

吹雪量測定に及ぼす昇華の影響について
— ネット式吹雪計の場合 —

佐藤 威

防災科学技術研究所新庄雪氷防災研究支所

**Sublimation rate of collected blowing snow in a collector
A case of Net type collector**

By

Takeshi Sato

*Shinjo Branch of Snow and Ice Studies,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention,
1400, Tokamichi, Shinjo, Yamagata, 996, Japan*

Abstract

Theoretical calculations and measurements in a cold room were carried out for the sublimation rate of collected blowing snow in a Net type collector.

The calculations based on the heat balance of collected snow showed the dependency of the sublimation rate on the temperature and relative humidity of the air, the transfer coefficient for sensible heat (which is close to that for water vapor), and $R - \sigma T^4$ (R is the energy input to the collected snow and T is the air temperature). The dependence on each parameter is similar to that of a Cyclone type collector, as revealed by Sato (1990).

The measured sublimation rates increase with the length of the collected snow up to about four times as large as those for the Cyclone type collector under similar experimental conditions. Taking account of the difference in the inlet area between the two type collectors, however, the sublimation of collected snow is not serious in the mass flux measurement with the Net type collector as compared to the Cyclone type one.

The transfer coefficient for sensible heat (water vapor) was obtained from measured sublimation rates and experimental conditions. The transfer coefficient increases with the increase of the length of collected snow, partly due to the sublimation from the side of it. The transfer coefficient also increases as the ambient wind becomes strong, and it decreases as the collected snow becomes dense.

Considering these properties of the transfer coefficient, schematic diagrams were presented to give the sublimation rate of collected blowing snow under various meteorological conditions (air temperature, ambient wind speed, and relative humidity).

Key words : Blowing snow, Blowing snow collector, Net type collector, Sublimation rate, Mass flux of blowing snow

キーワード : 地吹雪, 吹雪計, ネット式吹雪計, 昇華量, 吹雪量

1. はじめに

吹雪粒子の質量フラックス（吹雪量または飛雪流量）を測定する装置の一つにネット式吹雪計がある。これは空気中を飛んでいる吹雪粒子を化学繊維のネットの中に捕集するもので、製作が容易かつ安価であり、また観測時の取扱いも簡単（阿部，1989）であるため、筆者らは吹雪量の鉛直分布の観測に使用している。

捕集方式の吹雪計にはこのほかサイクロン型吹雪計などがあるが、いずれの吹雪計でも捕集した吹雪粒子は絶えず風にさらされているので、気象条件によっては昇華してその質量が減少する恐れがある。サイクロン型吹雪計については、低温室における昇華量の測定結果に基づき、吹雪計内部の雪の熱収支を解いて昇華量を評価する方法が佐藤（1990）に示されている。

本報告では、ネット式吹雪計に捕集した吹雪粒子の昇華量について、熱収支の原理に基づく理論計算の結果と種々の条件を変えた低温室内での測定結果を示す。さらに、それらの結果を用いて作成した、任意の気象条件下での昇華量を求めるためのチャートを示す。理論計算の原理、実験方法などは佐藤（1990）にほぼ従っている。以下では、佐藤（1990）を単に前報と記し、前報の式を引用する場合は式の番号にCを付け、特に断わらない。また、使用した記号の多くは前報のAppendix1にまとめてあるが、その説明の中の“サイクロン型吹雪計”を“ネット式吹雪計”と読み替える。

2. ネット式吹雪計

低温室における昇華量の測定実験に使用したネット式吹雪計は、阿部（1989）に示されたもので、メッシュ開孔間隔 $105\mu\text{m}$ 、開孔面積率52%のプランクトンネットを利用している。吹込口には内径2.9cmのプラスチック製円筒（35mmフィルムケースを加工）を付けてあり、それを含めた吹雪計の長さは26cmである（図1）。

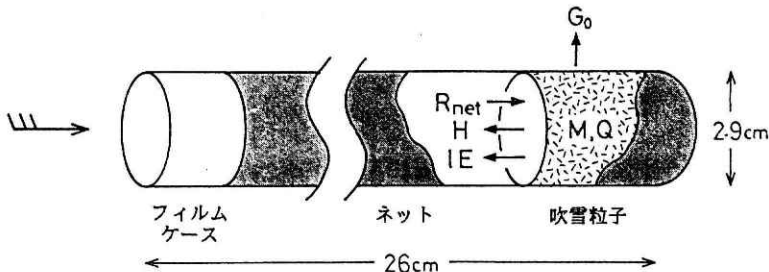


図1 ネット式吹雪計の構造と内部に捕集した吹雪粒子の熱収支の模式図。

Fig.1 Structure of a Net type collector and energy balance of collected blowing snow.

青森県五所川原市における地吹雪の集中観測（1987～1990年）では、このネット式吹雪計を6高度に取り付け吹雪量の鉛直分布の観測を行なった。ただし、吹雪量が多い下方2高度については長さを41cmとして使用した。

ネット部分は風にはためくため、捕集量が少ない場合は捕集した吹雪粒子はネットの中に球状に貯まる。捕集量が多くなると円柱状に貯まるようになるが、さらに多くなるとネット部分は貯まった雪の重みで垂れ下がる。なお、1990年1月の観測ではネット部分を螺旋状の針金で囲み、はためきと垂れ下がりがないようにした。

3. 熱収支の原理に基づく昇華量の理論計算

3.1 原理

ネット式吹雪計に捕集した吹雪粒子の昇華量を評価するために、次式で表わされるネットの中の雪全体（ただし、単位面積当たり）の熱収支を考える。

$$R_{\text{net}} = H + lE + G_0 + M + Q \quad (\text{C1})$$

ここで、 R_{net} 、 H 、 E はそれぞれネットの中に貯まった雪の前面およびネットのメッシュ開孔部における正味入力放射、顕熱、潜熱で、 E は昇華量である。顕熱・潜熱は雪から空気に輸送される場合を正とする。 G_0 はネット自身を通して逃げる伝導熱、 M は融解熱、 Q は雪温の変化に要する熱である。問題を簡単にするために、捕集した吹雪粒子は図1のようにネットの中に円柱状に貯まっていると仮定する。

一般に、 R_{net} は次式で表わされる。

$$R_{\text{net}} = (1-r) S^{\downarrow} + L^{\downarrow} - L^{\uparrow} \quad (\text{C2})$$

ただし、

S^{\downarrow} : 入力短波放射（日射）

L^{\downarrow} : 入力長波放射

L^{\uparrow} : 出力長波放射

r : 雪のアルベド

吹雪時には日射は弱く、かつ r が大きいため (C2) の右辺第1項は無視できるであろう。また、プランクtonネットの射出率は1に近いので、ネットの中に貯まっている雪の前面からの出力長波放射については、前報のAppendix 2と同様に考えると $L^{\downarrow} = \sigma T_s^4$ としてよい。また、メッシュ開孔部における出力長波放射も $L^{\uparrow} = \sigma T_s^4$ とできる。ただし、 T_s は雪の表面温度、 σ はステファン・ボルツマン定数 ($=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$) であり、雪の射

出率を1と仮定してある。従って、ネットの中に貯まった雪の熱収支式は

$$L \cdot -(G_0 + M + Q) = \sigma T_s^4 + H + IE \quad (C3)$$

となる。

HとEはバルク形式で次のように表わす。

$$H = c_p \rho c_h u \Delta T \quad (C7)$$

$$E = \rho c_e u \Delta q \quad (C8)$$

ただし、

$$\Delta T = T_s - T \quad (C5)$$

$$\Delta q = q_s - q \quad (C9)$$

で、Tは気温、 q_s は雪表面における比湿（雪面温度で氷飽和している）、qは空気の比湿である。 c_h と c_e は顕熱輸送と水蒸気輸送の抵抗係数（ $c_h u$ 、 $c_e u$ はそれぞれの輸送係数）で、前報と同様に $c_e/c_h \doteq 1$ に近似する。ただし、ここでは吹雪計内部に貯まった雪の前面および側面からの輸送に関する抵抗係数（輸送係数）を区別していない。

ところで、境界層理論によれば一様流中におかれた平板の抵抗係数は、その表面の空気力学的性質と平板上に形成される境界層の外の風速uによって決まり、理論・実験式が得られている。また、大気の接地境界層理論ではuとしてある高度の風速を用いて抵抗係数を定義するのが普通である。ネットの中に貯まった雪からの顕熱・水蒸気輸送の抵抗係数のうち側面からの輸送に関するものについては、uとして吹雪計の周囲の風速（以下、外部風速という）を用いれば実験的に決めることができる。一方、風が直接当たる貯まった雪の前面からの輸送の抵抗係数を考える時に境界層理論の考え方を踏襲するならば、uとして雪の前面上に形成される境界層の外の風速を用いるべきである。しかし実際は、ネット式吹雪計内部の風速を詳細に調べ境界層の構造を明らかにするのは困難であり、uを明確に定義することはできない。従って、ネットの中に貯まっている雪の前面からの顕熱・水蒸気輸送の抵抗係数を理論的・実験的に求めることはできない。

しかし、熱収支を解くだけならば輸送係数がわかればよいので、本報告においても前報と同様に輸送係数($c_h u$)を昇華量の測定実験の結果から求めることにする。なお、5節では輸送係数と実験に用いた雪試料の密度、長さ、および外部風速との関係を調べる。

前報と同様に、(C3)に含まれる σT_s^4 と q_s を気温Tのまわりで展開し整理すると、 ΔT に関する次の3次方程式が得られる。

$$\begin{aligned}
& (4\sigma T + \frac{1}{6}l\rho c_e u q_i'''(T))\Delta T^3 \\
& + (6\sigma T^2 + \frac{1}{2}l\rho c_e u q_i''(T))\Delta T^2 \\
& + (4\sigma T^3 + c_p\rho c_{hu} + l\rho c_e u q_i'(T))\Delta T \\
& + l\rho c_e u (q_i^0(T) - q) - R + M + \sigma T^4 = 0
\end{aligned}
\tag{C12}$$

ここで、 $R=L^{-1}-(G_0+Q)$ をネットの中に貯まった雪に対する入力エネルギーとする（近藤，1981）。また、 q_i^0 は氷面に対する飽和比湿を表し、 q_i' 、 q_i'' 、 q_i''' は、それぞれ q_i の T に関する1～3次の微係数である（前報参照）。入力エネルギー R 、融解熱 M 、気温 T と空気の比湿 q 、および輸送係数 c_{hu} （ $=c_e u$ ）が既知ならば、(C12)を解いて ΔT が求まり、さらに次式より昇華量 E が評価できる。なお、具体的な解法は前報に示した。

$$\begin{aligned}
E & \doteq \rho c_e u (q_i^0(T) + q_i'(T)\Delta T \\
& + \frac{1}{2}q_i''(T)\Delta T^2 \\
& + \frac{1}{6}q_i'''(T)\Delta T^3 - q)
\end{aligned}
\tag{C11}$$

3.2 昇華量のパラメータ依存性

3.1節の方法で、種々の気温 T 、輸送係数 c_{hu} 、 $R - \sigma T^4$ 、相対湿度 $h (=q/q_w^0(T); q_w^0$ は水面に対する飽和比湿)を与え、単位面積当りの昇華量 E を求めた。その際、 c_{hu} は後述する実験結果に矛盾しない値を与えた。従って、ネット式吹雪計内部に捕集した吹雪粒子全体の昇華量 E_n は E に吹雪計の吹込口の断面積（6.6cm²）を掛けて求まる（5.2節参照）。吹雪発生時の気象条件（詳細は6節参照）を想定し、 E_n の T 、 c_{hu} 、 h 依存性は $R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$ の場合について、また $R - \sigma T^4$ 依存性は $-50 \sim 50 \text{ W/m}^2$ に対して検討した。

ネット式吹雪計内部に貯まった吹雪粒子の昇華量の各パラメータに対する依存性は、定性的には前報で示したサイクロン型吹雪計の場合と変わらないので、ここでは図（図2～5）を示すだけにする。

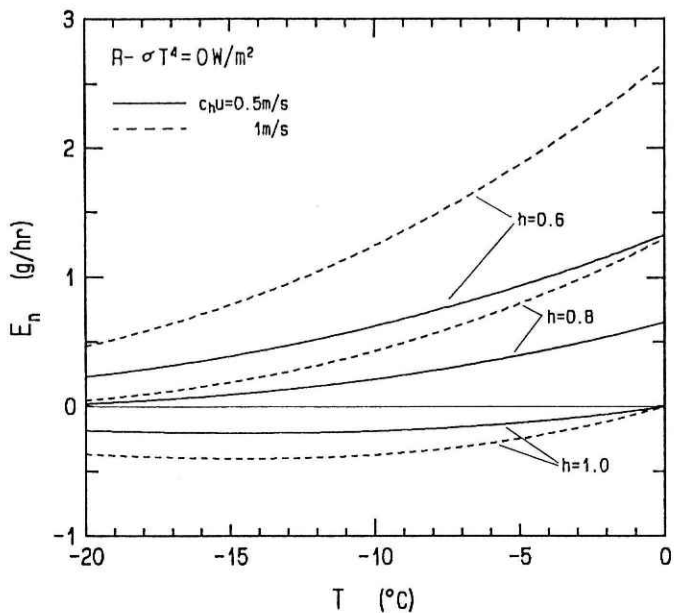


図2 昇華量 E_n と気温 T の関係 ($R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$ の場合)。

Fig.2 Relation between the air temperature T and the calculated sublimation rate E_n (Case of $R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$).

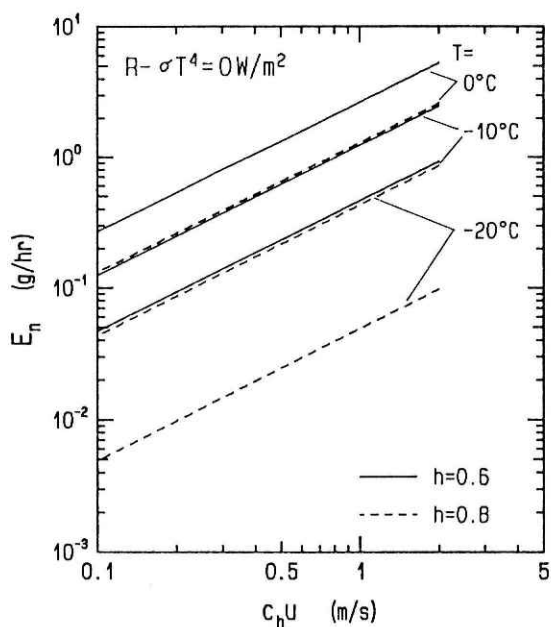


図3 昇華量 E_n と輸送係数 $c_h u$ の関係 ($R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$ の場合)。

Fig.3 Relation between the transfer coefficient $c_h u$ and the calculated sublimation rate E_n (Case of $R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$).

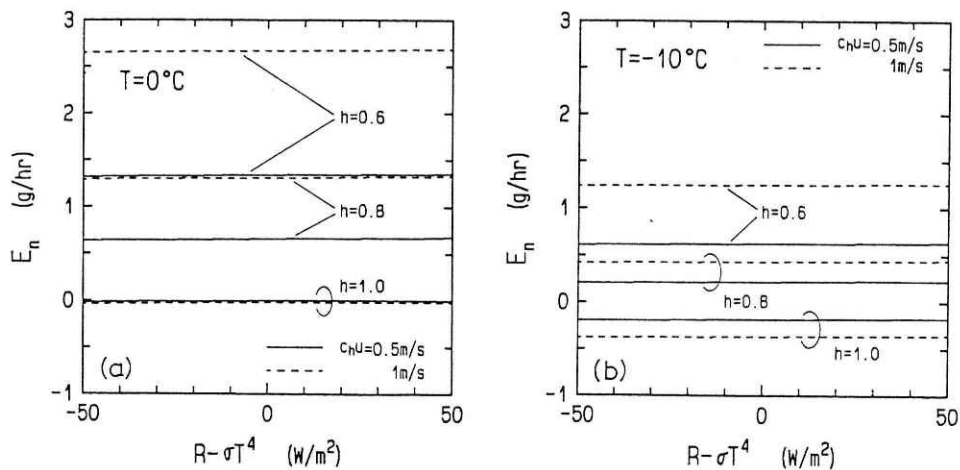


図4 昇華量 E_n と $R - \sigma T^4$ の関係. (a) 気温 $T = 0^\circ\text{C}$, (b) $T = -10^\circ\text{C}$.

Fig.4 Relation between $R - \sigma T^4$ and the calculated sublimation rate E_n . (a) : air temperature $T = 0^\circ\text{C}$, (b) : $T = -10^\circ\text{C}$.

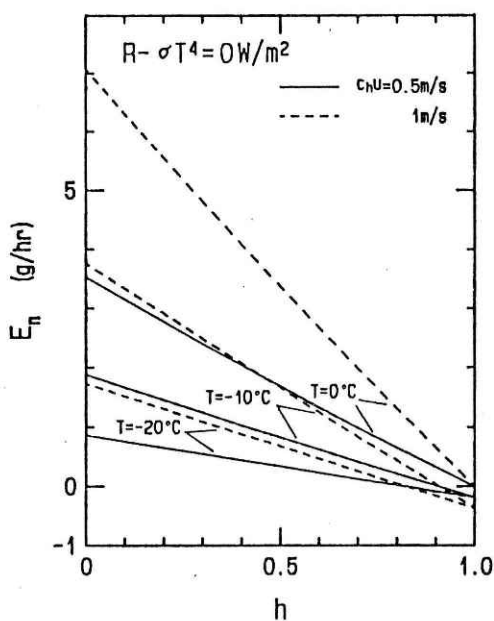


図5 昇華量 E_n と相対湿度 h の関係 ($R - \sigma T^4 = 0\text{W/m}^2$ の場合).

Fig.5 Relation between the relative humidity of the air h and the calculated sublimation rate E_n (Case of $R - \sigma T^4 = 0\text{W/m}^2$).

4. ネット式吹雪計内部の風速

ネット式吹雪計内部の風の強さは昇華量と密接に関連している。この節では、昇華実験で

使用した小型送風機（送風口の直径7.5cm）が吹き出す風の分布，およびネットの中に雪を入れない場合と入れた場合の吹雪計内部の風速分布の測定結果を示す。

風速測定に使用した熱線風速計は前報で使用したものとは異なる。プローブは直径1mm，長さ15mmの針状で，その先端3mmの部分が受感部である。このプローブは方位角方向には無指向性であるが，風が受感部に対して直角から $\pm 45^\circ$ 以上ずれて当たると指示値が低下する。吹雪計内部の風速の測定は，ネットに小さな穴をあけプローブを吹雪計と直交するように挿入して行なったので，近似的にネットの長さ方向の風速成分が測定されたと考えられる。

基準点（吹雪計の吹込口の風上5cm）の風速で規格化した風速と基準点からの距離の関係

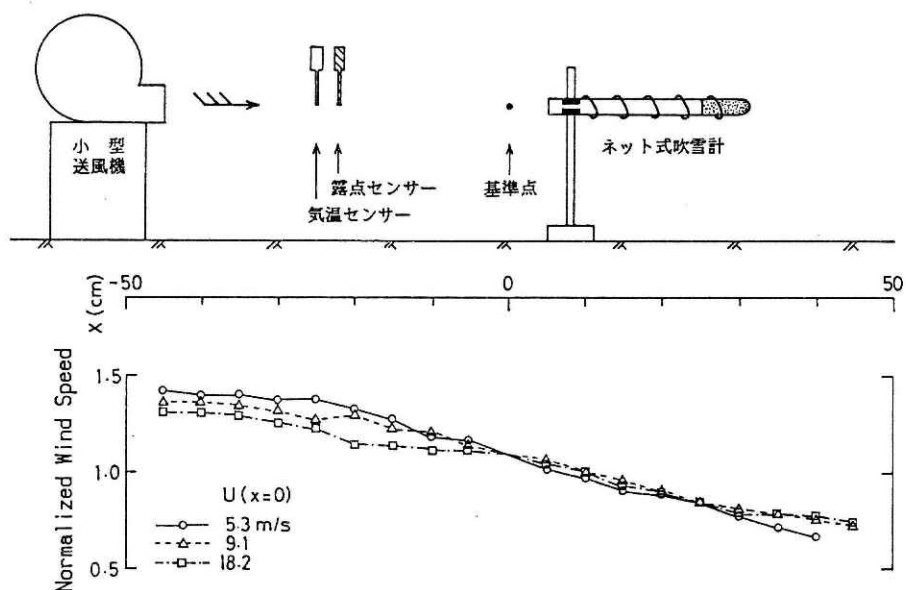


図6 昇華量の測定実験装置の模式図（上）と，基準点 $x=0$ の風速 U で規格化した風速分布（下）。ただし，風速は小型送風機の吹き出す気流の軸上の測定値。

Fig.6 Upper: schematic picture showing instruments to measure sublimation rate and experimental conditions in a cold room. Lower: variation of wind speed along an axis of the air flow, which is normalized with the reference wind speed U (at 5cm windward of the inlet of the collector).

を図6に示した。測定は同図の配置（ただし，吹雪計は置かない）で，吹き出す気流の中心軸上で行なった。規格化風速は基準点の風速にはあまり依存しない。また，送風機から吹き出す風が噴流であるため，送風口から離れるとともに幅が広がり風速が弱まっている（吹雪計の後端位置付近で基準点の風速の70%程度）。

図7は基準点の風速で規格化した吹雪計内部の風速分布（内部に雪がない場合）で，横軸

はネットの後端からの長さである。(a)は昇華実験時と同一の配置(図6の模式図参照)で測定したもの、(b)は大型送風機の送風口(直径30cm)から5cm離して吹雪計の吹込口を固定し測定したものである。(b)の場合は、吹雪計の周囲の風速は図6のように距離とともに減少することはなく、野外における自然風の状態に近い。ネット内面における摩擦とネットのメッシュ開孔部からの空気の流れのため、吹雪計内部の風速は基準点の風速より小さく、ま

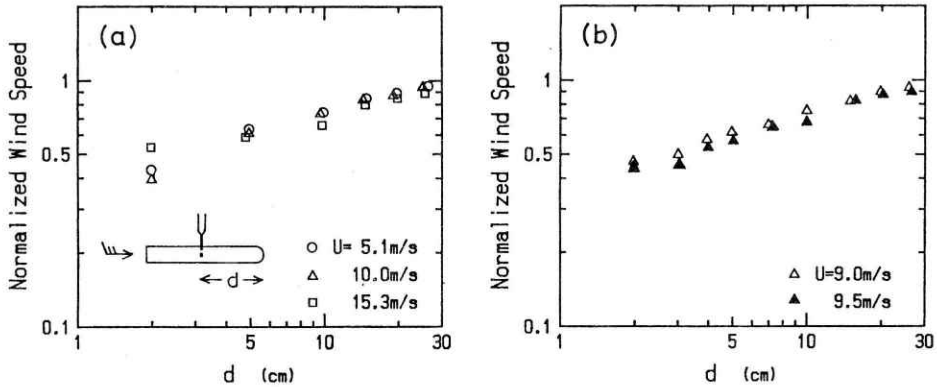


図7 基準点の風速 U で規格化したネット式吹雪計内部の風速分布(ネットの中に雪がない場合)。(a)周囲風速が図6のように距離とともに減少する場合。(b)周囲の風速が一様な場合。

Fig.7 Wind speed distribution in a Net type collector (without snow), which is normalized with the reference wind speed U . (a): under varying ambient wind speed as shown in Figure 6, (b): under uniform ambient wind speed.

たネット後端に近づくほど減少している。規格化風速の値は基準点の風速によらない。(a),(b)で差がないことから、図6に示した程度の吹雪計の周囲風速の減少は、内部の風速にあまり影響を与えないと考えてよい。またこの結果より、小型送風機を使用した昇華量測定実験の解析に際しても、基準点の風速を外部風速とみなすことにする。

次に、昇華量の測定実験で使用した雪試料と同じものをネットの中に円柱状になるように入れた時の、雪試料の長さ(高さ)と吹雪計内部の風速の関係を図8(a)に示した。使用した送風機および吹雪計の配置は図6の場合と同じである。吹雪計内部の風速は、雪試料前面からの距離が1, 2, 5cmの3点で測定した。内部の風速は試料が短いほど小さく、測定位置が雪試料の前面に近づくほど小さい。図7に示したように、吹雪計内部の風速はネット後端に近づくにつれ弱まる。(a)図にはこの傾向と雪試料があることの影響が重なっているため、横軸にネット後端から風速測定点までの長さを取り、図8(b)にプロットし直した。参考のため、図7(a)の $U = 10$ m/sの場合の規格化風速の値を破線で示した。これを見ると雪試料の前面からの距離が5cmでは雪試料の直接的影響はないが、風速測定点(高さ)が雪試料に近づくほど風速

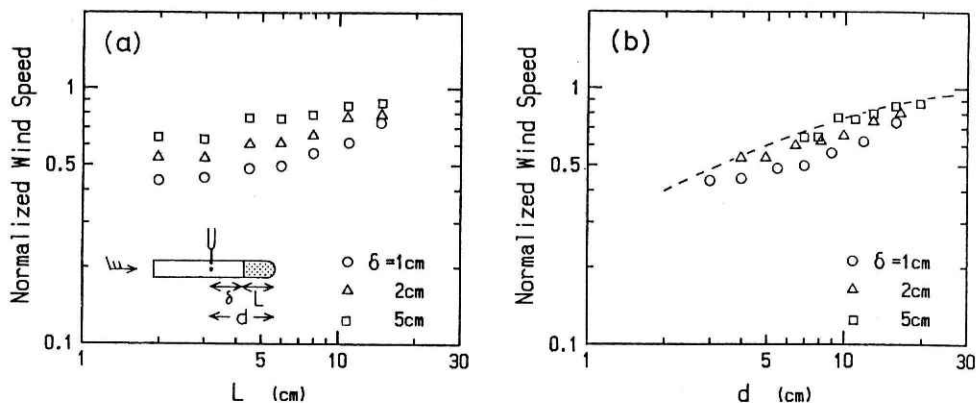


図8 基準点の風速 U ($\approx 10\text{m/s}$)で規格化したネット式吹雪計内部の風速分布 (ネットの中に雪がある場合)。(a)横軸は雪試料の長さ L , (b)横軸はネット後端と風速計の間の長さ d 。破線は雪がない場合の風速分布 (図7(a)の $U \approx 10\text{m/s}$ の場合)。

Fig.8 Wind speed distribution in a Net type collector (with a snow sample), which is normalized with the reference wind speed U ($\approx 10\text{m/s}$). (a) : abscissa is a sample length, (b) : abscissa is a length between the end of the collector and the anemometer. The broken line represents the case of $U \approx 10\text{m/s}$ without snow shown in Figure 7 (a).

が小さくなっている。これは雪試料が障害物となり、風が弱められるのと同時に気流がネットの長さ方向に吹けなくなるためと考えられる。

5. 低温室における昇華量の測定

5.1 測定方法

内部に雪試料を入れたネット式吹雪計に小型送風機で一定の風を当て、試料の重量の減少を測定して昇華量を求める実験を低温室で行なった。実験装置を図6に示したが、吹雪計は送風機から50cm離して設置し、2節で述べたように螺旋状の針金で支持した。

実験は気温と外部風速を変え、長さや密度の異なる雪試料を用いて行なった。気温と外部風速の値は前報のサイクロン型吹雪計の場合とほぼ同じである (気温が -15°C の実験は行なわなかった)。なお、気温を変えると相対湿度もその気温に対応する値に変化したが、相対湿度のみ、および気温のみを変えた実験はその制御が困難であるため行なわなかった。また、吹雪計を長さの異なるビニール袋で包み、雪試料の側面からの昇華を制御した実験も行なった。

使用した雪試料は、霜箱 (中村, 1978) で作成した新雪 (厳密には霜) および長期保存したしまり雪で、前者は針状の結晶形が崩れたもの、後者はふるいで粒径が $250\sim 420\ \mu\text{m}$

表1 低温室における昇華量の測定実験

Table 1 Summary of the measurements of sublimation rate in a cold room.

(a) 新雪を用いた実験

Run No.	気温 (°C)	外部 風速 (m/s)	相対 湿度 (%)	試料		測定 時間 (min)	昇華量 (g/hr)	輸送 係数 (m/s)
				長さ (cm)	密度 (g/cm ³)			
1	-4.2	5.2	73.6	10.5	0.14	30	0.460	0.381
2	-5.0	10.2	79.4	10.7	0.14	30	0.740	0.903
3	-4.8	15.2	78.2	10.3	0.15	33	1.018	1.132
4	-4.8	10.2	77.0	5.3	0.15	33	0.455	0.472
5	-4.6	10.2	75.2	2.4	0.10	33	0.364	0.338
6	-4.7	10.0	76.4	19.1	0.15	39	1.154	1.150
7	-4.7	10.0	76.4	2.2	0.11	30	0.380	0.378
8	-4.9	10.2	78.8	11.0	0.14	30	1.080	1.257
9	-4.3	10.2	80.1	5.3	0.15	30	0.560	0.665
10	-4.4	10.2	78.3	2.7	0.11	30	0.480	0.514
11	-4.4	10.2	77.1	18.7	0.16	37	1.557	1.564
12	-4.6	10.0	75.2	10.1	0.08	30	1.220	1.137
13	-4.6	10.0	76.4	11.2	0.20	32	0.694	0.685
14	-4.5	10.0	75.8	11.0	0.17	31	0.871	0.828
15	-4.6	10.0	75.8	10.0	0.11	33	0.873	0.836
16	-5.0	10.1	76.3	10.5	0.24	30	0.880	0.901
17	-4.7	10.1	77.6	10.5	0.23	30	0.680	0.723
18	-4.7	10.1	77.0	10.6	0.18	30	1.020	1.050
19	-4.6	10.1	76.4	9.2	0.12	31	1.045	1.033
20	-4.6	10.2	77.6	10.0	0.15	30	1.160	1.223
21	-8.9	5.2	65.3	8.5	0.18	54	0.444	0.395
22	-8.2	10.3	64.9	8.4	0.19	33	0.964	0.796
23	-9.1	15.0	66.3	8.1	0.19	30	1.360	1.283
24	-9.2	10.3	67.4	9.0	0.16	31	0.968	0.962
25	-8.0	10.3	66.6	13.6	0.17	31	1.219	1.054
26	-8.7	10.3	65.9	13.0	0.17	40	1.020	0.912
27	-9.0	10.3	68.0	2.8	0.12	45	0.413	0.413
28	-8.5	10.3	67.0	17.1	0.18	33	1.745	1.604
29	-8.9	10.3	66.9	5.2	0.15	31	0.619	0.587
30	-9.1	10.3	65.8	2.7	0.12	30	0.460	0.424
31	-9.1	10.3	65.2	17.4	0.17	51	1.882	1.701
32	-8.6	10.3	67.0	9.0	0.13	30	1.180	1.093
33	-8.4	10.3	65.4	8.8	0.17	30	1.040	0.889
34	-8.6	10.3	66.5	9.0	0.21	41	0.790	0.715
35	-8.4	10.3	64.9	8.0	0.14	32	1.106	0.928
36	-9.1	10.3	65.8	6.3	0.17	30	0.760	0.702
37	-9.0	10.3	65.8	6.2	0.23	34	0.565	0.517

(b) 保存雪を用いた実験

Run No.	気温 (°C)	外部 風速 (m/s)	相対 湿度 (%)	試料		測定 時間 (min)	昇華量 (g/hr)	輸送 係数 (m/s)
				長さ (cm)	密度 (g/cm ³)			
38	-4.2	5.3	75.3	5.6	0.28	61	0.266	0.239
39	-4.5	10.0	77.0	5.2	0.30	61	0.443	0.447
40	-4.5	15.0	78.2	5.5	0.28	72	0.708	0.766
41	-4.5	10.0	77.6	10.2	0.31	62	0.629	0.658
42	-4.4	10.1	80.7	2.0	0.15	30	0.240	0.299
43	-4.2	10.1	77.7	3.5	0.23	30	0.320	0.325
44	-9.1	10.1	65.8	2.8	0.13	30	0.300	0.276
45	-9.0	10.1	65.8	13.0	0.23	30	1.060	0.971
46	-9.2	10.1	64.2	6.4	0.24	30	0.700	0.612
47	-8.9	10.1	66.9	4.0	0.19	30	0.440	0.417

表2 低温室における昇華量の測定実験（試料側面からの昇華を制御した場合）

Table 2 Summary of the measurements of sublimation rate in a cold room (by controlling the sublimation from the side of a snow sample).

Run No.	気温 (°C)	外部風速 (m/s)	相対湿度 (%)	試料の風にさらされている部分の長さ (cm)	測定時間 (min)	昇華量 (g/hr)	輸送係数 (m/s)
48	-8.9	9.8	59.7	0	30	0.380	0.277
49	-9.0	9.8	59.5	0	30	0.240	0.176
50	-9.4	9.8	63.8	5	31	0.561	0.497
51	-9.0	9.8	62.1	5	30	0.460	0.367
52	-9.1	10.0	69.9	10	30	0.860	0.949
53	-9.5	9.7	66.3	10	30	0.940	0.915

の粒子を取り出したものである。いずれも実験条件下でしばらく放置した後、雪温が気温にほぼ等しくなってからネットの中に円柱状になるように入れた。

重量の減少は原則として約30分の間隔をおいて測定した。実験中、送風機と吹雪計の中間において気温と露点温度を連続測定し、吹雪計の吹込口の風上側5cm（図6の基準点）において外部風速を測定した。また、熱電対で測定した気温と雪表面の温度差は1°C以下で、気温のほうがやや高めであった。

実験条件と測定結果を表1および表2にまとめた。表中の試料密度は、昇華実験開始前に測定した雪試料の重量と長さから、試料が円柱状に入っているとみなして計算した。なお、試料の長さが数cm以下と短い場合は、ネットの中の雪試料を円柱と考えるには無理があるので、この算出方法では密度の誤差が大きいと考えられる。

5.2 結果と考察

(1) 昇華量

ネット式吹雪計内部の雪試料の昇華量と試料の長さの関係を図9に示した。(a)は新雪試料、(b)は保存雪試料を用いたものであるが、いずれも外部風速は約10m/sである。同じ記号のデータはほぼ同一条件下における測定値で、試料が長くなると昇華量が増大する傾向がある。気温 $T = -5^{\circ}\text{C}$ より $T = -9^{\circ}\text{C}$ の場合の昇華量がやや大きいのは、後者の相対湿度 h が前者より小さいことの影響が効いているためである（3.2節参照）。

ほぼ同じ実験条件下におけるサイクロン型吹雪計内部の雪の昇華量（前報のE.）と比べ、測定された昇華量は雪試料の長さが3cmの時は同程度で、15cmの時は4倍程度まで増加する。しかし、吹込口の断面積はネット式吹雪計が 6.6cm^2 、サイクロン型吹雪計が 2.0cm^2 であるので、昇華による飛雪流量の測定値の過小評価は、サイクロン型吹雪計の場合と比べ $1/3.3 \sim 4/3.3$ となる。すなわち飛雪流量の測定に及ぼす昇華の影響は、ネット式吹雪計内部

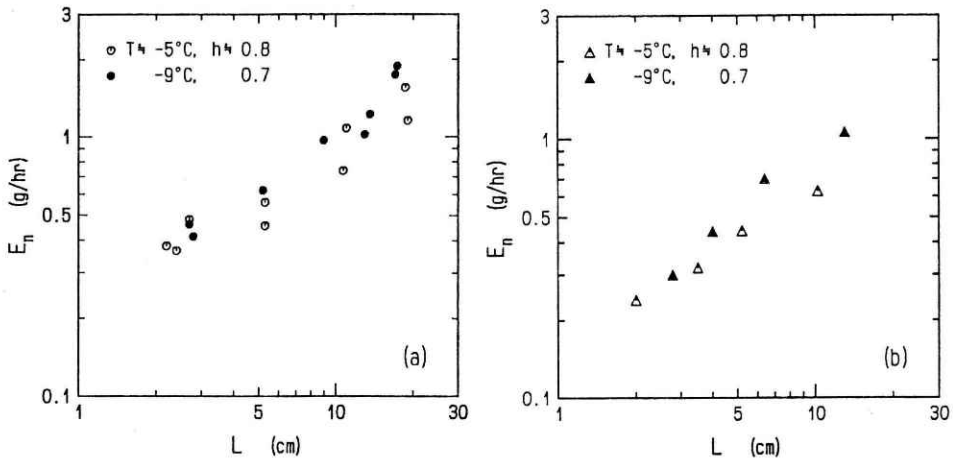


図9 昇華量 E_n と雪試料の長さ L の関係。ただし外部風速 $U \approx 10\text{m/s}$ で、気温 T と相対湿度 h は図中に示した。(a)新雪試料, (b)保存雪試料。

Fig.9 Relation between the length of a snow sample L and the measured sublimation rate E_n under the ambient wind speed $U \approx 10\text{m/s}$ (measured at 5cm windward of the inlet of the collector). T and h in the figure are the temperature and relative humidity of the air, respectively. (a) : new snow sample, (b) : compact snow sample (diameter of a snow particle is $250-420 \mu\text{m}$).

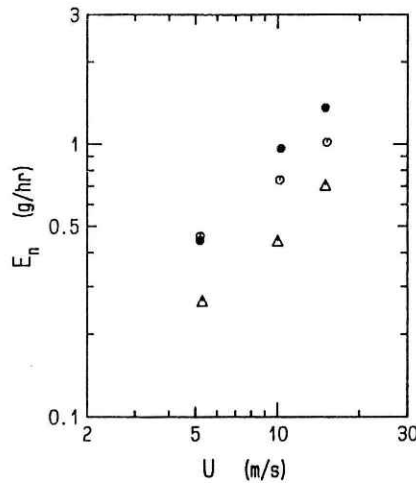


図10 昇華量 E_n と外部風速 U の関係。○:新雪試料(気温 $T \approx -5^\circ\text{C}$, 相対湿度 $h \approx 0.7 \sim 0.8$, 試料長 $L \approx 11\text{cm}$, 試料密度 $\rho \approx 0.15\text{g/cm}^3$), ●:新雪試料($T \approx -9^\circ\text{C}$, $h \approx 0.6 \sim 0.7$, $L \approx 8\text{cm}$, $\rho \approx 0.19\text{g/cm}^3$), △:保存雪試料($T \approx -5^\circ\text{C}$, $h \approx 0.8$, $L \approx 5\text{cm}$, $\rho \approx 0.28\text{g/cm}^3$)。

Fig.10 Relation between the ambient wind speed U and the measured sublimation rate E_n . ○:new snow sample (air temperature $T \approx -5^\circ\text{C}$, relative humidity $h \approx 0.7 \sim 0.8$, sample length $L \approx 11\text{cm}$, sample density $\rho \approx 0.15\text{g/cm}^3$), ●:new snow sample ($T \approx -9^\circ\text{C}$, $h \approx 0.6 \sim 0.7$, $L \approx 8\text{cm}$, $\rho \approx 0.19\text{g/cm}^3$), △: compact snow sample ($T \approx -5^\circ\text{C}$, $h \approx 0.8$, $L \approx 5\text{cm}$, $\rho \approx 0.28\text{g/cm}^3$).

に貯まった吹雪粒子の量が多い時には、ネット式とサイクロン型で同程度であるが、吹雪粒子の量が少ない時はネット式のほうが小さい。

図10は昇華量と外部風速の関係である。気温、相対湿度、試料の長さや密度は記号を変えた3組で異なっているが、各記号について見れば昇華量は外部風速にほぼ比例して増加している。

図示していないが、同じ雪試料を用いて風にさらされる側面の面積を変えた場合、その面積の増加とともに昇華量が増加する傾向があり、試料が長い場合には全昇華量に対する吹雪計側面からの昇華の寄与が大きいことが明かとなった。

(2) 輸送係数

測定された昇華量 E_n と実験条件から、ネット式吹雪計内部に貯っている雪の顕熱（水蒸気）の輸送係数 $c_h u$ を前報の5.2節(2)の方法によって求めた。その際、単位面積当たりの昇華量 E は、便宜上 E_n を吹雪計の吹込口の断面積で割って求めた。

輸送係数と雪試料の密度の関係を図11に示した。プロットしたデータは外部風速が約10 m/sの場合のものである。1例が保存雪試料、他は新雪試料でいずれも長さは約10cmである。密度は雪試料の圧縮の程度を加減し変化させた。サイクロン型吹雪計の場合と同様に、

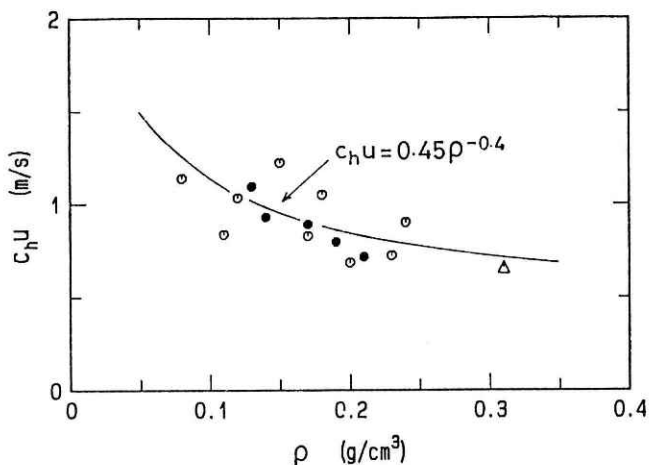


図11 輸送係数 $c_h u$ と雪試料の密度 ρ の関係。データは外部風速 $U \approx 10$ m/s、試料長 $L \approx 10$ cmのもの。
○: 新雪試料 (気温 $T \approx -5^\circ\text{C}$, 相対湿度 $h \approx 0.8$), ●: 新雪試料 ($T \approx -9^\circ\text{C}$, $h \approx 0.7$), △: 保存雪試料 ($T \approx -5^\circ\text{C}$, $h \approx 0.8$)。

Fig.11 Relation between the density of the snow sample 10cm long and the transfer coefficient $c_h u$ under the ambient wind speed $U \approx 10$ m/s. ○: new snow sample (air temperature $T \approx -5^\circ\text{C}$, relative humidity $h \approx 0.8$), ●: new snow sample ($T \approx -9^\circ\text{C}$, $h \approx 0.7$), △: compact snow sample ($T \approx -5^\circ\text{C}$, $h \approx 0.8$).

輸送係数は密度の減少とともに大きくなる。これは、密度が小さいほど雪内気流 (Ouriel *et al.*, 1976; 吉田, 1977) が雪試料の中を通りやすくなり、顕熱・水蒸気交換が活発になることを示している。しかし、輸送係数の増大の割合はサイクロン型吹雪計の場合より小さい。保存雪の輸送係数は新雪の輸送係数の傾向の延長上にある。この図から実験的關係として

$$c_{hu} (L=10\text{cm}) = 0.45 \rho^{-0.4} \quad (1)$$

が得られる。ただし c_{hu} と ρ の単位はそれぞれ m/s と g/cm^3 である。

1990年1月の集中観測において、ネット式吹雪計に捕集した吹雪粒子の密度を測定したところ、 $0.10 \sim 0.25 \text{g/cm}^3$ で雪面に近い吹雪計ほど密度が大きかった。これは次のように考えることができる。すなわち、吹雪量は雪面に近いほど大きいので捕集量も大きくなり、貯まった雪の前面が吹雪計の吹込口に近づく。このため吹雪計内部の雪に吹きつける風速が強くなり (図8参照)、貯まった雪が風によってより圧縮される。なお、外部風速は雪面に近づくほど弱くなるが、それ以上に上述の作用が効いていると考えられる。

図9に示した昇華量から求めた輸送係数と雪試料の長さの関係を図12に示した。ただし、各データの試料密度は多少異なっているため、図12には輸送係数の密度依存性も含まれてプロットされている。そこで、試料の長さに対する依存性のみを見るため、(1)が試料の長さによらず成立すると仮定し、これにより密度が 0.20g/cm^3 の時の輸送係数に換算して図13にプロットし直した。図12, 13とも(a)は新雪試料 (密度は 0.16g/cm^3 前後)、(b)は保存雪試料 (密度は 0.25g/cm^3 前後) を用いたものである。図12と図13を比べると、密度の影響が現われていない図13では、新雪と保存雪で輸送係数の値に差がなくなっている。前報でサイクロン型吹雪計の場合の輸送係数は気温と相対湿度に依存しないことを示したが、図13(a), (b)においても、白抜きと黒塗り記号で輸送係数はほぼ等しいので、ネット式吹雪計の場合も同様に考えてよいであろう。

雪試料が長いほど輸送係数は大きくなり、

$$c_{hu} (\rho = 0.20 \text{g/cm}^3) = 0.17 L^{0.7} \quad (2)$$

と表わすことができる。ただし、 c_{hu} と L の単位はそれぞれ m/s と cm である。これは、雪試料が長くなると試料の前面が吹雪計の吹込口に近づき、試料に吹きつける風速が大きくなることと、吹雪計側面のメッシュ開孔部における顕熱・水蒸気交換が増すことによる。

長さ 10cm 、密度 0.15g/cm^3 の新雪試料を用い、側面の風にさらされている部分の面積を変えて測定した昇華量から、前述の方法で求めた輸送係数を図14に示した。横軸は風にさらされている部分の長さ L_e で、 $L_e = 5 \text{cm}$ とは試料の風上側 5cm が風にさらされている場合である。また輸送係数は (1) を用いて密度が 0.20g/cm^3 の場合の値に換算してプロットしてある。

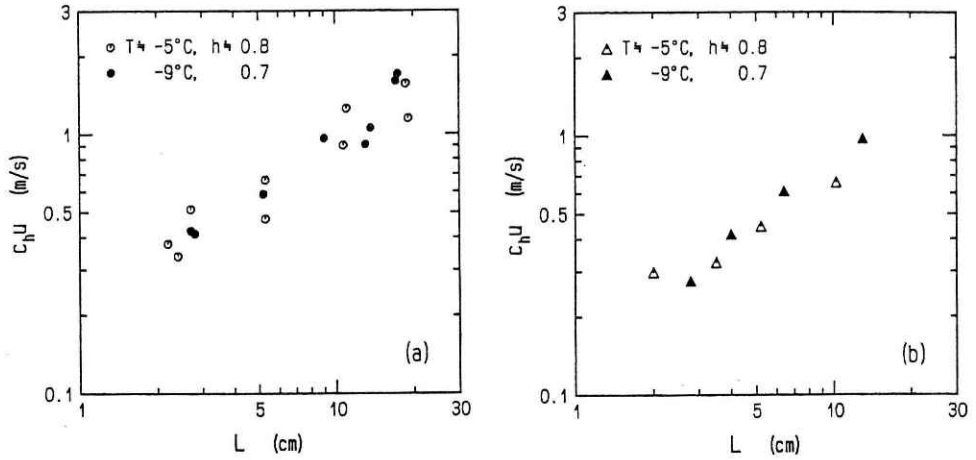


図12 輸送係数 $c_h u$ と雪試料の長さ L の関係。ただし外部風速 $U=10\text{m/s}$ で、気温 T と相対湿度 h は図中に示した。データは図9と同じで輸送係数の試料密度依存性を含む。(a)新雪試料,(b)保存雪試料。

Fig.12 Relation between the length of a snow sample L and the transfer coefficient $c_h u$ under the ambient wind speed $U=10\text{m/s}$ (T and h in the air, respectively). Plotted data are the same as in Figure 9 and $c_h u$ is a raw value. (a) : new snow sample, (b) : compact snow sample.

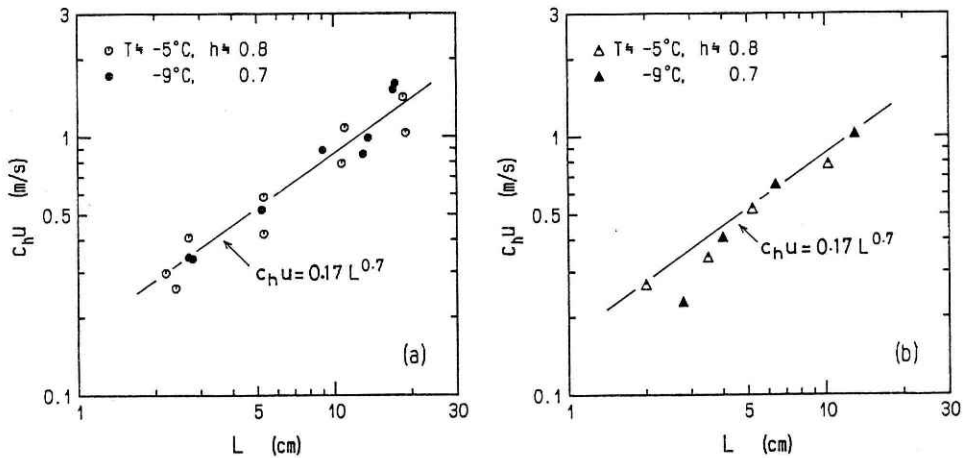


図13 輸送係数 $c_h u$ と試料の長さ L の関係。ただし外部風速 $U=10\text{m/s}$ で、気温 T と相対湿度 h は図中に示した。データは図12と同じであるが、(1)で試料密度が 0.20g/cm^3 の場合の輸送係数に換算してある。(a)新雪試料,(b)保存雪試料。

Fig.13 Same as Figure 12 except for the transfer coefficient $c_h u$ is transformed into a value for the standard sample density (0.20g/cm^3) with Eq. (1). (a) : new snow sample, (b) : compact snow sample.

ここで求めた輸送係数 c_{hu} ($=c_e u$) は

$$\frac{E_n}{\rho} = c_{hu} \Delta q S_f \quad (3)$$

で定義されたものである。ただし、 S_f は吹雪計内部の雪試料の前面の面積 (6.6cm^2) である。しかし、昇華は雪試料の側面でも起こっているため厳密には(3)は

$$\frac{E_n}{\rho} = (c_{hu})_f \Delta q_f S_f + (c_{hu})_e \Delta q_e S_e \quad (4)$$

と書かなければならない。ここで添字 f は雪試料の前面に関連する量、添字 e は側面に関連する量で、 $S_e = \pi \times 2.9 \times L_e$ である。一般的には $\Delta q \neq \Delta q_f \neq \Delta q_e$ であるが、三者が同一であると仮定すると、(3)、(4)より

$$c_{hu} = (c_{hu})_f + (c_{hu})_e \frac{S_e}{S_f} \quad (5)$$

となる。

図14より雪試料の側面がすべてビニールでおおわれている ($L_e = 0\text{cm}$) 場合、 $c_{hu} = (c_{hu})_f = 0.20\text{m/s}$ である。すなわち、雪試料の前面からの顕熱・水蒸気輸送の輸送係数は、ほぼ同一の外部風速 (10m/s) におけるサイクロン型吹雪計の場合の 0.04m/s (前報の図14参照) の5倍である。図8(a)より、長さ 10cm の試料がある時のネット式吹雪計の内部風速は試料の前方 2cm の点で 8m/s であり、またサイクロン型吹雪計の場合は約 3m/s (前報図7の u_A) である。この内部風速の大きさの違いを考慮しても、ネット式吹雪計内部に貯まった雪の前面における顕熱・水蒸気輸送 (昇華) は、サイクロン型吹雪計内部に貯まった雪からのそれよりやや活発である。この原因の一つとして風が昇華する雪の面に垂直に当たることが考えられる。植物の葉の場合には、葉が風に平行であるより傾いているほうが葉面上の圧力分布が変化して輸送係数が大きくなることが知られている (長谷場, 1973; 長谷場と伊藤, 1976) が、同様のことがこの場合にも起こっていると考えられる。さらに風が雪の面に平行に吹くよりは垂直に当たるほうが、雪の内部に入りやすいということも考えられる。

輸送係数は L_e とともに増大している。 $L_e = 10\text{cm}$ の場合は雪試料の側面がすべて風にさらされているが、この時の c_{hu} は 0.84m/s で $(c_{hu})_f$ の約4倍となり、雪試料の側面におけるメッシュ開孔部を通しての顕熱・水蒸気交換がかなり多いことを示している。なお(5)より $(c_{hu})_e = 0.046\text{m/s}$ が得られる。

図10に示した昇華量から求めた輸送係数の外部風速依存性を図15(a)に示した。同じ記号のデータは、ほぼ同じ密度と長さ (値は記号毎に異なる) の試料を用いほぼ同一の条件下で測定したものである。図15(b)は輸送係数の外部風速依存性のみを見るため、(1)、(2)より密度が 0.20g/cm^3 、長さが 10cm の場合の輸送係数に換算したものである。(b)では新雪試料 (○, ●) と保存雪試料 (△) で差はなく、いずれも輸送係数は外部風速に比例し、

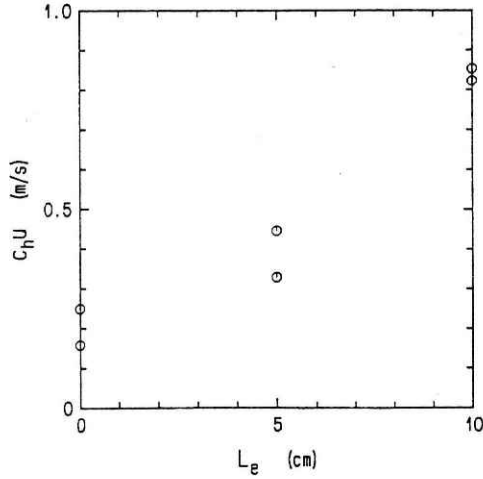


図14 輸送係数 c_{hu} と試料の風にさらされている部分の長さ L_e の関係。ただし、新雪試料（長さが10cm、密度が 0.15g/cm^3 ）を使用した。また、外部風速 $U \approx 10\text{m/s}$ 、気温 $T \approx -9^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $h \approx 0.6$ である。

Fig.14 The transfer coefficient c_{hu} versus the length L_e of the part of a new snow sample (length $L \approx 5\text{cm}$, density $\rho \approx 0.15\text{g/cm}^3$) exposed to the ambient wind. c_{hu} is transformed into a value for the standard sample density (0.20g/cm^3) with Eq.(1). Experimental conditions are summarized in Table 2.

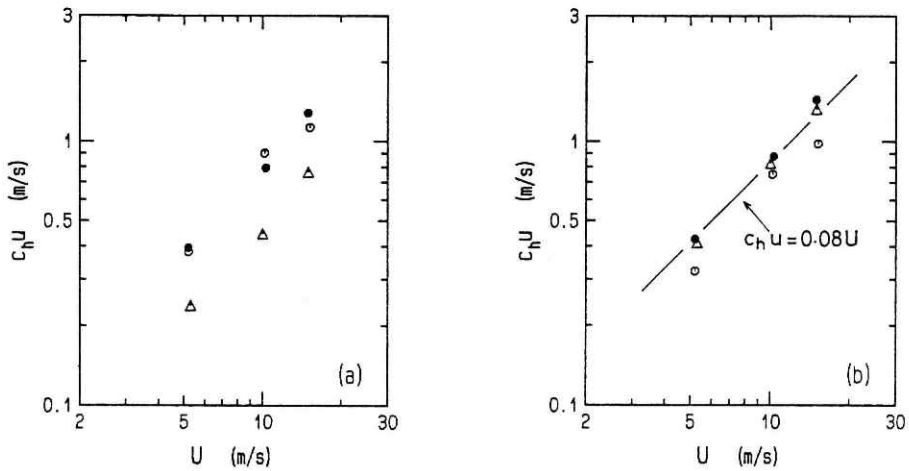


図15 輸送係数 c_{hu} と外部風速 U の関係。データは図10と同じ。(a)は輸送係数の試料密度依存性及び長さ依存性を含む。(b)は(1)、(2)で試料の密度が 0.20g/cm^3 、長さが10cmの場合の輸送係数に換算してある。

Fig.15 Relation between the ambient wind speed U and the transfer coefficient c_{hu} . (a) : c_{hu} is a raw value, (b) : c_{hu} is transformed into a value for the standard sample density (0.20g/cm^3) and standard sample length (10cm) with Eqs. (1) and (2).

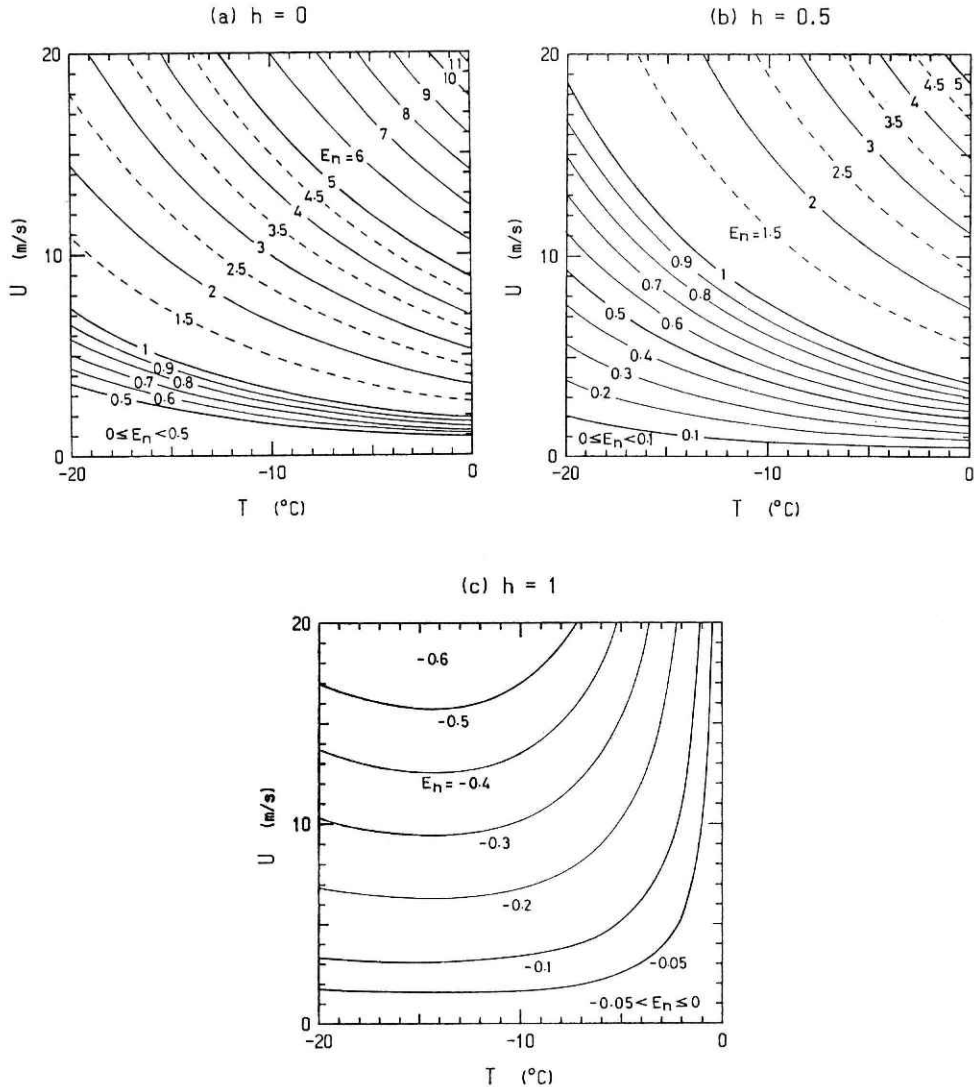


図16 ネット式吹雪計内部に捕集した吹雪粒子の昇華量 E_n (g/hr) を, 気象条件 (気温 T , 外部風速 U : 相対湿度 h) から求めるチャート. ただし, $R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$, 吹雪粒子は吹雪計内部に円柱状に貯まり密度が 0.20 g/cm^3 , 長さが 10 cm , 前面の面積が 6.6 cm^2 の場合. (a) は $h = 0$, (b) は $h = 0.5$, (c) は $h = 1$ の場合で, 負の値は凝結を表す.

Fig.16 Sublimation rate E_n (g/hr) of collected blowing snow in a Net type collector as a function of meteorological conditions (air temperature T , ambient wind speed U , relative humidity h) for $R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$. The blowing snow is assumed to be collected in a cylindrical shape and its density, length, and frontal area are assumed to be 0.20 g/cm^3 , 10 cm , and 6.6 cm^2 , respectively. (a) : $h = 0$, (b) : $h = 0.5$, (c) : $h = 1$, and the negative value of sublimation rate means condensation rate.

$$c_{hu} (\rho=0.20\text{g/cm}^3, L=10\text{cm}) = 0.08U \quad (6)$$

の関係がある。なお、サイクロン型吹雪計の場合は、内部に貯まった雪の顕熱（水蒸気）の輸送係数と外部風速の関係(C17) は $c_{hu} \propto U^{1.5}$ であり、Uのべき指数が異なっている。

6. 昇華量を求めるチャート

3.1節に示した原理に基づきネット式吹雪計に捕集した吹雪粒子の任意の気象条件（気温T、外部風速U、相対湿度h）下における昇華量 E_n を簡単に求めるためのチャートを作成した(図16)。 (a)は $h=0$ 、(b)は $h=0.5$ 、(c)は $h=1$ の場合であり、負の値は凝結を表している。図5より、昇華量は相対湿度とともに直線的に減少するので、任意の相対湿度に対する昇華量は(a)~(c)から読み取った値を直線内挿して求めることができる。

このチャートは、吹雪計内部に雪が円柱状（密度 0.20g/cm^3 、長さ 10cm 、前面の面積 6.6cm^2 ）に貯まっている場合を想定し、輸送係数 c_{hu} と外部風速Uの関係として(6)を用いている。もし、貯まっている雪の密度や長さがこれらの値と異なる場合は、図17に示した補正値を掛けて補正する必要がある。なお、これらの補正値は、(1)、(2)で与えられる輸送係数の雪試料の密度・長さ依存性、および図3に示した昇華量と輸送係数の比例関係に基づいている。

ネット式吹雪計を使用した吹雪量の測定は、吹雪が発生している最中に短時間で行なうこ

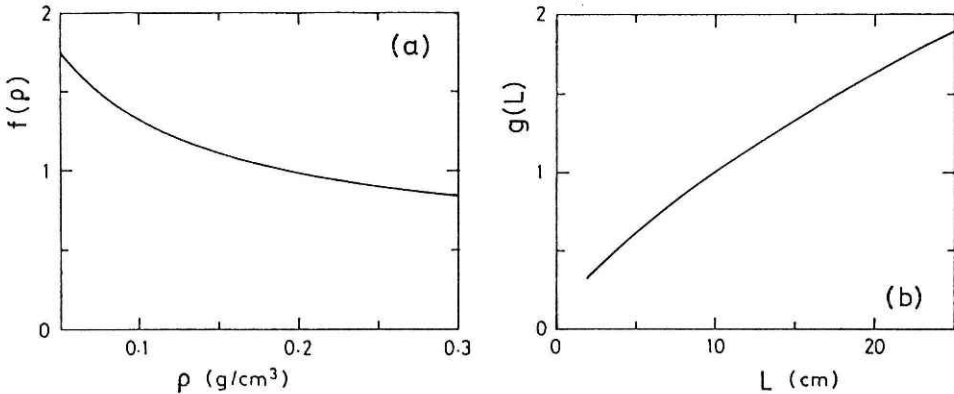


図17 ネット式吹雪計内部に捕集した吹雪粒子（密度 ρ と長さL）の昇華量 $E_n(\rho, L)$ を求めるための補正値。(a): $f(\rho)$ 、(b): $g(L)$ 。ただし、 $E_n(\rho, L) = f(\rho) g(L) E_n(0.20\text{g/cm}^3, 10\text{cm})$ で、 $E_n(0.20\text{g/cm}^3, 10\text{cm})$ は図16から読みとる。

Fig.17 Correction factors to give the sublimation rate $E_n(\rho, L)$ of collected blowing snow in a Net type collector, where $E_n(\rho, L) = f(\rho) g(L) E_n(0.20\text{g/cm}^3, 10\text{cm})$ and $E_n(0.20\text{g/cm}^3, 10\text{cm})$ is given by Figure 16. (a): $f(\rho)$, (b): $g(L)$.

とが多い。吹雪発生時には、通常強風と日射が弱い悪天候の状態が継続し、前報のAppendix 3で考慮したような天候や気温の急激な変化などは考えなくてよい。従って、入力エネルギーRに含まれる伝導熱 G_0 はあまり大きくない。さらに、雪の貯熱量変化Qは無視でき（前報のAppendix 3）、プランクtonネットの射出率は1に近いこと（前報のAppendix 2）、悪天候であることから $L \cdot$ は σT^4 に近い値をとる。以上より吹雪発生時の $R - \sigma T^4$ はほぼ0と考えられるので、図16は $R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$ として作成した。

7. ま と め

ネット式吹雪計の内部に捕集した吹雪粒子の昇華量について、熱収支の原理に基づき種々のパラメータを変えて理論計算を行なった。また、吹雪計内部に雪試料を入れ低温室内で気温・風速等の条件を変えて昇華量の測定実験を行なった。主な結果は以下の通りである。

- ①理論計算によれば、昇華量の気温、顕熱の輸送係数（水蒸気の輸送係数とほぼ等しい）、 $R - \sigma T^4$ ($-50 \sim 50 \text{ W/m}^2$)、相対湿度に対する依存性は、前報で示したサイクロン型吹雪計内部に捕集した吹雪粒子の昇華の場合と定性的に一致する。
- ②吹雪計内部の風速は外部の風速より小さく、ネット後端に近づくにつれ減少する。内部の風速と外部の風速の比は外部の風速に依存しない。ネットの中に雪が貯まっている場合は雪が障害物となるため、その近傍の風速は雪が貯まっていない場合よりさらに小さくなる。
- ③測定された昇華量は、ほぼ同じ実験条件下におけるサイクロン型吹雪計内部の雪の昇華量と比べ、同程度～4倍程度の大きさである。しかし、サイクロン型吹雪計よりネット式吹雪計のほうが吹入口の面積が大きいことを考慮すれば、ネット式吹雪計による吹雪量測定に及ぼす昇華の影響はサイクロン型吹雪計の場合より小さい（ただし、捕集量が多い時には同程度となる）。
- ④実験時の気温、相対湿度、および測定された昇華量から、吹雪計内部に貯まった雪の顕熱（水蒸気）の輸送係数を求めたが、その値は貯まった雪の長さとともに大きくなる。これは②に示した吹雪計内部の風速の変化と貯まっている雪の側面からの顕熱・水蒸気輸送の寄与が増すことによる。
- ⑤吹雪計内部に貯まった雪の側面からの昇華を制御して行なった実験結果より、貯まった雪の前面からの顕熱（水蒸気）の輸送係数を求めた。その結果、サイクロン型吹雪計の場合と比べやや大きな値となり、この理由として、吹雪計内の雪面への風の当たり方の違い（ネット式の場合は雪面に垂直に吹きつけるが、サイクロン型の場合は平行に吹く）が考えられた。
- ⑥ネットの中に捕集した吹雪粒子の密度が小さくなると輸送係数は大きくなるが、雪内気流

が顕熱・水蒸気輸送に関与することを示している。さらに、輸送係数は外部風速に比例して増加する。

- ⑦ ネット式吹雪計に捕集した吹雪粒子の任意の気象条件（気温、外部風速、相対湿度）下での昇華量を簡便に求めるためのチャートを作成した。その際、輸送係数と貯まっている雪の密度・長さおよび外部風速との関係を考慮した。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、当支所の木村忠志支所長、東浦将夫雪氷防災第2研究室長、佐藤篤司主任研究官には貴重なコメントを頂いた。また実験で使用した小型送風機は東北大学の近藤純正教授から借用した。ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 阿部修(1989)：磁力固定型ネット式吹雪計の試作, 国立防災科学技術センター研究報告, No42, 73-80.
- 2) 長谷場徹也(1973)：強制対流による葉形湿面からの蒸発—気流に対する面の傾きが葉面水蒸気輸送に及ぼす効果—, 農業気象, 29, 1-9.
- 3) 長谷場徹也・伊藤代次郎(1976)：イネの葉面境界層における水蒸気輸送 1. 層流気流中, 葉形湿面の場合, 農業気象, 32, 137-144.
- 4) 近藤純正(1981)：大気科学講座1 地表に近い大気, 東京大学出版会, 226pp.
- 5) 中村秀臣(1978)：霜の製造装置“霜箱”の作製, 雪氷, 40, 31-36.
- 6) Oura, H., T. Ishida, D. Kobayashi, S. Kobayashi, and T. Yamada, 1976: Studies on blowing snow, II, Physics of Snow and Ice, Part 2 (H. Oura ed.), Inst. Low Temp. Sci. Sapporo, 1099-1117.
- 7) 佐藤威(1990)：吹雪量測定に及ぼす昇華の影響について—サイクロン型吹雪計の場合—, 防災科学技術研究所研究報告, No46, 95-118.
- 8) 吉田順五(1977)：風が誘起する雪内気流, 低温科学, 物理篇, 35, 47-65.

(1990年12月20日 原稿受理)