): The characteristics of active glaciers in the northern Japanese Alps. *Proceedings of the General Meeting of the Association of Japanese Geographers*, **2023s**, 48. (in Japanese)]
- 福井幸太郎・飯田 肇・小坂共栄（2018）：飛騨山脈

- で新たに見出された現存氷河とその特性. 地理学評論, **91**, 43–61. [Fukui, K., Iida, H. and Kosaka, T. (2018): Newly identifying active glaciers in the Northern Japanese Alps and their characteristics. *Geographical Review of Japan Series A*, **91**, 43–61. (in Japanese with English abstract)]
- Huss, M. (2010): Mass balance of Pizolglletscher. *Geographica Helvetica*, **65**, 80–91.
- Huss, M. and Fischer, M. (2016): Sensitivity of very small glaciers in the Swiss Alps to future climate change. *Frontiers in Earth Science*, **4**, 34, doi: 10.3389/feart.2016.00034.
- Iida, H., Watanabe, O. and Takikawa, M. (1984): First results from Himalayan Glacier Boring Project in 1981–1982; Part II. Studies on internal structure and transformation process from snow to ice of Yala Glacier, Langtang Himal, Nepal. *Bulletin of Glaciological Research*, **2**, 25–33.
- 飯田 肇・福井幸太郎・長田和雄 (2016): 立山・室堂平における長期積雪断面観測. 雪氷研究大会講演要旨集 (名古屋・2016), 117. [Iida, H., Fukui, K. and Osada, K. (2016): Long-term pit survey in Murodo-Daira, the Tateyama Mountains. *Summaries of JSSI and JSSE Joint Conference on Snow and Ice Research—2016 in Nagoya*, 117. (in Japanese)]
- 井上 峻・河島克久・松元高峰・佐藤雅彦 (2023): 利尻山における雪崩涵養型雪渓の内部構造と氷化過程. 雪氷, **85**, 3–18. [Inoue, R., Kawashima, K., Matsumoto, T. and Sato, M. (2023): Internal structure and transformation process from firn to ice in a perennial snow patch nourished by snow avalanches on Mt. Rishiri, Hokkaido. *Journal of Japanese Society of Snow and Ice*, **85**, 3–18. (in Japanese with English abstract)]
- 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., 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.
- Kizaki, K. (1969): Ice fabric study of the Mawson region, East Antarctica. *Journal of Glaciology*, **8**, 253–276.
- 前野紀一・黒田登志雄 (1986): 雪氷の構造と物性. 前野紀一・福田正己編: 基礎雪氷学講座 I. 古今書院, 143–148. [Maeno, K. and Kuroda, T. (1986): Seppyo no Kozo and Bussei. in *Basic Course in Glaciology I (Kiso Seppyoogaku Koza I)* edited by Maeno, K. and Fukuda, M., Kokonshoin, 143–148. (in Japanese)*]
- 中尾正義 (1978): 伸長気泡に着目した, 氷河構造と流動の研究. 低温科学物理篇, **35**, 179–219. [Nakawo, M. (1978): Studies on structure and Flow of a glacier related to elongated bubbles. *Low Temperature Science Series A*, **35**, 179–219. (in Japanese with English abstract)]
- Yamada, T. (1987): Glaciological characteristics revealed by 37.6-m deep core drilled at the accumulation area of San Rafael Glacier, the northern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glacier Research*, **4**, 59–67.
- * Title etc. translated by K.F.