野外観測及び数値実験による積雪表面霜形成の風速依存性

八久保 晶弘·秋田谷 英次(北大低温研)

1.はじめに

積雪表面霜(以下、単に表面霜)とは、晴れた日の夜間に積雪表面が放射冷却し、空気中の水蒸気が積雪表面に昇華凝結してできた霜の結晶である。表面霜は表層雪崩の弱 層となることが指摘されており、その成長条件を知ることは雪崩予知の基礎である。

表面霜を形成する水蒸気輸送の必要条件は、本質的には積雪表面近傍に大きな比湿勾 配があることと、乱流輸送を助長する風があることの2つである。Colbeck (1988)は、表 面霜が無風ではなく風速1m程度の微風環境下で形成されること、そして強風では積雪 表面が暖められて比湿勾配が減少し、かえって表面霜ができにくいことを理論的に明ら かにした。このことは、水蒸気輸送に最適な微風速領域の存在を示している。しかしな がら、Seligman (1936)は強風のもとで表面霜の凝結を観察し、表面霜の凝結速度と風速 との関係の理解は必ずしも一致していない。

筆者らは、最近の2冬にわたる野外観測と、積雪表面の熱収支モデルによる数値実験 を行ない、上述の問題の解明を試みた。

2.野外観測とその結果

野外観測は、北大天塩演習林内の雪崩観 測所にて行なわれた。観測期間は 1994 年 1 ~3 月・12 月、1995 年 2~3 月の延べ4ヶ 月間であり、晴天の夜間を選んで観測した。 観測項目は水蒸気凝結量・温湿度・風速で あり、観測方法は八久保ほか (1994)と同じ である。

図1は水蒸気凝結速度と高さ1mの風速 との関係を示したグラフである(1点は30 分平均値)。図1から、風速2~3m/sで大 きな凝結速度を観測していることが分か る。観測期間中、粒径が5mm程度の表面 霜が凝結した際、水蒸気凝結速度の平均は 4×10⁻⁶(kg/m²·s)だった。よって、数mm~1 cm に達するような大きな表面霜ができる のは、微風環境下であることが推測される。 しかし、風速5m/s以上のデータは、地吹 雪によって水蒸気凝結量の測定は困難で あるという理由から少なく、したがって Colbeck (1988)の理論から予想される、水蒸 気凝結速度を最大にする風速の存在は、野

 $\times 10^{-6} (\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$



-40 -

外観測からは確認できなかった。

3.積雪表面の熱収支モデルの概要

観測で得るのが困難な、広い風速領域での水蒸気凝結速度の風速依存性を明らかにす るために、積雪表面の熱収支モデルを用いてその傾向を調べた。以下、モデルの概要に ついて述べる。

快晴の夜間に表面霜が凝結するとき、積雪表面における放射収支量 R_{net}・顕熱 H・潜 熱 IE・積雪内伝導熱 G の各フラックスは図 2 の向きであり、これらは熱収支の基本方程 式(1)に支配されている。

$$R_{net} + H + lE + G = 0 \tag{1}$$

熱収支の各項はそれぞれ次のように与えられる。

$$R_{net} = \varepsilon \left(L \downarrow -\sigma T s^4 \right) \tag{2}$$

$$H = \rho c_p C_h U_z (T_z - T_s) \tag{3}$$

$$lE = \rho C_e U_z (q_z - q_s) \tag{4}$$

$$G = \lambda (T_g - T_s) / \Delta z \tag{5}$$

ただし、 ϵ :積雪の射出率、L↓:大 気中の水蒸気·CO₂などからの放射、 σ :ステファン・ボルツマン常数、 ρ :空気密度、 c_p :空気の定圧比熱、 $C_h \cdot C_e$:それぞれ顕熱・潜熱のバルク係 数、q:比湿、 λ :積雪の熱伝導率、 T_e :雪面から深さ Δz の雪温である。

そこで、(2)~(5)式を(1)式に代入し、 これに条件として高さ 1 m の温度 T_i ・湿度 H_i ・風速 U_i を与えることに よって、 T_i が求められる。次に、求 めた T_i を(4)式に代入して、計算され た水蒸気凝結速度と条件として与え



図2 表面霜凝結時の Heat balance

た風速の関係を調べる。ただし、(2)~(5)式の詳細については以下の通りである。

(2)式中の ε には、 Kondo and Yamazawa (1985)の観測結果である 0.97 の値を用いた。 また、 $L \downarrow$ については、Yamamoto-Brunt の近似式(6)から求めた。

$$L \downarrow / \sigma T^4 = 0.51 + 0.066 \sqrt{e}$$

(6)

e、Tはそれぞれ境界層中の平均的な水蒸気圧(mb)と気温(K)であるが、本モデルでは1m 温湿度で代表できると仮定する。

(3)・(4)式中のバルク係数 Cの大気安定度依存性については、大気安定度の指標である

バルクのリチャードソン数 R_Bを用いて Thom (1975)の式(7)で補正する。

$$C = C(N) (1 - 5R_{iB})^{2} \qquad (0 < R_{iB} < 0.2)$$
(7)

$$R_{iB} = gz(T_z - T_s)/T_z U_z^2$$
⁽⁸⁾

 C_{NN} :中立時のバルク係数、g: 重力加速度、z:代表高さ(本モデルでは1 m とする) である。 Ch_{NN} 、 Ce_{NN} は、野外観測から求めた値(それぞれ 3.3×10⁻³、2.9×10⁻³)を用いる。

(4)式中の比湿 q は温度と相対湿度の関数であり、(9)式で与えられる。

$$q \approx 0.622e(T) \times Humidity/p \tag{9}$$

e(T):温度 T の飽和水蒸気圧、Humidity:相対湿度、p:大気圧である。

(5)式中の λ については、雪面近傍の積雪が風成雪($\rho \sim 200 kg./m^3$)であると仮定して、 和泉・藤岡 (1975)の求めた実験式から 0.2 [W/m·K]の値を得た。また、 $\Delta z \& 5$ cm とす ると、 T_g は高さ 1 m の気温 T_z と良い相関関係 (R=0.82) にあることが、野外観測におけ る積雪内温度の測定から分かった。よって、 T_g は回帰式(10)によって与えられる。

$$T_g = 1.0T_z - 2.2 \tag{10}$$

4.熱収支モデルの結果と考察

図3は、与えた風速に対す る表面温度のグラフである

(1 m 温度は 0℃、パラメー タは 1 m 湿度)。図 3 から、 無風のとき、放射冷却した積 雪表面と高さ 1 m との温度差 は 10℃以上になるが、風速が 増加すると雪面温度が上昇 して気温に近づくことが分 かる。その理由は、無風のと きは雪面に流入するフラッ クスが伝導熱だけであるの に対し、風があると顕熱・潜 熱フラックスの寄与が大き くなるためである。

図4は、与えた風速に対す る水蒸気凝結速度のグラフ





である(条件は図3と同じ)。空気中の水蒸気が飽和しているとき、凝結速度は風速に 対して急激に増加するのに対して、未飽和の場合には凝結速度を最大にする風速が存在 し、強風のときには凝結から蒸発に転ずることが分かる。これらの傾向は、異なる1m 温度の条件下でも同様に見られた。

潜熱フラックス(水蒸気凝結速度)を決 める(4)式において、q,は温度T,の飽和水蒸 気圧であり、(9)式で与えられた。一方、図 3で分かるように T. が風速と共に増加す るため、高さ1mと積雪表面の間の比湿差 (qr-q)は、風速の増加に対して減少する。 すなわち、水蒸気凝結速度の風速依存性は、 (4)式右辺中の風速と比湿差の兼ね合いで 決定される。本モデルの結果から、水蒸気 が飽和している場合は、(4)式右辺中の風速 の項の増加が比湿差の項の減少を上回る ために、水蒸気凝結速度は風速に対して単 調増加しており、 Seligman (1936)の観測例 はこのケースに対応すると推測される。ま た、水蒸気が未飽和の場合は、Colbeck (1988)の見解が成り立つことになる。

5.まとめ

表面霜形成の風速依存性を調べた結果、 野外観測からは風速 2-3 m/s の微風領域で 大きな水蒸気凝結速度が見られ、顕著な表

面霜が発達した。また、積雪表面での熱収 図4 モデルによる水蒸気凝結速度と風速との関係 支モデルを用いて水蒸気凝結速度と風速との関係を求めた結果、空気中の水蒸気が飽和 している場合は凝結速度が風速とともに単調増加し、未飽和の場合は凝結量を最大にす る風速が存在することが分かった。

以上の結果は、空気中の水蒸気が飽和に近い場合、強風のもとで表面霜が急激に発達 する可能性のあることを示すものである。

6.参考文献

Colbeck, S. C. 1988. On the micrometeorology of surface hoar growth on snow in mountainous area. Boundary-Layer Met., 44, 1-12.

八久保 晶弘・福沢 卓也・秋田谷 英次 1994. 積雪表面霜の形成機構. 北海道の雪 氷, 第13号, 26~29.

和泉 薫・藤岡 敏夫 1975. 積雪の変態と熱伝導率の研究 I. 低温科学, 物理篇, 33, 91-102.

Kondo, J. and H. Yamazawa. 1985. Measurement of snow surface emissivity (Research note), Boundary-Layer Met., 34, 415-416.

Seligman, G. 1936. Snow structure and ski fields. International Glaciological Society, Cambridge, 555 pp.



