

吹雪発生に関する実験的研究

小林 俊一* · 前野 紀一**

An experimental study on the initiation of blowing snow
by
Shun'ichi KOBAYASHI and Norikazu MAENO

(Abstract)

Blowing snow was produced artificially in a cold wind-tunnel belonging to the Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, and various measurements were conducted including total transport rates, mean saltation lengths and threshold wind velocity of blowing snow. The total transport rate and mean saltation length increased with increasing wind velocity, but they did not show clear dependence on temperature.

The threshold wind velocity of blowing snow occurrence showed a dependence on temperature; the dependence coincided with a field observation result.

I ま え が き

吹雪は、降雪も地上にいったん積った雪粒子も風によって空中を共に移動する現象である。雪氷災害の立場からみれば吹雪は山岳地帯に雪庇を形成し雪崩の原因となったり、着氷雪を引き起こすこともあり、更には屋根雪の積雪状態の不整にも関わり、雪氷災害の広い部分に関係している。吹雪そのものは、視程障害を起こす他、風の弱まる建造物の周囲や道路、鉄道、空港などで局所的に雪の吹き溜まりを作って著しい交通障害を引き起こす。更には吹雪による学校の休校や山での遭難事故を引き起こすなど毎冬社会的問題となる。

吹雪の発生は、最も被害の大きい「低気圧型」(強風と降雪を伴う)と気圧配置が西高東低の「季節風型」(主に地吹雪の発生)とに分類できる。しかし、いずれの場合も、雪粒子の移動量に関していえば、雪面近い所が多く、雪面から離れるにしたがって指数関数的に減少するので、雪面付近の雪粒子の挙動を調べる事が重要となる。実用的な問題としては、特定の場所の吹雪の発生の可能性および吹雪量を風速・気温・降雪量等の一般気象情報から予報できることが望ましいが現在のところ、そのような方法はまだ確立されていない。そこで、吹雪の発生や吹雪量を支配するパラメーターとして何が重要であるかを明らかにするために、北海道大学低温科学研究所の低温風洞を使って研究を行ったので、その概要を報告する。

* 新潟大学積雪地域災害研究センター

** 北海道大学低温科学研究所

II 実験方法

用いた低温風洞はゲッチンゲン型環流式風洞で、測定部の寸法は、断面積 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 、長さ 8.0 m である。風洞系全体は低温室に設置されており、温度は -30°C まで可変で、長時間一定温度に保つことができる。人工吹雪の発生は、冬期間に野外から採集して低温室に保存してあった自然雪を約 2 mm 開口の篩で低温風洞の床に平らに敷き雪面を作り、風速を増加させて雪面から吹雪粒子が自然発生する場合と、風上側で自動篩から雪粒子を供給して人工的に吹雪を発生させる場合とで行われた。ただし、供給雪粒子は少量で、それ自身が主な吹雪粒子となるのではなく、風上側での吹雪粒子発生引金として作用する。また、風下側には、箱型の吹雪計（幅 20 cm 、長さ 10 cm 、深さ 10 cm の小箱を6個風向に沿って並べたもの）を上表面が雪面に一致するように設置して、それぞれの小箱に溜った雪の質量を測定して、吹雪量と平均跳躍距離を計算から求めた。更に、風洞の中央の位置に、光を用いた吹雪濃度計を設置して吹雪による光の減衰の測定から吹雪濃度の変動を測定した。その他、吹雪粒子の濃度分布が写真撮影によって調べられ、速度分布や粒径分布も測定された。また雪面上の風速分布は熱膜風速計によって測定された。以上一連の測定系を図-1に示す。

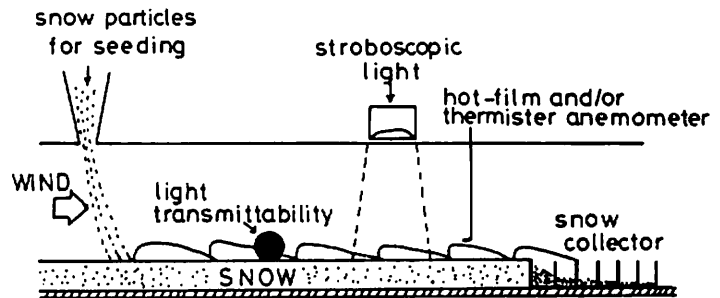


図-1 低温風洞（北海道大学低温科学研究所）による人工吹雪実験の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of measuring apparatuses

III 実験結果

1. 人工吹雪の持続性

人工吹雪の発生は、風速を増加させて雪面から吹雪粒子が自然発生する場合と風上側の自動篩から雪粒子を自然落下させながら供給する場合の二方法で行われた。これらの吹雪の状態を、光を用いた吹雪濃度計で調べた結果がそれぞれ図-2と図-3である。図-2は、たて軸は光の減衰率、よこ軸は風洞内の風速を増加させて風洞内の中心風速が 6.1 m/s になった時に吹雪が発生し始めてからの経過時間を示した。風洞内温度は -5.3°C であった。この状態の吹雪の自然発生は、ほとんど 20 秒間しか持続せず、更に吹雪を発生させる場合には風速を増加させなければならない。吹雪の発生限界風速を調べる目的の場合にこの方法を主として採用した。吹雪の持続時間を長く保つには、風上側の自動篩からの雪粒子の供給が必要である。この方法による吹雪状態の結果が図-3であり、最初風速を 5.2 m/s に設定した段階では吹雪は発生せず、自動篩からの雪の供給を始めると吹雪が発生し、雪の供給を中止すると約 10 秒遅れて吹雪が止む。このように雪の供給によって、主として吹雪の跳躍運動を風洞内で持続させることが可能である。

2. 全吹雪量と吹雪粒子の平均跳躍距離

吹雪をその雪粒の運動から分類すると、雪粒の、(1)転がり (creep)、(2)跳躍 (saltation)、(3)浮遊 (suspension) に区別されるが、低温風洞実験では大部分が(1)と(2)で占められている。(1)は跳躍の初期段階とみなせば、跳躍運動を実験で調べていることになる。この現象は地吹雪とも呼ばれており、寒冷的な積雪地域における交通障害の主要な部分を占めている。先づ、全吹雪量と跳躍距離の特長を調べるた

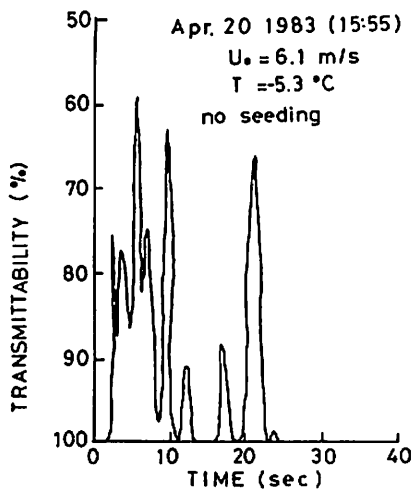


図-2 光透過率による吹雪濃度変化
(吹雪の自然発生の場合)

Fig. 2 Variations of snow drift density measured by light transmittability method (in the case drifting snow occurred without supplying snow particles for trigger)

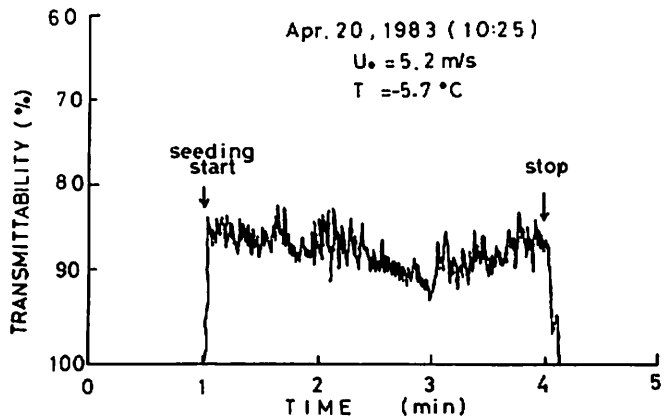


図-3 光透過率による吹雪濃度変化
(篩から雪粒子を供給した場合)

Fig. 3 Variations of snow drift density measured by light transmittability method (in the case blowing snow occurred by supplying snow particles for trigger)

めに、図-1に示されている6箱の小箱から構成される箱型の吹雪計を用いた。すなわち、各小箱の中に一定時間内に溜った雪の質量から、BAGNOLD(1941)、河村(1951)の飛砂の理論によって全吹雪量(Q)や平均跳躍距離(\bar{L})を求めることができる。

Q と \bar{L} の関係は、次の(1)式で表わされる。

$$Q = \int_0^{\infty} F(x) dx = G \cdot \bar{L} \quad (1)$$

ここで、 $F(x)$ は一番風上側の箱型吹雪計の位置を原点として風下側へとった距離 x における吹雪の落下量($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)で、 G は $F(0)$ の値である。この関係は箱型吹雪計による実測値を使ってグラフ上で求めることができる。

図-4に風速が弱く温度が高い場合と風速が強く温度の低い場合の例を示した。またこの装置では、 $F(x)$ の測定限界が $10^{-9} \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 程度なので、この値になる x まで積分して全吹雪量を求め、 Q と G の値から(1)式を使って \bar{L} を求めた。

図-5は温度 -5°C と -10°C で測定された全吹雪量と風洞の中心風速との関係である。全吹雪量は風速の増加に伴い増加するが、温度による違いは顕著には表われず、むしろ高温の Q が低温の Q より大きい結果になっている。中心風速が 5 m/s で温度を -5°C から -20°C まで変えて全吹雪量を調べた結果が図-6である。ここでも温度依存性は明確でないが、傾向としては、 Q の値は温度の低下とともに減少するようにさえ見え、成田(1977)が主張するような、温度依存性は観測されなかった。

次に、平均跳躍距離と風洞の中心風速の関係を図-7に示す。平均跳躍距離も風速の増加に伴い増加するが、図中の温度 -5°C と -10°C の場合の違いは表われなかった。更に平均跳躍距離と -5°C から -20°C の温度範囲についても図-8に示したが、平均跳躍距離の温度依存性は表われなかった。

成田 (1977) は南極みずほ基地 (南緯70°42.6′, 東経44°18.9′, 標高2,230 mの氷床上の基地) で同様な箱型の吹雪計による吹雪量の測定結果とKOBAYASHI (1972) が北海道で行った同じ方法による測定結果とを比較して、吹雪量も平均跳躍距離も温度が低くなるにつれていずれも増加するという温度依存性のあることを報告した。しかし、これは我々の結果とは一致しない。雪質すなわち、形や粒の大きさには南極の場合と北海道の場合とで大きな差があるので、成田の結果は温度依存性ではなく、雪質の差を表わしているのではないかという見方もできる。南極の場合は雪粒子の大きさは小さく、北海道の場合は大きい。BAGNOLD (1941) によれば吹雪発生の臨界風速は粒径の平方根に比例すると言われる。本実験で行った雪粒子の大きさは0.1mmから0.5mmの範囲にあり雪面に近い程大きな粒子が、雪面から離れる程小さな粒子が運動していた。そこで、雪質をコントロールして吹雪の発生臨界の低温風洞実験を行ったので次に述べる。

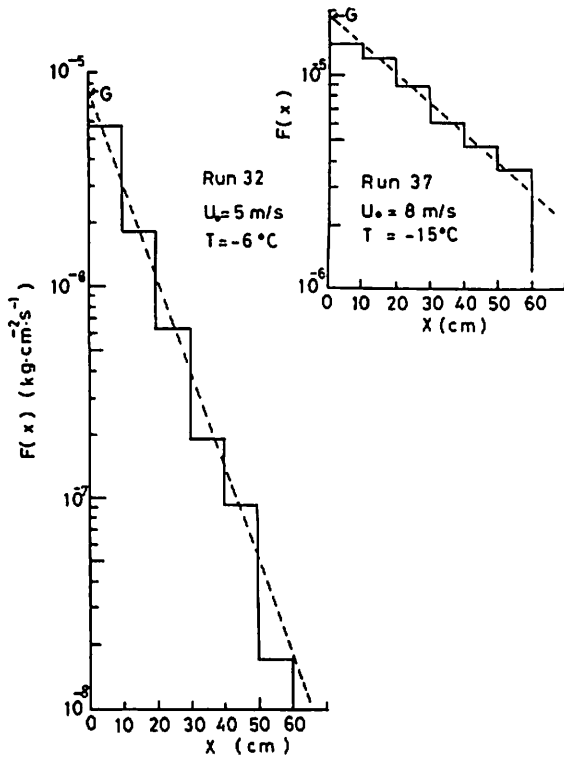


図-4 箱型吹雪計による吹雪落下量の測定例

Fig. 4 Mass flux of falling snow particles on a box type snow-collector

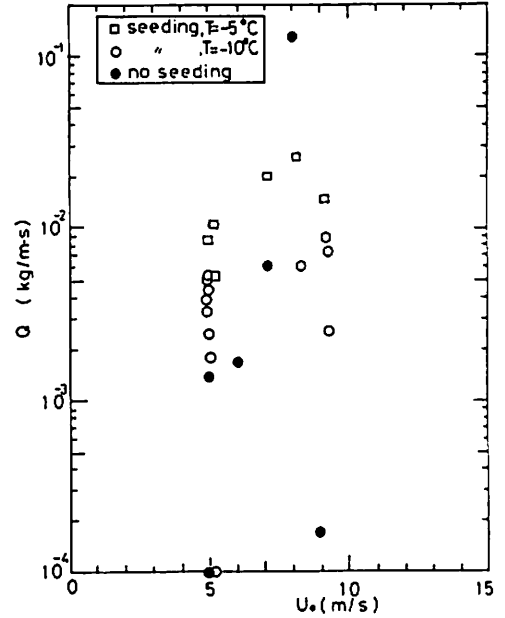


図-5 全吹雪量の風速依存性

Fig. 5 Total transport rate plotted against the wind velocity

3. 吹雪の発生臨界

この実験では、雪面の雪質と温度を一定に保つために、先づ風洞の底に風洞に沿って長さ約150cmの区間に厚さ約2cmの雪を敷き、更にその上に孔径2.0mmの篩を用いて約7mmの厚さで均質に雪を散布した。散布終了後一定時間(5分, 30分, 90分)放置してから風速を徐々に増してゆき、吹雪の発生する瞬間の風速値を吹雪発生臨界風速値とした。用いた雪の試料としては「新雪」と「しまり雪」の2種類である。吹雪発生は2つの方法で検知した。1つは目視方法で、もう1つは光の透過率の変化による方法である。

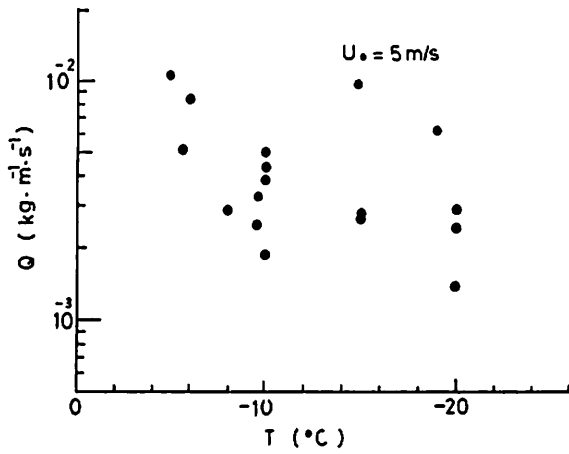


図-6 全吹雪量の温度依存性
Fig. 6 Total transport rate plotted against the air temperature

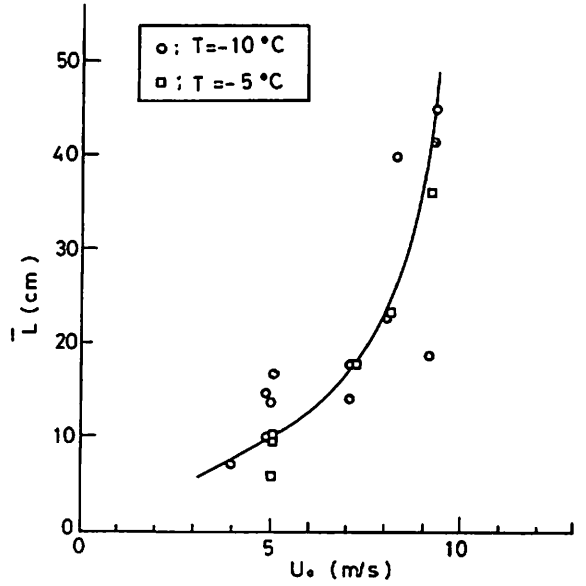


図-7 平均跳躍距離の風速依存性
Fig. 7 Mean saltation length plotted against the wind velocity

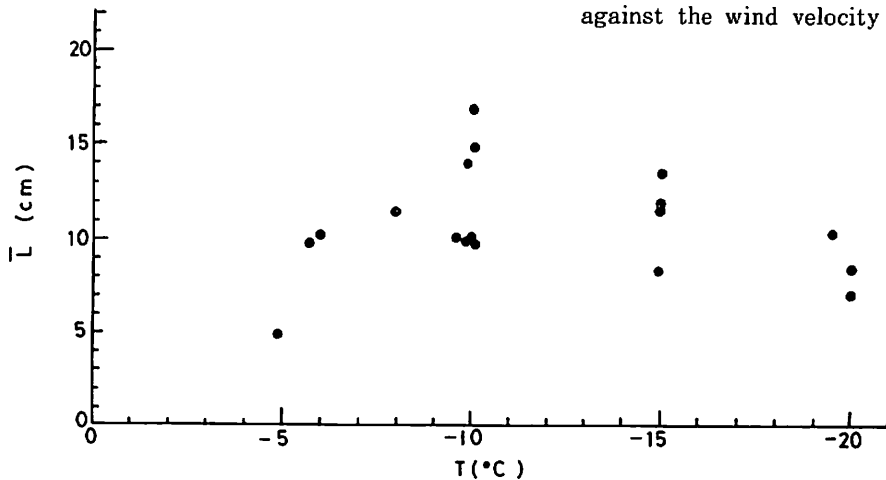


図-8 平均跳躍距離の温度依存性
Fig. 8 Mean saltation length plotted against the air temperature

本報告では、光透過率法の結果のみを述べる。これは小林・牧野(1975)によって南極昭和基地で雪嵐観測用に使われたもので、実効断面積 11.5cm^2 の光束をもつ投光器と受光器から構成されており、吹雪の発生によって光の透過率が100%から減少する。この出力をXYレコーダーのY軸に入力させ、風速は定温度型熱線風速計(KANOMAX CTA-21)で測定し同時にX軸に入力させた。XYレコーダーの記録紙上では、風速の増加過程において、吹雪が発生し透過率の急激な減少が始まり、吹雪発生の臨界を求めることができた。その結果、測定された吹雪の臨界風速(U_t)を温度と雪質をパラメーターとして図-9に示した。図から明らかなごとく、 U_t は温度の低下とともに減少し、 -10°C 以下ではほぼ一定値を示している。この結果は、野外で観測された佐藤(1962)や大浦(1968)の結果と同じ傾向を示した。また、新雪の U_t はしまり雪の U_t より大きい傾向を示した。

IV 考 察

降積雪地域の吹雪の発生は、大きな交通障害となるため、特定の場所の吹雪の発生頻度や吹雪量を気温、風速、降雪量、雪質等の一般気象情報から予測できることが望ましい。そのため低温風洞実験を行ったが、吹雪量と平均跳躍距離については、風速依存性は得られたものの温度依存性については明らかにできなかった。そこで、雪質をコントロールして、吹雪の発生臨界を調べた結果、野外で得られたと同じ傾向をもつ温度依存性が得られた。これらのことから、更に、雪質、温度、風速、時間等のパラメーターを充分コントロールして更に実験を重ねる必要があることが結論される。一つの方法として、粒径の揃った模型雪を工夫して作り実験を行うことが示唆される。

謝 辞

本研究は、北海道大学低温科学研究所にある低温風洞を使って行われたもので、一連の吹雪の研究は同研究所の気象学部門の主要テーマの一つとして現在もなお続行中である。本報告はその中の一部分にすぎないので、更に詳細な総合的な研究報告が別の機会に行われる予定である。同研究所気象学部門に所属する成瀬廉二、西村浩一、竹井巖、海老沼孝郎、西村寛（現在MTS雪氷研究所）の各氏の共同研究者に深く感謝の意を表わします。なお、本研究に要した費用の一部は、文部省科学研究補助金（自然災害）および日本国有鉄道委託研究費から支弁された。

終りに、本論文を昭和60年3月に新潟大学を停年退官された中俣三郎教授に捧げます。

文 献

- BAGNOLD, R.A. (1941) :The physics of sand and desert dunes. *Methuen, London*, 265pp.
- 河村竜馬 (1951) : 飛砂の研究. 東京大学理工学研究所報告, 5, 95-112.
- KOBAYASHI, D. (1972) :Studies on snow transport in low-level drifting snow. *Low Temp. Sci., A*, 24, 1-58.
- 小林俊一・牧野勤俊 (1975) :昭和基地における強風時の光を利用した飛雪観測. 南極資料, 53, 45-52.
- 成田英器 (1977) : 雪面の硬さ, 飛雪形, 温度が地吹雪現象に及ぼす影響. 低温科学, 35, 77-89.
- 佐藤正一 (1962) : 吹雪時の線路警戒の限界について. 雪氷, 24, 53-58.
- 大浦浩文 (1968) : 地吹雪の発生に関する研究. 雪氷, 30, 169-175.

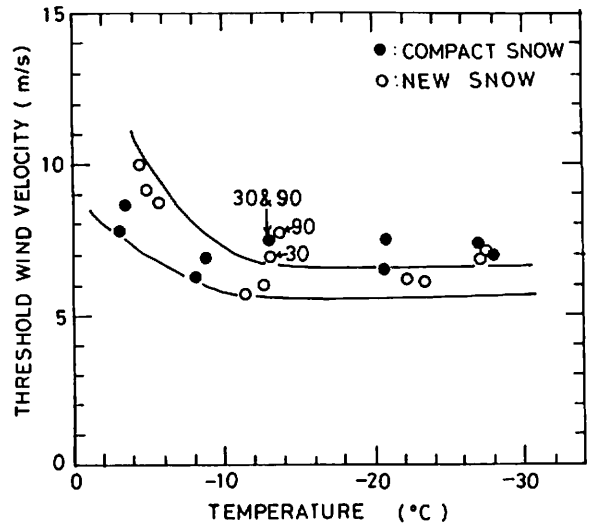


図-9 吹雪発生臨界風速の温度及び雪質依存性
 図中の数字は雪を敷いてから実験を開始するまでの経過時間(30分, 90分)で数字のないデータは全て5分の値である。

Fig. 9 Threshold wind velocity of blowing snow plotted against temperature (numbers of 30 and 90 mean time (minutes) during from set on snow at the surface to start the experiment, and other of data mean 5 minutes)