

学 位 論 文 題 名

Studies on Sun Crust

(サン・クラストの研究)

学位論文内容の要旨

融雪に伴って積雪層内に氷板が形成される事例は多々あるが、積雪の表面に氷板が形成されることは希で、このような雪質はクラストと呼ばれる。サン・クラストは薄く硬い氷の層であり、鏡のように日光を反射し美しく輝くために古くからその存在が知られていた。しかし希にしか形成されない雪面形態のために、定量的な観測が困難であった。本研究は、サン・クラストの構造、形成機構、維持機構を明らかにすることを目的に、長期野外観測および低温風洞室における再現実験を行った。

野外観測は、1991年から1995年の5冬期にわたって、北海道内の札幌、母子里、間寒別およびスピッツベルゲン島Ny-Ålesundで行われた。その結果、29回サン・クラストの形成を観測することができた。この観測によりサン・クラストの構造が明らかになった。すなわち、サン・クラストは雪粒子が連結してできた厚さ1から2 mmの氷板であり、サン・クラストの直下では内部融解によって、部分的に深さ1 cm程度の空洞が観測された。表層の積雪は密度の大きなざらめ雪を経てサン・クラストへと変態した。サン・クラストが形成されるとき、積雪表面は長波放射と蒸発によって冷却されており、長波放射収支と顕熱、潜熱のフラックスの和は常に負の値 ($-10 \sim -123 \text{ W/m}^2$) であった。また、サン・クラスト形成時には 200 W/m^2 を超える短波放射量が積雪に吸収されていた。

次に観測より得た熱収支条件に着目し、形成機構を単純化することによって低温風洞室内において再現実験を行った。輝度温度 5500°K のランプを用いて日射を再現し、顕熱と蒸発の潜熱によって雪面を冷却した。短波放射、顕熱輸送、蒸発量を変えて26回の実験を行った結果、8回サン・クラストを再現することに成功した。室内実験で形成されたサン・クラストは厚さ1 mm程の氷の板で、その下には内部融解によって空洞が形成された。この構造は野外で観測されたものと同様であった。サン・クラストが形成された実験について熱フラックスを求め、野外観測で得られたデータと比較を行った。その結果、積雪に吸収された短波放射量と雪面の冷却量は室内実験も野外観測と同様の値を示した。

積雪表層の密度はサン・クラストの形成にともない2倍ほどに増加することが観測された。そこでクラスト層への水の輸送が液相、気相のどちらでおこなわれるか、またどのような経

路で供給されるかについて、酸素安定同位体比を用いて解析を行った。水は2つの経路によって積雪表層へ供給されると考えられた。第1は水蒸気勾配によって内部融解層から蒸発しクラスト層で凝結する経路である。この場合、 H_2^{18}O は H_2^{16}O に比べ水蒸気圧が1%程度低いため、蒸発における分別によってクラスト層の $\delta^{18}\text{O}$ は下層より小さくなると考えられる。第2は融解水が毛管力によってクラスト層まで上昇し、再凍結する経路である。この場合、ぬれ雪の粗大化にともない氷の $\delta^{18}\text{O}$ は水よりも大きくなるので、クラスト層の $\delta^{18}\text{O}$ は下層より大きくなると考えられる。同位体解析により、サン・クラストの $\delta^{18}\text{O}$ は下層よりも大きくなるという結果が得られたので、融解水の毛管上昇がクラスト層への主な水の輸送経路であることがわかった。

次に積雪表層に注目してサン・クラストが形成される熱収支条件を求めた結果、雪面を冷却する熱フラックスは積雪表層数mmが吸収する日射量とほぼ同じであった。このことから、クラスト層が融解せず、積雪表面まで融解水がしみ上がる深さで内部融解層が形成される熱収支条件であったと考えられる。そこで日射の吸収を考慮した熱伝導方程式より、定常状態における内部融解層の上面の高さを吸収日射量と雪面冷却量の関数として求めた。観測されるサン・クラスト厚さは1 mm程度あることと、積雪表層の含水率より15 mm程度の融解水のしみ上りが期待されることから、内部融解層の上面が雪面下1から15 mmの間に位置する熱収支条件のときにサン・クラストが形成すると考えられる。これを実際にサン・クラストが形成したときの吸収日射量と雪面冷却量の値と比較した結果、たいへん良い一致が見られた。

さらにサン・クラストが熱収支的に安定に存在できるかについて考察を行った。多重散乱を考慮してクラスト層の日射の吸収、散乱を求めた結果、クラストが形成することによって積雪表層はより冷えやすくなることがわかった。したがって雪面の冷却が持続するならサン・クラストは安定して存在することができる。

最後に以上の結果よりサン・クラストの形成・維持モデルが示された。すなわち、雪面が長波放射や蒸発によって冷却され、強い日射が積雪内部で吸収される条件が続くと内部融解が起こる。この融解水が毛管上昇によって積雪表層に供給され再凍結することによってサン・クラストの氷板が形成される。またクラストの下には内部融解によって空洞が形成される。サン・クラストの形成にともなって雪面は冷えやすくなり、クラスト層が凍結し維持されやすくなる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 秋田谷 英 次

副 査 教 授 菊 地 勝 弘

副 査 助教授 成 瀬 廉 二

副 査 助教授 石 川 信 敬 (大学院地球環境科学研究科)

学 位 論 文 題 名

Studies on Sun Crust

(サン・クラストの研究)

サン・クラストは積雪表面に希に形成される薄い板状の水であるが、その形態が極めて特徴的であるため、その存在は古くから知られていた。しかし、サン・クラストは日中の晴天下で希に、しかも短時間で形成されるため、その形成の全過程を観察した例はこれまで皆無であった。

5冬期にわたり北海道の山岳域を重点的に、さらに北極圏でもその形成の全過程を観察するため、積雪表面の熱収支と積雪構造の観測をしながらサン・クラスト形成の機会を待ち続けた。その結果、数例のサン・クラスト形成の観測に成功し、形成時の熱収支と積雪条件を明らかにした。さらに、天然のサン・クラスト形成条件が解明されたので、室内実験で再現する事を試みた。すなわち、低温風洞で人工照明、気温、風速を制御し表面熱収支が天然と同じ値に達した時に、天然と同じ構造のサン・クラストが人工的に再現できることを確認した。サンクラストは積雪表面の粒状の雪粒子が薄い板状の水に数時間で変化したもので、その際の物質移動がどのような経路と状態で行われるかが未解明であった。物質移動を伴う形成モデルを構築するため、氷の酸素同位体比に注目し、クラストの発達に伴いクラスト本体の水と、その下方の積雪を採取し同位体比の変化を調べた。

以上の結果を要約すると、快晴時に強い日射で積雪内部が融解する。一方、表面は長波放射と顕熱輸送で熱が奪われ冷却される。内部の融解水は積雪粒子間の毛管力で表面へとしみ上がりそこで凍結する。この現象は観察と氷が融解・再凍結過程で酸素同位体が分別されたことから証明された。表面の粒状構造は蒸発により次第に平滑化し、やがて薄い透明な板状の水のみが残される。一旦クラストが形成し始めると、冷却されつつある透明な表面の板状氷は短波長には透明であるため、その直下の雪粒子の融解はさらに加速し、ついに氷の下部には空洞が形成され、サン・クラストへと発達する。サン・クラストの形成には積雪構造と日射、長波放射、顕熱・潜熱輸送の気象条件が微妙にバランスし、その状態が2～4時間継続しなければならない。これら全ての条件が満たされることは希で、北海道では一冬に2、3回程度である。

以上のように筆者は、サンクラスト形成の全過程を観測し、積雪条件と表面熱収支を明らかにし、さらに物質移動を伴う形成モデルを構築した。これらの新知見は雪氷学に対して貢献するところ大であり、これらの知見は雪崩発生予知に必要な積雪内部の弱層形成機構に多くの有益な示唆を与えるものである。

よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格があるものと認める。