



Title	積雪による日射の吸収
Author(s)	吉田, 順五
Citation	低温科学, 4, 17-26
Issue Date	1948-10-30
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/17454
Type	bulletin (article)
File Information	4_p17-26.pdf



[Instructions for use](#)

積雪による日射の吸収

吉田 順五

(低温科学研究所 應用物理學部門)

I 表面にまいた土の影響

(1) うちのりが、たてよこ 11.5×22.0 cm, ふかさ 10 cm の木の箱をふたつ作つて、兩方におなじ性質の雪をおなじ条件でいつばいにみたく。箱のよこ板に、うえのへりから 1.5 cm, 3.3 cm, 6.7 cm へだたつたところに穴をあけて、直径 3 mm のほそいアルコール寒暖計を水平にさしこみ、寒暖計の球部が箱の中心線のうえにくるようにしておく。こうして、雪の表面から、三つの深さの點の溫度をはかる。寒暖計にうえから順々に 1, 2, 3 と番號をつける。すなわち、

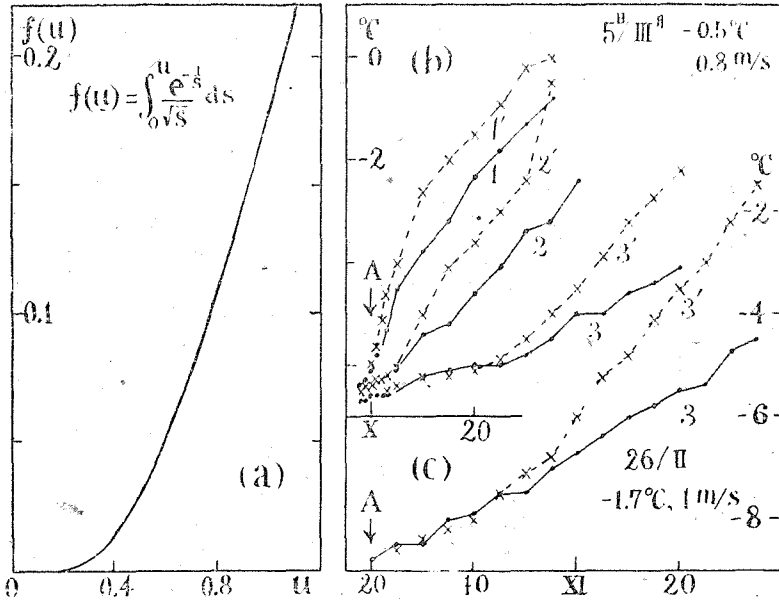
寒暖計	1	表面の下	1.5 cm
〃	2	〃	3.3 〃
〃	3	〃	6.7 〃

である。

ふたつの箱のうち、一方には雪の表面に土をまいて、あらかじめ兩方の箱を低温室のなかで -10°C ぐらいにひやしておく。これを屋外の積雪のなかに埋すめ、箱のなかの雪の表面がちようど積雪の表面とおなじ高さになるようにして日光をあてる。土をまいていない箱を I, まいた箱を II とすると、I と II とは日光の影響についてのほかはほはおなじ条件にあるので、箱のなかの雪は、まわりの積雪や空氣から熱をうけてしだいにあたたまるが、このことによる溫度上昇はふたつの箱であいひとしい。この原因による溫度上昇に、日光による溫度上昇が重なつてその和の溫度が寒暖計にあらわれる。したがつて、箱 I と箱 II との溫度の差は、雪の表面にまいた土によつて吸収された日光の熱の影響をあらわすことになる。

(2) 第 1 圖の (b) と (c) とに、雪の表面に石炭の粉と土の粉とをうす黒くなる程度にまいたときの測定結果をしめした。(b) は石炭のこな、(c) は土をまいたものである。横軸は時刻で、ローマ數字は時アラビア數字は分をあらわす。實線は表面が白いまいた箱 I の溫度で、破線が粉をまいた箱 II の溫度である。1, 2, 3 は寒暖計の番號で、箱 II の寒暖計の番號にはダツシュをつけた。A とある矢印は、そこで箱のふたをとつて日光をあてはじめたことをしめす。

温度はみな表面を黒くした箱Ⅱの方がたかい。表面が黒いと日光がよく吸収されるためである。日光の強さ、気温、風速などは一定でなく変化するので、表面にちかいかい1, 2の温度はその影響をうけて複雑な変化をするが、温度3は表面から7cmのところの温度で、表面でのこまかい変化の影響は平均されてしまつて、こゝまでは及ばない。それで、温度3だけをみることにして、温度1, 2は参考として考えることにする。



第 1 圖

(b) (c) に書きいれてある温度、速度は気温、風速である。

ふたをとつて、日光をあてだしてから、3と3'とはほとんど一致しているが、多少3'の方がひくい。そして、20~25分たつと、3'と3との差があらわれてきて、3'が3よりもたかくなる。日光の強さは、細かい変動をのぞけば、時間的にほぼ一定であるから、表面にまいた粉に吸収されるエネルギーも一定である。したがつて、粉から雪につたわる熱量 q も一定になる。つぎに、この熱量が雪のなかに傳わるようすを數學的にかんがえる。(定常状態でないので、粉が吸収する熱量が一定でも、粉の温度は變化して、 q は一定でないかもしれない。しかし、粉の熱容量は小さいから、だいたいにて q を一定とみてさしつかえない。)

(3) 雪の表面に原点をとつて、坐標 x を表面に垂直に雪のなかにむかつてとると

θ を温度、 t を時間

として、 $x=0$ では

$$q = -\mu \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_0$$

の関係がなりたつ。 μ は雪の熱傳導率で、 $q = \text{const}$ であるから、 $x=0$ での温度勾配 $\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_0$

は一定になる。 $t < 0$ では $\theta(x, t) = 0$ の温度分布であつたところえ、 $t = 0$ からはじまつて $x = 0$ に q/μ の温度勾配があらわれたとして、熱傳導の一次元の微分方程式をとくと、 $\theta(x, t)$ は

$$\theta(x, t) = \frac{\kappa}{\sqrt{\pi}} \frac{q}{\mu} \int_0^t e^{-\frac{x^2}{4\kappa^2(t-\lambda)}} / \sqrt{t-\lambda} \cdot d\lambda$$

となる。(たとえば、佐野静雄：應用數學 p. 125 参照)。 κ^2 は雪の温度擴散係數 (= $\mu/c\rho$, c : 比熱, ρ : 密度) である。いま

$$f(u) = \int_0^u e^{-\frac{1}{s}} / \sqrt{s} \cdot ds$$

とすると、うへの $\theta(x, t)$ は

$$\theta(x, t) = \frac{x}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{q}{\mu} \cdot f\left(\frac{4\kappa^2}{x^2} \cdot t\right) \dots\dots\dots (1)$$

となるが、この $\theta(x, t)$ が寒暖計 3' と 3 との温度差にひとしい筈である。

第1圖の (a) に $f(u)$ をあらわした。 $f(u)$ は u が小さいときはほとんど 0 で、 $u = 0.3$ あたりから急に大きくなりだす。したがつて

$$\frac{4\kappa^2}{x^2} t = 0.3 \dots\dots\dots (2)$$

をみたすような時刻 t から 3' と 3 との温度差があらわれるはずである。實驗につかつた雪の密度は $\rho = 0.35$ のしまり雪で、筆者が熱傳導率 μ と ρ との関係式⁽¹⁾としてもとめた

$$\log_{10} \mu = -4 + 2\rho$$

から μ を計算すると $\mu = 5.0 \times 10^{-4}$ cal/cm. °C となるので、これから温度擴散係數 κ^2 をもとめると (比熱 $c = 0.50$ cal/gr とする)

$$\kappa^2 = 2.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

がえられる。(2) 式で、 $x = 6.7$ cm とし、 κ^2 にこの値をいれて t をもとめると

$$t = 20 \text{ min}$$

となる。すなわち、實際に 3' と 3 とに温度差があらわれた時間 20~25 と一致する。これで、この温度差が表面での發熱によるものであることがたしかめられたわけである。また、だいたい 30 分間は、表面の發熱のえいきようが温度 3, 3' には及ばないと考えてよい。

(4) 60 分たつと、 3' と 3 との温度差は、第1圖 (b)(c) いずれのばあいも、 1.90°C なる。しかし、(1) 式の θ とくらべるためには、この 1.90°C は小さすぎる。雪をいれた箱の巾はせまく、雪の表面と寒暖計との距離とおなじ程度の中である。箱のまわりは 0°C にたもたれているから。表面からくる熱の流れは全部が x 方向に平行にならず、一部は左右にそれる。それで箱の中央の線のうへの温度は熱の流れが x 方向に平行に流れると考えた一次元のばあいにくらべてひくくなる。このことに對する補正をつぎのようにしてもとめた。箱の長さを水平方向に無限と考え、二次元の熱のながれを考える。そして、箱のそとがわの温度を 0°C 、雪の表面温度を 1°C に

たもつておいた定常状態での寒暖計3の温度を θ_3' とする。いつぼう、箱の中も無限にひろいと
したときの一次元の定常状態での3の温度を θ_3 とすると、計算の結果

$$\theta_3' : \theta_3 = 39 : 50$$

となつた。これは、定常状態についてもとめたもので、実験したときの条件とはちがうけれど
も、實測された温度差をうへの比率にしたがつて補正すれば、一次元の熱の流れの場合に對す
るほど正しい値になるであらう。

實測された温度差 1.9°C に $50/39$ をかけると 2.4°C となる。したがつて、一次元の問題として
考えた $\theta(x, t)$ について

$$\theta(6.7 \text{ cm}, 60 \text{ min}) = 2.4^{\circ}\text{C}$$

の関係がなりたち、これから(1)式をつかつて、表面にまいた粉が雪にあたえる熱量 q がも
とめられる。その結果は

$$q = 16 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{hr}$$

となつた。

ロビッチ日射計ではかつた水平面の日射量 Q は、第1圖の(b), (c)について

$$(b) \text{ のばあい } \quad Q = 54 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{hr}$$

$$(c) \quad // \quad Q = 48 \quad //$$

であつた。したがつて q は Q のほど30%となる。

(5) q の値は、まいた粉の量によつてかわるはずである。いまのばあい、表面がうすぐろ
くなる程度にまいたのであるが、顕微鏡で雪の表面の寫眞をとつて、まいた粉が雪の表面をか
くしている面積と全面積との比をもとめたら20~25%であつた。

日光に對する粉の吸収率は90%としてよいであらう。すると、雪の表面にまいた粉は、粉の
表面遮へい率を23%として、投射する日光 Q の $23 \times 0.9 = 21\%$ しか吸収しないことになる。
それにもかかわらず粉から雪に Q の30%の熱が伝えられるのはおかしい。しかも、粉が吸収し
た熱は全部雪に伝えられるのではなく、一部は空気にもあたえられるから、粉が吸収する熱量
は30%よりも大きい筈である。しかし、この矛盾はつきのように考えればとりのぞかれる。粉
にかくされていないところから、雪のなかにはいりこむ日光は77%になるが、このうちの70%
は雪のなかで散亂されてまた外えでようとする。これがまた粉によつて一部吸収されるから
實際に粉が吸収する熱量は Q の

$$21 + 77 \times 0.7 \times 0.23 \times 0.9 = 32\%$$

になる。

これでみると、土の粉が吸収した熱量は $0.32Q$ で、粉から雪に與えられた熱量は $0.30Q$ であ
る。もちろん、この32とか30という數字はそれほど正確なものではないが、それにしても、

粉が吸収した熱のほとんど全部が雪に與えられるということができる。粉からは、その一部の熱量が空気にもあたえられるが、それが非常に小さいわけで、この実験をおこなつたような気温 $-1 \sim -2^{\circ}\text{C}$ 、風速 1 m/sec という条件では、ほとんど0であると考えてよいことになる。

(6) よこれのない雪の表面の光の反射率は普通70%であるから、投射した日光の30%が雪のなかで吸収される。この吸収は表面だけでおこるのではなく、あとでとりあつかうように、表面ちかくのかなり厚い層でおこる。このため、雪のなかで熱が発生して、その場所の温度をたかめる。しかし、第1圖の(b)、(c)の3と3'との温度差が30分ちかくもほとんどあらわれなかつたことは、表面に粉をまいてもまかなくても、雪の内部で発生する熱にはほとんど變りがないことをしめしている。すなわち、粉をまいても、雪の内部にはいりこむ光の量はあまりへらなかつたわけで、粉がおおつている面積がうえにのべたように全面積の23%という小さいものであることからうかがわれることである。しかし、ごく少しではあるが、さきに注意したように、第1圖(b)、(c)で、はじめの20 min 間3'が3よりすこしひくく、雪のなかにはいる光の量がへつたことの影響を示している。

(7) うえのことを、投射した日光の強さを100として表にとりまとめると第1表のようになる。

第1表 積雪によつて日射がうける變化
 気温 -1.5°C 、風速 1 m/sec 、雪の比重 0.35

		土をまいたとき	土をまかないとき
(1)	投射日光の強さ	100	100
(2)	土の粒の表面遮へい率	0.23	0.00
(3)	表面で吸収される投射光	$100 \times 0.23 \times 0.9 = 21$	0
(4)	雪のなかへはいる光	$100 \times (1 - 0.23) = 77$	100
(5)	雪のなかで吸収される光	$77 \times 0.3 = 23$	$100 \times 0.3 = 30$
(6)	反射光として内部から表面に達する光	$77 \times 0.7 = 54$	$100 \times 0.7 = 70$
(7)	表面で吸収される反射光	$54 \times 0.23 \times 0.9 = 11$	0
(8)	吸収される光の全部: (3) + (5) + (7)	65	30
(9)	土の粒が吸収する光: (3) + (7)	32	0
(10)	土の粒から雪につたわる熱	30	0

表の(1)から(9)までは簡単な推論でえたものであるが、(9)の値が実際に測定してえた(10)の値とだいたい一致することは、この簡単な推論が正しいことの裏づけとみてよい。(8)の値を比較すると、直接に日光から雪に與えられる熱エネルギーが、雪の表面にうす黒くなる程度に土をまくことによつて、だいたい2倍に増すことになる。また、この測定は、気温が -1°C ぐらいのときに行つたもので、雪が盛んにとける頃の気温はもつと高い。気温が高ければ高いほど、土の粉から雪にゆかないで空気に與えられる熱はへるわけである。それゆえ普通の場合、

土が吸収した熱は、そのほとんど全部が雪に伝えられると考えることができる。

II 雪の内部で吸収される光

(1) まえの章では、表面から内部にはいつた光の吸収については、その全體をひとつのものにまとめて考えた。この章では、それをこまかく考えてみる。

積雪のなかに光がはいると光は擴散光になるが、この擴散光を下むきと上むきとのふたつの部分にわけろ。光の進むむきが、下むきの成分をもっているものはみな下むきの光のなかにいれ、上むきの成分をもつものはみな上むきの光のなかにいれる。そして、水平な 1cm^2 の面に 1sec のあいだにあたる下むきの光の量を A 、上むきの光の量を B とする。表面から下むきに坐標 x をとり、厚さ dx の層を考えると、 A 、 B のうちの一部 $aA dx$ 、 $aB dx$ はこの層によつて吸収される。 a は吸収係數である。のこりの光は層を通過したり、層によつて散亂されるが、 A が散亂されると散亂された光の一部分は B になる。それを $\sigma A dx$ として、 σ を反轉係數といふことにする。のこりの散亂光や通過した光は A として層をとおりぬける。 A とおなじく、 B もまた、そのうちの $\sigma B dx$ が A に反轉される。

A 、 B に對しては

$$\left. \begin{aligned} dA/dx &= -(a + \sigma)A + \sigma B \\ -dB/dx &= -(a + \sigma)B + \sigma A \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

がなりたち、 $x = \infty$ で A 、 B が 0 になるといふ條件で (1) 式をとくと

$$A = I_0 e^{-\lambda x}, \quad B = \frac{\lambda - a}{\lambda + a} A$$

$$\lambda = \sqrt{a(a + 2\sigma)}$$

となる。 I_0 は積雪の表面に投射する光の強さで、 $x = 0$ での A の値 A_0 にひとしい。 $x = 0$ での B の値 B_0 は雪の表面から外へでてゆく反射光であるから、積雪表面の反射係數 r は

$$r = \frac{\lambda - a}{\lambda + a} \dots\dots\dots (2)$$

となる。

(2) あとで實驗と比較するが、實驗につかつた雪 (密度 0.35 のしまり雪) に對しては、大浦浩文の測定⁽⁴⁾によると

$$r = 0.7, \quad \lambda = 0.5/\text{cm}$$

がもつともたしからしい値である。 λ は、雪の表面のしたいろいろな深さのところ、上からくる光、すなわち A を測定してきめられる。外國の測定者による値には、 0.07 から 0.45 にわたるいろいろな値があり、日本では泉末雄⁽²⁾と吉村信吉⁽³⁾とがそれぞれ 0.127 、 0.167 の値を得た。大浦浩文の値は、これらの値にくらべると非常に大きい、筆者とおなじ場所 (札幌市、北海道大學構内) の雪についての測定で、いまのばあい、もつとも適當な値と思はれるので、その

染めてあるため、光をよく吸収するので、そのために3の方が3'よりも高くなつた心配がある。しかし、表面から7cmほどの深さでは、この影響も多少あるが、第2圖の3と3'とにみられる温度差に比べれば小さいことを、ほかの方面でたしかめてある。

日光をあてると3と3'との温度差がすぐにでてくることは、箱Iの3の場所で光が吸収されたためとみななければならぬ。30minで0.8°Cの温度差になつたが、吸収された熱が全部この温度上昇につかわれたと考えると、雪の密度を0.35として

$$0.8 \times 0.35 \times 0.5 (\text{氷の比熱}) = 0.14 \text{ cal/cm}^3$$

となる。これは30min間の値で、1時間については

$$0.28 \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{hr}$$

である。

(5) ロピッチ日射計の測定によると、日射量は50 cal/cm²・hrであつた。(3)式のI₀にこの

第2表

積雪の表面した6.7cmでの光の吸収

投射日光 cal/cm ² ・hr		50	59
吸収熱量 cal/cm ³ ・hr	計等値 實測値	0.28	0.34
		0.28	0.34

値をいれて吸収エネルギーを計算することができる。第2表の2行目に、この計算値と、うえのようにして実験できめた値とをあげた。

第2圖(b)は、箱Iにはガラス板(厚さ2mm)、箱IIには磨いた亜鉛板(厚さ0.5mm)をかぶせた場合のものである。両方の箱とも、雪をつめただけで、なかに亜鉛板はいれてない。Iでは日光が雪のなかにはいるが、IIでは全然はいらない。そのほかの點では、境界条件がほぼひとしいので、第2圖(a)でとおなじことがいわれる。

第2圖(a)の場合でも(b)の場合でも、光が雪のなかにはいつて熱を發生するが、表面にちかいほど發熱がつよく、温度上昇が大きいはずである。この表面ちかくの大きい温度上昇が箱Iの寒暖計3にえいきようするおそれがある。しかし、まえの章でみたように、30minでは、表面の發熱は寒暖計3まではとどかない。それゆえ、寒暖計3と3'とは、箱のふたをとつて日光をあてだしたのちの30min間は、その場所で發生する熱のあるなし以外にはまつたくおなじ条件にある。

第2圖(b)の場合にも、3と3'との温度差は、時間に比例して大きくなり、30minで1.0°Cになつた。これは0.34 cal/cm³・hrの熱の吸収にあたる。日射量は59 cal/cm²・hrで、これから計算した値を第2表の第3行に示した。

(a)、(b)ふたつの場合とも、實測値と計算値とはまつたく一致しているが、これは偶然であろう。しかし、このことから、吸収係數 α を0.1/cmとしても、たいした誤りはないことがたしかめられたわけである。

(6) $\alpha = 0.1/\text{cm}$ として $\sqrt{\alpha(\alpha + 2\sigma)} = \lambda = 0.5$ から反轉係數 σ を計算すると

$$\sigma = 1.2/\text{cm}$$

となる。

なお、 $\lambda = 0.5/\text{cm}$ として計算すると、吸収されるエネルギー全体の 50% は表面から 1.4 cm までの間で、90% は 4.6 cm までのあいだで吸収されることになる。融雪期になつてからでも、気温がさがつて、積雪の表面が 0°C 以下になることもある。しかし、日射のために、内部で熱が発生するので、表面ではなく、内部で融雪がおこることもありうるわけである。

摘 要

積雪の表面にまいた土によつて吸収された日光のエネルギーがどの程度に雪につたわるかをしらべるため、つぎのような測定をした。木の箱に雪をつめて表面に土をまき、 -10°C にひやす。これを積雪のなかにうずめて日光をあて、箱の雪の内部の温度の變化を測定する。表面で雪に與えられる熱量 q が雪のなかに傳わつてゆく速さを熱傳導の理論からもとめ、測定から知られる實際の温度上昇と比較して q の値を定めた。一方、雪の表面の寫眞をとつて、土の粒が雪の表面をおおっている面積をもとめ、それから土の粒が吸収する日光のエネルギー q' を計算した。日光の強さは、ロビツチ日射計で測定した。その結果、 q は q' の 90% 以上になり、土が吸収した熱はほとんど全部雪に傳えられることがわかつた。

積雪の表面にあたる日光は、雪のなかにまではいる。表面からの深さを x とすると、雪のなかの光の強さは $e^{-\lambda x}$ に比例する。光の一部は雪に吸収されて熱になるが、その吸収係数 α は λ と、雪の表面反射係数とがわかれば理論的に計算できる。その結果 $\alpha = 0.1/\text{cm}$ となつた。しかし、このきめかたはあまり間接なので、うゑに説明したのとおなじように、木の箱に入れた雪に日光をあて、その温度上昇から雪の内部の發熱量をもとめた。その結果は、 $\alpha = 0.1$ として計算した發熱量とよく一致した。

この研究は文部省科學研究費、日本學術振興會補助により行つた。測定は笹谷雅信、内海威彦の兩君にしてもらつたのであつて、こゝに記して感謝の意を表わす。

文 献

- (1) 吉田 順 五 1948 積雪塊の熱傳導率の測定 低温科學, 3, (印刷中).
- (2) 泉 末 雄 1936 積雪の光線透過率 氣象集誌, 14, 92.
- (3) 吉村 信 吉 1937 菅平に於ける積雪中の光度測定 天氣と氣候, 4, 112.
- (4) 大浦 浩 文 1948 (印刷中)

Résumé

I. Soil particles scattered on the snow surface accelerate melting of snow, because they absorb well the heat of sun beams which fall upon them and share it to the snow. Heat

quantity q which is given by the soil particles to the snow was determined experimentally. Two wooden boxes I and II of the same size $12 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$ were filled up to their rims with snow (specific weight: 0.35) and a thermometer (diameter: 3 mm) was inserted horizontally into the snow through a small hole on one side of each box at the depth 6.7 cm from the snow surface. After having been cooled to -10°C in a cold chamber, the boxes buried in the snow cover with their rims in the same level of its surface,

The surface of the snow in the box II was scattered with soil particles and that of the box I was not. Temperature difference ΔT was observed between the thermometers of each box. ΔT must be due to the heat quantity q . By solving differential equation of heat conduction with appropriate boundary conditions, functional relation between q and ΔT was deduced and q was calculated by means of this function and the observed value of ΔT .

q was found to be more than 90% of the heat quantity q' which the soil particles absorbed from the sun beams.

II. Some of sun beams which fall upon the snow penetrates into its interior and is absorbed and scattered by its ice granules. Intensity I of diffuse light in the interior of snow cover can be expressed by a formula $I = I_0 e^{-\lambda x}$, where x is the distance from the snow surface and I_0 is the intensity of the direct sun beams. The absorption coefficient α of light in the interior of snow cover can be calculated from the values of λ and reflection power r of snow surface. By adopting the values $r = 0.7$, $\lambda = 0.5/\text{cm}$., α is found to be 0.09/cm. But the above determination of α is very indirect. So the author tried to determine it by a more direct way.

The same boxes as in the above experiment I were used. A sheet of polished zinc plate was buried horizontally in the snow of the box II at the depth 1.5 cm. from the snow surface. The sun light penetrated deep in the box I, but it did not in the box II stopped by the zinc plate. The effect of absorbed light in the interior of snow manifested itself in a temperature of the thermometer of the box I higher than that of the thermometer of the box II.

The temperature difference observed between the two thermometers was in good agreement with the value of temperature difference which was calculated by assuming 0.09 for the value of absorption coefficient α .