小型フォトトランジスタによる雪面の検出

著者	木村 忠志, 清水 増治郎
雑誌名	国立防災科学技術センター 研究報告
巻	9
ページ	33-46
発行年	1974-03
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00000697

551.508.77:621.38

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
国立防災科学技術センター雪害実験研究所第2研究室

Detection of Snow Surface with a Small-sized Photo Transistor

By

Tadashi Kimura and Masujiro Shimizu

Institute of Snow and Ice Studies (Nagaoka),
National Research Center for Disaster Prevention

Abstract

By making use of a measuring vertical probe, 480 mm in length and 4 mm in external diameter, with a small-sized photo transistor, of 30-degree visual angle and of 2-mm external diameter, attached at the end of the probe, the upward illumination of scattered light from the snow cover was measured, and the vertical distribution of the upward illumination was investigated.

Results obtained by the analysis of the distribution are as follows:

(1) In the curve of vertical distribution of illuminations, the upward component of illumination increases exponentially with the increase of the height above snow surface, and below the snow surface the illumination decreases exponentially with the increasing depth. The curve, therefore, has an inflection point near the snow surface.

(2) The inflection point is almost independent of the snow nature and measuring conditions such as the angle and intensity of illuminating light, and the point lies in a range of vertical distance of ±10 mm from the snow surface which was taken as the datum surface.

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，1974 a）．これは，He-Ne ガスレーザーの発生する，細くかつ太陽定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，また小容量の送風機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 b）．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，1951 b），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 ν として，

$$I_z = I_0 \, e^{-\nu z}$$

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，鉛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 40 mm 以上で，積雪層からの反射光の照度が一定値になる（Giddings 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，1951 a）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鉛直分布をもち，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鉛直分布（以下，鉛直分布と略記）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．鉛直分布は，雪面上 10 cm から，雪面下 20 cm 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 2.0 mm の小型フォトトランジスタを，外径 4 mm，長さ 480 mm のしんちゅうパイプの先端に，アラルダイトで固定した探針を作り，これを積雪層のなかに鉛直にそう入して測定した．探針の受光角は 30° である．

この照度測定探針は，二相可逆電動機，滑車装置および鋼線で構成した上下機構に固定し，野外の場合には約 8 m 離れた位置から操作した．これは，探針から充分はなれていないと，測定者のからだの動きによる付近の照度の不規則な変化が，探針に拾われるためである．作動に伴う上下機構の影の変化は，探針の部分のみであり，測定値に不規則な変動を及ぼすことはない．

探針の操作は，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．探針の行程は，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 300 mm に定めた．最初探針を S_1 の位置までひきあげて，探針の先端が雪から 10 cm 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. を短時間押して探針を下降させる．30 cm 下降すると S_2 が作動して探針が停止する．次に，Sr を上昇にセットし，P. B. を短時間押して，探針を最初の位置まで上昇させる．探針の上昇および下降速度は 20 mm/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．

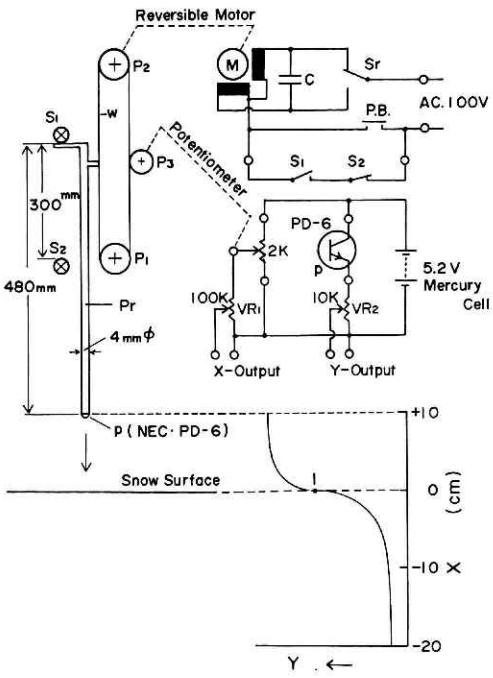


図 1 実験装置の略図と測定結果の模式図

探針の位置は，滑車機構と連動させた10回転ポテンショ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，鉛直分布を記録した．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ョ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の右下の略図に示すような鉛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たてた実験装置を示す．長さ 38 cm×幅 25 cm×高さ 35 cm 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，霧吹きで水をかけて，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．

探針の上下機構は，長さ 77 cm×幅 9 cm×厚さ 2 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個の戸車をつけた，長さ 25 cm×幅 3 cm×厚さ 2 cm の木のベッドをはめこみ，これを上下に動かすようにしたもので，ベッドに探針の上端を固定した．この上下機構は，かたい雪層の中にも探針をそう入できるように，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及ぼすことはない．

図2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，横軸は探針先端の高さである．探針は，雪面上 10 cm から下降し，雪面下 20 cm までそう入した後，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，そう入場所を 20 mm ずつずらして 12 回ずつ，計 24 回行ない，1回の測定ごとに，探針の上下を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鉛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探針の位置で，雪面がゼロ，プラス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．鉛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項目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項目は外的要因であり，4と6の項目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は探針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 +10 cm と −20 cm 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なる．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で，装置の構造上，とくに探針上昇時に大きく現われる．5は探針をくり返し上下したときの，積雪層に生じたそう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をよみとりにくくなる．

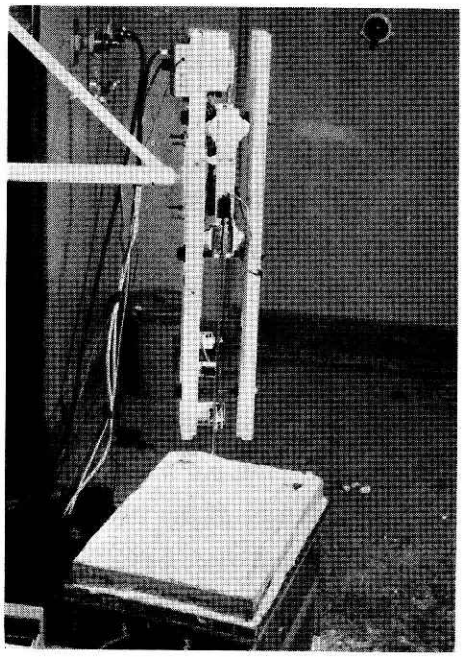


写真 1　実験装置（低温実験室内）

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

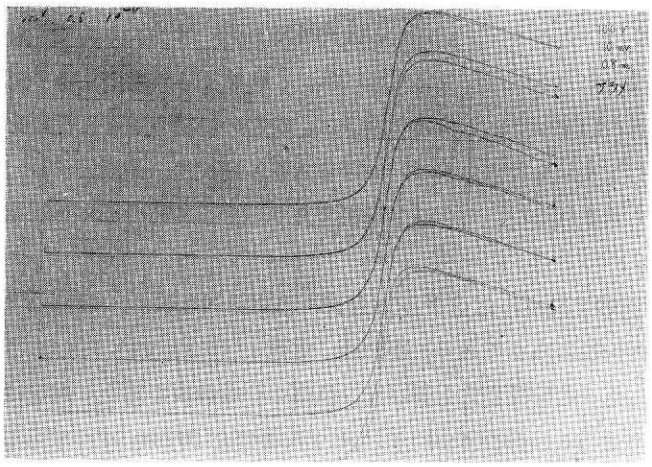


図 2　*XY* レコーダーの記録

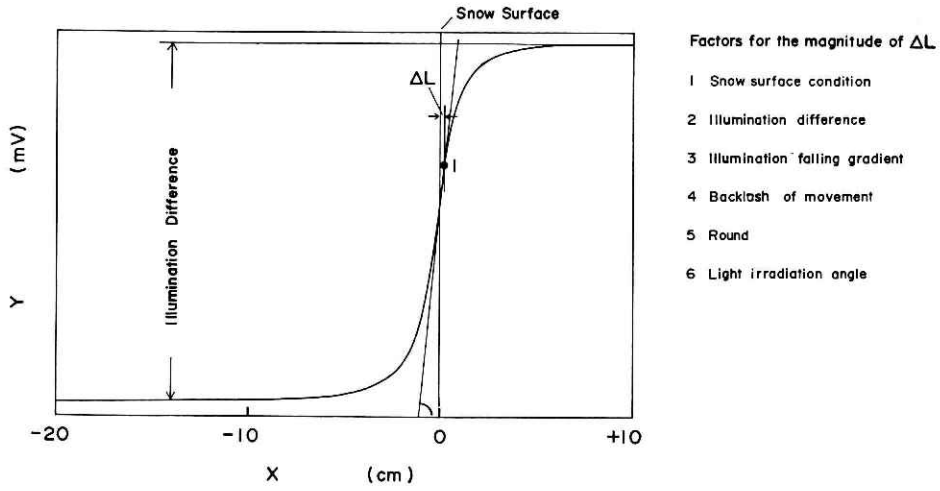


図 3　照度鉛直分布の傾向

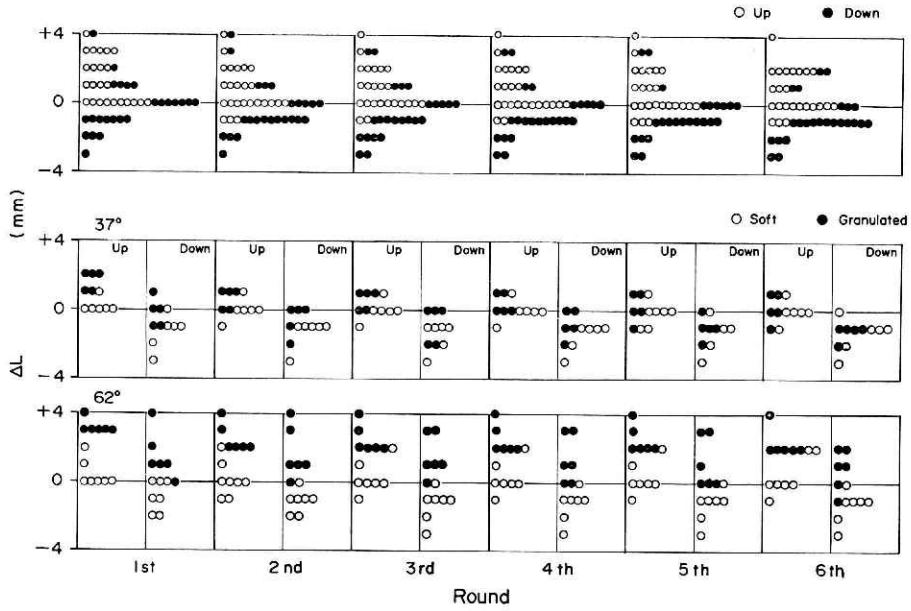


図 4　室内実験の結果

準としてプラス側が雪面上，マイナス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一様に分布し，±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によるものであろう．

下の2段は雪面の状況と照明の照射角度についてまとめたもので，白丸で人工シマリ雪面，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

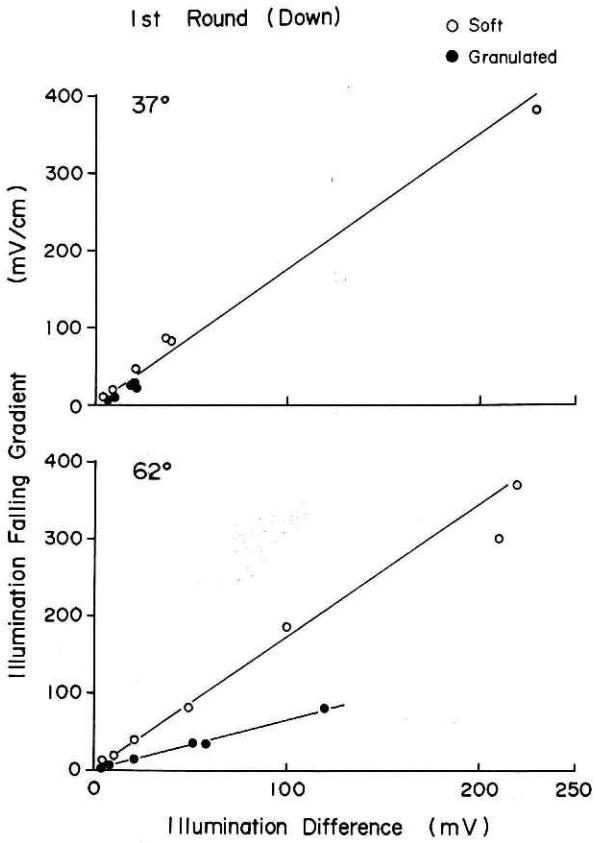


図 5　照度差と変曲点の照度減少率の変化（実験室）

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，ザラメ雪の場合がプラス側にズレている様子が認められ，照射角62°の場合にこの傾向が著しい．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，探針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シマリ雪面，黒丸がザラメ雪面の場合である．

図5から，シマリ雪面からの光の散乱が，ザラメ雪面と比較して一様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，67°では大きい．そして，照度減少率はシマリ雪面の場合の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，雪面付近の鉛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．

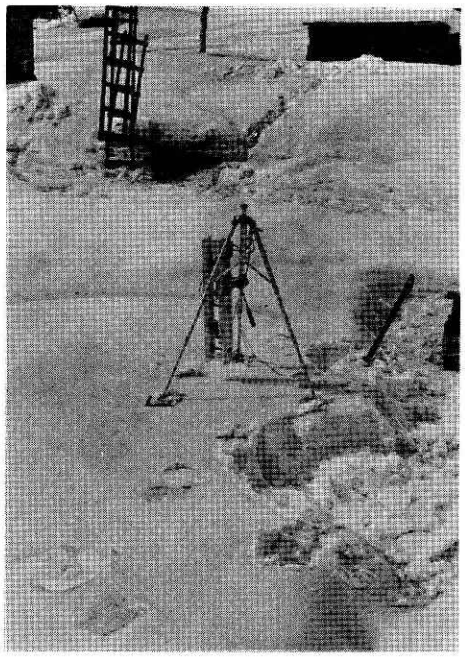


写真 2 実験装置（勇駒別）

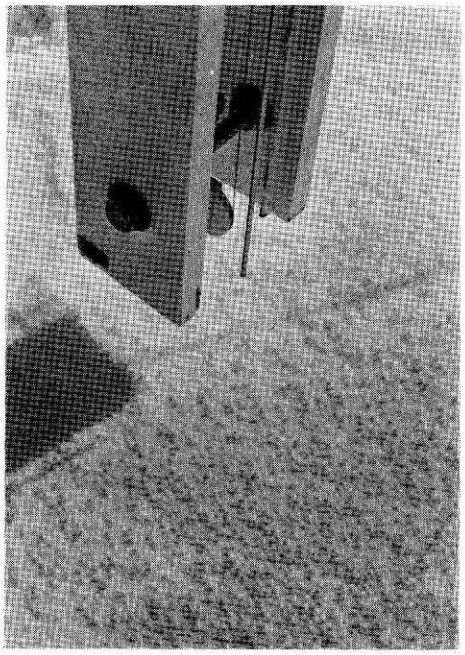


写真 3 探針の先端部（雪面アラレ）

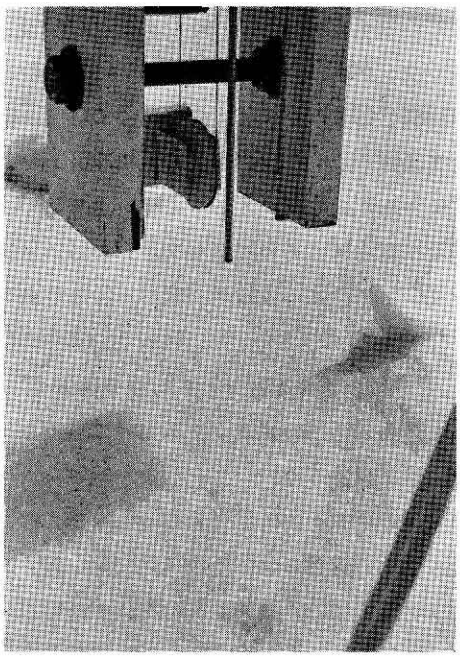


写真 4 探針の先端部（雪面ザラメ）

4. 野外実験

4.1. 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(ゆこまんべつ)・白雲荘で野外実験を行なった．実験地は大雪山系旭岳の西側，標高1,080 m 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．探針の上下装置は室内実験と同じもので，写真用の大型三脚で固定し，各測定ごとに約 0.5 m ずつ位置を変えた．

写真3は，雪面上 10 cm にセットした探針の先端部を示す．このときの雪面は直径 3 mm 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．

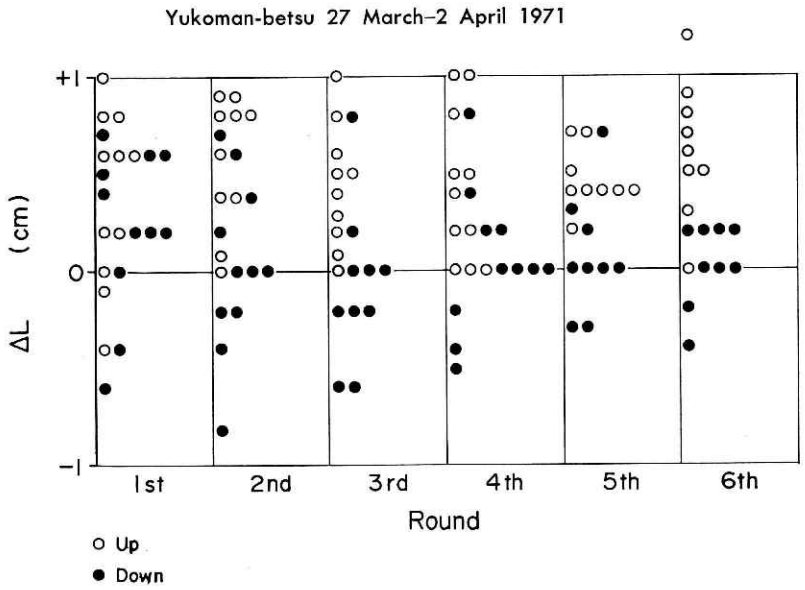


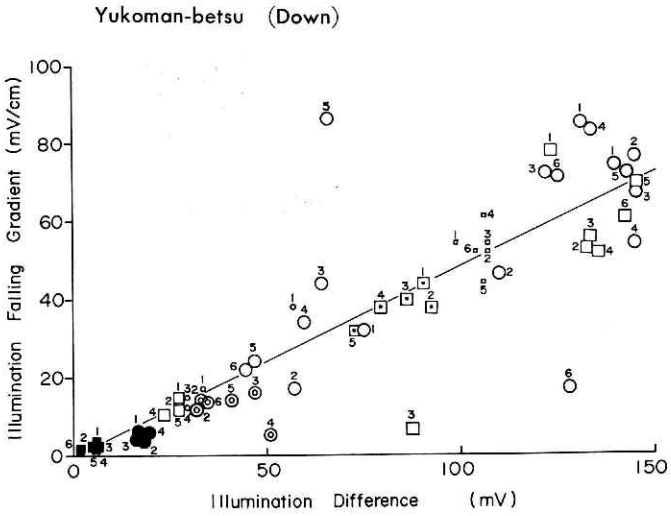
図 6　測定ラウンドと ΔL の変化

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回ずつ行なった．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，ΔL の分布状態を示した．図中の白丸は探針上昇時の値，黒丸は下降時の値である．白丸の分布が全体として上にズレているのは，装置のバックラッシ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基因している．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．

4.2.　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．黒丸印の Flat というのは，写真4のような状態である．黒四角印は黄砂を含んで茶かっ色に着色した雪で，3月30日早朝に降った．この研究では，鉛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は，快晴時の測定がほとんどであったにもかかわらず，



○ Large Graupel	3mmφ−4mmφ
° Small Graupel	≃1mmφ
□ New Snow	2mmφ−4mmφ
● Granulated Snow	Flat
⊡ Wet New Snow	1mmφ−2mmφ
■ Polluted New Snow	1mmφ−2mmφ
▫ Small Grain New Snow	≃0.5mmφ
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）

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 を添え書きし，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．午前と午後に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．

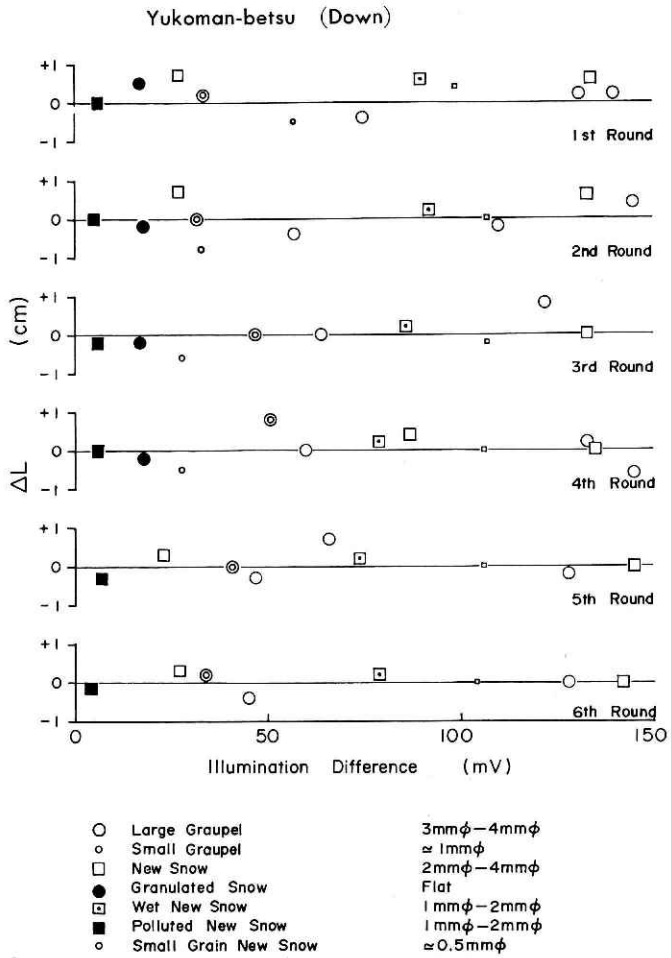


図 8　照度差，ラウンド回数，雪面状態による ΔL の変化

4.3.　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なった．実験地は岩木山の南ろく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，日中解けて夜間に凍結した氷板に近い雪面が多く，探針をそう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，探針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なった．

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ない，探針の下降時の値のみを採用した．

4.4.　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

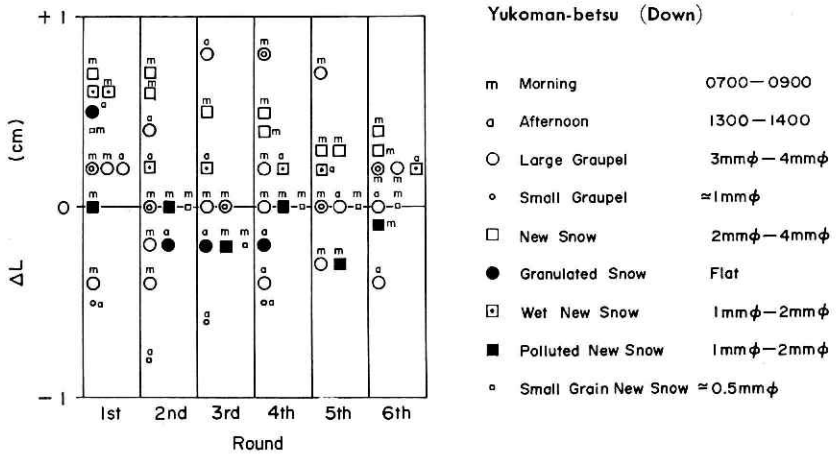


図 9 日射の照射角の効果



写真 5 実験装置（嶽）

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，白丸は積もりたての雪面，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．

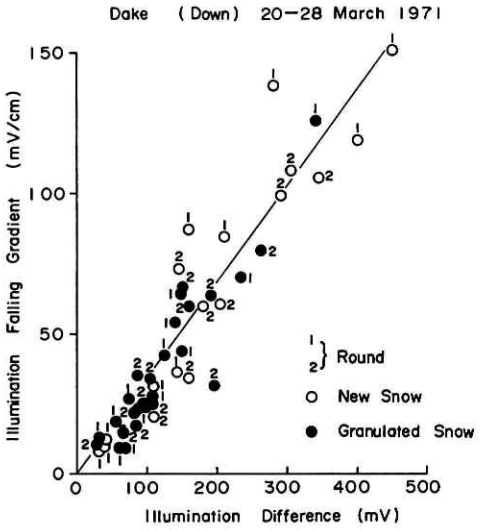


図 10　照度差と変曲点の照度減少率の変化（嶽）

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，その実用性を，小型フォトトランジスタによる細い測光探針により，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 ±4 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 ±10 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，測光探針を積雪層内にそう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なうことはできない．しかし，雪面にあけられた直径 4 mm 程度の穴は，小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，探針のそう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，探針のそう入場所を，測定ごとにわずかに移動することによって，そう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，探針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鉛直を目分量で定めたが，探針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，探針を完全に鉛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鉛直分布は，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

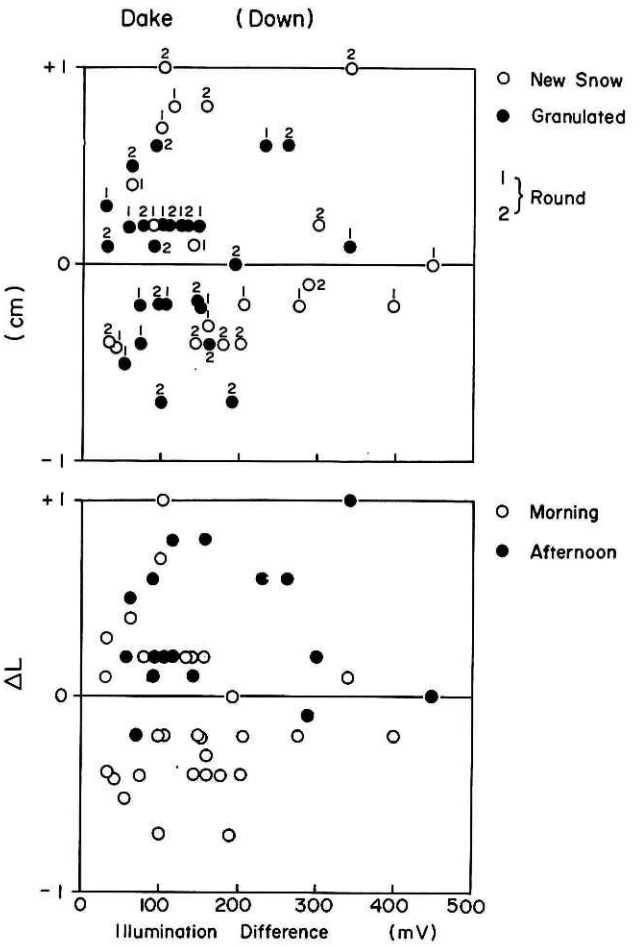


図 11 照度差と ΔL の変化

定条件によらず，雪面を基準にして ±10 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，XY レコーダーを借用した．以上をしるして謝意を表明する．

参 考 文 献

1) Giddings, J. C. and LaChapelle, E. (1961): Diffusion theory applied to radiant energy distribution and albedo of snow. *J. Geophys. Res.*, **66**, No. 1, 181-189.
2) 工藤　清 (1940): 積雪中の明るさ．雪氷，**3**, No. 9, 390-395.
3) 木村忠志 (1974a): レーザー・ビームによる雪面検出．雪氷，掲載予定．
4) 木村忠志 (1974b): レーザー・ビームによる積雪の深さ計原型．雪氷，掲載予定．

5) Mellor, M. (1964): *Properties of Snow, Cold Regions Science and Engineering*, III-AI, December 1964, p. 73.

6) 大浦浩文 (1951a): 積雪による光の反射および透過について，Ⅰ．低温科学，Ser. A, No. 6, 23-34.

7) 大浦浩文 (1951b): 積雪による光の反射および透過について，Ⅱ．低温科学，Ser. A, No. 6, 35-40.

(1973年5月17日原稿受理)