



| | |
|------------------|---|
| Title | サン・クラストの形成機構：その2 |
| Author(s) | 尾関, 俊浩; 秋田谷, 英次 |
| Citation | 低温科学. 物理篇, 53, 1-10 |
| Issue Date | 1995-02-15 |
| Doc URL | http://hdl.handle.net/2115/18633 |
| Type | bulletin (article) |
| File Information | 53_p1-10.pdf |



[Instructions for use](#)

サン・クラストの形成機構* —その2—

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)

(平成6年10月受理)

Abstract: The mechanism of sun crust formation was investigated through field observations. During the observations, sun crust formed 9 times. The weather conditions during sun crust formation were fine weather, air temperature nearly 0 °C, wind speed about 1 to 5 m/s, humidity about 30 to 60 % at a height of 1 m. In 8 of the 9 times of sun crust formation, the surface snow type before the formation was granular snow. In only one case did the sun crust form after new snow had metamorphosed into granular snow. The sun crust is a thin ice layer made of ice particles and cavities form under it. The energy balance condition for sun crust formation was revealed from the energy balance calculation of the surface layer. Longwave radiative flux and latent heat flux cooled the snow surface. Beneath the surface, shortwave radiation penetrated through the surface layer, was absorbed and internal melting occurred. This led to the formation of cavities under the sun crust.

要旨: サン・クラストが形成される熱収支領域及び雪質条件を明らかにすることを目的に、4融雪期にわたって野外観測を行なった。観測期間に9回15例のサン・クラスト形成を観測した。サン・クラストは1 mm程度の薄い氷板であり、その下には深さ1 cm程の空洞が形成された。サン・クラスト形成時には200から450 W/m²の短波放射フラックスが積雪に吸収されていた。また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(0~-140 W/m²)であった。これはサン・クラストが維持され、その下で内部融解が起こるのに適した熱収支条件であった。サン・クラストは平均4.2×10²kg/m³のざらめ雪が変態して形成された。さらに表層の雪はサン・クラストを形成する過程で大きな密度のざらめ雪を経なければならなかった。

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

キーワード: サン・クラスト, 空洞, 放射冷却, 内部融解, 氷板

* 北海道大学低温科学研究所業績 第3754号

I. 緒 言

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。クラストはサン・クラスト (sun crust), レイン・クラスト (rain crust), ウインド・クラスト (wind crust), 融解凍結クラスト (melt-freeze crust)¹⁾ の4つに分類されるがいずれも形成機構が解明されていない。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。しかし北海道では1年に2, 3度しか形成されない雪面形態のために、観測が困難であった。

尾関・秋田谷²⁾は1990-1991冬期にサン・クラストの形成を観測し、室内実験によって再現することによって、サン・クラストの構造および形成機構の概略を示した。しかし野外で観測されたサン・クラストは1例であり、その形成される気象条件を確定するに至らなかった。本論文では1991年から1994年の4融雪期にわたって野外観測をおこなうことにより、サン・クラストが形成される気象領域及び雪質条件を明らかにした。

II. 観 測

1. 観測方法

観測は1991年から1994年の4融雪期にわたって、北海道大学雨龍地方演習林のある幌加内町母子里の融雪観測室周辺でおこなわれた。観測場所を第1図に示す。母子里は朱鞠内湖に隣接し、周囲を標高差250mの山で囲まれた盆地になっている。1991年から1993年の観測は盆地底部の融雪観測露場(第1図A)と、雨龍地方演習林の山頂部(以下山頂局:第1図B)においておこなわれ、1994年の観測ではさらに山頂局から南に伸びる尾根上に観測局(以下見晴局:第1図C)を増設した。3観測地点とも表面地形は平坦である。

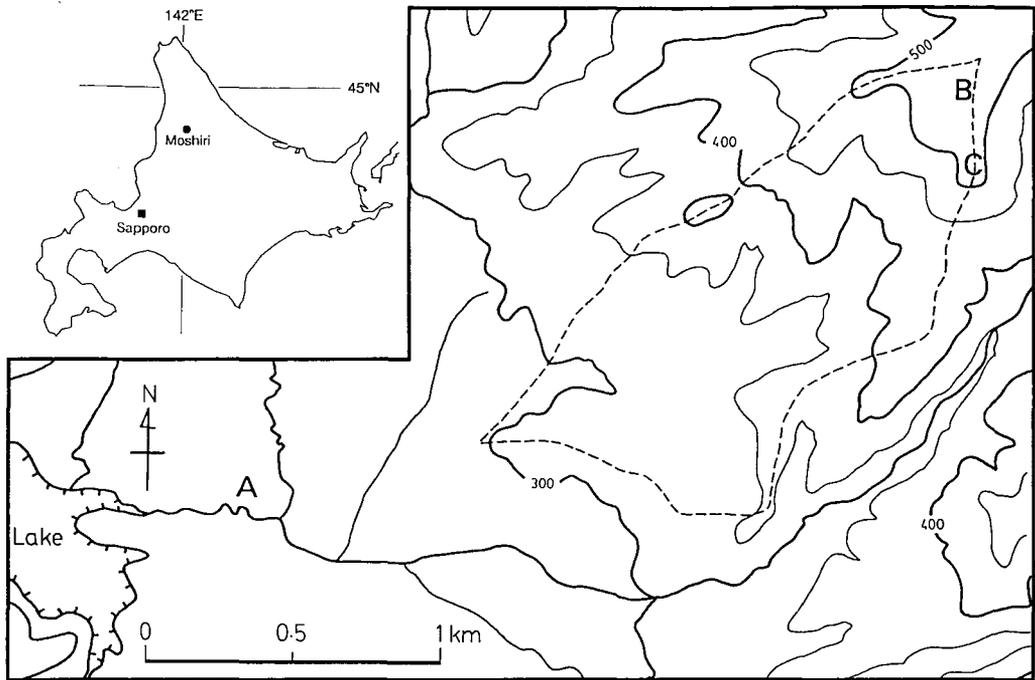
サン・クラスト形成時の熱収支条件を得るために、各観測地点において気象観測を行なった。各観測地点で測定した気象要素と気象測器を第1表に示す。これら連続観測項目に加えて09hと17hに融雪観測露場において、またサン・クラストの形成に合わせて各観測地点において積雪表層の密度と含水率を測定した。密度測定には密度サンプラーを、含水率測定には秋田谷式含水率計³⁾を用いた。

2. 各熱フラックスの推定

各観測地点においてバルク法⁴⁾を用いて顕熱フラックスと潜熱フラックスを求めた。雪面からの高さ1mでの気温を T_1 、風速を V_1 、雪面温度を T_0 、空気の密度を ρ_a 、定圧比熱を C_p とすると顕熱フラックス Q_H は、

$$Q_H = \rho_a C_p h V_1 (T_1 - T_0) \quad (1)$$

で与えられる。 h は無次元のバルク係数で、融雪期の雪面における観測値⁵⁾ $h = 2.3 \times 10^{-3}$ を用い



第1図 サン・クラスト観測地点（北大雨龍地方演習林母子里）

第1表 観測項目と観測方法

| | |
|------------------|----------|
| A) 母子里 | |
| 全波長放射収支 | 放射収支計 |
| 下向き短波放射及び上向き短波放射 | 全天日射計 |
| 乾球温度および湿球温度 | 測温抵抗体 |
| 雪面温度 | 放射温度計 |
| 気圧 | 円筒振動式気圧計 |
| 風速 | 3杯風速計 |
| B) 山頂局 | |
| 全波長放射収支 | 放射収支計 |
| 下向き短波放射及び上向き短波放射 | 全天日射計 |
| 気温 | 測温抵抗体 |
| 雪面温度 | 放射温度計 |
| 湿度 | 静電容量式湿度計 |
| 風速 | 3杯風速計 |
| C) 見晴局 | |
| 気温 | 測温抵抗体 |
| 湿度 | 静電容量式湿度計 |
| 風速 | 3杯風速計 |

た。顕熱と水蒸気について伝達と拡散の機構が同じとすると、同じバルク係数の値をとるので、蒸発・凝結の潜熱フラックス Q_E は、

$$Q_E = L\rho_a h V_1 (q_1 - q_0) \quad (2)$$

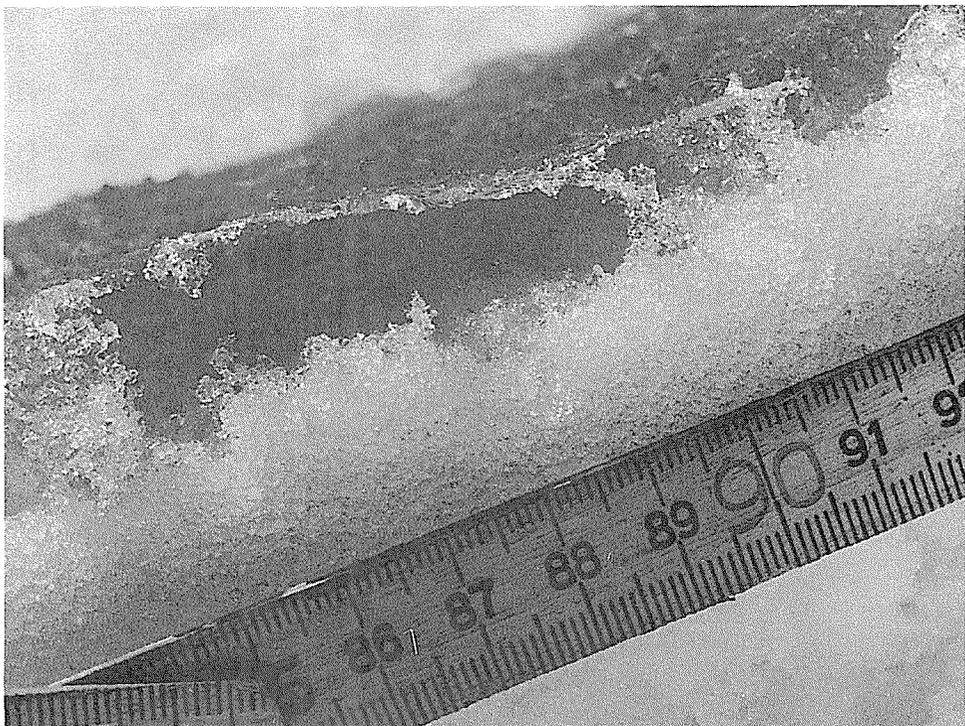
であらわされる。ここで q_1 と q_0 は雪面からの高さ 1 m および雪面での比湿、 L は蒸発の潜熱である。

見晴局では短波放射を連続測定していないが、アルベドメータによる随時測定を行なった結果山頂局にほぼ等しいので、山頂局の値を用いることとする。また見晴局の雪面温度も山頂局のものを代用したが、山頂局における観測期間の日中の雪面温度はおおむね 0°C であった。

3. 観測結果

4 融雪期の観測期間に 9 回 15 例のサン・クラスト形成が観測された。サン・クラスト形成の有無、発達・衰退の過程は各観測地点によって異なっていた。形成されたサン・クラストの構造を第 2 図に示す。サン・クラストは 1 mm から 2 mm の厚さの薄い氷板で、その下には空洞が形成された。氷板が水平方向へ成長するとともにその厚さは 1 mm よりも薄くなり、深さ 1 cm を越える空洞がしばしば観測された。なお氷板の下面には水滴が見られた。

サン・クラストは 15 例中 14 例までがざらめ雪に形成した。他の 1 例はざらめ雪の上に 5 mm 積もった新雪層がざらめ雪へと変態し、その後サン・クラストが形成された。サン・クラ



第 2 図 サン・クラストの断面写真

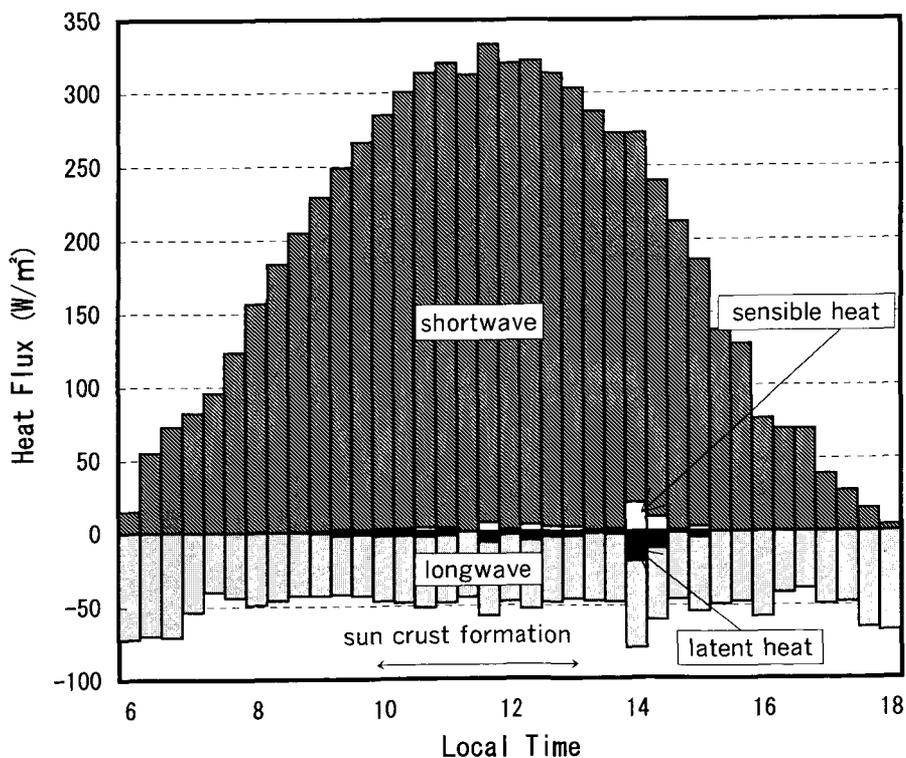
スト形成前もしくは形成中の表層の密度および含水率を第2表に示す。

サン・クラストが形成された熱収支条件として1994年4月6日の融雪観測露場の例を第3図に示す。形成期間中は好天であり、日中4時間ほどは日射フラックスのうち300 W/m²程が積雪に吸収され、-50 W/m²前後の長波放射フラックスが積雪表面から放出されていたことがわかる。また顕熱フラックスが雪面に数 W/m²の熱を与えると同時に、蒸発によって雪面からはほぼ等量の熱が奪われていたこともわかる。

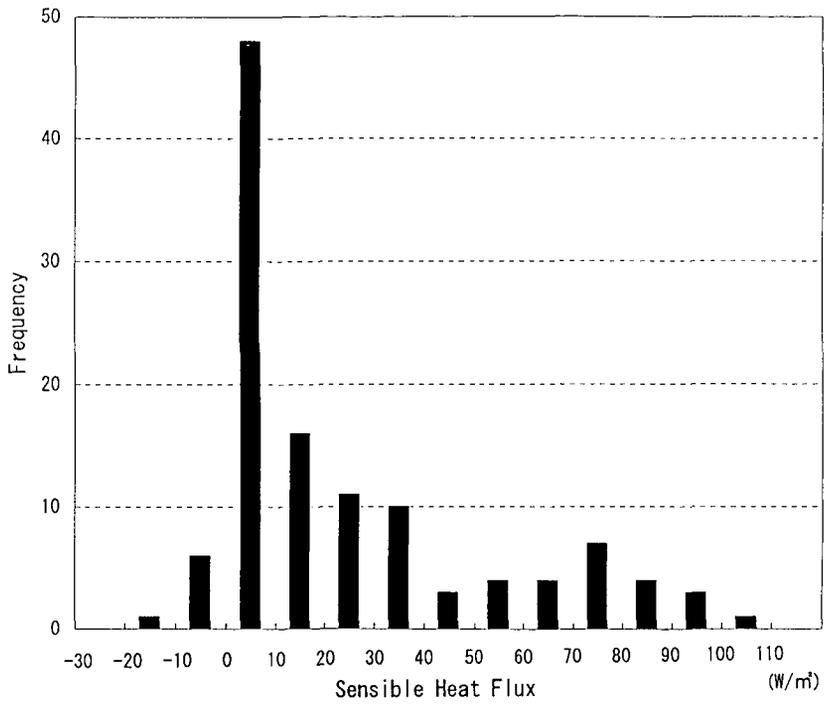
第4図はサン・クラスト形成時の顕熱フラックスを1時間平均値について示したヒストグラムである。これによるとサン・クラスト形成中、顕熱は大気から雪面へ数 W/m²のフラックスがあることが圧倒的に多い。一方、第5図は潜熱フラックスについて同様に示したヒストグラムであり、雪面からの蒸発によって雪面から大気へ数 W/m²のフラックスがあることがわか

第2表 サン・クラスト形成前の積雪表層の密度と含水率

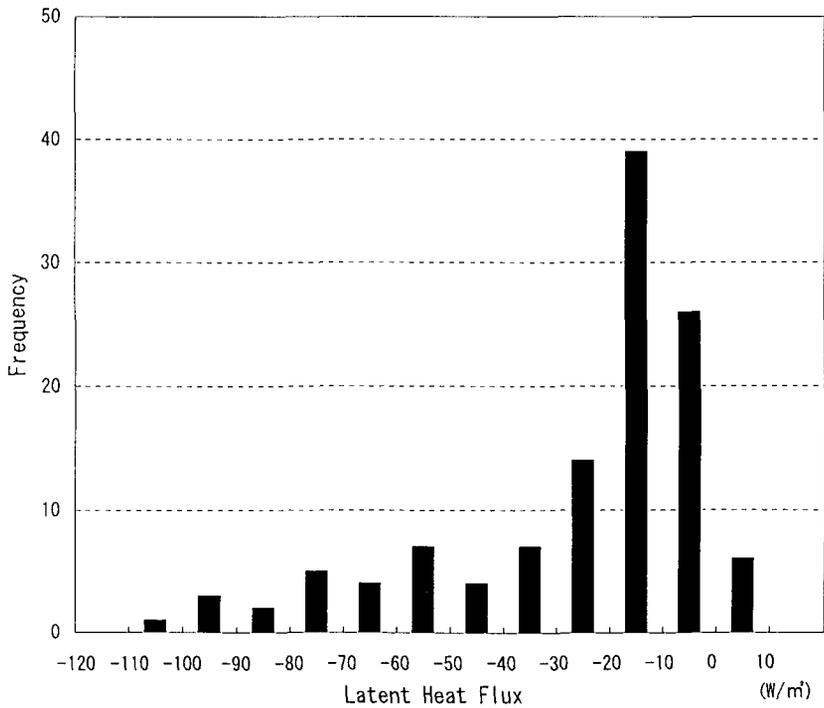
| | density | liquid water content |
|---------|---------------------|----------------------|
| | kg/m ³ | % |
| average | 4.2×10 ² | 12.6 |
| max | 4.8×10 ² | 19.0 |
| min | 3.7×10 ² | 4.9 |



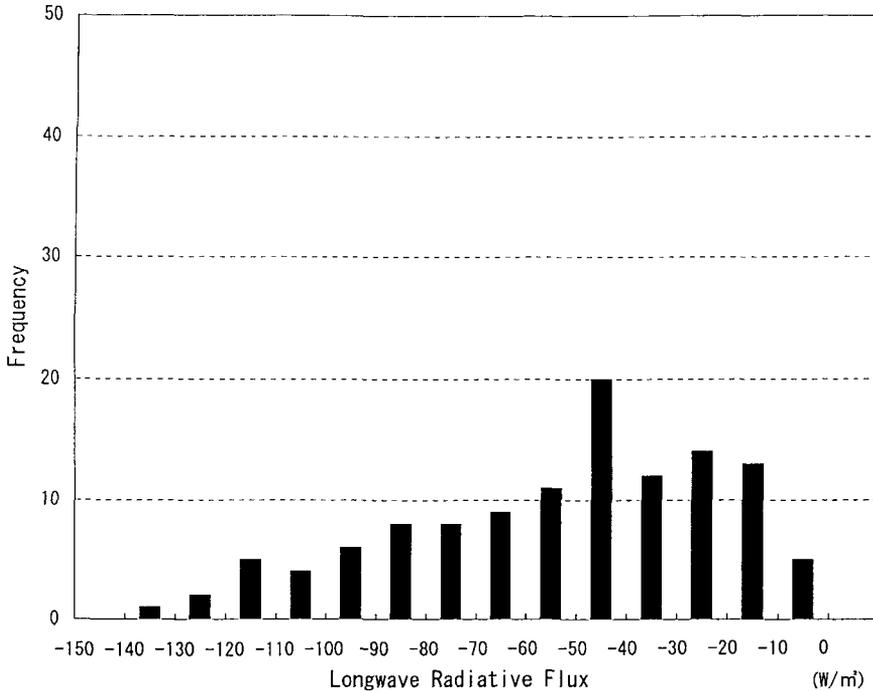
第3図 サン・クラスト形成日の熱収支各成分の変化 (20分平均)



第4図 サン・クラスト形成時の顕熱の頻度分布図



第5図 サン・クラスト形成時の蒸発潜熱の頻度分布図



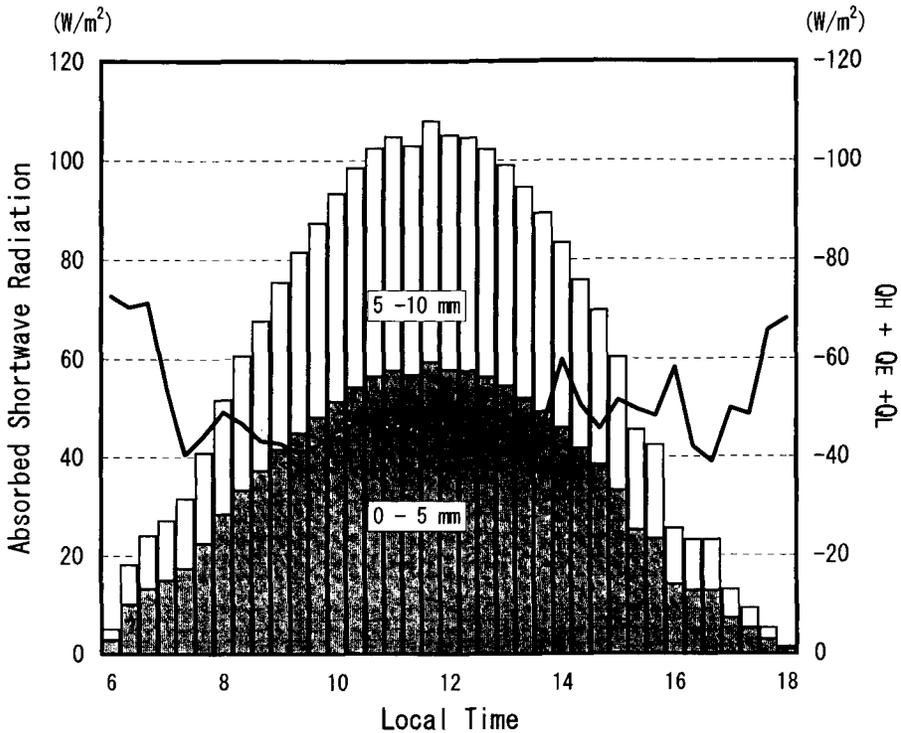
第6図 サン・クラスト形成時の長波放射収支の頻度分布図

る。第6図は長波放射収支フラックスについて同様に示したヒストグラムである。-40 から-50 W/m² の間にピークを持つなだらかな分布を示すが、常に雪面を冷却するフラックスとなっていることが特徴である。

積雪表層に注目してサン・クラスト独特の構造を生む熱収支条件を求めた。長波放射、顕熱、蒸発の潜熱が積雪表面と大気の間での熱交換であると見なせるのに対し、日射は積雪層内に吸収され熱となるので、短波放射だけを他の熱フラックスと分けて考えることとする。日射は積雪内を透過するとき、雪粒子により吸収・散乱を受け減衰する。深さ Z における短波放射フラックス I は減衰係数を α とすると

$$I = (1 - r) I_0 \exp(\alpha Z) \quad (3)$$

であらわされる。ここで r と I_0 は積雪表面でのアルベドおよび短波放射フラックスである。本研究では深見・小島の実験⁹⁾ 結果より減衰係数 $\alpha = -0.4 \text{ cm}^{-1}$ として日射の吸収量を見積もった。第7図は1994年4月6日について、雪面から5 mm、5 mmから10 mmの深さで吸収される日射の吸収量と大気から雪面へ与えられる熱フラックスを比較した図である。実線は長波放射 Q_L と顕熱 Q_H 、潜熱 Q_E の和で負の値をとり、積雪表面から熱を放出していたことになる。またサン・クラストが形成されるとき、雪面は積雪表層数 mm が吸収する熱量と同等の熱を大気に放出していたことがわかる。この結果、積雪表層は融解せずにその下で内部融解による空洞が発達したと考えられる。

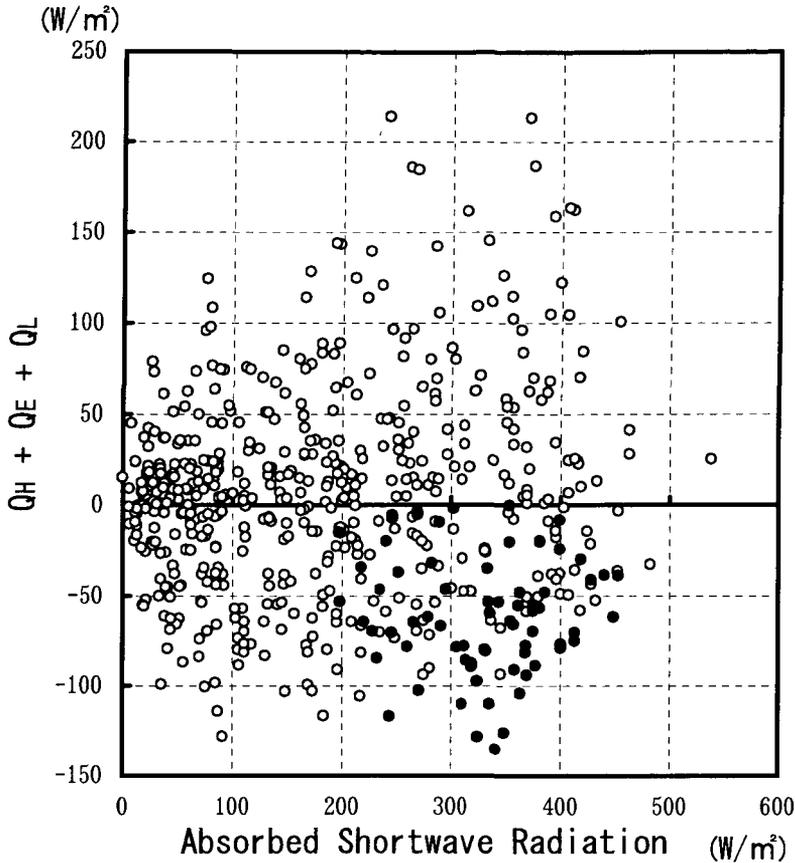


第7図 積雪表層における熱収支 実線：顕熱 Q_H 、潜熱 Q_E 、長波放射収支 Q_L の和
 ■ 0～1 mm, □ 5～10 mm：積雪が吸収する日射量

4融雪期の各観測地点において観測された大気から雪面への熱フラックスと、吸収された短波放射フラックスを1時間平均で比較したのが第8図であり、黒丸はサン・クラスト形成時、白丸は形成時以外である。なお、各点は日中に観測したものに限りプロットしたものである。黒丸は大気から雪面への熱フラックスが0から -140 W/m^2 の範囲に分布しており、サン・クラストは雪面が冷却される条件でないと形成されることがわかる。また透過日射が 200 W/m^2 を越える領域でないとサン・クラストの形成に適さないこともわかる。

III. 考 察

サン・クラストが形成される過程で積雪表面は凹凸が消えて、各雪粒子の上面が切られたように平坦になる。この要因は積雪表面での蒸発もしくは融解によると考えられる。先にも述べたようにサン・クラストが形成される時は 10 W/m^2 程の蒸発の潜熱フラックスが観測された。蒸発によって表面はどのくらいの低下をするのであろうか。 10 W/m^2 の蒸発の潜熱フラックスがあるとすると、これは1時間、 1 m^2 あたり 12 g の蒸発量である。粒径 2 mm の氷球が密度 $4.0 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ で積雪表面に1層敷き詰められているとすると、2時間で上部 0.2 mm が蒸発する量にあたる。蒸発が積雪の凸部で起こるとすると直径 1.2 mm の円が表面に広がることとなり、積雪上面からの蒸発は雪面が平坦になる要因の1つであると考えられる。



第8図 吸収日射量と顕熱 Q_h 、潜熱 Q_e 、長波放射収支量 Q_l の和の比較

●：サン・クラスト形成期間，○：その他

サン・クラスト形成を物質輸送の面で見ると、およそ 400 kg/m^3 の雪が 800 kg/m^3 を越える薄氷へと変態する現象と捉えることができる。サン・クラストの形成中は先に述べたように氷板直下で融解が起り積雪表層は放射冷却されている。下層からクラストへの水蒸気輸送によって雪が氷へと変態していると考えられることができるだろうか。 400 kg/m^3 の雪が 800 kg/m^3 、 1 mm の厚さの氷層になると仮定すると、この水蒸気の凝結による潜熱は $1.1 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ となる。これは 50 W/m^2 の放射冷却で6.3時間の熱量に当たる。2～4時間でサン・クラストは形成されるので、凝結のみによって水の輸送があると考えるのは潜熱の開放の点で無理がある。融解水の再凍結による潜熱は $1.3 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ と一桁小さいので、サン・クラストへ変態する層が薄くなることで密になり、再凍結により氷板となったと考えられる。

本観測においてサン・クラストは融雪期のざらめ雪に形成されることが圧倒的に多かった。放射収支に注目すると、厳冬期は日射量が小さいのに加え新雪やしまり雪はアルベドが高いため (>0.7)、晴れて日射が多くなっても全波長放射収支は負となり積雪が冷やされてしまう⁷⁾。したがって第5図に黒丸で示したような熱収支条件を満たすことが少なく、雪面直下で内部融

解が起らないため、サン・クラストの形成に適さないと思われる。

IV. 結 論

4 融雪期にわたっておこなわれたサン・クラストの観測によって、サン・クラストの構造および形成される気象条件が明らかになった。サン・クラストは 1 mm 程度の薄い氷板であり、その下には深さ 1 cm 程の空洞が形成された。

サン・クラスト形成時には 200 から 450 W/m² の短波放射フラックスが積雪に吸収されていた。また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で 0 から -140 W/m² であった。これは積雪表層数 mm から数 cm が吸収する日射量と同等であり、雪面で氷板が維持され、氷板の直下で内部融解が起こる最適の条件であった。

サン・クラストは平均 $4.2 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ のざらめ雪が変態して形成された。つまり表層の雪はサン・クラストを形成する過程で大きな密度のざらめ雪を経なければならぬことがわかった。

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ご助言を、同研究所児玉祐二助手には観測に有益なご助言、ご協力を受けた。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頂いた。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) Colbeck, S., Akitaya, E., Armstrong, R., Gubler, H., Lafeuille, J., Lied, K., McClung, D. and Morris, E. 1990 The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. *The International Commission on Snow and Ice of the International Association of Hydrological Science*, 23pp.
- 2) 尾関俊浩・秋田谷英次 1992 サン・クラストの形成機構 —その1—. 低温科学, 物理篇, **51**, 13-21.
- 3) 秋田谷英次 1978 熱量計による積雪含水率計の試作. 低温科学, 物理篇, **36**, 103-111.
- 4) 竹内清秀・近藤純正 1981 大気科学講座1 地表に近い大気. 東京大学出版会, 226 pp.
- 5) Ishikawa, N. and Kodama, Y. 1994 Transfer Coefficients of Sensible Heat on a Snowmelt Surface. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **53**, 233-240.
- 6) 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.
- 7) Wendler, G. 1986 The "Radiation Paradox" on the Slopes of the Antarctic Continent. *Polarforschung*, **56**(1/2), 33-41.