小型フォト・トランジスタによる雪面の検出

木 村 忠 志* 清 水 増治郎*

要 旨

小型フォト・トランジスタを下端に固定した、外径4mm、長さ480mm、受光角 30° の照度測定プローブにより、雪面上10cmから雪面下20cmの範囲において、雪層からの散乱光の上向き成分照度を測定し、その垂直分布を調べた。

この結果、次の事柄が判明した。

1. 測定装置が示した上向き成分照度の垂直分布曲線は、雪面上では高さの増加に伴って、ほぼ指数関数的に増加し、雪面下では深さの増加に伴って指数関数的に減少し、雪面付近に変曲点をもつ。

2. 変曲点は、雪面の雪質、光の照射角度等の測定条件にほとんど関係なく、雪面を基準として垂直に、 $\pm 10\text{mm}$ の範囲内に位置する。

1. 序 論

積雪の深さ計の最重要構成要素となる、確度の高い雪面検出機構として、レーザー・ビームによるものが報告されている(木村, 1973)。これはHe・Neガス・レーザーの発生する、細く、かつ太陽常数に近い強度の光ビームを、受光面積が光ビームの断面積と同程度のシリコン光電変換素子で受けるもので、受光素子に小口径のフードをつけ、また小容量のプロワーを用いるなどの簡易な処置によって、外光および気象条件の変化から完全に独立した雪面検出動作を実現できる。しかし、この機構を用いて積雪の深さ計を構成する場合には、光ビームとフードの直径が小さいため、投光部と受光部の上下送り機構にきわめて高い精度が要求される(木村, 1974)。それで、より簡易な機構で積雪の深さ計を実現するために、雪面上下の照度分布による雪面検出をこころみた。

積雪層内の照度分布については、古くから研究されており、雪面から入射した光は、積雪層内では完全に拡散して、その照度は深さのみの関数であり(大浦, 1951b)、深さ z における照度 I_z は、Bouger-Lambertの法則に従っていて、雪面での照度を I_0 、係数を ρ として、

$$I_z = I_0 e^{-\rho z}$$

で与えられる(たとえば、Mellor, 1964)ことが、実測

によってたしかめられている(たとえば、工藤, 1940)。

一方、雪面上の照度の上向き成分については、垂直分布を直接測定した例はないようであるが、積雪層の厚さが40mm以上で、積雪層からの反射光の照度が一定値になる(Gidding and LaChapelle, 1961)という測定例がある。また、雪面からの反射が、雪面の状態、光の照射角によって影響される(大浦, 1951a)など、要するに、雪面上の照度の上向き成分は、積雪層内とは異なった垂直分布をもち、雪面がその境界になるので、雪面付近の上向き成分照度の垂直分布(以下、垂直分布と略記)から雪面を検出することは、原理的に可能である。

2. 実験装置

図1に実験装置の略図と測定結果の模式図を示す。垂直分布は、雪面上10cmから、雪面下20cmまで測定した。測定による積雪層の破壊をできるだけ少なくするために、外径2mmの小型フォト・トランジスタを、外径4mm、長さ480mmの真鍮パイプの先端に、アラルダイトで固定したプローブを作り、これを積雪層のなかに垂直に挿入して測定した。プローブの受光角は 30° である。

この照度測定プローブは、2相レバージブル・モーター、プーリーおよびワイヤーで構成した上下機構に固定し、野外的場合には約8mはなれた位置から操作した。これは、プローブから充分はなれていないと、測定者の体の動きによる付近の照度の不規則な変化が、プローブに拾われるためである。作動に伴う上下機構の影の変化

* 国立防災科学技術センター雪害実験研究所第2研究室。

図 1 実験装置の略図と測定結果の模式図

は、プローブの部分のみであり、測定値に不規則な変動をおよぼすことはない。

プローブの操作は、押しボタンスイッチ (P. B) と、逆転スイッチ (Sr) によりなされる。プローブのストロークは、上限リミット・スイッチ (S_1) と、下限リミット・スイッチ (S_2) によって 300mm に定めた。最初プローブを S_1 の位置まで引きあげて、プローブの先端が雪から 10cm の高さになるように、装置の高さを調整したのち、Sr を下降にセットし、P. B を短時間押してプローブを下降させる。30cm 下降すると S_2 が作動してプローブが停止する。次に、Sr を上昇にセットし、P. B を短時間押して、プローブを最初の位置まで上昇させる。プローブの上昇および下降速度は 20mm/s で、1 回の測定は 32~33 秒で終了する。この速度で雲による日射の変化の影響を受けることはなかった。

プローブの位置は、プーリー機構と連動させた 10 回転ポテンシオメーターによって電圧に変換し、一方フォト・トランジスタのエミッターから、照度に応じた電圧をとりだし、それぞれ XY レコーダーの X 軸と Y 軸につないで、垂直分布を記録した。測定の再現性を高くするために、定電圧放電特性をもつ水銀電池をフォト・トランジスタとポテンシオメーターの電源に用いた。

詳細は後述するが、XY レコーダーには、図 1 の右下

写真 1 実験装置 (低温実験室内)

図 2 XY レコーダーの記録

の略図に示すような垂直分布曲線が現われた。この曲線は雪面付近に変曲点 (I) をもっている。

3. 室内実験

写真 1 に、低温実験室内に組み立てた実験装置を示す。長さ 38cm × 幅 25cm × 高さ 35cm の木箱のなかに氷をカンナで削ってつめ、これを 2 週間放置して作った人工シマリ雪層について実験した。雪面はできるだけ平らにした。また、スプレーで水をかけて、表面のみザラメ化した場合についても測定した。照明には写真用のフラッドランプを用い、照射角は 37° および 62° をとった。照度はスライダックによって加減した。

プローブの上下機構は、長さ 77cm × 幅 9cm × 厚さ 2

図 3 照度垂直分布の傾向

図 4 室内実験の結果

cm の 2 枚の木板を平行に並べ、内側に戸車用のレールをつけたガイドフレームのなかに、両側に 4 箇の戸車をつけた長さ 25cm × 幅 3 cm × 厚さ 2 cm の木のベッドをはめこみ、ベッドにプローブの上端を固定した。この上下機構は、かたい雪層の中にもプローブを挿入できるように、機械的強度を充分もたせたので、かなり大型にな

った。測定値には、装置の影による照度分布の変化も含まれるが、これは一定値であり、分布曲線の形に不規則な変動をおよぼすことはない。

図 1 に、室内実験で得られた XY レコーダーの記録例を示す。縦軸は照度に比例した電圧で、横軸はプローブ先端の高さである。プローブは、雪面上 10cm から下

降し、雪面下20cm まで挿入した後、もとの位置まで上昇させ、往復の分布曲線を得た。測定は、しまり雪の雪面とざらめ雪の雪面のそれぞれについて、挿入場所を20 mm ずつずらして12回ずつ、計24回行い、1回の測定ごとに、プローブの上下を6ラウンドくり返した。1回の測定結果は、図示のように座標軸をずらして、6ラウンド分を1枚の記録紙に記録した。

室内実験で得られた垂直分布曲線の傾向を、図3に示す。横軸は雪面を基準にしたプローブの位置で、雪面がゼロ、+側が雪面上の高さである。縦軸は照度に比例した量をとった。垂直分布曲線は雪面付近に変曲点をもつが、これは雪面と必ずしも一致しない。そこで、雪面を基準にした変曲点の高さ ΔL は、図中に記入した1～6の要因に影響されると考え、その程度をそれぞれの場合について調べた。これらの要因のうち、1～3は外的要因であり、4と6は実験装置の特性に関するものである。1は雪面および雪面上の雪片の種類で定まる。2はプローブの片道行程で得られた照度の最大値と最小値の差で、図3の場合には+10cm と -20cm の照度差になる。3は雪面への光線の照射角度で、野外では太陽高度に相当する。室内実験では37° と62° について調べた。4は装置のバック・ラッシュで、装置の構造上、とくにプローブ上昇時に大きく現われる。5はプローブをくり返し上下したときの、積雪層に生じた挿入孔の変形の程度で、ラウンド別に表示した。6は変曲点付近の照度の減少率であって、これが小さいほど変曲点はよみとりにくくなる。

室内実験の結果を図4に示す。3段にわけて表示した。横軸はくり返しの回数で全体に共通する。縦軸は各段とも ΔL で、雪面を基準として+側が雪面上、-側が雪面下を意味する。

最上段は、資料のすべてを、上昇と下降のみ区別して記入したもので、白丸が上昇時、黒丸が下降時の値である。 ΔL の値は、くり返し回数とは無関係に様に分布し、 ± 4 mm の範囲に納まった。しかし、どのラウンドにおいても、上昇時の値の分布範囲が、下降時をうわまわっている。これは装置のバック・ラッシュによるものであろう。

下の2段は雪面の種類と照明の照射角度についてまとめたもので、白丸で人工しまり雪面、黒丸でザラメ雪面の場合をそれぞれ示した。上段は照射角37°、下段は62° の場合である。各ラウンドごとに上昇と下降を分けて記入した。

下の2段のグラフから、ザラメ雪の場合が+側にずれている様子が認められ、照射角62° の場合にこの傾向が

図5 照度差と変曲点の照度減少率の変化(実験室)

いちじるしい。この理由として、雪面上の雪粒とその周囲の明暗のコントラストが、ザラメ雪の場合により大きく、一方プローブの受光角が小さいことが考えられる。

図5は、照度差を横軸にとり、変曲点の照度減少率を縦軸にとって両者の関係を示した。上段が照射角37°、下段が62° の場合である。いずれも白丸が人工しまり雪面、黒丸がザラメ雪面の場合である。

図5から、しまり雪面からの光の散乱が、ザラメ雪面と比較して一樣なことがうかがわれる。ザラメ雪面の場合は、照射角37° において照度差が小さく、62° では大きい。そして照度減少率はしまり雪面の場合の1/2である。これは図4で述べた理由と同じ原因によるものであろう。また、照度減少率が最大値の20%以下になって、雪面付近の垂直分布がかなりダラダラした場合でも、 ΔL の値を ± 4 mm の範囲内で定めうることがこの結果から主張できる。

4. 野外実験

(1) 勇駒別における野外実験

1971年3月27日から4月2日まで、北海道勇駒別・白雲荘で野外実験を行った。実験地は大雪山系旭岳の西側、標高1,080m に位置し雪片の種類が豊富である。

写真2に実験装置を示す。プローブの上下装置は室内

写真 2 実験装置 (勇駒別)

写真 4 プローブの先端部 (雪面ザラメ)

写真 3 プローブの先端部 (雪面アラレ)

実験と同じもので、写真用の大型三脚で固定し、各測定ごとに約 0.5m ずつ位置を変えた。

写真 3 は、雪面上 10cm にセットしたプローブの先端部を示す。このときの雪面は直径 3mm ぐらいのアラレで、こまかな凹凸がたくさんあり、明暗のコントラス

図 6 測定ラウンドと ΔL の変化

トが強い。大雪片の場合にも同じようにこまかい影がたくさんできる。ふりたての雪面は、ほとんどの場合このような状態を示し、実験室のシマリ雪面とくらべて、はるかに凹凸がはげしい。

写真 4 は表面がザラメ化した雪面の例で、この場合は比較的なめらかであるが、暗い部分が点在している。しかし、ふりたての雪面の場合にくらべて明るさが一様である。

測定は、降雪時と照度変化のはげしいときを除いて、0700~0900および1300~1400のそれぞれの時間帯に1回ずつ行った。図 6 に、勇駒別で得られたすべての資料について、横軸にラウンド数、縦軸に ΔL をとって、

Yukoma-betu (Down)

○ Large Graupel	3mm ϕ ~ 4mm ϕ
◦ Small Graupel	$\approx$ 1mm ϕ
□ New Snow	2mm ϕ ~ 4mm ϕ
● Granulated Snow	Flat
◻ Wet New Snow	1mm ϕ ~ 2mm ϕ
■ Polluted New Snow	1mm ϕ ~ 2mm ϕ
◻ Small Grain New Snow	$\approx$ 0.5mm ϕ
1 2 3 6	Round Number

図7 照度差と変曲点の照度減少率の変化(勇駒別)

4L の分布状態を示した。図中の白丸はブローブ上昇時の値、黒丸は下降時の値である。白丸の分布が全体として上にずれているのは、装置のバックラッシュによるものと考えられる。室内実験の場合にくらべてその程度が大きいのは、装置のガタが輸送中に増加したことに原因している。この報告では、下降時の値のみをとりあつかうことにする。

(2) 勇駒別の実験結果

図6の黒丸の分布範囲は、雪面を基準として ± 10 mm になっている。これは実験室の結果の約2倍であるが、雪面の凹凸の相違によるものであろう。この分布状態と、考えられる要因との関係について以下に述べる。

図7に、横軸に照度差、縦軸に変曲点付近の照度減少率をとって、両者の関係を示した。各点は図の下段に表示した記号で記入し、雪面上の雪片の種類および状態を

区別した。また、各点に添記した数字はラウンドの回数を示す。各記号には、観察されたそれぞれの雪片の大きさを併記した。●印の Flat というのは、写真4のような状態である。■印は黄砂を含んで茶褐色に着色した雪で、3月30日早朝に降った。この研究では、垂直分布曲線上の変曲点の検出を主な目的としたので、照射光の照度は測定しなかったが、ザラメ化した雪面と黄砂を含んだ雪面の場合には、快晴時の測定がほとんどであったにもかかわらず、照度差が比較的小さくなった。照度差が小さいほど照度減少率も小さくなる傾向は、図5で示した室内実験の結果と同様であるが、各点のバラツキは図7の方がはるかに大きい。そして雪面が平らなほど、雪面上の雪片が小さいほど、平均曲線からのバラツキが小さい。また平均曲線の傾斜も、室内実験の1/3弱になった。ラウンドの効果は図7では判然としない。

図 8 照度差, ラウンド回数, 雪面状態による ΔL の変化

図 8 は, 照度差, ラウンド回数, 雪面の状態のそれぞれが, ΔL の大きさに及ぼす効果を示すもので, 横軸に照度差, 縦軸に雪面を基準として ΔL をとり, ラウンド別に 6 段に分けて表示した。また雪面の状態は図 7 と同じ記号で区別した。雪片が小さいほど, また雪面が平らなときに, ΔL の絶対値が小さくなる傾向が認められる。ラウンド回数と照度差は, それぞれはっきりした効果をもたない。

図 9 は図 6 の黒丸の分布に, 午前の測定値に m, 午後の測定値に a を添記し, また, それぞれの場合の雪質も表示したもので, 光の照射角の効果を示す。午前と午後と同じ状態の雪面を測定できたのは, 大粒のアラレの場

合だけであるが, 照射角は ΔL に対して, はっきりした効果を示していない。

(3) 嶽における野外実験

1971 年 3 月 20 日から 28 日まで, 青森県岩木町嶽温泉で, 前節と同様な野外実験を行った。実験地は岩木山の南麓, 冬期間風雪の強いところで, 積雪層はよくしまっており, アラレまたは, 日中融けて夜間に凍結した氷板に近い雪面が多く, プローブを挿入した穴の変形は少ない。

写真 5 は実験地の状況である。測定装置は室内実験および勇駒別の場合と同じ寸法と機構のもので, 直径 5cm の鉄パイプを加工した支柱に固定した。この写真の左側

図9 日射の照射角の効果

写真5 実験装置(嶽)

が北になるが、装置の北側の雪面が乱れているのは、支柱を設置する穴を掘ったためで、プローブの付近は自然雪面である。装置の操作は、北側に約10mはなれた地点から行った。

測定は0700~0830, および1300~1400の各時間帯に1回, それぞれ2ラウンドずつくり返して行い, プローブの下降時の値のみを採用した。

(4) 嶽の実験結果

図10は横軸に照度差, 縦軸に照度減少率をとって, 嶽温泉における測定値をすべて記入したものである。各点の添字はラウンド回数を示し, 白丸は積りたての雪面, 黒丸は融解後再凍結した雪面をそれぞれ意味する。

全体の傾向は勇駒別の場合とほぼ一致するが, ザラメ状の雪面とふりたての雪面の値に大きな相違はない。また, ラウンド回数の効果は全く認められない。

図11は横軸に照度差, 縦軸に ΔL をとって, ΔL の

図10 照度差と変曲点の照度減少率の変化(嶽)

分布範囲を示す。上段はラウンドと, 雪面状況を区別し, 下段は午前の測定と午後の測定を区別して示した。上段については, 各要因と全く関係なく, ΔL が ± 10 mm の範囲内に納まっている。下段については, 午後の測定値が午前の測定値よりも, やや上方に分布している。これは室内実験におけるザラメ化雪面の結果と一致する。

5. 考察

この研究では, 太陽光または人工光で照明されている積雪層から上向きに散乱する光の, 雪面の上下にわたる照度分布によって雪面を検出する方法について, その実

図 11 照度差と ΔL の変化

用性を、小型フォト・トランジスタによる細い測光プローブにより、室内および野外において実験的にしらべた。

室内実験では $\pm 4 \text{ mm}$ の雪面検出精度を得た。この場合には、雪面検出誤差の分布に、雪面の性質および雪面の照射角が、かなりの効果をもたらした。野外では $\pm 10 \text{ mm}$ の雪面検出精度が得られ、この場合には、雪面上の雪片の種類や雪面の性質のほかは、すべての要因が雪面検出誤差にはっきりした効果をもたなかった。このことは雪面上方の、雪面付近における照度分布が、雪面の性質によって大きく影響されていて、その他の要因

による効果がマスクされてしまうためと考えられる。

この雪面検出機構は、測光プローブを積雪層内に挿入する必要があるために、完全に非破壊的な雪面検出を行うことはできない。しかし、雪面にあけられた直径 4 mm 程度の穴は、少量の降雪によってふさがれてしまうので、積雪期においては、プローブの挿入孔が大きな測定誤差を生ずることはない。また、融雪期においても、プローブの挿入場所を、測定ごとに移動することによって、挿入口の拡大による誤差をさけることができる。

この雪面検出機構の機械的動作は、プローブの上下動

のみであるが、等速度で作動させることを必要としない。また上述した実験では、いずれの場合にも装置の垂直を目分量で取ったが、プローブの数度の傾斜は誤差にほとんど関係しないと考えられるので、プローブを完全に垂直に上下させる必要もないことになる。それで、この雪面検出機構によって積雪の深さ計を構成する場合には、機械的構造にあまり高い精度を必要とせず、安価な装置が実現できるであろう。

6. 結 論

この研究により、次の事柄が明らかになった。

1. 測定装置が示した雪面付近における散乱光上向き成分の垂直分布は、雪面付近に変曲点をもち、これによって雪面を検出することが可能である。
2. 変曲点と雪面の位置の相違は、雪面の雪質によってもっとも大きく左右されるが、測定条件によらず、雪面を基準にして $\pm 10\text{mm}$ の範囲内に、変曲点が位置する。

謝 辞

勇駒別の現地入りに際して、北海道教育大学旭川分校地学教室の桜井兼市助教授のお世話になった。また嶽の実験のために、北陸農業試験場農業気象研究室の大沼匡

之室長より、X・Yレコーダーを借用した。以上をしるして謝意を表明する。

文 献

- Giddring, J.C. and E. LaChappelle, 1961: Diffusion theory applied to radiant energy distribution and albedo of snow. *J. Geophys. Res.*, **66**, 1, 181-189.
- 工藤 清, 1940: 積雪中の明るさ. 雪氷, **3**, 9, 10-15.
- 木村忠志, 1973: レーザー・ビームによる雪面検出. 雪氷, **33**, 3, 13-20.
- 木村忠志, 1974: レーザー・ビームによる積雪の深さ計原型 (予定).
- Mellor, M., 1964: Properties of snow. *Cold Regions Science and Engineering*, III-AI., 73.
- 大浦浩文, 1951a: 積雪による光の反射及び透過について. I. 低温科学, Ser. A, **6**, 23-34.
- 大浦浩文, 1951b: 積雪による光の反射及び透過について. II. 低温科学, Ser. A, **6**, 35-40.

Snow Surface Detection by a Small Photo Transistor

Tadashi KIMURA and Masujiro SHIMIZU

(*Institute of Snow and Ice Studies, Nagaoka*)

By means of a measuring vertical probe, 480 mm in length and 4 mm in outer diameter, equipped at its lower end with a small size photo transistor, 30 degree visual angle and 2 mm outer diameter, the upward illumination of the scattering light from snow cover was measured, and the vertical distribution of the upward illumination has been investigated.

Through the analysis of the distribution, the following results were obtained:

(1) In the vertical distribution curve of the upward illumination, measured by above apparatus, increases exponentially with the height above the snow surface and it decreases exponentially with the depth under the snow surface. The curve, therefore, has an inflection point near the snow surface.

(2) The inflection point of the obtained curve is in the region of $\pm 10\text{mm}$ in vertical distance relative to the snow surface, irrespective of the measuring conditions such as the type of snow, the angle and the intensity of the light illumination.

(1973年10月15日受理)