

1. 序 論

大気中で雪が融けて雨になる現象は、霙として観測され、雨・雪の判定や着雪などの問題として、予報上、重要である。また、この現象は、上空においては融解層としてレーダ等でも観測され、雨のできる仕組みを知る上でも大切である。

降水が雨か雪かでは、社会的影響が全く異なる。雨であれば注意報にもならないものが、雪の場合は、何らかの被害が現われる。降雪によって、交通網が寸断され、道路の除雪や凍結防止に多くの人々が動員される。降雪時の視程障害によって、航空機や船舶の運航が中止になったりする。大都市が集中する太平洋側は、雪に対する備えが弱く、わずかな降雪でも被害を受ける。この地域の降雪は、 0°C 付近の気温で起こることが多く、予報上、雨・雪の判定が難しい。山岳地域の降水は、雪崩や遭難の原因になり、雨か雪かは山岳勤務者や登山者にとって大きな関心事である。

雨・雪が気温と関係があることはよく知られ、解析によって気温との間により相関があることが確かめられている。各地域で、雨・雪を判別する基準作りが進められてきた。降水の型(雨・雪)と各高度の気温との関係が統計的に調べられ、雨と雪の境界温度が求められ、現業に利用されている。境界気温は、統計的(確率的)に意味があり、実際の応用に当ってはある幅を考慮している。季節風の下で起こる日本海側の降水は、地上気温が 3°C 以下で雪、 3°C 以上で雨となる。主に低気圧によってもたらされる太平洋側の降水は、 1.3°C 以下で雪となる。このようにして得られた統計値や経験則が、予報の中で重要な位置をしめ、雨・雪予報に利用されている(気象庁, 1976, 中沢・能登, 1971)。

気温が 0°C 以上と高くなると、降雪は水分を含んでぬれ雪(霙)となり、電線路や航空機などに着雪して大きな被害を及ぼす。最近では、1980年12月に東北地方を襲ったぬれ雪によって、電線路に大きな被害が発生した。宮城、岩手、福島の前北3県で、高圧線の鉄塔10基が倒壊、送電線の切断も予想以上の規模で、最大時61万戸の家屋が停電した。航空機の被害では、1982年1月に米国のワシントンで起こった墜落事故が記憶に新しい。フロリダ航空ボーイング737型機が離陸直後に失速し、ポトマック川に墜落、78名の犠牲者を出した。機体への着雪が原因といわれる。

着雪の発生と発達機構に関して、これまでに多くの調査や研究がある(荘田, 1953; 伊藤, 1953; 林他, 1953; 蔵重, 1953; 大後, 1968; 高木, 1973; 五藤・黒岩, 1975; 五藤, 1976; 坂本, 1978; 若浜他, 1982)。気温が比較的高く、風が弱く、降雪量が多く、ぬれ雪の場合に、着雪が発生・発達しやすいことが明らかになっている。この中で、着雪にとって不可欠な条件は、ぬれ雪の生成であり、この成因が気温との関連の中で調べられている。ぬれ雪は、統計的にはプラス 1°C 前後で生成することが示され、この気温が着雪予報に利用されている。

雨・雪の問題は、このほかに、雪氷領域の増加と減少の問題とも関連しており注目される。雪氷域の増減は、山岳地域の積雪のように生活・工業用水などの水資源の問題として大切であるばかりではなく、寒冷地域の気候にも少なからぬ影響を及ぼしている。Higuchi (1977) および Ageta

et al. (1980)は、ヒマラヤ等の高山地帯の水河の質量収支に、雨・雪が重要な影響を与えていることを見出だした。ヒマラヤ地域の水河は、下流のネパール、インド、中国にとって欠くことができない水資源である。また、アジア地域の気候にも少なからぬ影響を与えている。このため、水河の消長は多国間にわたる重要な問題となっている。この地域の水河の増減は、モンスーンの時期に同時に起こる。降水が雨であると水河は洗い流されて減少し、雪であると堆積して増加する。降水が雨か雪かで、水河の領域が大きく変動する。彼らは、水河の質量収支の見積りと予測に雨・雪の境界気温を用いている。

各分野で気温の統計値が利用され、多くの成果を収めてきた。しかし、現実の現象は、統計値だけでは理解できない。北海道では、地上気温が9℃の場合に乾いた雪が降り、珍奇な現象として報告されている(大北, 1948)。荒川・田畑(1956)は、九州の南の臥蛇島で地上気温が9.7℃で降雪があったと報告している。倉嶋(1966)および和達・倉嶋(1974)によれば、このような降雪は国内、国外にわたって観測されており、スイスでは地上気温が10.9℃の降雪の例があると述べている。高温時の降雪の原因については、いまのところ根拠のある説明はない。高橋(1943)は、一つの仮説をたてている。雪は熱の不良導体であり、0℃以下の気温のもとで生成した時の温度を保持しているので、たとえ外気温が0℃以上になっても融けない場合があるとしている。最近、Harris(1977)は、雪片にも湿球温度の考え方が適用でき、相対湿度の効果によって、気温が0℃以上でも雪片が融けない可能性があることに言及している。いずれにせよ、統計を中心とした予報の限界が推察される。

予報をさらに適確なものにしてゆくためには、併行して、現象の物理的な把握が必要である。統計的な手法を取り入れた予報では、上述のような不確かさは避け難い。統計的に90%の確率で起こる現象は、残り10%はそれ以外の現象であり、これによって予報がはずれる。現象が、サイコロの目のように純粋に確率的なものであれば仕方ない。しかし、気象現象の多くは何らかの物理法則に基づいており、10%の原因をつきとめることが大切である。10%でも予報のはずれは社会的に問題となる。現象の中から、問題点を抽出し、物理法則を把握し、予報に役立てる姿勢が重要となる。

上空の融解層内の物理過程は、降雨の形成過程を理解する上で重要な意味を持っている。レーダ気象学では、ブライトバンドの形成に関する観測や理論計算が数多く行なわれている。Austin and Bemis(1950)およびWexler(1955)は、レーダ観測と理論計算によって、ブライトバンドにおけるレーダ反射強度の高度変化を説明した。反射強度の高度変化を、主に、雪片の融解によって起こる、1) 雪片の誘電率の増加、2) 雪片の断面積の減少、3) 落下速度の増加に伴う降水粒子の空間個数濃度の減少等によっておこるとした。Gunn and Marshall(1958)は、観測された雪片の粒径分布と雨滴の分布との関係を調べ、これらの効果の他に融解層内で起こる雪片の分裂の効果が重要であるとしている。Ekpenyong and Srivastava(1970)およびTakeda and Fujiyoshi(1978)は、レーダ観測と理論計算から、分裂の効果の他に、特に雪片の併合の効果に着目し、この効果の重要性を指摘している。Houze et al.(1976), Houze et al.(1978), Leary

and Houze (1979) は、レーダ観測や飛行機による降水粒子の採集によって、融解層上部のレーダ反射強度の増加は、雪片の併合や雲粒捕捉による降雪粒子の成長によるものと推測している。これに反し、Du Toit (1967) はドップラレーダの観測から、Ohtake (1969) は高度が異なる2地点での降雪粒子と雨滴の同時観測から、雪片の併合と分裂の効果はレーダ反射強度を説明する上であまり重要でないとして述べている。Battan (1973) は、雪片の併合と分裂の重要性はブライトバンドによって異なるものと推論している。

このように、ブライトバンドの形成理論には、種々の微物理過程が提案されているが、これらの重要性については定量的にまだよくわかっていない。これは、融解層に関する直接的な観測や雪片の融解過程に関する基礎的な知見が充分でないことに起因している。たとえば、雪片の融解過程を微物理的に観察することは、分裂過程の研究や融解雪片のレーダ反射断面積の計算を行う上で必要となってくるが、この方面の研究はほとんどない。最近、Knight (1979) は、融解中の雪片の形態変化を観測しているが、まだ予備的実験の段階でレーダ気象学へ応用するまでには至っていない。物理的取り扱いが比較的簡単な氷球や雹の融解については、これまでMason (1956), Macklin (1963), Drake and Mason (1966), Goyer et al. (1969) 等の実験を中心とした研究があり、融解速度が求められている。レーダ気象学では、雪片の融解を氷球や雹の融解と同様に取り扱う場合が多い。これが正しいかどうかの確証はない。

このように、雪片の融解現象は多くの分野に関連しており、重要であるにもかかわらず、物理的にはほとんど明らかになっていない。雪片は、形状・構造が複雑で理論計算の対象にはなりにくい。雪片に関する量を求めようとしても、簡単な理論では表わせない。例えば、大気から雪片へ流れ込む熱輸送量がそれである。この量の見積りは、雪片の融解を定量的に取り扱う上で重要であるが、複雑な形状、空隙、表面の凹凸をもつ雪片への熱輸送の問題は、現在の熱輸送理論からしても、容易には解決できないであろう。

融解の問題は、結局、理論からだけでなく、現実の現象をよく把握した上で、種々の手法を用いて明らかにする以外にない。解析によって問題点を抽出・整理し、仮説を立て、これを検証するといった操作が必要となる。

この観点に立ち、この研究では大気中における雪片の融解現象を解明するために、(1)地上の降水の型と気象要素との関係に関する解析、(2)雪片の融解に関する実験、(3)0℃高度下の雪片の融解に関する数値計算、(4)実の野外観測、等を行なった。即ち、

- (1) 気象観測資料の解析によって、地上の降水の型と気象要素との関係を調べる。これによって、大気中で起こる雪片の融解現象に関しての問題点を提起する。
- (2) 雪片の融解に関する室内実験によって、雪片の融解の物理過程を調べ、融解速度を表現する実験式を求める。
- (3) 実験によって得られた融解速度式を基本式として、0℃高度の下で起こる雪片の融解に関する数値計算を行なう。計算によって、融解過程に影響を与える因子を定量的に把握する。解析の結

果と計算結果とを比較し検討することによって、大気中における雪片の融解過程と融解過程に影響を与える因子を明らかにする。

- (4) 霧の野外観測によって、落下中の雪片の含水率、落下速度、質量、断面積の測定を行なう。観測結果と計算結果とを比較して、数値計算の結果を検証すると共に観測によって新たに見出された事実の物理的意味を明らかにする。

このような方法で、雪片の融解の物理過程を調べ、融解過程に影響を与える因子を定量的に明らかにした。大気中における雪片の融解過程は、外気から雪片へ輸送される熱と水蒸気の相変化に伴う潜熱によって支配され、この過程に影響を与える因子としては、気温の他に大気の相対湿度、更には雪片の粒径、密度が重要であることが明らかになった。これらの因子が今後、実用的な問題に取り入れられ、活用されることが期待される。

この研究が、雨・雪に関する物理的な指針として予報業務の一助となり、また、降雨の形成理論の発展に役立てば幸いである。

なお、この研究は気象研究所経常研究の一環として行われ、報告は、主に、気象集誌に掲載された4編の論文(Matsuo and Sasyo, 1981 a, d, c; Matsuo et al., 1981 d)をまとめたものである。