

6. 結 論

大気中における雪片の融解現象を、地上気象観測資料の解析、雪片の融解に関する実験、雪片の融解に関する数値計算、霧の観測等によって調べた。

地上気象観測資料の解析では、地上の降水の型と気象要素との関係を調べた。解析の主な結果を下に示す。

- (1) 地上の降水の型は、地上気温だけではなく、相対湿度によっても変化する。地上気温が 0°C 以上でも、相対湿度がある臨界値（臨界湿度）以下であれば降水はすべて雪となる。臨界湿度 $RH_{cri}(\text{snow})$ と地上気温 T の関係は、解析の3地点（輪島、松本、日光）であまり変わらず、次式で与えられる；

$$RH_{cri}(\text{snow}) = -7.5 T + 93 \quad \text{輪島}$$

$$RH_{cri}(\text{snow}) = -7.3 T + 96 \quad \text{松本}$$

$$RH_{cri}(\text{snow}) = -6.2 T + 91 \quad \text{日光}$$

これは、雪片が融け始める条件において、気温の他に相対湿度が重要な役割を果していることを示唆している。

- (2) 地上気温が 0°C 以上で、相対湿度がある値（臨界湿度）以上であれば、地上の降水はすべて雨となる。臨界湿度 $RH_{cri}(\text{rain})$ と地上気温 T の関係は3地点で若干異なり次のように表わされる；

$$RH_{cri}(\text{rain}) = 46 \sqrt{6.2 - T} \quad \text{輪島}$$

$$RH_{cri}(\text{rain}) = 39 \sqrt{7.2 - T} \quad \text{松本}$$

$$RH_{cri}(\text{rain}) = 43 \sqrt{6.8 - T} \quad \text{日光}$$

これは、雪片が融解して雨滴になる過程には、気温の他に相対湿度、更には地点によって異なる因子（たとえば雪片の性質）が影響を及ぼしていることを示唆している。

- (3) 霧の出現頻度は、地上気温と相対湿度の他に、降水強度とも関連がある。これは、霧の形成には、大気状態の他に雪片の大きさ、密度等が影響を与えることを示唆している。

このように、解析によって、大気中の雪片の融解現象には、気温の他に、相対湿度、雪片の性質が関与している可能性が示された。

大気中における雪片の融解過程を明らかにするため、雪片の融解に関する室内実験を行なった。実験では、雪片の融解過程を観察し、これに基づいて雪片の融解速度を表現する実験式を求めた。実験によって得られた知見を下に示す。

- (1) 融解は雪片の表面で起こり、生成した水は雪片の内部にしみ込む。これは、雪片の多孔的性質に基づく毛細管の作用によるものと考えられる。
- (2) 雪片は水のしっかりした骨格をもっており、これは融解によって壊われにくい。
- (3) 雪片の融解速度式を融解による半径 R の減少速度で表わすと、次のように表わされる；

$$\frac{dR}{dt} = - \frac{\epsilon \tilde{a}}{L_f \rho_i} \frac{1}{R} (K \Delta T + L_v D \Delta \sigma)$$

ここで、 ϵ は補正係数で、実験によって1.75の値を得た。

実験によって得られた融解速度式を用いて、0℃高度より下の雪片の融解に関する数値を行なった。計算では、大気相対湿度、雪片の粒径、密度が雪片の融解に与える影響を調べた。計算結果を下に示す。

- (1) 雪片の融解の度合は、大気の状態と雪片の性質に依存するが、中でも相対湿度が融解に与える影響は大きい。0℃高度の下の大気が水飽和、水未飽和によって、雪片の表面で水蒸気の凝結あるいは昇華が起こり、これに伴う潜熱が融解を加速あるいは減速する。
- (2) 0℃高度より下の大気が飽和している時、雪片は0℃高度の直下から融け始め、融解層が形成される。融解は、外気から熱伝導によって輸送される熱に加え、雪片の表面で起こる水蒸気の凝結に伴う潜熱によって起こる。融解層は、雪片の粒径、密度が大きいほど厚くなる。
- (3) 0℃高度より下の大気が水未飽和の時、雪片は0℃高度の直下では融けない。雪片の表面で起こる水蒸気の昇華による冷却効果によって、雪片は0℃以下に冷やされる。したがって、0℃高度の下に雪片が融けない層が形成される。非融解層の厚さは雪片の粒径や密度には依存しないが、相対湿度によって変化し、たとえば相対湿度が90%場合に厚さが120 mとなり、50%で700 mとなる。非融解層の下で、雪片は融け始め、最終的に雨滴となる。雨滴となる高度は、相対湿度が低いほど、また雪片の粒径や密度が大きいほど低くなる。通常の大気状態と雪片の性質を考えると、この高度は0℃高度より下、数100 m以下となる。このように、大気が水未飽和の時、0℃高度の下にまず非融解層ができ、その下に融解層ができることになる。
- (4) 雪片の落下速度の変化は、非融解層中では昇華によって起こり、融解層中では融解によって起こる。昇華によって落下速度は僅かに小さくなり、融解によって落下速度は大きく増加する。

数値計算によって、大気中における雪片の融解過程に与える気温と相対湿度の影響および雪片の粒径と密度の影響が定量的に明らかになった。

霧の野外観測では、落下中の雪片の断面積、質量、落下速度の同時観測と含水率の測定を行なった。観測結果と数値計算の結果を比較することにより、融解が雪片の含水率と落下速度に与える効果は次のようにまとめられる。

- (1) 落下する雪片の含水率は、0℃以上の気温と相対湿度、更に雪片の質量によって変化する。気温と相対湿度が高いほど含水率は大きく、また同じ大気状態でも小さい質量の雪片ほど含水率は大きい。
- (2) 雪片の落下速度は、0℃以上の気温と相対湿度、更には雪片の質量に依存する。同じ質量の雪片でも、気温と相対湿度が高いほど落下速度は大きい。気温が0℃以下（雪片が融けていない場合）では、雪片の落下速度は雪片質量と共に増加する。しかし、気温が1.2℃以上で高くなると、

雪片の落下速度は質量によらず一定か、時には小さい雪片の落下速度が大きい雪片の落下速度より大きくなる場合がある。1.2℃以上の気温で見出だされたこのような関係は、雪片の融解と関連している。これを数値計算の結果から解釈すると、小さい雪片ほど融解の進行が早く、落下速度の増加速度も相対的に大きいために起こったとすることができる。

このように、雪片の含水率、落下速度は、気温と相対湿度、更に雪片の質量に依存して変化する。これらの観測結果は、数値計算の結果と定量的にもよく一致している。

この研究によって、大気中における雪片の融解過程が調べられ、融解過程に影響を与える気温と相対湿度、更には雪片の粒径、密度の効果が定量的に明らかになった。

謝 辞

観測に当たり、科学技術庁国立防災科学技術センター長岡雪害実験研究所栗山弘所長をはじめ木村忠志第2研究室長、小出和成管理係長ならびに職員の皆様から多くのお世話をいただいた。資料の収集に当たり、東京管区気象台調査課のご協力を得た。研究の上で、気象研究所物理気象研究部佐粧純男第1研究室長から多くのご援助を、久保次郎前部長、岡林俊雄部長および職員の方々には激励をいただいた。また、名古屋大学武田喬男教授には多くのご教示を、樋口敬二教授、小野晃教授、岩城泰信助教授にはご助言をいただいた。解析に当たり、埼玉大学（現在、草加市立草加中学校）佐藤靖裕氏の協力を得た。以上記して、御礼を申し上げる。

参 考 文 献

- Ageta, Y., T. Ohata, Y. Tanaka, K. Ikegami and K. Higuchi, 1980: Mass balance of glacier AX 010 in Shorong Himal, East Nepal during the summer monsoon season. *Seppyo*, 41, 34 — 41.
- 荒川秀俊, 田畑七郎, 1965: 平地の雪はどこまで降るか, *天気*, 12, 15 — 16.
- Austin, P. M. and A. C. Bemis, 1950: A quantitative study of the bright band radar precipitation echoes. *J. Meteor.*, 7, 145 — 151.
- Battan, L. J., 1973: Radar observation of the atmosphere. The University of Chicago Press, p. 195.
- Best, A. C., 1950: Empirical formulae for the terminal velocity of drop falling through the atmosphere. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 76, 302 — 311.
- 大後美保, 1968: 工業と天候, 産業科学学会, pp. 134—139.
- Drake, J. C. and B. J. Mason, 1966: The melting of small ice spheres and cones. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 92, 500 — 509.
- du Toit, P. S., 1967: Doppler radar observation of drop sizes in continuous rain. *J. Appl. Met.*, 6, 1082 — 1087.

- Ekepenyong, B. E. and R. C. Srivastava, 1970 : Radar observation of the atmosphere (Battan, 1973). The University of Chicago Press, p. 195.
- 藤吉康志, 武田喬男, 1980 : 同時に異なった高度に現われたブライトバンド, 天気, 27, 29—34.
- Goyer, G. G., S. S. Lin, S. N. Gitlin and M. N. Plooster, 1969 : On the heat transfer to ice spheres and the freezing of spongy hail. J. Atmos. Sci., 26, 319—326.
- Gunn, K. L. S. and J. S. Marshall, 1958 : The distribution with size of aggregate snowflakes. J. Meteor., 15, 452—466.
- 五藤員雄, 黒岩大助, 1975 : 北海道における電線着雪とその発達抑止に関する研究, 雪氷, 37, 182—191.
- 五藤員雄, 1976 : 捻れ回転による難着雪電線の着雪発達過程のシュミレーション計算法, 雪氷, 38, 13—23.
- Harris, F. I., 1977 : The effects of evaporation at the base of ice precipitation layers : Theory and radar observations. J. Atmos. Sci., 34, 651—672.
- 林潔, 相木一男, 柏村良一, 1953 : 送電線着雪の観測, 雪氷の研究—I, 73—79.
- Higuchi, K., 1977 : Effect of nocturnal precipitation on the mass balance of the Rikha Samba Glacier, Hidden Valley, Nepal. Seppy, 39, 43—49.
- Houze, R. A., J. D. Locatelli and P. V. Hobbs, 1976 : Dynamics and cloud microphysics of rainbands in an occluded frontal system. J. Atmos. Sci., 33, 1921—1936.
- , P. V. Hobbs, P. H. Herzegh and D. B. Parsons, 1978 : Size distributions of precipitation particles in frontal clouds. J. Atmos. Sci., 36, 156—162.
- 伊藤博, 1953 : 着雪の予報, 雪氷の研究—I, 81—85.
- 石崎潑雄, 1977 : 耐風工学, 朝倉書店, 東京, pp. 49—80.
- 気象庁予報部, 1976 : 天気予報指針, pp. 207—213.
- Knight, C. A., 1979 : Observations of the morphology of melting snow. J. Atmos. Sci., 36, 1123—1130.
- 倉嶋厚, 1966 : 日本の気候, 古今書院, 東京, p. 132.
- 甲藤好郎, 1979 : 伝熱概論, 養賢堂, 東京, pp. 44—182.
- 蔵重一彦, 1953 : 着雪予報の実際, 雪氷の研究—I, 86—92.
- Langleben, M. P., 1954 : The terminal velocity of snowflakes. Quart. J. R. Met. Soc., 80, 174—181.
- Leary, C. A. and R. A. Houze, 1979 : Melting and evaporation of hydrometeors in precipitation from the anvil clouds of deep tropical convection. J. Atmos. Sci., 36, 669—679.
- Macklin, W. C., 1963 : Heat transfer from hail stones. Quart. J. R. Met. Soc., 89,

360—369.

Mason, B. J., 1956 : On the melting of hailstones. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 82, 209—216.

Magono, C., 1953 : On the growth of snowflake and graupel. *Sci. Rep. Yokohama Nat. Univ.*, Sec. 1, No. 2, 18—40.

————— and T. Nakamura, 1965 : Aerodynamic studies of falling snowflakes. *J. Met. Soc. Japan*, 43, 139—147.

Matsuo, T. and Y. Sasyo, 1981a : Empirical formula for the melting rate of snowflakes. *J. Met. Soc. Japan*, 59, 1—9.

————— and —————, 1981b : Melting of snowflakes below freezing level in the atmosphere. *ibid.*, 59, 10—25.

————— and —————, 1981c : Non-melting phenomena of snowflakes observed in subsaturated air below freezing level. *ibid.*, 59, 26—32.

—————, —————, and Y. Sato, 1981d : Relationship between types of precipitation on the ground and surface meteorological elements. *ibid.*, 59, 462—476.

中村勉, 1960 : 雪片の含水量の測定法について, 雪氷, 22, 145—146.

中沢全一, 能登正之, 1971 : 判別解析による降水形態の予測, 研究時報, 23, 79—86.

西山哲男, 1971 : 流体力学(Ⅱ), 日刊工業新聞社, 東京, pp. 95—113.

大北至盛, 1943 : 電線の着氷現象と通信線路の電害観察(9), 雪氷, 5, 14—22.

Ohtake, T., 1969 : Observations of size distributions of hydrometeors through the melting layer. *J. Atmos. Sci.*, 26, 545—557.

Pruppacher, H. R. and R. Rasmussen, 1979 : A wind tunnel investigation of the rate of large water drops falling at terminal velocity in air. *J. Atmos. Sci.*, 36, 1255—1260.

Ranz, W. E. and W. R. Marshall, 1952 : Evaporation from drops. *Chem. Eng. Prog.*, 48, 141—146.

Sasyo, Y. and T. Matsuo, 1980 : On the statistical investigation of fall velocity of snowflakes. *Pap. Met. Geophys.*, 31, 61—79.

坂本雄吉, 1978 : 電線への着氷雪とその予測, 雪氷, 40, 11—17.

Sekhon, R. S. and R. C. Srivastava, 1970 : Snow size spectra and radar reflectivity. *J. Atmos. Sci.*, 27, 299—307.

荘田幹夫, 1953 : 着雪の研究, 雪氷の研究—I, 50—72.

Takeda, T. and Y. Fujiyoshi, 1978 : Micro-physical processes around melting layer

in precipitating clouds as observed by vertically pointing radar. J. Met. Soc. Japan, 56, 293—303.

高木子平, 1973 : 電線の着雪 (石打における観測), 雪氷の研究, 5, 94—101.

高橋龍太郎, 1943 : 風害・水害, 岩波書店, p. 180.

和達清夫, 倉嶋厚, 1974 : 雨・風・寒暑の話, NHKブックス, p. 155.

若浜五郎, 黒岩大助, 浅井修一, 樋口紀雄, 石井幸男, 高橋満敏, 1982 : 電線着雪気象と事故対策, 電力と気象, 27, 65—76.

Wexler, R., 1955 : An evaluation of physical effects in the melting layer. Proc. Fifth Wea. Radar Conf., 329—334.

Yuge, T., 1960 : Experiments on heat transfer from spheres including combined natural forced convection. J. Heat Transfer, 82, 214—220.

気象研究所

1946 (昭和21年) 設立

所長 : 理博 森安茂雄

予報研究部	部長 :	吉田泰治
台風研究部	部長 :	理博 相原正彦
物理気象研究部	部長 :	理博 岡林俊雄
応用気象研究部	部長 :	村山信彦
気象衛星研究部	部長 :	工博 内藤恵吉
地震火山研究部	部長 :	理博 渡辺偉夫
海洋研究部	部長 :	理博 飯田隼人
高層物理研究部	部長 :	理博 嘉納宗靖
地球化学研究部	部長 :	秋山勉

気象研究所技術報告

編集委員長 : 岡林俊雄

編集委員 : 秋山孝子 近藤洋輝 佐粧純男
吉川友章 青柳二郎 清野政明
遠藤昌宏 小寺邦彦 伏見克彦

事務局 : 西田圭子 西村浩弥

気象研究所報告は、気象学、海洋学、地震学、その他関連の地球化学の分野において、気象研究所職員が得た研究成果に関し、技術報告、資料報告及び総合報告を掲載する。

気象研究所技術報告は、1978年(昭和53年)以降、必要の都度刊行される。

昭和59年2月15日発行 ISSN 0386-4049

編集兼発行所 気象研究所

茨城県筑波郡谷田部町長峰1-1

印刷所 勝美印刷株式会社

TEL 03-812-5201-5