## -40°C ~ -55°C における人工雪結晶生成実験とその特徴

# 柿崎 佑希<sup>1</sup>, 中拂 匠<sup>1</sup>, 原田 康浩<sup>1</sup>, 村井 昭夫<sup>1,2</sup>, 亀田 貴雄<sup>1</sup> (<sup>1</sup> 北見工業大学, <sup>2</sup> 金沢市立内川中学校)

### 1. はじめに

気温 0°C から -40°C で生成される雪結晶の形態は Nakaya の研究 <sup>1)</sup> を発端にその後の様々な 研究によって晶癖は温度,成長の型は過飽和水蒸気量によって決まることが明らかになっている. それに対して -40°C 以下での雪結晶形態の研究は,その温度条件が高層大気や南極氷床内陸部で の気温に対応しており,興味深い対象であるに関わらず,Kobayashi による研究 <sup>2)</sup> や Bailey and Hallett による系統的な研究 <sup>3,4)</sup> など,拡散型生成装置を用いた研究の他はあまりなされていない.

このような背景から,我々は,この温度領域での人工雪結晶生成実験を自然の雪結晶の生成環境 に近い対流-混合型装置を用いて行い,結晶形状とその生成条件との関係を調べてきた<sup>5)</sup>.その結 果,水蒸気量が少ない場合には角板と交差角板が,水蒸気量が多い場合に砲弾および砲弾集合が, さらに水蒸気量が多い場合には針状結晶が生成されることが分かった<sup>5)</sup>.この結果は,拡散型装 置を用いた先行研究<sup>3,4)</sup>と一致する点も多く,有用な知見を与えるものであるが,結果の信頼性 向上のためにもさらなるデータの集積が必要である.

本研究では、さらに実験回数を重ねてデータ数を増やすとともに、1回の結晶生成の間に気温を ほぼ一定に保ったまま、供給する水蒸気量を段階的に変える実験を行い、成長過程にある雪結晶 の形状・種類が水蒸気量の段階的変化に追従して変わるのか調べた.すなわち、これまでに得ら れた気温-水蒸気量-結晶形態の関係を一回の実験で調べることができるように工夫をして、これま での結果の再現性を確認するための実験を実施した.

#### 2. 実験装置と基本的実験方法

人工雪生成装置は村井の対 流型雪結晶生成装置<sup>6)</sup>を用い た.図-1(a)に装置の内部構造 の正面図,(b)に装置内温度測 定位置の模式図を示す.発泡ス チロール(断熱材)によって外 部からの熱を遮断し,装置上 部に設置したペルチェ素子に電 圧を印加して装置内部の空間 (幅80mm,奥行き80mm,高 さ 250mm)を冷却する.雪結



図-1 対流混合型雪結晶生成装置の構造 (a),各種温度測定位置 (b).

晶生成のための水蒸気は、装置内の下部に設置した金属カップに入れた水または氷をヒーターで 加熱することで供給される.この水蒸気により、装置内上端の雪結晶支持具(2本の爪楊枝の間に ポリエステル繊維(直径 15 μm)を渡したもの)の繊維上に雪結晶が生成される.

雪結晶生成部の気温  $T_a$  は、図–1(b)(上)のように繊維の上下約 5 mm の 2ヶ所に設置したサー ミスタ温度センサで測定し、それらの値の平均値とした。一方、雪結晶の成長に必要な過剰水蒸 気量は、直接その値を測定することはしておらず、水蒸気供給部の水・氷の温度  $T_w$  をもって代え た.  $T_w$  は図–1(b)(下)のように、水・氷中の表面直下ならびに深さ約 5 mm 付近に設置したサー ミスタ温度センサーで測定するが、両者にほとんど差が無かったことから、水・氷面直下での測 定値を用いることにした。 生成した雪結晶の観察は、生成装置の前後に設けたウィンドウを通して双眼実体顕微鏡(Nikon 製, SMZ-660)で行い、顕微鏡画像の記録は顕微鏡の接眼部に取り付けたデジタルカメラ(Nikon 製 COOLPIX 5100)で行なった.また、カメラをインターバル撮影モードで使用することで雪結 晶の成長過程の様子も記録した.

#### 3. 本研究における2つの雪結晶生成実験

- **方法 1**:  $T_a \ge T_w$  の値の組み合わせを固定して、生成実験を行い、生成された結晶形状と  $T_a-T_w$ の関係を調べる. 2009 年 11 月 26 日~2010 年 9 月 24 日の間、計 51 通りの  $T_a-T_w$ の組み合わせの結果を得た. この方法による実験は、これまでの実験で不足している  $T_a-T_w$ の組み合わせの結果を得ることを目的としている.
- **方法 2:**1回の雪結晶成長実験の間, *T<sub>a</sub>* をほぼ一定に保持したままで, *T<sub>w</sub>* の値をもっとも低い 値から段階的に上昇して,供給する水蒸気量を動的に増加させ,生成される雪結晶形状の変 化を観察する.2010年11月17日 ~ 2011年4月4日の間,計16回の結果を得た.

#### 4. 実験結果と考察

## 4.1. 方法 1 の結果

図-2 は方法 1 による実験で得られた雪結晶の顕微鏡画像の一例である.  $T_a$  と  $T_w$  の組み合わせに応じて, (a) 角板および交差角板, (b) 砲弾および砲弾集合, (c) 針の3種類の結晶が生成された. これ以外の結晶型は生成されなかった. なお, (b) の砲弾集合は、ドームふじ観測拠点で1年を通して最も高い頻度で観察された砲弾および砲弾集合<sup>7)</sup> とほぼ同じ種類とサイズのものであった.

51回のすべての生成実験の結果を、横軸に生成部の気温  $T_a$ 、縦軸に水蒸気供給部の水・氷の 温度  $T_w$  として、生成された雪結晶の形状毎に記号を変えてプロットした雪結晶ダイヤグラムを 図–3(a) に示す. この図から次のことがわかる.

- (1)  $T_w$  が極端に低い、すなわち供給水蒸気量が極端に少ない場合には、 $T_a$  の高低にかかわらず、 雪結晶は生成されない.
- (2) 雪結晶が生成される条件で、*T<sub>w</sub>* がもっとも低く、供給水蒸気量がもっとも少ないと考えら れる場合には、角板および交差角板 (▲) が生成される.
- (3) *T<sub>w</sub>* を高くすると, 砲弾 (●) の生成頻度が高くなる. ただし, 生成部気温 *T<sub>a</sub>* が -40°C ~ -45°C の範囲で生成されやすい.
- (4)  $T_a$  が  $-45^{\circ}$ C よりも低い場合で、 $T_w$  が高く、水蒸気量が多いと、針 (■) が生成されやすい.
- (5) 極端に水蒸気量が多い場合には、図-2(c) にように一点から複数の針が放射状に成長する.

以上の結果のすべては,我々のこれまでの実験報告<sup>5)</sup>でも同じ内容が確認されていたが,今回の 追加実験によってその内容と傾向が確かなものであることが確認された.

### 4.2. 方法 2 の結果

まず最初に,段階的に上昇させる水・氷の温度差  $\Delta T_w$  を 5°C ~ 10°C の範囲内にして,成長 する雪結晶の形状の変化を調べた.その結果, $T_w$  を増加したことで図 3(a) ダイヤグラムでは違 う型の雪結晶となる  $T_a$ - $T_w$  の組み合わせへと変えたにもかかわらず,結晶形状には変化はなく, そのままサイズが大きくなるという結果となった.





図-3 実験により得られた  $T_a$ - $T_w$ -結晶形状の関係図: (a) 方法 1 による結果, (b) 方法 2 による結果.

(a)

そこで、次に  $T_w$  の段階的上昇量  $\Delta T_w$  を 10°C~20°C に変えて、水蒸気量を極端に大きく増 やす実験を行なった。16回の実験における  $T_a$ - $T_w$ -雪結晶形状の関係および推移をまとめたもの が図-3(b) である。図-3(a) の結果と比較すると、「方法 2」による結果では「方法 1」で得られた (1)-(5) の関係を維持したまま、プロットされる点が全体に右上にシフトしていることが分かる。 この結果は、ある型の結晶が生成されている状態で別な型の生成条件へと変えたとしても、この温 度域では基の結晶型での成長を維持する傾向が強いことを意味している。結晶形状の推移は、雪 結晶が生成されない場合を除いてすべての実験で確認されたが、図-3(b) にはそのうちの 2 例のみ を矢印で示している。図-4 (a1)-(a3) と (b1)-(b3) は、それぞれ図-3(b) 中の

•  $\Re \Pi$  (T1):  $(T_a, T_w) = (-52.8^{\circ}\text{C}, -17.3^{\circ}\text{C}) \Rightarrow (-52.0^{\circ}\text{C}, -2.5^{\circ}\text{C}), \Delta T_w = 14.8^{\circ}\text{C}$ 

•  $\mathfrak{K}\mathfrak{P}$  (T2):  $(T_a, T_w) = (-52.8^{\circ}\mathrm{C}, -3.0^{\circ}\mathrm{C}) \Rightarrow (-51.7^{\circ}\mathrm{C}, 16.5^{\circ}\mathrm{C}), \Delta T_w = 13.5^{\circ}\mathrm{C}$ 

に対する結晶形状変化の様子を表す顕微鏡写真である。図–4 (a1)–(a3) では, $T_w$ の上昇に伴う水 蒸気量の増加によって,角板および交差角板の先端から砲弾が成長したことがわかる。また,繊 維から直接砲弾が新しく成長している様子もわかる。一方,図–4 (b1)–(b2) では,水蒸気量の増 加に伴って砲弾の先端から新しく針が成長していることが分かる。図–4 (b3) はさらに結晶の成長 が進んだ結果で,図–4 (b1)–(b2)の視野よりも下の部分の顕微鏡写真であり,複数の針が放射状 に枝分かれしていることが分かる。このような特異な放射状の針となるのは, $T_w$ が+10°C と高 温の場合によく見られた。その際の結晶成長過程のインターバル撮影記録では,結晶が大きく揺

(b)



**図**-4 水蒸気量変化による結晶形状の変化例:(a1)-(a3) 角板,交差角板から砲弾への変化,(b1)-(b3) 砲弾から針および放射状の針への変化.

れている様子が見られた.このことは、下からの水蒸気供給量が多いために強い対流が生じていることを意味していると考えられる.

#### 5. まとめ

我々がこれまでに報告した気温 –40°C ~ –55°C における雪結晶の形状と生成条件の関係<sup>5)</sup>を, 対流-混合型生成装置を用いた 2 つの追加実験により,検証した.その結果,我々が得たこの温度 域における水蒸気量と結晶形状の関係<sup>5)</sup>を再確認することができた.また,この温度域で極端に 水蒸気量が多い場合には,複数の針が一点から放射状に成長する傾向が高くなるという,新しい 特異な現象を確認した.なお,ここまでの実験では雪結晶の成長に資する水蒸気量を,生成装置 下部に設置した水蒸気供給部の水または氷の温度で代えているため,形状と生成条件の関係は一 定の傾向を確認できたが,未だ不確定要素が大きいと言わざるを得ない.今後は,村井らが報告 したような小型の鏡面湿度計<sup>8)</sup>を用いて結晶生成部付近の水蒸気量を直接測定する雪結晶生成実 験を行なって,検証を進める予定である.

#### 参考文献

- [1] Nakaya, U., 1954: Snow Crystals: Natural and Artifical, (Harvard University Press, Cambridge).
- [2] Kobayashi, T., 1965: Vapour Growth of Ice Crystal between -40 and -90C, J. Meteor. Soc. Japan, 43, 359-367.
- Bailey, M.P. and Hallett, J., 2004: Growth Rates and Habits of Ice Crystals between -20°C and -70°C, J. Atmos. Sci., 61, 514-544.
- [4] Bailey, M.P. and Hallett, J., 2009: A Comprehensive Habit Diagram for Atmospheric Ice Crystals: Confirmation from the Laboratory, AIRS II, and Other Field Studies, *J. Atmos. Sci.*, **66**, 288–2899.
- [5] 柿崎佑希,原田康浩, 亀田貴雄,村井昭夫, 2010: -40°C ~ -55°C における人工雪結晶生成実験とその特徴(序報),雪氷研究大会(2010·仙台)講演要旨集, A3-02, p.176.
- [6] 村井 昭夫, 2005: ペルチェ素子を使用した対流型人工雪生成装置の製作, 雪氷, 67, 341-352.
- [7] Kameda, T., Fujita, K., Sugita, O. and Hashida, G., 2007: Snow crystals, ice crystals and blowing snow at Dome Fuji, JARE Data Reports, 298 (Glaciology 32), 46–64.
- [8] 村井 昭夫, 高橋 修平, 亀田 貴雄, 皆巳 幸也, 井端 一雅, 2011: 鏡面冷却式露点計による人工雪結晶 生成時の湿度測定, 雪氷, **73**, 3–14.