

THE STUDY OF MELTING OF SNOWFLAKES
IN THE ATMOSPHERE

By

PHYSICAL METEOROLOGY RESEARCH DIVISION, MRI

気象研究所技術報告

第8号

大気中における雪片の
融解現象に関する研究

物理気象研究部

気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

FEBRUARY 1984

Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director: Dr. S. Moriyasu

Forecast Research Division	Head: Mr. M. Yoshida
Typhoon Research Division	Head: Dr. M. Aihara
Physical Meteorology Research Division	Head: Dr. T. Okabayashi
Applied Meteorology Research Division	Head: Mr. N. Murayama
Meteorological Satellite Research Division	Head: Dr. K. Naito
Seismology and Volcanology Research Division	Head: Dr. H. Watanabe
Oceanographical Research Division	Head: Dr. H. Iida
Upper Atmosphere Physics Research Division	Head: Dr. M. Kano
Geochemical Research Division	Head: Mr. T. Akiyama

1-1, Nagamine, Yatabe-Machi, Tsukuba-Gun, Ibaraki-Ken 305, Japan

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief : Dr. T. Okabayashi

Editors : Dr. T. Akiyama Mr. H. Kondoh Dr. Y. Sasyo
 Dr. T. Yoshikawa Dr. J. Aoyagi Dr. M. Seino
 Dr. M. Endoh Dr. K. Kodera Dr. K. Fushimi

Managing Editors : K. Nishida, H. Nishimura

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute since 1978 as a medium for the publication of survey articles, technical reports, data reports and review articles on meteorology, oceanography, seismology and related geosciences, contributed by the members of the MRI.

序

この報告は、気象研究所の経常研究「固体降水粒子の融解に関する研究」（昭和55～57年度 担当；松尾敬世）を主体としてまとめたものである。気象集誌にもすでに四編の論文（Matsuo and Sasyo, 1981 など）として発表され、その内容が整理され研究成果の総合報告としたのが本書である。

降水が雨か雪かを予測することは、天気予報・防災業務上重要であるが、従来は雪の融解に関しては気温以外の因子の影響は全く考慮されてこなかった。それで雪など固体粒子の融解に影響を与える因子を把握するために、それらが融けて雨になる仕組みを物理的に明らかにしたのがこの研究である。研究では、野外観測、室内実験、数値計算、気象データの解析などが総合的に進められ、結論として、気温以外に相対湿度、雪片の粒径・密度の重要性が示されている。特に雪片などの融解に湿度の重要性を明らかにしたことは注目され反響をよんだ点であろう。

この報告にみられる成果は、今後この分野の研究にも生かされ、また、予報および観測などの現業業務にも有益な一助となるであろう。担当研究官の努力を多とするとともに、それを支援した当研究部の諸氏の労も多としたい。

昭和58年12月

気象研究所 物理気象研究部長

岡 林 俊 雄

大気中における雪片の融解現象に関する研究

目 次

序	
概要 (和文)	1
アブストラクト (英文)	3
1. 序 論	5
2. 地上の降水の型と気象要素との関係に関する解析	9
2.1 解析に用いた地点と期間	9
2.2 降水の型と気温及び相対湿度との関係	10
2.3 雪片の性質が降水の型に与える影響	20
3. 雪片の融解に関する実験	25
3.1 実験方法	25
3.2 融解過程の観察	30
3.3 融解過程に関する理論的取り扱い	31
3.4 実験結果	34
4. 0℃高度下の雪片の融解に関する数値計算	39
4.1 数値モデル	39
4.1.1 仮定	39
4.1.2 融解中の雪片の落下速度	40
4.1.3 計算スキーム	42
4.2 計算結果	48
4.2.1 雪片の温度の高度変化	48
4.2.2 雪片の直径, 含水率, 落下速度の高度変化	50
4.3 計算結果と解析結果との比較	56
4.4 雪片の昇華, 融解に伴う大気の変化	60
4.4.1 雪片の昇華によって起こる気温と相対湿度の変化	62
4.4.2 雪片の融解に伴う気温と相対湿度の変化	64
5. 雲の野外観測	67
5.1 降雪観測	67
5.1.1 降水期間中の大気状態	67
5.2 測定方法	68
5.3 雪片の密度	69
5.4 雪片の含水率	70
5.5 雪片の落下速度	71

6. 結 論	75
謝 辞	77
参考文献	77

大気中における雪片の融解現象に関する研究*

概 要

降水粒子は、一般に上空では氷からなる固体降水粒子であり、これが地上に落下する途中で融解によって雨滴になる場合が多い。固体降水の代表的なものが雪であり、気温によって、雪は霰から雨へと変化することが知られている。地上の降水が雪となるか雨となるかは、天気予報の中では雨・雪の判定の問題として、これまでに多くの統計的研究がある。また、降水が雪から雨へと変化する過程で見られるぬれ雪は、通信路や電線路で起こる着雪現象の主要な因子として知られ、このぬれ雪の成因についての研究も多い。降水の型の問題は、また雪氷の質量収支に大きな影響を与えるため、雪氷域の増減と関連して多くの研究がある。雪氷域の増減は、山岳部の積雪のように水力発電ならびに工業用水などの水資源の問題にとって重要であるばかりでなく、寒冷地域の気候にも少なからぬ影響を及ぼしている。

このような問題は、いずれも大気中で起こる雪片の融解過程と密接に関連している。融解過程において、気温が重要な因子となっていることは、これまでの統計的な研究によって明らかになっている。しかし、気温だけでは説明できない現象の報告も多く、気温の他にも融解過程に影響を与えている因子の存在が推察される。これらの因子については、これまで、全く検討されていない。雪片の融解に関連した現象を解明するためには、雪片の融解過程を明らかにし、融解過程に影響を与える因子を定量的に明らかにする必要がある。これらについて、総合報告的な意味を含めて解説したのが第1章である。

この研究の目的は、解析、実験、数値計算、観測等によって、雪片の融解過程およびそれに影響を及ぼす因子を明らかにし、大気中における雪片の融解現象を解明することにある。

まず第2章では、気象資料の解析によって、地上の降水型（雪、霰、雨）と気象要素との関係を調べ、大気中における雪片の融解現象に関する問題点を提起する。気象要素として、気温、相対湿度、降水強度を選んだ。地上の気温と相対湿度が高いほど雨の出現頻度が高くなり、逆に低いほど雪の出現頻度が高くなった。更に、同じ気温と相対湿度の場合でも、降水強度が大きい時の方が、降水は雨より霰になりやすい傾向が見られた。解析によって、雪片の融解現象において、気温の他に大気の相対湿度や雪片の性質が重要な因子となっている可能性が示された。

第3章では、雪片の融解に関する実験によって、雪片の融解の物理過程を調べ、雪片の融解速度を表現する実験式を求める。大気中を落下してきた雪片を採取し、垂直風洞内のナイロンの網の上に置き、これを速度 $100 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 、温度 $5.5 \text{ }^\circ\text{C}$ の気流のなかで融解させた。融解に伴う雪片の形

*松尾敬世 物理気象研究部

態の変化を観察した上で、伝熱理論を用いて雪片の融解速度式を求めた。融解速度を雪片の半径 R の減少速度で表わすと、 $dR/dt = -\epsilon \bar{\alpha} (K \Delta T + L_v D \Delta \sigma) / L_f \rho_i R$ と表わされた。ここで、右辺第1項は外気から熱伝導で輸送される熱によって雪片が融解する効果を表わし、第2項は雪片の表面へ輸送される水蒸気の潜熱による効果を示している。係数 ϵ は理論と実験をつなぐ重要な係数であり、1.75の実験値を得た。

第4章では、実験によって得られた融解速度式を用いて、雪片の融解過程に関して行なった数値計算の結果を示す。大気相対湿度、雪片の粒径、密度をパラメータとして、雪片の直径、含水率、落下速度が 0°C 高度より下の落下距離によってどのように変化するかを調べた。大気が水飽和の場合、 0°C 高度の直下から雪片は融け始め、 0°C 高度の下に融解層が形成される。融解層は、雪片の粒径、密度が大きいほど厚くなった。大気が水未飽和の場合、 0°C 高度の直下では、雪片は昇華によって冷やされ、融けない。 0°C 高度の下でこのように形成される非融解層は、相対湿度が低くなるほど厚くなり、たとえば相対湿度が90%で120m、50%で700mとなった。非融解層の下で雪片は融け始める。融解層の厚さは、相対湿度が低く、雪片の粒径、密度が小さいほど狭くなった。計算結果と解析結果との比較から、雪片の融解過程に影響を与える因子として、まず気温と相対湿度、更には雪片の粒径と密度が重要であることが明らかになった。

第5章では、雲の野外観測によって、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。観測は1978年と1979年の冬期に新潟県長岡市において行なった。観測では、雪片の断面積、質量、落下速度、含水率の測定を行なった。雪片の含水率及び落下速度は、地上の気温と相対湿度及び雪片の質量に依存していた。雪片の含水率は、地上の気温と相対湿度が高いほど大きく、また同じ気温と相対湿度の場合でも、雪片の質量が小さいほど大きかった。雪片の落下速度は、同じ質量でも地上の気温と相対湿度が高いほど大きかった。地上の気温が 0°C 以下の場合には、雪片の落下速度は雪片の質量が大きいほど大きくなった。この関係は、Magono (1953) 及び Langleben (1954) がこれまでに観測で得た結果と一致する。しかし、高い地上気温 (1.2°C 以上) の場合には、雪片の落下速度は雪片の質量によらずほぼ一定か、時には軽い雪片の落下速度が重い雪片の落下速度より大きくなる場合があった。 1.2°C 以上の気温で見出されたこのような関係は、雪片の融解と関連していた。これらの観測結果は、数値計算の結果を用いて矛盾なく説明できた。

結論として、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、気温と相対湿度、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。

The Study of Melting of Snowflakes in the Atmosphere

Takayo Matsuo

Physical Meteorology Research Division, MRI

ABSTRACT

The phenomena of melting of snowflakes in the atmosphere have been studied by analysis of surface weather observation, laboratory experiment, theoretical calculation, and field observation.

Analysis was made of the relationship between forms of precipitation and surface meteorological elements. The occurrence frequency of snow increased with decreasing air temperature and relative humidity. That of sleet and rain increased with increasing temperature and relative humidity. With increasing precipitation intensity, in this case, sleet rather than rain frequently occurred. These results suggest that the melting of snowflakes in the atmosphere is influenced not only by air temperature but also by relative humidity and precipitation intensity. The precipitation intensity is probably associated with snowflake size or density, and according to Gunn and Marshall (1958) snowflakes of larger size become dominant as precipitation intensity increases. It is presumed that sleet is likely to form at high intensity of precipitation because large snowflakes melt slowly.

In the experiment, the melting process of snowflakes was observed in a vertical wind tunnel in an airstream of 5.5 °C in temperature and of 100 cm sec⁻¹ in velocity. The examination revealed that no break-up of snowflakes took place in melting and that the melted water did not accumulated on the snowflake surface but percolated into the inside. The percolation may be due to capillary action. By the above result, a micro-physical model was proposed of a snowflake in melting. Using the model, an empirical formula for the melting rate of snowflakes, which is expressed as the rate of decrease in radius R by melting, was obtained to give the relation $dR/dt = -\varepsilon\bar{a}(K\Delta T + L_V D\Delta\sigma)/L_f\rho_i R$. The coefficient ε is an adjustable parameter to bridge the gap between experiment and theory, and evaluated as 1.75. \bar{a} is the ventilation coefficient of spheres, K the thermal conductivity of air, L_V the latent heat of vaporization of water, D the coefficient of molecular diffusion of water vapor in air, ρ_i the density of the snowflake, $\Delta\sigma$ the difference between water vapor density of airstream and equilibrium water vapor density on the snowflake surface, and ΔT the temperature difference between snowflake and ambient airstream.

Using the empirical formula as a basic equation, simulation of melting of snowflakes in the atmosphere was made to estimate the effects of air temperature, relative humidity, and snowflake size and density on the process of melting; the effect of relative humidity and snowflake size and density in particular was noted in this simulation. The results indicated that the fall distance for the onset of melting below freezing level increased with decreasing relative humidity and that the fall distance for

the completion of melting increased with decreasing relative humidity and with increasing snowflake size and density. If the air below freezing level is subsaturated, say 50 %, snowflakes reach the ground in unmelted condition, even at a warm surface air temperature of 5 °C. If it is saturated, snowflakes begin to melt from just below freezing level. Snowflakes of ordinary size, with equivalent diameter 1-4 mm in raindrop, completed melting within several hundred meters below freezing level. Large snowflakes with diameter 5-6 mm in raindrop did not complete melting as far as 1 Km below freezing level. The fall distance for the completion increased further with decreasing relative humidity.

The fall distance for the onset of melting is explained in terms of wet-bulb temperature of snowflakes. With decreasing relative humidity, the wet-bulb temperature of snowflakes decreased and snowflakes which would have a wet-bulb temperature below 0 °C do not melt. The fall distance for the completion is interpreted by the heat capacity of snowflakes and latent heat due to evaporation of water vapor from the snowflake surface; large snowflakes with large heat capacity melt slowly and a large amount of evaporation of water at low relative humidity suppresses the melting rate.

To verify the result of simulation, field observation has been carried out of snowflake water content, fall velocity, mass, and cross-sectional area under various conditions of surface air temperature and relative humidity. The results showed that fall velocity and liquid water content of snowflakes were dependent on surface air temperature above 0 °C, relative humidity, and snowflake mass. Fall velocities increased with increasing air temperature and relative humidity. Increase in velocity was greater with snowflakes of smaller mass. At surface air temperatures above 1 °C, fall velocities were almost constant with respect to snowflake mass. These findings show a different tendency from the results of Magono (1953) and Langleben (1954) which were obtained mainly about non-melted snowflakes. The water content in snowflakes was highest at the highest surface air temperature of 1.8 °C. In the case of the same air temperature, it increased with increasing relative humidity and in the case of the same air temperature and relative humidity, it increased with decreasing snowflake mass. These observations agree well with the result of simulation.

It is concluded that the melting process of snowflakes is under the control of (1) heat transfer from the ambient air to the snowflakes, (2) latent heat accompanying the phase change of water vapor on the snowflake surface, (3) heat capacity of snowflakes. The factors important in the process are air temperature, relative humidity, and snowflake size and density.

The present study will contribute to the clarification of bright-band formation in radar meteorology. It will also be useful for predicting the precipitation form and snow accretion in routine weather forecast.