

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—

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 Cyclone type collector—

By

Takeshi Sato

Shinjo Branch of Snow and Ice Studies,

*National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention,
1400, Tokamachi, Shinjo, Yamagata 996, Japan*

Abstract

Several types of collectors have been used to measure the mass flux of blowing snow. The collected snow, however, may decrease its mass due to sublimation since it is exposed to air flow. In this study, the sublimation rate was calculated on the basis of the energy balance of the snow in a Cyclone type collector. Measurements of the sublimation rate were also conducted in a cold room under conditions where the air temperature, humidity, and ambient wind speed were controlled.

The calculations showed that the sublimation rate increases with air temperature and with the transfer coefficient for sensible heat of the snow in a Cyclone type collector, which is close to that for water vapor. It was also noted that the sublimation rate decreases in proportion to the relative humidity of the air. These tendencies agreed with the present experimental results.

The transfer coefficient for sensible heat (water vapor) was obtained from the measured sublimation rates. The transfer coefficient increases with ambient wind speed, and the coefficient does not depend on air temperature, relative humidity, or the depth of the snow in a Cyclone type collector.

Schematic diagrams were presented, as a result of this study, to give the sublimation rate of collected blowing snow under various meteorological conditions (air temperature, ambient wind speed, and relative humidity).

*雪氷防災第2研究室

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

キーワード：地吹雪，吹雪計，サイクロン型吹雪計，昇華量，吹雪量

1. はじめに

空気中を飛んでいる吹雪粒子の質量フラックス(吹雪量)を測定する方法には，粒子を捕集する方式と光学的に計数する方式がある．前者には遠心力や重力を利用するもの(サイクロン型吹雪計など)とネットを用いるものがあり，後者にはスノーパーティクルカウンターがある．

捕集方式の場合は吹雪粒子の捕捉率を考慮する必要があり，これまでに種々の吹雪計について捕捉率の測定結果が報告され，実用に供されている(小林，1974；竹内ら，1975；Inoue and Fujino, 1977；阿部，1989)．一方，吹雪計内部に捕集された吹雪粒子は測定中に風にさらされるため，気象条件によっては昇華による粒子の質量の減少が無視できない場合がある．しかし，これまでに昇華量を定量的に検討した例はない．

本報告では，サイクロン型吹雪計の内部に捕集された吹雪粒子の昇華量について，熱収支

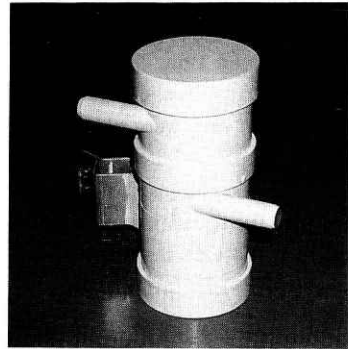
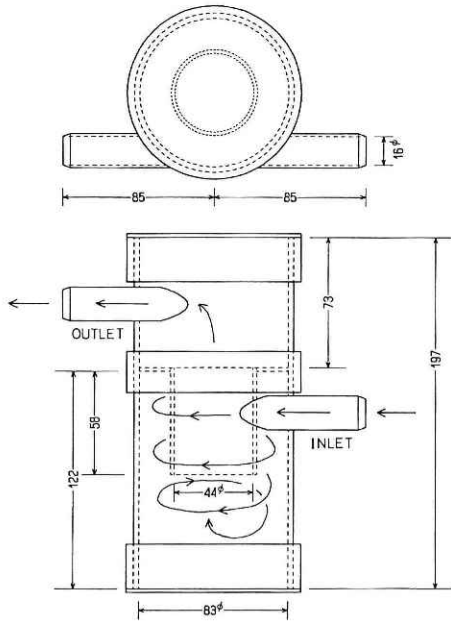


写真1 サイクロン型吹雪計の外観。

Photo 1 Cyclone type collector.

図1 サイクロン型吹雪計の構造，矢印は気流の動きを示す。

Fig 1 Structure of a Cyclone type collector. Arrows show the air flow.

の原理に基づく理論計算結果と低温室内で行った実験結果を示す。また、任意の気象条件下での昇華量の評価が可能であることを示す。

2. サイクロン型吹雪計

図1にサイクロン型吹雪計の構造を、写真1に外観を示す。吹込口から流入する空気は外筒の内壁に沿って螺旋運動しながら下降し、最終的には内筒を上方に抜けて吐出口から流出する。その間に、空気とともに入る吹雪粒子は遠心力と重力により外筒の壁および底に付着し捕集される。吹雪粒子は底の中央では浅く、壁に近づくにつれ厚く凹型に貯る。

サイクロン型吹雪計は、吸込口から流入した吹雪粒子が吹雪計内部にほぼ完全に捕捉されるので、捕捉率としては吹込口における空気力学的捕捉率のみを考えれば良く(小林, 1974)、また、吹雪計内部の容量が大きいという利点がある。従って、風向が一定なら、あるいは矢羽根をつけて絶えず風上を向くようにしておけば、ある程度長時間の測定が可能であるが、この場合昇華の影響を補正する必要がある。

サイクロン型吹雪計は、1988、1989年度の青森県五所川原市における地吹雪の集中観測で、吹雪量の広域分布の測定に使用された(東浦ら, 1989)。また、これまでに南極でも使用されている(成瀬, 1970; Takahashi *et al.*, 1984)

3. 熱収支の原理に基づく昇華量の理論計算

3.1 原 理

サイクロン型吹雪計の内部に貯った雪全体について次の熱収支が成立する。

$$R_{\text{net}} = H + \ell E + G_0 + M + Q \quad (1)$$

ここで R_{net} 、 H 、 ℓE はそれぞれ吹雪計内部の雪面における正味入力放射、上向き顕熱、上向き潜熱で、 E は昇華量である。また、 G_0 は吹雪計の外筒を通る伝導熱、 M は融解熱、 Q は雪温の変化に要する熱である。 R_{net} は一般的には

$$R_{\text{net}} = (1 - r)S^{\downarrow} + L^{\downarrow} - L^{\uparrow} \quad (2)$$

ただし、

S^{\downarrow} : 下向き短波放射(日射)

L^{\downarrow} : 下向き長波放射

L^{\uparrow} : 上向き長波放射

r : 雪のアルベド

と表されるが、サイクロン型吹雪計内部では $S^i = 0$ と考えてよく、また、 $L^i = \sigma T_s^4$ としてよい (Appendix 2 参照)。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、吹雪計内部の雪の熱収支式は

$$L^i - (G_0 + M + Q) = \sigma T_s^4 + H + \ell E \quad (3)$$

となる。

(3)の右辺第1項を気温 T のまわりで展開すると

$$\sigma T_s^4 = \sigma T^4 + 4 \sigma T^3 \Delta T + 6 \sigma T^2 \Delta T^2 + 4 \sigma T \Delta T^3 + O(\Delta T^4) \quad (4)$$

となる。ただし、

$$\Delta T = T_s - T \quad (5)$$

である。(3)の左辺の $L^i - (G_0 + Q)$ を吹雪計内部の雪に対する入力エネルギーと考えて R とおく (近藤, 1981)。 ΔT が十分小さいことがあらかじめわかっているならば、(4)において $O(\Delta T^2)$ 以上の項を無視できるが、 ΔT は未知数であるとの立場から、本報告では $O(\Delta T^4)$ 以上の項を無視する。これにより(3)は

$$R - M - \sigma T^4 \doteq 4 \sigma T^3 \Delta T + 6 \sigma T^2 \Delta T^2 + 4 \sigma T \Delta T^3 + H + \ell E \quad (6)$$

となる。

H と E はバルク形式で

$$H = c_p \rho c_h u \Delta T \quad (7)$$

$$E = \rho c_e u \Delta q \quad (8)$$

と表される。ただし、

$$\Delta q = q_s - q \quad (9)$$

で、 q_s は雪表面における比湿 (雪面温度で飽和している)、 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) である。抵抗係数は雪の表面の空気力学的性質と風速 u によって決まるが、顕熱・水蒸気輸送の相似性とそれぞれの分子拡散係数の値が近いことから、 $c_e/c_h = 1.12 \doteq 1$ と近似できる。

本報告では、サイクロン型吹雪計内部の雪の平均的な昇華量を考えるので、 u を吹雪計内部

の雪の表面近傍の平均的な風速(以下, 内部実効風速という)とする。しかし, 4節で示すように吹雪計内部の風速は一様ではなく, 内部実効風速を明確に定義し, これを実験的に決定することは困難である。なお, 5節では昇華量の測定実験の結果から, 吹雪計の周囲の風速(以下, 外部風速という)と輸送係数($c_h u$)の関係を求める。

q_s を T のまわりで展開し次式を得る。

$$q_s = q_i^0(T_s) = q_i^0(T) + q_i'(T) \Delta T + 1/2 q_i''(T) \Delta T^2 + 1/6 q_i'''(T) \Delta T^3 + O(\Delta T^4) \quad (10)$$

ただし, q_i^0 は氷面に対する飽和比湿を表し,

$$q_i' = \frac{dq_i^0}{dT}$$

$$q_i'' = \frac{d^2 q_i^0}{dT^2}$$

$$q_i''' = \frac{d^3 q_i^0}{dT^3}$$

である。再び $O(\Delta T^4)$ 以上の項を無視すると(8)は

$$E \doteq \rho c_e u (q_i^0(T) + q_i'(T) \Delta T + 1/2 q_i''(T) \Delta T^2 + 1/6 q_i'''(T) \Delta T^3 - q) \quad (11)$$

となり, (6)に(7), (11)を代入して整理すると, ΔT に関する次の3次方程式が得られる。

$$(4 \sigma T + 1/6 \ell \rho c_e u q_i'''(T)) \Delta T^3 + (6 \sigma T^2 + 1/2 \ell \rho c_e u q_i''(T)) \Delta T^2 + (4 \sigma T^3 + c_p \rho c_h u + \ell \rho c_e u q_i'(T)) \Delta T + \ell \rho c_e u (q_i^0(T) - q) - R + M + \sigma T^4 = 0 \quad (12)$$

吹雪計内部に貯った雪に対する入力エネルギー R , 融解熱 M , 流入する空気の気温 T と比湿 q , 吹雪計の内部実効風速 u , および抵抗係数 c_h , c_e (または抵抗係数と風速の積である輸送係数)が既知であれば, (12)を解いて ΔT が得られ, (11)より昇華量 E を求めることができる。

一般に雪温 T_s が 0°C より低い場合には融解は起こらず, (12)において $M=0$ とできる。しかし, ΔT (すなわち, T_s) は(12)の解として得られるので, M の値は既知ではない。従って, 実際には(12)を試行錯誤的に解く必要がある。すなわち, まず $M=0$ として(12)を解き, $T_s \geq 0^\circ\text{C}$ が得られたなら融解が起こっていると考え $T_s = 0^\circ\text{C}$ とし, 昇華量を求め直す。この時は T_s を 0°C 以上にしようとするエネルギーが, 実際には融解に費やされている。 $T_s < 0^\circ\text{C}$ となるならば, 得られた ΔT , E は正しい値である。

3.2 昇華量のパラメータ依存性

3.1節の方法で, $R - \sigma T^4$, 気温 T , 相対湿度 $h (= q/q_w^0(T)$; q_w^0 は氷面に対する飽和比湿),

輸送係数 $c_h u (=c_e u)$ を変えて昇華量 E を求めた。 E は単位面積当りの値であるから、 E に内部の雪の表面積(吹雪粒子が水平に貯るとして 54.1cm^2) を掛けて、サイクロン型吹雪計内部の雪の平均的な昇華量 E_c を求めた。

図2に、 $R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$ の場合の吹雪計内部の雪の昇華量 E_c と気温の関係、輸送係数と相対湿度をパラメータとして示した。相対湿度 $h=0.6, 0.8$ の場合は昇華量が気温とともに増加するが、これは、気温が高いほうが飽和比湿が大きく、相対湿度が一定であれば飽差も大きくなるためである。輸送係数が大きいほど、また相対湿度が小さいほど、昇華量の増加は著しい。

一方 $h=1$ の場合は、昇華量が負、すなわち雪面で凝結が起こっている。この時、雪面はその温度で氷飽和しているが、その比湿は大気の水飽和より小さいためである。凝結量もやはり輸送係数とともに大きくなる。

図3は、 $R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$ の場合の昇華量と輸送係数の関係で、パラメータは気温と相対湿度である。輸送係数が大きくなると水蒸気輸送が活発となり昇華量が増大する。この図に示されたパラメータの値の範囲内では、昇華量は輸送係数に比例する。

図4は昇華量と $R - \sigma T^4$ の関係で、(a)は $T = 0^\circ\text{C}$ 、(b)は $T = -10^\circ\text{C}$ の場合である。いずれも相対湿度と輸送係数をパラメータとしてある。 $T = 0^\circ\text{C}$ で $h=1$ の場合には、 $R - \sigma T^4 > 0$ の時に $T_s = 0^\circ\text{C}$ となり融解がおり、昇華(蒸発)量は0となる。なお、この場合の昇華量は $c_h u = 0.05\text{m/s}$ と 0.1m/s でほとんど変わらないが、図では線を少しずらしてある。

Appendix 2, 3 に示したように、吹雪発生時のサイクロン型吹雪計内部の雪の熱収支を考

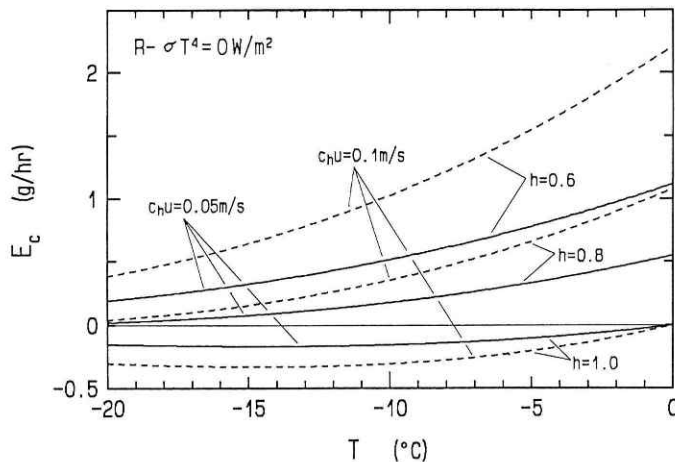


図2 昇華量 E_c と気温 T の関係 ($R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$ の場合)。

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

える場合には、 $|R - \sigma T^4| \leq 50 \text{ W/m}^2$ の範囲を考えればよい。(a), (b)いずれの図でも昇華量は $R - \sigma T^4$ とともにやや増加しているが、図に示した範囲では昇華量の違いは大きくなく、 $R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$ として得られた計算結果で近似することができる。

図5には、 $R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$ の場合の昇華量と相対湿度の関係を、気温と輸送係数をパラメータとして示した。昇華量は相対湿度に対してほぼ直線的に減少する。 $T < 0^\circ\text{C}$ の場合には、 $h = 1$ に近づくと負(凝結)に転ずるが、昇華量が0となる時の相対湿度は気温に依存する。

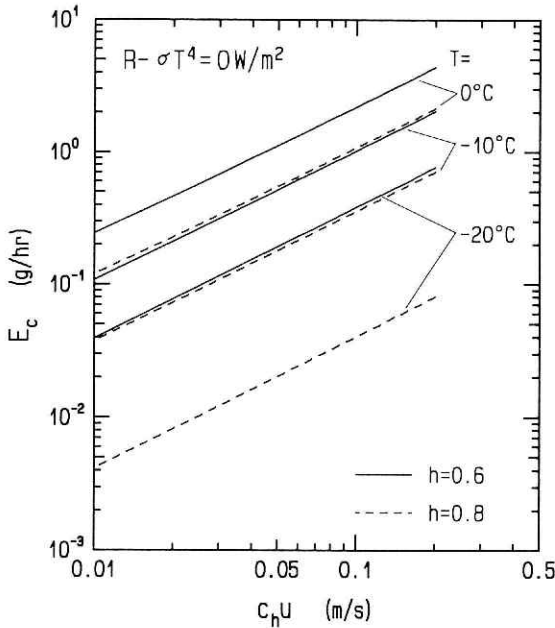


図3 昇華量 E_c と輸送係数 $c_h u$ の関係 ($R - \sigma T^4 = 0 \text{ W/m}^2$ の場合)。

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

4. サイクロン型吹雪計内部の風速

大型送風機の送風口(直径30cm)から20cm離してサイクロン型吹雪計を固定し、その底面から携帯用熱線風速計の感部(長さ約2mm, 直径約1mm)を挿入して、内部の風速分布とその外部風速との関係を測定した。また、プラスチックで吹雪粒子が貯っている時の底面の模型を作り、内部の風速に対する内部に貯る雪の影響を調べた。

図6は、外部風速で規格化した風速の、吹雪計の中心軸を含む断面における分布で、(a)は内部に雪が貯っていない場合、(b)は吹雪粒子が捕集されている場合に対応する。いずれの場合も、中心軸付近を除き接線方向の風速が最大となり、壁に沿う気流が確認された。両図より、規格化した風速は雪が貯っているか否かによらず同様の分布となり、底面(または模型雪面)近傍の風速は外部風速の30%前後であることがわかる。また、外部風速によって規格化した風速分布はそれほど変わらず、外部風速が与えられれば内部の風速分布は推定可能である。

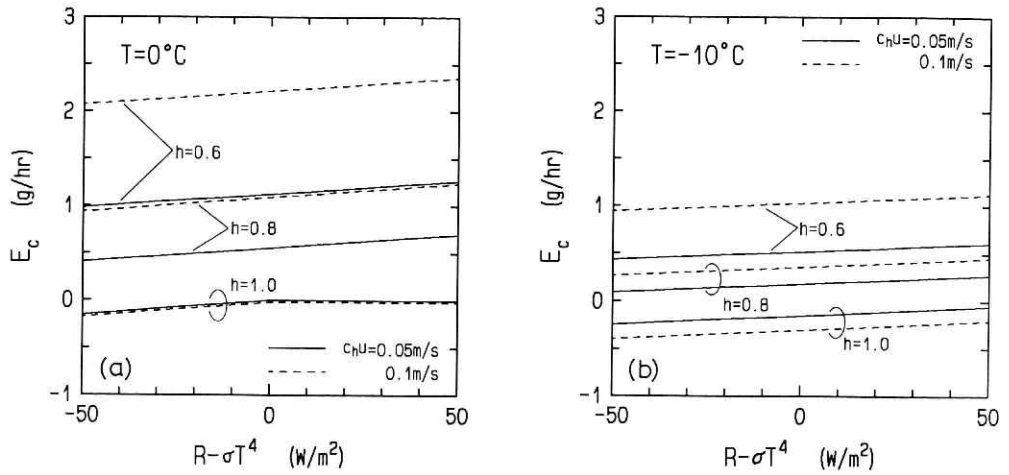


図4 昇華量 E_c と $R - \sigma T^4$ の関係。(a)は気温 $T = 0^\circ\text{C}$ 、(b)は $T = -10^\circ\text{C}$ の場合。
 Fig 4 Relation between $R - \sigma T^4$ and the calculated sublimation rate E_c . (a): air temperature $T = 0^\circ\text{C}$, (b): $T = -10^\circ\text{C}$.

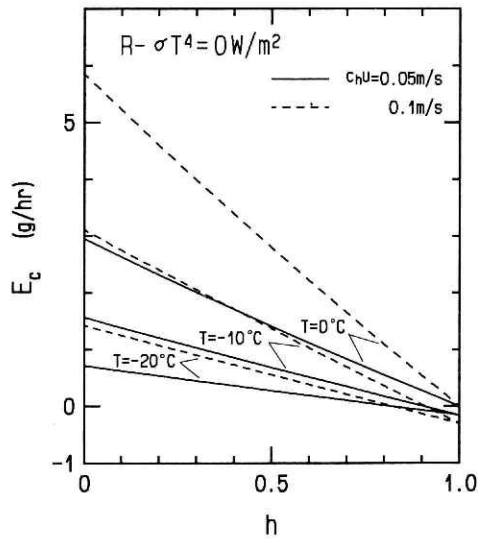


図5 昇華量 E_c と相対湿度 h の関係 ($R - \sigma T^4 = 0\text{ W/m}^2$ の場合)。
 Fig 5 Relation between the relative humidity of the air h and the calculated sublimation rate E_c (Case of $R - \sigma T^4 = 0\text{ W/m}^2$).

図6に●で示した点Aは、底面または模型雪面から2cm、壁から1.5cmの位置にあり、この点の風速 u_A で底面(または雪面)近傍の風速を代表させることにする。 u_A と内部実効風速 u には何等かの対応関係があると考えられる。 u_A と外部風速 U の関係を図7に示したが、“flat”は吹雪計内部に雪が貯っていない場合、“concave”は吹雪粒子が捕集されている場合に対応する。両者に差はなく u_A は U とともにほぼ直線的に増加する。

図8は、吹雪計内部に水平に雪が貯った場合の代表点の規格化風速 u_A/U と雪の深さの関係であるが、少なくとも雪の深さが4cm以下の場合には規格化風速は深さに依存しない。

以上より、サイクロン型吹雪計内部の風速は、貯っている雪の形状や深さにあまり依存せず、近似的に吹雪計の周囲の外部風速のみによると考えてよいであろう。

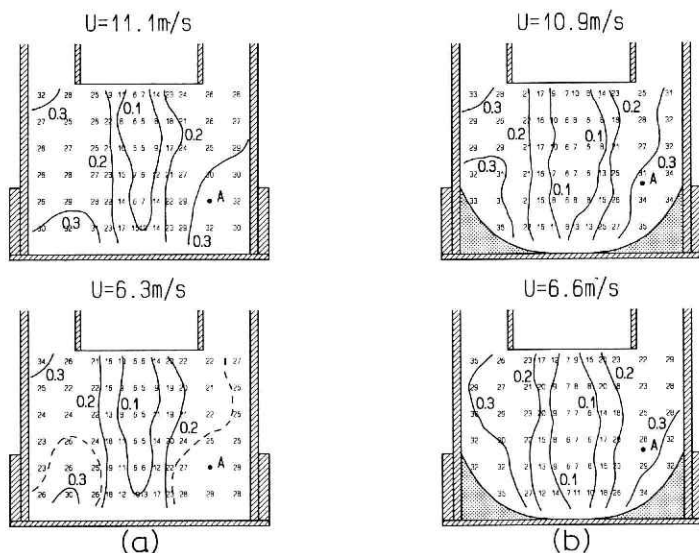


図6 サイクロン型吹雪計の中心軸を含む断面における、外部風速 U で規格化した風速分布。(a)は内部に雪が貯っていない場合、(b)は吹雪粒子が捕集されている場合に対応する。小さな数字は風速比を100倍したもので、図の右側に吹込口がある。点A(底面または模型雪面から2cm、壁から1.5cm)を吹雪計内部の代表点とする(図7参照)。

Fig 6 Normalized wind speed with the ambient wind speed U in the vertical cross-section of a Cyclone type collector. (a): without snow in the collector, (b): with collected blowing snow. Small numerals denote wind speed ratios multiplied by 100. The air blows into the collector from the right side of the figure. The wind speed at the point A (2 cm above the bottom or the snow surface, and 1.5 cm apart from the wall) is a measure of the wind speed near the snow surface in the collector (see Figure 7).

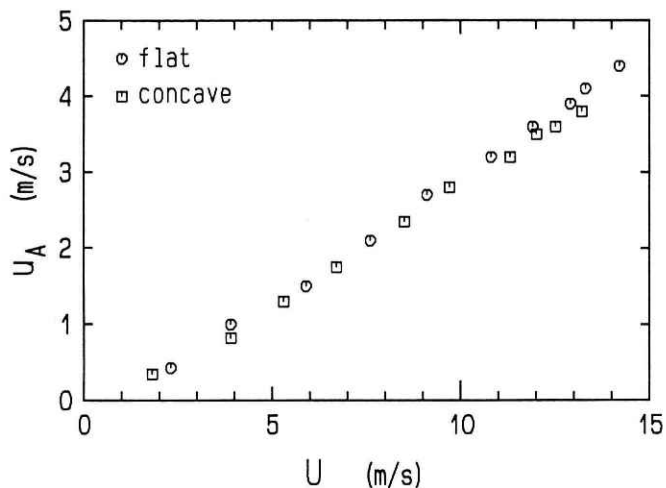


図7 サイクロン型吹雪計内部の代表点 A における風速 u_A と外部風速 U の関係。“flat” は吹雪計内部に雪が貯っていない場合，“concave” は吹雪粒子が捕集されている場合(図6参照)に対応。

Fig 7 Wind speed u_A at the point A against ambient wind speed U . “flat” : without snow in the collector, “concave” : with collected blowing snow (see Figure 6).

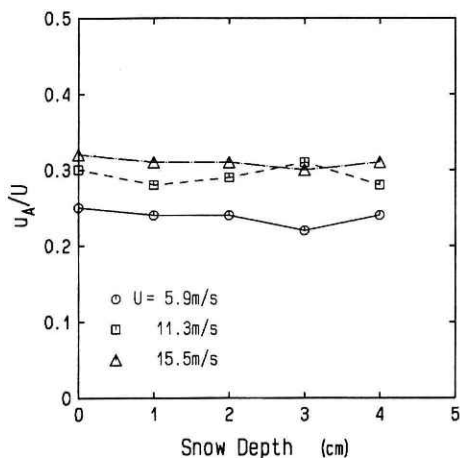


図8 サイクロン型吹雪計内部の代表点 A における、外部風速で規格化した風速 (u_A/U) と吹雪計内部に貯った雪の深さの関係。ただし、雪は水平に貯っていると、代表点は雪面から 2 cm、壁から 1.5 cm の点である。

Fig 8 Normalized wind speed, u_A/U , at the point A (2 cm above the snow surface and 1.5 cm apart from the wall) versus depth of collected blowing snow. Cases of flat snow surfaces.

5. 低温室における昇華量の測定

5.1 実験方法

気温をほぼ一定に制御した低温室内において、内部に雪試料を入れたサイクロン型吹雪計に送風機で一定の風を当て、雪重量の減少を測定して昇華量を求めた。実験装置を写真2に示したが、吹雪計は送風機から60cm 離れている。なお、この送風機は4節で述べたものとは違い、送風の直径は7.5cm であるが、外部風速と吹雪計内部の風速の関係は4節で示したものと同様であることを確認した。

実験は、気温と外部風速を変化させたもの(Run 1~19)と、相対湿度や雪試料の厚さ・密度・形を変えたもの(Run20~41)がある。低温室内の気温を一定に保った場合には、相対湿度はその気温に対応する一定値となっていた。しかし、気温を変えずに相対湿度を調節することは困難であるため、相対湿度のみを変えた実験例は少ない。実験中、送風機と吹雪計の間において気温と露点温度を連続測定し、吹雪計の吹込み口の風上側5cm において外部風速を測定した。また、気温と雪表面の温度差、および気温と吹雪計の外筒の温度差を熱電対で時々測定した。Run 1~41で使用した雪試料は、霜箱(中村, 1978)で作成した新雪(厳密には霜)を低温室内にしばらく置き、雪温が気温にほぼ等しくなってから円柱状(一部を除く)に圧縮して作成した。このほか補足的に、長期保存した雪(しまり雪)を用いた実験(Run42~47)も行った。

重量の減少は、原則として3時間以上の間隔をおいて測定したが、特に昇華量が大きくなる条件の場合には、雪の表面状態が変わらないように1時間程度の時間間隔で測定した。

実験条件と測定結果を表1にまとめた。



写真2 低温室における昇華量の測定実験装置。

Photo 2 Instruments to measure sublimation rate and experimental conditions in a cold room.

表1 低温室における昇華量測定実験のまとめ

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)
				厚さ (cm)	密度 (g/cm ³)			
1	-4.8	5.1	75.2	3.0	0.17	477	0.16	0.017
2	-4.7	4.6	73.5	3.0	0.17	184	0.20	0.020
3	-5.0	10.0	76.9	3.0	0.16	176	0.34	0.043
4	-4.8	9.9	75.2	3.1	0.16	185	0.42	0.048
5	-4.8	15.3	77.0	3.0	0.17	186	0.77	0.097
6	-4.8	15.2	78.2	2.8	0.18	181	0.86	0.116
7	-9.6	5.5	69.0	3.0	0.18	178	0.24	0.032
8	-9.5	5.5	66.8	3.0	0.17	588	0.23	0.027
9	-9.0	5.3	70.3	2.8	0.17	181	0.17	0.022
10	-9.4	10.3	72.5	3.0	0.18	553	0.26	0.040
11	-9.6	10.0	69.0	3.0	0.17	178	0.40	0.053
12	-9.7	15.0	70.1	3.0	0.15	182	0.63	0.090
13	-9.2	15.0	73.2	3.3	0.17	181	0.63	0.100
14	-14.7	5.0	61.6	2.7	0.19	629	0.12	0.019
15	-14.9	5.0	62.1	3.0	0.19	193	0.09	0.015
16	-14.8	10.0	62.2	3.0	0.19	174	0.31	0.051
17	-13.6	10.3	67.5	3.1	0.17	180	0.30	0.056
18	-14.8	15.5	63.8	2.7	0.20	125	0.58	0.103
19	-13.6	15.3	68.7	3.1	0.17	180	0.60	0.119
20	-5.0	10.3	90.5	3.0	0.17	181	0.13	0.066
21	-9.4	10.2	86.7	2.9	0.18	180	0.07	0.045
22	-9.6	10.0	77.4	2.9	0.18	181	0.27	0.058
23	-9.5	10.0	69.6	3.0	0.18	180	0.40	0.054
24	-9.4	10.0	69.6	1.5	0.16	179	0.40	0.054
25	-9.5	10.2	74.3	4.5	0.19	599	0.35	0.061
26	-9.6	10.0	73.7	6.2	0.14	656	0.46	0.078
27	-9.6	10.0	69.0	2.8	0.24	58	0.31	0.041
28	-9.2	10.2	73.8	3.1	0.23	194	0.19	0.031
29	-9.3	10.2	73.1	3.0	0.12	177	0.31	0.049
30	-9.4	10.2	73.7	2.7	0.09	60	0.40	0.067
31	-9.4	10.2	73.1	3.1	0.20	610	0.25	0.040
32	-9.4	10.3	74.9	3.0	0.28	275	0.20	0.035
33	-9.3	10.3	68.5	3.0	0.24	233	0.21	0.026
34	-9.0	10.3	72.0	3.0	0.11	104	0.40	0.058
35	-9.3	10.3	71.4	2.9	0.10	63	0.57	0.083
36	-9.1	10.3	70.8	3.1	0.12	88	0.55	0.076
37	-9.5	10.3	68.5	3.0	0.15	92	0.46	0.059
38	-9.7	10.3	69.0	3.0	0.13	89	0.40	0.054
39*1	-9.6	10.2	74.3	3.0	0.18	210	0.60	0.106
40*2	-9.3	10.3	70.2		0.18	61	0.79	0.076
41*2	-9.2	10.3	70.8		0.13	92	0.65	0.064

(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)
				厚さ (cm)	密度 (g/cm ³)			
42	-9.4	10.0	68.5	2.8	0.41	486	0.43	0.055
43	-9.5	15.0	70.2			180	0.77	0.108
44*2	-9.4	10.0	67.9		0.40	697	0.52	0.045
45	-9.4	10.2	73.1	2.8	0.46	202	0.21	0.033
46	-9.2	10.2	73.2	2.7	0.51	207	0.32	0.050
47	-9.2	5.3	70.2	3.0	0.45	760	0.16	0.021

* 1 : 表面に直径 5 mm, 深さ 5 mm のくぼみを10数個つける。

* 2 : 表面を凹型とする。

5.2 結果と考察

(1) 昇華量

昇華量と外部風速の関係を図9に示す。プロットしたデータはRun 1～19で、新雪を厚さ約3 cmに圧縮した円柱状試料(密度は $0.15\sim 0.20\text{g/cm}^3$)を用いたものである。昇華量は外部風速とともに増加している。気温毎(約 $-5, -10, -15^\circ\text{C}$)に記号を変えてあるが、気温による昇華量の違いがはっきりしないのは、気温と同時に相対湿度も変化しているためである。

図10は昇華量と相対湿度の関係で、外部風速を約 10m/s とし、厚さ約3 cm, 密度 $0.15\sim 0.20\text{g/cm}^3$ の円柱状新雪試料を使用した場合のデータをプロットしてある。記号は図9と同様である。3本の実線は、各気温に対する $c_h u = 0.05\text{m/s}$ (後述するが、外部風速が 10m/s に相当する)の場合の昇華量の理論計算結果である。各気温における昇華量の測定値および相対湿度とともに減少する傾向は、理論計算とほぼ一致している。

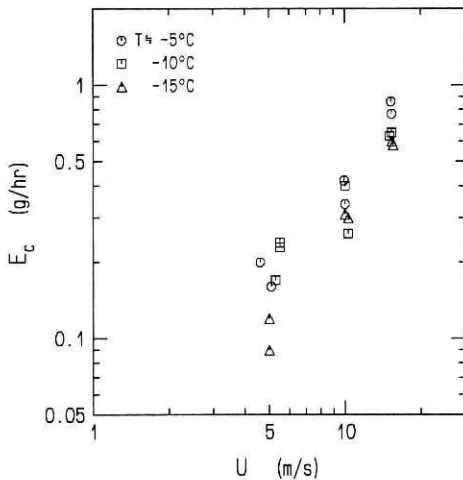


図9 昇華量 E_c と外部風速 U の関係。データはRun 1～19で、円柱状新雪試料(厚さ約3 cm, 密度 $0.15\sim 0.20\text{g/cm}^3$)を用いたもの。
Fig 9 Relation between the ambient wind speed U and the measured sublimation rate E_c , obtained with cylindrical samples of new snow compressed to 3 cm thickness (density is $0.15\sim 0.20\text{g/cm}^3$).

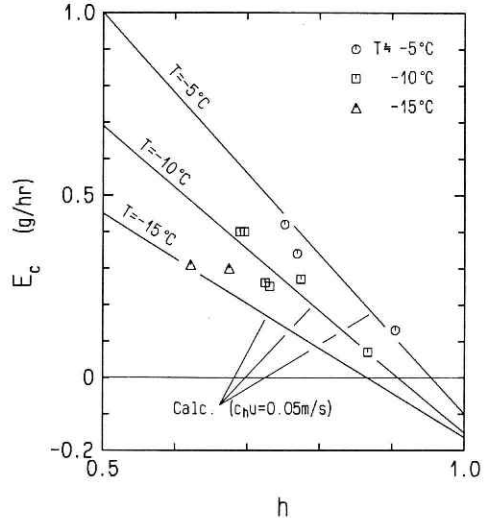


図10 昇華量 E_c と相対湿度 h の関係。データは、外部風速 U が約 10m/s , 円柱状新雪試料(厚さ約3 cm, 密度 $0.15\sim 0.20\text{g/cm}^3$)のもの。実線は各気温に対する $c_h u = 0.05\text{m/s}$ とした時の昇華量の理論計算結果。
Fig 10 Relation between the relative humidity of the air h and the measured sublimation rate E_c under $U \approx 10\text{m/s}$. Samples are similar to those of Figure 9. Solid lines represent theoretical calculations with $c_h u = 0.05\text{m/s}$.

(2) 輸送係数

サイクロン型吹雪計内部に貯った雪の顕熱(水蒸気)の輸送係数を理論的に与えることは困難であるが、実験的には以下の方法によって、測定された昇華量から求めることができる。

すなわち、熱電対による測定結果から $|\Delta T| \leq 1^\circ\text{C}$ であったので、 σT_s^4 と q_s の T のまわりの展開((4), (10))を ΔT の低次の項で止めることができる。今、1次の項で止めると(6)は

$$R - M - \sigma T^4 \doteq 4 \sigma T^3 \Delta T + c_p \rho c_h u \Delta T + \ell \rho c_e u (q_i^0(T) + q_i'(T) \Delta T - q) \quad (13)$$

となる。実験条件下では融解は起こらなかったので $M = 0$ とし、 $q = h \times q_w^0(T)$ を代入すると

$$\Delta T = \frac{R - \sigma T^4 - \ell \rho c_e u (q_i^0(T) - h q_w^0(T))}{4 \sigma T^3 + (c_p \rho c_h + \ell \rho c_e q_i'(T)) u} \quad (14)$$

が得られる。また、(11)は

$$E \doteq \rho c_e u (q_i^0(T) + q_i'(T) \Delta T - h q_w^0(T)) \quad (15)$$

となる。(15)に(14)を代入して ΔT を消去すると、 $c_h u (= c_e u)$ に関する次の2次方程式が導かれる。

$$\begin{aligned} & c_p \rho^2 (q_i^0(T) - h q_w^0(T)) (c_h u)^2 \\ & + (4 \sigma T^3 \rho (q_i^0(T) - h q_w^0(T)) + \rho q_i'(T) (R - \sigma T^4) - (c_p \rho + \ell \rho q_i'(T)) E) c_h u \\ & - 4 \sigma T^3 E = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

実験条件として気温 T と相対湿度 h が既知であり、 $R - \sigma T^4 = 0$ と近似できるので、測定された昇華量 E_c を吹雪計内部の雪試料の表面積で割り E を求め、(16)を解いて輸送係数が求められる。

Run 1~19, およびその他の新雪を用いた Run で円柱状試料の厚さが約 3 cm, 密度が $0.15 \sim 0.20 \text{ g/cm}^3$ の測定結果から、上記の方法で求めた輸送係数と外部風速の関係を図11に示した。記号は図9と同じである。風速がほぼ同じデータについて、輸送係数と気温の間に系統的な関係は見られないが、これは本来、輸送係数が気温や相対湿度には依存しないことに対応する(図13参照)。輸送係数は外部風速とともに増大するが、線形には比例していない。プロットしたデータは各風速毎に比較的まとまっているので、この図から輸送係数と外部風速の関係を与える実験式として

$$c_h u = 1.7 \times 10^{-3} U^{1.5} \quad (17)$$

が得られた。ただし、 $c_h u$ と U の単位は m/s である。

図12は図11と同じデータを、吹雪計内部の代表点 A(図6参照)における風速 u_A に対してプロットしたものである。 u_A と U の関係は図7から読み取った。輸送係数と u_A の関係も(17)と同

様の式で表せ、 u_A のべき指数は1よりやや大きい。内部実効風速 u は、吹雪計内部の雪面近傍の平均的な風速であるから、仮に $u = u_A/2$ とするならば、抵抗係数 c_h は約0.04となり、 u とともにやや増加する傾向にあることを示している。

輸送係数と相対湿度の関係を図13に示した。外部風速が約10m/s、円柱状新雪試料(厚さ約3 cm, 密度0.15~0.20g/cm³)の場合のデータをプロットし、気温により記号を変えてある。気温、相対湿度が変化しても輸送係数が系統的に変化することはない。

図14は、外部風速が約10m/sで気温が約-10°Cの時の輸送係数と試料密度の関係である。試料は新雪(白抜き記号)および保存雪(黒塗り記号)を厚さ3 cmの円柱状にしたもの(丸)と、それぞれの表面を実際の吹雪粒子の貯る形状である凹型にしたり(四角)、表面に直径5 mm, 深さ5 mmのくぼみを10数個つけたもの(三角)である。円柱状試料(くぼみをつけたものも含む)の表面積は54.1cm², 凹型試料の表面積は77.5cm²とした。また、凹型試料の密度は一様でなく、周辺部の密度がやや小さい(図14および表1の密度は平均的な値である)。○に注目すると、輸送係数は密度とともに小さくなっている。保存雪に対する輸送係数の値はばらついているが、新雪の場合の密度に対する傾向とは異なるようである。また、新雪試料表面を凹型とした時の輸送係数がやや大きいものが1例あるが、低密度の凹型周辺部で輸送が大きいことや、雪の表面近傍の風速の分布が円柱状試料の場合と多少異なることなどが、その原因

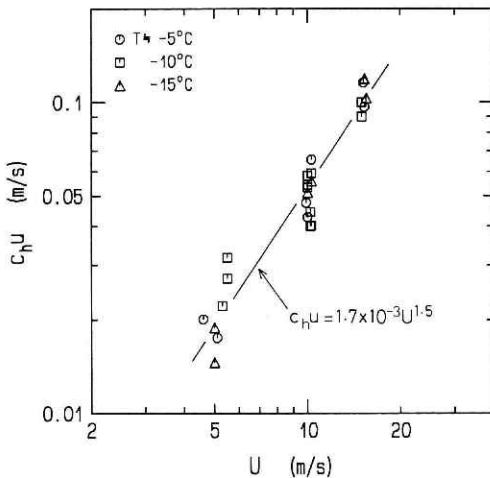


図11 輸送係数 $c_h u$ と外部風速 U の関係。データは Run 1~19, およびその他の円柱状新雪試料(厚さ約3 cm, 密度0.15~0.20g/cm³)を用いたもの。

Fig 11 Relation between the ambient wind speed U and the transfer coefficient $c_h u$. Samples are similar to those of Figure 9.

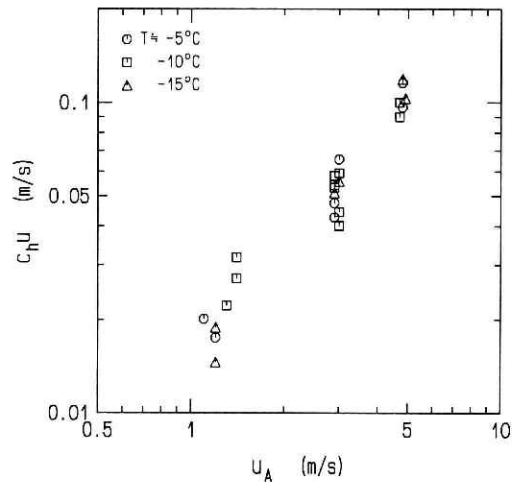


図12 輸送係数 $c_h u$ とサイクロン型吹雪計内部の代表点 A における風速 u_A の関係。データは図11と同じ。

Fig 12 Relation between the wind speed u_A at the point A and the transfer coefficient $c_h u$. Plotted data are the same as in Figure 11.

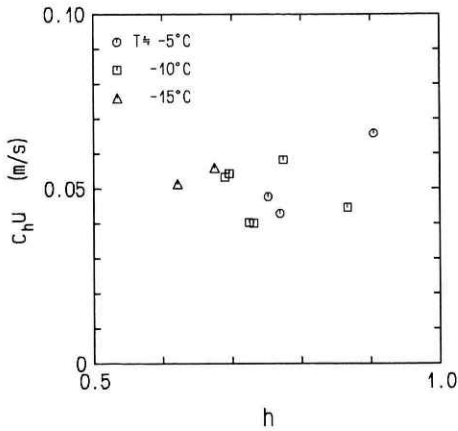


図13 輸送係数 $c_h u$ と相対湿度 h の関係。データは図10と同じ。

Fig 13 Relation between the relative humidity of the air h and the transfer coefficient $c_h u$. Plotted data are the same as in Figure 10.

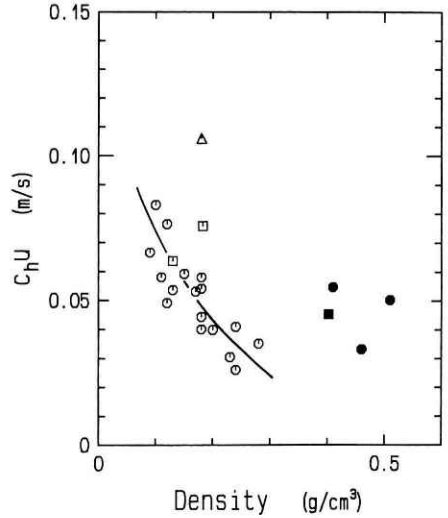


図14 輸送係数 $c_h u$ と試料密度の関係。白抜き記号：新雪，黒塗り記号：保存雪。丸：厚さ3 cm の円柱状試料，四角：厚さ3 cm の円柱状試料の表面を凹型にしたもの，三角：厚さ3 cm の円柱状試料の表面に直径5 mm，深さ5 mm のくぼみを10数個つけたもの。データは外部風速 U が約10m/s，気温 T が約 -10°C のもの。

Fig 14 Relation between the density of a sample and the transfer coefficient $c_h u$ under $U \approx 10\text{m/s}$ and $T \approx -10^{\circ}\text{C}$. Open symbol : new snow, solid symbol : compact snow. Circle : cylindrical sample of 3 cm thickness, square : same as circle except for the surface is concave, triangle : same as circle except for the surface is rugged.

として考えられる。また、試料表面にくぼみをつけると輸送係数が大きくなっているが、これは表面の大きな凹凸のため境界層の乱流状態が活発化し、水蒸気輸送が増えるためと考えられる。

輸送係数と吹雪計内部の雪の深さ(円柱状試料の厚さ)の関係を図15に示す。データは、外部風速が約10m/s、新雪試料(密度が $0.14 \sim 0.20\text{g/cm}^3$)のものである。深さ4 cm 程度までは輸送係数は雪の深さに依存せず、4 cm を超えるとやや増加する傾向を示す。これは、図8に示したように、吹雪計内部の代表点の風速が雪の深さ(4 cm まで)に依存しないことに対応する。

ここで、サイクロン型吹雪計内部の雪試料の上に形成される境界層について簡単な考察を

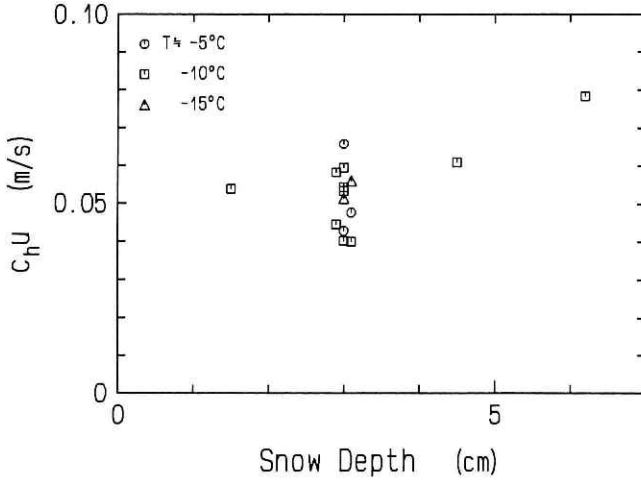


図15 輸送係数 $c_h u$ と吹雪計内部の雪の深さ(試料の厚さ)の関係。データは、外部風速 U が約10m/s, 円柱状新雪試料(密度0.14~0.20g/cm³)のもの。

Fig 15 Relation between the depth of collected blowing snow (thickness of a cylindrical sample) and the transfer coefficient $c_h u$, obtained with cylindrical samples of new snow (density is 0.14~0.20g/cm³) under $U \approx 10$ m/s.

してみる。新雪を用いた実験の前後に試料の断面を写真撮影し、表面の幾何学的な凹凸を測定した。その結果、試料密度によらず凹凸高(ピーク間)は0.2mm以下であった(雪面のごく近傍を除けば、吹雪粒子の粒径は100 μ m前後であるから、実際に吹雪計内部に貯る吹雪粒子の表面の凹凸も同程度であると推定される)。この値から、雪試料の表面は空気力学的に滑らかであると考えられる。吹雪計の直径(=8.3cm)を代表的な長さ L とすると、 $u = u_A/2 = 0.5 \sim 2.5$ m/s に対してレイノルズ数 Re は、

$$Re = \frac{uL}{\nu} = 3.1 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^4$$

となる。Schlichting(1979)によれば、空気力学的に滑らかな平板上に形成される層流境界層では、この範囲の Re に対して

$$c_h = 1.5 \times 10^{-2} \sim 6.8 \times 10^{-3}$$

であり、 c_h は Re (すなわち u) の増加とともに減少する。また、乱流境界層の場合もやはり Re とともに減少するが、層流から乱流への遷移状態にある場合には Re とともにやや増加する。従って、図12に示したデータから得られた c_h の値と u 依存性は、吹雪計内部の雪試料の表面上に形成される境界層が、少なくとも滑らかな平板上の層流または乱流境界層とは異なることを示唆している。

一方、これまでに積雪内部を吹く雪内気流の存在が指摘されている。(Oura *et al.*, 1976; 吉田, 1977)。試料密度が小さい場合には、雪内気流の存在により顕熱・水蒸気輸送が活発になり輸送係数が大きく、密度が増すにつれ雪の中に空気が入り難くなり輸送係数が小さくなり、輸送係数の密度依存性が生ずると考えることもできる。

このように、サイクロン型吹雪計内部の雪試料の上に形成される境界層を考える場合には、雪面の凹凸の幾何学的な大きさのみを考えるだけでなく、雪内気流の存在を合わせて考える必要があるように思われる。また、このことは野外における自然状態の積雪面上の境界層を考える場合にも、やはり注意すべきであろう。

6. 昇華量を求めるチャート

3.1節で示した原理に基づき、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、サイクロン型吹雪計内部に貯った吹雪粒子の昇華量 E_c を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)図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、吹雪計内部の雪の表面積を 54.1cm^2 とし、図11に示した輸送係数 c_{hu} と外部風速 U の関係に基づいている。従って、吸雪計内部に捕集された吹雪粒子の密度が $0.15\sim 0.20\text{g/cm}^3$ で、かつ水平に貯る場合に対するものである。1989年度の五所川原市における観測では、密度は $0.12\sim 0.24\text{g/cm}^3$ であったので、上記の密度範囲は妥当と考えられる。なお、現実には雪は凹型に貯るので、その表面積が増えるぶん、昇華量はこのチャートの値より大きくなると考えられる。また、このチャートは、実際の吹雪発生時の気象条件を考え、 $R - \sigma T^4 = 0\text{ W/m}^2$ として作成したが、例えば、日射が強く風が弱い時など、吹雪計の外筒の内・外壁の温度差が大きくなるような場合は、外筒を通る伝導熱のため昇華量はより大きくなる(Appendix 3 参照)。

7. ま と め

サイクロン型吹雪計の内部に捕集された吹雪粒子の昇華量を、熱収支の原理に基づき種々のパラメータを変えて理論的に計算した。また、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、昇華量は気温、顕熱の輸送係数(水蒸気の輸送係数とほぼ等しい)とともに増加するが、相対湿度とともに直線的に減少する。また、実際の吹雪発生時の気象条

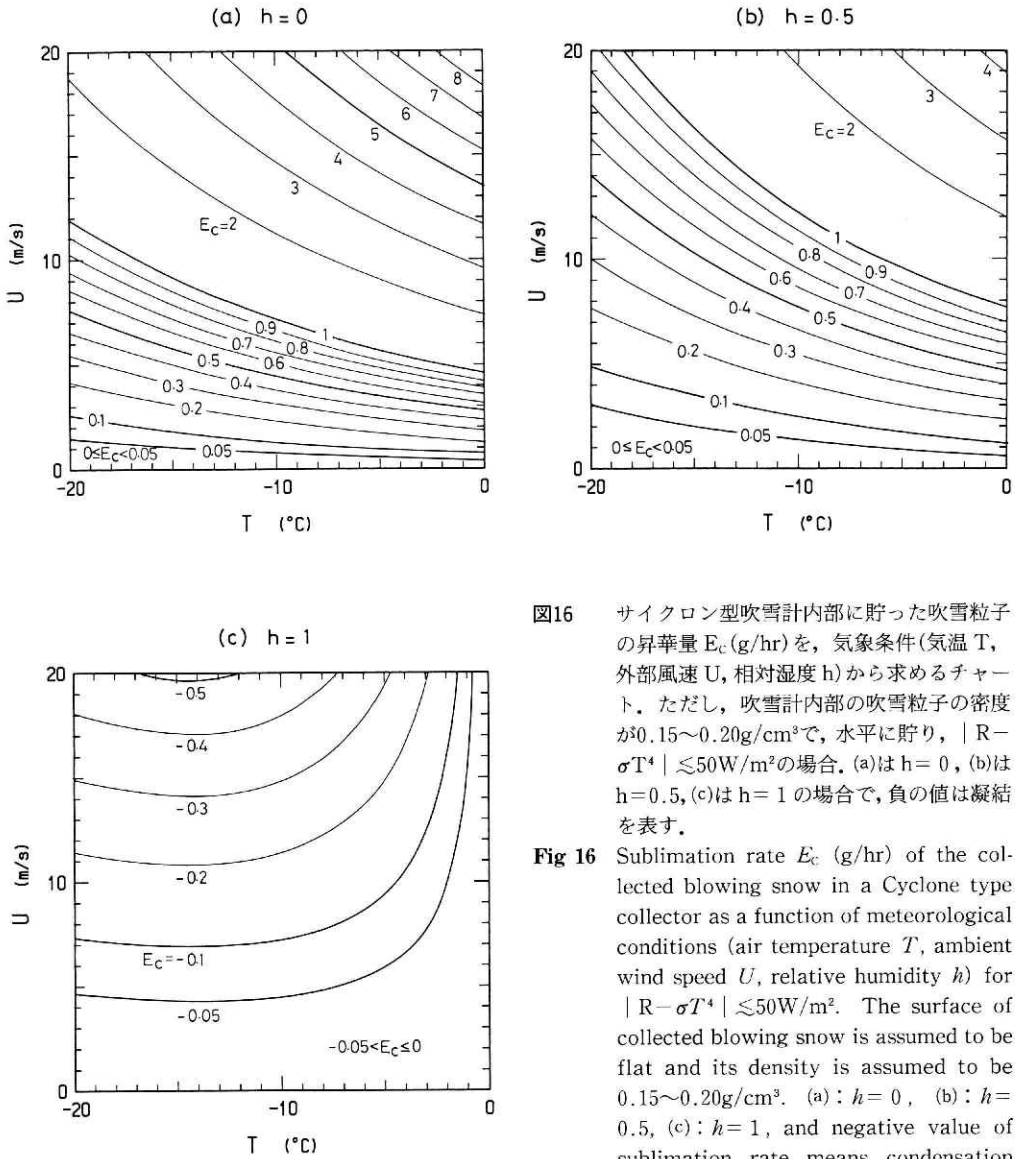


図16 サイクロン型吹雪計内部に貯った吹雪粒子の昇華量 E_c (g/hr) を、気象条件(気温 T 、外部風速 U 、相対湿度 h) から求めるチャート。ただし、吹雪計内部の吹雪粒子の密度が $0.15 \sim 0.20 \text{g/cm}^3$ で、水平に貯り、 $|R - \sigma T^4| \leq 50 \text{W/m}^2$ の場合。(a)は $h = 0$ 、(b)は $h = 0.5$ 、(c)は $h = 1$ の場合で、負の値は凝結を表す。

Fig 16 Sublimation rate E_c (g/hr) of the collected blowing snow in a Cyclone type collector as a function of meteorological conditions (air temperature T , ambient wind speed U , relative humidity h) for $|R - \sigma T^4| \leq 50 \text{W/m}^2$. The surface of collected blowing snow is assumed to be flat and its density is assumed to be $0.15 \sim 0.20 \text{g/cm}^3$. (a): $h = 0$, (b): $h = 0.5$, (c): $h = 1$, and negative value of sublimation rate means condensation rate.

件下で妥当と考えられる $|R - \sigma T^4| \leq 50 \text{W/m}^2$ の範囲では、昇華量は $R - \sigma T^4$ とともにわずかに増加する。ただし、 R は近似的に吹雪計内部の雪の表面における入力長波放射に等しく、 T は気温である。

②外部風速で規格化した吹雪計内部の風速の分布の形は、外部風速に依らず相似である。また、吹雪計内部の代表点における風速と外部風速は1対1に対応づけられ、内部に貯る雪の形状や深さにあまり依存しない。

③気温・風速等を制御して行った昇華量の測定実験の結果は理論計算と一致した。

④測定された昇華量から、熱収支式における未知数である吹雪計内部の雪の顕熱(水蒸気)の輸送係数を求めた。輸送係数は外部風速とともに増加するが、気温、相対湿度、吹雪計内部の雪の深さにほとんど依存しない。しかし、新雪試料の場合は、輸送係数は試料密度とともに減少する。この傾向は、吹雪計内部の雪の上に形成される境界層を考える際に、雪内気流の存在が無視できないことを示唆する。

⑤適当な仮定のもとで吹雪計内部の雪の顕熱(水蒸気)の抵抗係数を求めたところ、約0.04となった。

⑥実験より得られた輸送係数と外部風速の関係をもとに、気象条件(気温、外部風速、相対湿度)から昇華量を求めるためのチャートを作成した。このチャートにより、サイクロン型吹雪計を使用して吹雪量を測定する際の昇華の影響を容易に知ることができる。

本報告で示したように、サイクロン型吹雪計で吹雪量を測定する場合、冬期の通常の気象条件下では、捕集された吹雪粒子の昇華による質量の減少は避けられない。昇華の影響が無視できるか否かは測定時の気象条件や吹雪の状態によるので、吹雪量を正確に求めるためには、その時の気象条件より昇華量を算出し、場合によっては補正しなければならない。そのためには図16が便利であるが、この図の作成時のいくつかの仮定を満たすため、次のような観測時の配慮が必要である。すなわち、吹雪計が日射により昇温するのを防ぐため白色に塗装する、吹雪が終了した後直ちに重量を測定する等である。

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、長岡雪氷防災実験研究所の中尾正義第2研究室長、東北大学の近藤純正教授には貴重なコメントを頂いた。また、実験で使用した送風機は近藤純正教授より借用した。ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 阿部 修(1989)：ネット式吹雪計の捕捉率. 国立防災科学技術センター研究報告. No43, 247-254.
- 2) 東浦將犬・佐藤 威・八木鶴平・真木雅之・中井専人(1989)：津軽平野における吹雪量の広域観測 その1. 平成元年度日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, P.123.
- 3) Inoue, M. and K. Fujino (1977) : Measurements of drifting snow at Mizuho Camp, East Antarctica, 1974-1975. *Nankyoku Shiryo*, **60**, 1-12.
- 4) 小林俊一(1974)：サイクロン型地ふぶき計と引き出し箱型地ふぶき計の比較. *低温科学, 物理篇*, **32**, 89-95.
- 5) 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.
- 6) 中村秀臣(1978)：霜の製造装置“霜箱”の作製. *雪氷*, **40**, 31-36.
- 7) 成瀬廉二(1970)：南極昭和基地対岸の大陸沿岸部における地ふぶき量の測定. *低温科学, 物理篇*, **28**, 147-154.
- 8) Oura, H., T. Ishida, D. Kobayashi, S. Kobayashi, and T. Yamada (1976) : Studies on blowing snow, II. *Physics of Snow and Ice, Part 2 (II. Oura ed.)*, Inst. Low Temp. Sci. Sapporo, 1099-1117.
- 9) Schlichting, H. (1979) : *Boundary-Layer Theory (7th edition)*. McGraw-Hill, New York and London, 817pp.
- 10) Takahashi, S., II. Ohmae, M. Ishikawa, T. Katsushima, and F. Nishio (1984) : Observation of snow drift flux at Mizuho Station, East Antarctica, 1982. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **34**, 113-121.
- 11) 竹内政夫・石本敬志・野原他喜男(1975)：吹雪量と飛雪量垂直分布. *雪氷*, **37**, 114-121.
- 12) 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8月22日 原稿受理)

Appendix 1 主な記号

- c_e : サイクロン型吹雪計内部の雪の水蒸気輸送の抵抗係数, ただし, $c_e/c_h=1.12 \approx 1$
- $c_{e,u}$: サイクロン型吹雪計内部の雪の水蒸気輸送の輸送係数
- c_h : サイクロン型吹雪計内部の雪の顕熱輸送の抵抗係数
- $c_{h,u}$: サイクロン型吹雪計内部の雪の顕熱輸送の輸送係数
- c_p : 空気の比熱
- E : サイクロン型吹雪計内部の雪の昇華量(単位面積当り)
- E_c : サイクロン型吹雪計内部の雪の昇華量(E に雪の表面積を掛けたもの)
- G_0 : サイクロン型吹雪計の外筒を通る伝導熱
- h : 空気の相対湿度= $q/q_w^0(T)$
- H : サイクロン型吹雪計内部の雪面における上向き顕熱
- ℓ : 氷の昇華の潜熱
- ℓE : サイクロン型吹雪計内部の雪面における上向き潜熱
- L : サイクロン型吹雪計の代表的な長さ
- L^{\downarrow} : サイクロン型吹雪計内部の雪面における下向き長波放射
- L^{\uparrow} : サイクロン型吹雪計内部の雪面における上向き長波放射
- M : サイクロン型吹雪計内部の雪の融解熱
- q : 空気の比湿
- Q : サイクロン型吹雪計内部の雪の温度変化に要する熱
- q_i^0 : 氷面に対する飽和比湿
- q_i' : $=dq_i^0/dT$
- q_i'' : $=d^2q_i^0/dT^2$
- q_i''' : $=d^3q_i^0/dT^3$
- q_s : サイクロン型吹雪計内部の雪の表面における比湿(雪面温度で氷飽和)
- q_w^0 : 氷面に対する飽和比湿
- r : 雪のアルベド
- R : サイクロン型吹雪計内部の雪に対する入力エネルギー= $L^{\downarrow} - (G_0 + Q)$
- Re : レイノルズ数= uL/ν
- R_{net} : サイクロン型吹雪計内部の雪面における正味入力放射
- S^{\downarrow} : サイクロン型吹雪計内部の雪面における下向き短波放射(口射)
- T : 気温
- T_c : サイクロン型吹雪計の内壁の温度
- T_s : サイクロン型吹雪計内部の雪の表面温度
- u : サイクロン型吹雪計内部の雪の表面近傍の平均的な風速(内部実効風速)
- U : サイクロン型吹雪計の外部の風速(外部風速)
- u_A : サイクロン型吹雪計の底面(または内部の雪面)近傍の風速を代表させる点 A における風速
- δT : $=T_c - T_s$
- Δq : $=q_s - q$
- ΔT : $=T_s - T$
- ϵ : 雪の射出率= $0.98 \approx 1$
- ϵ_c : サイクロン型吹雪計の内壁(塩ビ)の射出率= 0.90
- ν : 空気の動粘性係数
- ρ : 空気の密度
- σ : ステファン・ボルツマン定数($=5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2/\text{K}^4$)

Appendix 2 サイクロン型吹雪計内部の雪表面における長波放射

雪の表面温度を T_s 、吹雪計の内壁の温度を T_c 、雪と内壁の射出率をそれぞれ ϵ 、 ϵ_c とし、多重反射を考慮すると雪表面における下向き長波放射 L^{\downarrow} は

$$L^{\downarrow} = \frac{\epsilon_c \sigma T_c^4 + (1 - \epsilon_c) \epsilon \sigma T_s^4}{1 - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_c)} \quad (\text{A } 1)$$

また、上向き長波放射は L^{\uparrow} は

$$L^{\uparrow} = \frac{\epsilon \sigma T_s^4 + (1 - \epsilon) \epsilon_c \sigma T_c^4}{1 - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_c)} \quad (\text{A } 2)$$

となる。 $\epsilon = 0.98 \approx 1$ 、 $\epsilon_c = 0.90$ (塩ビの射出率)であるから近似式として

$$L^{\downarrow} \approx \epsilon_c \sigma T_c^4 + (1 - \epsilon_c) \sigma T_s^4 \quad (\text{A } 3)$$

$$L^{\uparrow} \approx \sigma T_s^4 \quad (\text{A } 4)$$

が得られる。

昇華量の理論計算をする時のパラメータ $R - \sigma T^4$ (T は気温)は、伝導熱 G_0 と雪温の変化に要する熱 Q を無視すると

$$\begin{aligned} R - \sigma T^4 &\approx L^{\downarrow} - \sigma T^4 \\ &= \epsilon_c \sigma T_c^4 + (1 - \epsilon_c) \sigma T_s^4 - \sigma T^4 \\ &\approx 4 (\epsilon_c \delta T + \Delta T) \sigma T^3 \end{aligned} \quad (\text{A } 5)$$

と表される。ただし、 $\Delta T = T_s - T$ 、 $\delta T = T_c - T_s$ であり、 σT_c^4 と σT_s^4 を T のまわりで展開し、微小量 ΔT 、 δT の 2 次以上の項は省略してある。

ΔT と δT は熱収支の関係により互いに独立ではないが、(A5)で $T = -10^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T = -5 \sim 5^\circ\text{C}$ 、 $\delta T = -10 \sim 10^\circ\text{C}$ とすると $|L^{\downarrow} - \sigma T^4| \lesssim 50 \text{ W/m}^2$ となる。なお、この条件は吹雪が発生するような強風時には満足されないと考えられる。また、低温室における昇華量の測定実験時には、 $|\Delta T| \leq 1^\circ\text{C}$ 、 $|\delta T| \leq 1^\circ\text{C}$ であった。

Appendix 3 サイクロン型吹雪計の外筒を通る伝導熱 G_0 と雪温の変化に要する熱 Q

吹雪発生時のように強風で日射が弱い時には、サイクロン型吹雪計の外筒の内・外壁の温度差は小さいと思われる。しかし、吹雪がおさまり天候が回復した時や、気温が急激に変化するような特殊な気象条件下では、内・外壁の温度差が生じ、内部に貯った雪の熱収支(式(1))を考える上で、伝導熱 G_0 と雪温の変化に要する熱 Q が無視できなくなる可能性がある。ここでは G_0 と Q を概算してみる。

吹雪計内部に密度 0.2g/cm^3 、厚さ 2cm の雪が水平に貯っている場合を考える。伝導熱は吹雪計の底面と側面(厚さ 2cm の部分)から雪に与えられると仮定するが、後者については外筒の曲率の効果は無視できる。外筒の厚さを 3mm 、熱伝導率を $0.2\text{W/m}^\circ\text{C}$ (塩ビの値)とし、外壁温-内壁温 $= 2^\circ\text{C}$ とすれば、伝導熱は 1.5W となる。これを雪の表面積 (54.1cm^2) で割ると $G_0 = -270\text{W/m}^2$ となるので、 $R - \sigma T^4 = 0\text{ W/m}^2$ と考えることはできない。

$R - \sigma T^4 = 200\text{W/m}^2$ 、輸送係数 $c_{hu} = 0.05\text{m/s}$ (外部風速が 10m/s に相当)の場合、気温 $T = 0^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $h = 0.6$ では、昇華量 $E_c = 1.70\text{g/hr}$ となり、 $R - \sigma T^4 = 0\text{ W/m}^2$ の場合(図4(a)参照)より 0.58g/hr 多くなる。また、 $T = 0^\circ\text{C}$ 、 $h = 0.8$ では $E_c = 0.98\text{g/hr}$ となり、 0.43g/hr 多くなる。しかし、 $h = 1$ の場合には、内部に貯った雪が融解するため $E_c = 0\text{ g/hr}$ で変わらない。また、気温が 0°C より低くなればなるほど昇華量は $R - \sigma T^4$ に依存しなくなる。

このように、昇華量に対する吹雪計の外筒を通る伝導熱の影響は、気温が高く相対湿度が小さいほど顕著となるので、そのような気象条件下で、本報告で示した昇華量のチャート(図16)を使用すれば、昇華量の誤差が大きくなる可能性がある。従って、あらかじめ吹雪計の内・外壁温の差が大きくなならないような工夫(日射による昇温を防ぐため白色に塗装する等)や、地吹雪終了後直ちに重量を測定する等の観測上の注意が必要となる。

次に、上と同様に貯っている雪が1時間に 5°C の温度変化をすれば、貯熱量の変化は 0.06W となる(ただし、雪の熱容量を $4 \times 10^5\text{J/m}^3/^\circ\text{C}$ とした)。これを雪の表面積で割ると $Q = 11\text{W/m}^2$ となるので、 Q は熱収支において無視できる。