

論文

対流型装置を用いた -4°C から -40°C での人工雪結晶の 形態と生成条件

— 鏡面冷却式露点計による湿度測定に基づく結果 —

村井昭夫^{1),2)}, 亀田貴雄³⁾, 高橋修平³⁾, 皆巳幸也⁴⁾

要 旨

対流型の人工雪結晶生成装置内の結晶近傍に小型センサタイプの光学式鏡面冷却式露点計を設置して -4°C ～ -40°C の温度範囲で約200回の人工雪結晶生成実験を行い、結晶生成時の温度および湿度を測定し、測定結果を基に雪結晶の生成条件(気温、湿度)と結晶の形状についてのダイアグラムを作成した。実験の結果、以下の事が確かめられた。1) 結晶はおおむね氷飽和から氷飽和の間の湿度条件で生成する。2) 結晶生成時の湿度が低いときには温度帯によらず角柱結晶あるいは厚角板結晶になり、湿度が高くなるにつれてその温度特有の結晶形が現れる。特に -35°C 以下で、105%を超える高湿度のもとでは多結晶を含む多様な形状の結晶が生成する。3) 氷飽和を下回る未飽和の湿度条件でも雪結晶が成長することがあった。これは雪結晶成長時に周囲で浮遊している微小水滴がその成長に参与していることが考えられる。4) 針状結晶、樹枝状結晶、および -30°C 以上での交差角板結晶では湿度と成長速度には明瞭な関係が見られるが、扇形結晶・角板結晶および -30°C 以下での交差角板結晶では成長速度は湿度によらずほぼ一定となる傾向がある。

キーワード: 人工雪結晶, 鏡面冷却式露点計, 湿度測定

Key words: artificial snow crystals, chilled mirror hygrometer, water vapor measurements

1. はじめに

人工雪結晶生成装置(以下、人工雪生成装置)を用いて雪結晶を生成し、雪結晶生成時の条件と晶癖・成長形などの関係を明らかにする研究はNakaya *et. al* (1938)によって初めて報告され、その後もNakaya (1954), 小林 (1957), Hallett and Mason (1958), Kobayashi (1960, 1961),

Takahashi *et. al* (1991), Bailey and Hallett (2009)など多くの研究者によって進められてきた。これらの実験では結晶の成長条件のひとつである湿度(水分量)の測定が温度とともに重要な要素であるが、低温下での正確な湿度測定は技術的にも難しいとされてきた。そのため、その測定には様々な工夫が行われているが、精度面などいくつかの問題点が指摘されている(小林, 1980; 熊井, 2008)。

また、これまでの研究で得られた結果を比較する場合に、それぞれの研究で使われている過飽和度あるいは水分量についての定義が異なることから、その解釈に混乱が生じている事も従来から指摘され考察が加えられている(対馬, 2004, 2005; 油川・中埜渡, 2006; 熊井, 2008)。

筆者らは、これまで自動制御系を組み込んだセン

1) 北見工業大学大学院

〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地

2) 石川県教育センター

〒921-8153 石川県金沢市高尾ウ 31-1

3) 北見工業大学

〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地

4) 石川県立大学

〒921-8836 石川県石川郡野々市町末松 1 丁目 308 番地

サタイプの光学式鏡面冷却式露点計 FINEDEW™ ((株)山武製 特殊仕様 以下 FINEDEW と記述) を対流型の人工雪結晶生成装置 (村井, 2005) に組み込み, 人工雪結晶生成時の湿度測定を行ってきた。その結果, 結晶生成点のごく近傍での正確な湿度計測が可能になった。測定結果を Nakaya (1954) のダイヤグラム (Fig. 448; 以下, 中谷ダイヤグラム) と比較してみると, 結晶生成時の湿度が低く見積もられた。その差異が, FINEDEW で計測した湿度が空気塊に含まれている水蒸気量のみを計測した値であるのに対して, Nakaya (1954) の測定では過飽和度 (supersaturation) が装置内に浮遊する微小水滴も含めた全水分量を示していることによると考えられことを指摘した (村井ら, 2011)。

本稿では, これまで行ってきた結晶生成点温度 $-4^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ の範囲における約 200 回の雪結晶生成実験での温度と湿度の測定結果から, 多様な形態の雪結晶について, それぞれの生成条件の測定結果を報告する。

2. 実験装置

2.1 実験装置の構成

図 1 は本研究で用いた実験装置の構成図である。これらすべての実験装置は気温 10°C に設定した恒温室内に設置した。人工雪生成装置は冷却系にペルチェ素子を使用した自然対流型 (以下対流型と記述) の装置 (村井, 2005) を使用した。この装置の冷却ユニット内には 3 枚の大型ペルチェ素子 ($40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$) が 2 段構造で装着しており, 装置内部を -40°C 以下まで冷却可能であるとともに, ペルチェ素子に印加する電圧を調節することで結晶生成点の温度を自由に調節することができる (村井, 2005)。これを駆動する電源には大電流直流電源装置 (第一電波工業 GSV-3000) を使用し, 素子の放熱面から放出される熱は冷却水循環装置 (東京理科機械 CCA-1110) によって冷却水を循環させることで排熱する。装置最下部には直径 40 mm のステンレス製容器にヒータを取り付けた水蒸気発生装置を置き, 容器内の水温を調節することで装置上部にある結晶支持具に張った繊維 (Polyester mono filament, 直径約 $20\text{ }\mu\text{m}$) 上に結晶を生成させる。

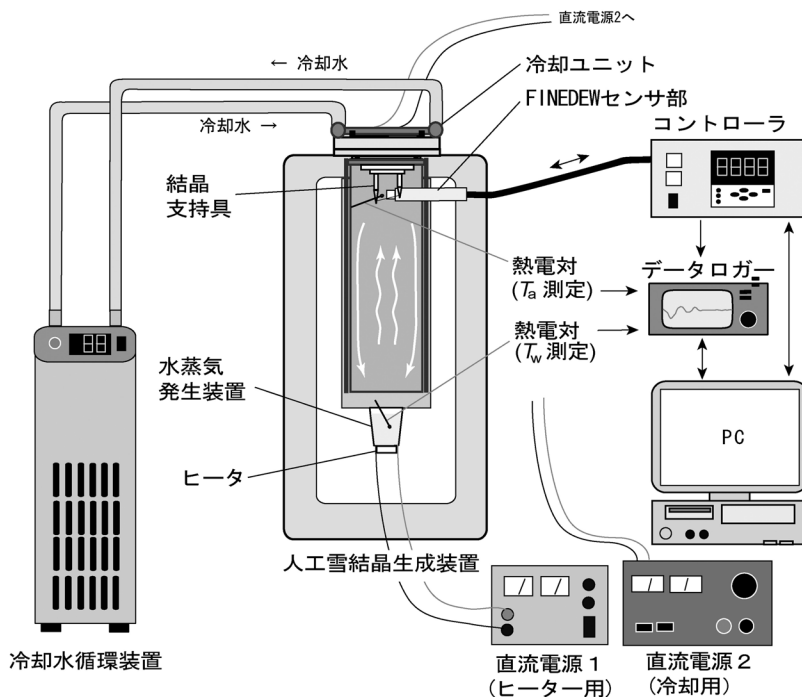


図 1 実験装置の構成。

装置内の結晶生成点から約 15 mm の位置に FINEDEW の鏡面部を置き、露点 (以下 T_d) あるいは霜点 (以下 T_f) を測定し、結晶支持具の繊維近傍に置いた K 型熱電対によって結晶生成点の温度 (以下 T_a) を測定する。また、水蒸気発生装置の水容器の底部から約 5 mm の位置に熱電対を置き、水蒸気発生装置の水温 (以下 T_w) をモニターする。これらの測定値はすべてデータロガー (グラフテック社製 GL-800) を通してパーソナルコンピュータに記録する。

図 2a は本研究で用いた装置全景、図 2b は装置内部に設置した状態の FINEDEW センサ部、図 2c は拡大撮影系である。生成した結晶と鏡面は

ファイバ照明装置で外部から照明し観察すると同時に、拡大光学系 (Nikon Telescomicro ED 6×18) を装着したデジタルカメラ (Nikon Coolpix P5000) で記録する。

2.2 FINEDEW の特徴と利点、露点測定精度

FINEDEW は光学系に極細の光ファイバを用い、これをシリコン単結晶製の鏡面と一体としユニット化した超小型のセンサタイプの鏡面露点計である。これによりセンサ部を測定環境に直接挿入可能で、高い追従性と測定精度が得られる (金井・井端, 2005; Ibata and Kanai, 2008) ことなどの多くの利点を持つ。同時に鏡面冷却能力にも優れ、-40℃ 以下の低温下でも霜点の測定が可能であるため雪結晶の生成実験での湿度測定にも有効である (村井ら, 2011)。

FINEDEW は計量法校正事業者登録制度 (JCSS 制度) において校正事業者に登録されている (株) 山武により、露点・霜点で 18℃ から -20℃ の範囲で校正を行っている。その校正値によって算出した補正式で機器偏差を補正することによって、さらにこれより広い温度範囲でも計測精度の信頼性を表す拡張不確かさ 0.18℃ (-20℃ の湿度で ±1.7%) で露点計測が可能であると考えられる (村井ら, 2011)。

2.3 雪結晶の生成と湿度の算出方法

雪結晶の生成、露点・霜点の測定は村井ら (2011) と同様に以下の手順で行った。

- 1) 人工雪生成装置を動作させ、設定した条件に安定させて雪結晶を生成する。
- 2) マニュアル操作で FINEDEW の鏡面温度を上げて鏡面上の水滴を取り除き、その後 FINEDEW の入力電圧を OFF にして鏡面温度を周囲の温度となじませる。
- 3) FINEDEW を測定モードにして鏡面温度が安定したところで 60 秒間 (1 秒間隔 60 回測定) 計測を行い、測定値の平均をとり、これを T_d (または T_f) とする。また同時に結晶生成点の温度 (T_a) を測定する。
- 4) このとき鏡面に存在する水が過冷却水滴であるか、氷 (霜) であるか拡大光学系で確認する。
- 5) 拡大撮影系で鏡面の状態および生成した結晶を記録する

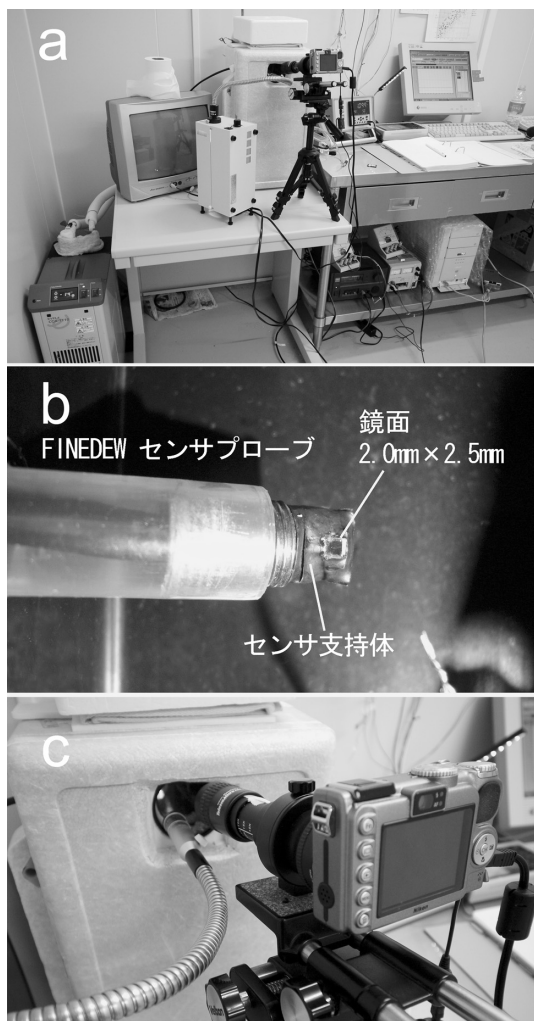


図 2 a: 実験装置全景 b: FINEDEW センサ部 c: 照明と拡大撮影系。

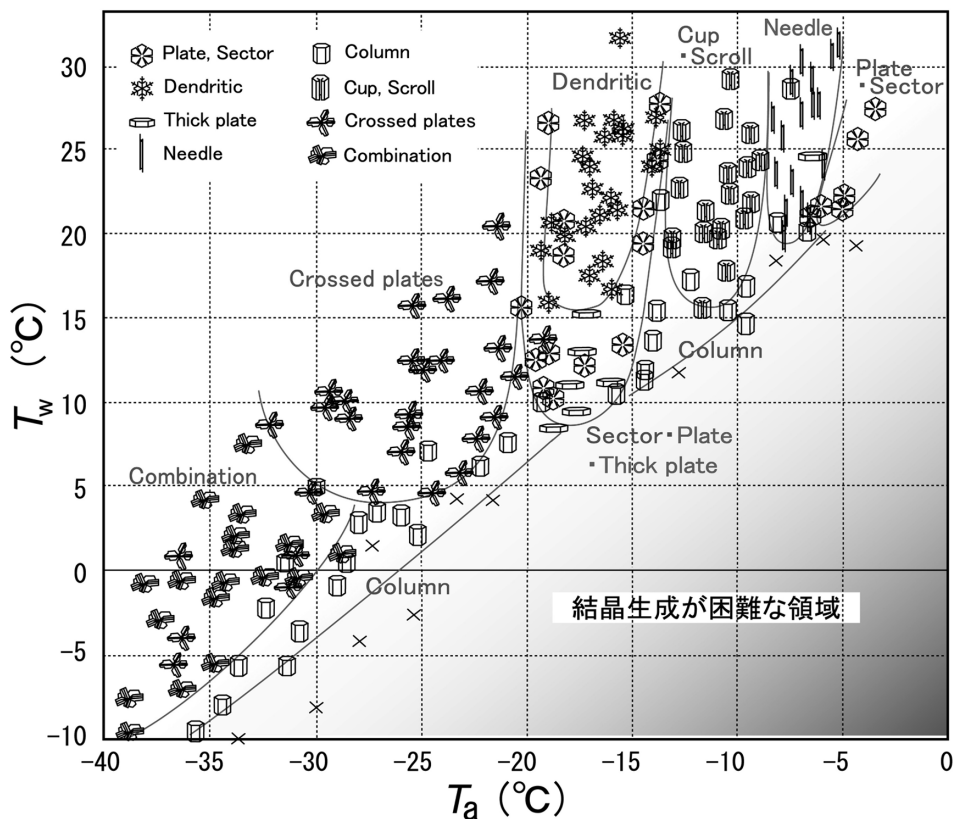


図 3 生成条件（気温 T_a 、水温 T_w ）と生成する人工雪結晶の形状。グラフ内に使われているシンボルは Magono & Lee (1966) に準じている。各結晶のシンボルの中心位置が T_a , T_w の値を示す。

温度から飽和数蒸気圧を与える Sonntag の式（日本規格協会，2001）を用いて，上記の 1～4 の手順で測定した T_d （または T_f ）と T_a から，装置内の水蒸気圧（ e ）と， T_a での水の飽和水蒸気圧（ E_i ）を求め，以下の式（1）により雪結晶近傍での水飽和に対する気相としての相対湿度（ RH_i ，以下簡便のため湿度 RH_i と記す）を算出した。

$$RH_i (\%) = \frac{e}{E_i} \times 100 \quad (1)$$

e : 装置内の空気中の水蒸気圧

E_i : 温度 T_a の時の水の飽和水蒸気圧

3. 実験結果

3.1 結晶形と生成条件（ T_a , T_w ）

実験は $T_a = -3.5^\circ\text{C} \sim -39.6^\circ\text{C}$ の範囲で約 200 回おこない，結果を図 3，図 4 にまとめた。

図 3 は結晶生成時の条件 T_a , T_w と生成した結晶形の分布を示したものである。生成した結晶はその形状別に大きく 9 種に分けてグラフ内にプロットした。結晶の名称は Magono and Lee (1966) に準じたが，側面結晶（side plane）については古川（2005）で示されている交差角板（crossed plates）を使用した。図中に記してある曲線は実験の結果得られた各結晶形の境界を示している。「combination」とした結晶については Magono and Lee (1966) の S3「側面，砲弾，角柱の不規則集合」とは意味が異なり，交差角板結晶，砲弾，角柱あるいは多結晶と思われる結晶が繊維上に不規則に混在しているものを表しており，その混在の状態は後述するように T_a や RH_i によって異なっている。「×」は実験開始後 12 時間を経過した時点で繊維上に結晶の生成が見られなかった事を表しており，これより右下部分の測定結果がプロットされていない領域は結晶生成が困難であることを示

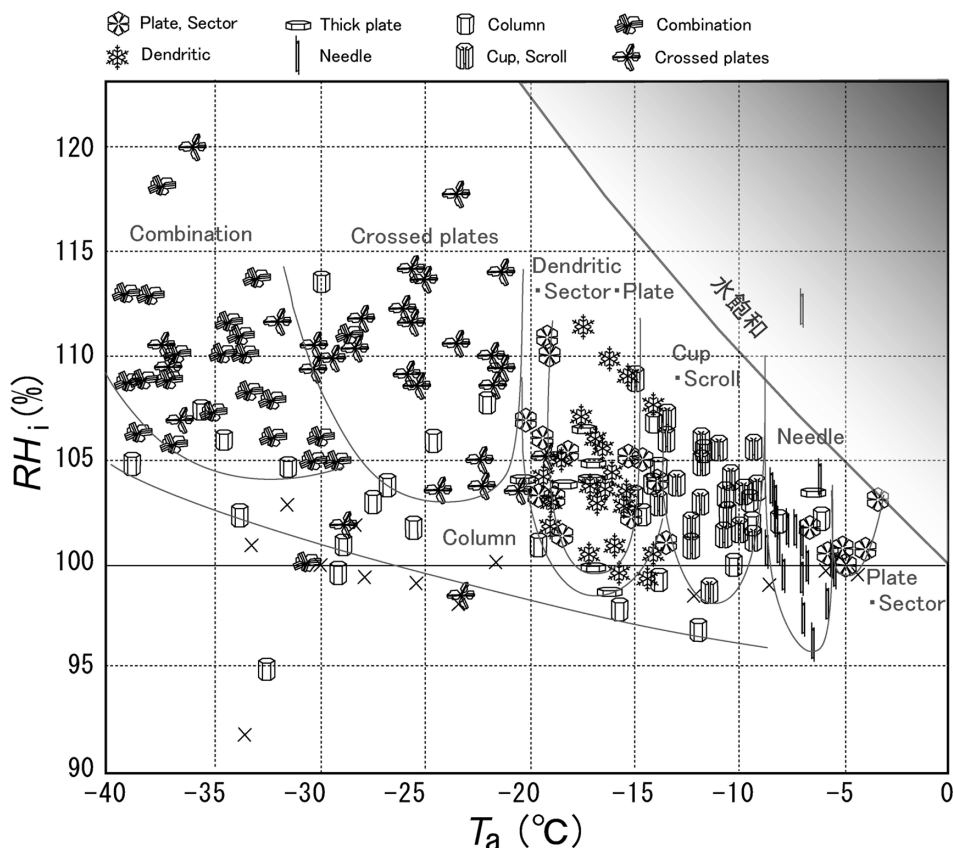


図 4 生成条件 (気温 T_a , 相対湿度 RH_1) と生成する人工雪結晶の形状. グラフ内に使われているシンボルは Magono & Lee (1966) に準じている. 各結晶のシンボルの中心位置が T_a , RH_1 の値を示す.

している. 左上部にも同様に結果が示されていない領域があるが, ここは結晶支持具の繊維に多くの水滴ができ, そこから過密な状態で結晶が生成したり, 生成した結晶にさらに多くの雲粒が付くことで結晶形の判別が困難な領域である.

図 3 から, 温度条件と生成する結晶形の関係が明瞭に確認できる. これはこれまで Nakaya (1954), Hallett and Mason (1958), Kobayashi (1961) 等によっても実験的に明らかにされている.

本結果では $T_a = -6^\circ\text{C}$ 以上で板状の結晶の生成が見られるが, それより低温の針状結晶との境界は水温 (T_w) にも関係しているように見える. 樹枝状の結晶は $T_a = -16^\circ\text{C}$ を中心として比較的狭い温度範囲で生成し, 扇形結晶は樹枝状の条件を取り巻くように $T_a = -14^\circ\text{C} \sim -15^\circ\text{C}$, $T_a = -18^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$, あるいは $T_a = -15^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$ において樹枝状結晶生成よりも水温が低めの条件で生成している. また,

$T_a = -20^\circ\text{C}$ 以下で生成する結晶形は, それ以上の温度条件のものとは大きく変化し, 立体的な構造を持つ交差角板結晶が生成するようになる. さらに $T_a = -29^\circ\text{C}$ 付近を境界にしてそれ以下では生成する結晶に角柱状あるいは砲弾, 厚い角板さらには多結晶と思われるものが混在するようになる.

また, $T_a = -6^\circ\text{C} \sim -15^\circ\text{C}$, $T_a = -20^\circ\text{C} \sim -36^\circ\text{C}$ で水温 (T_w) が低い条件で角柱状結晶, $T_a = -16^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$ でも同様に角柱状結晶に加え厚い角板結晶が生成する傾向がある. 装置内の湿度は水温 (T_w) と相関があると考えられるため, $-5^\circ\text{C} \sim -36^\circ\text{C}$ の広い温度域において湿度が低い条件で角柱状の結晶が生成し, そのなかで $-16^\circ\text{C} \sim -19^\circ\text{C}$ の温度範囲では厚い角板結晶が優勢に生成すると言い換えることができる.

3.2 人工雪結晶の結晶形と生成条件 (T_a , RH_1)

図 4 に T_a と RH_1 , 生成する結晶形との関係を示す. 図中で「水飽和」と記した線は水に対して

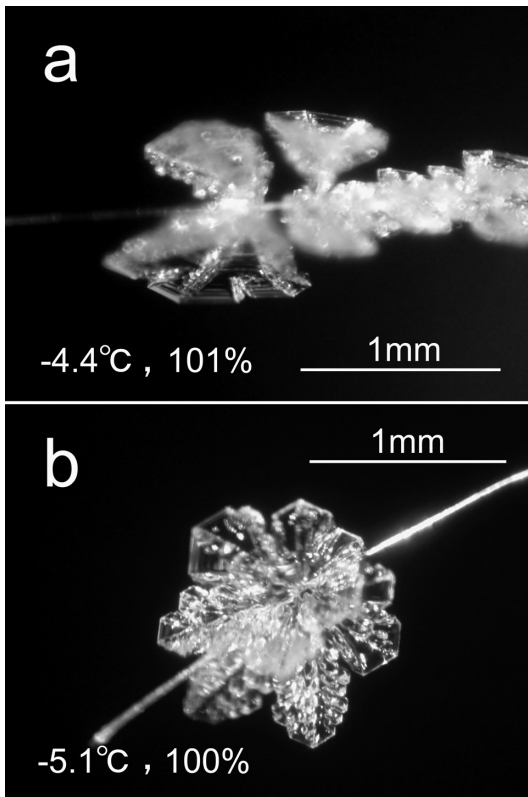


図 5 $T_a = -4.4^\circ\text{C} \sim -5.1^\circ\text{C}$ で生成した板状結晶 (plate) (画像の数値は T_a, RH_i).

の飽和を示し、各結晶形名を示した細線は図 3 同様、それぞれ各結晶形が生成する条件の境界を示している。ただし、図 3 にプロットした各結晶のうち、何らかの理由で RH_i の測定ができていない場合は図 4 には結果を表示していない。

図 4 から結晶生成時の装置内の湿度条件と雪結晶生成に関して以下の 1) ~4) がわかった。

- 1) 結晶はおおむね水飽和から水飽和の間で生成する。
- 2) 水飽和を超える成長条件は見られない。
- 3) T_a が低くなるほど高湿度での結晶生成が起こる。
- 4) 水飽和を下回る条件で結晶が生成することもある。

以下に写真を用いて、温度条件別に生成した雪結晶を説明する。

3.2.1 $T_a = -4^\circ\text{C} \sim -5^\circ\text{C}$ の高温領域の板状結晶

図 5 は $T_a = -4.4^\circ\text{C} \sim -5.1^\circ\text{C}$ で生成した板状の結晶である。この温度域ではやや厚みのある板状

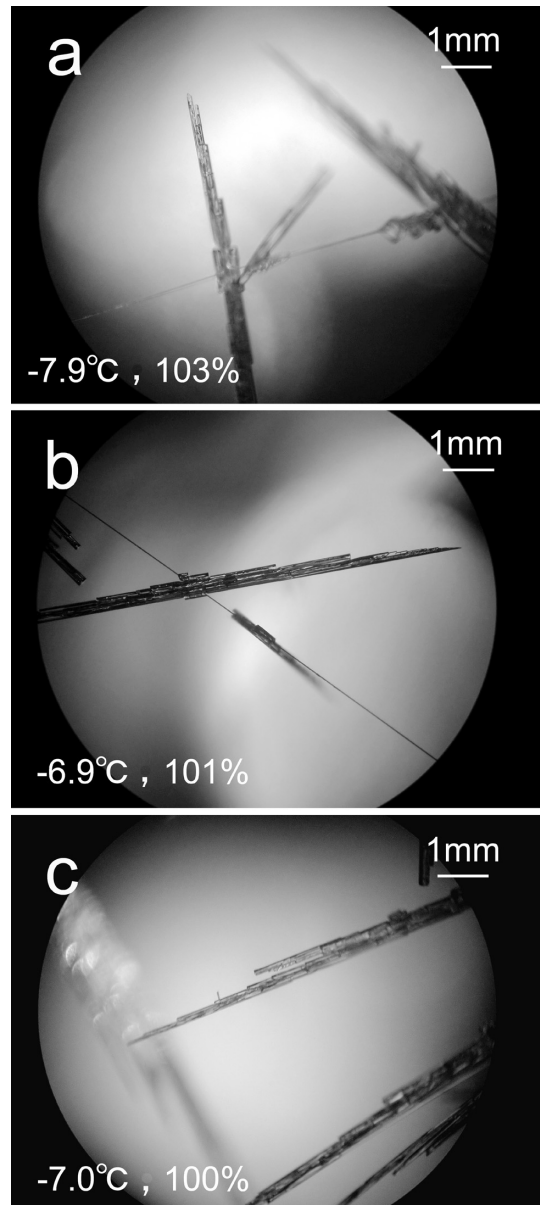


図 6 $T_a = -6.9^\circ\text{C} \sim -7.9^\circ\text{C}$ で生成した針状結晶 (needle) (画像の数値は T_a, RH_i).

の結晶 (図 5b), あるいは部分的にコップ状に成長した結晶 (図 5a) もあった。結晶の生成条件は $RH_i = 100\% \sim 103\%$ の非常に狭い範囲であり、湿度の違いによる結晶形の変化ははっきりとは確認できなかった。

3.2.2 針状結晶

針状結晶は $T_a = -5.5^\circ\text{C} \sim -7.9^\circ\text{C}$ の狭い温度範囲で生成する。図 6 は $T_a = -6.9^\circ\text{C} \sim -7.9^\circ\text{C}$, RH_i

=100%～103% で生成した針状結晶の例であるが、これらに湿度の違いによる結晶形の変化は見られなかった。

針状結晶の生成では湿度が 100% 未満である場合もあった。未飽和条件で結晶が成長することは考えにくい、針状結晶を生成させる場合には T_w を 20℃ 以上にする必要があり、後述のように、このような条件での結晶の成長には装置内に浮遊する多くの微小な水滴が関与していると考えている。

3.2.3 コップ・渦巻結晶

コップあるいは渦巻結晶は $T_a = -8.0℃ \sim -13.0℃$ の範囲で生成した。図 7 は $T_a = -9.0℃$ 付近での渦巻結晶の例、図 8 はそれより低温、つまり次節に述べる扇形結晶の成長領域に近い $T_a = -11.9℃ \sim$

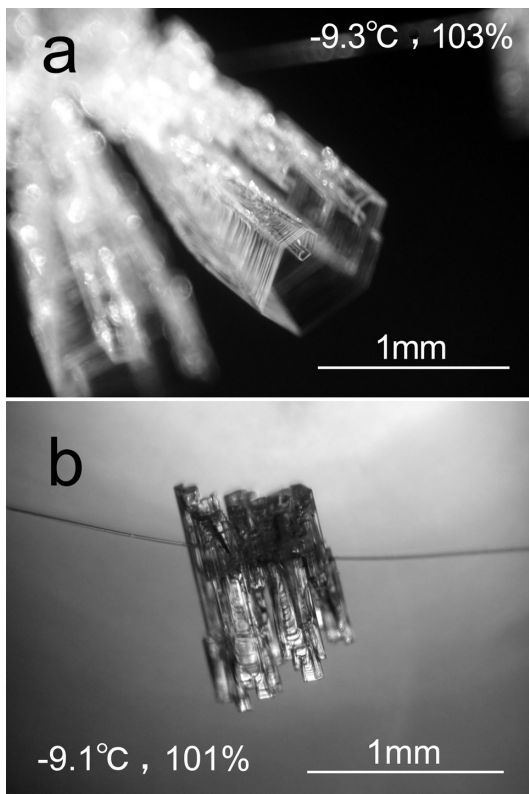
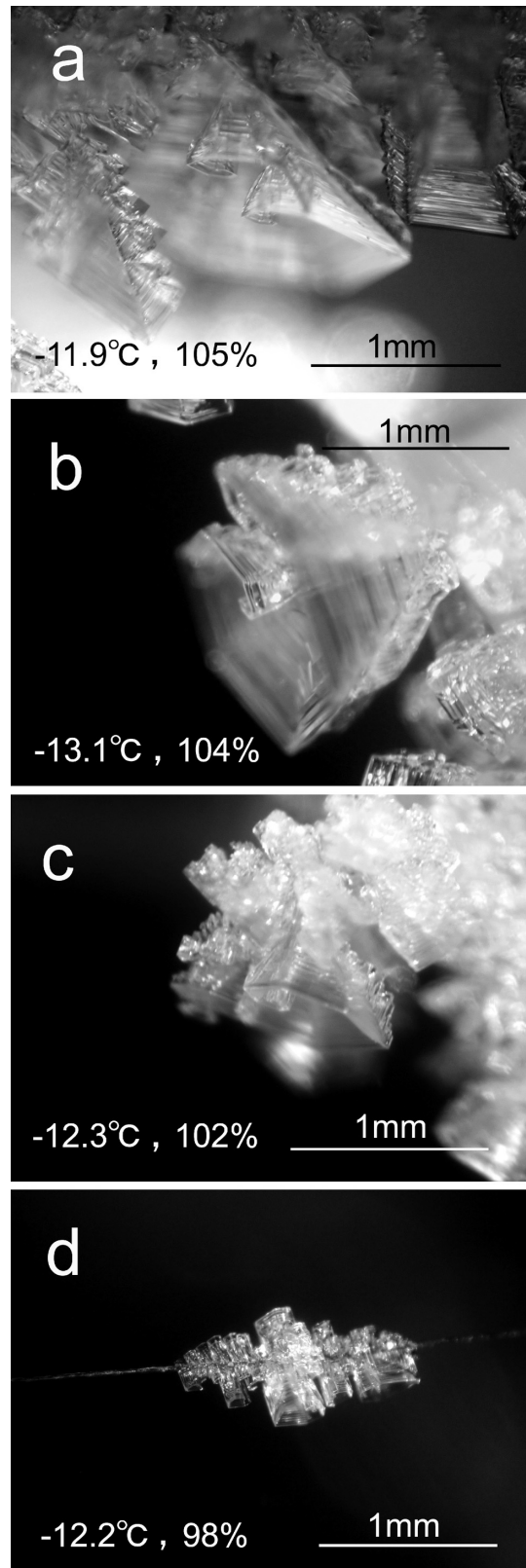


図 7 $T_a = -9.1℃ \sim -9.3℃$ での渦巻結晶 (scroll) (画像の数値は T_a, RH_i)。

図 8 $T_a = -11.9℃ \sim -13.1℃$ で生成した渦巻結晶 (scroll) (画像の数値は T_a, RH_i)。



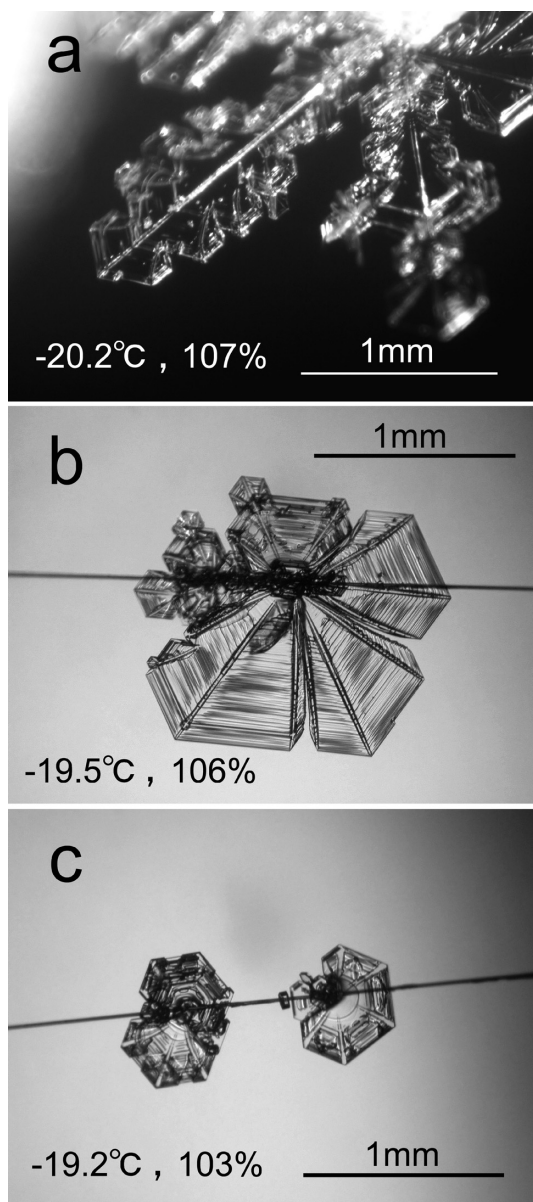


図 9 $T_a = -19.2^\circ\text{C} \sim -20.2^\circ\text{C}$ で生成した扇形および角板結晶 (画像の数値は T_a, RH_1). a, b: 扇形結晶 (sector plate). c: 角板結晶 (plate).

-13.1°C で生成した結晶の例である.

図 7a は結晶の先端を斜めに見た写真であり, 中空の六角柱状に伸びた結晶の先端部が内側に巻き込んだ「渦巻き構造」を持つことがわかる. 図 7b は 7a より若干低湿度条件で生成した結晶であるが, はっきりとした渦巻き構造は見られず全体として長い角柱状結晶 (または鞘状の結晶) が束

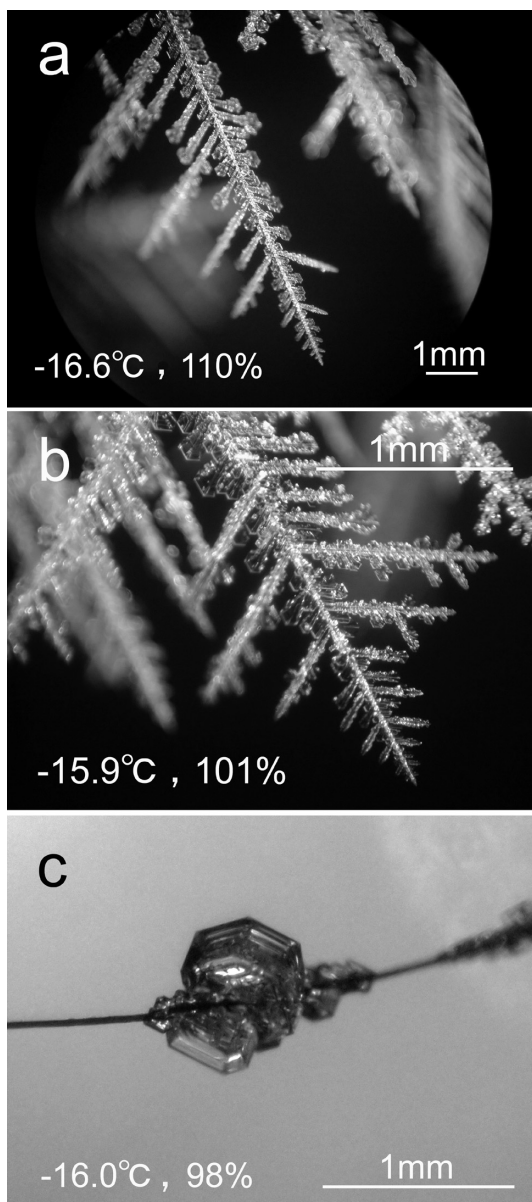
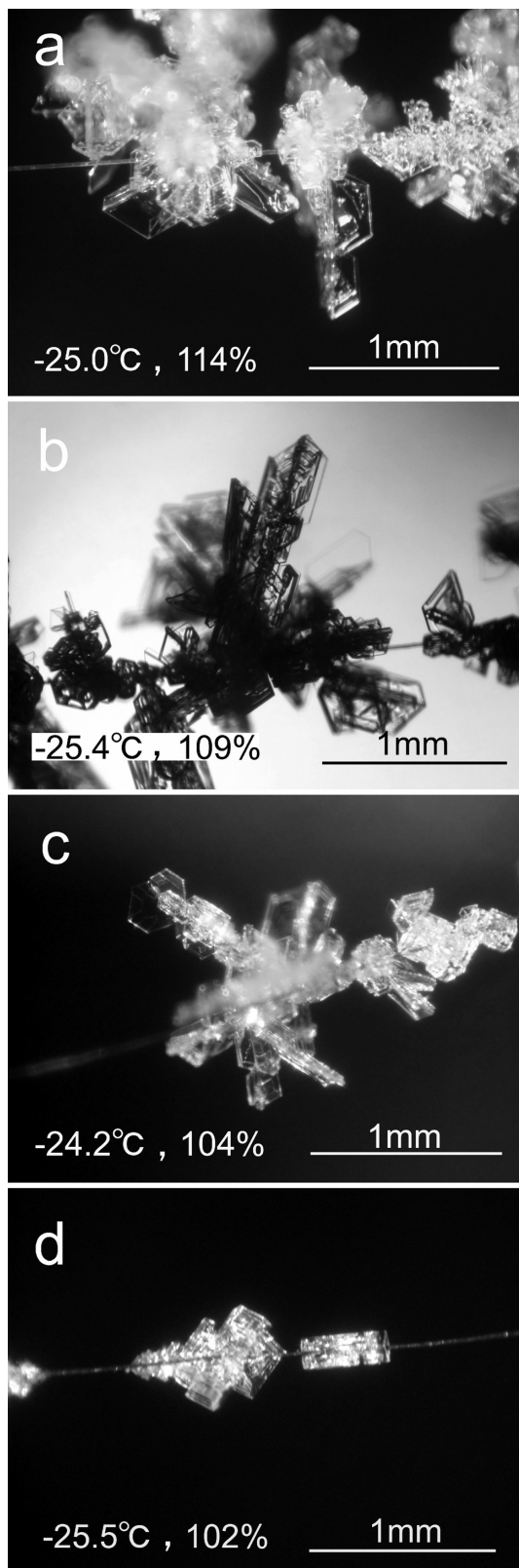


図 10 $T_a = -15.9^\circ\text{C} \sim -16.6^\circ\text{C}$ で生成した結晶 (画像の数値は T_a, RH_1). a, b: 樹枝状結晶 (dendritic), c: 厚角板結晶 (thick plate).

になっているようにも見える. これに対し図 8a ~ c はいずれも結晶が六角錐状に成長し, その一部が切れて内側に巻き込んだ構造を持つ. これは結晶成長時の温度条件が板状の結晶生成の条件に近い, c 軸方向に成長しながら a 軸方向へも大きく成長することで, 結果として六角錐状の形状となるためと思われる. 図 8d は骸晶構造を



持った角柱状結晶に見えるが、この結晶先端にも他同様に渦巻き構造が見られる。図 8a は見る方向によっては、一見全体の形状が扇形に見えるものの、写真のように a 軸方向から見るとその枝の端には数段に分かれた渦巻き構造が存在する。

図 7, 図 8 いずれの場合も低湿度 ($RH_i=101\%$ 以下) の条件では中空の角柱状、それより湿度が高い条件では渦巻き構造が明瞭な結晶が生成する。ただし、結晶生成時の温度の違いによって、c 軸方向に大きく成長して結晶全体としての形状が角柱状の形状となる場合と、a 軸方向にも広がって角錐形になる場合との違いが現れるということがわかる。

3.2.4 樹枝状結晶・扇形結晶・角板結晶

図 9 は $T_a=-19.2^{\circ}\text{C}\sim-20.2^{\circ}\text{C}$ で生成した角板および扇形結晶である。この温度域では樹枝状結晶が生成することもあるが、角板あるいは扇形が多く生成する。図 9c は角板状の結晶であるが、湿度がやや高い図 9b, ($RH_i=106\%$) では a 軸方向に板状に広がると同時に枝に隙間ができて扇形に成長している。さらに $RH_i=107\%$ の図 9a では枝の先端は扇形であるもののそれぞれの枝の幅が小さくなり全体として広幅状に成長している。

図 10 は $T_a=-15.9^{\circ}\text{C}\sim-16.6^{\circ}\text{C}$ で生成した結晶である。この温度域でも $RH_i=100\%$ 程度の低湿度条件では角柱状あるいは厚い角板が生成する 경우가多いが (図 10c), 湿度が高くなると a 軸方向へ主枝・側枝ができ樹枝状の結晶が生成する。ただし、後述するようにこの温度域では樹枝状結晶と角板結晶の生成について湿度条件に明瞭な差が見られないこともあった。図 10a は $RH_i=110\%$ で生成した結晶であり、その a 軸方向への成長速度は測定の結果、 5.7 mm/h と非常に大きく、図 10b に比べて主枝が著しく発達していることがわかる。

3.2.5 -20℃以下の低温域での結晶

図 11 は $T_a=-24.2^{\circ}\text{C}\sim-25.5^{\circ}\text{C}$, 図 12 は $T_a=-28.1^{\circ}\text{C}\sim-29.1^{\circ}\text{C}$ で生成した結晶である。これらの温度域でも氷飽和あるいはそれに近い条件で角

図 11 $T_a=-24.2^{\circ}\text{C}\sim-25.5^{\circ}\text{C}$ で生成した結晶 (画像の数値は T_a, RH_i)。a, b, c: 交差角板結晶 (crossed Bplates), d: 角柱結晶 (column)。

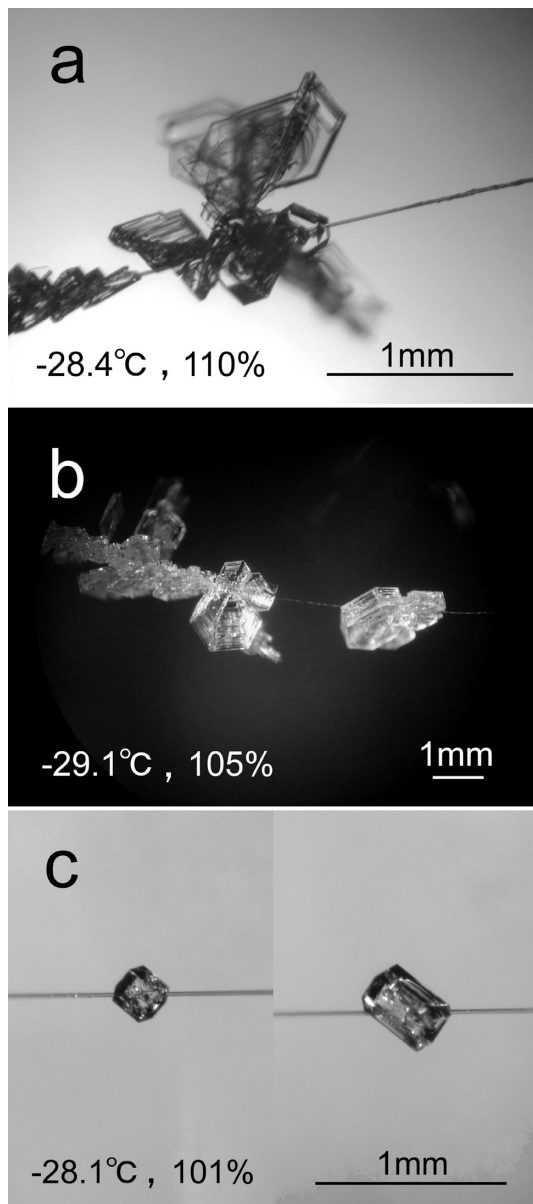


図 12 $T_a = -28.1^\circ\text{C} \sim -29.1^\circ\text{C}$ で生成した結晶 (画像の数値は T_a, RH_i). a, b: 厚角板結晶 (thick plate) と交差角板結晶の不規則集合 (crossed plates), c: 角柱結晶 (column).

柱状の結晶が生成するが (図 11d, 図 12c), $RH_i = 104\%$ 以上の条件下では -20°C 以上で生成する結晶とは異なった複雑な立体構造を持つ。また, 図 11 と図 12 を比較すると, 生成した結晶に明瞭な違いがみられる。すなわち, 図 11 では湿度が高くなるにつれて交差角板結晶のみが生成するよう

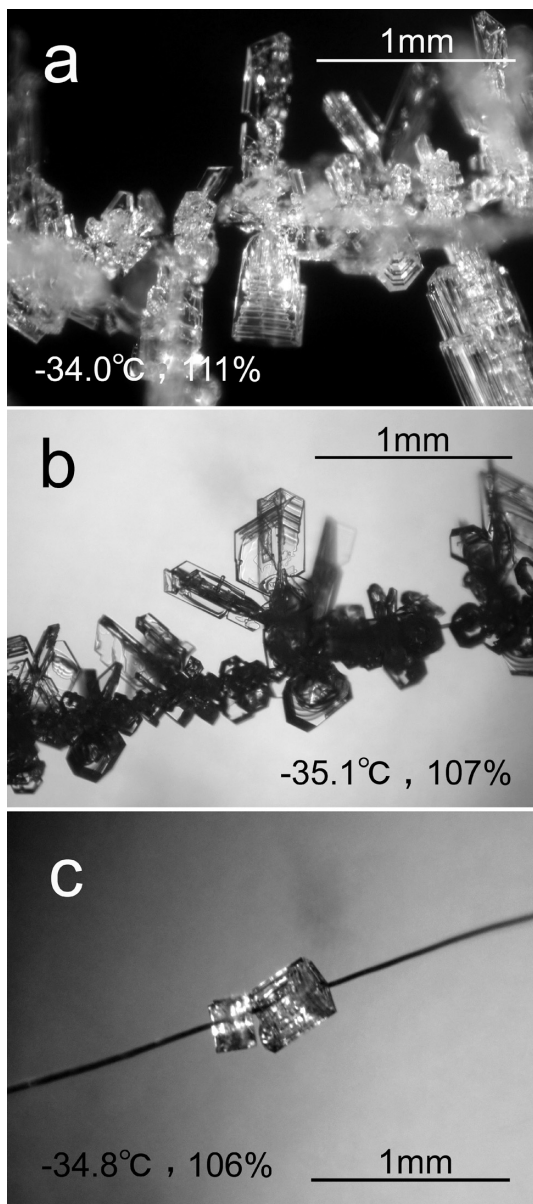
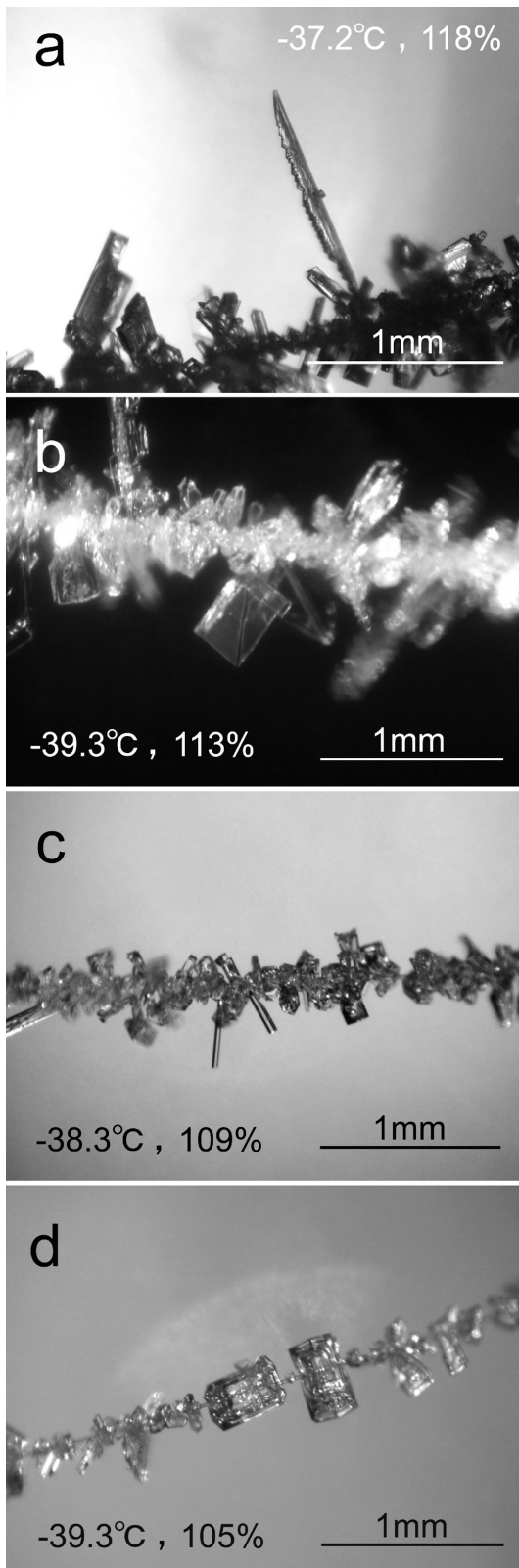


図 13 $T_a = -34.0^\circ\text{C} \sim -35.1^\circ\text{C}$ で生成した結晶 (画像の数値は T_a, RH_i). a: 交差角板 (crossed plates) と中空砲弾結晶 (hollow bullet) の不規則集合, b: 厚角板結晶と交差角板結晶の不規則集合, c: 角柱結晶 (column).

になるのに対し, これより低温条件下の図 12a では $RH_i = 110\%$ の高湿度条件でも交差角板に厚い角板結晶が混在する。

3. 2. 6 -30°C 以下の低温域での結晶

図 13 は $T_a = -34.0^\circ\text{C} \sim -35.1^\circ\text{C}$, 図 14 は $T_a =$



-37.2℃～-39.3℃で生成した結晶である。この温度域では $RH_i=100\%\sim105\%$ では角柱状の結晶が優勢であり、それを超える湿度条件ではそれぞれの温度域に特徴的な形状が現れるようになる。

図13cは角柱状結晶、これよりやや高湿度の図13bでは交差角板結晶と厚角板結晶、さらに高湿度の図13aでは交差角板結晶に砲弾状の結晶が混在している。 $T_a=-34^\circ\text{C}$ 以下では $RH_i=105\%$ 以上の条件で砲弾状の結晶が生成することが特徴的であり、この温度域での砲弾結晶はc軸の先端が渦巻状に巻き込む構造を持っていることが多いという特徴があるが、この構造が温度による特徴であるのか、あるいは湿度条件が要因のものであるのかは不明である。

$T_a=-38^\circ\text{C}$ 以下では湿度の変化とともにさらに多様な結晶が生成する。図14cでは交差角板結晶に混ざって無垢の針状角柱結晶が見られ、図14bでは砲弾結晶や菊地(1974)による分類で「砲弾付き四角形角柱面」とされる、渦巻結晶の側面が板状に広がって全体として矩形に見える結晶、さらに高湿度の図14aでは形状が刀に似ている結晶など多くの形状が見られる。このほかにも図15aに示すような御幣状(Sato and Kikuchi, 1985; Kikuchi and Sato, 1987)、図15bに示す多結晶と思われる結晶(菊地, 1974; 中田ら, 1991)も生成した。Sato and Kikuchi (1985)は拡散型の装置によって、気温が -32°C あるいは -40°C の条件で砲弾集合から成長した御幣状の結晶を生成させているが、本研究において御幣状の結晶は上述のとおり -38°C 以下の条件で見られた。ただし、本研究におけるこれらの結晶と湿度条件との関係ははっきりしていない。

3.3 湿度と成長速度

図16a～cはそれぞれ針状結晶について湿度とc軸方向への成長速度、樹枝状結晶および扇形結晶・角板結晶のa軸方向への成長速度、 -20°C 以

図14 $T_a=-37.2^\circ\text{C}\sim-39.3^\circ\text{C}$ で生成した結晶(画像中の数値は T_a , RH_i)。a: Kikuchi and Sato (1989)でのspearheadに分類されると思われるナイフ状の結晶, b: 砲弾付き四角形角柱面結晶(菊地(1974)による分類), c: 針状角柱結晶, d: 角柱結晶。

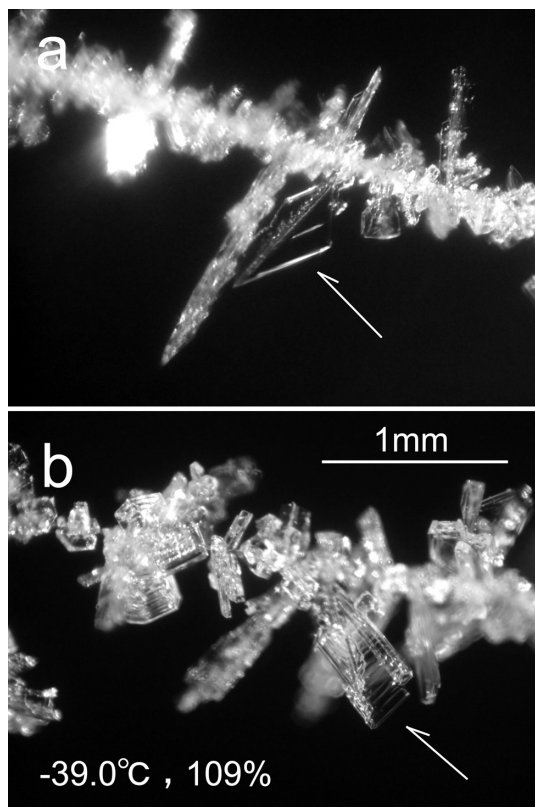


図 15 $T_a = -39^\circ\text{C}$ における雪結晶の例. a: 御幣状結晶, b: 柱面が発達した結晶.

下での交差角板結晶の結晶先端部の成長速度の関係を示したものである. また図 17 は, 比較のためにそれぞれの結晶の成長速度をまとめたものである. ここでの成長速度とは結晶の先端の成長速度であり, 結晶生成時にインターバル撮影した画像から撮像面に平行に成長した結晶 (あるいは枝) を選択し結晶長を測定, 結晶長の変化量を時間で除して求めた結晶成長時間全体での平均の成長速度である. $T_a = -30^\circ\text{C}$ 以下では交差角板結晶の他に様々な形状の結晶が混在するが, 図 16c では生成した結晶のうち交差角板結晶の成長速度を測定した. グラフ中の結晶のプロット点に添付した数値はそれぞれ結晶生成時の T_a である.

図 16a, b から, 針状結晶や樹枝状結晶では湿度が結晶の成長速度に影響しているといえるが (図中実線①, ②), 扇形結晶あるいは角板結晶 ($T_a = -14^\circ\text{C}$ 以上または $T_a = -18^\circ\text{C}$ 以下) の成長速度は樹枝状結晶の 1/5~1/10 と小さく, 成長速度は

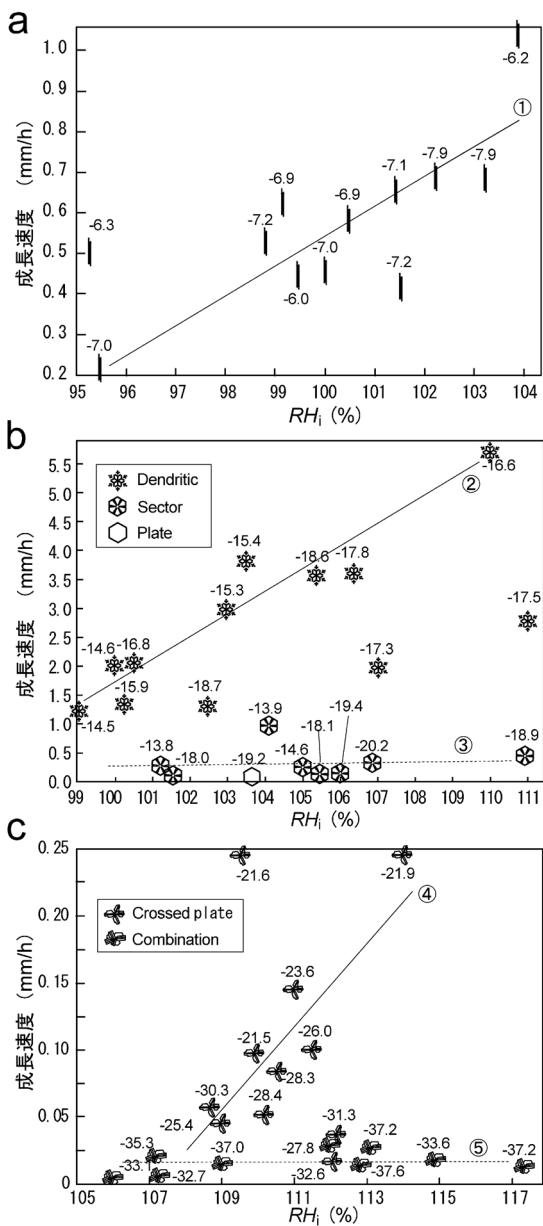


図 16 雪結晶生成時の湿度 (RH_i), 成長速度, 生成温度 (T_a) との関係.

a: 針状結晶の c 軸方向への成長速度, b: 樹枝状・扇形・角板結晶の a 軸方向への成長速度, c: 交差角板結晶・不規則集合結晶の先端部の成長速度.

湿度によらずほぼ一定であった (図中点線③).

また, 図 16c から $T_a = -30^\circ\text{C}$ 以上の条件では湿度と結晶の成長速度には明らかに相関がある (図中実線④) が, それより低温域では明瞭な関係

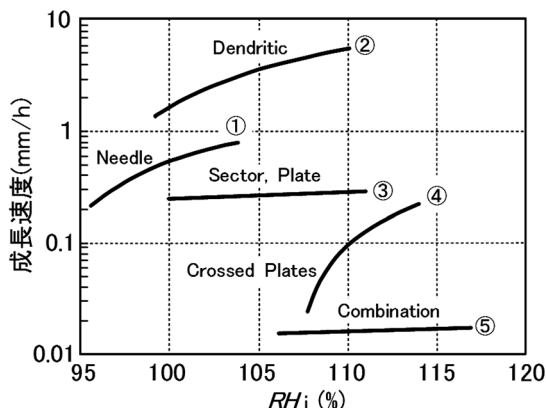


図 17 各雪結晶生成時の湿度 (RH_i) と成長速度の比較. ①~⑤の直線は図 16a~c の各結晶の成長速度に対応している.

が見られない (図中点線⑤). T_a が低い, つまり空気中の水蒸気量が少ないということから, 湿度が高くても水蒸気の絶対量が小さく成長速度も減少する事が考えられるが, 両温度域では湿度と結晶成長速度の関係が明らかに異なっていることがわかる.

図 17 より, 雪結晶の成長速度が結晶形によって大きく異なること, 成長速度が RH_i に依存するものとそうでないものがあることが明瞭にわかる.

4. 考察

4.1 これまでの研究と本結果との比較

これまで人工雪結晶の生成条件と結晶形の関係は Nakaya (1954), Kobayashi (1961), Hallett and Mason (1958), Magono and Lee (1966), Mason (1971), Kumai (1982), Takahashi *et al* (1991), Bailey and Hallett (2009) などによってダイアグラムとしてまとめられている. これらを温度条件にのみ着目して模式化し比較したものが図 18 である. 図中の※は中谷 (1949) での条件についての記述である. 結晶名は各研究で使用されている用語を使用した. Mason (1971), Bailey and Hallett (2009) ではそれぞれ -45℃, -70℃ までの結晶形が示されているが, ここでは本研究と比較する目的で -40℃ までを図示した.

これらと比較すると結晶形とその生成条件は傾向としては一致することがわかる. しかしなが

ら, いくつかの異なる点も存在する. 同じ対流型の中谷ダイアグラムと比べると, 本研究では湿度 RH_i が低い場合には -12℃ から -38℃ の広い温度範囲にわたって, 角柱状結晶が広く観察された点である. また, 板状結晶や針状結晶, 樹枝状結晶などの生成温度も少しずつ異なっていた. また, 幅広い温度領域での角柱状結晶の生成は小林のダイアグラムでも報告されていない. 本研究では, -20℃ 以下の温度領域で, 交差角板と砲弾あるいは角柱が混在する不規則集合結晶が生成したが, これらの点も Kobayashi (1961) や Mason (1971) によるダイアグラムと一致していない.

これらの相違点は, 雪結晶の呼称や分類の定義が異なることも一因となっている. 例えば Nakaya (1954) の scroll (屏風状) はまず樹枝状を作り, そこから T_a を上げていくことで伸びた枝のエッジが c 軸方向に屏風状に発達する温度を生成条件としている (中谷, 1949; 花島, 1944). 一方, 本研究での渦巻結晶 (scroll) とは T_a を変化させず初期状態のまま結晶成長させたときに, 全体の形状が中空の角柱状であっても c 軸に平行に巻き込むような構造 (以下渦巻き構造と記述) を持つものを渦巻結晶とした. このために生成温度に差があるように見えている可能性がある. また同じ温度条件での Kobayashi (1961), Mason (1971), Bailey and Hallett (2009) の sheath または hollow prism あるいは hollow column はこれらの巻き込み構造が考慮されているかは不明であるが, 小林 (1957) はこの温度域の結晶について「鞘型, コップ型, 屏風状の結晶は c 軸および a 軸方向への成長比によって便宜的に名付けられたもので結晶習性の上からは同型のもの」としており, 実際は同種の結晶を研究者によって別名称としている可能性も考えられる.

また, 微小水滴と対流の存在する対流型装置と, 結晶が水蒸気の拡散と昇華のみで成長する拡散型装置での条件の違いも温度と成長形や分類の違いの一因になっていると考えられる. たとえば樹枝状と扇形結晶の判断について Nakaya (1954) では枝の先端の形状に注目し, これが尖っていれば樹枝状, 広がっていれば扇形という区別をしているのに対し, 小林 (1957) の拡散型での研究では先端がすべてきっちりとした直線型の扇形構造

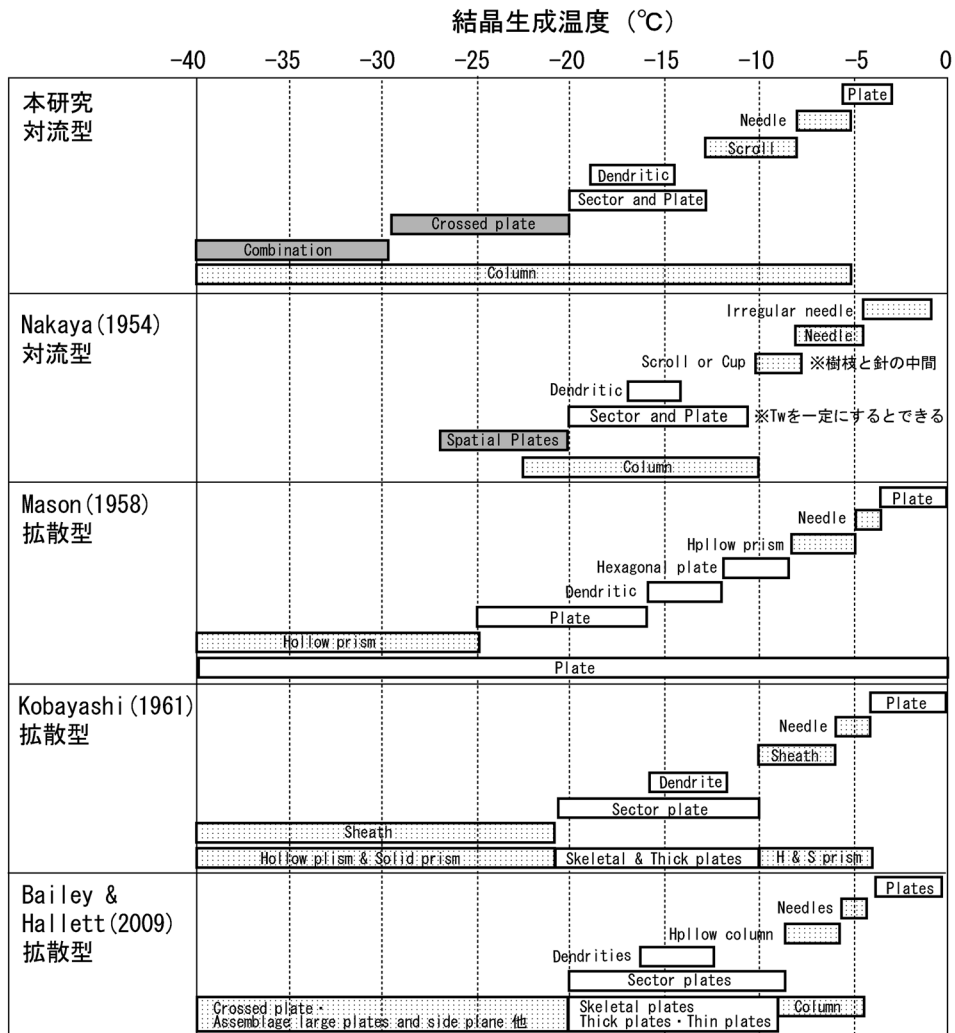


図 18 各形状の雪結晶の生成温度の比較。(表中の結晶の名称はそれぞれの論文で使用されている名称を使用。同じ結晶が別の名前で呼ばれている場合がある。)

表 1 $-6^{\circ}\text{C} \sim -19^{\circ}\text{C}$ の温度域における結晶生成時の RH_i 測定結果: 各欄の数字は測定個数

温度帯	結晶形	RH _i 測定結果			計
		未飽和 (氷飽和未満)	飽和 (氷飽和未満)	氷飽和以上	
$-6 \sim -9^{\circ}\text{C}$	Needle (針状)	6	9	1	16
$-9 \sim -14^{\circ}\text{C}$	cup, scroll (コップ、渦巻)	4	23	0	27
$-14 \sim -19^{\circ}\text{C}$	dendritic, sector, plate (樹枝状, 扇形, 角板)	2	28	0	30

を示した結晶が生成するが、これを樹枝状結晶としている。小林 (1957) は Nakaya (1954) との先端形状の違いの原因を樹枝の成長が過飽和度だけではなく微小水滴の存在にも支配されるためだとしている。

これらを含め、以下に上記の各研究で示されている雪結晶ダイヤグラムと本研究結果の比較を記述する。

4.2 湿度と結晶生成

4.2.1 水飽和を超える条件での結晶生成

本研究では中谷ダイヤグラムで示された水飽和やこれを大きく超える湿度条件での雪結晶生成は見られなかった。水滴が多数存在する対流型の実験では水飽和を大きく超える湿度は考えにくいですが、中谷ダイヤグラムでは -7℃ 以上の高温領域ではすべての結晶が水飽和以上を必要とするとしており、樹枝状結晶では氷に対して 107% 以上、140% 近くまでの高過飽和領域で生成することを示した。しかし、本研究においては樹枝状結晶についても水飽和を超える条件は見られない。また、小林 (1957)、Mason (1971)、Bailey and Hallett (2004, 2009) など拡散型の装置で得られているような高過飽和も測定されてはいない。

Nakaya (1954) は湿度測定方法として五酸化リンを用いた吸湿法を用いており、結果として中谷ダイヤグラムでの過飽和度 s は装置内に浮遊している微小水滴を含めた装置内の水分量の総和を意味している。式(2)は Nakaya (1954) での過飽和度を示す式である。

$$s = \frac{D}{D_{\text{sat}}} \times 100 \quad (2)$$

D : 装置内の水分量 (気相と液相の和)

D_{sat} : 温度 T_a での水の飽和水蒸気量

これに対し、本研究の RH_i は「気相としての相対湿度」すなわち空気塊に含まれている水蒸気量のみを計測した結果であり、これが両者の測定結果の違いの大きな要因であると考えられる (村井ら, 2011)。対馬 (2004) は中谷ダイヤグラムについて、式(2)で求められる縦軸の s が「過飽和度」や「湿度」と解釈されることで拡散型装置での過

飽和度との間で混乱が生まれたと指摘した上で、水滴が多数存在する自然の雲の中では中谷ダイヤグラムや小林 (1957) のダイヤグラムで樹枝状の生成条件として示されているような水飽和を大きく超える「水蒸気での過飽和」は存在しえないとしている。拡散型の装置では氷晶核、微小水滴や対流の存在しない実験的な環境で高過飽和を得ており (対馬・薄井, 2002)、対流型での本研究との相違となっていると思われる。

4.2.2 未飽和条件下での結晶生成

本研究では氷に対して数%未飽和の条件でも結晶の成長を確認している。表 1 は $T_a = -6^\circ\text{C} \sim -19^\circ\text{C}$ における結晶生成時の RH_i の測定結果を未飽和、飽和 (水飽和未満)、水飽和以上に分けてその個数を示したものである。表 1 から結晶生成時の温度 T_a が高い条件ほど未飽和での結晶生成の割合が多いことがわかる。

Kobayashi (1960) は中谷ダイヤグラムの検証を目的とした対流型装置による実験で、測定時に補償する気体の温度や湿度を管理した上で、カールフッシャー法による精密な水分量の測定を試みた結果、氷に対して 90% 程度からの雪結晶生成を報告している。しかし、Kobayashi (1960) はこの結果を測定に用いた気体が結晶生成点近傍からサンプリングしたものではないことから来るエラーと説明した。

結晶生成時に未飽和条件が測定されている原因として、まず湿度 RH_i の測定誤差や装置内の温度の空間的不均一性 (温度及び湿度ゆらぎ) による測定上の問題が考えられるが、これらについては、村井 (2011) に詳しく記したように本研究での温度、湿度の計測には問題がないと考えている。

水飽和未満での結晶成長は一般的には考えにくいですが、未飽和条件で結晶が生成する原因としては以下の 3 点が考えられ、特に対流型装置での結晶生成においては下記のうち 1)、2) による結晶生成の可能性が大きいと思われる。

- 1) 対流によって微小水滴が下から結晶付近に運ばれるとき、その温度が周囲の気温と同じ温度まで下がる以前に結晶生成点へ到達してしまうため、水滴の温度が高いままとなっている。
- 2) 雪結晶生成時に浮遊する微小水滴の影響

3) 周囲の冷却板が雪結晶生成温度よりも低いことで、雪結晶温度が放射冷却のために低下している。

1) について、対流型の装置で人工的に雪結晶を生成する際、装置内部は周囲の壁面から冷却されるが、壁面温度は結晶生成点温度より常時 $2^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ 低く、また壁面には霜が存在しているため壁面近傍の湿度はほぼ水飽和の状態と考えられるが、壁面で冷却された空気は装置下部の水蒸気発生装置付近の高温高湿度の空気と混合することで、微小水滴が生成すると同時に温度の上昇で湿度が下がり未飽和となる可能性がある。また、装置下部で大きな温度差のある空気が混合するため、生成した微小水滴が周囲の空気より温度が高い状態のまま結晶生成点へ運ばれ、結晶表面の温度との差によって結晶生成が起きることは充分あり得る。同時に雲粒のように大きな曲率を持った微小水滴は、同温度の平面に比べて飽和水蒸気圧が高く、雪結晶に近づいたときに水蒸気を供給する可能性も考えられ、このような場合、微小水滴近傍は周囲の雰囲気より高い水蒸気圧となり、周囲が未飽和であっても結晶に水蒸気を供給できる。

2) について、これら対流型の装置での雪結晶生成では実験中、装置内に多く浮遊している微小水滴が装置内の対流で移動し、結晶に付着することで直接成長に寄与している可能性が考えられる(小林, 1957)。実際、雪結晶生成中の装置内には多くの微小水滴が浮遊し対流によって上方へ移動しているのが観察される。また微小水滴による樹枝状結晶の成長は油川(2005)によって実験的にその場観察されており、本研究では図4からもわかるように未飽和での結晶生成はほとんどの場合 $T_a = -17^{\circ}\text{C}$ より高い条件のときに起きていること、また表1から T_a が高い条件の場合ほどその割合が高いのは、高温条件では微小過冷却水滴が液体として存在しやすいことが一因であるとも考えている。この場合微小水滴は消散過程にあると思われるが、水滴による結晶成長を考えればこのような条件下での結晶生成はあり得ると考えている。

3) について、雪結晶表面の温度が周囲の気温より低い場合、周囲の気温測定では未飽和でも結晶表面では飽和となっている可能性もあるが、これを確かめることは難しい。

4.3 温度と結晶生成

4.3.1 -5°C 以上での結晶

本研究では $T_a = -6^{\circ}\text{C}$ 以上、 $RH_i = 100\% \sim 103\%$ の条件で角板状の結晶が生成している(図4)。この温度域では Mason (1971), Kobayashi (1961) のダイヤグラムにおいても角板が示され、Kuroda and Lacmann (1982) によって理論的にも板状の結晶成長の説明がされている。中谷ダイヤグラムではこの温度域で針異形と呼ぶ c 軸方向に発達した結晶が示されているが、Nakaya (1954) と同様に対流型を用いた本研究ではこのような結晶は観察されていない。

この温度域では、上記のダイヤグラムすべてで水飽和以上の条件での結晶生成が示され、特に中谷ダイヤグラムでは結晶生成に水飽和以上が必要であることを示している。この温度域では水と氷に対する水蒸気圧の差は小さく水飽和以上での結晶生成もあり得るが、結晶生成の必要条件としての水飽和は考えにくく、中谷ダイヤグラムに示された大きな過飽和度は、4.2.1 に示したように、実験時の装置内に浮遊する多数の微小水滴の存在によるものだと考えられる。

4.3.2 -20°C 以下の結晶生成

本研究では低過飽和で角柱、過飽和度が高くなるにつれて交差角板が生成、 -29°C 以下の低温下ではこれにさらに角柱状、砲弾結晶などが混在した。中谷ダイヤグラムでは $T_a = -25^{\circ}\text{C}$ までで低過飽和では角柱、約 105% 以上で立体角板が生成するとしており、この点で本研究結果と同様である。

これに対し、Mason(1971) では $-20^{\circ}\text{C} \sim -25^{\circ}\text{C}$ で plate、 -25°C 以下で solid prism から過飽和度が大きくなるにつれて hollow prism に変わることが示されている。また同じ拡散型での小林のダイヤグラムでも -21°C 以下で同様に結晶は c 軸方向へ成長し、solid column $\rightarrow$ hollow prism $\rightarrow$ sheath と主に c 軸方向への結晶成長が示されている。

Bailey and Hallett (2009) は $-20^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ の温度域では水飽和付近で thick plate あるいは時に short column、過飽和度 0.03 から水飽和を超える広い湿度範囲で crossed plates, side plane あるいは assemblage of the thin plates など板状の結晶が組み合わさった結晶が生成することを

示しているがこれは本研究と同様の結果である。また彼らは航空機を用いた雪結晶のその場観察 (Baker and Lawson, 2006, Lawson *et al.*, 2006) でも同様な結果になることを指摘し、この温度域で角柱状結晶の生成が支配的になることを否定しており、本研究と一致している。

4.4 結晶の生成条件と成長速度

Nakaya (1954) では針状結晶、樹枝状結晶、広幅・扇形・角板結晶それぞれの成長速度は $0.55 \sim 2.3 \text{ mm h}^{-1}$, $1.0 \sim 5.0 \text{ mm h}^{-1}$, $0.145 \sim 1.20 \text{ mm h}^{-1}$ であった。(ただし、Nakaya (1954) の成長速度は結晶を包む球または円の直径を時間で除したものであるため、ここでは本研究との比較のため Nakaya (1954) の測定値に $1/2$ を乗じた)。

これを本研究 (図 16) と比較すると樹枝状結晶、広幅・扇・角板結晶についてはほぼ同じであり、針状結晶についても一例をのぞき本研究とはほぼ同様な成長速度が測定されている。

先にも述べたように針状結晶、樹枝状結晶の成長速度は湿度条件に依存しているということを考慮すると、成長速度から判断して Nakaya (1954) と本研究では結晶生成時の実際の湿度条件は近似していると思われる。しかし、中谷ダイアグラムと本研究の図 4 を比較すると各結晶の成長条件、すなわち雪結晶生成時に測定された湿度には大きな違いがある。このことから、両者に見られる湿度条件の差が測定法に起因したものであることが考えられる。具体的には、中谷ダイアグラムでは、本研究での湿度 RH_i よりもかなり高い過飽和度を示しているが、この両者の差がすなわち装置内の微小水滴の量を表しているとも言える。

図 16c では主に -30°C 以上で生成する交差角板と -30°C 以下の低温で生成する不規則集合結晶中の交差角板で大きな隔たりがある。この領域では -30°C 付近を境界に急に成長速度が小さくなる。この温度域では離れた単独の結晶を生成することは非常に難しいが、このことが成長速度に影響している可能性もある。

5. まとめ

超小型センサタイプの光学式の鏡面冷却式露点計を対流型の人工雪結晶生成装置内に設置し、 -3.5°C から -39.4°C までの温度で雪結晶生成実験

を約 200 回実施して雪結晶生成時の湿度および気温と生成する雪結晶との関係を調べ、その結果下記の結果が得られた。

- 1) 結晶はおおむね水飽和から水飽和の間で生成し、Nakaya (1954) の雪結晶ダイアグラムに見られるような水飽和を超える成長条件は見られない。これは水飽和に対する気相としての相対湿度 RH_i を測定している本研究に対し、Nakaya (1954) では装置内に浮遊する微小水滴を含めた全水分量を測定しているためと考えられる。
- 2) 結晶の形状を決める主要な条件として結晶生成時の温度条件が大きく影響するが、湿度条件に着目すると、 $0^\circ\text{C} \sim -40^\circ\text{C}$ までの広い温度域で比較的低湿度条件においては角柱結晶あるいは厚い角板結晶が生成し、湿度が高くなると、例えば $-5 \sim -8^\circ\text{C}$ で針状、 $-15 \sim -19^\circ\text{C}$ で樹枝状などその温度特有の結晶形が現れることが確かめられ、この点でこれまでの研究と一致した。さらに、特に -35°C 以下では高湿度のもとで多結晶を含む多様な結晶が生成する。
- 3) 対流型装置での本実験では、水飽和を下回る条件でも結晶が生成する場合があった。未飽和での結晶成長は考えにくいことから、この時には浮遊している多くの微小水滴の温度や曲率の効果等によって結晶の表面付近では過飽和となって気相成長している可能性や、微小水滴が結晶に直接付着することによる成長など、微小水滴の存在が結晶成長に寄与していることが考えられる。
- 4) 針状結晶、樹枝状結晶、及び -30°C 以上での交差角板結晶では成長速度は湿度にほぼ比例して大きくなる。しかし扇形結晶・角板結晶や -30°C 以下での交差角板結晶では湿度によらずほぼ一定となる傾向を示す。

謝 辞

本稿の査読を担当された方々には丁寧な内容を検討して頂き、また大変的確で有意義なご指摘、コメントを頂きました。感謝いたします。

文 献

- 油川英明, 2005: 過冷却水滴の結晶化による雪結晶の成長, 北海道教育大学紀要 (自然科学編), **55** (2), 1-12.
- 油川英明, 中埜渡美佳, 2006: 雪結晶ダイヤグラムに関する一考察, 北海道教育大学紀要 (自然科学編), **56** (2), 1-14.
- Bailey, M. and Hallett, J., 2004: Growth rates and habits of ice crystals between -20°C and -70°C . *J. Atmos. Sci.*, **61**, 514-544.
- Bailey, M. 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**, 2888-2899.
- Baker, B. and Lawson, R. P., 2006: In situ observation of the microphysical properties of wave, cirrus, and anvil clouds. Part I: wave clouds. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 3160-3185.
- 古川義純, 2005: 雪結晶分類, 雪と氷の事典, 日本雪氷学会, 35-36.
- Hallett, J. and Mason, B. J., 1958: The influence of temperature and supersaturation on the habit of ice crystals grown from the vapour. *Proc. Roy. Soc. London., ser. A* **247**, 440-453.
- 花島政人, 1944: 人工雪の生成条件について, 低温科学, 物理編, **1**, 52-65.
- Ibata, K. and Kanai, Y., 2008: Development of the micro chilled mirror hygrometer. *Proceedings of the 5th International Symposium on Humidity and Moisture-ISHM2006*, index 161.
- 金井良之, 井端一雅, 2005: 最新の微細加工技術を用いた小型鏡面冷却式露点計の実現. *Savemation Review*, **23** (2), 30-37.
- 菊地勝弘, 1974: 天然雪 - 特異な雪, 多結晶雪を中心として -, 気象研究ノート, **123**, 767-811.
- Kikuchi, K. and Sato, N., 1987: Characteristic features of snow crystals of low temperature types. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics)*, **8** (3), 243-257.
- 小林禎作, 1957: Diffusion cloud chamber による雪結晶習性の研究. 低温科学, 物理編 **16**, 1-12.
- Kobayashi, T., 1960: Experimental researches on the snow crystal habit and growth using a convection-mixing chamber. *J. Met. Soc. Japan*. **38** (5), 231-238.
- Kobayashi, T., 1961: The growth of snow crystals at low supersaturations. *Phil. Mag.* **6**, 1363-1370.
- 小林禎作, 1980: 六花の美 - 雪の結晶生成とその形 -, サイエンス社. 249pp.
- Kumai, M., 1982: Formation of ice crystals and dissipation of super-cooled fog by artificial nucleation. *J. Appl. Meteor.* **21**, (4), 579-587.
- 熊井 基, 2008: 雪結晶ダイヤグラムの比較研究 - 中谷 Ta-S, Mason Ta-S, 小林 Ta-S, 雪氷, **70**, 514-524.
- Kuroda, T. and Lacmann, R., 1982: Growth kinetics of ice from the vapour phase and its growth forms. *J. Crystal Growth*, **56**, 189-205.
- Lawson, R.P., Pilson, B., Baker, B. and Mo, Q. 2006: In situ observation of the microphysical properties of wave, cirrus, and anvil clouds. Part II: wave clouds. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 3186-3203.
- Magono, C. and Lee, C. W., 1966: Meteorological classification of natural snow crystals. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics)*, **4**, 321-335.
- Mason, B.J., 1971: *The Physics of Clouds*. Clarendon press, Oxford, 2nd Edition, 671pp.
- 村井昭夫, 2005: ベ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.
- 村井昭夫, 高橋修平, 亀田貴雄, 皆已幸也, 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.
- 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究 - 結晶の形態とその生成 -, 岩波書店. 161pp+付録 17pp (図版 319 図).
- Nakaya, U., 1954: *Snow crystals: Natural and artificial*. Harvard University press, Cambridge, 510pp.
- Nakaya, U., Sato, I. and Sekido, Y., 1938: Preliminary experiments on the artificial production of snow crystals. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Imperial Univ., 2 (Physics)*, **2** (1), 1.11.
- 中田勝夫, 浅野浅春, 山下 晃, 1991: 多結晶雪の研究 (第 2 報) - 巨大人工多結晶雪の形態的分類 -, 大阪教育大学紀要 - 第 III 部門, **39**, 2, 139-151.
- 日本規格協会, 2001: JIS 湿度 - 測定方法. *JIS Z 8806*, 東京, 45pp.
- Sato, N. and Kikuchi, K., 1985: Formation mechanisms of snow crystals at low temperature. *Annals of Glaciology*, **6**, 232-234.
- Takahashi, T., Endoh, T., Wakahama, G. and Fukuta, N., 1991: Vapor diffusional Growth of free-falling snow crystals between -3 and -23°C . *J. Met. Soc. Japan*. **69** (1), 15-30.
- 対馬勝年, 2004: 中谷ダイヤグラムと拡散式人工雪作成法の問題. *天気*, **51**, 753-758.
- 対馬勝年, 2005: 雪結晶の分類図表について. 雪氷, **67**, 380-382.
- 対馬勝年, 薄井たかし, 2002: 雪結晶ダイヤグラムの問題, 第 18 回寒地技術シンポジウム報告集, **18**, 868-875.

Morphology of artificial snow crystals from −4°C to −40°C using a convection chamber with the “FINEDEW” chilled mirror hygrometer

Akio MURAI^{1),2)}, Takao KAMEDA¹⁾, Shuhei TAKAHASHI¹⁾ and Yukiya MINAMI³⁾

1) Kitami Institute of Technology,

Koen-cho 165, Kitami, Hokkaido 090-8507

2) Ishikawa Prefectural Institute for Education Research and In-service Training,

Takaomachi u31-1, Kanazawa, Ishikawa 921-8153

3) Ishikawa Prefectural University,

Suematsu 1-308, Nonoichi, Ishikawagun, Ishikawa 921-8836

Abstract: In order to investigate the morphology of snow crystals from −4°C to −40°C, artificial snow crystal formation experiments using a convection chamber with the “FINEDEW” chilled mirror hygrometer were conducted about 200 times. Using the data of relative humidity in the atmospheric phase (RH_i) by FINEDEW, we made a new diagram of snow crystal types. Our main findings are as follows: 1) Snow crystals mostly generate from ice saturation level to water saturation level from −4°C to −40°C. 2) When the humidity is close to the ice saturation level in the same temperature range, only columnar and thick plate types of snow crystals formed. When the humidity increases, snow crystals develop to each particular shape according to the temperature. Below −35°C and over 105% RH_i , a variety of shapes of snow crystals including poly-crystals formed. 3) Snow crystals sometimes formed below ice saturation level, which is difficult to understand. We postulate that small supercooled droplets, which are floating in the convection chamber, possibly attribute to the growth of snow crystals. 4) The relation between the growth rates and RH_i was obtained for the needle type, the dendritic type and the crossed-plate type at temperatures above −30°C. On the other hand, no clear relations between the growth rates and RH_i were observed for the sector plate type, the hexagonal plate type, and the crossed plates type at temperatures under −30°C.

(2011 年 4 月 11 日受付, 2011 年 8 月 12 日改稿受付, 2011 年 10 月 26 日最終改稿受付,
2011 年 12 月 3 日受理, 討論期限 2012 年 7 月 15 日)