

氷河涵養域で観測された着氷について

和 泉 薫*

On the icing observed in the accumulation area of Åsgårdfonna, Spitsbergen
by
Kaoru IZUMI

(Abstract)

Meteorological observations were carried out on a dome at the top of a glacier called Åsgårdfonna, Spitsbergen, from May 26 to June 13, 1987. During a cloudy period with low temperatures and high humidity, we observed occasional icing on the soft rime of vertical obstacles. When a soft rime developed, the air temperature ranged from $-8 \sim -10^{\circ}\text{C}$ and the wind speed was less than 5 m/s. The density of soft rime ranged from $0.13 \sim 0.47\text{g/cm}^3$ and increased with the increase in the mass of icing per unit time. The calculated value of the liquid water content of air ranged from $0.1 \sim 0.5\text{g/m}^3$. It was estimated that icing on a horizontal snow surface did not contribute so much to the annual accumulation of this glacier.

Key words : icing, soft rime, super-cooling droplet, glacier, accumulation, arctic region
キーワード : 着氷, 樹氷, 過冷却水滴, 氷河, 涵養, 北極圏

はじめに

北極圏氷河学術調査隊 (JAGE 1987) の一員として, 1987年5~6月に, 北極海に浮かぶノルウェー領のスピッツベルゲン島オスゴルド氷河 (Åsgårdfonna) の涵養域のドーム状頂部 (Høgghetta, 北緯 $79^{\circ}16'$, 東経 $16^{\circ}52'$, 標高約1200 m) における深度86 mの氷河ボーリングに参加した (図-1)。この学術調査は, 北極域雪氷圏の動態を, 現在の氷河・氷床の形成・維持条件から比較検討し, こうした自然環境条件の長期的変動を, 氷河・氷床ボーリングによる雪氷コアの解析により明らかにすることを目的としている。

スピッツベルゲン島はスバルバル諸島の最大の島で, この地域は大西洋を北上するメキシコ暖流の影響を強く受けて, 高緯度に位置する割には気候は温暖である。しかし調査期間中は, 初めの数日晴天で気温が上昇した他は, ほとんど雲に覆われ気温の低い湿度の高い天候が続いた。この雲に覆われた期間, 雪面上の物体に「エビのシッポ」と呼ばれる着氷が頻繁に発達した。こうした着氷は日本においても, 航空機, 山岳地帯のマイクロウェーブの諸施設や送電線等に付着して被害を及ぼす。そこで, これらの着氷現象を現地で調べたので, その結果を報告する。

*新潟大学積雪地域災害研究センター

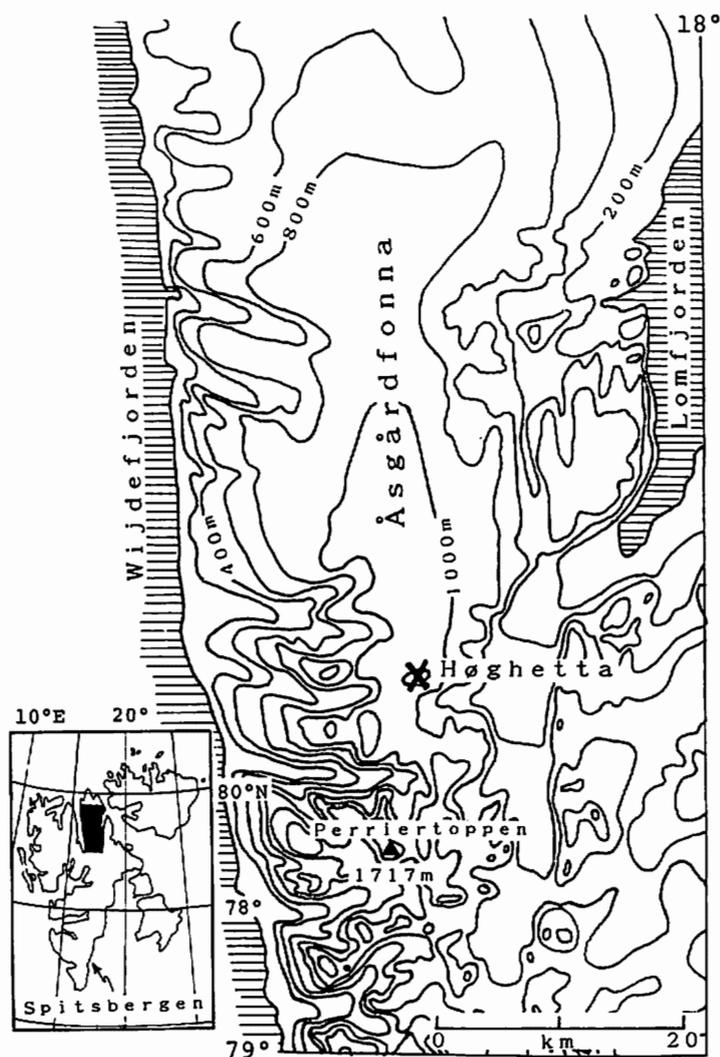


図-1 調査地 (×印) の位置図

Fig. 1 Location of the observation site (×).

II 調査地での気象状況

氷河ボーリング実施中には、それと並行して気象観測も行った。観測項目は気圧、相対湿度、風向・風速、全天日射量、放射収支量、降水量、雲量である。調査期間中の1987年5月26日から6月13日までの気象観測結果を図-2に示した (Izumi et al., 1988)。この図から、前述のように、初めの数日後の期間で天候が対照的に変わっていたことがわかる。すなわち初めは晴天で気温が 0°C を越えたのに対し、後の期間は、相対湿度が90%以上であったことからわかるようにほとんどが雲の中にあり気温の低い日が続いた。 -10°C 程度の雲の中では、雲粒は直径が $10\sim 30\mu$ の微少な過冷却水滴として浮遊している。これが 0°C 以下に冷えた物体にぶつかって凍結し、着氷が発達する。すなわち後の期間のほとんどは、着氷が発達しうる条件下にあったと言える。

全天日射量を見ると、真夜中でも $0.30\text{MJ}/\text{m}^2$ 以上あることがわかる。これは調査地が高緯度にあっ

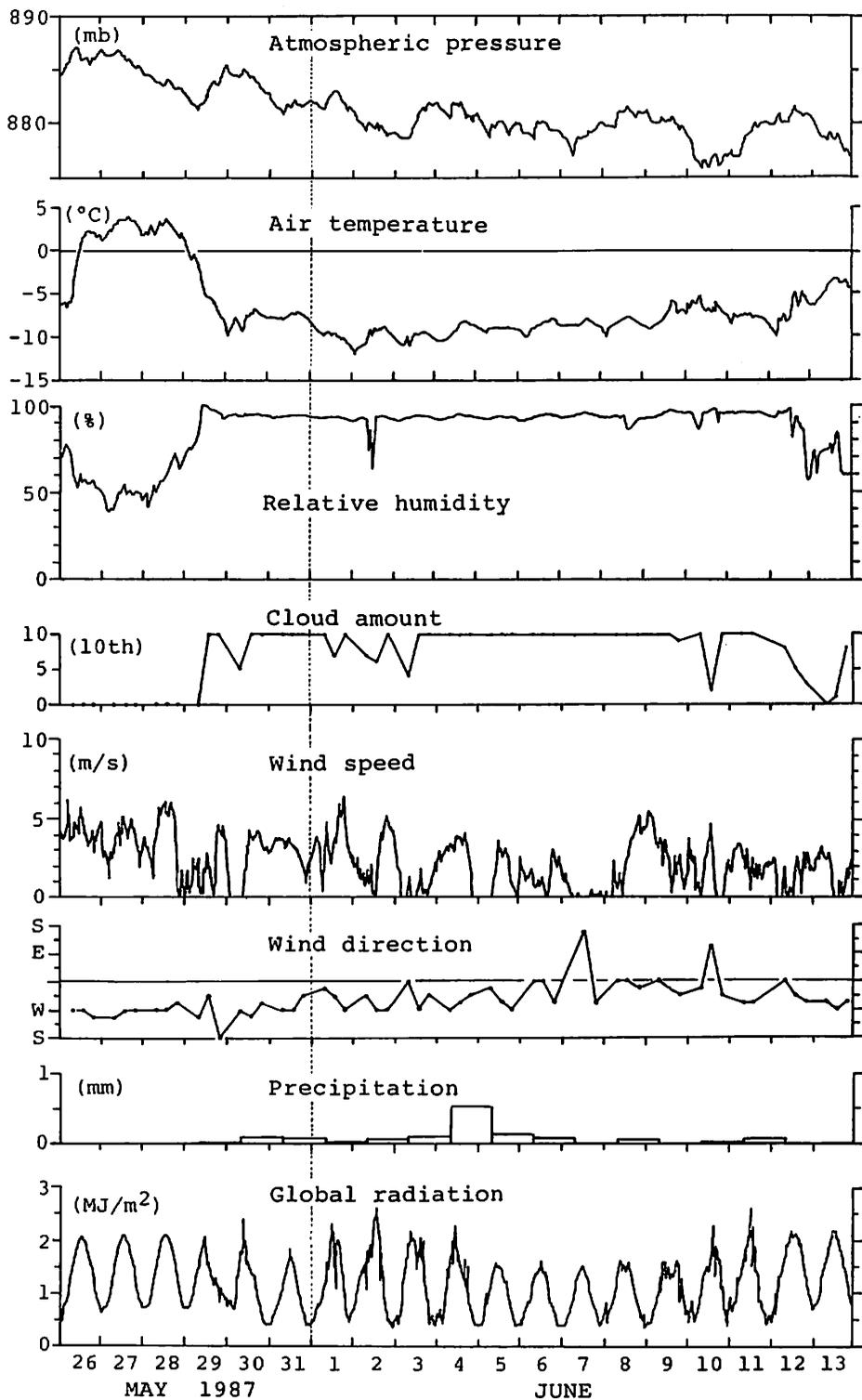


図-2 調査地における1987年5月26日から6月13日までの気象状況 (Izumi et al.,1988)
 Fig. 2 Meteorological conditions at the observation site from May 26 to June 13, 1987 (Izumi et al., 1988).

て、この時期太陽が一日中沈まないこと（これを極昼という）による。また、後の雲に覆われた期間でも、全天日射量は日変化を示し、一日当りの日射量で $20.9\text{MJ/m}^2 \cdot \text{day}$ 以上もあった。これは、雲に覆われてはいたが、その雲は厚くなく日射をよく透過したことによると考えられる。

調査地は氷河源頭部のドーム状頂部の平らな広い雪原であったが、風はそれほど強くなく調査期間中の平均風速は 2.2m/s で、西風が卓越していた。また、降水量は僅かで、調査期間中に降雪として 1.3mm しかなかった。

Ⅲ 着氷の観測

調査地では、電源コード等を雪面上に架線するためや標識として、直径 1cm 長さ 2m 程度の竹棒を多数使った。この竹棒の雪面上 1.3m のところでの着氷の発達状況を、主に、風上方向への着氷の長さに着目して随時観測した。図-3に竹棒に付着した着氷の様子を示す。着氷はほとんどの場合日射量の減少する夕方から付着しはじめ、朝方になると日射量の増大によって脱落した。平均としては、付着しはじめと脱落時の全天日射量は、それぞれ $0.9, 1.4\text{MJ/m}^2$ 程度であった。



図-3 竹棒への樹氷の発達

Fig. 3 Development of soft rime on a bamboo stake.

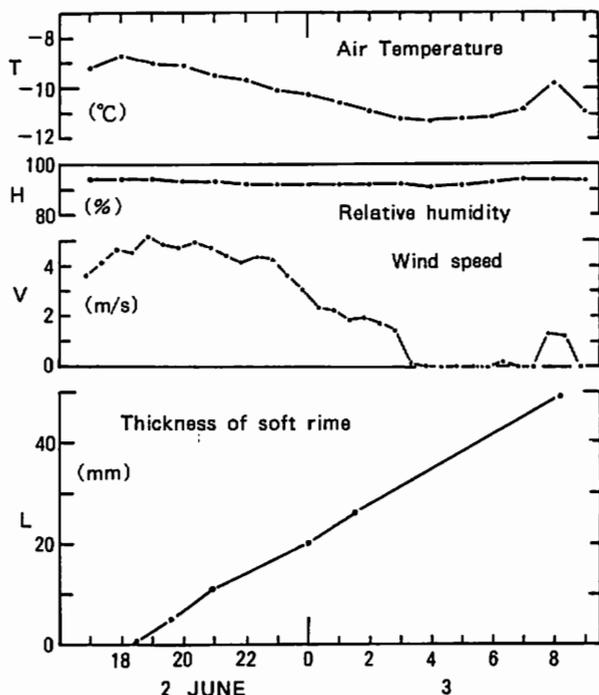


図-4 樹氷の発達とその時の気象

Fig. 4 Development of soft rime and ice-forming conditions.

着氷の発達状況とその際の気象条件を一例図-4に示した。この時、着氷は6月2日18時過ぎから付着し始め、6月3日08時には 49mm にまで発達し、その後すぐに日射によって竹棒から脱落した。このような観測結果をまとめて示したのが表-1である。これによると、西風、風速 5m/s 以下、気温 $-8 \sim -10^\circ\text{C}$ 、湿度 92% 以上の気象条件の下で、着氷が1時間当たり $1 \sim 5\text{mm}$ の割合で成長したことがわかる。なお、測器の雪面上の高さは、温湿度が 1.0m 、風速が 1.9m である。この結果を、風速と気温による

表-1 樹氷が発達した時の気象条件と樹氷の性質

Table 1 Summary of ice-forming conditions and soft rime properties.

No	Period	Wind direction	Wind speed V (m/s)	Air temperature T (°C)	Relative humidity H (%)	Soft rime	
						Growth rate (mm/h)	Density (g/cm ³)
I	18 ^h -24 ^h , May 29	SE	3.9	- 8.3	94	3.6	0.47
II	20 ^h , May 30-9 ^h , May 31	W	3.3	- 7.8	94	1.6	0.13
III	18 ^h , May 31-8 ^h , June 1	NW	2.3	- 8.6	93	1.1	0.21
IV	9 ^h -11 ^h , June 1	N	2.8	- 9.5	94	3.0	
V	20 ^h , June 1-8 ^h , June 2	W	3.0	-11.3	92	5.4	
VI	18 ^h , June 2-8 ^h , June 3	W	2.4	-10.2	93	3.5	0.23
VII	10 ^h , June 3-1 ^h , June 4	W	0.8	-10.0	94	0.9	
VIII	19 ^h , June 4-10 ^h , June 5	W	0.5	- 9.1	93	1.1	0.28
IX	10 ^h -24 ^h , June 5	W	1.8	- 9.1	93	2.5	0.19
X	0 ^h -8 ^h , June 7	W	0.6	- 8.7	93	1.2	
XI	0 ^h -8 ^h , June 9	N	4.4	- 8.9	93	1.2	
XII	23 ^h , June 10 ^h -8 ^h , June 11	NW	2.5	- 7.6	95	2.0	0.35

着氷の型の分類(黒岩, 1956)に当てはめてみると, 観測された着氷は, すべて樹氷型であることがわかる。樹氷(Soft rime)は, 白く柔らかく不透明な着氷で, その典型は「エビのシッポ」と呼ばれるように, 幅の広い方を風上に向け, 末広がりに風上側に成長してゆく。観測された樹氷も図-5の接写写真に示したようにこれらの特徴を有していた。図-5は, 表-1のNoⅧの樹氷で, 風上側の先端部が二つに分かれ, 隙間ができていたのが見てとれる。

着氷の物理的性質のなかで重要なものの一つに密度があげられる。表-1の観測のうちのNo I, II, III, VI, VII, IX, XIIについては, 脱落する前に樹氷を採取して密度を測定することができた。着氷はその外形が不規則でかつ不均質であるため体積を正確に求めることは難しいが, ここでは平均化した外形をメジャーで測って体積の概略値を求めた。その際, 図-5に示したような隙間は無視して外形を測った。こうして算出した樹氷の密度は, 0.13~0.47g/cm³の範囲にあった。樹氷の密度は鈴木(1987)によれば0.2~0.4g/cm³で, 黒岩(1956)によれば0.6g/cm³以下となっており, それらとはほぼ同じ値と言える。

これら密度を測定した樹氷については, 竹棒の高さ1.3m付近の着氷の重量が得られているので,

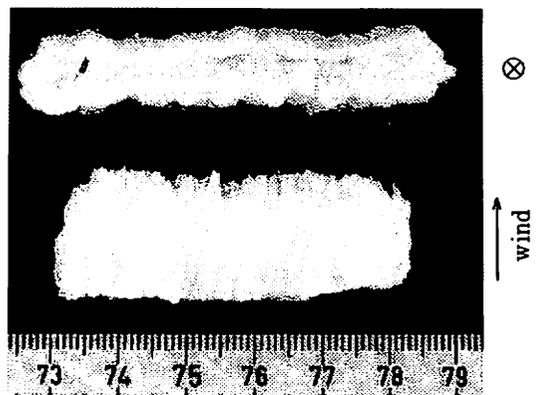


図-5 樹氷の接写写真
(上: 前面から見たところ,
下: 横から見たところ)

Fig. 5 Close-up photography of soft rime.
(up : front view, down : side view)

それから単位長さ当りの着水量の平均的な増加速度 (dM/dt) が求められる。この dM/dt と密度との関係を図-6 に示した。これによれば dM/dt が増大するほど、密度が大きくなる傾向が見られる。特に Na I の樹氷は、密度が 0.47g/cm^3 と大きく、かなり硬かった。これは、この時の風速が密度を測定した中では最も大きかったことからわかるように、樹氷独特の粒状構造が風速によって密に固くなったためと考えられる。

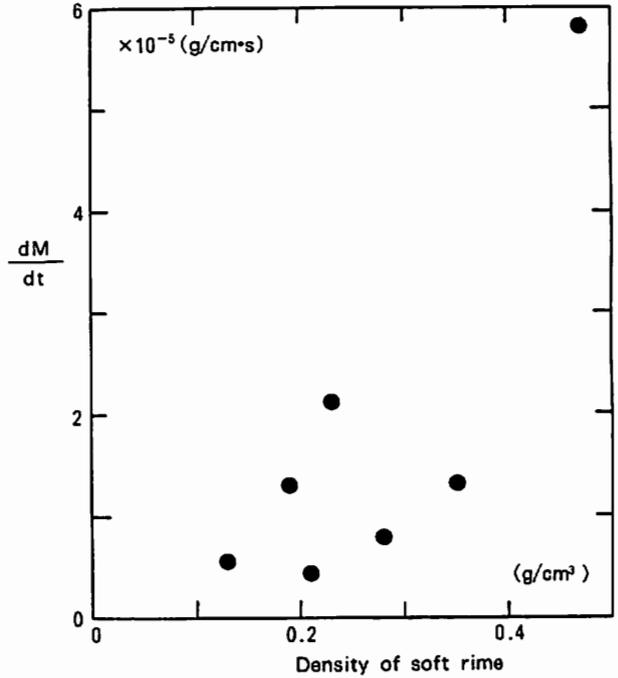


図-6 樹氷の重量の増加速度 (dM/dt) と密度の関係
 Fig. 6 Relation between growth rate (dM/dt) and density of soft rime.

IV 円柱への着氷の成長と霧水量

Langmuir and Blodgett (1946) は円柱への過冷却水滴の衝突率を流体力学的に考察した。彼らに従って円柱への着氷の成長について述べる。着氷のうち樹氷の場合は、付着した水滴が全部凍結するので、どれだけ付着するかだけが問題になる。すなわち、半径 R の円柱の単位長さ l に dt 時間に着氷する過冷却水滴の量を dM とすると、単位時間当りの着水量は

$$\frac{dM}{dt} = 2\alpha WVR \quad (1)$$

で表される。ここで W は雲の単位体積中の過冷却水滴の量、 V は風速、 α は捕捉率 (Collection efficiency) である。 α は V , R , r (過冷却水滴の半径) の関数で $0 \sim 1$ の値をとり、次式で表される λ と ϕ の二つの無次元量で決まる。

$$\lambda = \frac{2}{9} \frac{\rho_w V r^2}{\mu R} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{18 \rho_a^2 V R}{\mu \rho_w} \quad (3)$$

ここで ρ_a , ρ_w はそれぞれ空気と水滴の密度、 μ は空気の粘性係数である。

前述のように、密度を測定した樹氷に対しては成長中の平均的な dM/dt が求められるので、過冷却水滴の半径 r を決めてやれば、その間の気象条件から空気の単位体積中に含まれる過冷却水滴の量 (霧

水量) W が求められる。ただし、樹氷は成長と共に風上に向かって幅が広がってゆくが、この観測ではその幅は広がってもせいぜい竹棒の直径と同程度であったので、捕捉率 α は竹棒に対して計算し、樹氷が成長してもその値は一定と仮定した。雪面上1.3mと1.9mでの風速の差はそれほど大きくないので、ここでは1.9mでの測定値を補正をせずに使った。過冷却水滴の直径は、樹氷型の着氷時には5~20 μ の範囲にある(黒岩, 1956)。そこで、ここではその直径を15 μ と定め、捕捉率 α や霧水量 W を求めた。その結果を表-2に示す。これによれば捕捉率 α は0.15~0.34、霧水量 W は0.1~0.5g/m³の範囲にあった。黒岩(1956)によれば、着氷時の霧水量は一般に0.3~0.6g/m³とされており、求めた霧水量の値とよく合っている。

表-2 竹棒(半径 R)の捕捉率(α)と霧水量(W)の算定
 Table 2 Calculation of collection efficiency (α) of bamboo stake and liquid water content (W) of air.
 R : radius of bamboo stake, dM/dt : growth rate of soft rime

No	Growth time (h)	$2R$ (cm)	α	dM/dt (g/cm ³ s)	W (g/m ³)
I	6.5	0.9	0.31	5.8×10^{-5}	0.5
II	13.5	0.7	0.34	5.3×10^{-6}	0.1
III	15	0.7	0.25	4.2×10^{-6}	0.1
VI	14	0.9	0.20	2.1×10^{-5}	0.5
IX	11.5	1.0	0.15	1.3×10^{-5}	0.4
XII	11	0.85	0.22	1.3×10^{-5}	0.3

調査期間中、テント外に出ると過冷却水滴がメガネに多量に付着し、拭っても曇って作業に難渋したことが2回あった。これが表-2のNo. IとVIの期間で、霧水量が0.5g/m³と最も多かった時と符合している。

V 氷河の涵養に対する着氷の寄与

雲に覆われた期間に頻繁に起こった着氷現象が氷河の涵養にどれほど寄与するか考えてみた。

前述のように雪面に鉛直に立てた竹棒には度々樹氷が付着したが、その風上に発達した長さの鉛直分布を調べた例を図-7に示した。これによると樹氷は、雪面からの高さの対数に比例して発達していることがわかる。すなわち雪面付近では、樹氷の付着は非常に少なくなる。風速の鉛直分布もこれと似た関係となっており、風速が樹氷の形成に大きな役割を担っていることを示している。雪面付近は風速がほとんど0のため、鉛直な物体に比べ雪面に過冷却水滴が衝突することは少ない。それでも、雪面上の物体に樹氷の発達が著しい時には、水平な雪面に風上に向かってごく小さな木の葉を斜めに立てたような形をした着氷が見られた(図-8)。これは竹棒の横に発達した樹氷よりも脆く、軽く触れただけでつぶれるようなものであった。この雪面への着氷の量を推定してみる。

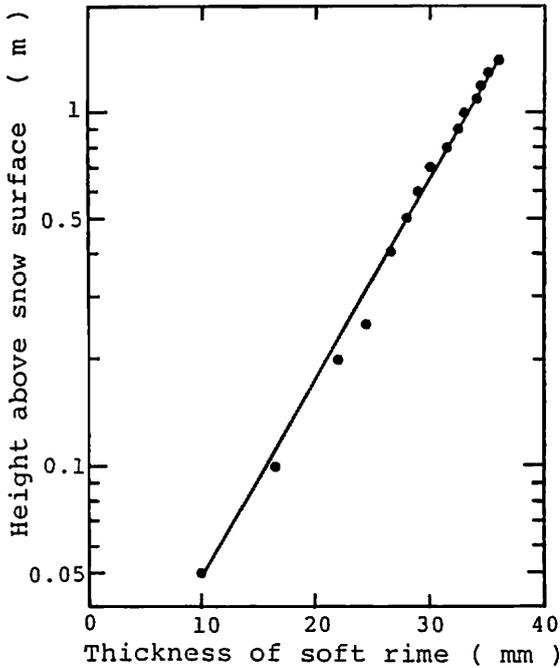


図-7 6月5日に半日で竹棒に発達した樹氷の長さの鉛直分布

Fig. 7 Vertical profile of the thickness of soft rime developed on a bamboo stake for a half a day on June 5.

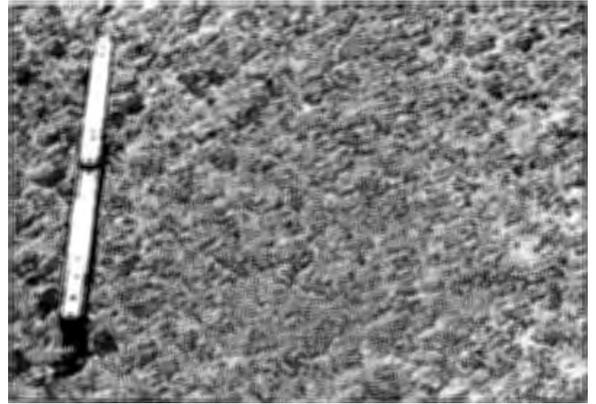


図-8 水平な雪面上への着氷
Fig. 8 Icing on horizontal snow surface.

調査期間の途中の6月4日から、50×40cm程度の断熱材(厚さ2.5cm)を雪面に置き降雪板として降雪量を測定した。降雪板の上面は雪面と同じレベルにセットした。この降雪板には降雪の堆積の他に雪面と同じように着氷も発達した。6月4日から13日までの10日間の降雪と着氷の累計は水量で2.0mmであった。一方、同じ期間の雨量計による降水量は0.9mmであった。雨量計は受水口高さが雪面から1.3mにセットされた直径20cmの円筒である。受水口の縁に着氷がつきそれが一部混入したこともあるが、降水のほとんどが降雪である。雨量計の捕捉率を1として、引き算すると10日間の雪面への着氷量は約1mmとなった。

調査期間中には、冬期間このスバルバル諸島を包み込んでいた海水が北方へ後退し北緯80°付近まで開水面が現れ、海からの水蒸気の供給がそれまでと比べて格段に多くなった。このため過冷却水滴の雲に覆われることが多かったと考えられる。このような頻繁な着氷が夏の約5カ月間——150日も続くとして着氷量を多めに見積ると、15mmとなる。一方、調査地での積雪断面観測によれば、1986～1987年冬期に堆積した積雪の相当水量は152mmであることがわかっている(和泉ほか, 1987)。よって雪面への着氷量は多めに見積っても年間堆積量の1割程度でしかない。

よって、雪面より上にある物体には著しく着氷が発達することはあるが、水平な雪面への着氷量は樹氷の鉛直分布や降雪板による見積りからみても量的には少なく、氷河の涵養に対する寄与は大きくないと結論される。Schytt (1964) はスバルバル諸島の北東島(Nordautlandet)の氷帽のドームの頂部で、1956年9月に同年の夏以降に堆積した表層42cmについて積雪断面観測によって細かな観察を行い、その表層中に含まれる着氷量が水量で10%以下であったと述べている。また、観測を行った9月に

は沿岸にはまだ開水面が広がっていて過冷却水滴の雲に覆われることが多いため着水量が多くなったのであり、年間堆積量としては着氷量の寄与は大きくないと述べている。これは上で述べた結論を支持している。

VI ま と め

1987年5～6月、スピッツベルゲン島のオスゴルド氷河の涵養域において氷河ボーリングを実施していた期間、頻繁に発生した着氷現象について調べた。着氷は樹氷型で、これまでに調べられた樹氷成長時の気温、風速の範囲に入っていた。樹氷の密度は、 $0.13\sim 0.47\text{g/cm}^3$ の範囲にあり、単位時間当りの着氷量が多くなるにつれ大きくなる傾向が見られた。また、過冷却水滴の直径を仮定して捕捉率を出し、それから計算された霧水量は $0.1\sim 0.5\text{g/m}^2$ の範囲にあった。

また、降雪板と雨量計を使い雪面への着氷量を10日間で約1mm（水量換算）と見積り、それは夏の期間に卓越することから、調査氷河の涵養に対する着氷の寄与は大きくないと結論した。

おわりに、北極圏氷河学術調査隊（JAGE 1987）の方々には気象観測に協力していただいた。特に、長岡工業高等専門学校佐藤和秀教授には現地での気象観測から気象データのとりまとめまで負うところが大きい。ここに記して深く感謝の意を表します。

なお、この学術調査は文部省科学研究費海外学術研究「北極圏における雪氷コアによる比較氷河観測」によって実施されたものである。

参 考 文 献

- 和泉 薫, 佐藤和秀, 河村俊行, 亀田貴雄 (1987): スピッツベルゲン島高所における積雪と氷河水の形成過程。日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 310.
- Izumi, K., K. Satow, Y. Fujii and S. Kawaguchi (1988): Meteorological observations at Åsgårdfonna, Spitsbergen, 1987. *Bulletin of Glacier Research*, 6, 51-54.
- 黒岩大助 (1956): 着氷と着雪。北大応用電気研究所彙報, 8, 153-174.
- Langmuir, I. and K. B. Blodgett (1946): A mathematical investigation of water droplet trajectories. G. E. Res. Lab. Rep., RL225, 65pp.
- 鈴木道也 (1987): 雪氷電波・光工学。昭晃堂, 163pp.