

積雪における可視光の透過実験—青い雪—

Transmission of visible radiation in snow layer

—Blue snow experiment—

三浦辰也 (北海道教育大学札幌校*), 尾関俊浩 (北海道教育大学札幌校)

安達聖 (防災科学技術研究所雪氷防災研究センター)

富樫数馬 (防災科学技術研究所雪氷防災研究センター)

Tatsuya Miura, Toshihiro Ozeki, Satoru Adachi, Kazuma Togashi

1. はじめに

2014年2月に記録した関東甲信地方の記録的な大雪は交通に大きな影響をもたらしただけでなく、「雪が青く見える」ことが大きな話題を呼んだ。これは雪粒そのものが青く見えるのではなく、積雪の穴や割れ目を覗いた色が水色に見えるというものである。このとき積もった雪は、さらさらとした、雪粒間の結合が弱いガラス片が集まったような雪の結晶で、角柱が多くみられたことが報告されている¹⁾。

氷塊を長距離透過した光が青く見える現象は一般によく知られている。図1はローヌ氷河(スイス)に開けられた氷のトンネルの内部を撮影した写真であるが、氷の壁は青白く見える。氷に入射した光は距離とともに指数関数的に減衰する。紫外線からマイクロ波にかけての減衰係数(または吸収係数)は多くの人によって測定されており、光の波長 λ に依存することが知られている²⁾。氷は可視光領域(0.4~0.7 μm)ではほとんど透明であるが、赤外領域(0.7~3 μm)では減衰係数が大きく不透明である。Warrenら³⁾が可視光領域から赤外領域についてまとめた例では、減衰係数は波長0.4 μm 前後を極小値として0.1 m^{-1} よりも小さな値を示す。

WarrenとBrandt⁴⁾が既往のComplex index of refraction m に関する計測結果を改めたところ、虚部 m_{im} の波長0.2~0.5 μm における値はそれまで小さいとされていた値よりもさらに小さいことが明らかになっている。なお m を虚部 m_{im} と実部 m_{re} により $m=m_{re}+im_{im}$ と表すと、 m_{im} は減衰係数 k_{abs} と $k_{abs}=4\pi m_{im}/\lambda$ で関係づけられる。したがって、太陽光のうち青から緑にかけての波長(約0.43~0.55 μm)がより多く透過した結果、トンネルの壁の色が青白く見えたことがわかる。



図1 ローヌ氷河(スイス)の氷のトンネル。透過光は青く見える。

通常の積雪は白く(透過光は白いまま暗く)見える。一つ一つの雪の結晶は透明な氷粒であるが、積雪に入射した光は吸収と散乱を受け、反射光は多重散乱の結果白く見える。一方、透過光は急激に減衰する。積雪の減衰係数も多くの人によって測定されているが、その波長依存性については結果に相違が見られる^{3) 5)}。これは積雪の粒径、密度、含水率などにも大きく依存するからである。

*現在 北海道大学

「青い雪」が観察されるのは雲粒なし降雪結晶に起因すると指摘されている¹⁾⁶⁾。そこで本研究では、結晶形の違う雪を用意して、積雪の厚さを変えて透過光を測定し、青い雪の見える条件を調査した。

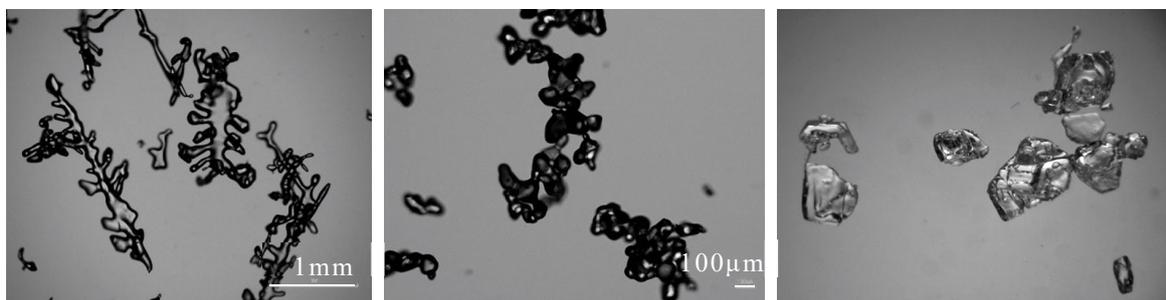


図2 実験に用いた積雪の結晶の接写。左から積雪 A, 積雪 B, しもざらめ雪。

2. 実験方法

2014年2月の関東甲信地方の降雪では角柱やガラス片が集まったような結晶が積もったことが分かっているが、そのような Solid (無垢) な雲粒なし降雪結晶を実験用に集めるのは難しい。そこで、風洞型表面霜作成装置で生成した表面霜を使うことを想定した。人工表面霜は一回の生成で 0.8 m^2 の面積で得られる。しかし本研究では同時に行った実験に表面霜を用いたため十分な量を確保できず、苫小牧で採取した天然のしもざらめ雪を用いることとした。また、均一な結晶を積層させるため、防災科研 CES の降雪 A, 降雪 B を篩 (ふるい) にかけて積雪 A, 積雪 B とした。

積雪 A は樹枝状の大きな結晶で、結晶の長径は 2 mm ほど、短径は $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ ほどである (図2左)。密度は 110 kg m^{-3} と密度の小さい積雪であった。積雪 B は水滴を膜に噴霧して作った降雪を用いており、形状は粒状の小さな結晶の集合体で、各粒径は 0.1 mm ほどである (図2中)。一方、密度は大きく 330 kg m^{-3} であった。しもざらめ雪は角ばった形状をしており、粒径は 2 mm ほどである (図2右)。しもざらめ雪を篩にかけて作成した積雪の密度は 250 kg m^{-3} であった。

本研究では、高さ 90 cm の実験箱の上部に光源を取り付け、箱の下部に円形の穴をあけアクリル板を敷き、光源からの光が試料を透過して箱の下に設置したセンサーで捕らえられるようにした。光源とアクリル板の距離は 70 cm である。透過光の測定にはフィールド携帯型分光放射計 Field Spec (ASD 社) を用いた。実験装置概図を図3に示す。実験箱内部は塗料で黒く塗られており、壁面からの反射光が積雪やセンサーに入射しないようにした。アクリル板は厚さ 3 mm 、全光透過率約 93% 、可視光領域ではほぼすべての光を透過するものを使用した。また、本実験では光の強度を高めるために、集光レンズ NIKKOR 85 mm (ニコン, F1.4) を使用した。光源はフトリフレクタランプ (Panasonic, 500 W , 色温度 5500 K) を用いた。また、しもざらめ雪についてはその他に LED ランプ (朝日電器, 14 W , 昼光色, 全光束 1000 lm) と太陽光も用いた。

本研究では、積雪深を増加させるごとに分光計により透過光を測定した。したがって分光計より下方からの反射光がない実験であり、透過光が青く見えるかに特化した実験である。各波長の減衰係数 k は、透過光の強さ I が

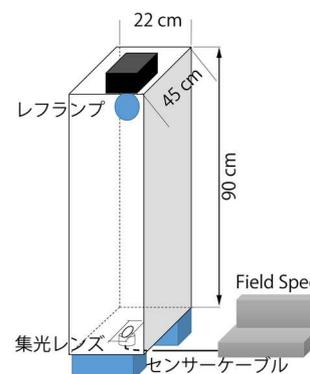


図3 実験装置概図。

$$I = (1 - a)I_0 \exp(-kz) \quad (1)$$

にしたがって積雪の深さ z にとともに減衰するとして回帰式より求めた。ここで I_0 は入射光, a はアルベドである。積雪が浅いときには黒い板上のアルベドは黒い板の影響を受けることが知られている⁵⁾。積雪が数ミリ積もるだけでアルベドは黒い板の影響を受けなくなるので, 最も薄い積雪の値は除いて k を求めることとした。

3. 実験結果

実験系の性能を確かめるため, 氷ブロックを用いて測定を行った。本実験では, 氷を電動糸鋸で加工し, 5 cm から 70 cm まで 5 cm 間隔で測定を行った。氷は内部に気泡が含まれていない透明な氷を使用した。図 4 に 380~750 nm の測定結果を示す。減衰係数は 380~450 nm (紫から青) まで 0.2 m^{-1} 程度と小さく, それより波長が長くなると徐々に大きくなる傾向がみられた。既往の研究³⁾と比較すると, 紫から緑の減衰係数の値は大きめだったものの, 増加傾向もオーダーも一致していた。この結果から, この実験系によって積雪の透過光を測定することとした。

図 5 に 3 種類の積雪の測定結果を示す。減衰係数は 380~750 nm の範囲で算出した。積雪 A は, 可視光全域にわたって約 40 m^{-1} であった。これは既往の研究⁵⁾とオーダーは一緒であるが, 密度が小さいことを勘案すると, 密度の割に減衰が大きかったと推察される。波長依存性はよく見ると 550 nm 以降は波長が長くなるほど減衰係数が大きくなっている。積雪 B の減衰係数は約 200 m^{-1} と大きく, 透過光は急速に減衰する。しかしその値を注意深く見ると 380 nm から 550 nm にかけて緩やかに減少, 550 nm 以降は波長が長くなるほど減衰係数が大きくなった。この結果数 cm の浅い積雪のときに透過光が青白くなる現象が見られた (図 6)。

しもぎらめ雪の減衰係数は積雪 B と比較して明らかに小さいため, しもぎらめ雪のような Solid な結晶は他の雪よりも光を通しやすと考えられる。しもぎらめ雪の減衰係数は 380 nm から 450 nm 付近まで減少し, 650 nm から 750 nm まで増加している。450 nm から 650 nm にかけて減衰係数が横ばいの傾向があるが, 摂動が見られた。450~650 nm はリフレクタ

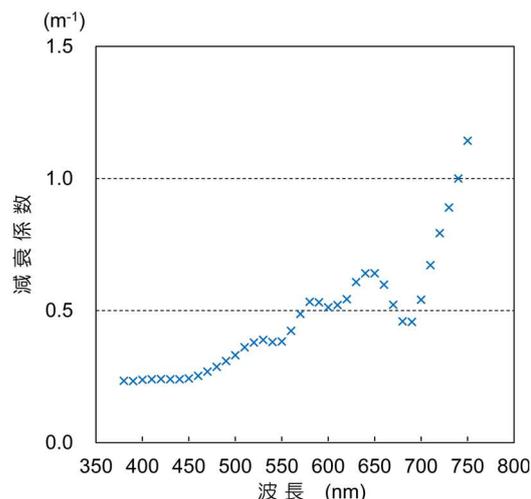


図 4 氷の減衰係数の波長依存性。

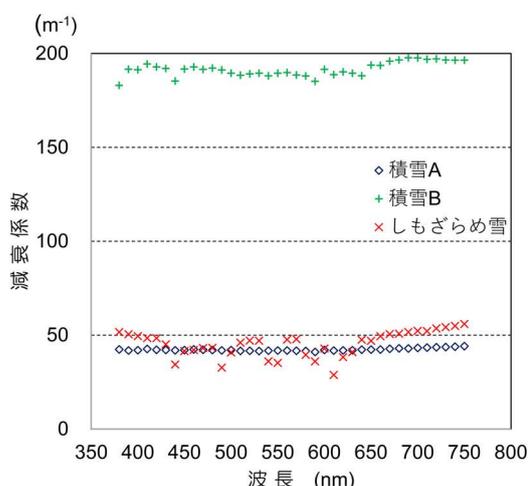


図 5 積雪 A, 積雪 B, しもぎらめ雪の減衰率の波長依存性。

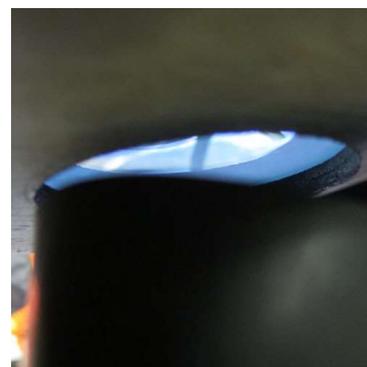


図 6 青い透過光。積雪 B。

ランプの出力が十分ではなかったことが原因の可能性があるので、他の光源を用いてしもぎらめ雪の追加実験を行った。LED ライトの出力はリフレクタランプと比べて小さかったので、光源の高さを 20 cm へ近づけて測定した。太陽光は高度約 19°であったので、分光計を約 40°に傾けて測定した。よって太陽光のみ約 20°の入射角で光が雪面にする条件であった。

図 7 に 3 種類の光源を使った測定結果を示す。なおデータは各光源の入射光が $0.1 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ 以上の部分だけを抽出した。3 種類ともに測定した 440~470 nm の値はいずれも 40 m^{-1} 前後であった。また、LED の減衰係数が全体的に小さい傾向はあったが、この値の差はしもぎらめ雪の積層の差であった可能性も考えられる。傾向としては 550 nm 以降は波長が長くなるほど減衰係数が大きくなっていった。

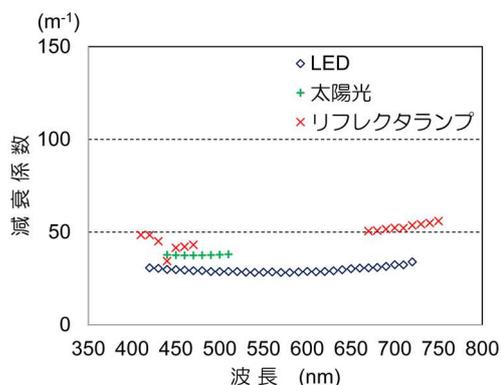


図 7 3 種類の光源による減衰係数の測定。積雪はしもぎらめ雪。

4. まとめ

3 種類の積雪ともに減衰係数は光の波長が 400~550 nm 付近で小さく、550 nm より波長が長くなるにつれて増大するという共通性は見られた。しかし、減衰係数の値は各積雪によって大きく異なった。これは、各積雪の密度や結晶の形状の違いのためだと考えられる。藤原と青木⁷⁾が行ったシミュレーションでは、大きな雪粒子ほど 450~500 nm の光が相対的に残りやすい結果が得られている。一方、いずれの積雪においても青から緑にかけての波長で減衰係数が小さい傾向はあるものの、氷のように長波長の色と比べて劇的に小さいわけではない。また氷の減衰係数に比べて $10^2 \sim 10^3$ 倍大きな値であることから、反射光は白く、積雪内部は暗くなり、積雪が青く見えることが希であることがわかる。しもぎらめ雪のように減衰係数が 50 m^{-1} 以下の Solid な大粒の結晶の場合は、積雪の層が厚くても透過光が感知でき、青白く見える可能性が高い。一方、積雪 B ではごく薄い積層の時に青く見える可能性がある。積雪 A で青い雪が見える可能性については特定に至っていない。今後は入射光の強度を大きくすること、スペクトルの合成で透過光の色を確認して最も青く見える積雪深を究明することが課題である。

【参考・引用文献】

- 1) 石坂雅昭, ほか 6 名, 2015: 2014 年 2 月の南岸低気圧時の新潟県下における降雪粒子の特徴—関東甲信地方の雪崩の多発に関連して—, 雪氷, **77**(4), 285-302.
- 2) 前野紀一, 黒田登志雄, 1986: 第 4 章氷の物性. 雪氷の構造と物性, 東京, 古今書院, 81-130.
- 3) Warren, S.G., Brandt, R.E., Grenfeli, T.C., 2006: Visible and near-ultraviolet absorption spectrum of ice from transmission of solar radiation into snow. *App. Optics*, **45**(21), 5320-5334.
- 4) Warren, S.G., Brandt, R.E., 2008: Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: A revised compilation. *J. Geophys. Res.*, **113**, D14220, doi:10.1029/2007JD009744.
- 5) 小野延雄, 1994: 第 1 章雪氷水文現象. 雪氷水文現象, 東京, 古今書院, 1-15.
- 6) 四手井綱英, 1953: 表層雪崩の一特異例. 雪氷, **14**(2), 116-119.
- 7) 藤原滋水, 青木輝夫, 1993: 氷の色・雪の色. 天気, **40**(3), 2pp.