

ペルチェ素子を用いた霧箱の開発

(理科教育講座・物理学教室) 中本 剛

(愛媛県立三島高等学校) 坪根 虎汰

Development of the cloud chamber by using Peltier modules

Go NAKAMOTO and Kota TSUBONE

(2023年9月1日受付、2023年11月28日受理)

抄録：The cloud chamber for observation of passage of ionizing radiation has been developed by using Peltier modules instead of usually used dry ice. Two Peltier modules with different sizes are stacked on a heat sink. Then the heat sink is cooled by ice water to remove the heat generated by the lower plane of the stacked Peltier modules. The temperature of around -40°C at the upper plane of the stacked Peltier modules is obtained and kept for about 10 min. Ceramic balls including Radium are used as a radiation source. The passage of radiation for α and β rays can be observed clearly by the cloud chamber developed in this study.

キーワード：霧箱 (Cloud chamber), ペルチェ素子 (Peltier module), 放射線 (Radiation)

1. はじめに

1-1 放射線観察・測定装置

放射線に関する実験装置として挙げられるのが、放射線の軌跡を観察してその存在を認識させる霧箱や、放射線の強度を定量的に計測する放射線測定器である。後者は放射線を定量的に測定できるという利点を持つが、自作するのは難しく、価格も高価なため、多くの学校現場で導入するのは難しいと考えられる。前者の霧箱に関しては、ドライアイスや寒剤として使用するタイプであれば、比較的簡単に自作できて、その費用も安価である。ただし、冷却に使用するドライアイスを実験の度に購入しなければならないというデメリットが存在する。

霧箱に関しては、このデメリットを改善するために、これまで様々な装置の開発が行われてきた。袖木、尾関、田口らは、市販の融雪剤を氷に混ぜることで、ドライアイスが無くても実験できる霧箱を開発している¹⁾。ただし、融雪剤が机や床にこぼれた際の掃除の手間や予め氷をシャーベット状にして融雪剤と十分に混合しておく必要があるなどの課題もある。融雪剤や氷などの寒剤を全く使用しない霧箱として、ペルチェ素子(熱電変換素子)を用いた霧箱がある^{2,3)}。秋吉の開発した装置³⁾では、ペルチェ素子の放熱にPC用の冷却ファンを用いているため、電源さえあれば、いつでもどこでも使用できるという利点はあるが、素子を駆動するための高圧電

源ユニットや冷却ファンを用いているために高価である。演示用には十分であるが、学校等で児童・生徒一人一人に実験させることは難しい。ペルチェ素子を用いた同様の霧箱は、教材会社からも販売されているが、その価格が10万円を超えるなど非常に高価である。安価なペルチェ素子霧箱として、高辻、芝原、山口らは、PC用のUSB給電ユニットを電源にしたペルチェ素子と氷で冷却を行い、反対側を熱湯で加熱する霧箱を開発している⁴⁾。ペルチェ素子と氷を併用することで、ドライアイス霧箱のような事前準備を必要とせず、かつ従来のペルチェ素子霧箱より価格を抑えることに成功している。ただし、その装置の組み立ての複雑さや熱湯の使用によるやけど等の危険性を伴う。

1-2 本研究の目的

そこで、本研究では、1. 安価であること、2. ドライアイスの代わりにペルチェ素子を用い、放射線の軌跡を観察するのに十分な性能を有すること、3. 構造がより簡単であり、児童・生徒が容易かつ安全に実験できること、の3点を満たす霧箱の開発を目的とした。

2 装置の開発

2-1 霧箱の原理

霧箱とは放射線の軌跡を観察する実験装置である。図1に霧箱の原理を示す。霧箱の本体は、エタノールを染み込ませたスポンジを上部に取り付けた密閉容器である。室温に置かれたエタノールは蒸発し、気体となって容器下部へ移動する。容器下部を冷却することで、容器内に温度勾配が誘起され、容器下部にエタノールの過飽和層が形成される。このエタノール過飽和層に放射線が入射すると、放射線の電離作用により、空気中の気体分子がイオン化する。それを核としてエタノールが凝縮して放射線の軌跡に沿った雲が発生し、間接的に放射線の軌跡を観測することができる。霧箱で重要なのは、容器内部に温度勾配を作るために、容器下部を十分に冷却することである。従来の霧箱では、一般的に寒剤としてドライアイスが用いられてきた。

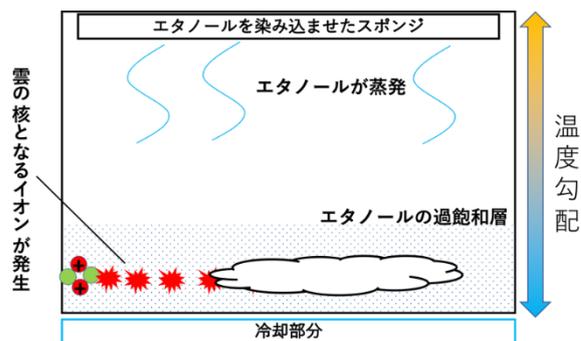


図1 霧箱の原理

2-2 ペルチェ素子の性能実験と最適条件の決定

霧箱で放射線の軌跡を観察するために必要な低温は、秋吉によると、 -30°C 前後とされている²⁾。まず、ペルチェ素子でこの低温を得るために必要な条件を決定する実験を行った。

使用したペルチェ素子は、Thermonamic Electronics社製の30mm角TES1-12739と40mm角TEC1-12708である。

図2に実験装置の概略図を示す。洗面器に氷を入れ、その上にヒートシンクを水平になるよう設置した。このヒートシンクに、良好な熱接触が得られるよう水で濡らして、ペルチェ素子を載せた。素子の上面中央に、直径0.76mmのアルメルクロメル熱電対の接点を置き、同様に素子との十分な熱接触が得られるよう水を一滴たらして、その上にステンレス板を載せて固定した。ペルチェ素子は直流電源装置から電流を供給することで温度を制御した。熱電対は、デジタルマルチメーターに繋ぎ、その起電力を測定し素子上面の温度を求めた。

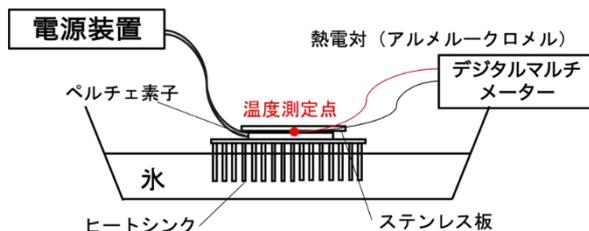


図2 ペルチェ素子の性能実験装置の概略図

図2のように実験装置を組んだ後、ペルチェ素子が熱平衡に達したら、電源装置の電源を入れて、10分間一定の電流を素子に供給した。通電中は、15秒毎に熱電対の電圧を測定し、素子上面温度の

時間依存を調べた。1回の測定が終わる度に、氷を補充して素子が熱平衡に戻ってから次の測定を開始した。このような実験を、電流値やペルチェ素子の種類や枚数を変えて行うことで低温生成の最適条件を探った。

図3に30mm角ペルチェ素子における通電時間に対する素子上面中央温度の変化を示す。2.5A以上の電流を流したとき、-30℃以下の低温が得られることが判る。ただし、電流値を3.0A以上になると、一時的に温度は下がるものの、時間経過とともに温度上昇や温度のばらつきが生じている。この温度上昇の原因として、大きな電流を供給した場合、ペルチェ素子下面で生じる熱をヒートシンクを介した氷では取り切れず、熱が素子下面から上面へと逆流したためと考えられる。また、素子の内部抵抗が温度により変化するため、素子を流れる電流値が変化して温度のばらつきが生じたと考えられる。

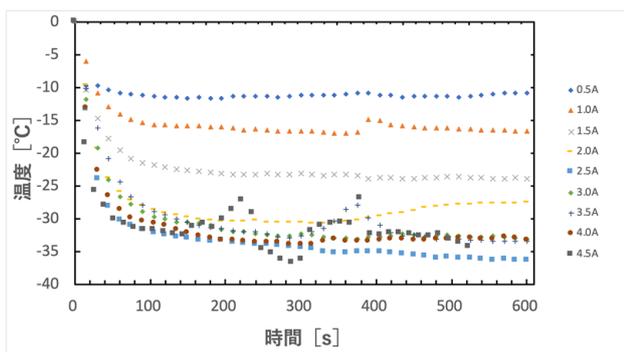


図3 30mm角ペルチェ素子の様々な電流値に対する冷却側温度の時間変化

このような排熱の問題を解決するためには、さらに冷却能力が高い、より大型のペルチェ素子を利用すればよい。そこで、30mm角と40mm角のペルチェ素子を二段重ねにして、30mm角素子下面の熱を40mm角の素子で取り除くことを試みた。二段重ねした素子を用いた実験方法は、上述の方法と同様である。ただし、2台の直流電源装置をそれぞれの素子に接続して、電流値を独立に制御しながら実験を行い最適条件を調べた。

図4に30mm角と40mm角のペルチェ素子を二段重ねした場合の、様々な電流値における通電時間に対する30mm角素子上面温度の変化を示す。

実験したどの電流値の組み合わせでも-30℃以下の低温を10分間安定して得ることができた。最も低温が得られたのは、30mm角素子に2.0A、40mm角素子に3.5Aを通電したときで、10分経過時で約-47℃であった。

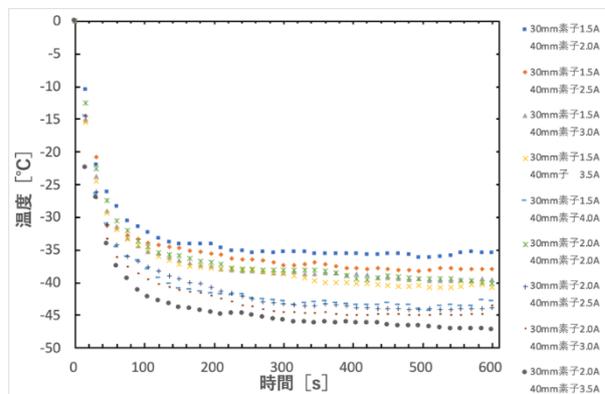


図4 30mm角と40mm角ペルチェ素子を二段重ねした場合の様々な電流値の組み合わせに対する冷却側温度の時間変化

2-3 ペルチェ素子を用いた霧箱の作製

前述したように、放射線の観測に必要な-30℃以下の低温は、2つの大きさの異なるペルチェ素子を2段重ねにすることで得られることが判ったので、それを用いた霧箱の作製を行った。

2-3-1 電源装置

性能実験では、それぞれの素子へ供給する最適な電流値を調べるために、2台の直流電源装置を用いたが、なるべく安価で簡便にするために、電源装置1台で2つのペルチェ素子を駆動するように、図5に示す回路図の電源分配ボックス(図6)を作製した。電子レンジ対応容器の側面に、電源装置とペルチェ素子を接続するための端子を固定する穴を開け、そこにバナナプラグのメスを取り付けた。回路図に示すように、電源側の端子にそれぞれのペルチェ素子を並列接続した。

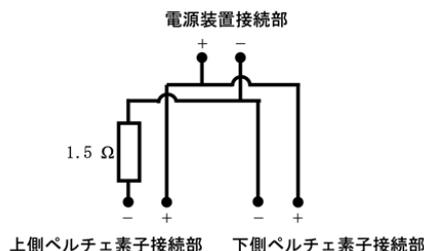


図5 電源分配ボックスの回路図

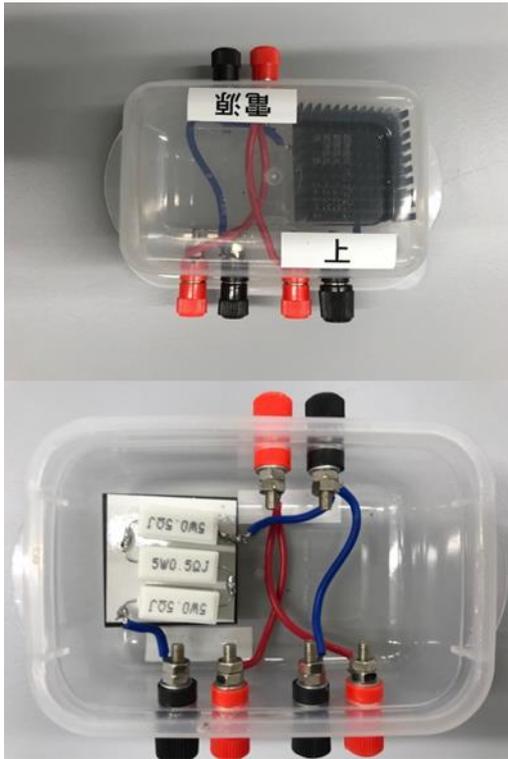


図6 作製した電源分配ボックス

30 mm 角素子に流れる電流を 40 mm 角素子のそれよりも抑えるため、合計 1.5 W のセメント抵抗を 30 mm 角素子の配線内に入れた。このセメント抵抗にはヒートシンク (40×40×10 mm) を貼り付けて放熱できるようにした。

2-3-2 冷却部分と霧箱本体の作製

図 7 のように、30 mm 角素子を上段に、40 mm 角素子を下段に配置して瞬間接着剤で固定した。接着の際は、素子間の良好な熱接触を実現するため、接着面の隙間が無くなるよう指で強く押さえた。次に、素子を電源ボックスに接続するために、それぞれの素子のリード線にバナナプラグを取り付けた。

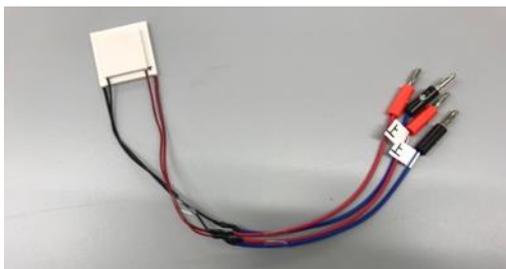


図7 30 mm 角と 40 mm 角素子を二段重ねした冷却部分

さらに図 8 に示すように、洗面器に氷を入れて、その上にアルミニウム製のヒートシンク (100×100×18 mm) を水平になるよう載せた。さらにその上に 2 段重ねのペルチェ素子を 30 mm 角素子が上になるよう載せた。

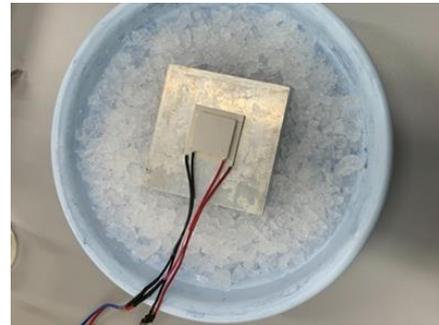


図8 ヒートシンクに載せた二段重ね素子

次に、図 9 に示すように、放射線の軌跡の観察がしやすいよう片面に黒いビニルテープを貼り付けたステンレス板を 30 mm 角素子の上に載せた。ヒートシンクとステンレス板を素子に接触させるときは、熱接触を良好にするため接触面を水で濡らしてから重ねた。

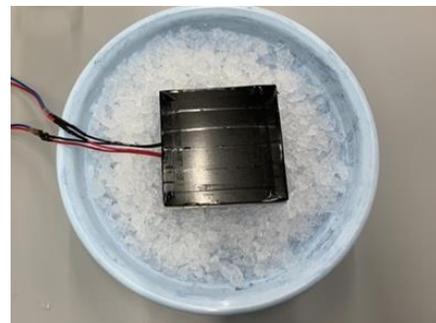


図9 二段重ね素子に被せた黒いビニルテープを貼ったステンレス板

最後に、図 10 に示すように、作製した冷却部分を電源分配ボックスを介して電源装置に繋げた。



図10 電源装置に繋げた冷却部分

霧箱の本体には図 11 のようなコレクションケースを利用した。ケース上部に隙間テープを貼り付け、そこにエタノールを染み込ませた。放射線源には、市販の入浴用ラジウムセラミックボールを利用した。黒いビニルテープを貼ったステンレス板の上に、30 mm 角の冷却部分を囲むようこの放射線源を配置し、LED ライトで観察面を照らして電源装置をオンにすれば準備完了である。



図 11 作製したペルチェ素子霧箱の全体図

図 12 にこの霧箱で観測した放射線の軌跡を示す。太く直線的な α 線と考えられる軌跡が明瞭に観測できていることが判る。このときの、電源装置の電圧は 4.6 V、電流は 3.6 A であった。これ以上電圧と電流の値が小さいと観測できなかった。



図 12 作製した霧箱で観測した α 線の軌跡

2-4 霧箱の改良

これまで述べてきたように、開発した霧箱で放射線の軌跡を観測することができた。学校現場等でより安全にかつ簡便に使用できるよう更なる改良を加えた。

2-4-1 電源装置

電源として使用した直流電源装置は、その価格が数万円程度と高価であり、クラス単位で児童・生徒を対象に実験を実施する場合は、その準備が難しいことも予想される。開発した霧箱で放射線の軌跡を観察するためには、電源電圧として 5 V 程度あれば十分であることが判った。ただし、3 A 程度の電流が必要である。そこで、市販の定格電流値が大きい携帯電話用の急速充電用 USB 電源ポートを用いることにした。図 13 に示すように、二段重ねしたペルチェ素子のリード線に USB ケーブルをはんだ付けし、USB 電源ポートに接続することで、100 V の家庭用コンセントさえあれば使用可能となった。



図 13 USB ケーブルを取り付けた二段重ね素子

2-4-2 その他の改良箇所

観察面として使用したステンレス板は、比較的加工が難しく、加工後も切り口が鋭く児童・生徒が怪我をする危険性もある。また、金属は、熱伝導が優れているという利点はあるが、金属板全体が冷えるまで温度が安定しないこと、また、熱伝導が優れている故、外からの熱流入も無視できない。そこで、ステンレス板の代わりに加工が容易な厚み 1.2 mm のプラスチック板を用いることにした。図 14 のように、プラスチック板の中央を 30 mm 角の素子が入るよう切り抜き、片面に黒いビニルテープを貼った。切り抜いた部分に貼られたビニルテープによってペルチェ素子上面に貼り付けた。これにより、上面の素子サイズ 30 mm 角の領域のみ局所的に冷却することができるようになり、電源を入れてから 1 分以内で放射線の軌跡の観察が可能となった。

さらに、洗面器の代わりに小型のバットを使い、

これに伴ってヒートシンクも小型の物を使用して装置全体の小型化を図った。改良後の装置の概略図を図 15 に示す。ヒートシンクの小型化に伴い、放熱効率を上げるために、冷却には氷水を用いた。

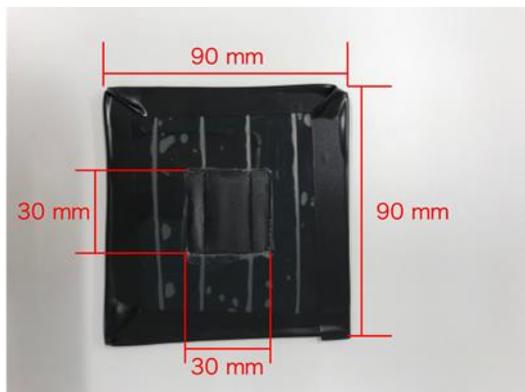


図 14 プラスチック板で作製した観察面

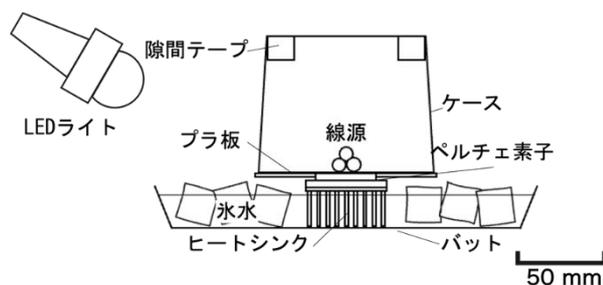


図 15 改良後の装置の概略図

2-4-3 作製費用

表 1 に USB 電源を利用したペルチェ素子霧箱の作製に要した材料とその価格を示す。多くの材料は、100 円均一ショップで購入可能であり、1 台当たり約 3000 円で作製可能である。

表 1 霧箱作製に必要な材料とその価格

材料 (購入費用)	1 台分の費用
ペルチェ素子 TES1-12739 (880 円)	880 円
ペルチェ素子 TEC1-12708 (770 円)	770 円
アルミ製ヒートシンク (220 円)	220 円
無水エタノール 500ml (1650 円)	33 円
AC 充電器 USB ポート (550 円)	550 円

円)	
USB-A 充電ケーブル (110 円) ×2	220 円
コレクションケース (110 円)	110 円
お料理バット 3 個入り (110 円)	36 円
プラスチック板 (110 円)	7 円
隙間テープ (110 円)	5 円
黒ビニルテープ (110 円)	4 円
LED ライト (110 円)	110 円
合計	2,945 円

3 放射線の軌跡の観察

線源として用いた入浴用のラジウムラミックに含まれるラジウムは、放射性崩壊に伴い α 線を、また、崩壊後の子孫核種から β 線を発生する。

図 16 と 17 に観測した α 線と β 線の軌跡をそれぞれ示す。いずれも明瞭にその軌跡が観測できていることが判る。電源を入れて 20 秒程度で観測できるようになった。また、氷が溶けて観測不能になるまでの時間は約 20 分であり、観測時間としては十分と考えられる。



図 16 α 線の軌跡



図 17 β 線の軌跡

さらに、本研究で開発したペルチェ素子霧箱とドライアイス霧箱の比較を行った。両者の比較では、冷却部分を変えただけで、その他の部品や条件は全く同一である。図 18 と 19 にペルチェ素子霧箱とドライアイス霧箱で観測した放射線の軌跡をそれぞれ示す。どちらの霧箱も観測される放射線の軌跡は変わらず、今回開発した霧箱はドライアイス霧箱と同等の性能を持つことが判った。



図 18 ペルチェ素子霧箱で観測した α 線の軌跡



図 18 ドライアイス霧箱で観測した α 線の軌跡

4 まとめ

本研究では、児童・生徒が安全かつ簡便に使用できる霧箱の開発を行った。電源として USB 電源ポートを利用し、冷却に二段重ねのペルチェ素子を用いることで、 -30°C 以下の低温を容易に生成できた。装置を簡単な積層構造とすることで、児童・生徒にとっての組み立て易さと取扱い易さも実現した。霧箱としての性能も、ドライアイスを用いた霧箱の性能と比べて遜色無いことが判った。さらに、作製費用も 1 台当たり 3000 円と非

常に安価である。この開発した霧箱を用いて、ジュニアドクター育成塾やグローバルサイエンスキャンパス等で小中高生向けの科学講座や課題研究指導を実施し、その有用性についても実証されている。

参考文献

- 1) 柚木朋也、尾関俊浩、田口哲：融雪剤を用いた簡易霧箱の開発 物理教育 63-1 (2015) 35-38.
- 2) 佐伯友美、関谷圭右、竹本翔太、津田謙太郎、向平和、隅田学、中本剛、大橋淳史、熊谷隆至、日詰雅博、中村依子、佐野栄：大学院生による「理科観察実験プログラム」における実践事例 2—ペルチェ素子を用いた霧箱に関する教材研究— 愛媛大学教育実践総合センター紀要 32 (2014) 41-49.
- 3) 秋吉優史：ペルチェ冷却式高性能霧箱製作のための要素技術 日本放射線安全管理学会誌 16-2 (2017) 79-84.
- 4) 高辻舞華、芝原寛泰、山口道明：ペルチェ素子を用いた簡易な霧箱の教材化と授業実践—放射線の透過性について理解するための授業展開の提案— 京都教育大学教育実践研究紀要 18 (2018) 21-28.