

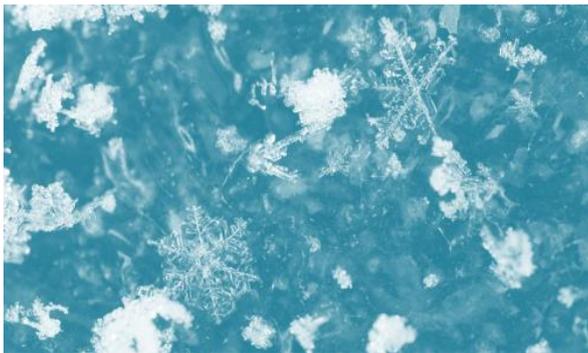
家庭用保冷剤を用いて雪の結晶を生み育てる

奥州宇宙遊学館 /

NPO 法人イーハトーブ宇宙実践センター

1. はじめに

湿った空気が上昇して冷やされると雲ができます。その雲は日本では夏の暑い時期を除いてほとんどが氷の粒であるが、氷の粒はやがてまわりの水蒸気を取りこみ雪の結晶が成長します。地上では雨でも高いところは気温が低く大抵は雪になっており、落ちてくる間に溶けなれば地上でも雪、気温が高く溶ければ雨、その間では曇（みぞれ）と教えられます。しかし、実際は、上空のことをこのように見たわけではありません。北海道大学の物理学者であった中谷宇吉郎の著書「雪」や「日本の心」に「雪は天からの手紙である」と述べています。降ってくる雪を調べると上空の様子が分かると、表現しているのです。また中谷らは、実験室内で雪の結晶を作る装置を世界に先駆けて作ることに成功し、雪の結晶は温度と水蒸気の過飽和量とによって決まるとする、有名な「中谷ダイヤグラム」を表しました。自然はとてもしつこく好きで、これほど単純ではなく、落下してくる途中で成長することもあるれば、風や水分の変化で思いがけない形に変わってしまうかも知れません。雪って、結構気まぐれです。そこでもう少し雪について深く知ろうと思い、奥州宇宙遊学館（Ohsu Space & Astronomy Museum ; OSAM）では現代の科学技術を最大限に生かして、家庭で簡単に作れる『人口雪の結晶装置』の製作を試みました。



皆さんは夜中に静かに降った雪をじっくり観察したことがあるでしょうか。朝の庭先や校庭などで、虫眼鏡で覗いてみると、雪は六角形の合わさったきれいな姿をしていることに気が付くことでしょう。その結晶には色々な情報が組み込まれているのです。そこで、ご一緒に力を合わせて、その天からの手紙の解読を試みてみませんか。こう意を決したのですが、その取り組みは試行錯誤の連続で始まったと言ってもいいかも知れません。

2. 雪の結晶ができる原理と予備実験

自然の雪は、上空 0℃以下の過冷却状態の微小な水の粒が集まった雲の中で、小さな塵やごみなどを核として氷晶ができ、それに周りから水分子を取り込んで六方対象の結晶に成長したものと言えます。この成長過程で、まわりの温度などの影響を受けるのですが、そのような状態を人工的に作り、またある程度制御することが人工雪結晶装置に求められます。そのような装置、特に家庭や学校で扱える雪結晶装置ができないか、その開発実験を進めました。

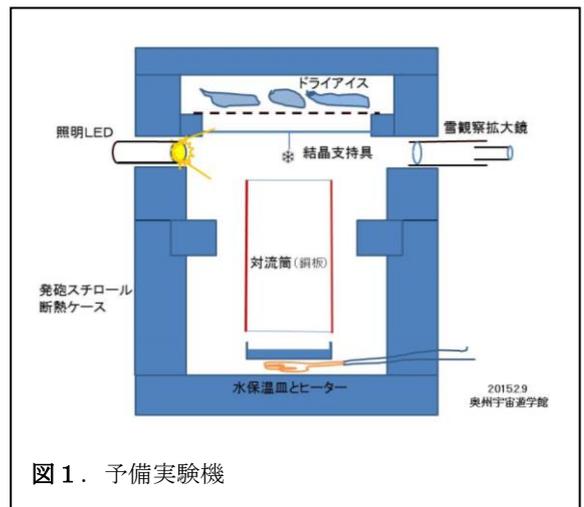


図1. 予備実験機

まず中谷式の人口雪の結晶作成装置を参考に、冷却部を含む装置の試作機を作ってみました。試作に当たっての大枠は家庭で入手できる部材を用いて、軽量、簡単な構造であることを第一としましたが、その機能についても留意しました。

装置は中谷式と同じく上部に結晶を作って観察する部分を設け、下部に水槽とヒーターを置くシステムです。中谷式と違う点は、冷却方式が全体を低温室に置くのではなく、上部にドライアイスによる冷却室を設ける方式としたことです。外壁には発砲スチロールを用い、内部には空気の対流をコントロールするための銅板の円筒を置きました。結晶の形成部には木綿糸や絹糸などを支持具の先に着けました。

予備実験機 材料と構成

- 冷却部；ドライアイス
- 水を温める皿とヒーター
- 内部対流用円筒
- 発砲スチロールの断熱ケース
- 観測窓ヒーターと観測照明用 LED ライト
- 観察用拡大鏡

予備実験機によって得られた雪の結晶の例を図 2 に示します。この装置の実験を通して、吊り下げた糸の先に樹枝状の結晶が

文字通り樹枝のように発達する様子が観察できました。その時間的変化も観察できましたが、対流層の空気の動きが大きく（下部に熱源があるため）、結晶は成長するとすぐ落ちてしまうことが多くありました。このコントロールのため隔壁や網などを挿入して調整しましたが、かなり難しいことが分かりましたが、結晶形成に道筋が見えたことは大きな成果でした。

平松和彦氏による「平松式ペットボトル人工雪発生装置」も使わせて頂きました。この装置ではほとんどのような状況でも確実に針状結晶が発達し、しかも手軽に見られるのには驚かされました。ただ問題の一つは使用するドライアイスの量も大変なものであり、子供たちの実験には危険があります。そこで、やはりもう一歩進めて、家庭用の保冷剤を用いた雪結晶装置の開発を進めることにしました。保冷剤の利点は何度でも繰り返し使えること、扱いが全性で、結晶作成に必要な温度まで冷却でき、また程度温度範囲も変えられると考えました。

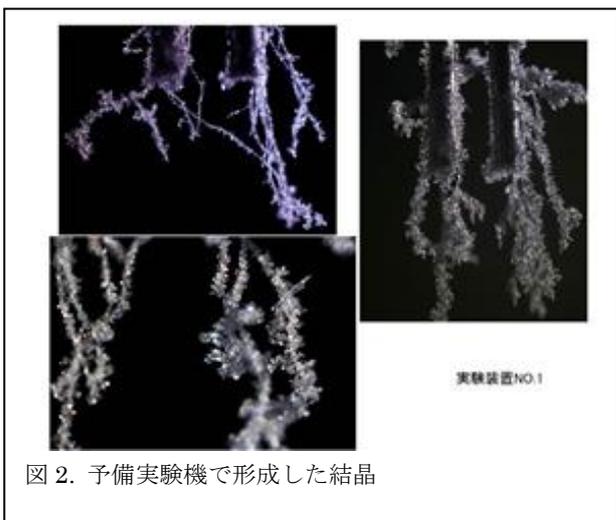


図 2. 予備実験機で形成した結晶

3. 人口雪結晶装置の試作

3.1 OSAM-SNOW 3 号機

試みた方式は下からの冷却する方法です。この方法は、すでに藤野丈志の報告書及び小林禎作（1957）に詳しく述べられており、その実用性は高いと言えます。特に前者による装置は、冷却部にペルチェ素子を用いているので、温度コントロールがしやすく、また薄幕上にできる結晶を上から観察する構造としていることも大きな利点となっています。結晶の発生と成長が、薄幕シートでどのように左右されるかの課題も残っていると見られますが、この取り

組みでは、藤野丈志による基本レイアウトを参考に、本来の目的の「家庭用の保冷剤でどこまで結晶が得られるか」の実験開発を進めました。デザインに当たっては、冷却室の熱効率と熱伝導性、結晶形成室のサイズと温度の均一性、観測窓の大きさ、観測用対物レンズと結晶形成位置との距離(近すぎると、熱的擾乱になる)、などを考慮し、次のような装置を作りました。

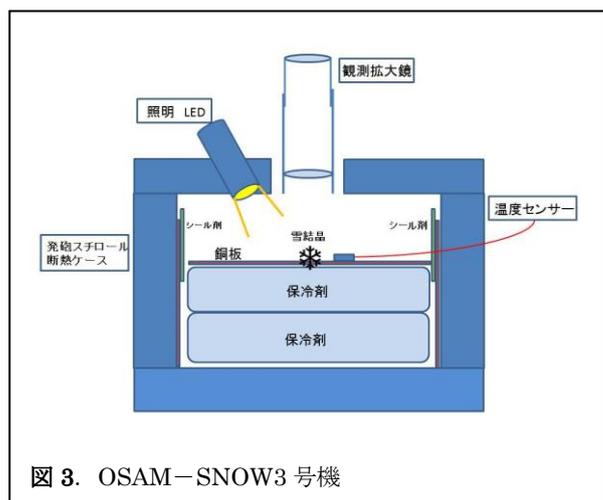


図 3. OSAM-SNOW3 号機

OSAM-SNOW3 号機 材料と構成

保冷剤 (M550g, 超氷結 No. M-6028, CAPTAIN SAG パール金属(株)、
サイズ 120mm, 193mm, 30mm 厚) を 2 個使用)

発砲スチロールの断熱ケース、厚さ 20 mm の 2 層構造

結晶形成室のサイズ 130mm×185 mm×50 mm

冷却室と結晶形成室の間に 0.5 mm 厚の銅板など

観測窓口径 50mm、対物レンズと雪結晶形成面までの距離 約 50mm

観測照明用 LED ライト、熱線吸収用フィルター

保冷剤は -16°C 以下まで冷却し凍結させてから装置内に挿入しました。今回の実験を明らかにしたことは、星三つの冷蔵庫であれば、保冷剤その物を -16°C 前後まで、また冷凍庫では -25°C 以下にまで冷却でき、それらを装置内に移すことにより、外気温が常温近くであれば、結晶形成室を約 $-12^{\circ}\text{C}\sim-15^{\circ}\text{C}$ まで冷却し、半日程度キープすることができました。

雪の結晶の作成は、銅板上に薄いガラス板(顕微鏡のプレパラート用のカバーガラスの裏面を黒く塗装したものをを用いた)を置いて行いました。安定した結晶を得るために、中部が一定温度に冷却されるまで待ってから、このカバーガラスを挿入しました。この実験による雪の結晶の例を図4に示めます。この画像から雪の結晶は、ガラス面に付着した水蒸気又は氷から拡散する水分子を取り込んで成長する様子がみえます。

また上記の図3には示していないが、実験を通して行った改良点をまとめておきます。

- 1) 容器内の上下方向に温度勾配を小さくするために、薄いアクリルの円筒状の筒を内部に置く。この円筒の壁面に小型のアルコール温度計を取り付け上下の温度差をモニターした(図5)。この円筒効果は大きく、円筒最下部とその1cm上での温度差はほぼ 0.5°C 以内に抑えることができた。
- 2) 結晶形成面の照明のため、LEDを円筒の最下部にリング状に取り付けたもの(図5、円筒の高さ40mm、直径98mm)を用いる。この照明により、上部から光を照射する方法よりも遥かに良い映像が得られた。
- 3) 湿度の制御のため天井部の下の面に保湿剤を貼り付け、外部から水分を補充できるようにした。



図4. OSAM-SNOW3号機でできた樹枝状結晶

上記の追加改良の中で、特に2)のアクリル円筒を用いた効果は大きく、実験開始(2015.12.3, 14時20分)から6時間後の例として、銅板面からの高さ0mm、10mm、20mmの点での各温度が、それぞれ、 -12.2°C 、 -11.8°C 、 -10.4°C が得られました。

得られた結晶の画像は、後の図8、図9にまとめた中に見られますように、当初の予想以上に多くの雪結晶が得られ、温度や湿度によるでき方の違いを捕えることができました。市販の保冷剤の能力の高さは予想以上であることを確認することができました。

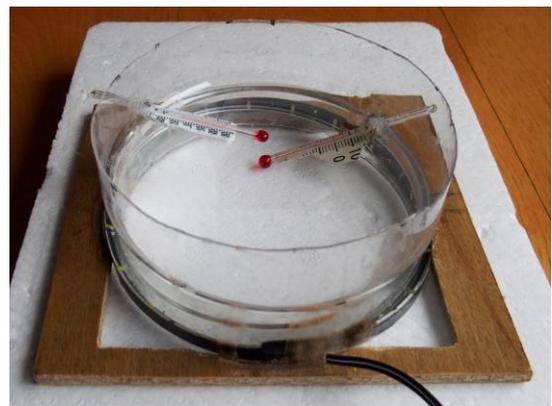


図5. 内部に挿入するアクリルの円筒と温度計

3.2 OSAM-SNOW 5号機

保冷剤の冷却力を高め、装置の保温性もさらに高いものにするため第二のモデルを製作しました。大きな狙いは、1号機では(-15°C までの実験はできたが)どうしても到達できなかった -25°C の世界を実験するためです。温度の均一性をなるべく保つことが重要であり、この点を考慮しました。

保冷剤をより大きなものにし、下と横に2枚ずつ、計4枚使えるようにした。発砲スチロールの厚さを5mm

にし、内容積の最適化を計り、図6のような装置をデザインとした。結晶形成室のサイズも大きくし、銅板面にデジタル温度計を固定した。図の中で容器周辺の枠はカメラを支える支柱です。

この装置冷却力は期待以上に大きく、保冷剤を4枚挿入なら -20°C 以下を、2枚でも -12°C から -13°C を半日以上キープすることができました。やはり市販の保冷剤の能力の高さは意外な誤算でした。

結晶を作るに当たって、注意したこと、また考慮したことを纏めておきます。これは OSAM-SNOW 3号機と5号機はほぼ同じです。

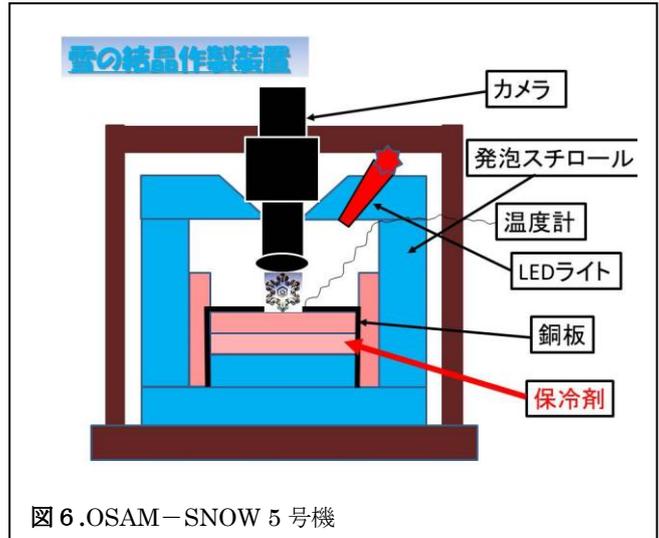


図6.OSAM-SNOW 5号機

- ① 銅板上に雪の結晶が形成されたが、その発生のタイミングはかなり複雑である。それは、保冷剤を入れてからの銅板温度が徐々に降下するからであろう。この不確定さを避けるために、先に述べたように顕微鏡観察用のカバーガラスを外部に置いておいて、容器内部が一定の温度まで下がった時に入れることにした。
- ② 結晶形成面として薄膜シートのポリエチレンとポリ塩化ビニリデンをテストした。後者がやや安定して結晶を発生させるが、銅板との差はほとんど見いだせなかった。
- ③ 観測用拡大鏡と上部カバーの間には若干の隙間があり、多少の空気の流入が可能になっている。必要に応じて拡大鏡部を外して密閉し、外気の出入りを調整するようにした。
- ④ 内部湿度は、上部の天井部近くに乾湿計またはデジタル式湿度計を挿入して測り、参考にした。

OSAM-SNOW 5号機 材料と構成

保冷剤 (M800g, 超氷結 No. M-6028, CAPTAIN SAG パール金属(株)、サイズ 120mm, 193mm, 30mm 厚) を 4 個使用)

発砲スチロールの断熱ケース、厚さ 50 mm

結晶形成室のサイズ 170mm×185 mm×50 mm

デジタル温度計、乾湿計

観測窓口径 80mm、対物レンズと雪結晶形成面までの距離約 50mm

観測照明用 LED ライト

4. 実験から分かったこと

以上の実験で明らかになったことをまとめると、

- 1) 今回の実験から、 -10°C 前後と -18°C 前後のところで扇形状の結晶が生まれること、またそれより温度が高い -10°C から -5°C の間で樹枝状の結晶や針状の結晶、また六角柱の結晶が生まれることが確認できました。
- 2) 特に OSAM-SNOW 5号機では -25°C 近傍の実験に成功し、 -24°C から -26°C の範囲で厚い角板ができることを確認できました。
- 3) -15°C から -25°C の低温の中でできた氷晶角から柱面や樹枝の発達が生じ、時間の経過と

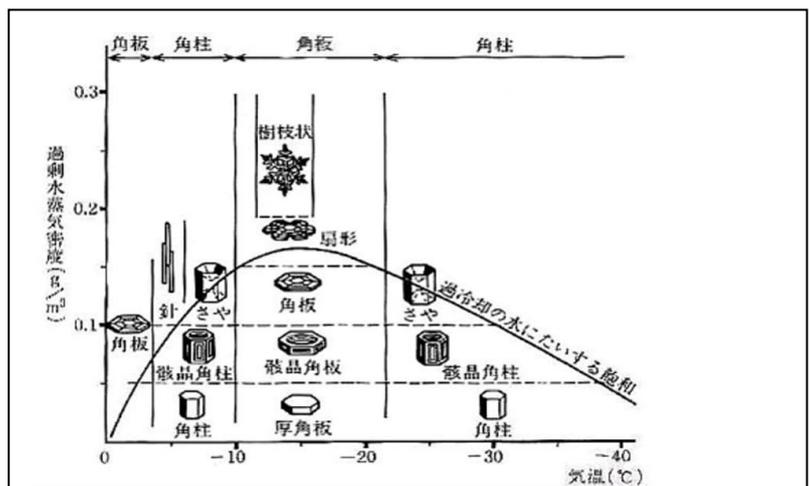


図7. 小林ダイヤグラム (小林禎作、Experimental Researches on the Snow Crystal Habit and Growth by Means of a Diffusion Cloud Chamber、1957年による)

しても捕えることができた。3)の中で、結晶の成長中に温度と湿度の変化があれば、その影響が結晶の形に現れること、そして最終的な形状はその変化の集積の結果であることが分かった。その意味で「雪の結晶は手紙である」とのべた言葉は明言であろう。

4) 家庭用の保冷材でも、保温性のいい容器を用いれば、室温が20℃以下の場合半日以上に亘って-12℃以下に保てること。また夏の真っ盛りでも今回の実験のように4枚の保冷剤を組み合わせれば十分雪結晶実験に適した温度を保てることが確認できた。

上記の3号機と5号機によって得られた雪の結晶の画像と温度条件などをまとめて図8、図9に示しました。これらを総括すると、実験はほぼ小林ダイヤグラムに(図7)沿って結晶が形成されたと見られます。全般に角板から扇型へと進まずすぐ樹枝状の結晶が成長する例が多かったが、その中で-10℃前後および-16℃から-21℃の間の2か所の温度の中で扇型の結晶の形成ができました。また-12℃から-16℃の間では樹枝状の結晶が多く見られました。全体にほぼ小林ダイヤグラムを支持するものと理解でき、開発実験としての有効性を示すものと思われます。一方、湿度の記録する仕組みを取り入れたはずですが、こちらは精度面でもう一步の工夫が求められているようです。

5. まとめと課題

○ 種々の条件による結晶の形が観察され記録できました。装置による結晶のでき方の違いは大きくはなく、温度と湿度の影響が基本的に支配的であることを確かめることができました。

○ 雪の結晶作製はある意味ではやや複雑であり、課題も残っています。しかし、雪は、身近な自然の技そのものです。現在の中学1年生のための新しい科学1上(東京書籍)の見開きグラビアに、中谷宇吉郎の「探求のあしあと」として研究のあらましが大きく掲げられているように、私たちも努力してみるべきことを訴えています。

○ 保冷剤を用いての雪の結晶実験は、十分可能であることが分かりました。熱効率の良い容器を作ることができれば、学校や家庭での学習や雪観察の楽しみにも使えるのではないかと思います。

○ 課題として残ることは、湿度を厳密に測れる仕組みを取り入れること。このことにより、中谷ダイヤグラムと小林ダイヤグラムの違い、また上空の雪の形成の詳しい仕組みが見えてくるであろう。特に雪国での寒気と降雪は頭の痛い問題であり、地球環境理解にも資すると思われる。

○ 課題のもう一つは、さらに対称性の良い結晶を作ること。結晶の核としてゴミ以外のものを使ってみることもまた重要と思われるが、これは地上での実験であり、上空の事をある程度推測できるとしても、綺麗な雪を作るには地球重力という厳しいハードルが在るのかも知れません。

(大江昌嗣、中東重雄、及川 秀、高梨 拓、新田高行)

文 献

丸山稔、「雪の結晶」インターネット講座「宇宙から素粒子へ」第七回

藤野丈志、「卓上人口雪観察装置の試作」日本雪氷学会全国大会予稿集、P158、2007年9月

佐崎元 他、「氷結結晶表面の分子レベルのその場観察」Sazaki@lowtem.hokudai.ac.jp

雪の科学館、石川県

小林禎作、Experimental Researches on the Snow Crystal Habit and Growth by Means of a Diffusion Cloud Chamber. II, 低温科学. 物理篇= Low temperature science. Series A, Physical sciences、1957年12月13日

中谷宇吉郎、「雪」岩波新書、昭和13年(1938年)

中谷宇吉郎、「日本のこころ」1951年

図 8.

雪結晶作成実験 (1)

2015.6~2016.3

奥州宇宙遊学館

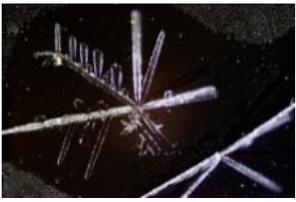
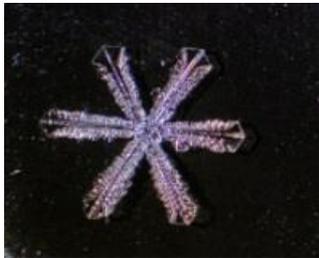
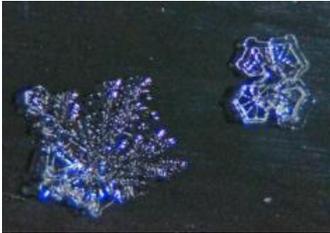
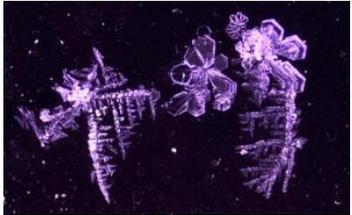
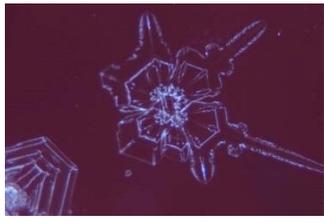
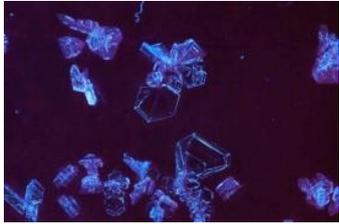
<p>11,12,13, 2015/9/29</p>				
	<p>at 9:43 -9.5~-4.6°C 針状</p>	<p>at 10:29 -9.5~-4.6°C 針状</p>	<p>at 10:41 -9.5~-4.6°C 針状</p>	
<p>14,15,16,17 2015/10/8</p>				
	<p>at 18:28 -10~-9.0°C 扇状</p>	<p>at 18:36 -10~-9.0°C 扇状</p>	<p>at 18:41 -10~-9.0°C 扇状</p>	<p>at 18:47 -10~-9.0°C 扇状</p>
<p>19,20 2015/10/8</p>				
	<p>at 20:33 -10~-9.0°C 扇型六花</p>		<p>at 20:35 -10~-9.0°C 扇型六花</p>	
<p>22 2015/12/16</p>			<p>23 2015/12/19</p> 	
	<p>at 20:14 -1~-3°C 扇型、星状六花</p>		<p>at 15:05 -10.4~-12°C 扇型、樹枝状</p>	
<p>26 2015/12/21</p>			<p>27 2015/12/28</p> 	
	<p>at 16:29 -10°C < 中空角柱</p>		<p>at 13:49 -5.8~-4.4°C 針状</p>	
<p>43,46 2015/6/23</p>				
	<p>at 14:21 -8.4~-10°C 針状</p>		<p>at 18:53 -8.4~-10°C 画像諧調反転 角板</p>	

図 9.

雪結晶作成実験 (2)

2015.6~2016.3

奥州宇宙遊学館

<p>48,50,51 2016/1/31</p>			
	<p>at 8:57 -18~-16°C 骸晶角板</p>	<p>at 15:52 -12.8~-11°C 扇型</p>	<p>at 17.35 -12.8~-9°C 扇型</p>
<p>52,53 2016/2/26</p>			
	<p>at 16:01 -19~-16°C 扇型六花</p>	<p>at 16:38 -19~-16°C 扇型六花</p>	
<p>54 2016/3/3</p>		<p>55 2016/3/11</p>	
	<p>At 18:58 -18~-16°C 扇型、樹枝状</p>	<p>at 12:26 -18.2~-16.2°C 扇型</p>	
<p>N1, N2, N3 2016/1/31-2/1</p>			
	<p>at 9:10 室温 6.5°C/室内湿度 45% -24.0→-26.2°C 骸晶角柱 (角板)</p>	<p>at 17:00 室温 6.0°C, -24.0→-26.2°C 骸晶角柱 (角板)</p>	<p>2/1 at 11:20 室温 6.5°C -24.0→-26.2°C 骸晶角柱 (角板)</p>
<p>N4, N5 2016/2/4</p>			
	<p>at 17:00 室温 5°C/室内湿度 68% -27.5 →-20.3°C 骸晶角柱 (角板)</p>	<p>at 17:05 室温 5°C/室内湿度 68% (息を吹きかける) -27.5→-17.9°C 骸晶角柱 (角板)</p>	
<p>N6 2016/2/5</p>			
	<p>at 9 : 39 -27.5 →-16.1°C 骸晶角柱 (角板)</p>		

