

教育現場で使用できる人工雪生成実験

Experiment of Artificial Snow Crystals for Science Education

諏訪 裕子*

(福井大学大学院教育学研究科物理学教室)

佐々木 恭介**

(福井大学教育地域科学部理数講座物理教室)

伊藤 文雄***

(福井大学教育地域科学部理数講座物理教室)

香川 喜一郎****

(福井大学教育地域科学部理数講座物理教室)

1. はじめに

前回の論文において、塩と氷を用いる新しい人工雪生成法について述べた¹⁾。雪は空気中の水蒸気が $-15\sim-20^{\circ}\text{C}$ 付近の温度で昇華してできるものである。氷と塩を寒剤として用いることによって、 -20°C の安定した低温を作ることができ、それが人工雪生成に適した条件を提供している。

よく知られているように、人工雪の研究は北海道大学の中谷らによって1936年に世界で初めて行われた^{2, 3)}。それは低温室の中に置かれたガラス管の上方にうさぎの毛をつるし、下方から水蒸気を少しづつ送り、うさぎの毛の上に雪の結晶を生成する方法である。中谷の人工雪生成装置は、自然雪の生成条件を研究する上で、非常に有効であった。しかし、この装置は低温室が必要であり、小、中学校の教育現場で利用することはできない。これに対して、我々が開発した人工雪生成法は非常に簡単なものであり、それゆえに画期的なものである。

数年前、北海道旭川西高等学校の平松氏によって、ドライアイスとペットボトルを用いる簡単な人工雪生成法が報告されたが⁴⁾、その装置では、結晶の生成過程を顕微鏡観察することができない。そのため、この方式で作られる結晶が本当に雪の結晶であるかどうか、疑問となっていた。

本研究では、ペットボトル方式で作る結晶の顕微鏡観察を行い、我々の方法で作る人工雪との比較を行った。また、前回考案した人工雪生成方法を更に改良し、より確実に、しかもより対称性のよい人工雪を作る方法を完成させ、その結晶生成のメカニズムについても考察を行った。

キーワード：理科教育、雪の顕微鏡観察、人工雪の生成、ブライン、アクリル板、結晶の核生成、静電気

* Yuko Suwa (Department of Physics, Faculty of Education and Regional Studies, The University of Fukui, Fukui910-8507, Japan : 現在、武生市北日野小学校講師)

** Kyosuke Sasaki (Department of Physics, Faculty of Education and Regional Studies, The University of Fukui, Fukui910-8507, Japan)

*** Fumio Ito (Department of Physics, Faculty of Education and Regional Studies, The University of Fukui, Fukui910-8507, Japan)

**** Kiichiro Kagawa (Department of Physics, Faculty of Education and Regional Studies, The University of Fukui, Fukui910-8507, Japan)

2. ペットボトル方式で作る人工雪

旭川西高等学校の平松氏が開発した装置は、暖かい部屋の中でも簡単に人工雪ができるという特徴から、発表当時話題となった。この方法は、ペットボトルを使うことから、ペットボトル方式と呼ばれている。我々もこの研究に触発されて人工雪の研究を開始した。図1はその装置を示す。発砲スチロールの箱の蓋にペットボトルがはまる程度の穴を開け、ペットボトルの上部が首を出すようにセットする。セットする前に、ペットボトルに息を吹き込んで多量の水蒸気を入れ、ペットボトルの上部から黒い糸を鉛直におろす。ペットボトルの周囲にドライアイスを入れて冷却する。結晶のできる過程を斜め上方から観察する。

室温26~28°Cで実験を行ったところ、10分ほどで黒い糸の表面に白く光る小さな結晶ができ始め、30分ほどで1cm程度の長さの結晶に成長した。結晶成長の過程を、時間を追って撮影したものが写真1である。(a)は17分、(b)は22分、(c)は27分である。結晶は保冷ボックスの蓋の高さから少し下がったところにできる。この領域は-15~-20°Cの温度範囲にあり、且つ、上下方向の温度勾配が最も急峻な所である。結晶成長後、この装置を低温室に移動させて結晶を取り出し、顕微鏡下で観察を行った。写真2はその顕微鏡写真である。中谷の研究によると、雪の結晶には、枝の軸方向に2本の溝がある。しかしこのペットボトル方式でできた結晶には、

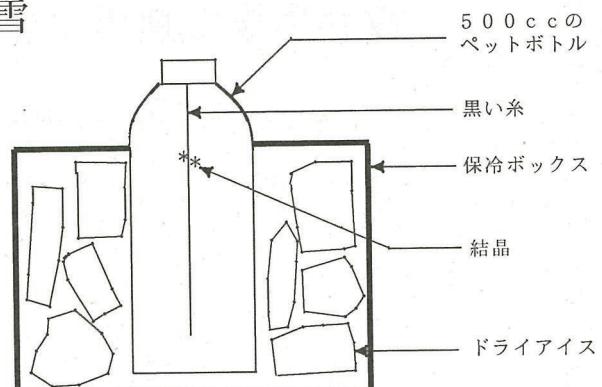
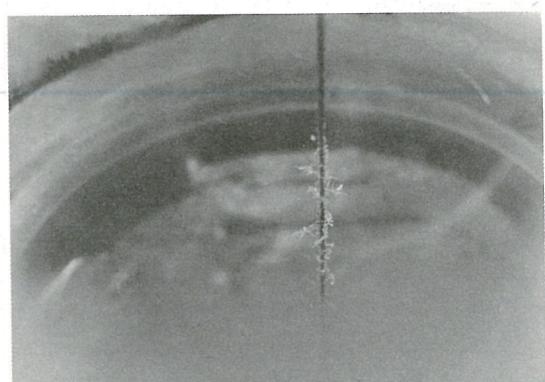
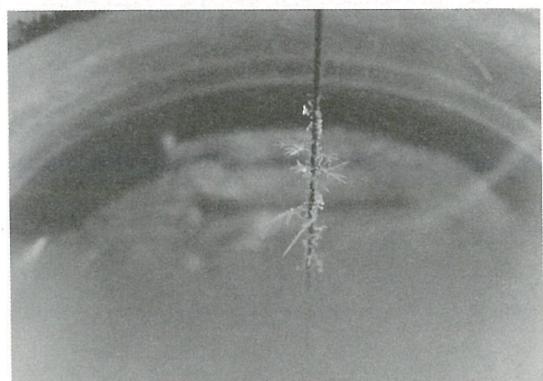


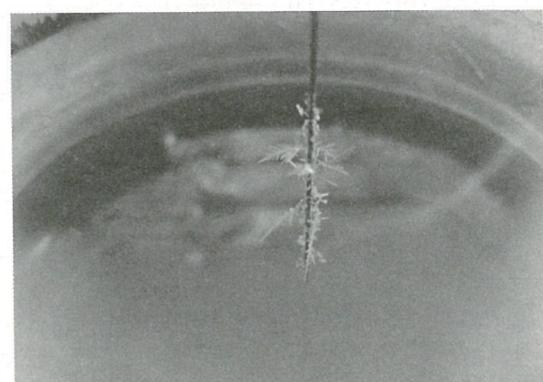
図1：ペットボトルを用いる人工雪生成装置



(a)



(b)



(c)



写真2：ペットボトル方式で出来た結晶の顕微鏡写真

写真1：ペットボトル方式による人工結晶生成過程

この溝が見られない。また、軸から出た小枝の間隔がお互いに接近している。この結晶は物体表面に付着して成長する霜の結晶に似ている。これらのことより、このペットボトル方式でできる結晶は、雪とは言えない。写真から分かるように、黒い糸の1~2cmの長さにわたって結晶の芽が密集しており、単結晶が生じにくい条件になっている。

この装置で雪の結晶ができない理由として、冷却されたペットボトル内部の水蒸気の過飽和度が著しく高くなっていることが挙げられる。そのため、水蒸気が多量に凝結し、顕微鏡で見ると、糸表面に凍結した水滴がたくさん着いている。その水滴から霜状の結晶が伸びているのが観察される。過飽和度が高いため結晶の成長速度も非常に速く、このような条件では単結晶になり得ない。今後ペットボトルに入れる水蒸気量を極力抑えて実験する必要がある。

結晶成長がおこるためには、昇華によって発生する潜熱を取り除かなければならぬ。中谷方式では、ガラス管の中の対流によって潜熱が取り去られている。ペットボトル方式では、対流は存在しない。また糸は熱の不良導体であり、糸を通して熱伝導で潜熱が逃げているとは考えられない。このペットボトル方式では、ペットボトル内部の温度勾配の急峻な所で、熱拡散によって結晶生成時の潜熱が取り除かれていると考えられる。

3. 塩と氷で作る人工雪

前回の論文で、塩と氷を用いる雪結晶観察装置について述べたが、その装置で雪を採集することなく、しばらく放置していると、青色工作用紙の上にピカピカ光るもののが観察された¹⁾。これを顕微鏡でみると、6本の枝に分かれており、人工雪であることが分かった。この発見をきっかけとして、より人工雪生成に適した装置を開発した。

図2は装置の断面図を示す。カップラーメンのビッグサイズに使われるスチロール容器(85mmΦ)を適当な高さ(約50mm)に切断して、それをプラスチック容器(130×130×65mm)の中に置く。スチロール容器の中にはブライン約100gを入れる。ブラインとは、氷7、塩3の重量比で混ぜたものである。氷は、市販されている家庭用のかき氷器を用いてシャーベット状にして用いる。スチロール容器のまわりを氷の塊で取り囲む。これは周辺からの熱の流れを抑えるためであり、これによって25℃近くの室温でもブラインの温度は長時間の間低温を維持できる。図3は、ブラインの温度の時間変化をしたものである。この時の室温は20℃であった。これより、ブラインは、-20℃の温度を約50分間維持できることが分かる。室内の温度が10℃以下であればスチロール容器を氷で取り囲む必要はなく、スチロール容器に、そのまま蓋をして用いればよい。プラスチック容器の蓋の中央部に穴をくりぬき、代わりにガラスシャーレを

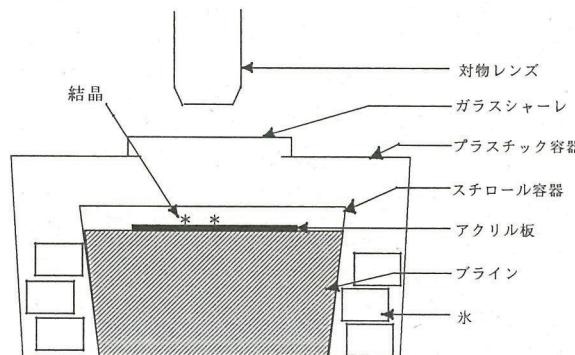


図2：塩と氷を用いる人工雪生成装置

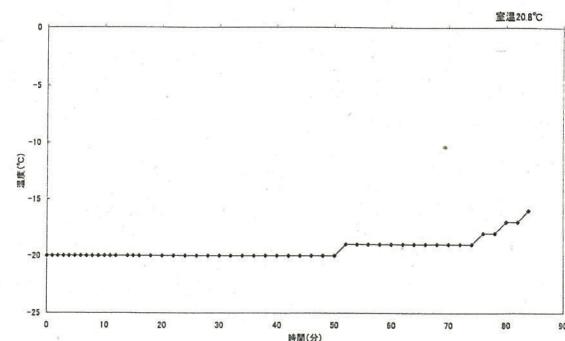


図3：ブラインの温度の時間変化

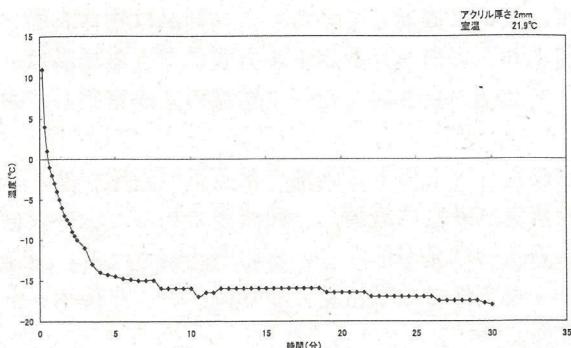


図4：アクリル表面温度の時間変化

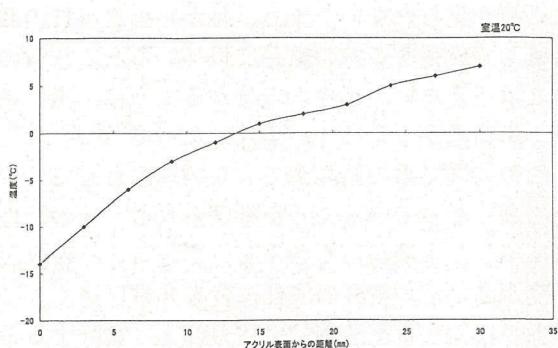


図5：アクリル表面から高さ方向の温度分布

逆さまに伏せ、観察窓とする。シャーレとプラスチックが接触する場所にシリコングリースを塗り、気密性を良くしている。黒いアクリル板（2mm厚、25mm角）の新しいものを用意し、アクリル表面を保護している紙をはがしてから、すぐにブラインの上にのせる。黒いアクリル板を使用したのは、結晶を見やすくするためである。ブラインから水が出ていないときは飽和食塩水を少し加えて、アクリル板とブラインの熱接触をよくする。アクリル板をブラインの上に置いたらすぐにプラスチック容器の蓋をする。図4はアクリル板を置いた直後からのアクリル板の表面温度と時間の関係を表したものである。これより、アクリル表面の温度は5分程度で-12~-16°Cの温度に下がることが分かる。この温度範囲は人工雪生成に非常に適した温度である。また図5は、アクリル表面から高さ方向への温度分布を表したものである。

この装置では、雪結晶に使われる水蒸気を特別に供給していないが、装置の蓋をしたときに閉じ込められた空気中の水蒸気が、アクリル板の表面で昇華して雪となる。従って、室内の湿度が結晶生成に大きく影響てくる。室温が20°C近くのときは、60~70%近くの湿度が適当である。湿度が高すぎても低すぎても、よい雪の結晶はできない。室内の空気が低すぎるときは、大きなビニール袋の中に水を入れ、湿度を適当に上げ、その中に装置を入れて蓋をする。蓋をしてしまえば中は密閉されるので、外に出して顕微鏡観察ができる。写真3は、実体顕微鏡を用いて人工雪生成装置の中の結晶を観察している様子である。

この装置では、アクリル板をのせてから1~2分くらいで結晶が見え始め、20分くらいで結晶の成長は止まる。この間、結晶は1~2mm程度の大きさまで成長する。写真4は結晶の成長過程を写真に撮ったものである。(a)はアクリル板をブラインの上に乗せてから13分後、(b)は16分後、(c)は21分後の写真である。このときの室温は20°Cである。この写真より、星状六花から広幅六花へ成長していく様子がよく分かる。これらの結晶は、自然雪の結晶と同じくらい完全な対称性を持っている。また、この結晶には、明らかに、雪結晶の特徴である軸に沿っての2本の溝がある。また、この写真が示すように、結晶が小さな水滴に囲まれて成長していることに注目すべきである。この水滴は過冷却の状態にあり、この水滴から水蒸気が供給されて結晶が成長していく。水滴は等方的に分布しているので、結晶は均一な水蒸気場の影響を受けて、非常に対称性のよい結晶に成長することができる。しかし写

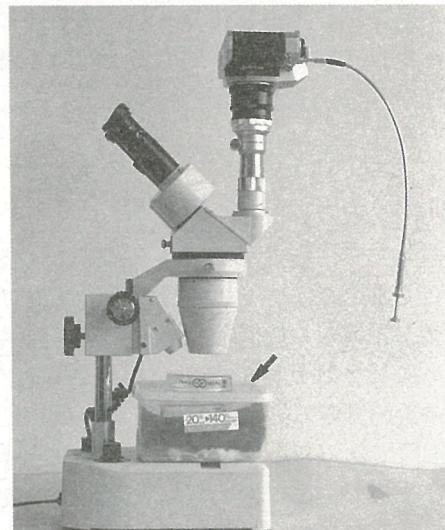
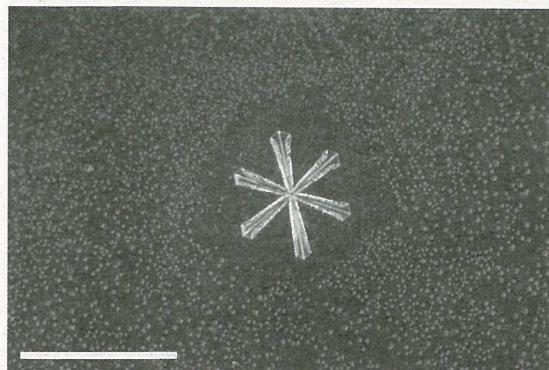
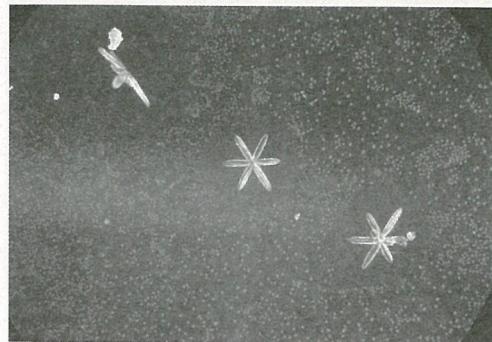


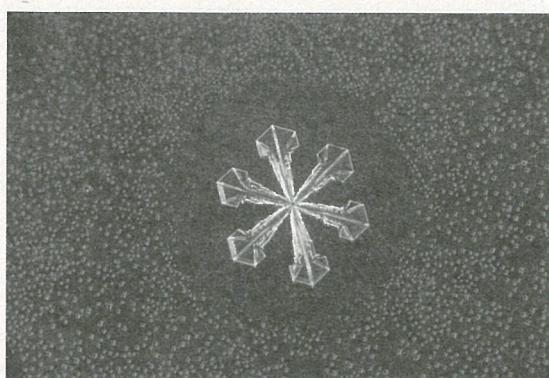
写真3：塩と氷を用いる人工雪生成装置と顕微鏡観察、矢印は人工雪生成装置



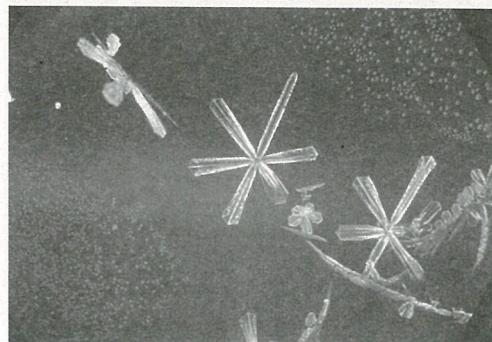
(a)



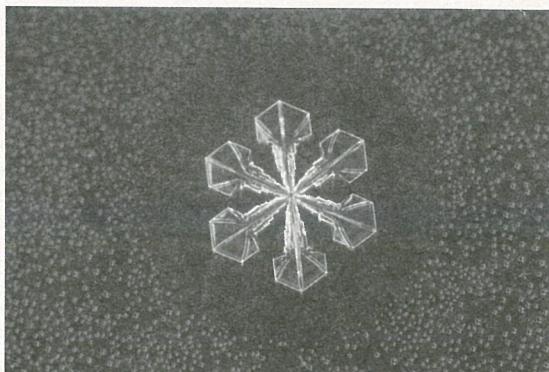
(a)



(b)



(b)



(c)

写真4：アクリル表面にできる人工雪の成長過程：(a)はブラインの上にアクリルを乗せてから13分後、(b)は16分後、(c)は21分後、白線の長さは1mm

写真5：結晶間の干渉による対称性の乱れ：(b)は(a)から4分後

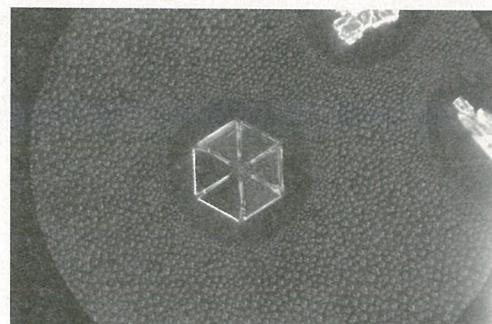


写真6：角板型の人工雪

写真5のような状況では、時間が経過すると、2つの結晶が互いに干渉効果を生じ、結晶の対称性は悪くなる。中谷方式の人工雪の場合、水蒸気は下方から対流によって供給されるため、下側に向いた枝の成長が上側のそれよりも幾分上回り、結晶が少し非対称になる。これに対して、今回的方法では、非常に対称性のよい結晶作成ができる。

中谷が示したように、雪の結晶の形は水蒸気の過飽和度と温度により決まる。この人工雪生成装置においても、室内の湿度やアクリル表面の温度によって結晶の形は変化する。写真6は角板の結晶であり、写真7はつづみ型の結晶である。また、この人工雪生成装置では温度、湿度のみならず、基板の特性によっても結晶の形が変化する傾向がある。写真8はアクリルに代わって黒の塩ビ（塩化ビニール）の板を用いた場合である。ここでは、花びらのような形の結晶ができている。これは自然雪ではありません珍しい形である。写真9は同じく塩ビの板を用いた場合であり、双晶型の星状結

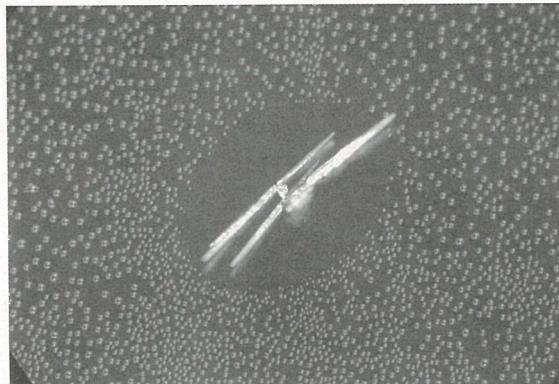


写真7：つづみ型の人工雪



写真8：塩化ビニールの板の上にできる人工雪

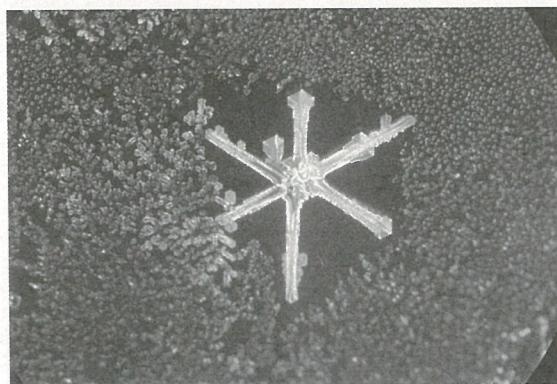


写真9：塩化ビニールの板の上にできる双晶型の人工雪

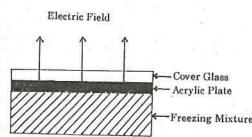
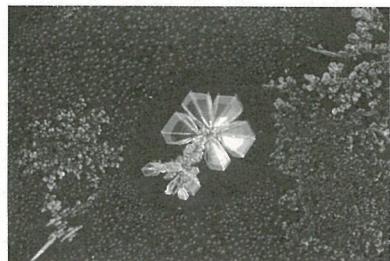


写真10：ビニールテープの表面にできる樹枝状型人工雪

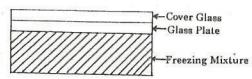
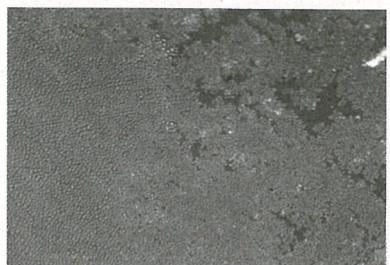
晶ができている。また写真10はビニールテープの上にできた結晶である。ビニールテープは、銅版(0.3 mm厚)の上に貼り、その銅版をブラインの上に置いた。この結晶は、自然雪でよく見られる樹枝状結晶の特徴を持つ。

これら的方法でできる雪の結晶では、何が核になっているかが問題となる。中谷の人工雪生成装置では、うさぎの毛が使われており、うさぎの毛の中にある小さなこぶが核になっていると考えられている⁵⁾。今回使ったアクリルやビニールテープの場合は、表面に核となり得るものはない。今回の方法では、核の発生に静電気が関与していることが、次の実験により明らかになった⁶⁾。すなわち、アクリル板に代えて、うすいガラス板(2 mm厚)をブラインの上に置いたとき、ガラスの表面はアクリル板のときと同様に水滴で覆わるもの、人工雪はできない。我々の実験ではアクリルを使う場合、常に新しいものを使い、そのアクリルの表面を保護している紙をはがして使用している。このとき、紙をはがすことによりアクリル板の表面に強い静電気が発生していることが検電器により確認できる。一方、ガラス板には静電気は発生しない。またアクリル板を用いる場合でも、紙をはがしてしばらく時間をおき、静電気を減らすと、結晶はできにくい。

静電気が核の発生に大きく関与していることは、以下の実験において、より明瞭に示される。写真11(a)は、静電気を持つアクリル板の上に薄いカバーガラス(0.15mm厚)を重ねたときのものである。アクリル板のみ用いる場合と同じように結晶ができている。アクリルからの静電界が、カバーガラス上部に及ぶためと考えられる。これに対して写真11(b)は、ガラス板の上にカバーガラスを重ねたときのものである。この場合、結晶はできていない。カバーラスの表面が水滴で覆われるのみである。



(a)



(b)

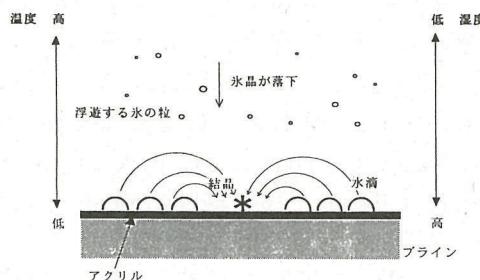


図6：結晶の成長過程を示す概念図

写真11：結晶成長におよぼす静電気の効果：(a), (b)
とともに表面はカバーガラス、(a)はカバーガラスの下に静電気を持つアクリル板が置かれている

我々は、静電界のもとでの雪結晶成長メカニズムを、以下のように考えている。雪の結晶の核は、アクリル板が作る静電界のもとで、アクリル表面の上方で発生していると考えられる。実際、表面から約3mm上方に顕微鏡の焦点を合わせると、ミクロンオーダーの小さな白い微粒子が沢山確認できる。この表面から3mm上方の温度は図5より-10°Cである。その微粒子は、ゆっくりと基板の表面に落ちていく。この微粒子は氷の微粒子であり、空気中の水蒸気が、アクリル上方の急な温度勾配の影響を受けて結晶化したものである。この微粒子の中には、静電気力の影響を受けて落下速度が減少し、アクリル上方により長く滞在するものがあると考えられる。そのような場合、氷の微粒子はより大きな粒子へと成長し、それがアクリル板に到着して核となる。アクリル表面の水滴を囲む水蒸気は水滴と熱平衡状態にあるが、その水蒸気圧は氷の結晶に対しては過飽和となっている。そのため、結晶に向かってまわりの水蒸気がどんどん流れ込み、結晶は成長する。図6はこの結晶成長過程を概念的に示したものである。

この人工雪生成法では、静電気が強いほど結晶の数が多くなる傾向がある。強い静電気の影響で、より多くの核が発生したためと考えられる。しかし、そのような状態でできた結晶は、まわりの結晶の干渉を受け、結晶の対称性は乱される。それゆえ、よい結晶を作るためには、いくらか静電気を抑えて核の数を調節する必要がある。

4. おわりに

ここで述べた人工雪は、身の回りにあるものを用いて比較的簡単に作ることができ、非常に教育的価値の高いものである。結晶が成長していく様子が短時間で観察され、しかも結晶は対称性に優れ、美しい。児童、生徒の関心を引き付ける理科教育教材として、おそらくこれ以上のものはないであろう。この人工雪生成実験は、小学校高学年から高校まで、幅広い教育現場で使用できるものである。今後、総合学習の実践テーマとして導入され、教育現場で広まっていくことを期待したい。今後、結晶成長に対する基板の影響などについて、より詳しい研究を行う予定である。

参考文献

- 1) 諏訪裕子、伊藤文雄、香川喜一郎, 2000 : 雪を教材とする理科教育の提案, 福井大学地域環境研究教育センター研究紀要, vol7, 35-42.
- 2) Nakaya,U., Sato I. and Sekido Y., 1936a : Preliminary experiments on the artificial production of snow crystals. J. Fac. Sci. Hokkaido Imperial Univ., Ser.II Vol. 2 (1) 1-11.
- 3) Nakaya U., Yoda Y. and Maruyama S. 1936b : Further experiments on the artificial production of Snow crystals. J. Fac. Sci., Hokkaido Imperial Univ., Ser.II Vol. 2 (1) 13-57.
- 4) 平松和彦, 1998 : ペットボトルで雪の結晶を作ろう, 子供の科学, Vol.40 (8), 42-43.
- 5) 小林禎作, 1970 : 雪の結晶, 自然雪の芸術をさぐる, 講談社
- 6) Suwa Y., Myint, H. H., Kuvniawan, H., Itoh, F. and Kagawa, K., 2001 : A new method for producing artificial Snow crystals using Mixture of salt and ice. Physics Education Vol. 36 (4) 293-298.