

研究ノート

ペルチェ素子を使用した対流型人工雪生成装置の製作

村井昭夫¹⁾

要　旨

ペルチェ効果を利用して雪結晶を生成する装置を考案した。本装置は、大型のペルチェ素子を多段化し水冷方式で使用する事により、室内で-30°C程度までの低温環境を実現しながら、電圧を調節することで、結晶生成領域の温度と水温、すなわち水面から発生する水蒸気量を変化させ、簡単に雪結晶を生成することができる対流型の人工雪発生装置である。筐体に発泡スチロールを使用するなどの工夫によって、装置の製作が容易であり、同時に小型で移動もできるという利点を持つ。これは、従来の対流型や拡散型装置のように低温室など大がかりな装置や、冷媒を使用する複雑な付加装置が不要である。

本論文では、この装置の基本原理およびその構成を述べ、本装置によって作られた雪結晶のいくつかを紹介する。

キーワード：人工雪結晶、ペルチェ素子、対流型

Key words: artificial snow crystals, Peltier device, convection chamber

1. はじめに

実験室において人工雪生成装置を用いて人工雪結晶を作り、その結晶習性や成長機構を調べることは今まで多くの研究者によって行われてきている。

その中でもよく知られているものに、中谷(1949)の人工雪生成装置がある。この装置の基本的な構造は、2重のガラス円筒と、下端に温度調節用の電熱線を内蔵した水蒸気供給源などからなっており、これを低温室の中に設置して実験を行う。すなわち、装置下部の容器の水を暖め、ガラス円筒内の対流によって運ばれた水蒸気により、上部のウサギの毛の上に雪結晶を作る。これは対流型と呼ばれ、装置内の温度は低温室の温度によりコントロールされ、発生する水蒸気量は電熱線によって水温を調節して行われる。この装置により、温度と水分量と雪結晶の成長形が調べられ、中谷ダイヤグラムとしてまとめられるなど、

雪結晶の研究において多くの成果を上げたことはよく知られている。

また、Hallett and Mason (1958) や Kobayashi (1957) は、拡散型と呼ばれる人工雪生成装置を開発して研究を行い、中谷の研究を発展させてきている。さらに、これらの他にも、権田(1980)の氷晶の成長形に対する水蒸気と熱の拡散効果を調べるための装置の開発、油川(2005)によるアクリル板とポリエチレンの薄膜を使い、密閉容器内に固定した微水滴群を用いる方法、結晶を自由落下させて成長させるものとして、山下(1974)による大型低温槽を使った方法、Takahashi *et al.* (1991) の風洞中の浮遊実験装置など種々の人工雪生成装置が作られている。

一方、教材として平松(1998, 2005)はペットボトルとドライアイスを使って簡単に雪結晶を作る装置を開発した。また、香川ら(2001, 2003)は食塩と氷による寒剤を用いた簡単な装置で人工雪を製作した。これらの装置は簡単に短時間に製作でき、費用もかからず、誰にでも結晶を作れるため、優れた教材として、現在でも学校教育の現

1) 石川県教育センター

石川県金沢市高尾ウ 31-1

場や地域活動などいろいろな場面で幅広く使われている。また、教材として(株)東洋製作所から雪結晶を人工的に生成する装置(遠藤ら, 1998)も市販されている。この装置は、Kobayashi(1957)による拡散型雪結晶生成装置の原理を元に、小型化、教材化したものであり、容易に雪結晶が生成できる点に優れている。

権田(1974, 1980)も述べているように、人工雪生成装置の中でも、ウサギの毛や纖維を使い、その上に雪結晶を成長させる装置は、結晶の位置が固定されることで、初期結晶から、大きく成長した結晶まで一つの結晶に注目して結晶の成長過程を追うことができる点で優れている。

しかし、中谷や小林などの人工雪生成装置は低温室など大がかりな設備、冷媒を使用した冷却装置など複雑な構造を持つ機器が必要であり、それ故、大きな設備を持たない者が手軽に人工雪結晶の実験を行ったり、このような装置自体を製作、改良したりすることは容易ではなく、当然ながら、研究者以外の一般の人々がこれらの雪結晶を実際に作り、目にはすることはきわめて難しい。逆に、平松や香川らの装置は簡便である反面、水蒸気量と温度をコントロールする事が困難で、いろいろな形状の雪結晶を製作することはほとんどできない。また、先に挙げた(株)東洋製作所の装置も温度・水蒸気量を相応にコントロールすることが難しいと判断される。

そこで、中谷の人工雪生成装置を室温で再現できないかと考え、検討の結果ペルチェ素子の利用を考えた(村井, 2004)。ペルチェ素子の使用については小林(1970)が氷結晶表面のエピタクシー成長の観察に使用しているが、今回、大型のペルチェ素子を多段化し、水冷方式で使用することにより、各種の雪結晶生成に必要な低温領域を作りだし、温度と水蒸気量をコントロールしながら人工雪結晶を作製することができた。本装置は制作・改造や移動も容易という、従来の雪結晶装置にはない特徴を持った対流型の人工雪結晶生成装置である。本報告ではこの装置の基本的原理と構成、及び作製された人工雪結晶を紹介する。

2. 人工雪発生装置の特徴と構造

本装置の特徴として、1) ペルチェ素子を使用す

るため、冷媒などを用いる装置が不要で、小型かつ簡単な構造であり、製作が容易で安価にできること、2) 常温の室内で-30°C以下まで冷却ができる、かつ結晶の成長過程が連続的に観察できること、3) 温度と水蒸気量を同時に比較的容易にコントロールすることができる。という3点があげられる。

特に1)については、後述するように人工雪生成装置自体の構造を非常に単純化できるという利点がある。また、部品も市販品で比較的簡単に手に入るため、容易に製作可能となる。ペルチェ素子は、近年非常に手に入り易くなり、高性能なものが通信販売等でも容易に購入できる。さらに、必要に応じて改造や改良が容易であり、発展性もあるという利点もある。

2.1 装置の構成

図1は本装置の構造図である。装置は大きく分け冷却ユニット、筐体、水蒸気発生装置、結晶支持具、温度モニタの5つの部分からなる。

冷却ユニットはペルチェ素子と水冷装置を組み込み、冷却のための主要な機能を持つ。筐体は外気温から断熱すると同時に、対流のための空間を持ち、雪結晶観察のための断熱構造の観察窓を装備している。水蒸気発生装置は水温の調節により、水蒸気の発生量をコントロールする。結晶支持具は雪結晶を成長させ、保持するための装置である。また、温度モニタは水温と装置内の結晶生成点の温度をモニタする。

2.2 各部の構造

2.2.1 冷却ユニット

図2は本装置の冷却ユニットの断面図である。冷却ユニットは大きく2つの特色を持つ。ひとつは大型のペルチェ素子を多段化して使用していること、もう一つは、その排熱のために水冷装置を備えていることである。

今回ペルチェ素子を冷却に使用する理由は、以下のよう3つの特徴・特性があるためである。

まず、1)これまで冷却に必要であった冷媒等を使用する必要がなく、素子自体が比較的コンパクトであること。2)冷媒等を使用する必要がないため、大がかりな装置が不要で、振動の影響からも解放され、装置自体も構造が単純で、コンパクトにできること。そして、3)温度制御に関する応答

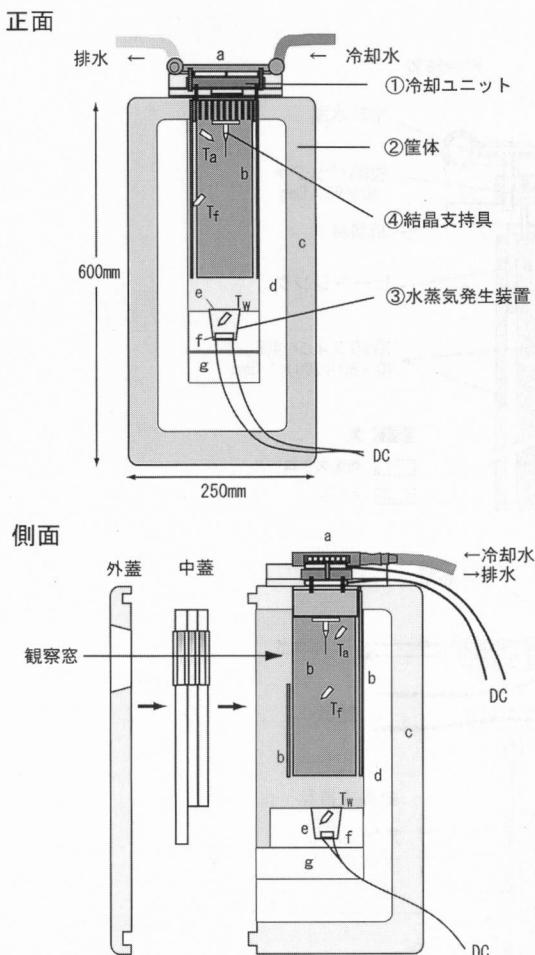


図 1 装置正面断面・装置横断面（左側が前面）。
a : 水冷装置 b : 冷却フィン c : 容器 d : 泡スチロール断熱材 e : 水容器 f : ヒーター g : 高さ調節板。

Fig. 1 Vertical section of the system.

性が良く、安定しており、寿命が長く、安価かつ、容易に手に入れることができることである。

しかし、ペルチェ素子は、吸熱能力がほぼ電圧に比例しているのに対して、発熱量は電圧の2乗によよそ比例するため、高い電圧をかけた場合、吸熱側と発熱側に大きな温度差を生むが、過大な熱の放出により、ペルチェ素子からの発熱量が排熱能力を上回ってしまう。その結果、負荷電圧が高くなると、発熱側に発生した熱により素子自身が熱を持ち、その熱が冷却面へ流出し冷却できなくなってしまうという現象が起こる。そのため、

排熱を効率よく行うと同時に、電圧を極力抑えて冷却能力を引き出す工夫が必要になる。つまり、 -30°C 程度までの低温を安定して獲得するためには理想的な排熱の構造が必須となる。

さらに、ペルチェ素子の吸熱面と発熱面の最大温度差はあまり大きく保てないため、素子1段では必要な温度を得ることは難しい。そこで、本装置ではペルチェ素子3枚を2段にして使用し、所定の低温を獲得できるようにした。

ペルチェ素子は現在いろいろな大きさ・性能の物が市販されているが、今回は大きさ $39.6 \times 39.6 \times 3.94\text{ mm}$ 、最大電圧 17.5 V 、最大電流 8.5 A 、最大吸熱量 85 W のものを使用した。

本装置では、9mmの銅板を放熱バッファとして挟んで、ペルチェ素子3枚を2段に重ね、上段の2枚の素子で下段の素子の放熱面を冷却することにより、1段では得ることができない低温を得ることができる(図2)。上段の2枚の素子には銅製の水冷装置を密着させる。この水冷装置はパソコン用のCPU冷却用の部品を利用した。これと水道の蛇口をホースでつなぎ、水道水を流すことで効率のよい排熱を行える(図3)。流水量は、およそ 300 ml/min で十分である。この水冷装置による排熱が本装置の大きな特色であり、重要なポイントでもある。

下段の素子の吸熱面(冷却面)には、アルミ製のヒートシンクを固定し、さらに銅製のフィンによって装置内の壁面4面すべてを効率よく冷却し、装置内の対流を円滑にさせる。

ペルチェ素子を効率よく稼働させるには、各接合面間の熱伝導をよくしなければならない。各素子、水冷装置、フィン、銅バッファの接合面は熱伝導性グリスを塗布し、隙間がないように密着させる。この冷却ユニットを図1に示した②の筐体の上部より差し込む形で取り付ける。また、冷却ユニットの下には図1の④結晶支持具をマジックテープで取り付ける。

装置内の温度は、ペルチェ素子に加える電流の調節により、水道水の温度よりも最大 -48°C 程度までの冷却が可能である。後述のように、冷却水の温度をさらに下げることにより、この温度以下の低温まで装置内を冷却することが可能になる。

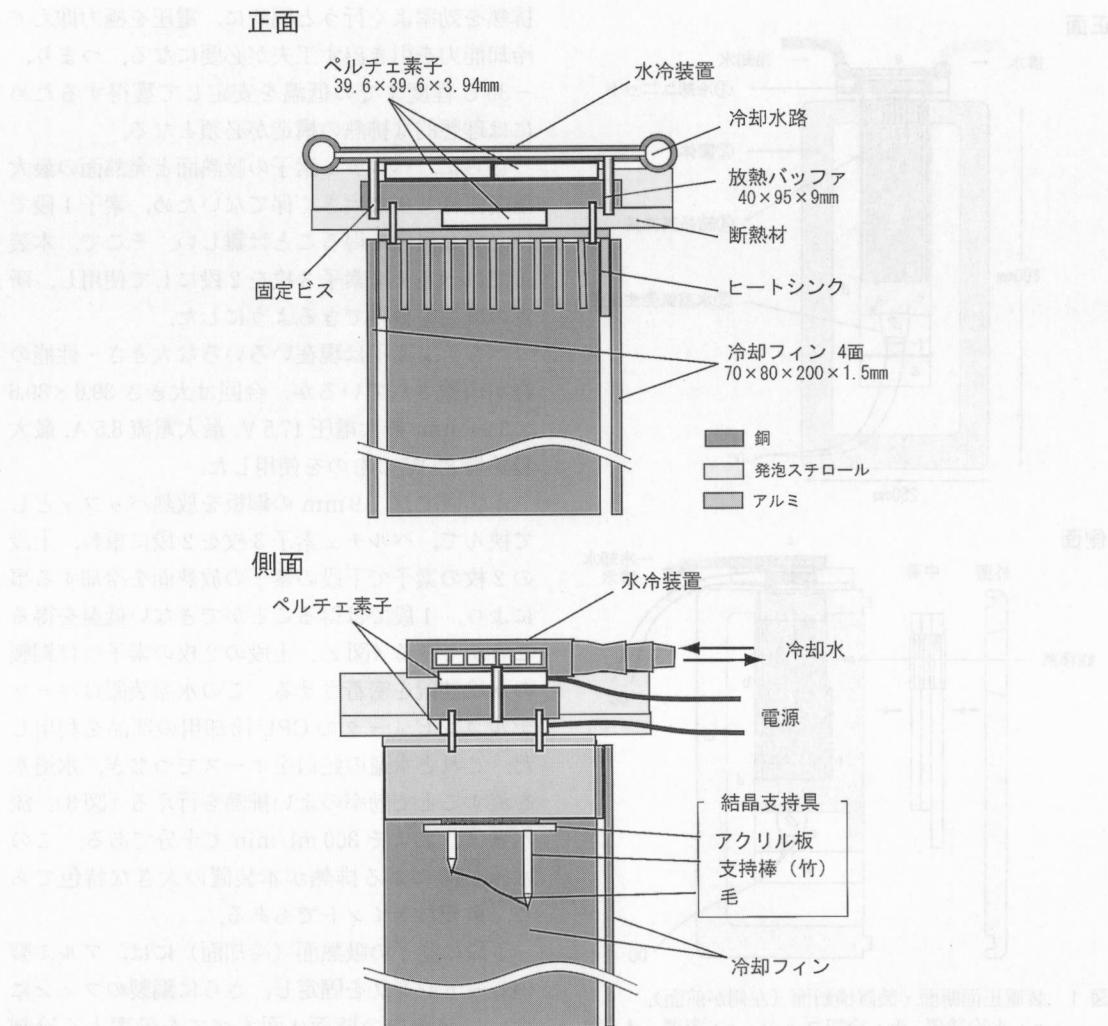


図 2 冷却ユニット断面と結晶支持装置の取付け.

Fig. 2 Vertical section of cooling unit.

2.2.2 筐体

筐体は一般に市販されている発泡スチロール製のクーラーボックスを利用し、さらに、断熱性を高めると同時に、不要な空間を作らないために、発泡スチロール材で不要な空間を埋めるようにした。この空間の下部には次に述べる図1の③に示した水蒸気発生装置を設置する。

そして、この筐体の上部に約10cm四方の穴を設け、図1に示した①の冷却ユニットを差し込む形で設置する。

この装置において、断熱性を維持した状態で、連続して雪結晶の成長の観察と写真撮影を行うた

めに、図1および図4のように、断熱構を持つ観察窓を装備したふたを取り付けた上で、さらに筐体のふたをする。

2.2.3 水蒸気発生装置

図1の②の筐体の空間下部には、水蒸気発生装置をおく。これは容器に水を入れ、この温度を変化させることができるようしたものである。本装置では、温度制御を簡単にするため、発熱体として固体抵抗を使い、ここに可変電源をつないで水温を変えることで、水面から発生する水蒸気量を変えるようにした。

また装置内での水蒸気発生装置の高さは、水蒸

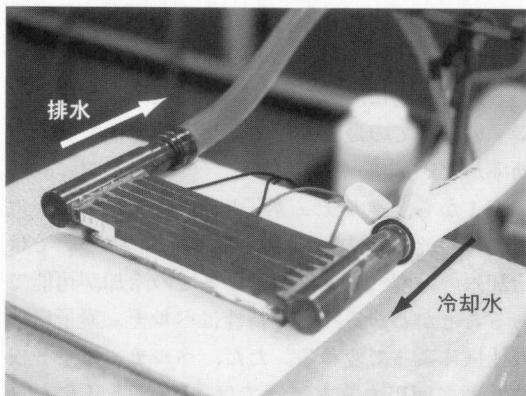


図 3 水冷装置と冷却水の流れ。

Fig. 3 Cooling unit and flow of coolant.

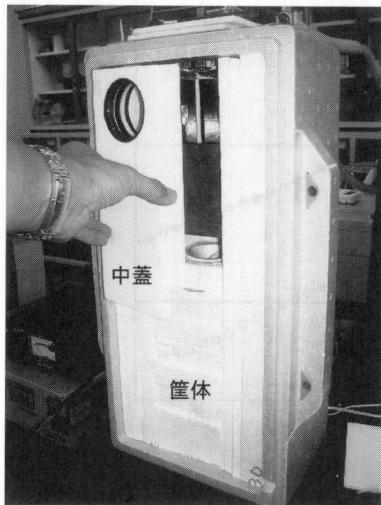


図 4 中間蓋の取り付けの様子。

Fig. 4 Observational window of the system.

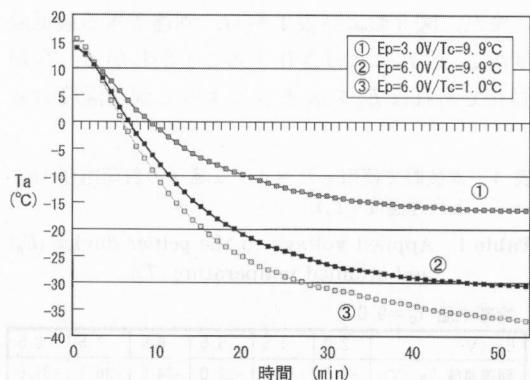
気発生装置下部の発泡スチロール板の高さを加減する事で調節できる。

2.2.4 結晶支持具

これは結晶が昇華・凝結するための毛を接着した結晶支持具である。アクリル板に竹製の支持棒を取り付け、支持棒の先端にウサギ等の毛を取り付ける。これを図 1 の①冷却ユニット下部にマジックテープで取り付けることにより、結晶支持具を簡単に交換し、何回でも続けて実験を行うことができる。(図 2)

2.2.5 温度モニタ

表面温度測定用のデジタル温度計により、水蒸

図 5 ペルチェ素子の負荷電圧 (E_p) と冷却水の温度 (T_c) による結晶生成領域の温度 (T_a) の時間変化の関係。Fig. 5 Relation between applied voltage (E_p), temperature of coolant (T_c) and attained temperature (T_a).

気発生装置の水温(以下, T_w), 結晶生成点の温度(同, T_a), および冷却フィンの温度(同, T_f)をモニタし, 各部の電圧を調節しながら装置内の温度と水蒸気量をコントロールする。(図 1)

3 実験の実際

3.1 水蒸気量と温度のコントロール

水蒸気発生装置の水温(T_w)はヒーターにより、また結晶生成点の温度(T_a)は冷却ユニットのペルチェ素子にかける電圧を調節することによって制御する。つまり、2カ所の電圧をコントロールするだけで、雪結晶の形を決定する2つの条件を得ることができる。しかし、 T_w を調節することにより、 T_a もそれに若干影響されて変化するため、両者を連動させて調整することが必要となる。

3.2 冷却特性

図 5 は、本装置のペルチェ素子に加える電圧(以下 E_p)と冷却水の温度(以下 T_c)による T_a の時間による変化を示す。また、表は T_c が 9.0°C の場合、 E_p の違いによって、結晶生成領域の最低到達温度 T_a がどのようになるか示したものである。

図 5 から、電源を入れて 50 分程度で T_a が最低温度近くに到達することがわかる。よって、本装置で結晶生成実験を行う際は、電源投入後、温度が安定した後、実験を始める。

また、図 5 および表 1 から、到達できる最低温度が E_p と T_c により変化することがわかる。 T_c が同じであれば E_p の大きさによって到達温度は変

表 1 本装置で使用したペルチェ素子の負荷電圧 (E_p) と到達温度 (T_a)。

Table 1 Applied voltage to the peltier device (E_p), and attained temperature (T_a).

冷却水温 $T_c = 9.0^\circ\text{C}$

E_p (V)	2.0	3.5	5.5	6.5	7.5	8.5
到達温度 T_a ($^\circ\text{C}$)	-9.5	-22.1	-32.0	-34.5	-36.1	-37.6
$T_c - T_a$ ($^\circ\text{C}$)	18.5	31.1	41.0	43.5	45.1	46.6

いずれも S.T.S 社 T150-85-127 を 3 枚使用時

化する。ただし、前述の通り電圧を上げると排熱量も大きくなるため、効率よい範囲で E_p を調節する。一般的に、ペルチェ素子に加える電圧は、素子の仕様での最大電圧のおよそ半分程度までが効率がよい。

表 1 から、ペルチェ素子に加える電流 E_p が大きいほど冷却能力が大きくなり、 $E_p = 8.5$ V では冷却水の温度 (T_c) -46.6°C までの冷却が可能であることがわかる。この特性はペルチェ素子自体の仕様によって変わる。ただ、ペルチェ素子 3 枚を並列に使用する本装置では、 $E_p = 8.5$ Vにおいて約 16 A の電流が必要であり、大電流で使用可

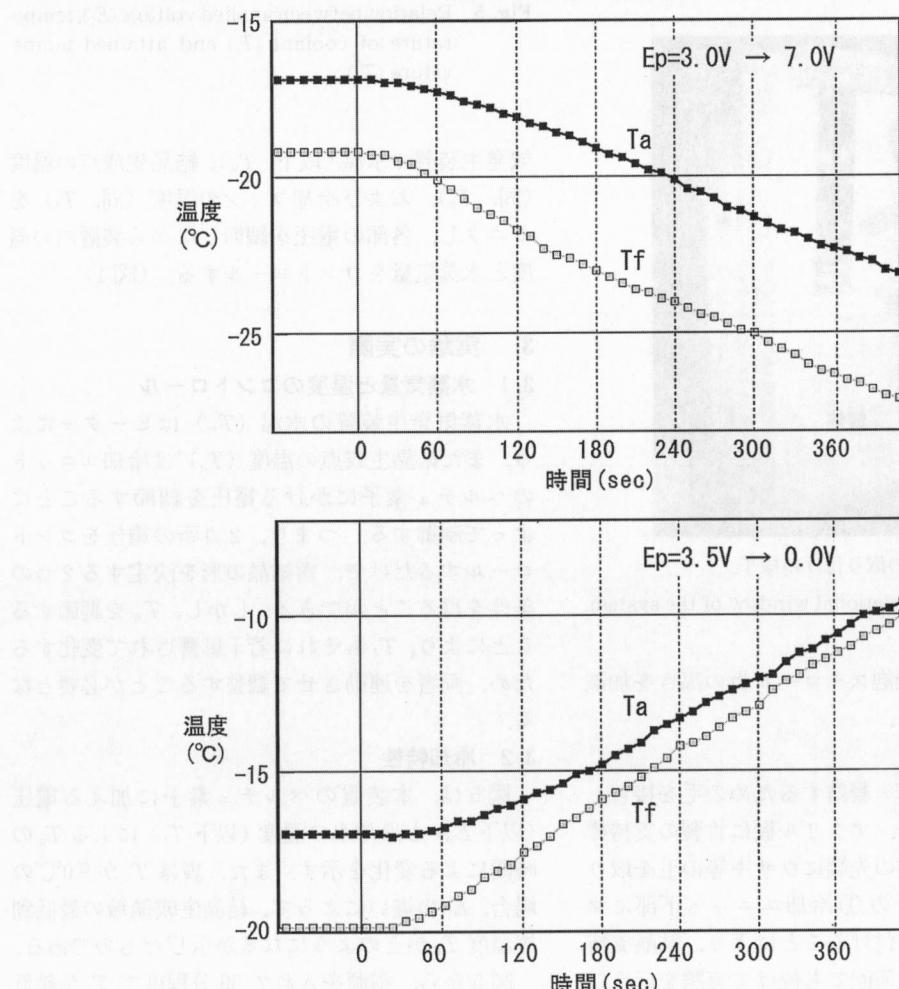


図 6 ペルチェ素子の負荷電圧 (E_p) を変化させたときの冷却フィン温度 (T_f) と結晶生成領域の温度 (T_a) の変化。

Fig. 6 Upper: relation between E_p and T_f , lower: relation between E_p and T_a .

能な直流電源が必要になる。

また、図5からは E_p が同じであれば、 T_c が低いほうが到達温度は低いこともわかる。本装置では $E_p=6.0\text{ V}$ の場合、 $T_c=1^\circ\text{C}$ と $T_c=9.9^\circ\text{C}$ では到達する T_a に約 6°C の差ができる。ペルチエ素子は温度安定性が良く、この E_p と T_c 2つの因子が安定していれば T_a は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 程度で安定する。

図6は本装置で結晶生成過程で E_p を変化させたときの結晶生成領域の温度 T_a 及び、冷却フィンの中央部の温度 T_f の変化である。図6より、 E_p を 3.0 V から 7.0 V へ変化させると、 T_f はおよそ $-1.3^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 T_a は $-1.0^\circ\text{C}/\text{min}$ で変化する。逆に、 $E_p=3.5\text{ V}$ から 0.0 V へ変化させるとしばらく遅れて、 T_f はおよそ $+1.4^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 T_a は $+1.2^\circ\text{C}/\text{min}$ の変化をする。これから、この装置では、例えば T_a を樹枝状結晶の生成条件から角柱結晶の生成温度条件へ4~5分で変化させることができることがわかる。

さらに、ペルチエ素子の特徴的な特性のひとつに、電流の向きを変えると、熱移動の方向も逆になることがある。すなわち、電流の向きを変えることにより、より短時間で急激に装置内の温度条件を変化させることも可能である。

3.3 付加装置

冷却ユニットによる冷却能力はペルチエ素子の発熱側からの排熱量に影響される。そのため、本装置では冷却水の温度により、到達可能な最低温度も影響を受ける。今回使用した水道水の場合、日変化は殆どないため、ペルチエ素子による冷却は安定している。

しかし、年間を通してみると、金沢市の場合、冬季水道水温は 10°C 程度であるが、夏季(8月)は 20°C を越える。そのため、上に述べたように、水道水を冷却水として用いる本装置では、夏季と冬季では最低到達温度が異なる。この対策として、夏季には冷却水そのものを冷却し、温度を安定させ、循環させるための2次冷却装置を取り付ければ、より一層安定した冷却温度を得ることができる。

図7は2次冷却装置を接続した状態の本装置である。この装置として、今回は鑑賞魚用の小型循環式クーラーを使用してみた。これにより冷却水温は常に $13.8\sim 14.2^\circ\text{C}$ に保たれ、安定した冷却が

可能になる。



図7 2次冷却装置を取り付けた装置。

Fig. 7 Whole system of producing the crystal.

4. 人工雪結晶の製作の結果

図8は本装置内で生成した雪結晶の様子である。雪結晶の形は結晶成長時の水蒸気供給量と結晶生成点の温度に大きく影響される。

本装置では、前述のようにペルチエ素子にかける電圧で T_a を、下部の水蒸気発生装置の固定抵抗にかける電圧で T_w をコントロールする。水蒸気発生装置で発生した水蒸気が対流によって結晶生成域へ運ばれ、温度が下がり、それぞれの温度と水蒸気量に応じた結晶が形成される。ここで、 T_w が高いほど結晶生成点の水分量が大きいことになるが、冷却フィンや、その周辺や装置の壁面に凝結するため、水蒸気発生装置で発生した水蒸気がすべて結晶生成域まで移動、結晶の成長に使われるわけではない。

次に本装置で得られた人工雪結晶の例を示す。

図9は順に樹枝状結晶、針状結晶、角柱結晶である。前述のように温度と供給される水蒸気量の条件を変化させて、自然の雪結晶と同様な結晶を人工的に作り出すことができる。またさらに温度と水蒸気量の条件を変えることにより角板、広幅六花、立体角板、厚角板などの結晶を作ることもできる。

本装置では、電圧の調整で結晶生成領域の温度 T_a と水蒸気の発生量を簡単に変化させることは先にも述べたが、この装置により、結晶の成長過程で両者を変化させ、その影響下で

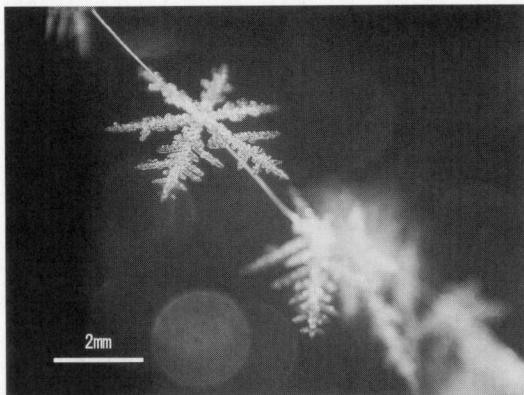


図 8 本装置により製作された人工雪結晶。

Fig. 8 Artificial crystals on the fiber.

の結晶の成長過程を観察をする事ができる。図 10, 図 11, 図 12 はその例である。

図 10a は $T_a = -16.5^{\circ}\text{C}$, $T_w = 6.8^{\circ}\text{C}$ で生成した樹枝状結晶であり、b はそこから $T_w = 2.8^{\circ}\text{C}$ へ変化させ 1 時間経過したものである。水蒸気量の減少とともに樹枝の先端が角板状に成長しているのがわかる。

図 11a は $T_a = -14.6^{\circ}\text{C}$, $T_w = 11.6^{\circ}\text{C}$ の条件で成長させた樹枝状結晶の枝の先端部分を横方向からみた物である。b はその後 $T_a = -9.0^{\circ}\text{C}$, $T_w = 18.0^{\circ}\text{C}$ に変化させ、3 時間経過したものであるが、樹枝状結晶の先端から c 軸方向へ結晶が成長している。

図 12 は同様に温度と水蒸気量を変化させて生成した結晶の例である。a は水蒸気量を変化させてできた樹枝付き角板結晶、b は生成条件を角柱結晶から、樹枝状結晶の生成条件へと変化させてできた鼓状結晶である。

このように本装置では、温度や水蒸気量に関して連続的に複雑な条件変化を再現することが可能であり、ほかにも T_a と T_w を変化させて多種の結晶を作り出す事ができる。

5. おわりに

これまで述べてきたように、本装置においては室内で簡単に温度・水蒸気量の条件を変化させて、さまざまな雪結晶を生成させることができ。今後、本装置内の気体の種類を変えて実験を行うなど、雪結晶成長に関する発展的な検証も可

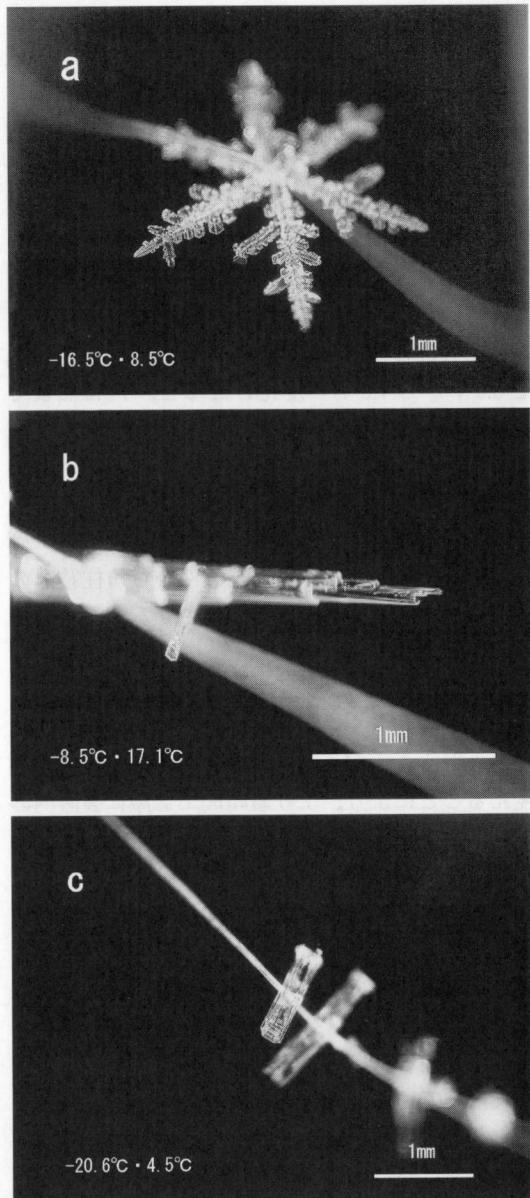


図 9 本装置により作成された種々の雪結晶。

a : 樹枝状 b : 針状 c : 角柱。

左下に表示した温度は、結晶生成点の温度(T_a)・水蒸気発生装置の水温(T_w)。

Fig. 9 Artificial snow crystal a : dendritic, b : needle, c : column.

能と考えられる。

また、本装置は小型で移動が簡単なため、水道さえあれば、小さな机程度のスペースで充分実験が可能である。さらに、主要部品と最低限の工具

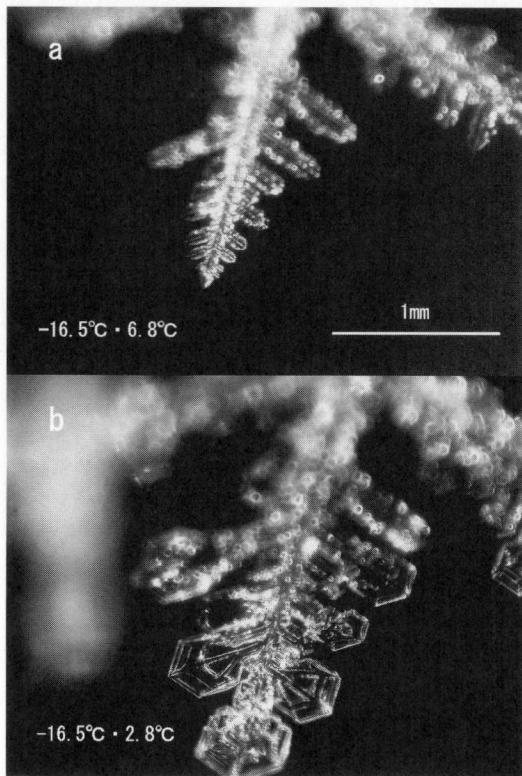


図 10 水蒸気発生装置の水温 (T_w) を変化 (降下)させたときの樹枝状結晶の成長形態。
a : 樹枝状結晶 b : 1 時間後の同結晶.

Fig. 10 a : dendritic b : 1 hour after.

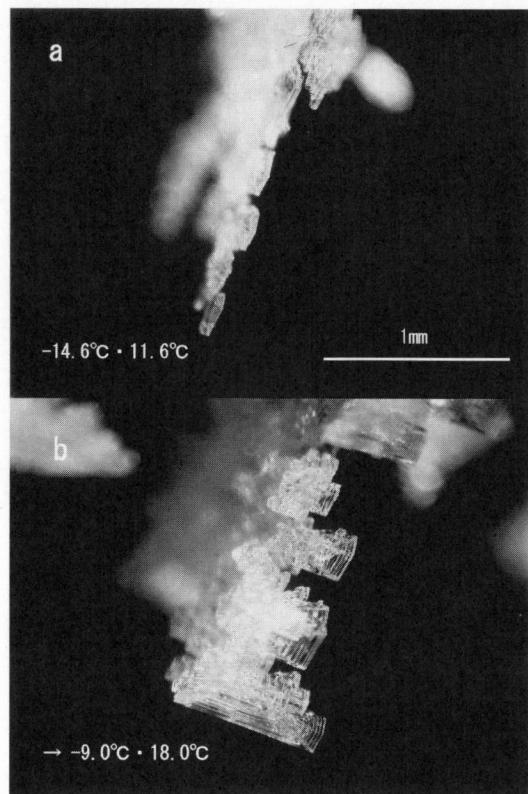


図 11 T_a と T_w の上昇による樹枝状結晶からの角柱状結晶の成長.
a : 樹枝状結晶 b : 3 時間後の同結晶.

Fig. 11 a : dendritic b : 3 hours after.

さえあれば、簡単に自作・改良もできる。つまり、従来大きな設備や費用が必要であった人工雪結晶の実験が誰でも簡単にでき、手軽に雪結晶を作ることができることから、研究や教育方面において実用が可能になるとを考えている。

たとえば、本装置を考案したねらいのひとつであるが、人工雪を室温で作ることにより、学校教育の中で生徒に実際に体験する場を与える、雪に対する科学的な興味・関心を喚起することがあった。日本海側の多雪地域の住民にとっては雪は身近な自然現象でありながら、学校教育において雪を科学的にとらえる機会はほとんどない。この装置により、季節に関係なく雪を科学的に見ることが可能になる。雪にふれる経験のあまりない地方でも、雪結晶を実際に見ることは大きな刺激になる。

反面、これからさらに研究を進めるに当たり、

本装置には課題も残されている。ペルチェ素子の特性上のメリットのひとつに精密な温度制御がしやすく、温度応答性がよいということがあげられ、素子表面の温度制御は 0.1°C 程度の精度で可能である。しかし、現状では電圧により T_a , T_w を制御しており、季節により、同じ電圧でも冷却水の温度が変化することで、装置内の温度は同一にならない。よって、温度制御にはある程度「慣れ」が必要になる。今後、温度調整器あるいはコンピュータ等を使用して、ペルチェ素子のコントロールを自動化し、直接温度制御できるようにすれば、上に挙げたような、ペルチェ素子の特性をさらに生かすことができると考えられる。それにより、装置内の結晶成長の条件をより一層安定させる事が可能になる。

また、ペルチェ素子は今回使用したものよりさ

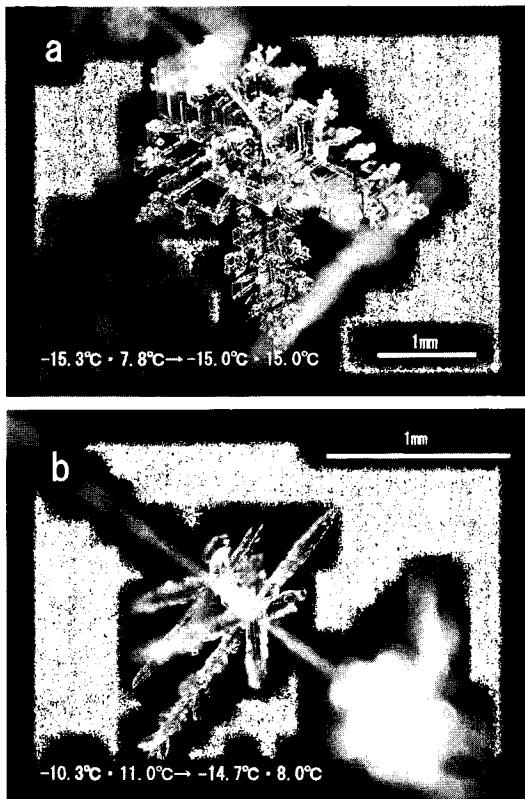


図 12 結晶の成長過程において、 T_w を変化させてることにより生成した雪結晶。

a: 樹枝付角板 b: 鼓。

Fig. 12 a : plate with dendritic extention,
b : column with dendritic crystal.

らに大型で最大吸熱量の大きなものも市販されており、それを使えばさらに効率よく、より低温までの冷却が可能になる。これらは今後の研究の課題であると同時に、この装置の発展の可能性が存在していると考えられる。

また、本文中に述べているように、水蒸気発生装置で発生する水蒸気量の指標として水温(T_w)を用いていたが、これは水蒸気量を定性的に扱うことになる。今後の課題として、水蒸気量を測定し定量的に示す必要がある。

謝 辞

本原稿は北見工業大学の亀田貴雄助教授から多くの御指摘、ご教授をいただいて作成されたものであり、ここに深く感謝の意を表します。また、本稿執筆に当たり、北海道教育大学岩見沢校の油

川英明教授、尾関俊浩助教授、北陸大学講師の竹井 嶽氏、加賀市中谷宇吉郎雪の科学館 神田健三館長、日本科学協会の山下晃氏からは多くの資料を提供していただきました。併せてお礼申し上げます。さらに 2 名の査読者には懇切丁寧に査読していただき、的確な指摘をいただきました。記して感謝いたします。

文 献

- 油川英明, 2005: 過冷却微水滴の結晶化による雪結晶の生成. 北海道教育大学紀要(自然科学編), 55 (2), 1-12.
- 遠藤浩司・大西 豪・関 光雄, 1998: 結晶雪観察を含めた複合化観察教材の開発. 第 14 回寒地技術シンポジウム, 475-478.
- 権田武彦, 1974: 雪結晶の成長に関する実験的研究. 気象研究ノート, 日本気象学会, 123, 95-117.
- 権田武彦, 1980: 気相からの氷の結晶成長. 結晶成長学会, 7, 197-214.
- Hallet, 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., A247, 440-453.
- 平松和彦, 1998: 室内で行う雪水実験. 第 14 回寒地技術シンポジウム, 479-482.
- 平松和彦, 2005: 雪の結晶をつくって観察する方法. 渡辺興亞編, 雪と氷の事典, 朝倉書店, 712-715.
- Hiramatsu, K. and Sturm, M. 2005: A simple, inexpensive chamber for growing snow crystals in the classroom, The Physics Teacher, 43, 23-25 (in press)
- 香川一郎・伊藤文雄・諫訪裕子・佐々木恭介, 2001: 雪の顕微鏡観察と人工雪生成実験. 雪水, 63, 385-396.
- 香川一郎・伊藤文雄・澤 大輔・佐々木恭介・服部浩之, 2003: 帯電したタンポポの毛を用いた人工雪生成実験. 雪水, 65, 29-32.
- Kobayashi, T., 1957: Experimental researches on the snow crystals habit and growth by means of diffusion cloud chamber. Jour. Meteor. Soc., 75th Ann., 38-44.
- 小林楨作, 1970: 雪の結晶 自然の芸術をさぐる. ブルーバックス, 講談社, 304 pp.
- 村井昭夫, 2004: 雲を見る・石川の空を知る. 石川県教育センター研究紀要, 第 72 号, 石川の自然, 27 集, 地学編 (13), 37 pp.
- 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究—結晶の形態とその生成—. 岩波書店, 161 pp.
- Takahashi, T., T. Endoh, G. Wakahama and N. Fu-

kuta, 1991: Vapor diffusional growth of free-falling snow crystals between -3 and -23°C , J. Meteor. Soc. Japan, **69**, 15–30

山下 晃, 1974 : 大型低温箱を使った氷晶の研究. 気象研究ノート, 日本気象学会, 123 号, 47–94.

Development of an artificial snow crystal production system using a convection chamber with a Peltier device

Akio MURAI¹⁾

1) Ishikawa Prefectural Institute for Educational Research In-Service Training
u 31-1, Takao, Kanazawa, Ishikawa, 921-8153

Abstract: The artificial snow crystallizing system introduced in this study works on the basis of the Peltier effect. By using a multiplexed Peltier device combined with water cooling system and foam polystyrene as an insulator for the casing, the air temperature can be controlled to -30°C . In addition, conditions such as temperature and vapor can be easily varied using a voltage controller. Further, the device is easy to manufacture, has a relatively small form factor, and is easily transportable. This device outperforms the traditional convection or diffusion types of snow crystallizing systems because it does not require the construction of a special low-temperature laboratory or the installation of complex equipment to cool the air using refrigerants.

In this paper, the basic principles and mechanisms of this device are presented along with pictures of the snow crystals produced by this system.

(2005 年 1 月 20 日受付, 2005 年 4 月 14 日改稿受付, 2005 年 5 月 30 日再改稿受付, 2005 年 5 月 30 日受理,
討論期限 2006 年 1 月 15 日)