



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	融雪期における積雪表面の蒸発係数について
Author(s)	小島, 賢治; KOJIMA, Kenji
Citation	低温科学. 物理篇, 27, 399-403
Issue Date	1970-03-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18128">https://hdl.handle.net/2115/18128</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	27_p399-403.pdf



## 融雪期における積雪表面の蒸発係数について\*

小島賢治

(低温学研究所)

(昭和44年8月受理)

### 1. 積雪表面で起る蒸発量または凝結量に関する経験式

積雪表面からの蒸発量は、雪面に接する下層大気中の水蒸気密度勾配と風速に左右される。 $\Delta t$  時間に単位面積の雪の表面から蒸発する雪の量を  $\Delta v$  ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) とすると、単位時間内の蒸発量  $E$  と空気中の水蒸気圧、風速との関係を表わす式として、

$$E = \Delta v / \Delta t = -\beta_z(e_z - e_0) u_z \quad (1)$$

がしばしば用いられる。ここで  $e_z$  と  $u_z$  はそれぞれ雪面から  $z$  m の高さでの水蒸気圧および風速の  $\Delta t$  時間内の平均値、 $e_0$  は雪面温度における飽和水蒸気圧 (雪面がとけているときは 6.1 mb または 4.58 mm Hg)、 $\beta_z$  は比例定数である。従来、 $\beta_z$  の値を経験的に求めた報告は少なくないが、それらの値はいろいろである。

筆者は 1967 年 3 月空知郡幾寅 (いくとら) で、また同年 4 月雨竜郡母子里 (もしり) で行なった融雪観測の際に測定した雪面蒸発量と、雪面からの高さ 90 cm 又は 1 m での温度、湿度、風速等に関する資料にもとづき、式 (1) の定数  $\beta_z$  の値を求めてみた。蒸発量その他の測定法は上記融雪観測の報告<sup>1)</sup> に詳しく述べた。

石井<sup>2)</sup> は岩見沢での蒸発量の測定結果に基づき、1 時間平均蒸発 (凝結) 量が風速と飽差 ( $e_z - e_0$ ) との積に比例することを確かめ、次の関係式を得た。

$$E = 1.12 \times 10^{-3} (6.1 - e_{1.5}) u_{1.5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hr}^{-1} \quad (2)$$

但し、 $e_{1.5}$  と  $u_{1.5}$  は高さ 1.5 m における水蒸気圧 (mb) と風速 ( $\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ ) である。

筆者は 1967 年 3 月 19~22 日 (幾寅) および 4 月 24~27 日の昼間の 2 時間毎の平均測定値につき、 $E/(e_0 - e_z) u_z$  により  $\beta_z$  の値を計算した。その値はかなりのちらばりを見せたが、とりあえず測定場所が異なる 3 月の分と 4 月の分とにわけて、それぞれの平均を求めたところ、幾寅の測定値 ( $z=0.9$  m) に関しては諸量の単位を石井の (2) 式と同じにして  $\beta_{0.9}=0.87 \times 10^{-3}$ 、母子里に関しては  $0.83 \times 10^{-3}$  ( $z=1$  m) という数値を得た。大沼<sup>3)</sup> はまた、単位時間単位面積あたりの凝結量  $-E$  を与える式として、

$$-E = 0.845 (e_{1.5} - e_0) u_{15} \times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hr}^{-1} \quad (3)$$

を得た。 $u_{15}$  は高さ 15 m での風速 ( $\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ ) である。

一方、Havens 等は  $t$  時間に単位面積に大気から伝達される熱量  $Q_A$  を高さ 90 cm の温度  $T$

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 990 号

と風速  $u$  により

$$Q_A = \alpha T_{0.9} u_{0.9} \cdot t \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \tag{4}$$

であらわして先ず  $\alpha$  の経験値を求め、水蒸気の輸送が熱量の輸送と同じ機構であると仮定して、単位面積の雪面への凝結潜熱の伝達量  $Q_L$  を

$$Q_L = \alpha \times 2.0(e_{0.9} - 4.58) u_{0.9} \cdot t \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \tag{5}$$

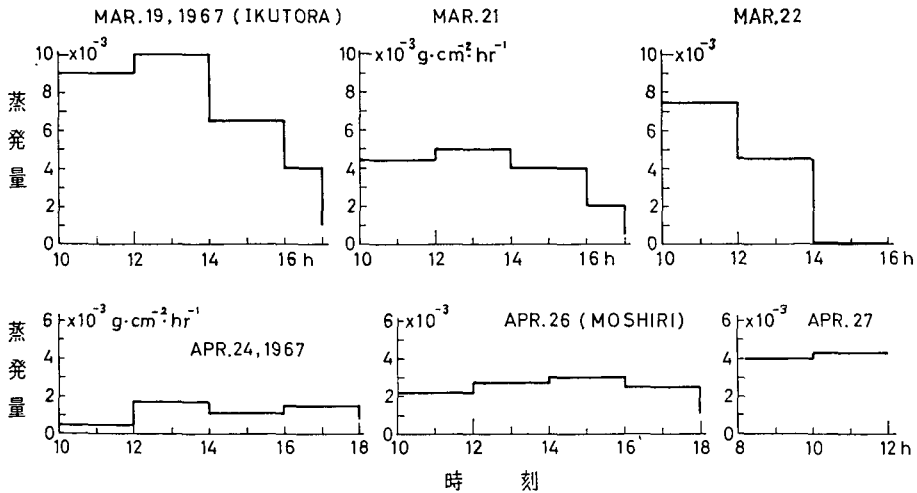
とした。 $\alpha$  の多くの時間帯についての経験値の平均は 0.0036 である。ただし、 $e$  と  $u$  の単位は mm Hg と  $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$  である。 $e$  の単位を mb に変えて式 (4), (5) の  $\alpha$  と式 (1) の  $\beta_{0.9}$  との関係を表わすと、 $\beta_{0.9} = \frac{2\alpha}{600} \cdot \frac{1}{1.33}$  となり、更に風速を  $\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$  であらわすと、 $\beta_{0.9} = 0.90 \times 10^{-3}$  となり、筆者の幾寅の測定結果に近い値となる。以上の幾つかの報告例をまとめて、蒸発量と高さ 1 m での水蒸気圧 (mb) と風速 ( $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ ) との関係式：

$$E = -\beta_{1.0}(e_{1.0} - e_0) u_{1.0} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1} \tag{6}$$

における  $\beta_{1.0}$  の値を第 1 表に示した。

**第 1 表** 雪面からの蒸発量に関する式： $E = \beta_z(e_0 - e_z) u_z \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$  における係数  $\beta_z$  の値。雪面から  $z$  の高さでの水蒸気圧を  $e_z$  mb、風速を  $u_z \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$  とし、雪面での水蒸気圧を  $e_0$  とする。( ) 内は雪面粗度  $z_0$  に石井<sup>2)</sup> が風速分布から求めた 0.25 cm を用い、風速分布に関する対数法則によって、 $z$  を変えた場合の  $\beta$  の値に筆者 (小島) がなおした数値

観測者	観測場所	蒸発係数 $\beta$ の値			
		高さ 90 cm	1 m	1.5 m	15 m
石井	岩見沢		( $1.28 \times 10^{-5}$ )	$1.12 \times 10^{-5}$	$0.845 \times 10^{-5}$
大沼	高田			( $1.19 \times 10^{-5}$ )	
Havens 他	Axel Heiberg Island (北極地方)	$0.90 \times 10^{-5}$	( $0.87 \times 10^{-5}$ )		
小島	幾寅	$0.87 \times 10^{-5}$	( $0.84 \times 10^{-5}$ )		
"	母子里		$0.83 \times 10^{-5}$		



**第 1 図** 雪の表面からの蒸発量とその時間的变化

グラフの水平部分の高さは、1 時間あたりの蒸発量の 2 時間平均値を示す。上は幾寅、下は母子里での測定結果

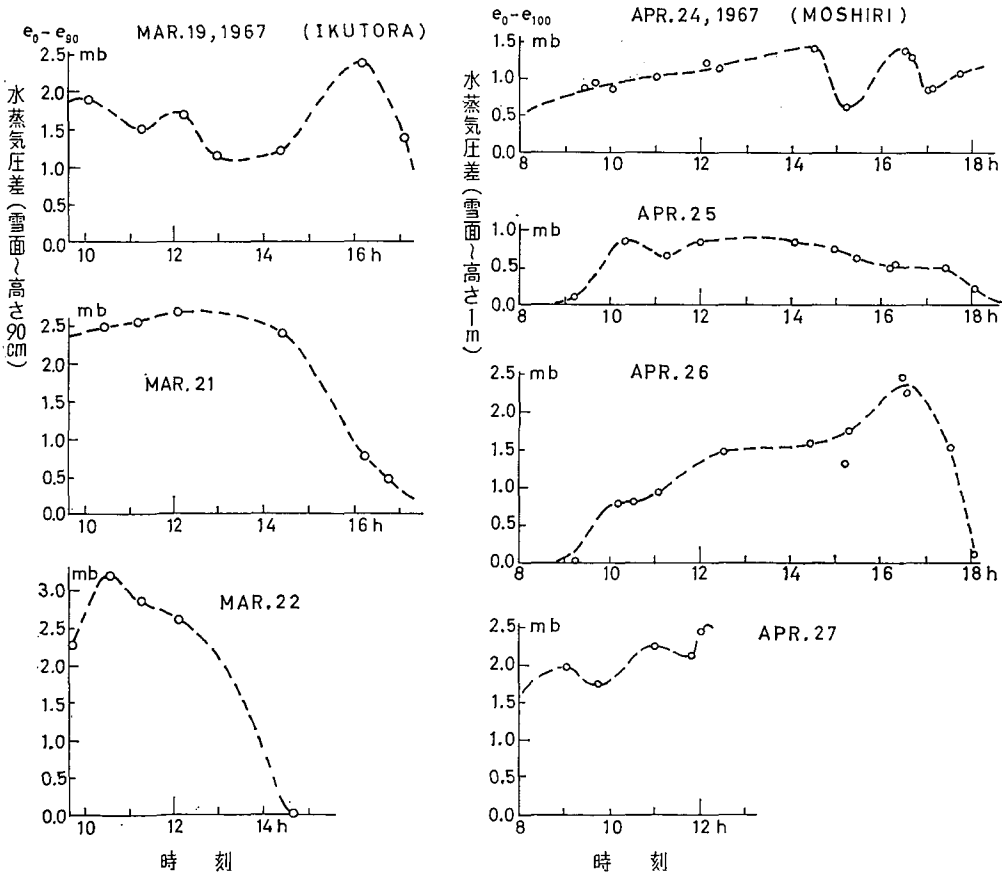
石井と筆者の値は直接蒸発量を測定して求めたものであり、大沼と Havens 等の値は熱伝達係数から算出したものであるが、石井と大沼の値は近く、筆者の得た値はそれより小さいが Havens 等の値に近い。母子里の蒸発量測定値に基づいて求めた  $\beta$  を、融雪が雪面でさかんに起っている時の蒸発係数として採用すると、

$$E = 0.83 \times 10^{-5} (6.1 - e_{1.0}) u_{1.0} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1} \quad (7)$$

となる。ここで  $u$  の単位は  $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$  である。筆者が  $\beta$  の値を算出するのに用いた蒸発量、飽差、風速および気温等の時間的変化をそれぞれ第 1 図、第 2 図、第 3 図のグラフであらわした。数値は融雪の報告<sup>1)</sup>に記載されている。

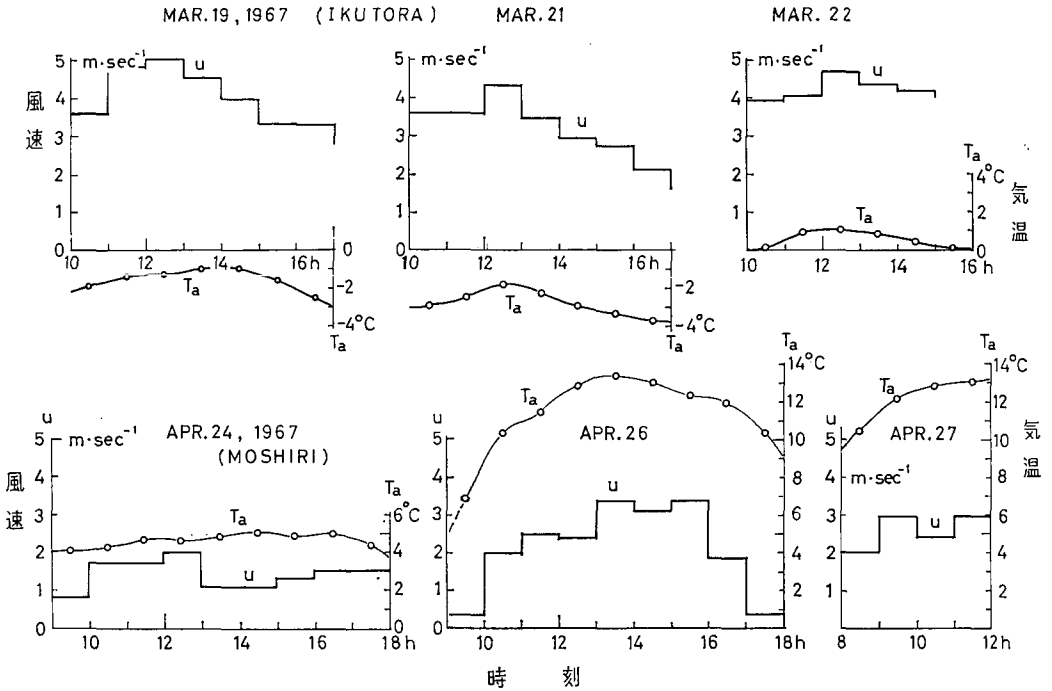
### 2. 係数 $\beta$ と理論式との対応

大気の流れにより水平な単位面積を通して単位時間に上から下へ向って輸送される熱量  $Q_A$  ならびに水蒸気量  $E'$  に関して、Prandtl の混合距離理論から導かれる次の式がよく用いられる。



第 2 図 左：幾寅で観測した高さ 90 cm での水蒸気圧  $e_{90}$  と雪面温度における飽和水蒸気圧  $e_0$  との差、 $e_0 - e_{90}$  の時間的変化

右：母子里で観測した高さ 1 m での水蒸気圧  $e_{100}$  と雪面の水蒸気圧  $e_0$  の差、 $e_0 - e_{100}$  の時間的変化。(幾寅で雪面温度が  $0^\circ\text{C}$  より低かった時は、気温と雪温の垂直分布から外挿して雪面温度を決めた)



第3図 幾寅(上)と母子里(下)で観測した雪面上1m(幾寅では90cm)での1時間平均風速  $u$  と気温  $T_a$  の時間的变化

$$Q_A = c_p \frac{\rho_a k^2 (T_1 - T_0) u_1}{\{\ln(z_1/z_0)\}^2} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \quad (8)$$

$$E' = \frac{0.623}{P} \frac{\rho_a k^2 (e_1 - e_0) u_1}{\{\ln(z_1/z_0)\}^2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \quad (9)$$

ここで、 $T_1$ ,  $e_1$ ,  $u_1$  は高さ  $z_1$  cm での温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、水蒸気圧 (mb)、風速 ( $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ ) である。 $z_0$  は  $u=0$  の高さ (雪面粗度) であり、この高さ  $z_0$  で  $e=e_0 \approx$  雪面温度における飽和水蒸気圧、 $T=T_0 \approx$  表面雪温 (表面がとけている時  $0.0^{\circ}\text{C}$ ) と考える。 $c_p$  は空気の定圧比熱 ( $\text{cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )、 $\rho_a$  は空気の密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )、 $P$  はその場所の大気圧 (mb)、 $k$  はカルマン定数である。従って式(6)の係数  $\beta_1$  は、 $E = -E' \times 60 \times 60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$  であるから、

$$\beta_1 = \frac{0.623}{P} \cdot \frac{\rho_a k^2}{\{\ln(z_1/z_0)\}^2} \times 3600 \quad (10)$$

ということになる。この関係によって蒸発係数  $\beta_1$  は、 $z_0$  と  $k$  を決めれば計算により求められる筈である。しかし、ここでは蒸発量の測定結果によって求めた  $\beta$  から逆に  $z_0$  の数値を算出してみた。 $k$  の数値についても問題はあるが、ここでは  $k=0.4$  とする。前記の母子里での測定結果にもとづく  $\beta$ ,  $P$ ,  $\rho_a$  等の値を式(10)に入れて計算すると、 $z_0=0.056 \text{ cm}$  となり、幾寅での観測で得た  $\beta$  その他の値からは、 $z_0=0.043 \text{ cm}$  となった。一方風速の垂直分布の測定値を対数分布で近似して直接  $z_0$  を求めると、幾寅における26回の風速分布測定結果からは平均として  $z_0=0.24 \text{ cm}$  となり、 $\beta$  の値から逆算した  $z_0$  の値と大いにくい違ふ。一方、母子里における4月

26, 27 日両日の 1 時間平均風速の垂直分布 13 例 (計 13 時間) による平均の  $z_0$  は 0.055 cm であって,  $\beta$  の値から求めた値とほぼ一致した。従って, 少なくとも母子里での観測結果に関しては, 風の運動量の輸送と水蒸気の輸送とが同じ機構によると考えて差支えないことになる。

そこで, 式 (9) と (8) とが雪面での凝結, 蒸発量ならびに大気伝達熱量の算定に適用出来るとすると,  $Q_A$  を式 (1) と同じ型式であらわした  $Q_A = \alpha_z (T_z - T_0) u_z$  の係数  $\alpha_z$  は,  $\beta_z$  の値から  $\alpha_z = (c_p P / 0.623) \beta_z$  によって求めてもよいであろう。なお, 上に述べた  $z_0$  は粗度と称えられるものの, 当時の実際の (特に母子里) の雪面の凹凸模様の規模とはおよそかけはなれた数値である。蒸発に関する筆者の以前の報告<sup>5)</sup> に当時の雪面の写真を掲げてある。

以上は, 日本雪氷学会昭和 42 年度研究発表会に報告した雪の蒸発に関する研究<sup>6)</sup> の内容の一部で, 他の部分は上記の報告<sup>5)</sup> に記述した。

## 文 献

- 1) 大浦浩文・小島賢治・小林大二・小林俊一 1967 金山ダムおよび朱鞠内湖附近における融雪の研究. 低温科学, 物理篇, **25**, 99-117.
- 2) 石井幸男 1959 積雪基礎調査——融雪の研究. 北海道電力株式会社, 札幌管区气象台, 88 pp.
- 3) Ônuma, T. 1967 Studies on heat balance on natural snow surface and promotion of melting of snow. In *Physics of Snow and Ice, Part 2* (H. Ôura, ed.), Inst. Low Temp. Sci., Sapporo, 785-796.
- 4) Havens, J. M., Müller, F. and Wilmot, G. C. 1965 Comparative Meteorological Survey and A Short-term Heat Balance Study of the White Glacier. Jacobsen-McGill Arctic Research Expedition 1959-1962, *Meteorology*, No. **4**, 1-21.
- 5) 小島賢治 1967 積雪の蒸発の融雪に及ぼす影響についての一実験. 低温科学, 物理篇, **25**, 119-126.
- 6) 小島賢治・小林大二・小林俊一 1967 融雪時における雪面からの蒸発に関する測定と実験. 日本雪氷学会昭和 42 年度研究発表会 (口頭発表).