

学 位 論 文 題 名

Surface hoar growth on snow

(積雪表面霜の形成に関する研究)

学位論文内容の要旨

積雪表面霜は、晴天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。その後の降雪によって積雪中に埋没した表面霜は、低密度で力学的にもろい弱層として保存され、これを滑り面とする表層雪崩の原因となる。また、数種類ある弱層原因の中で、頻度が最も高いことも知られている（Föhn, 1992, Jamieson and Johnston, 1994）。したがって、表面霜の形成条件を知ることは、雪崩警報を実用化するために必要不可欠であるが、冬期の山岳地での野外観測が困難であるため、従来の研究はいずれも定性論的な観察報告にとどまっていた。そこで申請者は、表面霜の形成条件の定量化を目的として、気象観測を主体とする研究を行った。

野外観測は、1993年から1996年にかけての冬期3シーズン、北海道北部の間寒別にある北大低温研の雪崩観測所で行われた。観測所は日本海より約20kmと近いことから、水蒸気の供給量は豊富であり、表面霜は年に数回の頻度で観察される。本研究では、気温・相対湿度・風速・雪面温度・雪温・正味放射量などの気象観測項目に加え、新たにsublimation gauge（50 × 60cm²のアルミ板に雪を載せたもの）を開発し、水蒸気昇華量（すなわち表面霜形成量）の直接測定を行った。

野外観測からは次のようなことが明らかにされた。まず、雪崩観測所において、表面霜の形成は約-3℃から-10℃の範囲内で観測された。そして、熱収支に占める潜熱伝達量の割合は10-20%程度であり、表面霜の形成によって解放される昇華潜熱が熱収支バランスに占める割合はそれほど大きくないことが分かった。一方、表面霜のできやすい条件は、正味放射量の絶対値が大きく、相対湿度が90%以上、風速2-3m s⁻¹の微風環境下、の3つであり、正味放射量の絶対値が小さい、相対湿度が60%以下、無風に近い、のいずれかの条件下では表面霜はできにくいことが分かった。

また、水蒸気昇華速度が風速と水蒸気圧勾配との積と比例関係にあることを確認し、その比例常数であるバルク輸送係数（ 2.4×10^{-3} ）を求めた。このことは、バルク法を用いることによって、気象データから水蒸気昇華速度、すなわち表面霜の形成速度が推定可能であることを意味する。なお、今回求めたバルク輸送係数は、水蒸気の昇華凝結領域において野外観測から初めて得られたものである。

さらに、表面霜が大きく成長するとき、時間と共にバルク輸送係数が増加していく傾向が確認された。バルク輸送係数は、理論的には空気安定度と空気力学的粗度の関数で表わされるが、表面霜形成時の安定度の変化量は小さく、バルク輸送係数の増加傾向の原因ではないことが示された。一方、空気力学的粗度は実際の地表面の幾何学的粗度そのものではないが、一般には両者の間にある程度の対応関係が存在する（Stull, 1988）。そこで、このバルク輸送係数の増加の原因は表面霜の成長による雪面の幾何学的粗度増加であると考え、表面霜結晶の長径を幾何学的粗度の代表値とし、バルク輸送係数の幾何学的粗度依

存性を表わす回帰式 ($(2.0+0.4d) \times 10^{-3}$ 、 d は表面霜長径 [mm]) を求めた。この関係式は、半理論的に導出された、雪面の幾何学的粗度と空気力学的粗度との関係についての報告(竹内・近藤, 1981)とも矛盾しない。このことから、表面霜の成長による幾何学的粗度の増加が、空気力学的粗度の増加を促し、バルク輸送係数を増加させたと考えられる。したがって、表面霜の成長自身が水蒸気の輸送係数を増加させる、正のフィードバックのメカニズムの存在が明らかとなった。

次に、野外観測から求められた輸送係数を用いて雪面熱収支モデルを構築し、昇華速度の風速依存性に関する考察を行った。過去の文献によると、Colbeck (1988)は、無風状態では表面霜はできず、一方で風は顕熱輸送を増加させるので昇華凝結に必要な雪面冷却を妨げる働きも合わせ持っているとして述べており、このことから表面霜の形成に最適な風速が存在することを示唆した。それに対し、Seligman (1936)は高湿度の強風下で表面霜の発達したケースを報告している。双方とも定量的議論に乏しく、特に強風時の表面霜の発達については決着が付いていない。一方、本研究の観測結果では、 4 m s^{-1} 以上でsublimation gaugeによる昇華量測定が困難となるために、風速依存性の全体像は不明のままである。そこで、以下のような雪面熱収支の数値モデルを用いて、表面霜形成時の昇華速度と風速との関係を調べた。

数値モデルは、正味放射量・顕熱・潜熱・伝導熱の4つで構成される雪面の熱収支式を基礎方程式とし、各項はそれぞれ雪面温度の関数として表現される。解析手順としてはまず、与えられた条件(気温・相対湿度・風速)下で熱収支がバランスしたときの、雪面における平衡温度を数値計算する。これを潜熱項に代入すれば昇華速度が求められ、条件として与えた風速との関係を調べることができる。まず初めに、モデルの妥当性検証のために、実際に表面霜が発達した時の気象データを入力して計算した結果、このモデルは実際の雪面温度、および熱収支バランスの絶対値や各フラックスの配分をうまく再現することが確認された。昇華速度の風速依存性に関しては、風速 $0-6 \text{ m s}^{-1}$ の範囲で、相対湿度80%以上であれば昇華速度は風速と共に増加し、それ以下であれば昇華速度を最大にする風速の存在することが、モデルの結果から示された。一方、晴天条件下 (-60 W m^{-2} 以下)の観測データからは、相対湿度90-100%における昇華速度は風速と共に増加傾向にあるのに対し、60-70%では風速が小さいときに昇華凝結、風速約 4 m s^{-1} 以上で昇華蒸発に転じており、このことはモデルの結果を裏付けている。したがって、Colbeck (1988)の見解である最適風速の存在は相対湿度の比較的低い場合に成り立ち、Seligman (1936)の観測報告は相対湿度の高い場合の現象であったと推測され、両者の議論を矛盾なく説明できた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 林 大 二
副 査 教 授 本 堂 武 夫
副 査 教 授 播磨屋 敏 生 (大学院理学研究科)
副 査 助教授 高 橋 英 紀
副 査 助教授 石 川 信 敬

学 位 論 文 題 名

Surface hoar growth on snow

(積雪表面霜の形成に関する研究)

積雪表面霜は、晴天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。その後の降雪によって積雪中に埋没した表面霜は、低密度で力学的にもろい弱層として保存され、これを滑り面とする表層雪崩の原因となる。したがって、表面霜の形成条件を知ることは、雪崩警報を実用化するために必要不可欠であるが、冬期の山岳地での野外観測が困難であるため、従来の研究はいずれも定性論的な観察報告にとどまっていた。そこで申請者は、表面霜の形成条件の定量化を目的として、気象観測を主体とする研究を行った。

野外観測は、1993年から1996年にかけての冬期3シーズン、北海道北部の間寒別にある北大低温研の雪崩観測所で行われた。本研究では、気温・相対湿度・風速・雪面温度・雪温・正味放射量などの気象観測項目に加え、水蒸気昇華量（すなわち表面霜形成量）の直接測定を行った。

野外観測からは次のようなことが明らかにされた。まず、雪崩観測所において、表面霜の形成は約-3℃から-10℃の範囲内で観測された。一方、表面霜のできやすい条件は、正味放射量の絶対値が大きく、相対湿度が90%以上、風速 $2\text{--}3\text{ m s}^{-1}$ の微風環境下、の3つであり、正味放射量の絶対値が小さい、相対湿度が60%以下、無風に近い、のいずれかの条件下では表面霜はできにくいことが分かった。

また、水蒸気昇華速度が風速と水蒸気圧勾配との積と比例関係にあることを確認し、その比例常数であるバルク輸送係数 (2.4×10^{-3}) を求めた。このことは、バルク法を用いることによって、気象データから水蒸気昇華速度、すなわち表面霜の形成速度が推定可能であることを意味する。なお、今回求めたバルク輸送係数は、水蒸気の昇華凝結領域において野外観測から初めて得られたものである。

さらに、表面霜が大きく成長するとき、時間と共にバルク輸送係数が増加していく傾向が確認された。バルク輸送係数は、理論的には空気安定度と空気力学的粗度の関数で表わされるが、表面霜形成時の安定度の変化量は小さく、バルク輸送係数の増加傾向の原因ではないことが示された。一方、空気力学的粗度は実際の地表面の幾何学的粗度のものではないが、一般には両者の間にある程度の対応関係が存在する。そこで、このバルク輸送

係数の増加の原因は表面霜の成長による雪面の幾何学的粗度増加であると考え、表面霜結晶の長径を幾何学的粗度の代表値とし、バルク輸送係数の幾何学的粗度依存性を表わす回帰式を求めた。この関係式は、雪面の幾何学的粗度と空気力学的粗度との関係についての従来の報告とも矛盾しない。このことから、表面霜の成長による幾何学的粗度の増加が、空気力学的粗度の増加を促し、バルク輸送係数を増加させたと考えられる。したがって、表面霜の成長自身が水蒸気の輸送係数を増加させる、正のフィードバックのメカニズムの存在が明らかとなった。

一方、過去の文献によると、Colbeck (1988)は、無風状態では表面霜はできず、一方で風は顕熱輸送を増加させるので昇華凝結に必要な雪面冷却を妨げる働きも合わせ持っているとして述べており、このことから表面霜の形成に最適な風速が存在することを示唆した。それに対し、Seligman (1936)は高湿度の強風下で表面霜の発達したケースを報告している。双方とも定量的議論に乏しく、特に強風時の表面霜の発達については決着が付いていない。そこで、野外観測から求められた輸送係数を用いて、雪面の熱収支式を基礎方程式とした数値モデルを構築し、昇華速度の風速依存性に関する考察を行った。

モデルの計算結果からは、風速 $0-6 \text{ m s}^{-1}$ の範囲で、相対湿度80%以上であれば昇華速度は風速と共に増加し、それ以下であれば昇華速度を最大にする風速の存在することが示された。一方、晴天条件下 (-60 W m^{-2} 以下) の観測データからは、相対湿度90-100%における昇華速度は風速と共に増加傾向にあるのに対し、60-70%では風速が小さいときに昇華凝結、風速約 4 m s^{-1} 以上で昇華蒸発に転じており、このことはモデルの結果を裏付けている。したがって、Colbeck (1988)の見解である最適風速の存在は相対湿度の比較的低い場合に成り立ち、Seligman (1936)の観測報告は相対湿度の高い場合の現象であったと推測され、両者の議論を矛盾なく説明できた。

以上のように、本研究は、長期にわたる野外観測および数値実験によって表面霜の形成条件を定量化し、得られた知見は表面霜を滑り層とする表層雪崩の予知に大きく貢献することが期待される。

よって審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ、申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。