



Title	雪庇の発生に関する実験的研究
Author(s)	内藤, 明男; NAITOU, Akio; 小林, 大二 他
Citation	低温科学. 物理篇, 44, 91-101
Issue Date	1986-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18521
Type	departmental bulletin paper
File Information	44_p91-101.pdf



雪庇の発生に関する実験的研究*

内藤 明 男**

(北海道大学大学院 理学研究科)

小林 大 二

(低温科学研究所)

(昭和60年11月受理)

1. 緒 言

ふぶきのあと山稜や河川の堤には雪庇が発生している。Seligman¹⁾はその著書の中で発煙筒実験を行ない、山稜に雪庇の発生する模様を風速分布を用いて説明した。その後風速分布と雪庇の成長を扱った Dawson³⁾は数値解析により、古川他³⁾は現地の風速分布観測結果により、それぞれ雪庇防止柵の設計をしていた。この他、Latham et al.⁴⁾は雪庇の周囲の電場が着雪とかかわりをもつと発表している。以上の雪庇についての研究は、自然に発生した雪庇を断片的に観測し風速分布でまとめあげる形をとっていた。これに対し、小林⁵⁾は野外で雪庇をつくり雪庇の発生過程を報告した。しかしながら実験例が少なく地ふぶきと雪庇の関係について調べることが必要と考えられた。

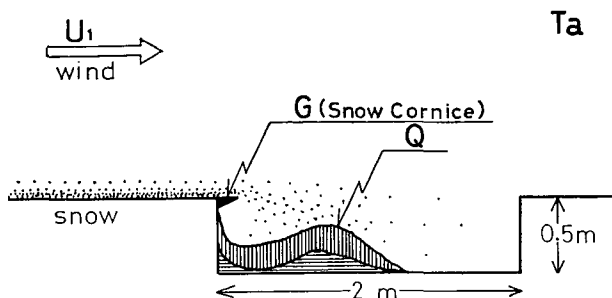
そこで本研究は、小林⁵⁾の例にならない野外と風洞で雪庇を発生させ、雪庇の発生から成長について調査したものである。

2. 実験方法

実験は野外と風洞において行なった。

2.1 野外実験

野外では第1図に示す主風向に直交する幅2mのみぞを掘り、みぞの風上側上端に発生し



第1図 野外実験の方法

u_1 : 雪面上1mの平均風速, T_a : 気温, G : 雪庇の成長量, Q : 地ふぶき量

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2778号

** 現在 財団法人日本気象協会北関東センター

た雪庇を観測した。

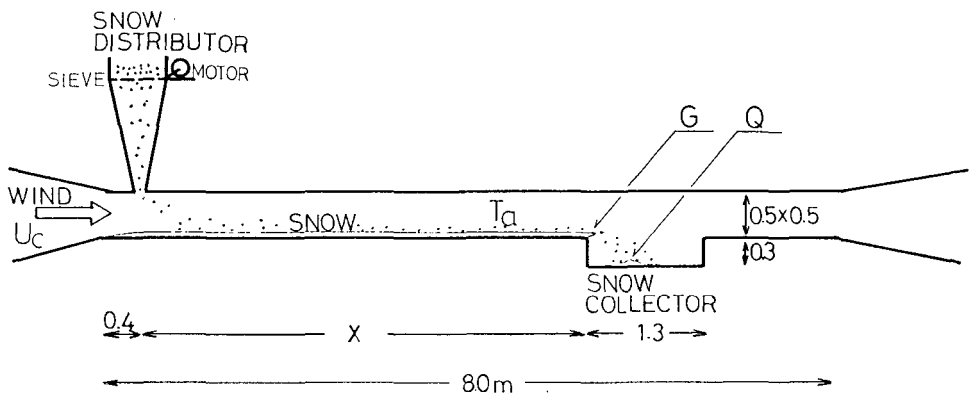
風速はピラム型風速計により雪面上1mの平均風速を、気温は水銀温度計により測定した。

地ふぶき量は Kobayashi⁶⁾ に従い、みぞに溜った積雪を、あらかじめ散布したタイムマークの色線ごとに計量した。

雪庇の成長量は間口が20cm×5cmの角型サンプラーを用い、みぞの風上側壁面より風下に伸びた雪庇を地ふぶき量と同じ時間間隔で切り取り計量した。

2.2 風洞実験

室温調整可能な風洞において第2図のような装置を設定した。風洞の風上側には地ふぶきの種つけのため降雪装置を配し、風洞床には降雪装置と同質の雪を敷き、風洞風下床には飛雪を捕捉するため箱を用意した。



第2図 風洞実験の方法

X は2.4m, 4.9m, 6.3mの3種類, 変化させた。 u_c : 風洞中心風速,
 T_a : 風洞内気温, G : 雪庇の成長量, Q : 地ふぶき量

風速はサーミスタ風速計により風洞中心風速を、気温は水銀温度計により測定した。

地ふぶき量は箱に溜った積雪を、雪庇の成長量は箱の風上側壁面より風下側へ伸びた雪庇を切り取り、それぞれ計量した。

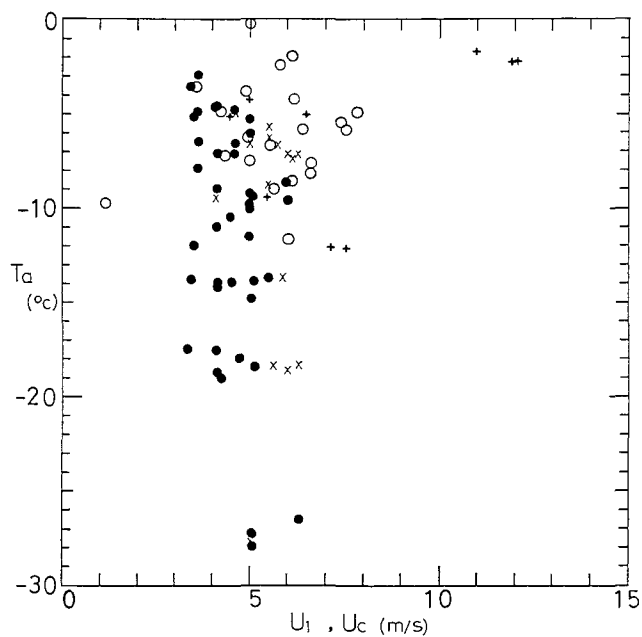
3. 気象条件

野外実験時の天気は32例中9例が降雪を伴う低い地ふぶき、3例が降雪を伴う高い地ふぶき、残りの20例が降雪を伴わない低い地ふぶきであった。

風洞においては、全例とも風上側で種つけのため雪を降らせた。

以上の実験のうち野外における高い地ふぶきでは雪庇は発生しなかった。

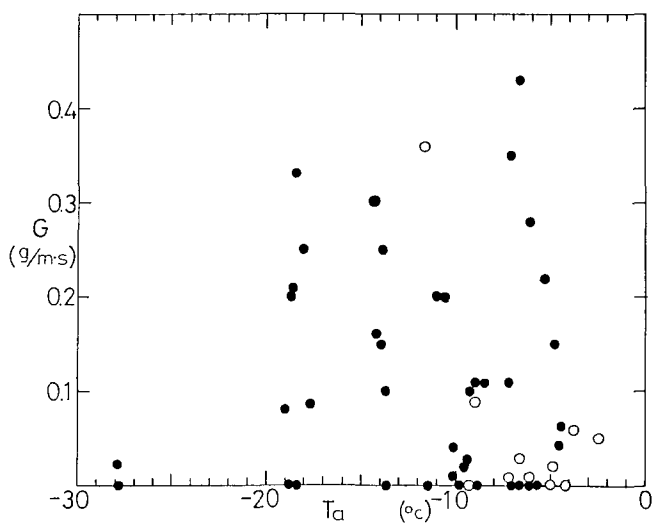
次に実験時の気温と風速を第3図に示す。風速は、雪面上1mの値と風洞中心風速が同じものとして扱った⁷⁾。第3図によれば、風速5m/s前後の帯域で雪庇の多くが発生している。気温に関しては、発生だけに限れば、 -30°C までは発生していると言える。同図で特異なのは、風速1m/s、気温 -10°C 付近で発生した雪庇で、これは降雪時の微風により雪庇状になったものである。雪庇よりもむしろ着雪と表現した方が適当と思われ、雪庇と着雪の境界が不明瞭な



第3図 実験時の気温と風速

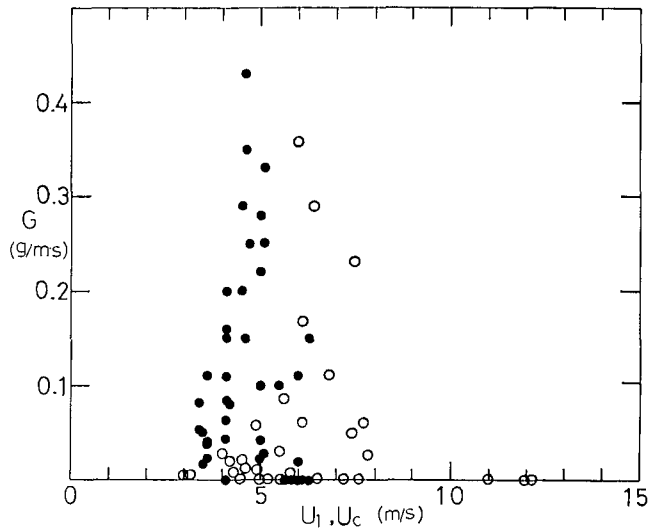
T_a : 気温, u : 野外実験時の雪面上1 mの平均風速, u_c : 風洞中心風速

- : 野外において雪庇が発生した場合
- : 風洞において雪庇が発生した場合
- +: 野外において雪庇が発生しなかった場合
- ×: 風洞において雪庇が発生しなかった場合



第4図 気温と雪庇の成長量との関係

- : 野外実験, ●: 風洞実験



第5図 風速と雪庇の成長量との関係
○: 野外実験, ●: 風洞実験

のに気づいた。

さて、ここで雪庇の成長量 (G) を、地ふぶき量と同じ単位をもつ、単位幅あたり、単位時間あたりに生成した雪庇の質量と定義する。この雪庇の成長量を、気温と風速についてまとめると第4図、第5図となった。気温については -20°C までは、雪庇が生長するということができよう。また -30°C 以下ではほとんど成長しないものと推定される。一方風速については 4 m/s から 8 m/s の範囲で 5 m/s 付近を頂点とするひと山分布になっている。この風速の下限値 4 m/s は、多くの文献 (たとえば Kikuchi⁷⁾) によれば地ふぶきの発生限界風速にあたる。また上限値 8 m/s は、Radok⁸⁾ の示した高い地ふぶきの発生限界風速 9 m/s に近い値を示している。

このように雪庇の発生に関わる風速に下限と上限のある事実は、雪庇防止柵の設計において利用されている。たとえば、Dawson et al.²⁾、古川他³⁾ においては雪庇の発生し易い部分の風速を柵を設けて強め、飛雪が堆積しないように工夫している。

4. 飛雪と雪庇の成長

4.1 飛雪の動き

Seligman¹⁾ の影響をうけた研究者たちは、雪庇が庇の下にまわり込んだ飛雪が庇の下面に着雪して成長すると考えた。ところが雪庇の周辺の飛雪の動きを観察すると第6図のようにその大部分の飛雪は雪庇の上面を跳躍運動したあと雪庇の先端から風下へ向けて飛び去っていた。この事実は、小林⁵⁾ の結果とも一致した。したがって飛雪が雪庇の下側からまわり込んで着雪する事実はないと確認された。

4.2 雪庇の成長過程

第6図の飛雪と雪庇の写真を一定の時間をあけて撮影したところ、第7図に示した輪郭線

が得られた。同図によれば、雪庇が風下へ成長するとき同時に雪庇の上面に雪が堆積していることが判る。この事実は出来たばかりの雪庇の横断面(第8図)を観察するといっそうはっきりする。雪庇内の層構造は雪庇の上面とほぼ平行に走り、雪庇が風下へ向って成長すると同時に雪庇上面に新しい層が堆積している。

さらにこれら各地ふぶきごとの成長を繰り返えすと、第9図に示すような雪庇が出来る。同図においても各雪庇の痕跡内に平行な層構造がみられ、雪庇の成長と雪庇上面の雪の堆積が裏づけられた。

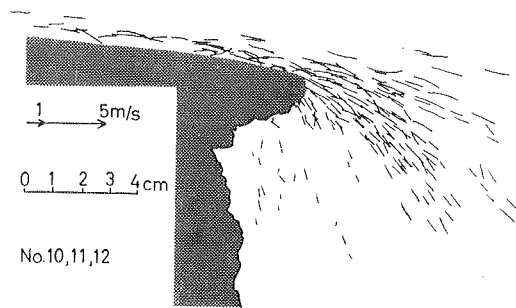
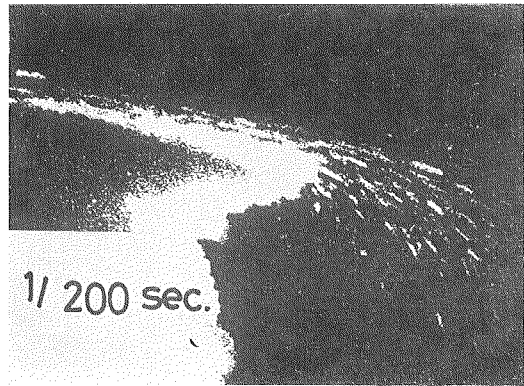
したがって雪庇は、第10図に示すように飛雪の一部が自重でたれ下がった雪庇の上面に堆積し、さらにその一部が雪庇先端から風下側にも伸びて形成されるものである。大きな雪庇はこのような過程を地ふぶきごとに繰り返した結果出来るものだと判った。

4.3 飛雪形状と着雪

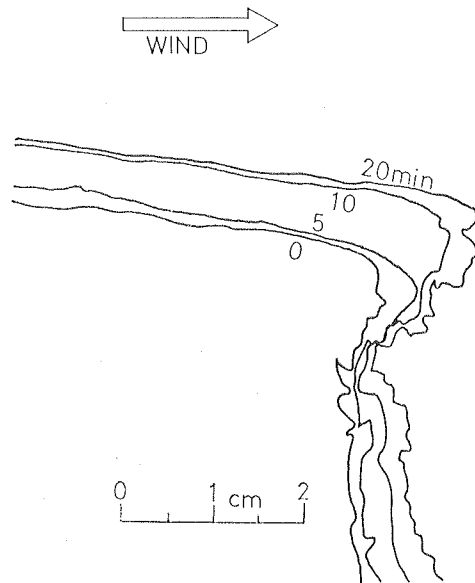
雪庇は本来不安定な先端にも雪粒が付着し成長する。運動量をもつ飛雪がなぜ雪庇上面に堆積し、その先端にも付着し、かつ他の飛雪にはじき飛ばされないのだろうか。

雪庇の成長過程を第6図の連続写真でみると、数10秒に1回の割合で風が弱まるとき跳躍運動していた雪粒が回転運動にかわり雪庇の上面に静止し堆積した。その一部が雪庇の先端にも運ばれすでに静止していた粒子に付着した。付着後の粒子はその後跳躍運動してきた粒子にはじき飛ばされることも少なかった。

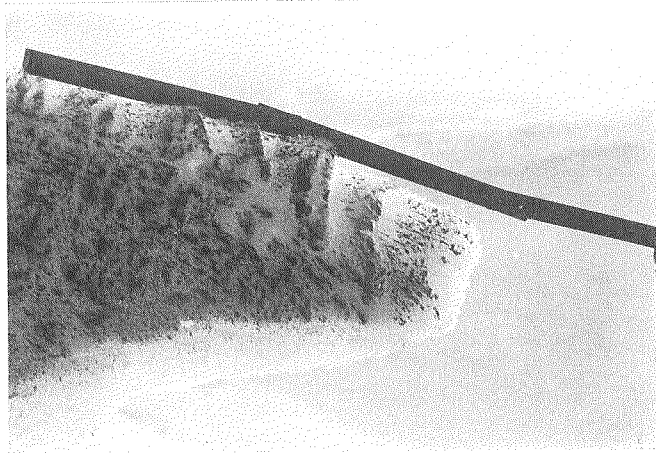
さて雪粒が砂粒と比べて、雪庇のような不安定な形状をつくり得るのは雪粒同志の焼結が最終的な原因である。しかしながら焼結には雪粒同志の瞬間的付着と比べて永い時間が必要である。そこで雪粒同志の結合力とし



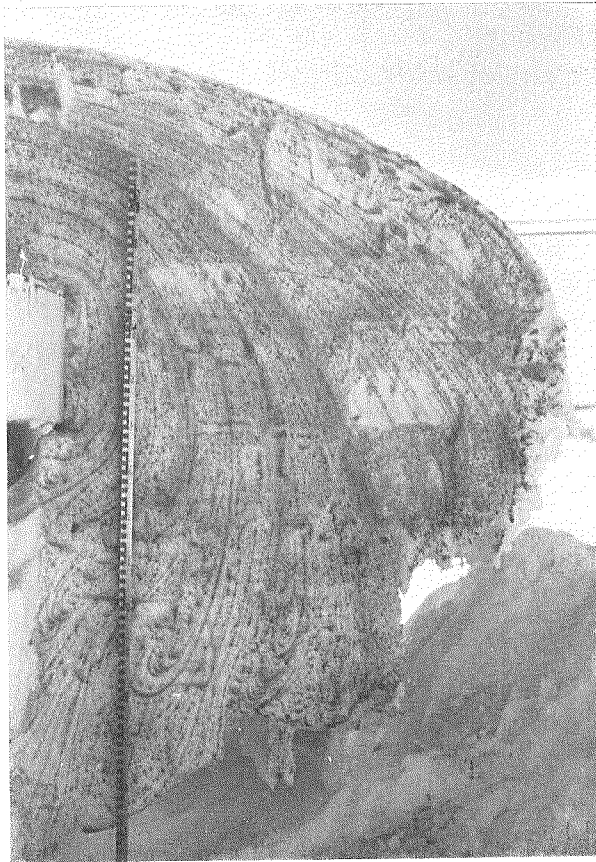
第6図 雪庇周辺における飛雪の動き
 上図：200分1の秒で撮影した飛雪の写真
 下図：上図3枚を投影した図



第7図 発生時の雪庇の輪郭線
 連続撮影した写真を5分毎に投影した図



第8図 発生直後の雲庇の横断面



第9図 屋根の上に出た雪庇の横断面

て氷表面に存在する水様膜による付着力(山田他⁹⁾)を考え、さらに結合力を大きくするため雪粒の形状を複雑にして接触面積を増やすことを考えた。この点を確認するため、粒子形状の違

いが雪庇発生に及ぼす影響を実験により調べた。

第11図に野外に発生した雪庇先端の薄片と飛雪の形状を示す。同図から雪粒同志が隣接粒子と複数の接触点をもち、各粒子はしまり雪やざらめ雪よりもむしろ新雪に近い形状をしていることが判断される。

飛雪の形状を表現する方法として黒岩¹⁰⁾は形の係数(F_s)を次のように定義した。

$$F_s = A_r/A_s \quad (1)$$

ただし A_r : 飛雪の投影された周長に匹敵する円の面積

A_s : 飛雪の投影面積

野外の飛雪(第11図)と風洞実験に用いた飛雪(第13図)との形の係数の頻

度分布を第12図に示した。新雪になるほど頻度分布の頂点は形の係数の大きい方へ移動している。野外の飛雪の分布がちょうど中間に位置し、風洞実験で用いた雪粒の形状が両極端なものであったことが判る。この点は他の文献(たとえば小島¹¹⁾)からも明らかでほぼ妥当な形状条件の設定であったと言える。なお風洞実験に用いた雪粒は採集後低温貯蔵2日以内の新雪と、採集後6ヵ月以上低温貯蔵した旧雪である。

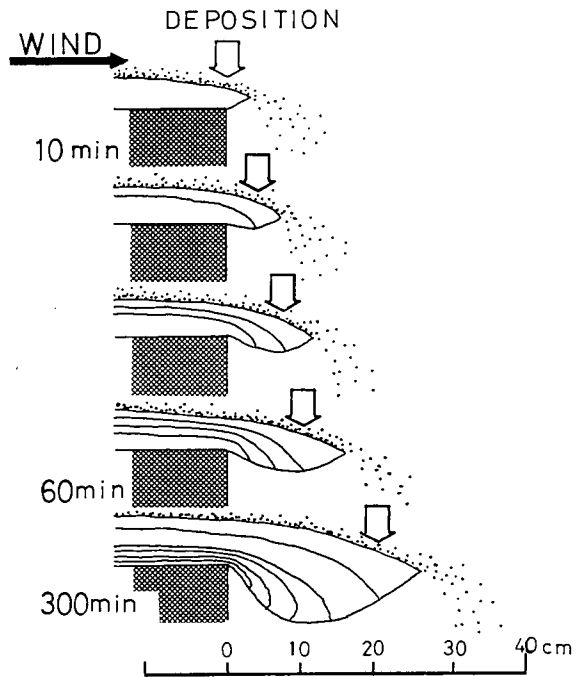
風洞実験は上述の2種類の雪質について気温をかえて行ない、風速は5 m/sと固定した。実験の状況を第13図に示す。いずれの気温条件でも新雪では雪庇が発生し、旧雪では発生しなかった。本実験では、各個の質量を同じくした雪粒を用いたわけではないので、新雪と旧雪を比べると旧雪はひと粒あたり重いものになっている。したがって新雪による雪庇発生は、前述の雪粒同志の接触面積の大小の他、ひと粒あたりの質量の差が運動量の差になり、新雪程度では雪粒同志の付着を破壊するに至らなかったと考えられる。

いずれにせよ雪庇が発生するときは、形の係数の大きな新雪に近い形状の飛雪によりつくられることが判った。

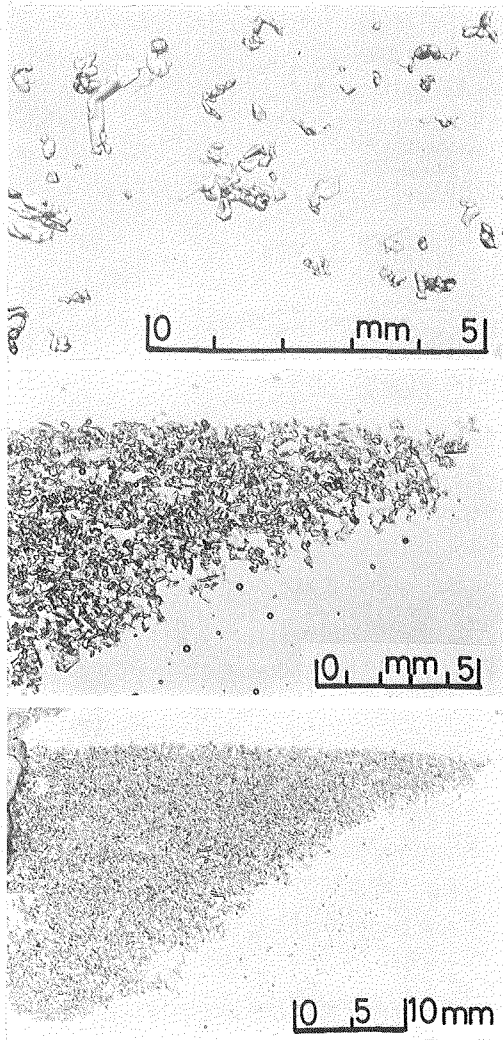
4.4 地ふぶき量と雪庇生長量

雪庇は、地ふぶきにより輸送される飛雪の一部が雪庇として捕捉されて、第10図のように生長することが判ったので、風洞で地ふぶき量と雪庇生長量の関係を調べた。

第14図に、地ふぶき量と風速の関係を示す。降雪装置から風下に行く程、地ふぶき量は指数関数的に減少する。そこで、降雪装置の風下、2.4、4.9、6.3 mの各位置で、地ふぶき量の測定を行った。また、雪庇生長量も同じく、3ヵ所で測定した。第15図には、雪庇生長量を、

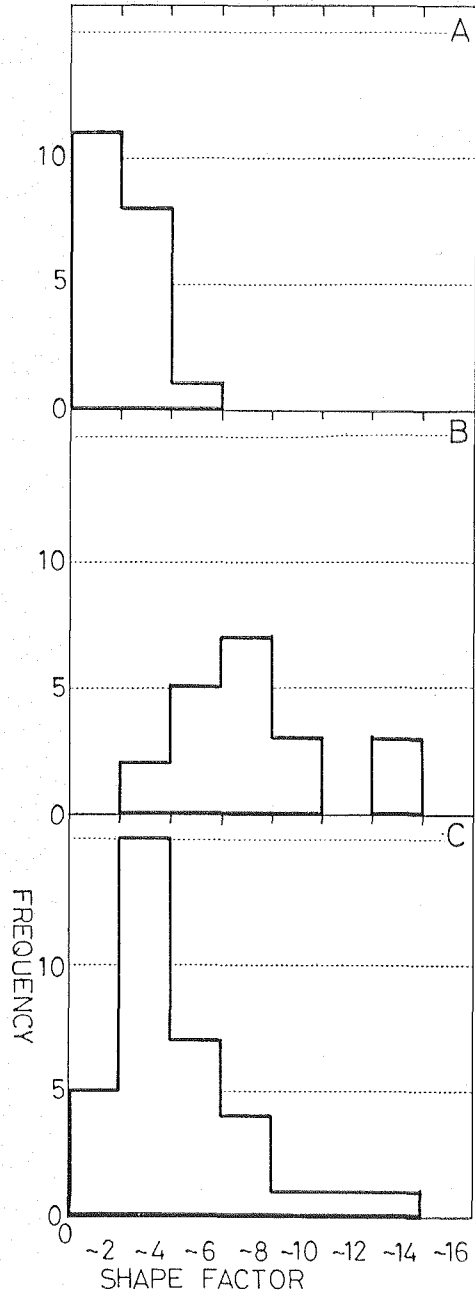


第10図 雪庇の成長過程



第11図 発生直後の雪庇の薄片と飛雪

上：雪面付近の飛雪，中：雪庇の先端，下：雪庇の全貌，観測時は風速5 m/s，雪温 -7.7°C であった

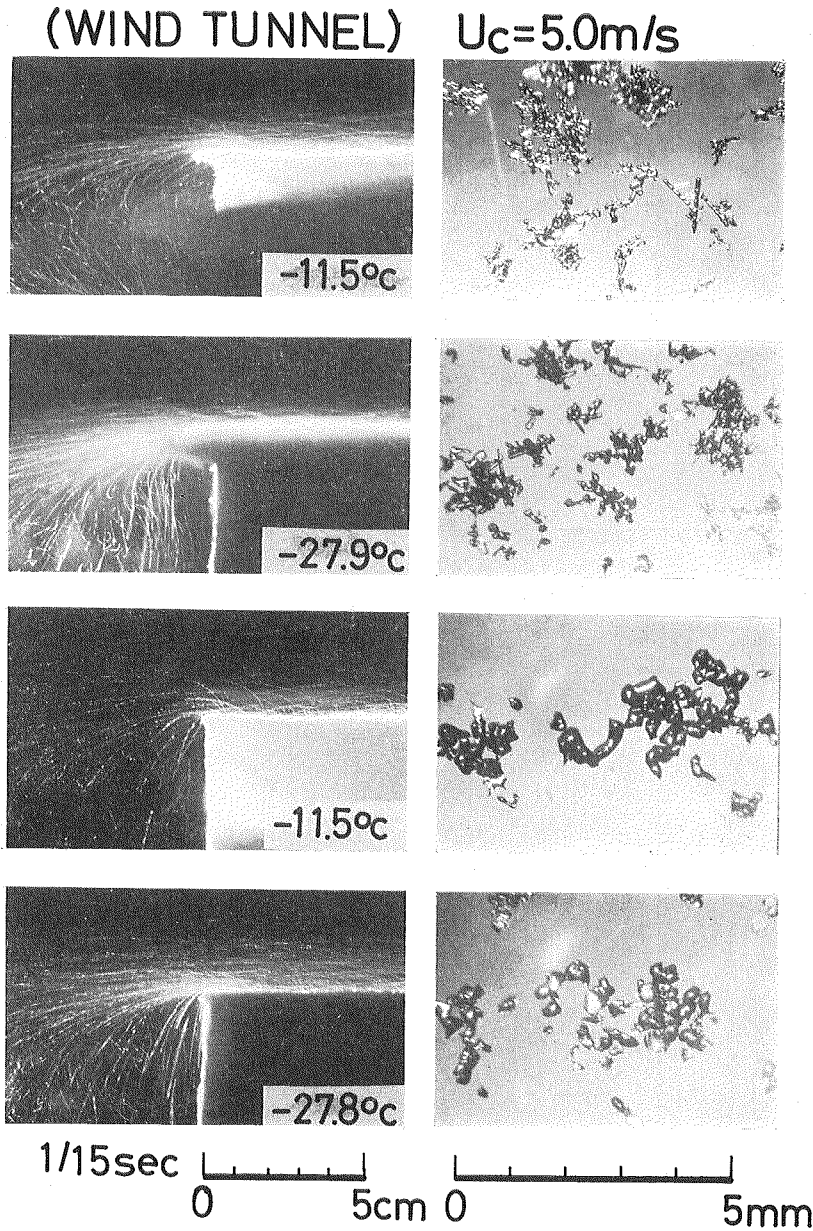


第12図 形の係数の頻度分布

A：風洞で用いた旧雪，B：風洞で用いた新雪，C：第11図に示した野外の飛雪

地ふぶき量で規格化した値—雪庇の地ふぶき捕捉率—を地ふぶき量に対して示した。また、Kikuchi⁷⁾が風洞で求めた、地ふぶき量と風速の関係(第14図参照)を用いて、風速の目安を、地ふぶき量と同じ軸に示した。

第15図を第14図とあわせてみると、雪庇の生長の風速の範囲は、飛雪の跳躍移動の、浮遊移動よりも卓越する4~8 m/sにある。特に顕著な生長は、4~6 m/sの風速範囲においておこることになる。また、雪庇捕捉率は、大略0.05以下、すなわち、地ふぶき量の5%以下が、雪庇として生長している。風速が強くなると 捕捉率がおちるのは、雪庇の破壊率が、



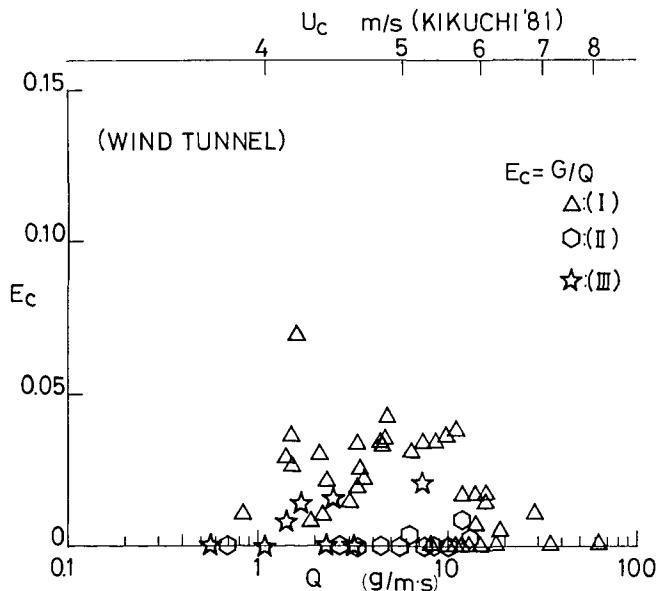
第13図 飛雪形と雪庇の発生との関係

- (1) $T_a=-11.5^\circ\text{C}$, 新雪, (2) $T_a=-27.9^\circ\text{C}$, 新雪
 (3) $T_a=-11.5^\circ\text{C}$, 旧雪, (4) $T_a=-27.8^\circ\text{C}$, 旧雪

大きくなるためか、または、飛雪粒子そのものが、最初から、雪庇上にとどまり得なくなるのか等、今後調べてみる必要がある。なお野外観測で求めた雪庇捕捉率は、大略0.1以下であった。



第14図 風洞における風速と地ふぶき量の関係
 (I) $X=2.4$ m, (II) $X=4.9$ m, (III) $X=6.3$ m
 (X は第2図参照)



第15図 風洞における地ふぶき量と捕捉率の関係
 図中の記号は第14図に対応する

本研究をまとめるにあたっては多方面の方々の協力、援助を仰いだ。小島賢治教授他融雪科学部門の方々、藤岡敏夫教授他雪害科学部門の方々、北海道開発局土木試験所石本敬志氏他の方々に、観測に際して様々な配慮を賜わった。この場を借りて感謝の意を表わす次第である。

なお、本報告書は著者のひとり内藤が、理学研究科修士課程の修了研究として実施したのをまとめたものである。

文 献

- 1) Seligman, G. 1936 Snow structure and Ski Fields. Int. Glaciol. Soc. Copy, 1980, 555 pp.
- 2) Dawson, K. L. and Lang, T. E. 1979 Evaluation of jet-roof geometry for snow-cornice control. *J. Glaciol.*, **22**, 503-511.
- 3) 古川 巖・青木 義 1966 雪庇防止柵の解析的研究. 日本積雪連合資料, No. 82, 1-17.
- 4) Latham, J. and Montagne, J. 1970 The possible importance of electrical forces in the development of snow cornices. *J. Glaciol.*, **9**, 375-384.
- 5) 小林大二 1969 みぞの縁にできる小雪庇, 低温科学, 物理篇, **27**, 405-407.
- 6) Kobayashi, D. 1972 Studies of snow transport in low-level drifting snow. Cont Inst. Low Temp. Sci. **A**, **24**, 1-58.
- 7) Kikuchi, T. 1981 Studies on aerodynamic surface roughness associated with drifting snow. *Memo. Fac. Sci. Kouchi Univ.*, **2-3**, 13-37.
- 8) Radok, U. 1968 Deposition and erosion of snow by the wind. *CRREL Res. Rep.*, **230**, 23 pp.
- 9) 山田知充・大浦浩文 1968 氷の固着現象の研究 I, 一氷球と氷板の間の付着力の測定一. 低温科学, 物理篇, **27**, 31-39.
- 10) 黒岩大助 1971 スキーヤーの科学. NHK ブックス, 174 pp.
- 11) 小島賢治 1969 顕微鏡による飛雪粒子の観測. 低温科学, 物理篇, **27**, 115-138.

Summary

The authors studied the generation and growing process of a snow cornice both in the field (Fig. 1) and in the wind tunnel (Fig. 2), with the following result. A snow cornice is formed by the same process as was explained by Kobayashi's theory, in which drifting snow particles adhere one after another at the leeward edge of the windward wall of the trench, in the form of a thin slab of snow elongating leewards, then the slab hangs down under its weight, depositing drifted snow particles on it, as shown in Fig. 10.

The meteorological conditions suitable for cornice formation is as follows: the air temperature is between 0 and -20°C (Fig. 4) and the wind speed is between 4 and 8 m/s (Fig. 5). New snow in an irregular dendriform shape is more appropriate for the cornice formation than aged round snow.

The capture coefficient of drifting snow by the snow cornice is turned out to be less than 0.05 in the wind tunnel (Fig. 15) and 0.1 in the field.