HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	サン・クラストの形成機構 : その 1
Author(s)	尾関, 俊浩; 秋田谷, 英次
Citation	低温科学. 物理篇, 51, 13-21
Issue Date	1993-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18609
Type	bulletin (article)
File Information	51_p13-21.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Toshihiro OZEKI and Eizi AKITAYA, 1992, An investigation of sun crust formation using field data and laboratory experiments I, *Low Temperature Science, Ser. A, 51.*

サン・クラストの形成機構* －その1－

尾 関 俊 浩
(北海道大学大学院理学研究科)
秋田谷 英 次
(低温科学研究所雪害科学部門)

(平成4年11月受理)

Abstract : The mechanism of sun crust formation is investigated through field observations as well as laboratory experiments. The structure of the sun crust is observed through field observations. The sun crust is a thin ice layer made up of ice particles. With the formation of the sun crust, the local temperature beneath it rose and internal melting occurred. This led to the formation of cavities under the sun crust. The energy balance calculation of the sun crust revealed that the shortwave radiation absorbed is balanced with the total of net longwave radiative flux, latent heat flux, and sensible heat flux. Further down the snow pack, shortwave radiation which had penetrated through the surface layer was absorbed and internal melting occurred. Field observations are verified by laboratory experiment using various snow types. A sun crust was formed from both compact snow and granular snow. However, when the snow surface became rough due to quick melting, a sun crust was not formed even under suitable energy balance conditions for sun crust formation.

要旨：サン・クラストの形成機構を明らかにすることを目的に，観測と実験を行なった。野外観測により，サン・クラストの構造が明らかになった。すなわち，サン・クラストは積雪表面の雪粒子が連結してできた氷板であり，その直下では内部融解が進んで，部分的に空洞が形成された。積雪表面での熱収支を算定した結果，サン・クラストが形成されるとき，長波放射収支量，顕熱輸送量，潜熱輸送量の総和は積雪表面を冷却する方向であり，その大きさは積雪のごく表層で吸収される日射量とほぼ等しかった。しかし，より深い位置では積雪は吸収日射によって内部融解する条件にあった。野外観測で得られた形成条件を確かめるために，様々な雪質を用いて室内実験を行なった。その結果，サン・クラストは，しまり雪からも，ざらめ雪からも形成された。しかし，急激な融解で雪面の形状が凹凸になると，その後に熱収支の条件が満たされてもサン・クラストは形成されなかった。

* 北海道大学低温科学研究所業績　第3623号

key words : sun crust, thin ice layer, cavity, cooling, internal melting

キーワード：サン・クラスト，薄い氷板，空洞，雪面冷却，内部融解

I．はじめに

積雪表面は，気温，湿度，日射，長波放射，降雪などの影響をたえず受けている。その結果，表層の新雪はさまざまな雪質を経て，ざらめ雪へと変化する。その過程で，サン・クラストと呼ばれる光沢のある薄い氷板が雪面に形成されることがある。クラストとは積雪表面のうすい層がその下の層よりも硬く，密になったものである。サン・クラストは強い日射のもとで短時間のうちに形成されるが，このような急激な変化は積雪の変態としては稀である。

サン・クラストは形成後，雪に埋没しても表面がなめらかなので，周囲の雪粒との接触点が少なく，焼結が進みづらいと考えられる。その場合，サン・クラストは雪崩のすべり面としてふるまう可能性がある。また，顕著な弱層であるしもざらめ雪がサン・クラストの下に急速成長することがある。積雪表面直下でしもざらめ雪が急速成長する現象は，秋田谷ら[1]によって観測がなされている。福沢・秋田谷[2]は，この急速成長が1℃/cmを越える温度勾配のもとで起こることを示した。サン・クラストが形成されるとき，その直下は融解しているので，夜間，放射冷却によって表面の氷板が冷やされても，その下の層は潜熱の放出によって温度が下がりづらい。これは大きな温度勾配ができやすい状態なので，サン・クラストはその構造自体がしもざらめ雪の急速成長に都合が良く，斜面積雪の安定度にも影響する。しかし，その形成条件や構造は明らかにされていない。

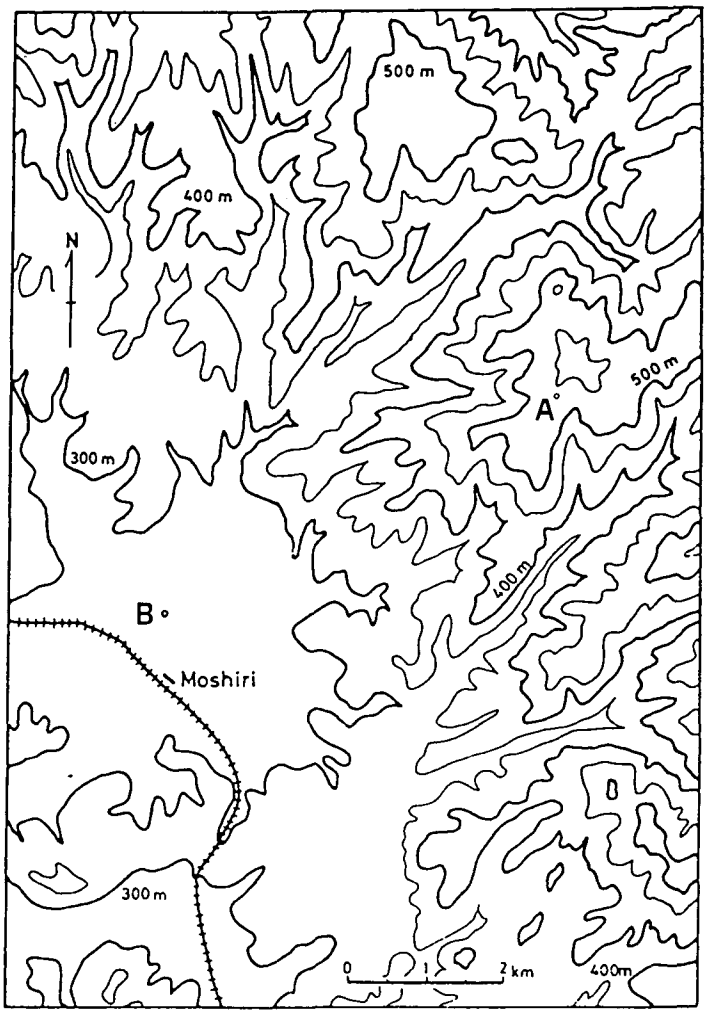
本論文では，1991年の冬期におこなった野外観測のデータと，低温室でサン・クラストを再現した室内実験の結果から，サン・クラストの構造およびサン・クラストが形成される条件を求める。

II．観　　測

1．観測方法

観測は1990－1991年の冬期に，北大雨龍地方演習林のある母子里の融雪観測室周辺でおこなわれた。観測場所を図1に示す。融雪観測室周辺の地形は，周囲を標高差250 mの山で囲まれた盆地になっており，観測は盆地底部の融雪観測露場と，雨龍地方演習林の山頂部（以下山頂局）でおこなわれた。山頂局は尾根上にあり平坦になっている。

サン・クラスト形成時の雪面での熱収支を知るために，両地点で気象観測がおこなわれた。融雪観測露場ではフンク型放射収支計により全波長放射収支を，ネオ日射計で下向き短波放射および上向き短波放射，測温抵抗体で乾球温度および湿球温度，アネロイド自記気圧計で気圧，超音波風速計で風速を測定し，1時間毎にその平均値をデータロガーで記録した。一方，山頂



第1図　母子里の観測地点の配置図
A：山頂局　B：融雪観測露場

局ではフンク型放射収支計により全波長放射収支量を，測温抵抗体で気温，静電容量式湿度計で湿度，3杯型風速計で風速を測定し，30分毎にその平均値をデータロガーで記録した。両地点において，バルク法を用いて，次式により顕熱輸送量（S）と潜熱輸送量（E）を求めた。

$$S=K_a\cdot(T_1-T_0)\cdot W_s \qquad (\mathrm{kW/m^2}) \qquad (1)$$

$$E=680\cdot K_e\cdot(e_1-e_0)\cdot W_s \qquad (\mathrm{kW/m^2}) \qquad (2)$$

ここで，W_sは積雪表面から1mの高さの水平風速，Tは気温，eは水蒸気圧を，添字の1，0はそれぞれ積雪表面から1mの高さと積雪表面を表わす。また，K_a，K_eはそれぞれ顕熱，潜熱

のバルク係数である。母子里でのバルク係数は，石川ら[3]による観測値，

$K_a=0.26$ (ly/hr・(m/s)・℃) (3)

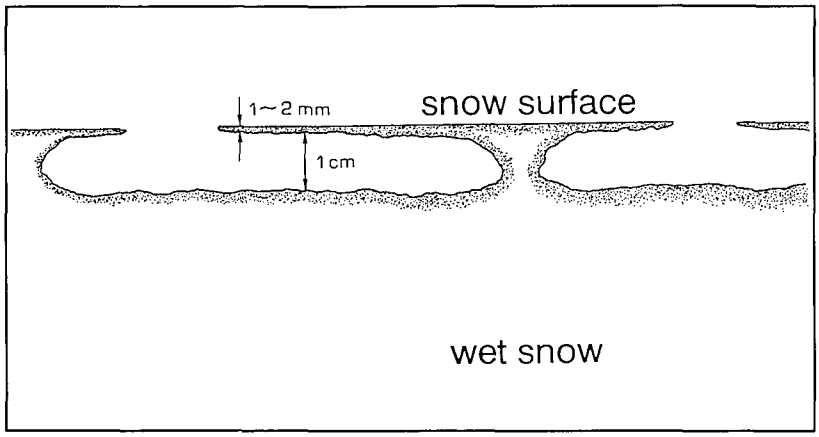
$K_e=0.69\cdot10^{-3}$ (ly/hr・(m/s)・mb) (4)

が与えられている。また，このデータを用いて融雪観測露場前でのアルベドや長波放射収支量を求めることが可能である。

2．観測結果

4月19日11：30～13：00の間に母子里の山頂局周辺でサン・クラストの形成が確認された。11：30に使用したスノー・モービルのトレース上にもサン・クラストが形成されていたことからも上の形成時間は間違いがない。当日の天気は晴れであり，気温は0℃付近，風速は4～5 m/s，湿度は小さかった。なお，サン・クラスト形成前の雪質はざらめ雪であり，表層3 cmの密度は441 kg/m³，含水率は4.9%であった。

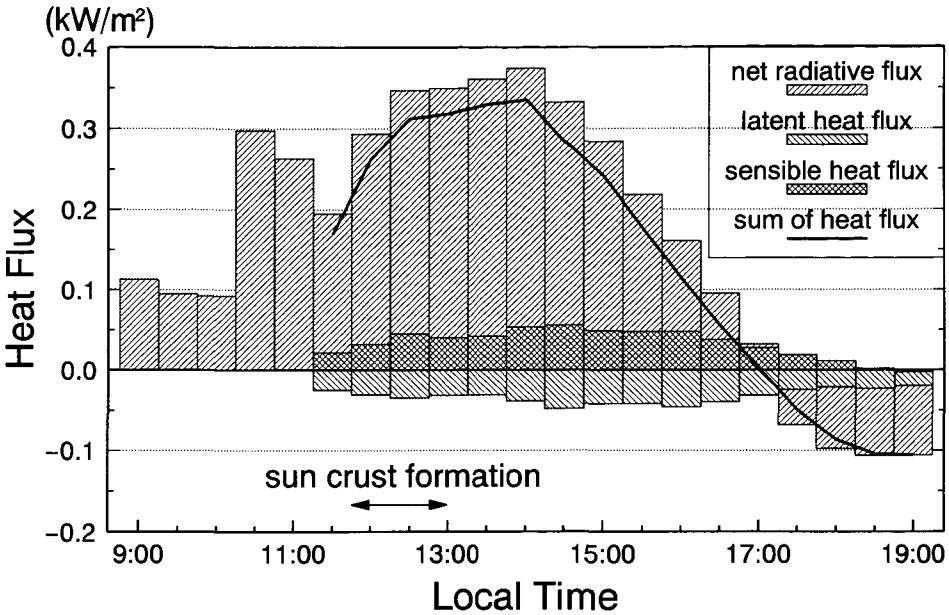
サン・クラストの断面構造の模式図を図2に示す。サン・クラストは1 mmから2 mmの厚さをもつ薄い氷の板からなっており，その下には深さ1 cm程の空洞ができていた。クラストの



第2図 サン・クラストの構造の概念図

下面には水滴を見ることができたので，この空洞は内部融解によってできたと考えてよい。

次にサン・クラスト形成時の表層の熱収支を考える。積雪表面から1～2 mm下で温度が融点に達していることから，積雪表面における温度（T_0）と水蒸気圧（e_0）は$T_0=0$（℃），$e_0=6.11$(mb)（0℃の飽和水蒸気圧）と置いて，顕熱，潜熱を(1)式，(2)式より求めた。第3図に4月19日9～19時の放射収支量，顕熱輸送量，および潜熱輸送量の30分毎の変動を示す。実線は3成分の総和量を表わしている。縦軸は熱量であり，積雪が受けとる熱を正にとってある。なお，9～11時の顕熱，潜熱は風速データが欠測のため求められなかった。また，サン・クラストの形成期間を矢印で示す。日中，積雪表面の温度は0℃付近であるが，気温が0℃以上な



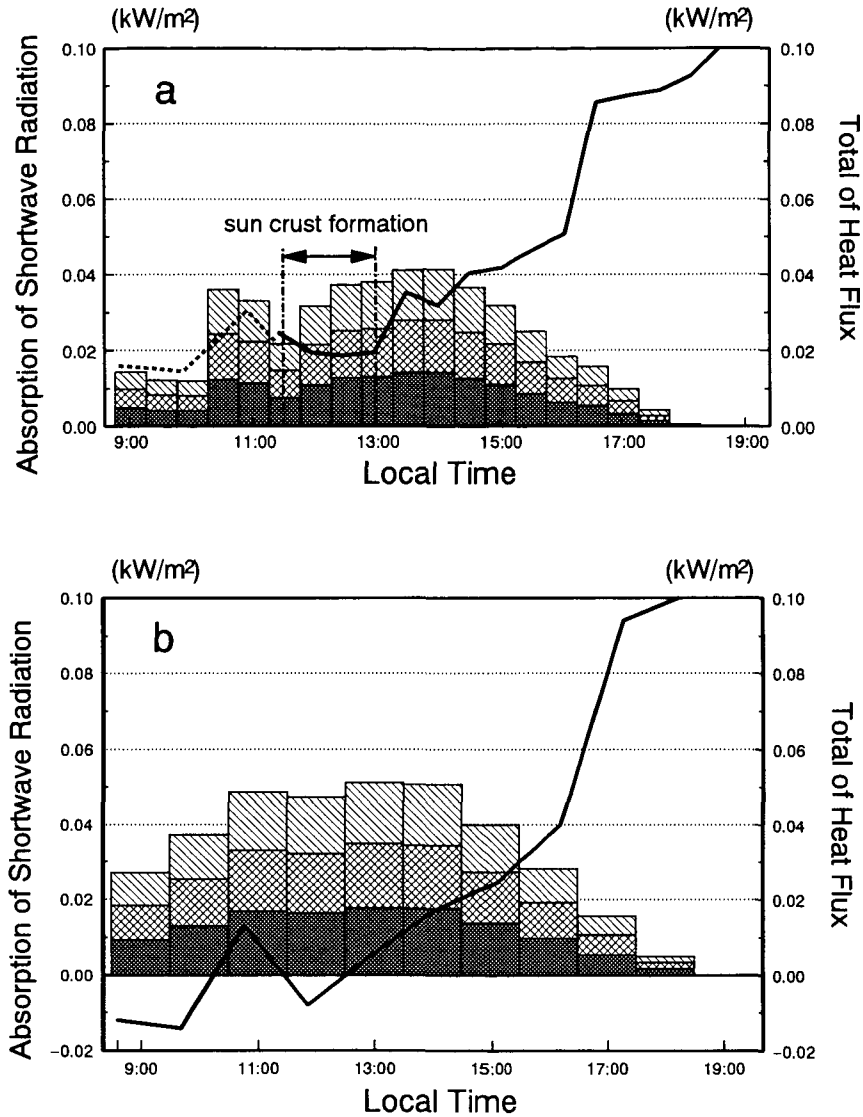
第3図　山頂局での全層の熱収支

ので，大気側から積雪に顕熱が伝達された。一方，大気側の湿度は積雪表面よりも低いので，蒸発が生じ雪面から潜熱が奪われた。このように両者は逆方向に熱を伝達し，その大きさがほぼ等しいので，この2つの熱フラックスは相殺していることがわかる。

サン・クラストとその下方の空洞は積雪表面から2 cm程度の表層に形成されているので，積雪表層で吸収した熱量と，積雪表面から大気へ失われる熱量の比較をおこなう。積雪表面が失う熱流量は，長波放射収支量と顕熱輸送量，潜熱輸送量の和で表される。積雪は長波長領域に対して黒体と見なせるので，長波放射は積雪表面でやり取りをしていると考える。なお，山頂局では長波放射収支量を測定していないので，平地で求めた長波放射収支量の値より山頂局での長波放射収支量の値を見積った。積雪による日射の吸収は，日射が深さとともに指数関数的に減少するとして求めた。減衰係数は深見・小島の実験[4]結果より$-0.4\ \mathrm{cm}^{-1}$を用いた。

第4図aによると，クラストが形成された期間の前後では，雪面から大気へ失われる熱量は積雪が表面下3 mmまでの層で吸収した熱量と同程度であった。一方，クラストが形成された期間中は，放熱量は積雪がより浅い層（0～2 mm）で吸収した熱量とつりあうほどに小さくなっていた。これは，クラストが形成された期間中は，積雪表面から2 mm以上深い部分では日射の吸収のみが進んだことを示唆している。この結果，積雪表面から2 mm以上深い領域では内部昇温がおこり，ついには内部融解によって空洞を形成したと考えてよい。

4月19日に山頂局でサン・クラストが観測されたが，融雪観測露場ではサン・クラストは形成されなかった。第4図bより，融雪観測露場では潜熱輸送量がほぼ0 kW/m²となっていたことがわかる。この結果，山頂局でサン・クラストが形成された期間には露場では日射の吸収のみならず，大気からも雪面へ熱が与えられて，積雪は表面から融解してしまったので，サン・



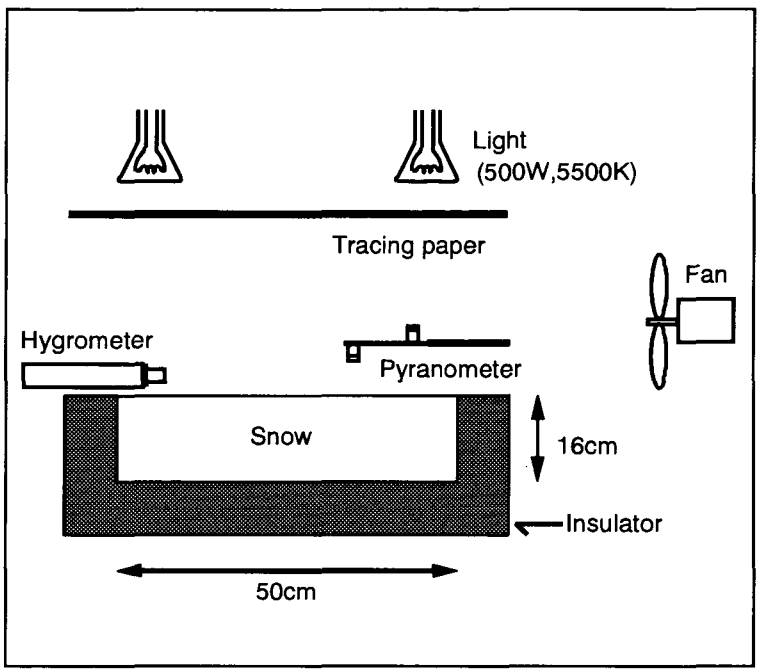
第4図 積雪表層の熱収支
a：山頂局　b：融雪観測露場
各積雪層の吸収熱量は ▩ 0～1 mm, ▨ 1～2 mm, ▧ 2～3 mm, で示され，雪面から失われる熱量は　長波放射・顕熱・潜熱の総和，長波放射，で示される

クラストができなかったことになる。

III. 実　　験

1．実験装置および実験条件

観測から求めたサン・クラストの熱収支的条件を確かめることと，サン・クラストの形成に必要な雪質を求めることを目的に，低温室で実験をおこなった。実験装置を第5図に示す。試料の雪は，表面が約45×50 cm，深さが約16 cmで，側面および下面からの熱の移流がないよ



第5図　実験装置

うに，上面以外は断熱ボックスで覆われている。日射を再現するために，100 V，500 W，輝度温度5500 Kの写真用光源ランプ(フォトリフレクタランプ，デイライトカラー用) 2個を用い，トレーシング・フィルムを使って散乱光が雪面にあたるようにした。また，顕熱と潜熱を与えるために小型送風機によって雪面上に風を送った。風は，小型の風洞 (高さ30 cm，幅58 cm，長さ72 cm)の中を流れる。長波放射による冷却を実験室で再現するのは困難なので，顕熱輸送と潜熱輸送によって雪面を冷却した。実験中の低温室の気温は，ランプによる発熱で変動するが，－5℃付近であった。下向き，上向き短波放射の測定はフォトセル型日射計(KOITO，IKS-35)を用いた。水蒸気圧を計るために静電容量式の湿度計(ロトロニック，MP-100 TST-020)を雪面から2 cmの高さに設置し，送風機から送られる空気の温度を銅・コンスタンタンの熱電対で測定した。

2．　実験結果

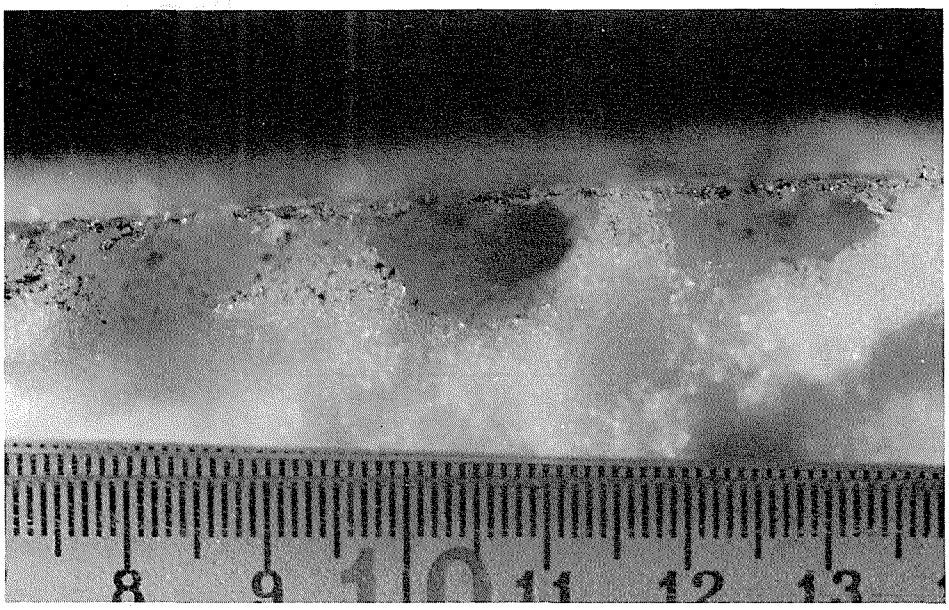
実験は条件を変えて11回行った（第1表)。なお，用いた試料の密度は実験1～実験8が

400～430 kg/m³，実験 9 ～実験 11 が 350～370 kg/m³であった。実験 3 以降は内部融解を促進する目的で，試料の表面や数㎜内部の約半面に融雪剤を散布した。融雪剤にはコピー用トナーを用いた。

11 回の実験で，4 回サン・クラストを作ることに成功した（実験 6，9，10，11）。実験で再現されたサン・クラストも野外で観測されたものと同様に雪粒子が連結してできた氷板であった。第 6 図は実験で再現したサン・クラストの断面を撮影した写真である。実験室で形成されたサン・クラストは実際に観測されたもの（第 2 図）と同じ断面構造をもっていることから，サン・クラストをよく再現している。写真の撮影にコントラストが必要なため，同図には融雪剤を散布した部分を示したが，融雪剤を散布しなかった部分でもサン・クラストは形成された。ただし，融雪剤を散布した部分は内部融解が促進されてサン・クラストの形成が早く，サン・クラストの下の空洞も大きく成長した。一方，融雪剤を散布していない部分はサン・クラストができるまでに時間がかかり，空洞も小さかった。

第 1 表　実験試料の特徴

RUN	雪　質	融雪剤	結　果
1	ざらめ雪	－	表面凹凸
2	ざらめ雪	－	表面凹凸
3	ざらめ雪	表面（部分的）	表面凹凸
4	ざらめ雪	表面（全　面）	表面凹凸
5	ざらめ雪	表面（全　面）	表面凹凸
6	しまり雪	内部（部分的）	サン・クラスト
7	ざらめ雪	表面（部分的）	表面凹凸
8	ざらめ雪	表面（部分的）	表面凹凸
9	ざらめ雪	表面（部分的）	サン・クラスト
10	ざらめ雪	内部（部分的）	サン・クラスト
11	しまり雪	内部（部分的）	サン・クラスト



第 6 図　室内実験で再現したサン・クラスト

また，この実験からサン・クラストは水の関与した変態であることが明らかになった。すなわち，第6図に示したサン・クラストは実験11でしまり雪から作ったものであるが，雪粒子はざらめ雪に変態していた。さらに，サン・クラストが形成される過程で，クラスト下面から水滴が滴るのが観測されたこともそれを示す。

サン・クラストができなかった実験ではいずれも表面に融解による凹凸が発達した。雪面に凹凸が発達すると，雪粒子は水平方向に連結した面を作れないので，サン・クラストが形成されない。のみならず，観察によると，雪面にできた凹部は凸部によって風が弱まり，さらに融解する傾向にあるので，一度雪面での融解を経て凹凸のできた試料はサン・クラストにならなかった。

IV. ま と め

1991年の冬期におこなった野外観測と，低温室でサン・クラストを再現した室内実験の結果から，サン・クラストの構造およびサン・クラストが形成される条件が明らかになった。

野外観測により，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氷板であり，サンクラストの直下では内部融解が進んで，部分的に空洞が形成された。

積雪表層での熱収支を算定した結果，サン・クラストが形成されるとき，長波放射収支量，顕熱輸送量，潜熱輸送量の総和は積雪表面を冷却する方向にあり，その大きさは積雪のごく表層で吸収される日射量とほぼ等しかった。しかし，より深い位置では積雪は吸収日射によって内部融解する条件にあった。

野外観測で得られた形成条件を確かめるために，様々な雪質を用いて室内実験を行なった。その結果，サン・クラストは，しまり雪からも，ざらめ雪からも形成された。また，サン・クラストは融雪剤の有無に関係なく形成された。しかし，急激な融解で雪面の形状が凹凸になると，その後に熱収支の条件が満たされてもサン・クラストは形成されなかった。

終わりに，この研究を進めるにあたり，低温科学研究所成瀬廉二助教授，石川信敬助教授には貴重な御助言を，同研究所白岩孝行助手，福沢卓也助手には観測および実験に有益な御助言，御協力を受けた。また，低温科学研究所融雪科学部門には貴重なデータの提供を受け，北大演習林の方々には観測にご協力いただいた。ここに記して深く感謝の意を示す。なお，研究費の一部は文部省雪崩事業費から支出された。

文　献

1）秋田谷英次・清水　弘　1987　積雪内の弱層形成に関する観察事例．低温科学，物理篇 **46**，67－75.
2）福沢卓也・秋田谷英次　1991　しもざらめ雪層の急速形成過程の観測．低温科学，物理篇 **50**，1－7.
3）石川信敬・小林俊一・小島賢治　1982　融雪期の顕熱フラックスⅠ―バルク法と渦相関法の比較―．低温科学，物理篇 **41**，109－116.
4）深見浩司・小島賢治　1980　積雪内部における日射の減衰．低温科学，物理篇 **39**，119－126.