



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪内部における日射の減衰
Author(s)	深見, 浩司; FUKAMI, Hiroshi; 小島, 賢治 他
Citation	低温科学. 物理篇, 39, 119-126
Issue Date	1981-03-18
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18420
Type	departmental bulletin paper
File Information	39_p119-126.pdf



積雪内部における日射の減衰*

深見 浩 司

(北海道大学大学院 理学研究科)

小 島 賢 治

(低温科学研究所)

(昭和 55 年 10 月受理)

I. ま え が き

日射は積雪内部へ透過して、積雪表面付近の温度分布や融雪に影響を与える¹⁾。また、最近リモートセンシングが積雪調査に利用され始めた。特に人工衛星などから撮影される可視光域の映像の解釈のためにも、日射の透過の問題は重要であろうと考えられる。

積雪内部へ透過した日射は、散乱や吸収により減衰する。斎藤²⁾、Dunkel and Bevans³⁾らは、積雪内部の日射を上下2方向の成分に分けて、この問題を考えた。そして、深さ x における進行方向が下向きの成分をもつ日射フラックスを A 、上向きの成分をもつフラックスを B とすれば、それらは深さに関して指数関数的に減少し、

$$A = A_0 \exp(-\mu x) \quad (1)$$

$$B = B_0 \exp(-\mu x) \quad (2)$$

となることを示した。 A_0 、 B_0 はそれぞれ、積雪表面内側 ($x=0$) における下向きフラックス、上向きフラックスで、 μ が積雪による日射の減衰係数である (以下、減衰係数と略す)。 μ の値は古くから数多くの測定がなされている。しかし、測定方法により、大きく異なった値になっている。

そこで、野外において減衰係数を測定する装置を試作し、積雪内部における日射の減衰を調べることにした。試作した装置は感部にフォトセルを用いた。感部に対していくつかの検定をした結果、装置は使用可能と判断されたので、野外においてさまざまな積雪の減衰係数を測定した。

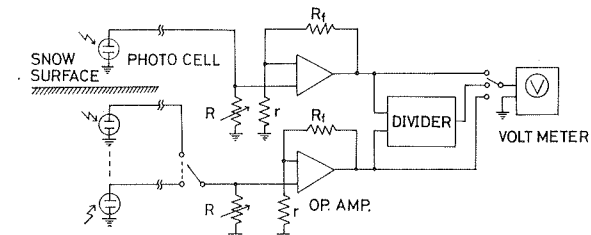
II. 測 定 装 置

第1図に測定装置の原理図⁴⁾を示す。測定装置は、感部、増幅部、演算部、指示部からなる。感部には表面積 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ の大きさのシリコンフォトセル (PHOTO CELL, 浜松テレビ S 642-B) を用いた。このフォトセルは、 $3,200 \text{ \AA}$ から $10,500 \text{ \AA}$ の波長範囲に感度をもち感度のピークは $7,500 \text{ \AA}$ にある。フォトセルは、外径 4 mm の支持棒の先端に取り付け、積雪内部のさ

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 2279 号

まざまな深さに9個さし込めるようにした。通常は水平上向きに5個、下向きに4個さし込み、それぞれ下向きフラックス、上向きフラックスを測定するようにした。積雪表面には基準とするフォトセルを水平上向きに置いた。フォトセルは光の強さに比例した電流を発生するので、可変の負荷抵抗 R を調節し、光の強さに比例した出力をとり出す。適当な値に調整された出力はオペアンプ (OP. AMP.) で増幅する。表面においた基準のフォトセルも同様に増幅する。そして日射の変動の影響をおさえるため、演算部、即ち演算素子 (DIVIDER; Teledyne Phylbrick 4452) によって、基準のフォトセルの出力と、積雪内部の出力との比を求めた。0~1.0の比の値は0~10 Vの電圧 D で出力される。以上の操作により、基準のフォトセルで規格化された積雪内部のフォトセルの出力が求められ、電圧指示計 (VOLT METER) で読み取る。表面のフォトセルの出力、内部のフォトセルの出力もスイッチの切換えにより求められる。野外において、これらの出力はデジタル電圧計を用いて読み取った。

第2図は装置の概観である。(a)が積雪内部にさし込むフォトセル、(b)が基準のフォトセルである。(a)はガイド(c)を用いて、積雪鉛直断面(北向き)から水平南向きに10 cm以上さし込んだ。その際、フォトセル同志による影響をさけるようにして、下部のものほど奥になるようにした。ダイヤル(d)は負荷抵抗 R に相当する。(e)、(f)は積雪内部のフォトセルの切換スイッチ、(g)はパネルの電圧指示計の切換スイッチ、(h)は出力端子である。なお、気温の低い野外での使用を考え、装置本体を断熱材で囲み保温した。

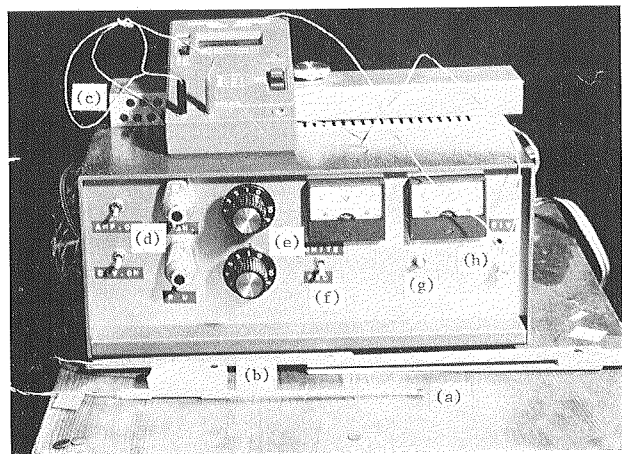


第1図 測定装置の原理図

R : 可変抵抗 10回転 $2\text{ k}\Omega$

r : $1.6\text{ k}\Omega$

R_f : $43\text{ k}\Omega$



第2図 測定装置の概観図

(a), (b): 感部 (c) ガイド (d) ダイアル (e), (f): 積雪内部のフォトセルの切換スイッチ (g): 指示計の切換スイッチ (h): 出力端子

III. 感部の検定

まず、使用したフォトセルを日射計 (EKO社, MS-12) と比較した。第3図に負荷抵抗 R の値を変えた時それに応じて増幅されたフォトセルの出力 V (Volt) と、日射計で求められた日射量

I (ly/min) の関係を示す。これは野外においてさまざまな天候において求めたもので、トレーシングペーパーを用いて、太陽光を減衰させたりもしている。図より I と V の関係は、 V が 7.0 V 以下では

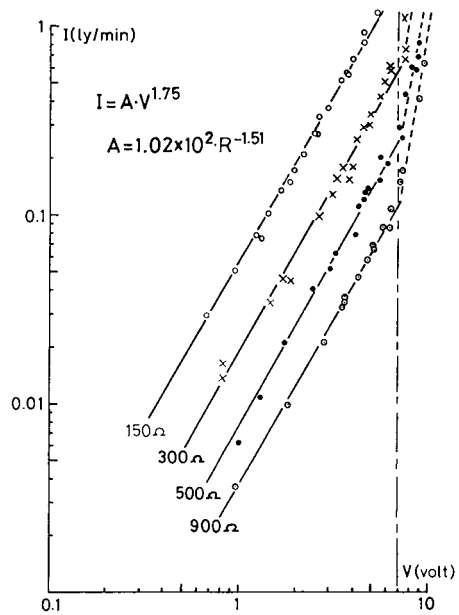
$$I = (1.02 \times 10^2 \cdot R^{-1.51}) \cdot V^{1.75} \quad (3)$$

と表わせる。従って負荷抵抗 R を調節するとき、基準とするフォトセルの出力が 7.0 V を越えないようにする必要がある。そうすれば、水平面日射量 I_0 で規格化された積雪内部のフラックス A は

$$\frac{A}{I_0} = \left(\frac{D}{10}\right)^{1.75} \quad (4)$$

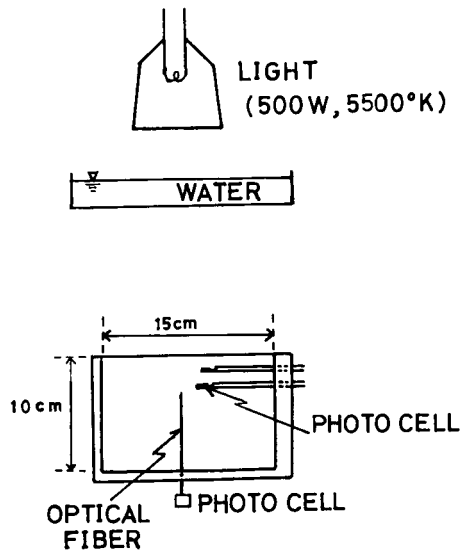
で求められる。なお、 D (Volt) は演算素子からの出力である。

次に、積雪内部に支持棒をとりつけたフォトセルを水平に差し込むことによって、放射場が乱される影響について調べた。そのため、積雪内部の放射場を乱さないと考えられるオプティカルファイバー⁵⁾を用いて減衰係数を測定し、試作した装置より求めた減衰係数と比較した。第4図にその実験方法を示す。光源には、100 V、500 W、色温度 5,500°K の写真用光源ランプ（フォトリフレクタランプ、ディライトカラー用）を用い、長波長放射を取り除くために、水フィルターを通した。この光源を用いて、フォトセルの出力と日射計の出力の関係を調べたところ、(3) 式で表わせた。従って、光源より射出される短波長放射の波長特性は、日射に近いものと考えられる。試料の積雪は、15 cm × 12 cm × 10 cm の大きさで側面と底面から光が入らないようにした箱に入れた。実験に用いたオプティカルファイバーは、アクリル製で外径 0.5 mm のものを 3 本を細い針金で束ねて、一方の端を光もれがないようにしてフォトセルにつけた。他端を箱の底から鉛直上向きに差し込み、さまざまな深さで下向きフラックスを測定した。また、側面から積雪内部に測定装置の感部を水平上向きに差し込み同様の測定をした。第5図にその一例を示す。積雪内部における下向き

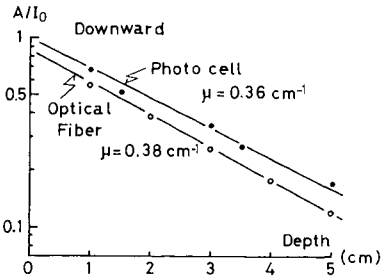


第3図 フォトセルの出力 V と日射量 I の関係

パラメータはフォトセルの負荷抵抗値 R



第4図 オプティカルファイバーを用いた、測定装置の感部の検定の実験方法の模式図



第5図 表面への入射量で規格化された下向きフラックス A/I_0 と深さ x の関係

Photo cell: 測定装置より求めたもの
減衰係数 $\mu=0.36 \text{ cm}^{-1}$

Optical Fiber: オプティカルファイバーより求めたもの
減衰係数 $\mu=0.38 \text{ cm}^{-1}$

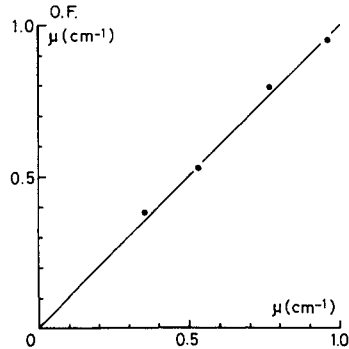
フラックスは表面に入射する値で規格化してある。両者とも、フラックスは深さに関して指数関数的に減少し、減衰係数は5%程度の差で一致している。このようにして、オプティカルファイバーを用いて得られた減衰係数の値と測定装置より求めた値の比較を第6図に示す。それぞれの方法により求めた減衰係数の値が等しい場合が実線である。図より、2つの方法により求められる値はよく一致しており、フォトセルを水平に差し込むことにより積雪内部の放射場が乱される影響はほとんどないと考えられる。これは感部として用いたフォトセルの表面積が5mm×5mmという非常に小さいものであったためであろう。

さらに、波長特性の異なる同じ大きさのフォトセル(浜松テレビ, S462)を測定装置の感部として用いた。このフォトセルは5,000 Å~11,900 Åの波長範囲に感度をもち、8,500 Åにピーク感度があり、増幅された出力と日射量は比例関係にあった。第7図に、波長特性の異なる2つのフォトセルより得られた減衰係数の値の比較を示す。異なるフォトセルで得られた減衰係数の間には極端な差がない。これは、積雪内部での光の減衰の波長依存性が可視光域から近赤外域においてはさほど大きくないことによると考えられる⁶⁾。

以上の感部の検定により、試作した測定装置は、精度よく日射の減衰係数を測定できるものと考えられる。

IV. 測定結果および考察

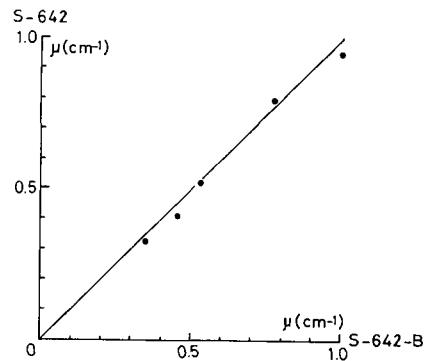
減衰係数は、厚さが10 cm以上ある均一と思われる積雪層について測定した。同時に密度、



第6図 測定装置で求めた減衰係数の値とオプティカルファイバーより得られた値の比較

横軸: 測定装置より得られた値

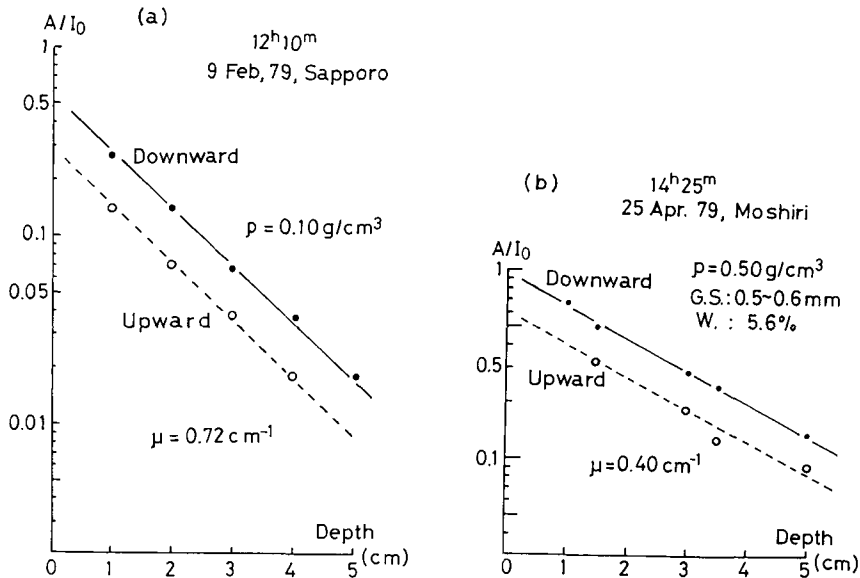
縦軸: OF (オプティカルファイバーより得られた値)



第7図 波長特性の異なるフォトセルを用いた場合の減衰係数の比較

横軸: S 642-B

縦軸: S 642



第8図 積雪内部の日射フラックスと深さの関係

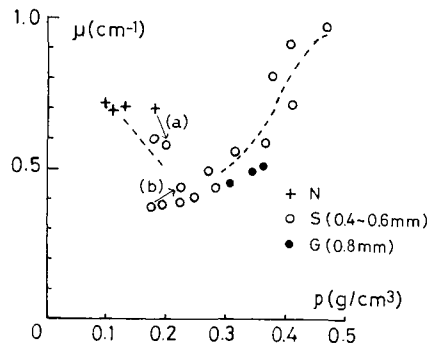
実線：下向きフラックス，破線：上向きフラックス
 (a) かわき新雪：密度 0.10 g/cm^3 減衰係数 0.72 cm^{-1}
 (b) ぬれしまり雪：密度 0.50 g/cm^3 平均粒径 $0.5\sim 0.6 \text{ mm}$
 含水率 5.6% 減衰係数 0.40 cm^{-1}

平均粒径，含水率も測定した。平均粒径は，積雪をほぐして偏光で接写撮影して写真から求めた。ぬれ雪の場合は，熱量式含水率計⁷⁾により含水率を測定した。

第8図に野外における積雪内部の日射の減衰の測定結果を2例示す。(a)はかわき新雪，(b)はぬれしまり雪の場合である。第5図と同じように，積雪内部の日射フラックスは水平面日射量で規格化してある。(a)，(b)ともに，日射フラックスは深さに関して指数関数的に減少し，上向きフラックスと下向きフラックスに傾きの差はない。従って積雪内部の日射の減衰は(1)式，(2)式で表わされることがわかる。この図の場合，減衰係数は(a)では 0.72 cm^{-1} ，(b)では 0.40 cm^{-1} と求まった。

以上のようにして求められた減衰係数の値をまとめてみた。

第9図に，密度 $0.1\sim 0.5 \text{ g/cm}^3$ の範囲のかわき雪の減衰係数と密度の関係を示す。新雪を(+)，こしまり雪・しまり雪(平均粒径 $0.4\sim 0.6 \text{ mm}$)を(O)，ざらめ雪(平均粒径 0.8 mm)を(●)で表わしてある。また同一積雪層の減衰係数と密度の変化を矢印(a)，(b)で示した。減衰係数の値は，密度 0.18 g/cm^3 のこしまり雪の 0.37 cm^{-1} から，密度 0.47 g/cm^3 の 0.97 cm^{-1} まで，大きく変化している。そして，新雪→こ



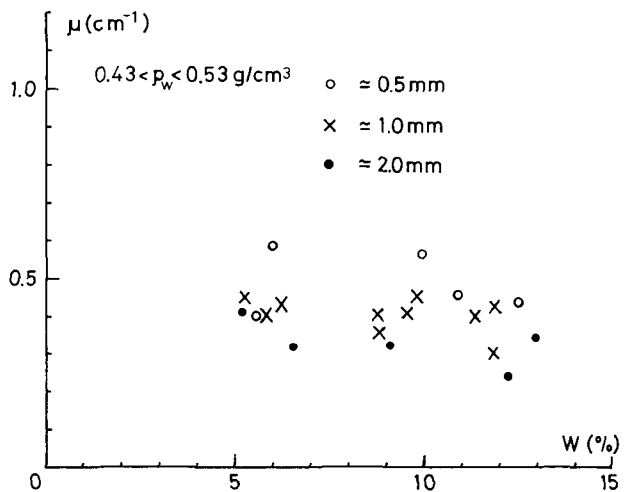
第9図 かわき雪の減衰係数 μ と密度 ρ の関係

N：新雪，S：こしまり，雪しまり雪
 G：ざらめ雪，は()平均粒径
 矢印(a)，(b)は同一積雪の変化を示す

しまり雪→しまり雪という変態過程に伴い、減衰係数は減少→増加という傾向があることがわかる。この傾向は次のような理由によるものと思う。矢印 (a) のような新雪→こしまり雪の変態過程では、降雪時の角ばった結晶形を持っていた積雪が丸みを帯びて、比表面積が減少することにより、日射が透過しやすくなるのであろう。一方矢印 (b) のようなこしまり雪→しまり雪の変態過程では、ある程度丸みを帯びた積雪は粒径が大きく変化せずに圧密され、日射が透過しにくくなっていくのであろう。

また、Weller⁸⁾ の報告などと同様に、粒径の大きいざらめ雪は同密度のしまり雪より減衰係数の値は小さくなっている。

第 10 図にはぬれ雪の減衰係数と含水率の関係を示す。ぬれ密度が $0.43 \sim 0.53 \text{ g/cm}^3$ の積雪について、平均粒径が 0.5 mm 程度のを (○), 1.0 mm 程度のを (●), 2 mm 程度のを (×) で表わした。含水率が $5 \sim 15\%$ の範囲では、減衰係数は同密度のかわき雪よりも小さく、 $0.23 \text{ cm}^{-1} \sim 0.58 \text{ cm}^{-1}$ の値をとった。また、粒径が大きいものほど減衰係数が小さくなる傾向は第 9 図よりもはっきりしている。ぬれ雪になると減衰係数が小さくなるのは、氷の粒と粒の間に水がたまることによるのであろう。つまり、その水によってみかけ上粒径が増大することになるからである。また、含水率が増加するに従い減衰係数はわずかながら減少するような傾向がみられる。



第 10 図 ぬれ雪の減衰係数 μ と含水率 W の関係
ぬれ密度 ρ_w , パラメーターは平均粒径
(○): 0.5 mm (×): 1.0 mm (●): 2.0 mm

このように、減衰係数は積雪の構造に対応して変化しており、今後比表面積とも関連させて調べていく必要があろう。また特に、新雪の場合、結晶形と減衰係数の関係を明らかにしなければならない。

V. あとがき

積雪による日射の減衰係数を測定する装置を試作し、野外においてさまざまな積雪の減衰係数を測定した。減衰係数は積雪の構造に対応して変化したが、新雪→こしまり雪の変態過程で減少し、こしまり雪→しまり雪の圧密過程で増加した。またぬれ雪になると減衰係数は減少した。同密度では粒径が大きいものほど減衰係数は小さかった。

減衰係数の値の正当性は、感部の検定により確認されたが、内部昇温の実験からも確認できるであろう⁹⁾。

この報告は筆者の一人、深見の北海道大学大学院理学研究科地球物理学専攻修士課程の修了研究の前半である。

測定装置の試作に際してお世話になった油川英明助手をはじめ、測定や結果の解析に御協力いただいた融雪科学部門の方々に感謝いたします。

文 献

- 1) Hoeck, E. 1958 Influence of radiation and temperature on the melting process on the snow cover. SIPRE Translation, **49**, 60 pp.
- 2) 齋藤錬一 1948 敗乱媒質中の輻射の減衰(積雪の輻射に対する性質1). 気象集誌, **26**, 208-215.
- 3) Dunkel, R. and Bevans, J. 1956 An approximate analysis of solar reflectance and transmittance of a snow. *J. Meteor.*, **13**, 212-216.
- 4) 油川英明・深見浩司 1978 簡易アルベドメータの試作. 低温科学, 物理篇, **37**, 171-174.
- 5) O'Neill, A. D. J. and Gray, D. M. 1972 Solar radiation penetration through snow. The Role of Snow and Ice in Hydrology, Vol. 1. IAHS-UNESCO-WHO, Proceeding of Banff Symposium, September 1972, 227-241.
- 6) 神岡 忍・黒岩大助 1976 高密度雪における光の減衰について. 低温科学, 物理篇, **34**, 49-58.
- 7) 吉田順五 1959 積雪含水率測定用熱量計. 低温科学, 物理篇, **18**, 17-28.
- 8) Weller, G. 1960 Radiation diffusion in Antarctic ice media. *Nature*, **221**, 355-356.
- 9) 深見浩司・小島賢治 1980 積雪の内部昇温. 低温科学, 物理篇, **39**, 109-117.

Summary

A device capable of measuring the extinction coefficient of solar radiation within a snow cover was developed, using small silicone photocells as the sensors. An output of a photocell which is modulated by loading resistance R , is amplified by an operational amplifier. The influence of solar radiation fluctuation is lowered by calculating the ratio of the output of the photocell within a snow cover to that on the snow surface. The principle of the device is shown in Fig. 1, the photograph of the device is shown in Fig. 2.

A series of calibration of the sensor (photocell) was conducted to examine whether or not the device allows accurate measurement of the extinction coefficient. The amplified output of the photocell V is related to the solar radiation I measured by a pyranometer in the field, using the graphs in Fig. 3. An influence of putting a photocell into snow upon the measured results is checked by a optical fiber which makes negligible the disturbance of the solar radiation field within a snow cover. (Figs. 4, 5 and 6). And another type of photocell which differs in wavelength sensitivity is used to check the wavelength dependence of the extinction coefficient (Fig. 7). It followed from the result of these calibrations that the device was capable of measuring the extinction coefficient accurately.

The two examples of the results which were gained from field measurements are shown in Fig. 8. The solar radiation fluxes, both downward and upward, decrease exponentially with the depth x , as described by eqs. (1) and (2).

The relation between the extinction coefficient μ and the density ρ of dry snow is shown in Fig. 9. The value of μ changes from 0.37 cm^{-1} to 0.97 cm^{-1} in the density range of $0.1 \sim 0.5 \text{ g/cm}^3$. It decreases in the metamorphism process from new snow to slightly compacted snow, and increases in the settlement process from slightly compacted snow to compacted

snow. If the density is equal, the extinction coefficient decreases with an increase in an average grain size. The relation μ and the water content W of wet snow is shown in Fig. 9 with the average grain size as a parameter. The value of μ is $0.23 \sim 0.58 \text{ cm}^{-1}$ in the density range of $0.43 \sim 0.53 \text{ g/cm}^3$ and in the water content range of $5 \sim 15\%$. The grain size dependence of the extinction coefficient as mentioned above is clearly shown in Fig. 10. And the tendency of decrease in extinction coefficient with an increase in water content is found to be slight. In these manners, the extinction coefficient changes according to the structure of snow.