

積雪表面霜の形成機構

八久保 晶弘、福沢 卓也、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。この表面霜の形成機構についての従来の研究報告は僅かであり、それも定性的な議論の域を出ていない。

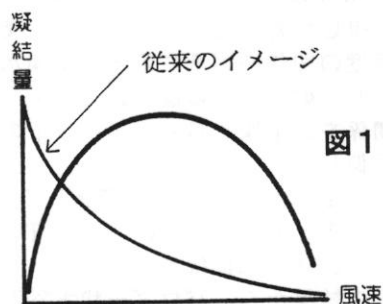
表面霜は積雪中に埋没すると力学的に弱い層 (弱層) となり、斜面においては表層雪崩の滑り層となることが指摘されている。また、南極氷床内陸部の涵養に表面霜の成長による凝結量が大きく寄与している可能性も指摘されている。よって、表面霜の形成条件の定量化はこれらの各方面で期待されている。

我々は昨冬 1 月～3 月の長期に渡る野外観測を行ない、幾つかの興味深い結果が得られたので報告する。

2、表面霜の形成理論

従来の表面霜の形成に関する議論の殆どは、風の無い条件下で実現される大きな水蒸気圧勾配を駆動力とする水蒸気の自己拡散が、表面霜の成長にとって支配的なプロセスである、としている。しかし、自己拡散による輸送量は極めて僅少で、観測されるような表面霜を一晩で形成するのは不可能である。よって、輸送量の数オーダー大きい乱流拡散が表面霜への水蒸気輸送の担い手であることが予想される。

ある風速のもとでは、顕熱輸送によって積雪表面を暖め水蒸気圧勾配が減少して凝結を抑制する効果と、乱流輸送が増加して凝結を促進する効果の、拮抗する 2 つの作用が存在する。従来は、前者の効果によって表面霜は無風時にできやすいとされていたが、後者の効果を含めると、表面霜の凝結に最適な風速があると考えられる (図 1)。



3、観測方法

観測は、1994 年 1 月～3 月の間の延べ 2 ヶ月間、北大手塩地方演習林内の観測所付近の尾根にて行なわれた。うち、顕著な表面霜が形成された日は 4 日あった。

観測項目は、温度・湿度・風速・放射収支・凝結量の 5 項目である。温湿度と風速は 10cm と 1m のそれぞれの高さで測定した (温度は雪面温度も含む)。5 項目のうち凝結量を除いた 4 項目は 1～2 分の瞬間値或いは平均値であるが、凝結量は 30 分間の積算値である。凝結量は約 0.3m² のアルミ板に雪を撒いたものを用い、質量変化を 30 分毎に測定した。表面霜形成時の質量変化の最大値は 30 分で約 3g であった。

4、結果

以下、観測で得られた表面霜の凝結量と気象要素の関係を示す。気象要素は高さ 10cm のものを用いた。図 2・図 3 では、プロットされたデータは 30 分間の平均値である。

図 2 は凝結量の風速依存性のグラフである。NR (放射収支) は晴れの指標として用い、値が小さいほど快晴で、0 近傍では曇っていることを示している。図 2 から、数 m の風速

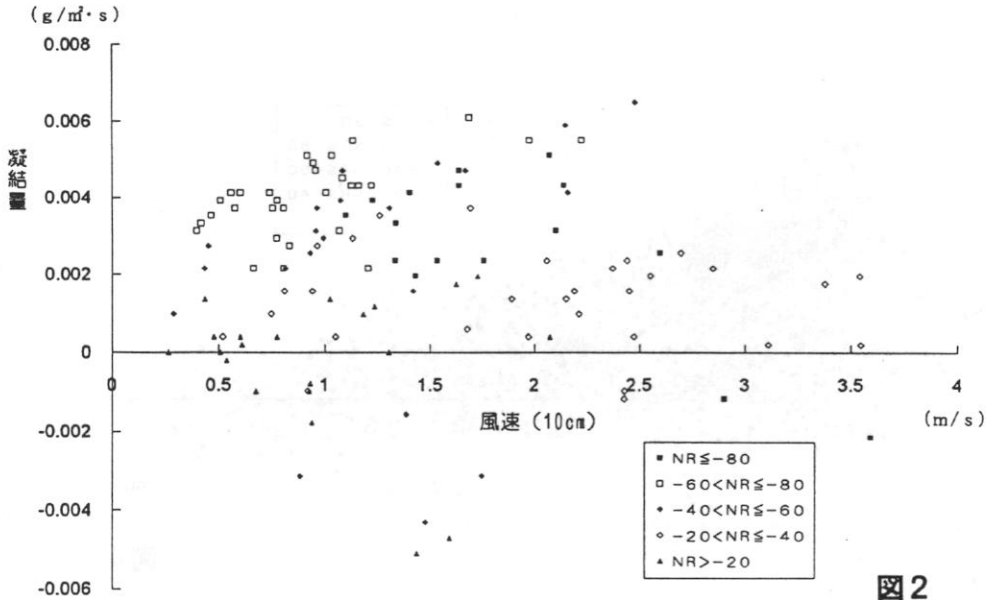


図2

でも表面霜が凝結することが分かる。しかし、風速の0付近のデータはなく、また風速の大きいときは飛雪が舞うために信頼できるデータが得られなかった。よって、前述の凝結量のピーク及び表面霜の凝結に最適な風速を見いだすことはできなかった。

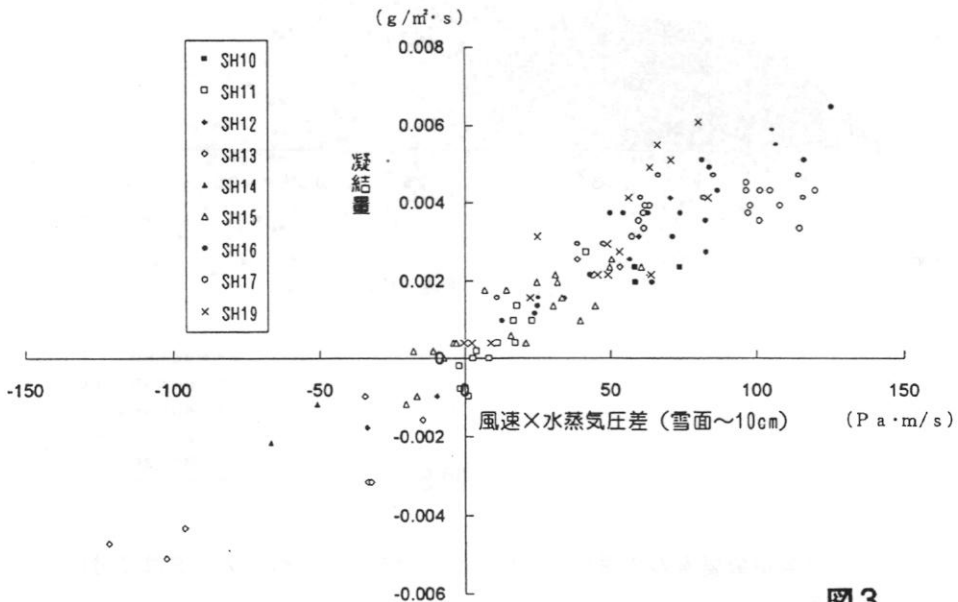


図3

図3は凝結量と風速×水蒸気圧差（雪面～10cmの絶対湿度の差）のグラフである。記号は観測ステージを表わしていて、SH16とSH17が表面霜のできた夜である。相関係数は0.93で、このことは、係数を定めれば表面霜の凝結量が気象要素（風速・温度・湿度）によって決定できることを示している。

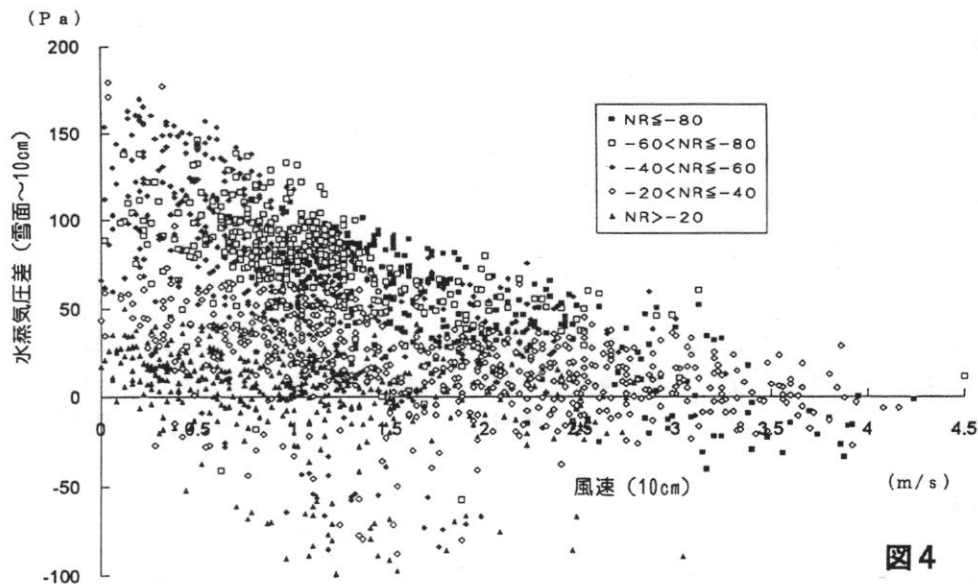


図 4

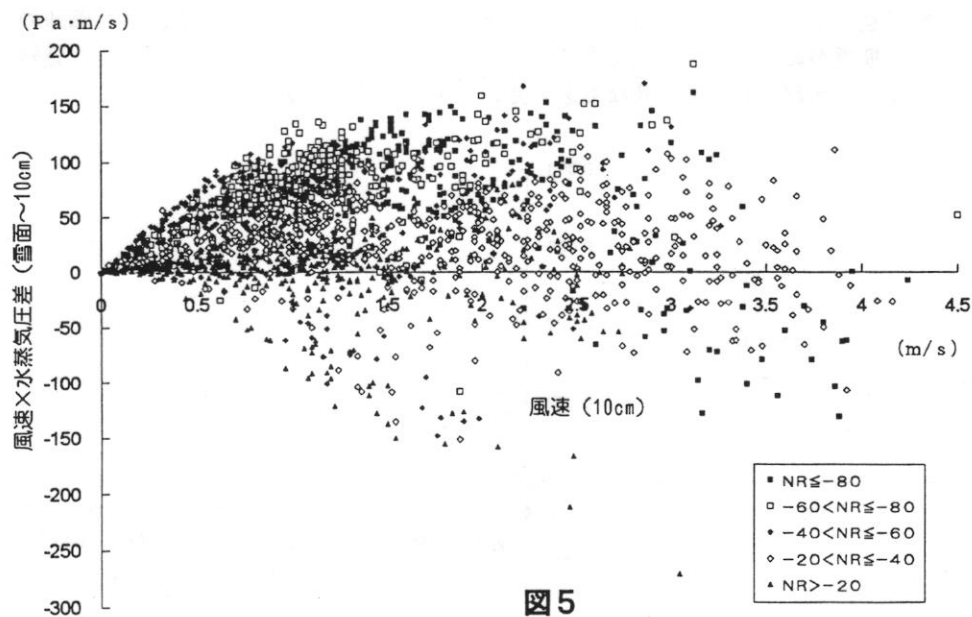


図 5

図 4・図 5 は各気象要素の関係を示したグラフであり、一つのデータは 2 分間の気象要素の平均値である。

図 4 は水蒸気圧差の風速依存性のグラフである。風が強くなるほど、放射冷却で冷えた積雪表面が顕熱で暖められて水蒸気圧差が減少することが分かる。

図 5 は図 4 の縦軸に風速をかけたグラフである。図 3 から、凝結量の大きいときは、風速×水蒸気圧差が大きく、従って図 5 から、無風時よりはある程度風の吹く方が凝結量が大きいことが結論される。

5、考察

観測結果から、表面霜の凝結には風の寄与が重要であることが示された。しかしながら、凝結に最適な風速がどれくらいで、またそれが何の要素に依存するのか、などの議論をするには、今回の観測では不十分であった。今後も観測によってデータを蓄積する一方で、熱収支についての簡単な数値実験を行なうことによって、理論的にも明らかにしていきたいと考えている。

図3で得られる関係式は、地表面への各種フラックスについての半経験式であるバルク法そのものである。すなわち、放射冷却のような極めて安定な条件（雪面近傍では温度勾配が $5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ にも達する）でも、乱流輸送の式であるバルク法が適用できることになる。しかし、関係式の比例定数であるバルク係数は一義的に決定できるものではなく、表面の粗さや流れの状態までも含む関数である。表面霜の成長は雪面状態を変えていくので、バルク係数は一定とは考えられない。よって、バルク法から表面霜の凝結量を求めるには、バルク係数の意味とその決定方法について今後も十分検討する必要がある。

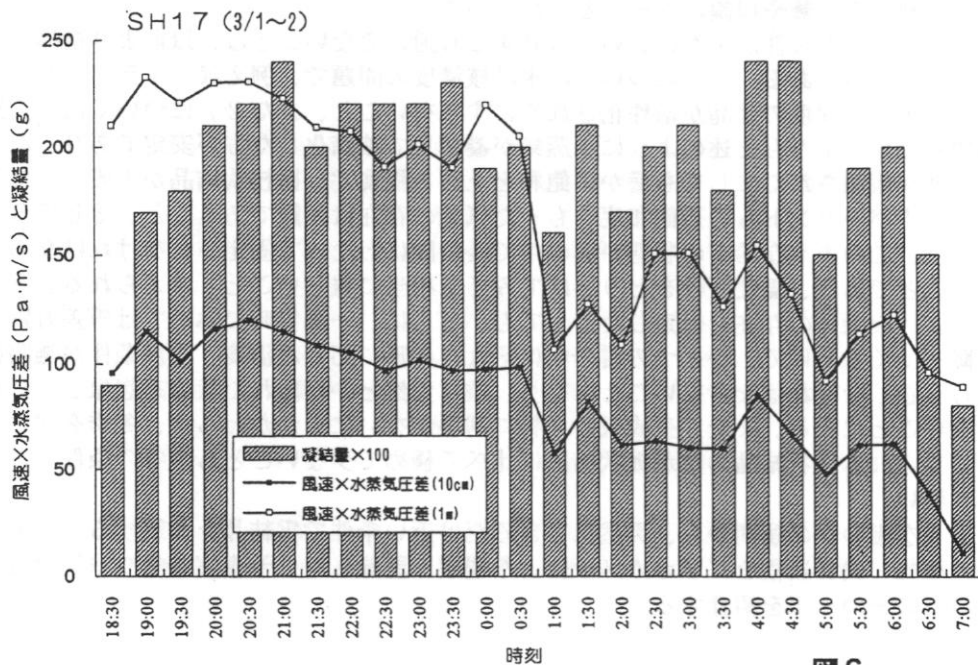


図6

表面霜が数mm～数cmまで発達すると、霜自身が雪面付近の気流を乱す効果や、雪面の表面積が相対的に増加する効果が重要になると考えられる。観測事実として、表面霜は一晚中快晴でも特に夜半過ぎに急激に成長するようであり、輸送係数であるバルク係数も増加傾向にあることが挙げられる（図6参照）が、このことは、表面霜の凝結量が単純に気象要素だけでは決定できず、構造的な因子が絡んでいることを示している。従って、表面霜の凝結には、従来の水蒸気輸送の理論が単純には通用しない。今後は、表面霜の三次元解析から表面霜の表面積を求める室内実験を行ない、表面積という新たなファクターを取り入れて表面霜の形成機構を理解したい。