

# 気象と積雪

吉田 順五\*

雪には「降る雪」と、地面に「つもった雪」とがある。降る雪は、まだ大気の中にあつて、当然気象学の対象になるが、つもって地のものとなった雪、すなわち、積雪も、大気と縁をきってしまったわけではない。雨ならば、地面に着くと地のなかにもぐって、大気との縁はうすらいでしまう。しかし、雪は地面のうえに止まって、大気との接触をいつまでも保っている。

日本の国の面積の52%が積雪でおおわれるという人がいる。52%とまで正確にいつてよいかどうかは別として、ほぼ半分が冬のあいだ雪のしたになることにまぢがいはない。それで、地表面と大気との相互作用を考えるとしたばあい、日本では、積雪状態にある地表面を無視することはできないであろう。

しかし、地面が雪でおおわれているか否かによって、気象や気候にどのような差がでてくるかの研究は、いたつて少ないようである。その差は小さくて問題にするにあたらぬのかも知れない。しかし、そうだといいきつてゐる研究報告もないようである。

北陸地方に降る雪のなかには、北陸不連続線といわれる不連続線によるものがある。海上からくるふたつの暖気団N、Wと内陸から押し出す冷気団Sとの接触によつてこの不連続線は発生する。そして、冷気団Sは、内陸が積雪でおおわれているために、その上の空気が冷されてできるのだと考えられている<sup>1)2)</sup>。積雪が気象にかなり大きな影響を与えることを示すこのような例がある以上、積雪の気象や気候に対する影響が小さいとは必ずしもいわれまい。ただ、気象現象には多くの要素が関連しているから、積雪の影響をみきわめるのは、一般には、困難なことである。積雪のあるなしだけは違つたが、ほかの気象条件は同じなふたつの土地が並んでいるようなことがあれば、比較によつてそれもできよう。日本のように、せまくて地形の複雑な国では、ちょっと望めないことである。しかしソ連のように広い平原のある国の春には、このような条件がほぼ満されるばあいが相当にあることと思われる。そういう事情を利用した研究と想像されるのだが、次のようなことを書いたソ連の論文がある<sup>3)</sup>。

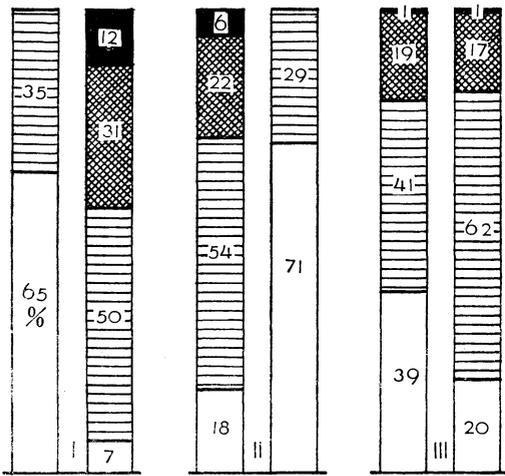
積雪の影響はそこにある気団の種類によつて非常にちがう。まず冷気団のばあいについていうと、積雪地の春の曇り日、風の強い日の数は裸地（以下積雪のない土地の意味につかう）での数の約半分しかない。積雪地の方が天気がよいわけである。気温の日変化の中は積雪地の方がはるかに大きい。1937~41の春（3月、4月）の観測結果によると、積雪地では、冷気団であつて気温の中が10°Cをこえる日数が冷気団の存在した全日数の43%に達した。ところが裸地では気温の中が10°Cをこえる日は1日もなかつた。裸地では、春の日光で地面が暖められるので、冷気団があると、気温の逓減率が大きくなって対流がさかんになる。それで曇りが多く風も強い。これに反して、積雪地ではそのようなことがない。それで積雪地では天気はよく静かで、また、天気が良いから気温の日変化の中が大きくなると解釈されている。積雪地と裸地との境界線の両側のあいだの気温の差は、日中はあまり大きくない。裸地のうへでおこつてゐる対流のため、空気が混合するからである。しかし、夜になると、対流はとまり、かつ、積雪地では天気がよくて雪面の冷却が甚しいので、この気温の差は大きくなる。

暖気団のばあいの事情はだいぶちがう。裸地が日光で暖められても、冷気団のときのように気温の逓減率が著しく大きくなるということはない。それで対流が激しくなることもなく、曇り日は少ない。これに反して、積雪地は気団の下層が冷されて、層雲の形で高い霧が発生しやすく、冷気団のばあいとは逆に、曇り日は積雪地の方が多くなる。気温の日変化の中も逆の関係になる。裸地では10°C以上の中のある日が28%もあつたが、積雪地では1日もなかつた。裸地と積雪地との境界の両側のあいだの温度差は、日中は大きく、夜間は小さい。その結果、平均気温には10°Cもの差ができることがある。しかし、風には差がほとんどみられない。

局地気団のばあいには、地面と空気とは熱平衡にむかつて進みつある状態にある。それで、裸地と積雪地との境界の両側の気温は、だいたい平均している。また両地とも曇りの日が多い。気温の日変化の中についても、裸地と積雪地とで大きな差はない。

第1図は、このソ連の論文にのつてゐる図で、1937~

\* 北海道大学低温科学研究所



第1図  
裸地と積雪地における春の気温の日変化の巾

1941年の春の気温日変化の観測結果をまとめたものである。3種の気団のばあいについて、裸地と積雪地との気温日変化の中が比較してある。I, II, IIIが、それぞれ、冷、暖、局地気団のばあい、各ばあいについて、左が裸地、右が積雪地である。0°Cから20°Cまでの気温の中を5°Cおきに区分し、ある区分にあたる日変化をもつ日の数が%で表わされている。裸地と積雪地との気温の中の分布状態が、IとIIとで、すなわち、冷氣団と暖気団とのばあい、ちょうど逆になっていることがよく現われている。局地気団のばあいには、裸地と積雪地とで差はほとんどない。

うえにあげたソ連の研究結果も、また、積雪の気象や気候に及ぼす影響がそれほど小さくはないことを示す例と考えてよいであろう。積雪が気象や気候に影響するとして、積雪のどのような性質が働くかという、まず、積雪が氷であることがあげられる。このため、積雪が存在するかぎり、地表面の温度は0°C以上にはのほりえない。気温が0°Cより高ければ、空気は必ずひやされる。つぎにあげるべき性質は熱伝導率が非常に小さく、日光に対する反射率が非常に大きいことである。このふたつとも、積雪が網目組織の氷でできていることに由来する。積雪の熱伝導率  $\mu$  cal/deg · cm · sec と積雪の密度  $\rho$  gr/cm<sup>3</sup> とのあいだには、だいたい

$$\log_{10} \mu = -4 + 2\rho \quad \dots\dots(1)$$

という簡単な関係がなりたつ。平均的にみて、自然状

態で  $\rho$  が 0.4 より大きくなることはあまりないから、 $\mu$  は  $7 \times 10^{-4}$  をこえない。空気の熱伝導率は  $0.7 \times 10^{-4}$  である。それゆえ、積雪はただか空気の数倍の程度に熱を伝えるにすぎない。土の熱伝導率は、ごく乾いた土でも  $30 \times 10^{-4}$  ぐらひはあり、水分が増すと大きくなる。また、普通の地面や林の日光に対する反射率は20%くらいだが、積雪は70~90%も日光を反射する。この大きな反射率と小さな熱伝導性とのため、地面が積雪でおおわれると、空気と土地とは熱的に絶縁されることになる。空気と土地とのあいだに断熱壁が挿入されたわけで、大気内の熱現象と土地のなかの熱現象とは、おのおの独立に行われる。積雪は地表面の凹凸を消して風に対する地面の抵抗を小さくするというなど、まだいろいろな作用が考えられるが<sup>5)</sup>、主な作用はうえにあげたふたつであろう。北陸不連続線をつくる冷氣団Sは、それ自体が元来 0°C 以上の温度をもつべき気団だったのなら、積雪によって冷されて冷氣団になったのであろう。また、もともと 0°C 以下の温度の冷氣団であったのなら、積雪は、それが土地によって暖められるのを妨げるという作用をしたことになろう。

雪は小さな氷の結晶の形でふってくるが、積ってから数日あるいは十数日のあいだに、昇華によって、また時には一時的な融解もてつだって、結晶の形はくずれてゆく。そして短い氷の棒が複雑に連結した氷の網目組織をつくる。網目のあいだには隙間がたくさんあって、空気がつまっている。それで、積雪の熱伝導率は氷の熱伝導率の  $53 \times 10^{-4}$  にくらべるとはるかに小さく、空気の熱伝導率にちかい値になるわけである。また、網目をつくっている氷の表面の形には規則性がなく、しかもその表面積は非常にひろい。積雪の1cm<sup>3</sup>のなかにある氷の網目の表面積を比表面積  $S_k$  というが、 $S_k$  は 30cm<sup>2</sup> から 70cm<sup>2</sup>、あるいはそれ以上にもなる<sup>6)</sup>。このため、氷の網目のなかに光がはいると、光は氷と空気との境界面に頻りに衝突して反射屈折する。それで氷の網目は光を乱反射する力がつよく、積雪の日光に対する反射率が先のべたような大きな値になるのである。

氷の網目組織によってきまるのは積雪の熱学的性質と光学的性質とだけではない。ほかのあらゆる性質が、それによって定められる。それで網目組織を顕微鏡で見て調べることが積雪の研究にとって非常にだじなことなのだが、従来はそれがうまくゆかなかった。顕微鏡でみるとすれば、網目をこわさないことはもちろん、少しの変形も与えずに、1mm以下の厚さの薄片に積雪を切ら

なければならぬ。積雪はなにぶんにも脆いものなので、それがなかなかむつかしかった。ところが、ここ1、2年のあいだに、わりあい簡単な方法で薄片が作れるようになった。1mmの厚さのものは、電流を通じた直径0.1mmのニクロム線で少しづつとかしながら切っていく。電流は懐中電灯の電池からとれるので、全くの野外でも、この方法はつかえる<sup>7)</sup>。0.1~0.2mmの薄片を切るには、まず、 $-5^{\circ}\text{C}$ あたりの温度で積雪試料をアニリンにつけて、氷の網目のあいだの空気をアニリンでおきかえる。これを $-20^{\circ}\text{C}$ にするとアニリンは氷の網目の隙間にあるままで凝固し、全体がかたくなる。(アニリンの凝固点は $-6.2^{\circ}\text{C}$ )そこでかんなで削って薄片にする。アニリンは凝固すると不透明になるので、薄片の温度を $-5^{\circ}\text{C}$ にあげアニリンを液体にもどして顕微鏡で観察する<sup>8)</sup>。厚さ0.01~0.02mmの薄片もつくれるが、このときは、アニリンのかわりに、べんがらの粉をまぜた人造樹脂の溶液で網目のあいだを満し、溶媒を蒸発させてかためる。これを $-20^{\circ}\text{C}$ くらいの温度のところで紙やすりで磨いてうすくする。このばあい、氷の網目のすきまは不透明な樹脂でつまっただまである。しかし、薄片は非常にうすくて、その厚さが網目を組立てている氷の棒の直径以下なので、網目のすきまが透明でも不透明でも、網目の形はよく見える<sup>9)</sup>。このあとのふたつの方法には、 $-20^{\circ}\text{C}$ というかなりな低温が必要だが、野外研究のときでも夜になればこのような低温にめぐまれることがあるので、それを利用すればよい。あるいは、雪の試料をとかさないようにして研究室まで運び、低温実験室のなかで薄片にする。

口絵の写真2と3とは、ニクロム線で鉛直方向に積雪を切った厚さ1mmの薄片である。両方とも、2mほどの厚さの積雪の表面の下50cmほどのところからとった。写真2は、20日ほどまえにつまった積雪の表面にあった雪で、次の降雪までの数日間空気にさらされていたものである。日射のため少しは融けもしただろうし、風の作用も受け、また昇華もさかんにおこなって、降ってきたときの結晶の形は跡かたもないほどに変態し、石ころのような氷の粒が連結して氷の網目をつくっている。写真3の方は、写真2より3cm下にあった雪で、日射や風の影響はあまりうけなかったはずである。氷の網目組織は写真2のとはだいぶちがいが、水平方向にならんだ氷の棒が連なりあっている。星状の雪の結晶がつもると、そのあとに続く積雪の沈降とともに、結晶はその面をすだいに水平にしてゆくことが知られている。写真

3の組織は、星状の雪の結晶が水平な位置にむかいつつ昇華変態を行ってできたのである。雪は、星状、針状、立体樹枝状などいろいろな形の結晶として、またしばしば、雪あられの形で降ってくる。しかし、どんな形でふってきても、数日から十数日もたてば、粗密のどあいちがいはあれ、形式はみな同じ網目組織をつくるものと今までは考えていた。ところが、積雪を薄片にして顕微鏡でみられるようになってから、そうではないと思うようになった。はじめ星状結晶の集合体であった積雪は20日あとに写真3のような特徴ある網目組織にかわったが、針状結晶、立体樹枝状結晶、あられなども、日射や風の作用をうけなければ、それぞれ特徴のある網目組織をつくるらしい。

中谷宇吉郎博士の言葉に「雪は天からの手紙である」というのがある。なにか寓意がこめられているのかも知れないが、直接の意味は、雪の結晶の形は上空の気象状態できまるはずだから、雪の結晶はその形によって上空のありさまを地上に伝えるものだということである。同博士、花島博士たちによる低温実験室での人工雪製作の実験によって、現在では、ある形の雪の結晶がどのような温度、どのような温度でできるかが詳しくわかっている。この冬、札幌管区気象台、北海道大学、北海道学芸大学の人たちがつくっている雲物理研究会が、降ってくる雪の結晶の形と上空の気象状態との関係を大規模な観測を行ってしらべた。その結果は人工雪の実験でえられた結果とよく対応していた。雪の結晶は、たしかに、天からの手紙だったのである。ところで、この手紙は積雪の形で地上にたまるが、そこに書いてある字はすぐには消えない。さきへのべたように、積雪の氷の網目の組織の特徴として残るのである。降ってくる雪の結晶を数多く観察してその形を判定するには、たいへんな手間と時間とがかかる。それにくらべると、古手紙で字はぼやけ崩れているとはいうものの、積雪のばあいには束になって目の前にあるのだから、判読の技術さえ身につければ調べるのは簡単である。上空の気象状態と雪の結晶の形との関係をしらべるのに、将来、積雪のこの性質が使われるようになるかも知れない。それに結晶の形の崩れるのを防ぐ方法もある。地面のうえに直接つまった積雪は、地熱のために下面は $0^{\circ}\text{C}$ に暖められ、上面は冷たい空気に冷される。それで内部には、いつも、強い温度勾配があって昇華作用が促進され、結晶の形のくずれかたが速い。しかし、高い台の上にとまった積雪では、台の下の風通しをよくしておくこと、下面も上面と同様に冷さ

れて、大きな温度勾配はあらわれない。ほかの用のために作られたものだが、地上1.6mの高さで水平に張られた面積10m<sup>2</sup>の金網があった。その上につもった積雪についてしらべたら、結晶の変形は地上の積雪のばあいにくらべて、2倍も3倍もおそかった。

積雪には、また、地上ちかくの気象状態のあとも残される。口絵の写真1は積雪に堀った穴の壁の一部である。中央の白い部分だけ、壁のうしろの雪をとりさって、1~2cmの厚さの雪の板が透かしてみえるようにした。堀ったままの雪の穴の壁はたゞ白いだけだが、透かすようにすると、黒ずんだ太い線はそい線が水平に密にならんで見え、積雪にこまかい層構造のあることがわかる。黒ずんだ線のところでは、氷の網目の比表面積 $S_K$ が大きい。 $S_K$ が大きい所は乱反射が強く光は透過しにくくて透かし見には暗くなる。また、 $S_K$ が大きいと、一般に、網目組織の氷の表面の凹凸がはげしく、水を保持する力が強い。それで、インキをとかした色水を霧吹きでかけると、 $S_K$ の大きい所は余計に色水を吸いこんでこく染まる。写真1の左右のうす黒い部分は、作ったままの雪の壁に色水をかけたあとである。中央の透し部分の黒ずんだ線に対応するところがインキに強くそまり黒い線（写真では黒いが実際は赤または青の線）となっている。左側の方が右側よりインキの線がこい。左側は色水をかけたあと更に火であぶったのである。積雪の層構造をみるには、透かしにするより、インキで染める方がはるかに簡単である。

氷の網目の写真2, 3は、それぞれ写真1に矢印A, Bで示した場所の雪なのである。前述のように、Aの所は一時積雪の表面となっていた。そういう所は一般にインキに強くそまる。それで、過去の降雪の記録と濃いインキの線とを対照すると、積雪の各層がいつ降った雪でできたのがわかる。このような過去の時を定めるのに使われる規準線のほかにも、たくさん線がみられるが、それが地上付近の過去の気象状態をある程度われわれに示してくれる。風雪のときに、積雪にほった穴のなかに坐って雪の壁の上の縁のところを見ていると、息をする風が強くなって雪が雪面にそって流されるたびに細い線が一本できる。それゆえ、風雪のときにできる積雪層には横縞がたくさんはいることになる。気温がわりあいに高く、とけかけた雪の結晶がつくる積雪層は、圧縮がおそく、インキの水の吸いこみかたもほかの部分とちがう。また、一時積雪の表面になっていた規準線のところにある雪の氷の網目組織を顕微鏡でみれば、過去の

あいつづく降雪と降雪とのあいだの天気がどんなものであったかの判定も、ある程度はつけられる。

気象辞典にはのっていない言葉だが「水気象」という言葉をときどき聞く。川の水源と気象との関係をあつかう気象学の一部門をさすらしい。それで、山にある積雪の重量の調査が水気象の重要な対象のひとつとなっている。山のなかにたくさん地点をえらんで、スノーサンプラーという長い金属管を積雪につきさし、積雪全層にわたって試料をとって目方をはかる。こうして、1cm<sup>2</sup>あたりの積雪重量 $W$ をもとめ、それから山全体にある積雪量を推定するわけである。しかし、スノーサンプラーはかなり嵩だかで運搬に手がかかるし、雪につきさすのにもなかなか力がある。もし積雪の厚さ $H$ を測定して雪の重量 $W$ が計算でだせることになれば、この積雪量の調査は非常に楽になるであろう。厚さをはかるだけなら、積雪棒をあらかじめ立てておき、細い棒につきさすことかですむからである。しかし、そのためには、 $H$ と $W$ との間にどんな関係があるかが判っていなければならぬ。

北海道の平地につもった雪についてではあるが、積雪をつくっている各層の圧縮に関して非常に簡単な法則がみつかった。各層の圧縮は粘性的におこり、粘性係数 $\nu$ はその層を作っている雪の密度 $\rho$ によってきまる。そして

$$\log \nu = a + b\rho \quad \dots\dots(2)$$

の関係がなりたつ。常数 $a$ は雪の性質によって多少値をかえるが、常数 $b$ の方はそれに無関係に一定である。二、三の仮定をおいたうえでのことだけれども、この式をもとにして、次のように、積雪の重量 $W$ と厚さ $H$ との関係を求めることができる。

雪は降ったりやんだりしながら積るので、 $W$ は階段的にます。しかし、この階段をならしてみると、ほぼ直線的に $W$ が増大してゆくことが経験的にしられる。もちろん、年により所により、増大速度は異なるけれども、直線的に増大するという点だけはかわらない。それで雪はやむことなく、毎日、一定の割合 $w$ で連続的に降ってくるものと仮定しても、事実とひどくちがうことはないであろう。雪の降りかたについてこの仮定をすると、(2)式をもとにした簡単な関式計算で第2図のようなものが書ける。左下すみから右上にむかう太い実線は1日に降る雪の量 $w$ が0.7gr/cm<sup>2</sup>・dayのばあい、積雪の厚さ $H$ が、日がたつとともに、どのように増大してゆくかを表わす積雪曲線である。 $w$ にちがった値をあたえれ

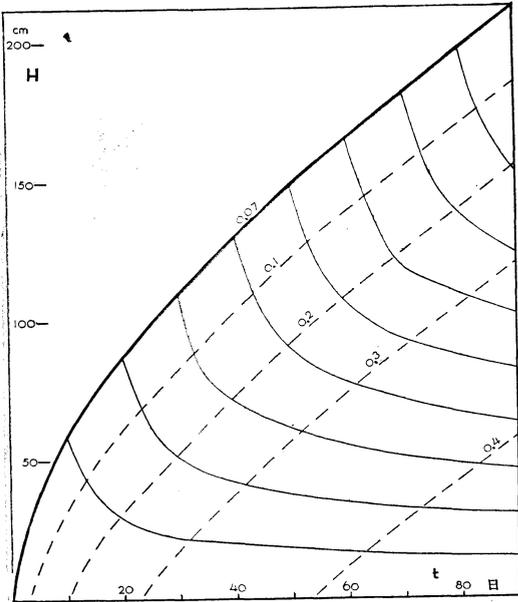
ば、この曲線の形はそれに応じてかわる。それで、あらかじめ、いろいろな値の  $w$  についての積雪曲線を用意しておく。ある年ある所の積雪の厚さを根雪初日から  $t$  日目にはかって  $H'$  cm をえたとしよう。用意しておいた図のなかから、 $t$  日目にちょうど  $H'$  の厚さを与える曲線をえらびだす。すると、それから、その年その場所の  $w$  の値がわかる。この  $w$  に  $t$  をかければ、それが現在そこにある積雪の重量  $W$  になる。

ので、太い実線の積雪曲線は、同時に、その値の等密度線でもある。また細い実線は、10日目ごとの雪の表面が、あとから積った雪の下になって、積雪内部で沈降してゆくもようを示す内部沈降曲線である。積雪のなかに埋もれた物体は沈降する積雪から大きな力をうけ、よくこわれてしまう。等密度線と内部沈降曲線とは、この積雪の沈降力を考えるうえで非常に役にたつ。

さいごに、以上書いたうちの後半部は、北海道の雪について行った研究にもとずいていることを注意しておかなければならない。北海道の冬は気温がひくく、雪はほとんどとけることがない。それで、積雪の内部構造を変化させるのは昇華現象だけだといってもよい。雪の結晶の形のあとが積雪の氷の網目構造に残るのもこのことのためで、本州の平野地のように気温が高く、雪のとける機会の多いところでは事情がちがってくるであろう。しかし、本州でも、ある程度以上に高い山のなかならば、北海道とだいたい同じことになっていると思う。

文 献

- 1) 石原健二 (1949) 降雪の話 (其の二) 雪と生活 1巻5号, 5.
- 2) 島山久尚 (1959) 冬の天気と降雪, 雪氷, 21, 20~21.
- 3) Я.И. Фелъдман (1957) Влияние снежнго покрова на гсгод и климат. Природа, 4号, 89~90.
- 4) 吉田順五, 岩井裕 (1950) 積雪塊の熱伝導率の測定. 低温科学, 3, 79~87.
- 5) Г. Л. Рихтер (1948) Роль снежнго покрова в физико-гесграфическом процессе. Труды Института Гесграфии, XL.
- 6) 石田完, 清水弘 (1955, 1956) 積雪の通気抵抗 I, II. 低温科学, A14, 33~42; A15, 63~71. 清水弘 (1956) 積雪の通気抵抗. III. 低温科学, A15, 73~79.
- 7) 小島賢治 (1958) 積雪層の粘性圧縮. IV. 低温科学, A17, 53~64.
- 8) 木下誠一, 若浜五郎 (1959) 低温科学, A18 に発表の予定.
- 9) 清水弘 (1958) Red Paste 法による積雪の薄片. 低温科学, A17, 81~86.
- 10) 小島賢治 (1957) 積雪層の粘性圧縮. III. 低温科学, A16, 167~196.



第2図 毎日の固形降水量  $w$  を  $7\text{mm}$  としたときの積雪曲線, 等密度曲線, 内部沈降曲線

北海道の雨竜の山のなかの盆地で、数日おきに積雪の厚さと重量とを観測しつつ比較してみたら、うえの理論の結果と実際とがよく一致した<sup>10)</sup>。ただ、いまの所は、水平な土地についてのことしかいわれない。しかし、傾斜地の積雪についても、現在、研究がすすめられていて、このばあいにも (2) 式に似た関係がえられそうである。それがはっきりしたら、以上の方法を実際の山の積雪調査に応用するようになろう。

なお、第2図には、破線で積雪内部の等密度線もいれてある。0.2 とあるのは密度が  $0.2\text{gr/cm}^3$  であることを意味する。降ったばかりの雪の密度は  $0.07\text{gr/cm}^3$  な