



Title	高密度雪における光の減衰について
Author(s)	神岡, 忍; KAMIOKA, Shinobu; 黒岩, 大助 他
Citation	低温科学. 物理篇, 34, 49-58
Issue Date	1977-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18297
Type	departmental bulletin paper
File Information	34_p49-58.pdf



高密度雪における光の減衰について*

神 岡 忍

(北海道大学大学院理学研究科)

黒 岩 大 助

(低温科学研究所)

(昭和51年10月受理)

I. ま え が き

極地では、積雪は圧密され氷化していく。このような過程でできた氷は、必ず気泡を含み、みかけ密度は純氷より小さい筈である。しかし、南極のバード基地で取出されたコアには気泡を含まない透明な氷が発見され、話題となっている。最近、リモートセンシングの技術が急速に発達し、これが雪氷学の分野にも広く応用されるようになった¹⁾。リモートセンシングに利用される電磁波の波長も十数 m の電波からマイクロウェーブ、ミリ波はもとより光の領域までほとんど連続的に応用されている。ところで、リモートセンシングで得られる可視領域での雪氷の映像の正しい解釈には、雪氷の光学的性質に関する知識が必要であることはいうまでもない。積雪は氷の粒と空気との混合物であるから、積雪の光の透過度は、氷粒に含まれる不純物の影響を除くと、空隙と粒子界面での光の散乱と、氷実質部の光の吸収によってかわり、みかけ密度、粒径、比表面積、粒子の結晶学的配位、光の波長などの関数と考えられる。これまで積雪の光の減衰については、自然積雪について Thomas²⁾、Liljequist³⁾ などが、人工的に処理した雪については Mellor⁴⁾ が測定している。Thomas²⁾、Liljequist³⁾ によると、測定された密度範囲では、光の波長の増加にともなって減衰係数は増加する。ところが、Mellor⁴⁾ の測定では、逆に波長の増加に対して減少している。光の波長を固定して減衰係数を密度との関数として測定した場合は、Thomas²⁾ によると密度が 0.098 g/cm³ から 0.9 g/cm³ に増加するに従って減衰係数が単調に減少する傾向にある。また、Mellor⁴⁾ は密度が 0.37~0.62 g/cm³ の人工積雪について測定したところ、減衰係数はいったん密度の増加とともに増加し、一つのピークを持ったあと減少していくことを見出した。粒径についての関係は、Mellor⁴⁾ および Weller など⁵⁾ は、粒径が増大するにしたがって減衰係数が減少することを報告している。このように積雪は氷の粒と空気との混合物であるため、その光学的性質はたいへん複雑であり、たんに密度というような単純な組成因子だけではきまらない。

積雪を通過する光の減衰は主として氷粒界面での光の散乱と粒子実質部分での光の吸収とに左右される。この二つの効果を分離しようとする試みは、大浦⁶⁾、Liljequist³⁾、Weller⁷⁾ 等によってなされてきた。とくに、大浦・小林⁸⁾、小林・大浦⁹⁾ らは、フィルター法を考案し、吸

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 1794 号

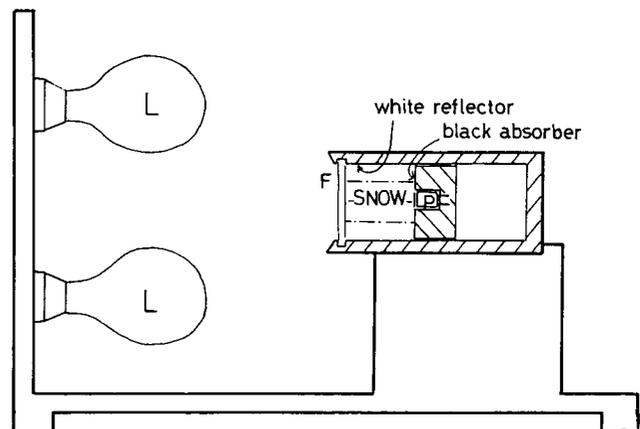
収係数と散乱係数とを計算している。ところでこれらの著者たちの測定は主としてみかけ密度 0.5 g/cm^3 以下の自然積雪に限られていた。しかし、将来予想されるリモートセンシングへの応用という立場からすれば、測定範囲を密度 0.5 g/cm^3 以上の高密度雪から全く気泡を含まない純氷の領域まで広げておく必要がある。また、天然の積雪が存在している温度は homologous temperature (絶対温度であらわした融点に対する比) でいえば、きわめて氷の融点に近い状態におかれている。たとえば雪温 -20°C は $253^\circ\text{K}/273^\circ\text{K}=0.93$ で融点の 93% に近い温度である。それ故、積雪内部では、焼結、再結晶、粒子粗大化などにより時間とともに変態がすすんでいる。したがって、積雪の光学的性質は時間とともに変っていく筈である。われわれは、積雪を人工的に圧密することによって氷河氷の密度に近づけ、減衰係数を測定して光の波長、粒径、密度、比表面積との関係を示し、これらの関係が積雪の変態にともなう内部構造の変化によってどう変るかを考察した。

II. 測定方法

測定装置の略図を第 1 図に示してある。一様で面積の大きい光源をうるため、100 W の白熱電球を 5 個用いた。光源の前に光源面に垂直な軸を持った四角な測定用の筒が置いてある。測定筒の断面は、内法が $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ で長さ 15 cm である。雪の試料を入れるのが容易なように測定筒の上面は取りはずしができる。測定筒の内面には、光を散乱させるため白色の紙が貼りつけてある。試料前面には干渉フィルターを置き、波長特性を調べた。フィルターの半値幅はフィルターによって異なるが、 $120 \text{ \AA} \sim 180 \text{ \AA}$ である。試料の後面には中央に透過光量を測定するためのフォト・ダイオード (Silicon Photo Diode Optical Detector, Belle Howell 社) を埋め込んだアクリル樹脂の板が接触させてあり、板が雪と接触する面には、光を通さない黒い塗料がぬってある。この塗料はアクリル板の表面での光の反射を除去するためである。

試料は、低温室に貯蔵してあった積雪を用いて作った。 -10°C で積雪を粉々にし、ふるいで粒径をそろえ、角柱状の筒につめて圧縮し、それを一定温度 (-3°C 又は -20°C) で焼鈍させた。それを、前面が $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ の直方体になるように成形した。

積雪のように媒質が散乱と同時に吸収を行う場合の光の減衰は、散乱係数と吸収係数の 2 つの成分から成り立つ。斎藤¹⁰⁾ は散乱と同時に吸収を行う媒質の光の減衰係数について詳細な計算を行った。この理論によると積雪のような媒質の散乱係数と吸収係数とを求めようとすると、減衰係数と同時に積雪表面でのアルベドを同時に測定する必要がある。積雪表面でのア



第 1 図 測定装置。L: 光源, F: 干渉フィルター, P: フォト・ダイオード

ルベドーの測定は試料面積が十分広い場合はともかく、小さい試料ではむりである。大浦と小林⁸⁾とは斎藤の理論を展開し、試料のアルベドを測定する代りに透過率のわかった色によって選択吸収のない灰色フィルター、たとえば格子フィルターを試料の中央に入れ、フィルターを入れた時と入れない時との光の透過率の比を求め、試料の減衰係数とから散乱係数と吸収係数とを求める方法を工夫した。

積雪の減衰係数、散乱係数、吸収係数をそれぞれ、 λ, s, k とすると、厚さ h の試料の格子フィルターを入れないときの光の透過率 T は

$$T = \frac{2\lambda}{s+k+\lambda} e^{-\lambda h} \tag{1}$$

となり、また、格子フィルターを入れたときと入れないときの透過率の比 F は

$$F = \frac{2(\lambda/s)\delta \cdot t}{\delta^2 - t^2} \tag{2}$$

となる。ただし

$$\lambda = \sqrt{k(k+2s)}, \quad \delta \equiv 1 + \frac{k}{s} + \frac{\lambda}{s}$$

t = 格子フィルターの透過率、この実験では
 $t = 0.64$ の格子を使用した。

} ⊕

である。(1)と(2)とを実測すれば、 λ, k, s が求められる。

測定後、試料の薄片写真を取りその写真から粒径と比表面積を求めた。比表面積は、空隙と粒子との自由界面のみに注目し、今回は粒子間の界面(すなわち結晶境界)は考慮していない。なお比表面積は成田¹¹⁾の方法で求めたものである。

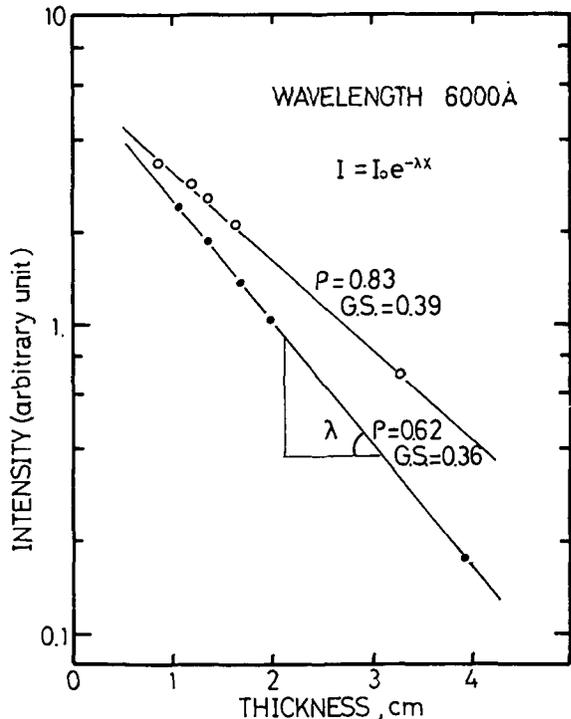
III. 測定結果

(1) 厚さと透過量

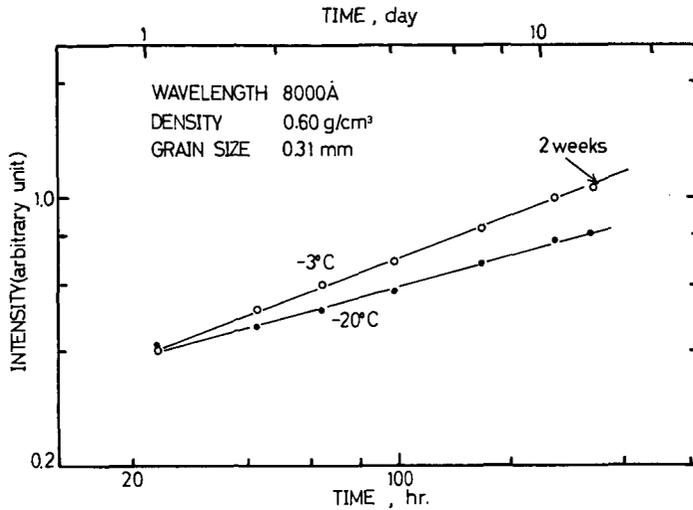
試料の厚さの変化にともなう光の透過量の変化の一例を第2図に示す。これは、 $I = I_0 \exp(-\lambda h)$ の形の式を満足していることがわかる。減衰係数 λ は第2図の直線の傾きから求められる。

(2) 経時効果

積雪は焼結の進行とともに光学



第2図 積雪試料の厚さと透過光量との関係。直線の傾きが減衰係数にあたる。 ρ : 密度, g/cm^3 , G.S.: 平均粒径, mm

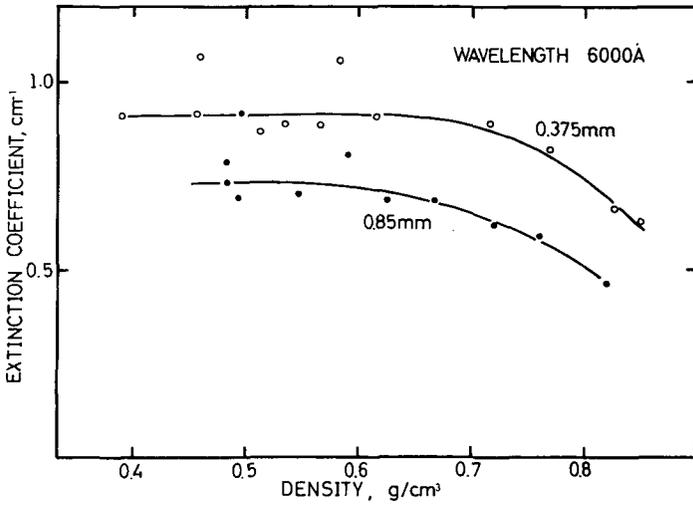


第3図 透過光量の経時効果。パラメータは焼結温度

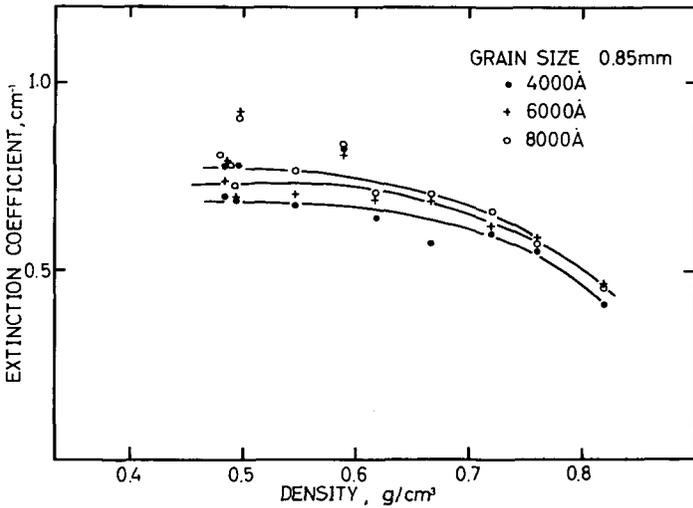
的性質を時間の関数として変えていく。このことを経時効果という。第3図は、光の透過量の時間的変化を焼結温度をパラメータとして図示したものである。測定は前述の方法で作ったサンプルを、一定温度（ -3°C 又は -20°C ）で一定時間放置し焼結させる。光の透過量を測定する時は、この試料を -10°C の室に一時間置き、サンプル全体の温度を -10°C にした後、透過量を測定した。測定が終ると、サンプルは再びもとの保存温度にもどし、蒸発しないように注意して1~数日放置、焼結させた。これを再び、 -10°C の測定温度で測定するという方法を繰り返した。図に示した温度は測定温度ではなく、焼結温度を示す。この図にみられるように、あきらかに光の透過量は時間の経過とともに増加する。又、高い温度で焼結させたものほど光の透過量の増加の割合も大きくなる。これらのサンプルの平均粒径は、時間的にはそれほど成長しているようには見えなかったが、比表面積を測定してみると、 -3°C で焼結させたサンプルでは2週間で約10%程度の減少がみられた。しかし、 -20°C ではその変化はほとんど測定できなかった。

(3) 密度・粒径・光の波長に対する依存性

第4図は、一定波長の光に対するいろいろな密度の雪の減衰係数の値を粒径をパラメータとして、又第5図は平均粒径が相等しい試料の減衰係数の密度による変化を波長をパラメータとして図示してある。サンプルはすべて -3°C で2週間焼結させたものについて比較した。第4, 5図から、試料の密度が増加するにしたがって、いいかえると、空隙率が減少するとともに減衰係数は減少していることがわかる。これは粒子の自由界面での散乱効果の減少を暗示する。又、第4図から同じ密度のサンプルでも粒径が大きいもの、いいかえると比表面積の小さいサンプルの方が減衰係数が小さいことがわかる。このこともまた粒子界面での散乱効果が比表面積の減少とともに小さくなることを暗示している。なお、第4図には密度 0.4 g/cm^3 以下の雪の減衰係数の値は示されていないが、密度がこれ以下に小さくなると空隙率がふえかえって光の透過量が増すのでみかけ減衰率は小さくなる筈である。したがって、減衰係数はある密



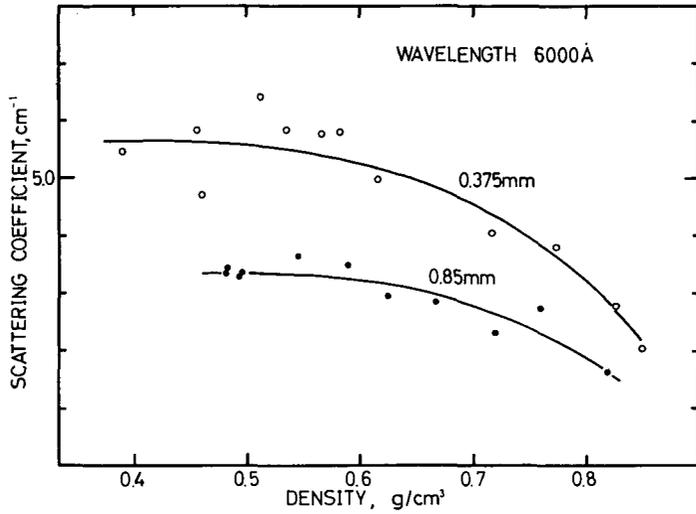
第4図 減衰係数と密度との関係。パラメータは平均粒径。○印の粒径範囲は0.325 mm~0.425 mm, ●印のそれは0.75 mm~0.95 mmである



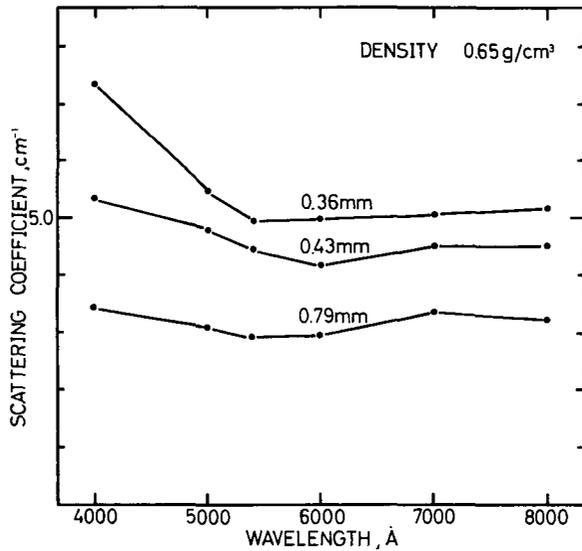
第5図 減衰係数と密度との関係。パラメータは波長

度で極大値をとるであろう。第5図は、減衰係数の密度変化を波長をパラメータとして示している。測定値のバラツキが大きいのでは正確なことはいえないが、粒径が一定のサンプルでは光の波長が大きいほど減衰係数が大きい傾向があるようにみえる。

さて、うえにのべた実験事実を強調するためにフィルター法で測定した散乱係数の密度、波長と粒径に対する変化を調べてみよう。第6図は密度に対する散乱係数の変化を粒径をパラメータとして図示したもので、第7図は、散乱係数の波長に対するスペクトラムを粒径をパラメータとして表わしたものである。第6図に示すように、散乱係数はあきらかに密度が増加するにしたがって減少し、かつ粒径の大きいものほど散乱係数は小さい。しかし、第7図に示す



第6図 散乱係数と密度との関係。パラメータは粒径

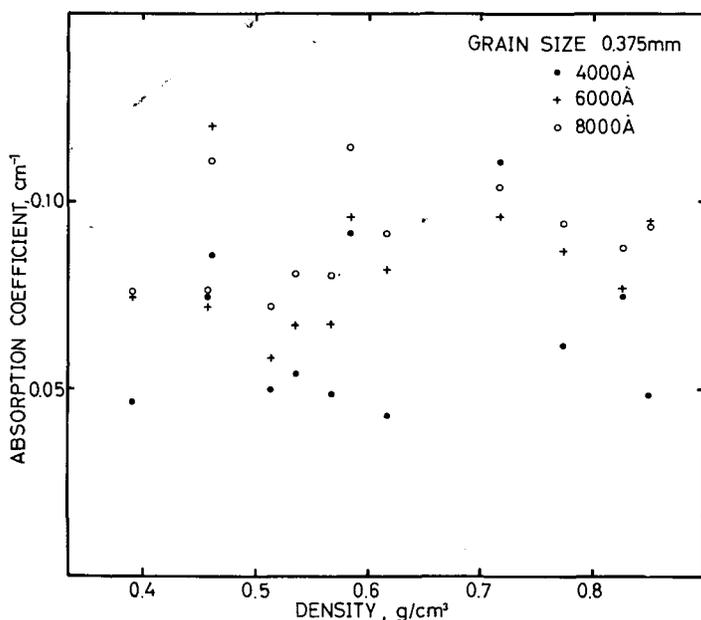


第7図 散乱係数のスペクトラム。パラメータは粒径

ように散乱係数の波長による変化はほとんどないが、ただ粒径が小さい時は波長の減少とともに散乱係数は大きくなる傾向を示す。第7図は密度 0.65 g/cm^3 のサンプルについての結果であるがこの傾向は異なった密度のサンプルについてもいえる。

第8図は、いろいろな密度の雪の吸収係数の変化を波長をパラメータとして図示したものである。測定値のバラツキが大きくはっきりしたことはいえないが、吸収係数は波長が長くなるほど大きいことを示している。また吸収係数の値は大きくとも 0.1 cm^{-1} の程度であり減衰係数の $1/6 \sim 1/9$ である。

これらのサンプルの比表面積については、密度が同程度のものでは粒径が小さいもの



第8図 吸収係数と密度との関係。パラメータは波長

(G.S.=0.375 mm)の方が粒径が大きいもの(G.S.=0.85 mm)より2倍程度大きく、粒径のほぼ等しいサンプルでは密度が大きいほど比表面積が大きい傾向にある。

IV. 考 察

積雪の光に対する減衰係数は、散乱係数と吸収係数との二つの成分から成り立つ。積雪は空気と氷粒との混合物であるから、散乱係数に寄与するのは氷実質部を構成している水分子と含有不純物分子による固有の散乱を除けば主として空気と氷粒子との界面(氷粒の自由表面)および粒子と粒子との接触界面(結晶粒界)における光の散乱である。そして散乱効果は、氷粒の自由表面の方が結晶境界における散乱効果よりも大きいであろう。そして、積雪を長時間一定温度のもとで焼結させると、自由表面は主として焼結くびれの増大とともに減り、結晶境界は再結晶、境界移動によって減少していくことになる。これに反し、氷実質部の光の吸収は氷粒内部の水分子の構造、不純物分子の濃度に変化がなければ変わらない。この研究は減衰係数を散乱係数と吸収係数とに分け、密度、波長、粒径、とくに焼結ともなう経時効果の関数として測定した。

第3図に示したように、みかけ密度が一定の雪に対する光の透過量は時間の経過とともに増した。この現象は次のように解釈される。時間の経過とともに焼結ならびに再結晶が進行して比表面積が減少し、そのため散乱係数が減少したと解釈できる。事実、比表面積を測定してみると、その値は時間とともに減少していることがわかった。たとえば -3°C で焼結させた場合、比表面積は測定の初期には $84\text{ cm}^2/\text{cm}^3$ であったが、2週間後には $75\text{ cm}^2/\text{cm}^3$ に減少した。

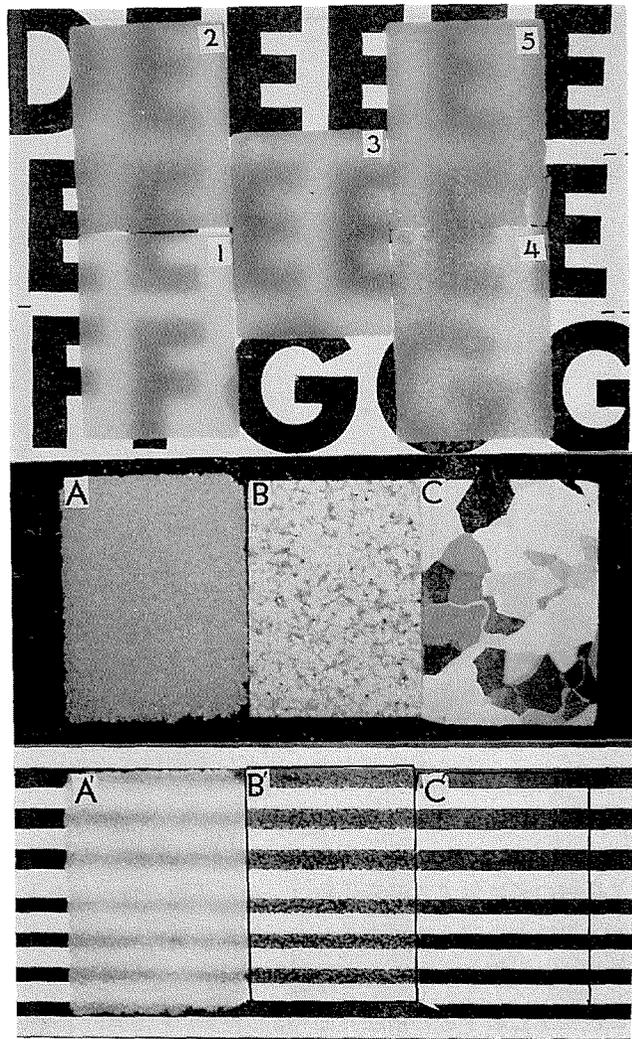
減衰係数が波長の増加とともに増すという事実は、Thomas²⁾、Liljequist³⁾の結果とは一

致するが Mellor⁴⁾の結果とは一致しない。このことは次のように説明できる。散乱係数は、粒径が大きい時は光の波長によってあまり変化がないが、粒径が小さい時は波長が短かいほど大きい(第7図)。いっぽう吸収係数の方は波長が長いほど大きい(第8図)。この結果、減衰係数は粒径が大きい時は波長の増加とともに増し、粒径がかなり小さい時は逆の現象となると解釈される。

粒径が大きいものの方が減衰係数が小さいという結果は、Mellor⁴⁾、Weller 等⁵⁾の報告とも一致するし、又散乱係数も同様に粒径が大きいほど小さくなるので、これは粒径が大きいほど比表面積が小さいためと解釈され、妥当である。

われわれが取扱った密度 0.39 g/cm^3 以上の雪では、減衰係数はみかけ密度が増加するにともなって減少している。このことは密度の増加、すなわち空隙率の減少にともなって比表面積が減少していくからであると解釈される。しかし、実験してみると、減衰係数の減少と比表面積の減少とは必ずしも対応していない場合もあった。このことは、比表面積の測定は粒子の自由表面についてのみ行ない、結晶粒界については行っていないのでこの点についてなお検討を重ねる必要がある。

第9図は、うえに述べた積雪の光に対する減衰係数の密度、粒径、焼結時間に対する結果を裏付ける一連の写真である。これらの写真から圧密した雪の光学的性質に関するいろいろな情報をひき出すことができる。第9図の最上段に1, 2, 3, 4, 5と番号をつけた5個のサンプルがアルファベットの英文字の上にならべられているが、これら5個のサンプルは次のような条件でつくったもので、いずれも厚さ一定(0.49 mm)の板に切り、英文字の上にならべ下から一様な光で照明して写真を取ったものである。



第9図 密度、粒径、焼結条件を異にする雪の透明度を示す写真

サンプル No.	密度	平均粒径	焼結温度	焼結時間
1	0.8 g/cm ³	0.37 mm	-3°C	2 週間
2	0.6 g/cm ³	0.37 mm	-20°C	2 週間
3	0.6 g/cm ³	0.37 mm	-3°C	2 週間
4	0.6 g/cm ³	0.85 mm	-3°C	2 週間
5	0.6 g/cm ³	0.37 mm	-3°C	3 日

まず番号1と3とを比べてみよう。これらは粒径、焼結温度、焼結時間は同じであって密度だけが異なるサンプルである。あきらかにみかけ密度の大きい1の方が3よりも下地の英文字がはっきりしていて透明度が高いことがわかる。番号2と3とを比べると焼結温度が高い3の方が2よりやや下地の英文字が黒くみえる。また、サンプル3と4とは粒径の異なる試料であるが粒径の大きい4の方が3よりも透明度が高い。つまり積雪はみかけ密度が大きく、粒径が大きいほど光を通しやすい。

また、第9図の中央のA, B, Cは厚さが0.49 mm、たてよこの寸法が3 cm × 4 cmに切りだした、積雪(密度0.4 g/cm³)、雪氷(密度0.89 g/cm³)、市販氷(0.91 g/cm³)の粒子構造を示す偏光写真であって、最下列のA', B', C'はその同じサンプルの透明度を比較したものである。中央Bの雪氷は雪に水を浸みこませて凍らせたものでCの市販氷に比べると直径の小さな結晶粒からなりたっている。A', B', C'を比べてみるとあきらかに密度の小さい積雪に比べ、密度の大きい雪氷が透明であり、更に気泡を含んでいない市販氷の方が更に透明である。下地の黒い横線のボケはサンプルにふくまれる空隙と粒子界面、気泡などの自由表面における光の散乱に起因する(サンプルB'の白い斑点は気泡)。また、CとC'との比較から結晶粒界はほとんど白色光の散乱には寄与していないこと、また吸収も大へん小さいことがわかる。ただし振動方向が限定された偏光に対しては別である。第9図の写真は積雪を通る光の減衰は主に空気に氷粒との自由界面での散乱によることを示している。

文 献

- 1) Glen, J. W., Adie, R. J. and Johnson, D. M., ed. 1975 Symposium on Remote Sensing in Glaciology. *J. Glaciol.* **15**, 3-475.
- 2) Thomas, C. W. 1963 On the transfer of visible radiation through sea ice and snow. *J. Glaciol.* **4**, 481-484.
- 3) Liljequist, G. H. 1956 Energy exchange of an antarctic snowfield. Scientific results of the Norwegian-British-Swedish Antactic Expedition, Norsk Polarinstitut, Oslo, Vol. II, Part 1,
- 4) Mellor, M. 1965 Optical measurements on snow. *CRREL Res. Rept.*, **169**, 19 pp.
- 5) Weller, G. and Schwerdfeger, P. 1967 Radiation penetration in antarctic plateau and sea ice. *Polar Met. WMO Tech. Note*, **87**, 120-141.
- 6) 大浦浩文 1951 積雪による光の反射および透過について II. 低温科学, 物理篇, **6**, 35-40.
- 7) Weller, G. 1969 Radiation diffusion in antarctic ice media. *Nature*, **221**, 355-356.
- 8) 大浦浩文・小林大二 1965 積雪の光に対する散乱・吸収係数測定法試案. 低温科学, 物理篇, **23**, 87-98.
- 9) 小林大二・大浦浩文 1972 積雪中に遮蔽物のある場合の光の透過について. 低温科学, 物理篇, **30**, 65-71.
- 10) 斎藤鍊一 1948 散乱媒質中の輻射の減衰(積雪の輻射に対する性質の研究 I). 気象集誌, **26**, 208-215.

- 11) 成田英器 1969 積雪の比表面積の測定 I. 低温科学, 物理篇, 27, 77-88.

Summary

Measurements were made on the coefficient of extinction of light in artificially prepared snow samples as a function of apparent density, grain size, and specific surface area of snow. Samples were prepared in such a way that a block of natural snow was crashed into powder and sieved in various sizes and then compressed in an aggregate having a desired density. Samples were sintered at -3°C and -20°C for 2 weeks to test the effect of aging on the extinction of light. The extinction coefficient of light in snow is composed of two factors, absorption due to water molecules in ice grains and scattering at grain boundaries and interfaces between air and ice grains. Values for scattering and absorption were separately estimated by a convenient method developed by Oura and Kobayashi.

The following results were obtained. Figure 3 shows that the intensity of light transmitted through snow increased with increases in the sintering time and temperature. Figures 4 and 5 show that the value of extinction coefficient decreased with an increase of the apparent density of snow. This suggests that the decrease of the specific surface area of ice grains will lead to the decrease of the scattering of light, and eventually the decrease of the extinction coefficient. As seen in Figs. 6 and 8, the coefficient of scattering decreased with the increasing density of snow, but no discernible increase of the coefficient of absorption was observed against the increase of density.