

5. 霽の野外観測

これまで行なってきた解析・実験・数値計算によって、大気中で起こる雪片の融解過程に与える気温、相対湿度、雪片の粒径、密度の影響を調べた。この章では、霽の観測によって得られた結果と先の数値計算との比較を行ない、大気中における雪片の融解過程を定量的に調べる。

5.1 降雪観測

1978年1月と1979年2月に新潟県長岡市にある科学技術庁国立防災科学技術センター雪害実験研究所の露場で降雪の観測を行なった。長岡市は北陸地方の日本海沿岸地帯にある小都市で、冬期は降雪が多い。この地域は冬期でも気温が高く、地上気温が 0°C 以上でもしばしば降雪がみられる。観測期間中、約20回の降水(雪、霽、雨)を記録した。降雪中の雪片は立体的であり、構成する結晶は殆ど樹枝状結晶からなり、実験で融解速度式を求めた雪片と同種のものであった。観測では、個々の雪片の質量、断面積、落下速度、含水率の測定を行なった。

5.1.1 降水期間中の大気状態

観測を行なった期間中の、降水時の気温と相対湿度の高度分布を調べた。解析には、長岡市における降水時に一番近い時刻の輪島の高層資料を用いた。解析の方法は、2章の解析方法(2.2節)と全く同様である。表4において、 H_f は 0°C 高度を示す。表にはそれぞれの値の平均値(Mean)と標準偏差(S. D.)が示されている。

表4 Atmospheric condition over Wajima Aerological Station at the time of precipitation at Nagaoka station.

Periods	r ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$)	$\text{RH}_g - \text{RH}_f$	H_f (m)
21 ^h , 27 Jan. 1978	7.8	- 9	600
9 ^h , 28 Jan. 1978	7.7	- 8	225
21 ^h , 2 Feb. 1979	6.5	0	330
9 ^h , 4 Feb. 1979	6.1	- 6	180
21 ^h , 4 Feb. 1979	6.6	- 7	820
9 ^h , 6 Feb. 1979	4.0	- 2	420
Mean \pm S. D.	6.5 ± 1.4	$- 5 \pm 4$	

大気の気温減率は湿潤断熱減率 $6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ (900mb 高度で気温が $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 付近) にはほぼ等しく、地上と $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高度の相対湿度の差は平均で5%と小さい。長岡市の降水時の大気状態は、数値計算で仮定した大気状態に近い。

5.2 測定方法

観測に使用した装置を図26に示す (Sasyo and Matsuo, 1980)。装置は、大きさ $50\text{ }\times\text{ }50\text{ cm}$ 、高さ 170 cm の垂直角型洞から成る。フォトカプラー A, B, C は発光部と受光部からなり、落下する雪片が発光部より出る光線を遮蔽するとパルス状の電気信号が出る仕組みになっている。洞の底部

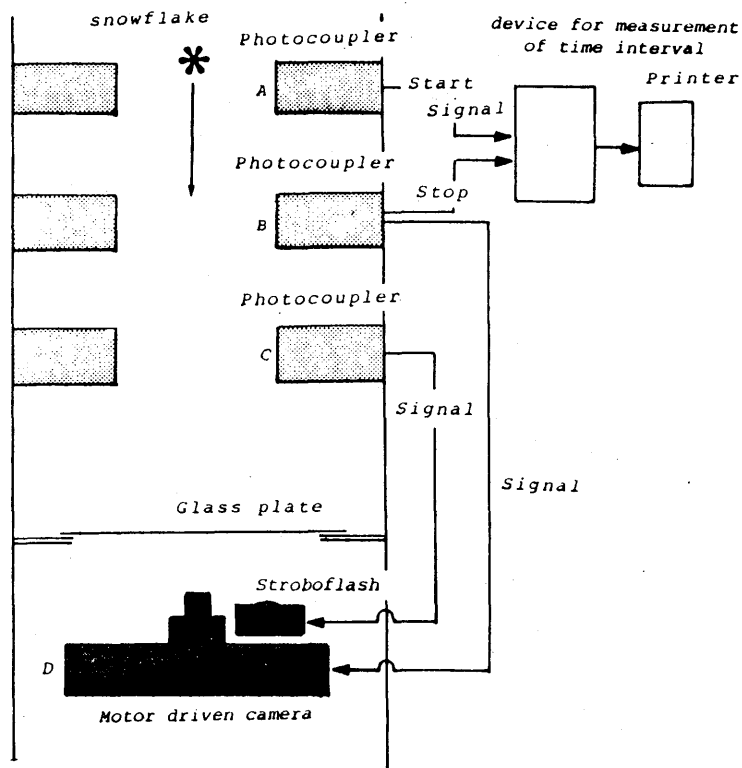


図 26 Schematic arrangement of apparatus used to measure snowflake fall velocity, cross-sectional area, and mass.

には透明なガラス板が置かれ、その下には落下する雪片を撮影するためのストロボとモータードライブカメラからなる写真装置Dがある。

雪片がフォトカプラー A を通過すると、スタート信号が発生し時間の測定が始まる。フォトカプラー B に来ると2つの信号が発生し、1つは時間間隔測定装置へストップ信号として送られ、これから落下速度が計算される。もう一つはモータードライブカメラに送られシャッターを開放の状態にする。フォトカプラー C に来ると、電気信号が発生し、これがストロボに送られ発光させる。こ

れによって、落下中の雪片の断面積が撮影される。底のガラス板上に落下した雪片を融かし、質量を沓紙法で測定する。これで1つの雪片について落下速度・断面積・質量の測定が終了する。雪片が同時に2つ以上入った場合、装置が誤作動し、1つの雪片について3つの要素をすべて測定できない場合があった。

含水率は中村(1960)の方法によって測定した。ウォーターブルーを付着させた沓紙を外気に充分なじませ、これに落下する融解雪片を受ける。雪片の中の水がしみ出し沓紙に吸収され、青い円を作る。この輪郭を鉛筆でふちどる。沓紙に残った水を暖め融かした後、大きくなった外円をふちどる。外円と内円の面積比から含水率を計算する。含水率の測定は、種々の降雪で行なわれたが、地上気温が0℃以下の時の降雪では、含水量が微量で測定できなかった。

観測地点から50m程度離れた場所で測定された気温と相対湿度を、観測のデータ解析に使用した。

5.3 雪片の密度

雪片の密度は一般に結晶形、雲粒付着、融解等によって変化することが知られている。図27に、測定された雪片の質量と断面積との関係を示す。実線は雪片を球形と仮定した場合の等密度線である。観測期間中の地上気温は降雪によって異なり、-4℃~+1.8℃の間で変化した。図の中で○

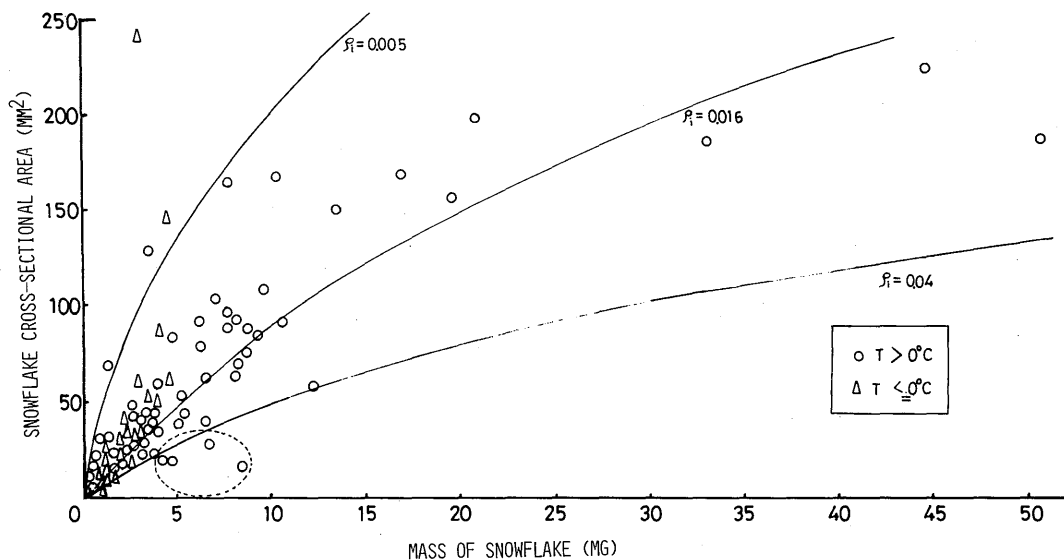


図27 Relation between snowflake masses and cross-sectional areas observed. Solid lines are lines of constant density obtained by assuming spherical symmetry.

印は地上気温が0℃以上の場合の測定値を、△印は0℃以下の場合を示す。雪片の密度はおよそ0.005~0.04の間にある。気温が0℃以上の場合の方が0℃以下の場合に比べ、いくらか密度が

大きく、平均でそれぞれ0.017 ($T > 0^\circ\text{C}$)と0.014 ($T \leq 0^\circ\text{C}$)である。全雪片の平均の密度は0.016である。図の中で、破線で囲まれた4つの雪片は、 $+1.4^\circ\text{C} \sim +1.8^\circ\text{C}$ の高い気温の場合に観測されたものであり、これは融解によって密度が増加したことを示唆している。

5.4 雪片の含水率

図28に、測定した含水率と雪片質量の関係を示す。同じ記号は同じ降雪中の測定値を示す。測定期間中の平均の地上気温と相対湿度を図の右上方に示す。含水率は一般に、地上気温が高いほど大きく、同じ気温でも相対湿度が高いほど大きいことがわかる。また、同じ気温と相対湿度でも雪片の質量が小さいほど含水率は大きくなっている。

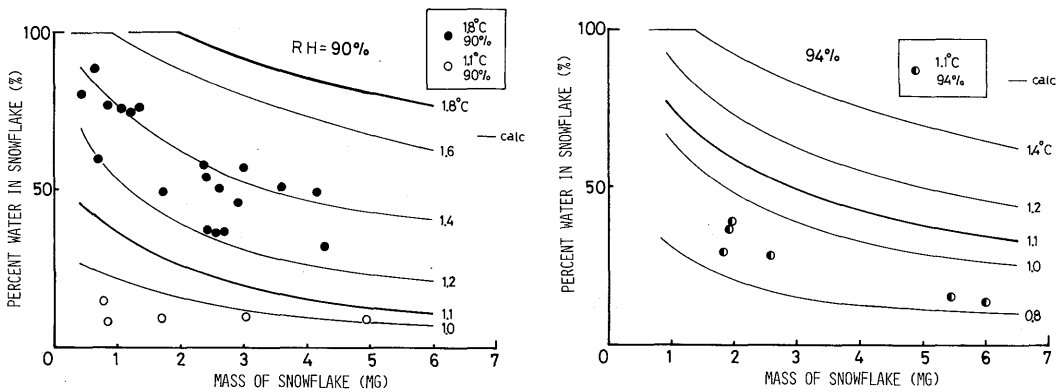


図28 Variation of percent water in snowflakes with snowflake mass, showing comparison of observational results (symbols) with theoretical curves (solid lines) from numerical calculations, at the indicated surface temperatures and relative humidities. Thick solid lines indicate calculated lines of the same condition as the observation. The left figure is for relative humidity of about 90%: the right for relative humidity of about 94%.

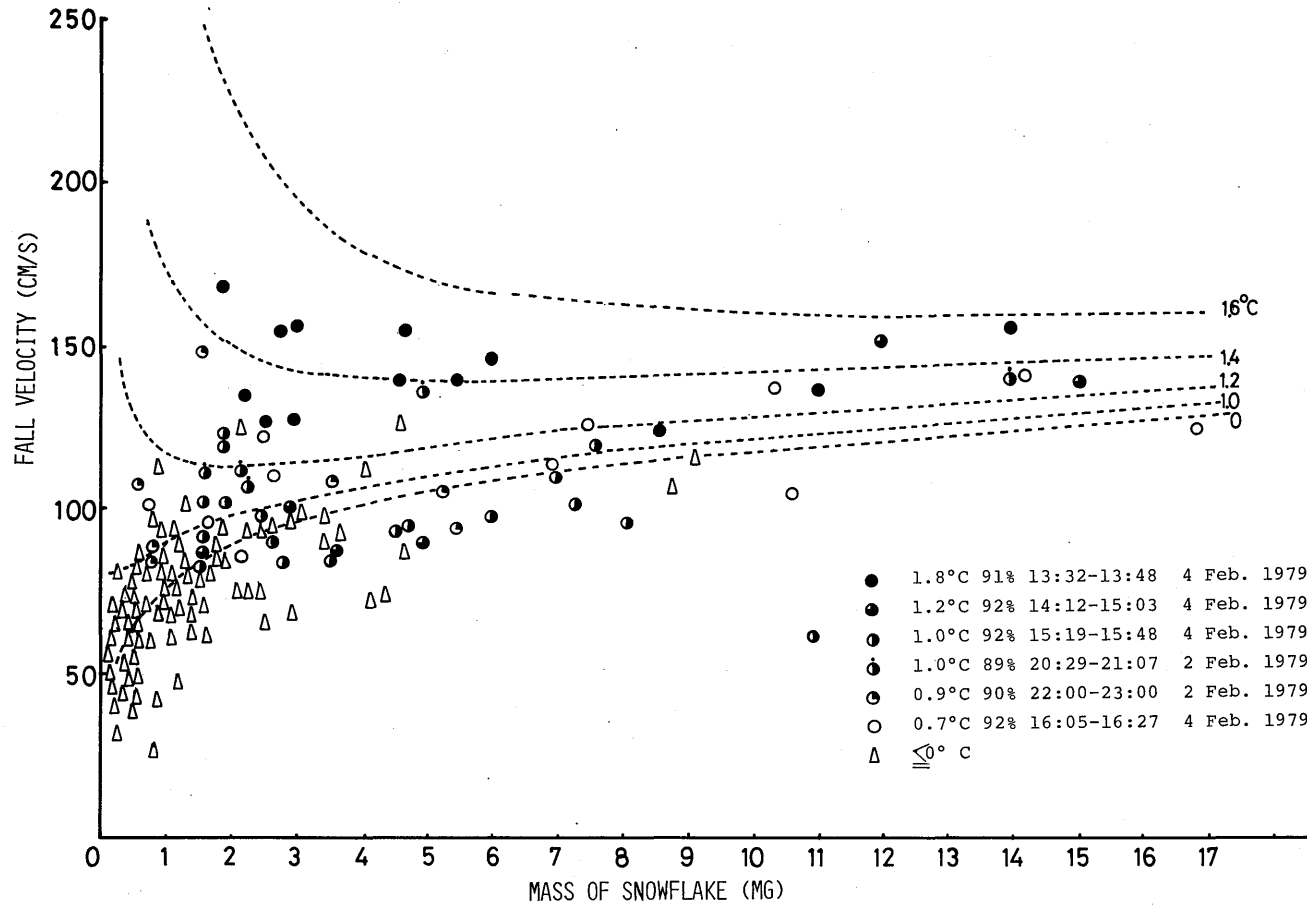
比較のため、計算によって求めた含水率と質量の関係を実線で示す。計算に必要な雪片の密度は、観測で得られた平均の密度 $\rho_i = 0.016$ を用いた。計算方法及び大気状態の仮定は、4章の数値計算の場合と同様である。90%あるいは94%の相対湿度の条件の下で、 0°C 高度から実線の端に示された外気温になる高度まで雪片を落下させた。この高度における含水率と質量の関係が実線で示されている。太い実線は、観測時と全く同じ気温と相対湿度の条件の下で計算を行なって求めた関係を示す。同じ条件の下での測定値と計算値を比較すると傾向はほぼ一致している。これは数値計算の融解モデルが妥当であったことを示している。ただし、系統的に測定値の方が計算値より10~30%だけ含水率が小さくなる傾向がみられる。この原因の一つは、沓紙法による含水率の測定にあると考えられる。沓紙による含水率の測定法は、かなりの測定誤差を伴う。沓紙法では、雪片の中に

含まれる水を完全に吸い取ることはできない。少量の水は、雪片の孔や間隙に毛細管的作用によって取り込まれており、容易には出てこない。このため測定値は実際の含水率より少なくなる可能性がある。このような傾向が測定値と計算曲線との間に現われているとみることができる。しかし、この測定誤差がどの程度であるかは、個々の雪片については、沓紙法にまさる正確な含水率の測定法がないので、はっきりしたことはわからない。

5.5 雪片の落下速度

観測期間中の降雪時の地上の相対湿度は、多くの場合90%あるいは94%に近かった。図29 (a), (b)は観測で得られた雪片の落下速度と質量との関係を示す。(a)は地上の相対湿度が約90%の場合であり、(b)は約94%の場合である。同じ記号は同じ期間の測定値を示す。期間中の平均の地上気温と相対湿度を図の右下方に示す。特に、△印は地上気温が0℃以下の場合の測定値を示し、地上の相対湿度と関係なく選んである。雪片の落下速度は、地上気温、相対湿度、雪片質量によって変化することがわかる。地上気温が高くなると、落下速度は相対的に大きくなる。相対湿度が高いほど落下速度は大きくなる。相対湿度が94%と高い場合 (b) 図) には、 $200 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上の大きい落下速度が見られるが、90%の(a)図では、それが見られない。次に落下速度の質量に対する依存性を調べる。地上気温が0℃以下の場合、△印で示されるように、落下速度は質量の増加と共に大きくなる。この傾向は、これまでのMagono (1953) および Langleben (1954) の観測結果とよく一致する。しかし、気温が0℃以上で高くなっていくと (○印が黒くなっていくと)、このような傾向が見られなくなる。即ち、気温が1.2℃以上と高くなると、落下速度は質量によらず一定か、時には小さい質量の雪片の落下速度が大きい質量のものより大きくなる場合がみられる。これは、気温の上昇による落下速度の増加が、特に小さい質量の雪片について顕著に現われてくるからである。このような傾向は、これまで報告された例はなく、雪片の融解の問題と関連して興味深い。

ここで、観測結果と計算結果とを比較する。計算によって求めた落下速度と雪片質量との関係を図の中で破線によって示す。計算の方法は先の含水率の場合と同様である。地上気温0℃の計算曲線は融解していない雪片質量と落下速度との関係を代表しているが、観測結果 (△印) はほぼこの曲線上にある。地上気温が0℃以上で高くなっていくと、理論曲線は右上がりから一定に、更には右下がりの傾向を示す。これは、小さい質量の雪片ほど融解の進行が早く、断面積の減少速度が大きいため、従って、落下速度が増加する度合が相対的に大きくなるために起こることを示している。0℃以上の地上気温で測定された観測値の傾向は、このような理論曲線とほぼ一致している。このことは、0℃以上の高い地上気温において新たに見出だされた雪片質量と落下速度との関係が、数値計算の結果を用いてうまく説明できることを示している。しかし詳細にみると、同じ条件の下で計算した理論曲線の周りに、観測値はかなりばらついている。これは、計算の中でうまく取り扱えなかった個々の雪片の性質の違いによって、起こっていると考えられる。質量が同じでも、雪片によって形、多孔性の度合、雲粒付着の度合等が異なり、これらが落下速度に影響を与えていることが



29(a) Variations of fall velocities of snowflakes with their masses at relative humidity of about 90%, showing comparison of observational results (symbols) with theoretical curves (dashed lines) from numerical calculations, at the indicated surface air temperatures. Average surface air temperature and relative humidity during the snowfall period are indicated with symbols in a list in the lower right hand corner.

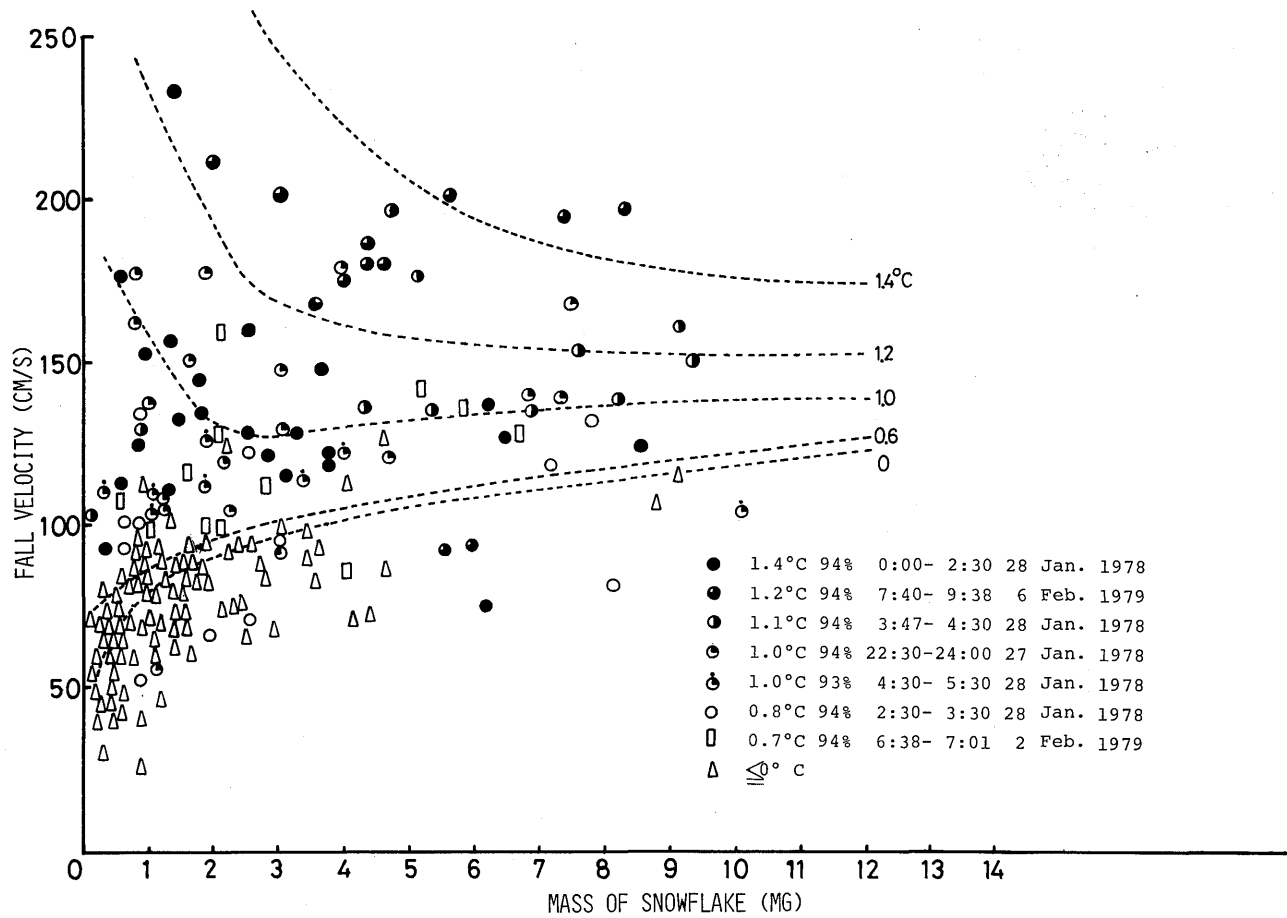


图29(b) Same as Fig. 29(a) except for relative humidity of about 94 %.

考えられる。

観測結果をまとめると次のようになる。雪片の含水率ならびに落下速度は、地上気温、相対湿度、質量に依存して変化する。地上気温が 0°C 以上で高いほど、また相対湿度が高いほど、雪片の含水率は大きく、落下速度もまた大きくなる。地上気温が 0°C 以下の場合（雪片は融けていない状態）では、落下速度は雪片質量が大きくなるほど大きくなる。しかし、地上気温が 0°C 以上で高くなると、落下速度は質量によらず一定か、時には小さい質量の雪片の落下速度が、大きい質量の雪片の落下速度より大きくなる場合がある。

これらの観測結果は数値計算の結果とよく一致している。このことは、この研究によって示された大気中における雪片の融解過程が妥当なものであることを示している。