

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—

高辻 舞華¹・芝原 寛泰²・山口 道明³

(京都府立洛北高等学校・京都教育大学名誉教授・京都府立桃山高等学校)

Development of a Compact Cloud Chamber Using a Peltier Element as a Teaching Material and Report of Class on Experiments — Proposal of Class Plan to Understand the Penetrability of Radiations —

Maika TAKATSUJI¹, Hiroyasu SHIBAHARA², Michiaki YAMAGUCHI³

Kyoto Prefectural Rakuohku High School¹, Emeritus Professor of Kyoto University of Education², Kyoto Prefectural Momoyama High School³

2017年11月30日受理

抄録：霧箱の実験は、理科教科書で広く取り扱われており、放射線についての学習では代表的な実験のひとつである。霧箱に必要な寒剤として、融雪剤や保冷剤を用いた教材が開発されるなど、学校現場において導入するための工夫がなされている。しかし、寒剤の混合や冷凍に手間がかかることが問題点として挙げられる。本研究では、寒剤の事前準備が不要で、低電圧で冷却可能なペルチェ素子を用いた小型の霧箱を開発した。ペルチェ素子の発熱側を循環した氷水につけ放熱し、さらに霧箱の観察槽上部を携帯カイロの材料で保温することにより、一定の温度差を観察槽内につくり、継続的な放射線の飛跡の観察が可能となった。また、線源としてラジウムセラミックボールを用いることにより、 α 線及び β 線の飛跡が観察できた。

開発した実験教材を用いて、2人1組の個別実験の形態で授業実践を行ったところ、高校生でも十分に実験操作が可能であり、 α 線及び β 線の飛跡が観察できることがわかった。また、線源の位置と容器の遮蔽による飛跡の見え方の違いから、放射線の透過性について考察できることも明らかになった。

キーワード：霧箱、ペルチェ素子、放射線、透過性、個別実験

I. はじめに

高等学校学習指導要領解説理科編¹⁾では、放射線に関する実験・観察の例に、霧箱による実験が記載されている。霧箱は、蒸気の凝結作用を利用して、放射線の飛跡を検出する装置であり、目に見えない放射線を視覚的に捉えることができる。

霧箱の実験について、現行の「高等学校物理」^{2,3)}の教科書では、冷却にドライアイスを用いた方法が主に記載されている。しかし、ドライアイスは準備や保存の点において制約が多いため、ドライアイス以外の寒剤を用いた霧箱が数多く報告されている。例えば、鎌田・窪田⁴⁾は、保冷剤を用いた霧箱を開発している。この報告では、融点が -18°C の保冷剤により冷却しているが、観察槽上部を湯で保温することによって、観察槽内に十分な温度勾配を作り、約20分間の飛跡の観察を可能としている。また、柚木・尾関・田口⁵⁾は、市販されている融雪剤には、約99.4%の $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ が含まれていることに着目し、それを用いた霧箱を開発している。結果、15分間、明瞭な飛跡の観察を可能にしている。これらの霧箱は、保存が容易な寒剤を用いている点において優れているが、生徒実験において、観察時間が延長されることを想定すると、寒剤の冷凍や混合に手間がかかることが課題である。

小田部・谷⁶⁾は、空冷により放熱したペルチェ素子を用いることにより、長時間の観察が可能な霧箱を開発している。しかし、実験器具の構造が複雑であり、学校現場における生徒実験では再現が難しいと考えられる。ま

た、ペルチェ素子を用いた霧箱は、教材会社からも市販されているが、生徒全員が観察できる台数を用意するためには高額のコストがかかる点が課題である。本研究では、冷却にペルチェ素子を用いて小型かつ安価で、簡易な実験方法で、飛跡が観察可能な霧箱を開発することにより、以上の課題を解消することを図った。

霧箱を用いた実践研究では、生徒の放射線に対する興味関心の向上や、放射線に対するイメージの深化を促す効果があることがすでに報告されている⁷⁾。しかし、本研究では、放射線を視覚的に捉えることのできる霧箱の特徴を生かし、放射線についての知識・理解を促進することをねらいとした。森本・松本⁸⁾は、中学生を対象に、霧箱の観察において、線源の周囲に紙をついたて状に立て、 α 線が遮断される様子の観察を実施している。この実践は、 α 線は透過性が小さいことを実感させる上で有効な方法であるが、 β 線が透過する様子の観察ができていないことが問題点として挙げられる。そこで、本研究では、開発した霧箱を用いた、 α 線と β 線の両方の飛跡の観察から、放射線の透過性について考察する授業展開を考案し、高校生を対象にした授業実践を通してその有効性を検証した。



図1 市販のペルチェ素子の概観
(素子部分 40 mm 角)

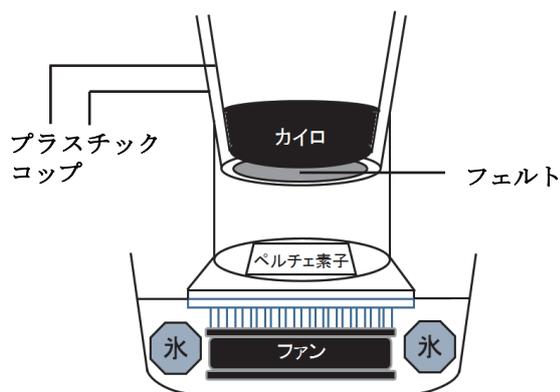


図2 実験器具の全体

II. 教材開発

1. 実験器具

実験器具とその作製方法について述べる。本実験器具では、水冷により放熱したペルチェ素子(図1)を冷却に用い、さらに、携帯カイロの材料により霧箱の観察槽上部の保温を行った。また、線源にラジウムセラミックボールを用いて、 α 線・ β 線の両方の飛跡の観察を試みた。図2に実験器具の全体を示す。

1) ペルチェ素子を用いた冷却装置

図1に示すペルチェ素子は、素子部分により様々な大きさのものが市販されているが、本実験器具では、価格を考慮して、40 mm 角の素子を使用した。ペルチェ素子の放熱効率を上げるため、アルミ製の放熱フィン(60×76×15 mm)を、6 W/mK の熱伝導性グリスを介し発熱側に取り付けた。また、高さ調節のため、コルクシート(1 mm 厚)を2枚重ね、ペルチェ素子の周りを囲うように貼った。さらに、放熱フィンを冷却ファンで循環した氷水につけた。容器(11×11×4.5 cm)には、3.5 cm 角の氷を5個入れた。結果、ペルチェ素子の冷却側の温度を約 -24°C で30分間、一定に保つことができた。この時、電源としては冷却ファンには9 V 電池(6P)、ペルチェ素子には5 V USB 電源⁹⁾を用いた。図3に冷却装置の全体を示す

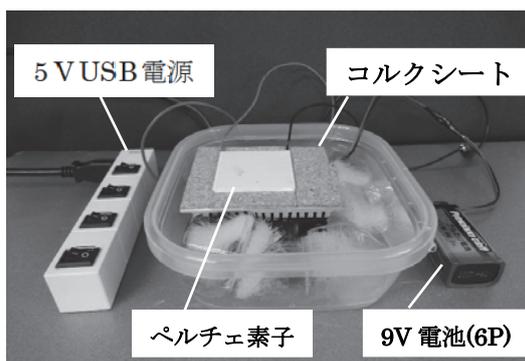


図3 冷却装置の全体

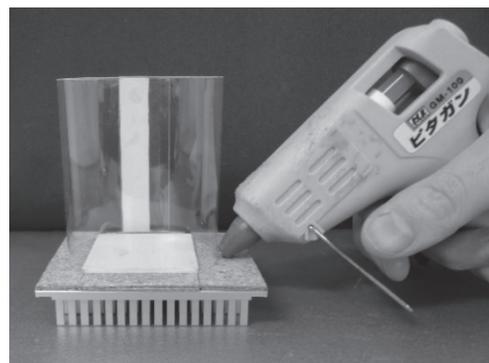


図4 観察槽を接着している様子

2) 観察槽と保温装置

透明度が高いプラスチック板 (0.35 mm 厚) を 7.0×20 cm に切り出し、ペルチェ素子の対角線と同じ直径の筒状にして両面テープで留め、観察槽を作製した。その観察槽の底部を冷却装置にホットボンドを用いて接着した (図 4)。

前述の鎌田・窪田の報告⁴⁾では、観察槽上部を湯で保温することによって、観察槽内に十分な温度勾配を作り飛跡の観察を可能にしている。本実験器具では、より長時間の保温を可能にするため携帯カイロの材料を用いた。観察槽の上部に、底にフェルトを貼ったプラスチックコップを乗せ携帯カイロの材料 20 g を入れたプラスチックコップをさらにその上に重ねた。

観察の際は、フェルトにシャーレ中の無水エタノールをつけたプラスチックコップを観察槽上部に乗せた (図 2)。プラスチックコップを 2 重にして、エタノールの過剰な蒸発により飛跡の観察が阻害されることを防いだ。

3) 線源

山本¹⁰⁾は、人工的なラドン温泉の元であるラジウムセラミックボールが、霧箱の線源として利用できることを報告している。ラジウムセラミックボール RE45 (セラミック&鉱石本舗) には、ウラン系列及びトリウム系列の放射性物質が微量に含まれており、 α 線及び β 線が放出されている。

本研究では、このラジウムセラミックボールを、黒いプラスチック板に接着剤を用いて 3 個並べて貼り付けたものを線源として使用した (図 5)。

作製した線源の安全性を確かめるために、ガイガーカウンター (GAMMA-SCOUT) を用いて、線源から 5.0 cm のところで 1 時間のパルス測定を行った。測定している様子を図 6 に示す。

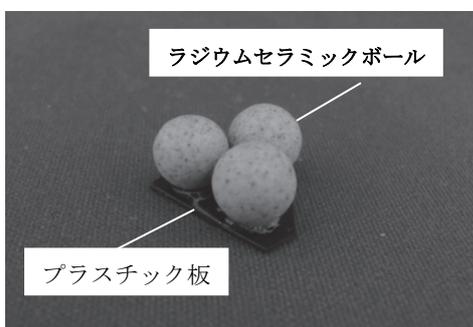


図5 線源

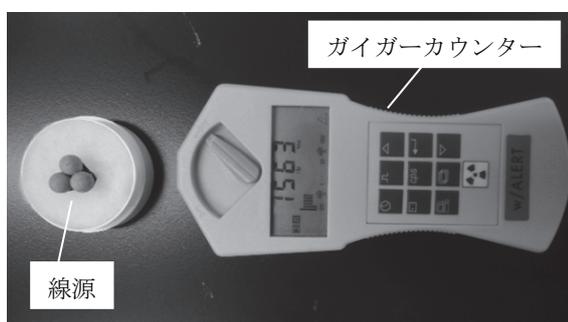


図6 線量を測定している様子

以上の方法で測定した結果、ラジウムセラミックボールの線源の線量は 0.43 Bq を示した。同様の方法で、教材用の閃ウラン石の線量を測定したところ、1.3 Bq を示した。以上の結果から、ラジウムセラミックボールを用

いた線源は、教材用として安全に使用可能と考えられる。

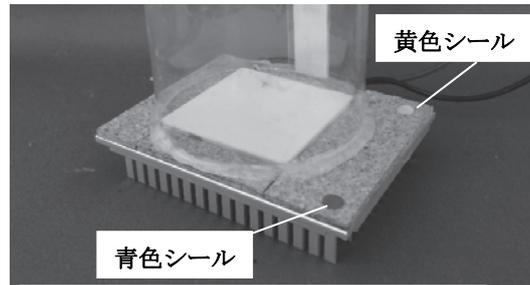


図7 設置位置を示すカラーシール

4) 線源と LED ライトの設置位置

霧箱の実験においては、観察槽に向けて LED ライトの白色光を照射するが、これはエタノールの液滴が光を散乱する効果を利用して、飛跡を観察しやすくするためである。明瞭な飛跡を観察するためには、飛跡の発生源である線源と、LED ライトの位置関係を最適にすることが重要である。そこで、本実験器具では、コルクシートの上にカラーシールを貼り（図7）、目印とした。黄色シールは、LED ライトを乗せる位置、青色シールは、 β 線の観察の際に線源を乗せる位置を示した。

2. 実験方法及び結果

1) 観察準備

事前に保温に用いるカイロの材料をプラスチックコップに入れ、攪拌しておく。そして、図8に示すように各器具を配置し、放熱フィンの部分が十分につかるように冷水を注ぐ。その後、ファンの電源を入れ、水のゆらぎでファンが回転していることを確かめる。

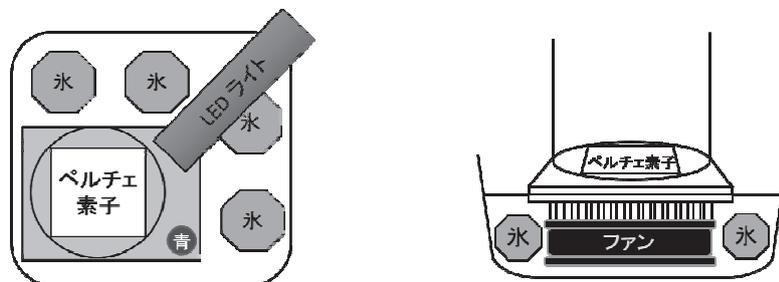


図8 器具の配置を示す位置関係

(左：上から見た図 右：横から見た図)

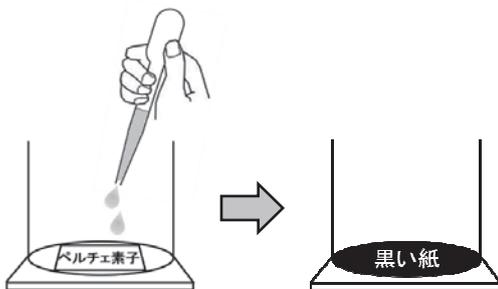


図9 ペルチェ素子の密着の様子

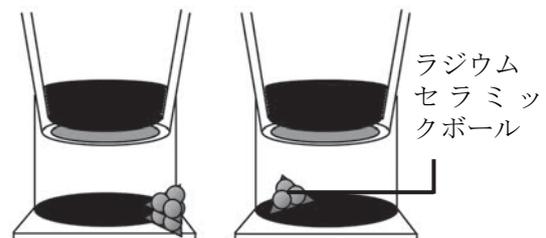


図10 ラジウムセラミックボールの位置

(左： β 線観察時 右： α 線・ β 線観察時)

次に、ペルチェ素子の上にエタノールを5滴程滴下し、薄手の黒い紙を乗せ、軽く指で押さえる等してペルチェ素子と密着させる（図9）。その後、シャーレに入れた無水エタノールにプラスチックコップの底のフェルトをつけ、観察槽上部に乗せる。ペルチェ素子及びLEDライトの電源を入れると、フェルト中のエタノールが蒸発して過飽和層ができる様子を観察して確認する。

2) 観察

線源を観察槽の中に置くと α 線と β 線、線源を観察槽の外（図7：青色シールの位置）に置くと、 β 線の飛跡だけが観察できる。 β 線の観察の際、線源を2個重ねると、飛跡が見える頻度が増え、観察しやすくなる。さらに、観察槽の外側から、ティッシュペーパーでこすった塩化ビニル棒を近づけると、観察槽内の雑イオンが取り除かれ、明瞭な飛跡が観察できる。図10に線源の位置、図11・12に観察できた飛跡を示す。

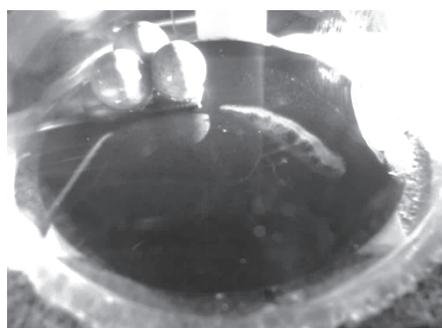


図11 観察できた α 線の飛跡

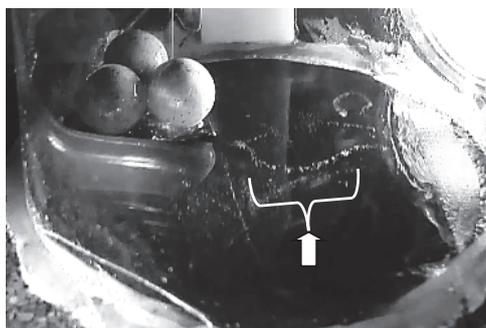


図12 観察できた β 線の飛跡（矢印）

3. 授業実践の概要及び授業展開

開発した教材実験の有効性を検証するために、2015年10月、京都府内の公立高等学校において、「物理基礎」受講の2年生1クラスを対象に、50分×2コマの授業実践を行った（図13）。本実験教材では、線源を観察槽の外に置いたときに β 線、中においたときに α 線と β 線の両方の飛跡を観察できる。この結果から、 α 線が遮断され、 β 線が透過していることに気づかせることをねらい、霧箱の観察の後、 α 線と β 線の透過性の大小関係を考察する討論などの活動を行った。表1に授業展開を示す。



図13 授業実践の様子

表1 授業展開

対象	物理基礎受講の高等学校2年生 40名
授業時間	100分（50分×2コマ）
授業展開	霧箱の説明（10分） 実験方法の説明及び観察準備（20分） 霧箱の観察（20分） 観察1：線源を観察槽の外に置いた場合 観察2：線源を観察槽の中に置いた場合 観察結果の記入（5分） 放射線の基礎知識の講義（10分） ホワイトボードを用いたグループ討論（20分） 事後アンケート（10分） まとめ（5分）

はじめに、霧箱で放射線の飛跡が観察できる原理を説明した。この際、実験の見通しをもたせるため、本実験教材におけるペルチェ素子やカイロの役割についても説明した。また、 α 線や β 線の飛跡の写真を示し、それぞれの特徴を説明した。

霧箱の観察は2人1組の個別実験の形態で実施した。実験方法は動画により説明し、観察の際は部屋の照明を消した。観察の順番は、線源を観察槽の外に置いた場合→中に置いた場合 に設定した。これは、逆の順番で行うと、線源を観察槽の中に置いたときに、比較的明瞭に観察できる α 線の飛跡にのみ着目する可能性があるためである。観察後に、飛跡の様子を文章及びスケッチでワークシートに記述する時間をとった。

放射線の基礎知識の講義は、生徒が放射線について未履修のため行った。放射線の定義に続いて、放射線には α 線、 β 線等の種類があること、また電離作用や透過性があること等、グループ討論を行うにあたって必要な事項を確認した。グループ討論では、観察結果の特徴から、 α 線と β 線の透過性の大小関係について4人班で話し合いを行った。出てきた意見をホワイトボードにまとめた後、教室全体で観察結果や考察を共有した。事後アンケートでは、本実験教材の操作性、また飛跡の視認性について選択回答式で評価させた。また、 α 線及び β 線の透過性の大小関係に関する問いについて答えさせ、理由と共に記述させた。

4. 事後アンケート及び観察結果の分析

授業実践後に、①実験器具の操作性及び飛跡の視認性、②透過性の理解に対する達成度 について評価した。①については事後アンケートの結果から、②についてはワークシート、事後アンケートの結果、及びホワイトボードの記述から評価した。

① 実験器具の操作性及び飛跡の視認

表2～4に事後アンケートにおける質問内容と、それらに対する回答の割合を示す。

「実験操作は難しかったですか。」という質問に対し、9割以上の生徒が肯定的に回答した。飛跡の視認性については、 α 線、 β 線ともに8割以上の生徒が「わかりやすい」「ややわかりやすい」と回答した。以上の結果から、本実験器具は、高校生を対象にしても十分に実験操作が可能であり、 α 線と β 線の飛跡が観察できると言える。

②透過性の理解に対する達成度

生徒が記述したワークシートから、 α 線と β 線の透過性の大小関係を考察する上で、適切な観察結果を元に行っているか分析した。観察1（線源を観察槽の外に置いた場合）で β 線のみ、観察2（線源を観察槽の中に置いた場合）では α 線と β 線の両方の飛跡を視認していると考えられる記述（図14）は、「十分な観察結果」、それ以外の記述（図15-16）は、「不十分な観察結果」に分類した。

表2 実験器具の操作性に関する回答

実験操作は難しかったですか。	回答数 40名
簡単	67%
やや簡単	30%
やや難しい	3%

表3 α 線の飛跡の視認性に関する回答

α 線の飛跡は観察できましたか。	回答数 40名
わかりやすい	70%
ややわかりやすい	13%
ややわかりにくい	17%

表4 β 線の飛跡の視認性に関する回答（ β 線）

β 線の飛跡は観察できましたか。	回答数 40名
わかりやすい	58%
ややわかりやすい	23%
ややわかりにくい	17%
わかりにくい	2%

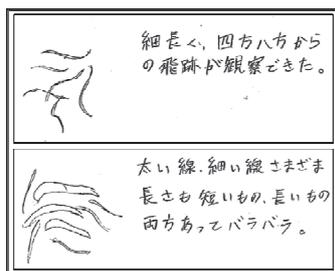


図 14 「十分な観察結果」の例
(上：観察 1 下：観察 2)

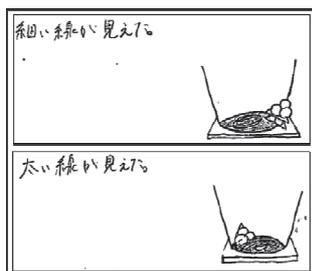


図 15 「不十分な観察結果」の例
(上：観察 1 下：観察 2)

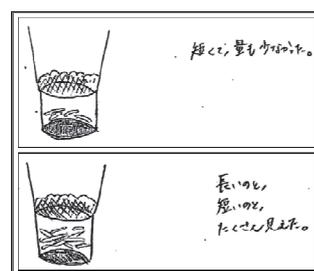


図 16 「不十分な観察結果」の例
(上：観察 1 下：観察 2)

図 15 に示した記述は、観察 1 では β 線、観察 2 では α 線のみを表していると考えられる。観察 2 において β 線の記述がないため、「不十分な観察結果」に分類した。また、図 16 のように飛跡の太さや数に着目した記述も、「不十分な観察結果」に分類した。その結果、「十分な観察結果」に分類される記述をした生徒は全体の約半数であった。

一方、事後アンケートにおける、「 α 線と β 線のうち、物質を通り抜ける性質が強いのはどちらか」という設問に対しては、すべての生徒が、正しい答えである β 線を選択した。また、ほとんどの生徒が、図 17 に示すように、線源の位置による観察結果の違いから考察できていた。先述したように、2 人 1 組の個別実験の段階では、透過性について考察する上で十分な観察結果を視認できた生徒は約半数だったが、4 人 1 班のグループ討論を通して、観察結果や考え方を交流することによって、さらに考察が深まったと考えられる。また、グループ討論のはじめには、「 α 線の方が、飛跡が太いため、透過性が強い」と考えていた班が、図 18 のような意見に変容していた。このことから、グループ討論は透過性について考察するために、意義あるものだったと考えられる。

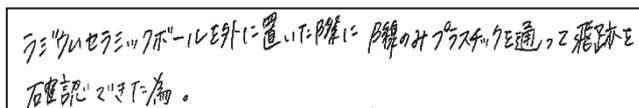


図 17 β 線を選択した生徒の記述

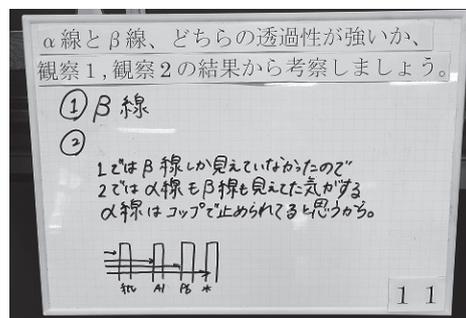


図 18 グループ討論における記述

IV. まとめと今後の課題

本研究では、冷却方法にペルチェ素子を用いた霧箱の教材開発を行った。さらに霧箱による飛跡の観察を通して、放射線の種類による透過性の違いについて考察する授業展開を考案した。それに基づく高校生を対象にした授業実践を通して、それらの有用性を検証した。ドライアイスや寒剤として用いる従来の方法では、安定した十分な冷却状態になるまでには時間がかかり、50 分の授業内で実施するには課題があった。本法ではペルチェ素子を用いた冷却方法、容器の小型化により、これらの課題も解決できることがわかった。

授業アンケートの結果から、開発したペルチェ素子を用いた霧箱は、高校生でも十分に操作可能であり、 α 線と β 線の観察の視認性も良好であることが分かった。しかし、生徒が記述したワークシートから、線源を観察槽の中に置いた場合に α 線の飛跡のみに着目し、 β 線の飛跡を見落としてしまう生徒が半数いることがわかった。

そのため、透過性について考察するための十分な観察結果を視認させるには、さらなる教材の改良が必要だと考えられる。今後の課題として、本稿で示した授業の対象は1クラスのみであるため、さらなる授業実践を行い、本実験教材を用いた霧箱の視認性、授業展開の有効性について詳細な調査を行いたい。また、今回は放射線の透過性に着目して授業実践を行ったが、霧箱の原理に深く関わっている放射線の性質として、電離作用がある。これについても考察できる授業展開を検討したい。しかし、事後アンケートの結果においては、ほとんどの生徒が α 線と β 線の大小関係について、霧箱の観察から考察できていた。これは、グループ討論により、2人1組による実験結果を共有し、考察を深めたためだと考えられる。

謝辞・附記

本論文は、日本理科教育学会近畿支部大会（2013年11月：和歌山大学教育学部附属中学校、及び2014年11月：兵庫教育大学）において発表した内容について、加筆・再構成したものである。

本研究は、科研費（平成26～28年度基盤研究C、課題番号265350233、及び平成29～31年度基盤研究C、課題番号26350233 いずれも代表者 芝原寛泰）の助成を受け、実施された。

引用文献

- 1) 文部科学省（2009）『高等学校学習指導要領解説－理科編－』, 46.
- 2) 高木堅志郎, 植松恒夫ら（2012）『物理』啓林館, 395.
- 3) 佐藤文隆, 小牧研一郎ら（2013）『物理』実教出版, 327.
- 4) 鎌田正裕, 窪田美紀（2012）「Simple cloud chambers gel ice packs」『PHYSICS EDUCATION』47（4）, 429-433.
- 5) 柚木朋也, 尾関俊浩, 田口 哲（2015）「融雪剤を用いた簡易霧箱の開発」『物理教育』第63巻, 第1号, 35-38.
- 6) 小田部荘志, 谷 太郎（2012）「可搬型ペルチェ式霧箱の製作」『久留米工業高等専門学校紀要』第28巻, 第1号, 1-7.
- 7) 森健一郎, 栢野彰秀（2014）「放射線の「透過性」と「電離作用」の理解を促す学習プラン－簡易霧箱を効果的に活用するための補助的な実験の導入－」『エネルギー環境教育』Vol.8, No.2, 31-37.
- 8) 森本弘一, 松本郁弥（2012）「中学校における放射線教材を用いた授業実践とその評価」『理科教育学研究』Vol.53, No.1, 147-153. 文部科学省（2009）『高等学校学習指導要領解説－理科編－』, 46.
- 9) 坂東 舞, 川本公二, 土田弘幸, 芝原寛泰（2006）「マイクロスケール実験による水の電気分解実験の定量化」『京都教育大学教育実践研究紀要』第6号, 25-34.
- 10) 山本海行（2016）, 「うみほしの部屋」, Retrieved from <http://www.umihoshi.com>