

## ノート

論文受付  
2012年9月21日

論文受理  
2013年2月8日

Code No. 131

## 診断用 X 線装置を用いた霧箱実験の提案と シミュレーションコードを援用した解析

林 裕晃<sup>1</sup> 花光宏樹<sup>2</sup> 西原貞光<sup>1</sup> 上野淳二<sup>1</sup> 三好弘一<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 徳島大学大学院ヘルスバイオサイエンス研究部

<sup>2</sup> 徳島大学医学部保健学科

<sup>3</sup> 徳島大学アイソトープ総合センター

### 緒言

霧箱は荷電粒子の飛跡を可視化できる放射線検出器で、1900年代初頭の原子核実験に用いられていた。現在、霧箱が研究用途の放射線検出器として用いられることはほぼなくなっているが、放射線の飛跡を簡便に可視化できる代替の検出器がないので、初学者への教育には依然として高い効果を発揮する。当初開発された Wilson 型霧箱<sup>1)</sup>は、断熱膨張を利用してごく短時間の間だけ過飽和状態を持続できるものであったが、現在は過飽和状態が長時間持続できる拡散型霧箱が教育に利用されている。

拡散型霧箱は、密閉された容器の天井を高温に、底部を低温に保つ構造である。液溜まり部を容器の上部に設置し、エタノールなどのアルコールを満たす。このアルコールが蒸発し下方へ拡散するときに、底部から

数センチの範囲に過飽和領域を作る。この過飽和領域中に荷電粒子が運動するときに気体分子がイオン化され、これらのイオンを核としてアルコール分子が凝集し霧としてみえるので、放射線の軌跡を可視化することができる。5~10 cm 四方程度の小型の拡散型霧箱は比較的簡単に製作できるので、小中学生の放射線教育の一環で、自然放射線(主に  $\alpha$  線)を可視化する実験が行われている。また、磁場を付加した高機能の霧箱を開発し、高等学校の物理教育にも利用した例が報告されている<sup>2,3)</sup>。有限会社ラド<sup>4)</sup>が開発した電気冷却式の大型の製品(100 cm 四方程度)は科学館などの一般施設で公開されている。

われわれは、大学における初学者教育(実習)に利用できる霧箱を開発することを考えた。高校までの物理教育との大きな違いは、a) X 線装置を使用した実験を行う

### Proposal of a Cloud Chamber Experiment Using Diagnostic X-ray Apparatus and an Analysis Assisted by a Simulation Code

Hiroaki Hayashi,<sup>1\*</sup> Hiroki Hanamitsu,<sup>2</sup> Sadamitsu Nishihara,<sup>1</sup> Junji Ueno,<sup>1</sup> and Hirokazu Miyoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Health Bioscience, The University of Tokushima Graduate School

<sup>2</sup>School of Health Sciences, The University of Tokushima

<sup>3</sup>Radioisotope Research Center, The University of Tokushima

Received September 21, 2012; Revision accepted February 8, 2013

Code No. 131

#### Summary

A cloud chamber is a radiation detector that can visualize the tracks of charged particles. In this study, we developed a middle-type cloud chamber for use in practical training using a diagnostic X-ray apparatus. Because our cloud chamber has a heater to vaporize ethanol and features antifogging glass, it is possible to observe the vapor trails for a long time without the need for fine adjustments. X-rays with a tube voltage of 40 kV or of 120 kV (with a 21-mm aluminum filter) were irradiated at the chamber and the various phenomena were observed. We explain these phenomena in terms of the range of electrons and/or interactions between X-rays and matter and conclude that our analysis is consistent with analysis using the Monte Carlo simulation code EGS5.

**Key words:** cloud chamber, radioisotopes, X-ray, practical training

\*Proceeding author

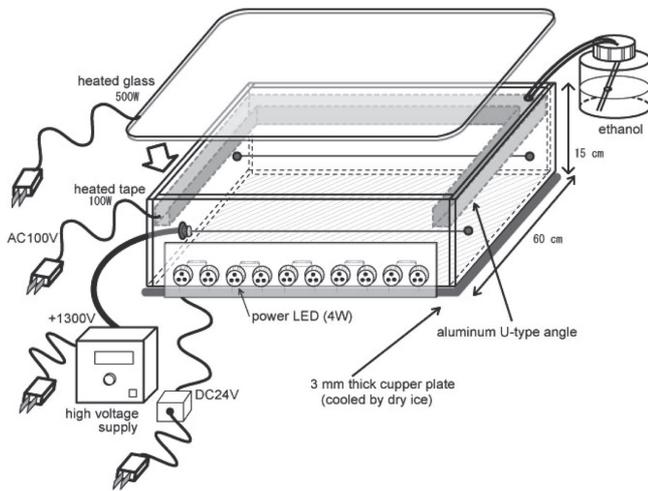


Fig. 1 Schematic drawing of cloud chamber.

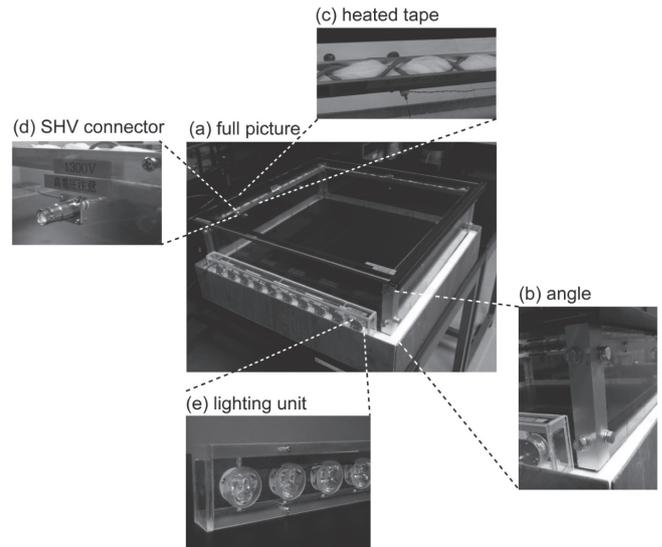


Fig. 2 Photographs of cloud chamber.

ことで X 線に対する知識を向上させるという目的があることと、b)放射線と物質が相互作用をした結果発生する電子の振る舞い(空気中での飛程)を放射線物理学の観点から考察することである。前者の目的のためには、医療用の X 線装置で設定する照射野の大きさや、X 線の照射によって生成する散乱 X 線や 2 次電子を十分に観測できる大きさ(~60 cm 四方程度)の霧箱が必要である。また、後者の目的のためには、シミュレーションコードを援用した解析を行うことが有用であると考えるが、この目的を達成するためにはできるだけシンプルな構造の霧箱を製作する必要がある。

本論文で提案する実験を行うことができる大型もしくは小型の霧箱は販売されておらず、他の研究論文でも公表されていないので、中型の霧箱を自作した。中型の霧箱に求められる性能は、安全性、長時間の持続性、再現性である。特に X 線装置を用いた実験を行うためには、人が微調整をしなくても数分以上、安定した状態を安全に維持できることが必要不可欠な条件となる。小型の霧箱は外気温や湿度の変化に敏感なので、安定した過飽和状態を作り出すことが難しい。また、大型の霧箱は高価であり、移動させることが難しく、側面からの X 線の入射を想定した設計ではないので X 線装置を用いた実習への利用は困難である。一方、本論文で紹介するような中型の霧箱は、高電圧やヒータなどの付加機能を比較的容易にもたせることができるので、外気温の影響を受けることが少なく非常に安定しているという特長がある。さらに、人が持ち運べる大きさなので、水平式撮影台の上に配置することができる。このように、小型の霧箱と大型の霧箱の両方の特長をもっているため、X 線装置を用いた実験に適している。

本論文では、開発した中型の拡散型霧箱を紹介し、種々の実験が行えることを報告する。さらに、霧箱に X 線を照射して得られた画像(霧の写真)を放射線物理の観点から理解するために、モンテカルロシミュレーションコードを援用した解析を行い、本論文で提案する X 線装置を用いた霧箱の実験が初学者教育に有用であることを説明する。

## 1. 使用機器と方法

### 1-1 製作した霧箱

Fig. 1 に製作した霧箱の概念図を示す。Fig. 2(a)は霧箱の全体写真である。全体の重量はおよそ 20 kg[本体 13 kg, 天板(防曇ガラス)7 kg]であり、厚さ 10 cm の発泡スチロール製の台の上に設置してある。本体の枠は厚み 1 cm のポリカーボネイトで作られており、寸法は 60 cm(縦)×60 cm(横)×15 cm(高さ)である。全体の剛性を高めるために、ポリカーボネイトの板をアングルと M8 ボルトによって固定して枠を製作した[Fig. 2(b)]。底面は厚み 3 mm の銅板であり、粉碎したドライアイスの上に装置全体を載せて冷却する。この銅板の表面は黒色の焼き付け塗装が施してあり、白い霧が見やすいように工夫した。この銅板はネジ(M4, 15 mm)を用いてポリカーボネイト製の枠(本体)に固定した。本体の上蓋は 65 cm 四方の防曇ガラス(フィグラ社、特注サイズ)<sup>5)</sup>であり 500 W の発熱によって、装置上部の温度を保てるようになっている。防曇ガラスは、曇り止めと、安定した温度勾配を維持する役割をもつ。1 cm(縦)×1 cm(横)の溝を有するアルミニウム製の U 字アングルにエタノールを入れ、このアングル内に 100 W のシリコンコードヒータ<sup>6)</sup>を巻きつけた脱脂綿を挿入した

[Fig. 2(c)]. また、不要なイオンを除去するための電場<sup>1)</sup>を印加するために、Fig. 1に示すように霧箱内部に電線を張った。電源装置は Geiger-Mueller 検出器(以下、GM 検出器)の計数装置として用いられているベーシックステーラ TDC-105(日立アロカメディカル株式会社)<sup>7)</sup>を利用し、+1300 V の電圧を印加した。電源ケーブルは safe high voltage(SHV)ケーブルを使用し、本体に取り付けたコネクタ(林栄精器株式会社)<sup>8)</sup>を用いて、霧箱内部だけに電場がかかるように工夫した[Fig. 2(d)]. 発生した霧をみやすくするために、白色 light emitting diode(LED)ユニットを用いて装置側面から内部を照らした[Fig. 2(e)]. LED ユニット(白色, OSPR3XW3-W4XME1C1E, OptoSupply Limited 社)は 4 W 相当の製品を 2 個直列に結線し、47 $\Omega$  のセメント抵抗を挿入し、24 V の直流電圧によって動作させた。LED ユニットの合計で 10 個用いた。指向性が高い光束を得るために、LED ユニットには専用のレンズ(パワー LED 用レンズ OS-OLTX3525P, OptoSupply Limited 社)を被せて使用した。霜や水滴が付着して漏電することを防止するために、これらの LED はアクリルを用いて製作したケース内の密閉雰囲気中に配置した。

## 1-2 霧箱の立ち上げ方法と動作条件

霧箱は以下の手順で立ち上げた。

- 1) ドライアイス 6 kg を用意し、金槌を用いて粉碎した。
- 2) 粉碎したドライアイスを発泡スチロール製の台に敷き詰め、その上に霧箱の本体を載せた。
- 3) U 字アングル中にエタノールを入れ、上蓋を被せ、霧箱内部を密閉状態にした。
- 4) U 字アングルおよび上蓋のヒータに通電した。
- 5) 安全を確認し、高電圧 1300 V を印加した。
- 6) LED ライトを点灯した。

安定した定常状態を保つために、以下の操作が必要であった。

- a) U 字アングルの温度を 40~50 $^{\circ}\text{C}$ 、上蓋の温度を 40 $^{\circ}\text{C}$  程度となるように調節した。これらの温度はサーモテープを用いて、10 分ごとに目視によって確認した。
- b) 20 分ごとに、U 字アングル中のエタノールの残量を確認し、不足があった場合は追加した。2 時間程度の実験で、500 ml 程度のエタノールが必要であった。
- c) 必要に応じてドライアイスを追加した。室温 25 $^{\circ}\text{C}$  の条件で 6 kg のドライアイスを利用したとき、ドライアイスによる冷却は、約 2 時間持続した。

## 1-3 自然放射線の観察

X 線撮影室の中央に霧箱を設置して、自然放射線の

観測をした。画像(動画)はデジタルビデオカメラレコーダ(DCR-HC88, ソニー株式会社)を用いて記録し、放射線の飛跡が確認できた動画の一部を静止画として出力した。動画の編集は AVS Video Converter(Online Media Technologies Limited 社)を用いた。

## 1-4 X 線装置を用いた実験

1-3 に記載した方法と同様の観察方法で以下の実験を行った。

施設 A 所有の X 線撮影装置(MRAD-A50S/70, 東芝メディカルシステムズ株式会社)を用いて、霧箱に X 線を照射する実験を行った。照射条件は、管電圧 40 kV と 120 kV の 2 通りであり、後者の条件では線質を硬くするために 21 mm のアルミニウムフィルタを付加した。撮影条件は 40 kV の実験のときには、管電流時間積(mA second: mAs)を 0.5 mAs(50 mA, 0.01 s)、120 kV の実験のときには 3.2 mAs(320 mA, 0.01 s)とした。X 線は霧箱の側面から入射させた。霧箱の側面と焦点の距離は 40 cm、霧箱側面での照射野の大きさは 4 $\times$ 4 cm であった。この実験では、厚み 2 mm の鉛板を X 線の軸上、霧箱の中央に挿入し、霧箱中で入射 X 線と鉛板とが相互作用をするようにした。

## 1-5 シミュレーション計算

1-4 で取得した画像の物理現象を、光子の軌跡と電子の飛跡の両方の観点から理解するために、モンテカルロシミュレーションコード EGS5<sup>9)</sup>を用いてシミュレーション計算を行った。シミュレーションコード内に霧箱を再現し、X 線を霧箱側面から入射した。実験を再現した計算を行うために、4 cm $\times$ 4 cm の大きさをもつ面線源を設定した。計算には管電圧 40 kV および 120 kV の X 線スペクトル<sup>10)</sup>を用いた。計算結果は 3D 画像表示ソフト CGVIEW<sup>11)</sup>を用いて表示した。CGVIEW では表示させる粒子の種類を選択できる。そこで、光子および電子の飛跡と電子だけの飛跡の 2 種類の画像を出力した。800 個の光子が入射したときの飛跡を表示した。

## 2. 結果

### 2-1 霧箱の立ち上げと自然放射線の観察

1-2 に示した手順で霧箱を立ち上げたとき、5 分ほどで 1~6 の手順を完了した。その直後から  $\alpha$  線の飛跡を確認できた。さらに 10 分程度が経ち内部の温度勾配が安定した状態では、電子線の飛跡を確認できた。

実験で得られた飛跡の写真を Fig. 3 に示す。観測できた飛跡は以下に示す 3 種類であり、(a)は長さ 5 cm 程度の太い線、(b)は長さ 10~40 cm 程度の細くて長い

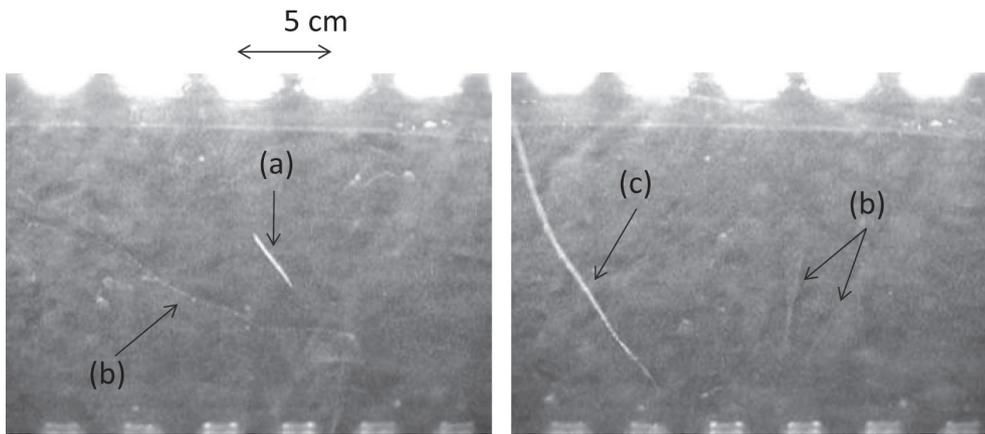


Fig. 3 Photographs of tracks caused by natural radiation. (a)  $\alpha$ -particles; (b) electrons; and (c) muons.

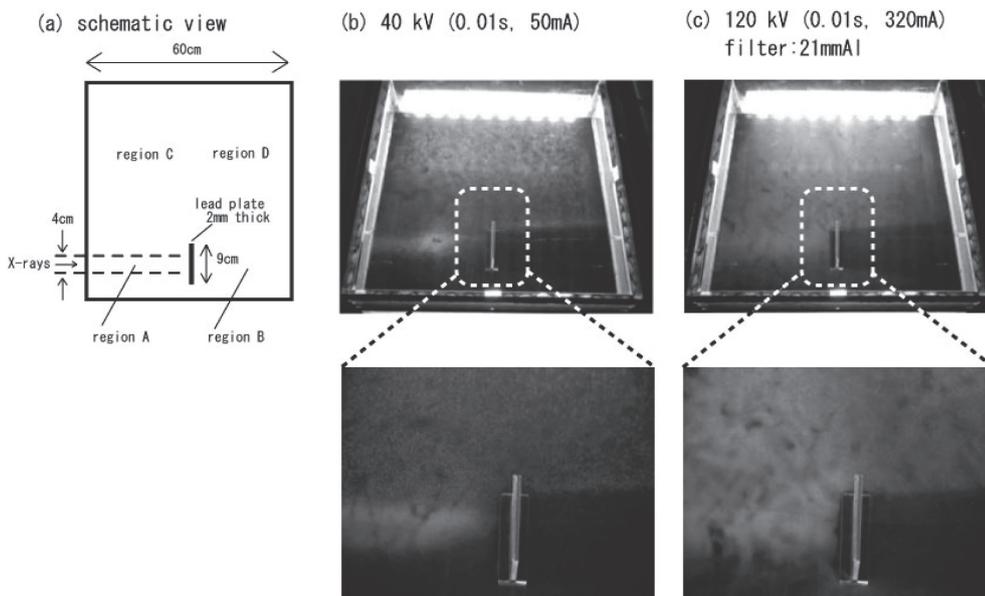


Fig. 4 Pictures of the cloud chamber irradiated with X-rays. Figure (a) is a schematic view. Figures (b) and (c) show experimental results.

線, (c)は長さ 20 cm 程度の太くて長い線であった。(b)は頻繁に発生し, 次いで(a), 最も低い頻度で(c)が観察された。

## 2-2 X線装置を用いた実験

Fig. 4に, X線装置を用いた実験結果の写真を示す。Fig. 4(a)は概念図であり, Fig. 4(b)および Fig. 4(c)はそれぞれ管電圧 40 kV および 120 kV のときの写真(静止画像)である。上段は全体図で 60 cm 四方の視野を示しており, 下段は遮蔽体として挿入した鉛板周辺の 20 cm 四方の拡大図を示す。上段と下段の実験は2回の独立した実験の結果である。

## 2-3 シミュレーション結果

Fig. 5にシミュレーション計算で得られた粒子の飛跡を示した。Fig. 5(a)および Fig. 5(b)の画像は, 管電圧 40 kV および 120 kV の X 線を入射したときの結果である。上段は光子および電子の飛跡を示しており, 下段は

電子だけの飛跡を示している。画像は上面図であり, Fig. 4 で示した実験と同じ向きで表示している。

## 3. 考察

### 3-1 霧箱の製作と冷却に対する工夫

材料費は電源装置を除き, 10 万円程度であった。本体の製作は, 小型のフライス盤を用いて加工したが, 直径 8 mm 程度までの穴あけ加工ができる装置(ボール盤, ハンドドリル)やネジ切り工具を有する施設であれば, Fig. 2 に示した霧箱を比較的簡単に再現できる。本体に用いたポリカーボネイトの適用温度は  $-40^{\circ}\text{C}$  ~  $+120^{\circ}\text{C}$  なので, 底面の冷却とエタノールを入れる U 字アングルの加熱に適用できるが, 安全な温度範囲で使用していることを常にチェックすることが大切である [1-2, 手順 a) および b)]。特に U 字アングルとその中に満たされているエタノールを合わせた熱容量は, エタノールの残量によって刻々と変化するので, エタノールの残量に不足があった場合は早めに補給することが望

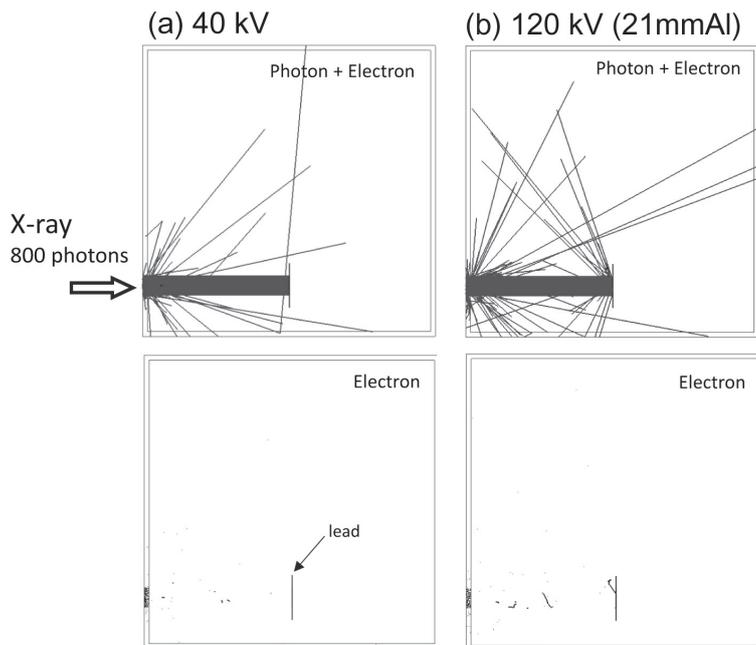


Fig. 5 Simulated results for the cloud chamber irradiated with X-rays with tube voltages of 40 kV and/or 120 kV. The upper figures indicate the tracks of photons and electrons and the lower figures indicate the tracks of electrons.

ましい。われわれの霧箱の側面にはエタノール補給用の小孔が空けてあるので、内部の状態を保ったままエタノールを補給できる。また、高電圧を霧箱の内部だけに印加するために、GM 計数装置を電源として利用する工夫を行った。診療放射線技師養成校では GM 計数装置を所持している<sup>12)</sup>、別途高価な電源を購入する必要がないと思われるが、他の代用品としてはシンチレータ用の電源装置などが使用できる。このような放射線計測用の電源装置を利用することで、安全に高電圧を印加することができる。

すべての部品をネジ留めによって組み立てることは中型霧箱の設計にとって重要な要素である。なぜならば、冷やし始めの段階[1-2, 手順 2)]では霧箱全体を均一に冷却することが難しく、しばしば不均一な冷却状態になり、材料の収縮率の違いが歪を生じさせるからである。しかし、ネジ留めによって霧箱を製作しておけば、材料と材料の接合部でこれらの歪を吸収できる。この工夫は安全な霧箱を製作するアイデアであり、われわれの霧箱は数十回の立ち上げに対しても十分な耐久性を示している。できるだけ均一に冷却するためには、ドライアイスは粉状になるまで丁寧に粉砕することが大切であり[1-2, 手順 1)]、どうしても不均一な冷却状態になってしまった場合は、霧箱底面全体にエタノールの液溜まりを作ることで、この状況を改善できる。

霧箱底面を黒く塗装する際にも注意が必要で、一般の塗料では熱収縮に適用できず、塗料が割れてしまう。小型の霧箱では黒紙を敷くことが多いが、中型以上の霧箱では、長期的な使用も視野に入れた設計をすること

が望ましい。われわれは銅板に焼き付け塗装を施す(専門業者に委託)ことでこの問題を解決した。この塗料の層は非常に薄く、銅板の低温状態を直接霧箱内部に伝達できるので、霧箱の早い立ち上げにも貢献している。

このように、われわれが提案する霧箱は長期的な使用も視野に入れた安全性の高い実験装置である。

### 3-2 観測できた自然放射線

自然界に存在する放射性同位元素で、霧箱中に気体として存在するものは、 $^{222}\text{Rn}$ と $^{220}\text{Rn}$ であるが、霧箱では半減期の長い $^{222}\text{Rn}$ (半減期: 3.8 日,  $\alpha$ 線のエネルギー: 4.7 MeV)が主に観測される<sup>13, 14)</sup>。空気に対する $\alpha$ 線の飛程は 5 cm 程度<sup>14)</sup>であり、Fig. 3(a)で観測された結果と一致している。自然放射線由来の $\gamma$ 線はエネルギーが 2.6 MeV まで分布し<sup>14)</sup>、霧箱底面の銅板表面でコンプトン散乱もしくは光電効果を起こす。はじき出された 2 次電子の飛程は 2 m 程度<sup>14)</sup>であるので、霧箱で観測できるのは飛程の一部であり、Fig. 3(b)に示したような細くて長い多数の飛跡として観測される。Fig. 3(c)の太く若干曲がった線は、2 次宇宙線として代表的なミュー粒子の飛跡であり<sup>14)</sup>、霧箱で観察できることが知られている。

### 3-3 X線装置を用いた実験

霧箱の実験を通して考察したい現象は、Fig. 5 の上段に示した光子および電子の飛跡である。しかし、霧箱で観察できる現象(Fig. 4)は、入射 X 線が相互作用して電子にエネルギーを付与した後の電子の飛跡であ

り、対応するシミュレーション結果は Fig. 5 の下段に示した電子の飛跡である。Fig. 5 では、ソフトの制約があるのでわずか 800 個の X 線を入射させた時の結果を可視化しているが、実際の X 線装置からは 1 mAs の場合ですら  $10^{10}$  個以上(X 線の発生効率 1%、立体角 0.1% と想定したとき)の光子が入射していることに注意しなければならない。これは、Fig. 5 で示した飛跡は、現実に行われている現象のごく一部であることを意味している。以下に、Fig. 4 に示した実験結果を、Fig. 5 のシミュレーション結果と対比しながら考察し、われわれが提案する実験で、X 線と物質との相互作用を理解できることを示す。

まず、Fig. 4(a)に示すように、A~D の領域を定義する。X 線のビーム軸上で鉛板までの領域を領域 A と定義し、鉛板以降の領域を領域 B とする。領域 C は霧箱上方の左側の領域、領域 D は右側の領域である。管電圧 40 kV の実験結果[Fig. 4(b)]も管電圧 120 kV の実験結果[Fig. 4(c)]も、X 線のビーム軸上(領域 A)では白い霧が生じているが、鉛板の右側(領域 B)では白い霧を生じていない。これは、2 mm 厚の鉛板によって、入射 X 線が十分に遮蔽できていることを示している。このことは、Fig. 5 に示したシミュレーション結果において、入射 X 線のすべてが鉛板で止められていることと矛盾しない。

管電圧 40 kV の X 線スペクトルは 20 keV から立ち上がり最大エネルギー 40 keV まで分布する。同様に、管電圧 120 kV の X 線スペクトルの場合も 20 keV から立ち上がり 120 keV まで分布する。そこで、20~120 keV の電子の飛程が数 cm から 10 cm 程度<sup>14)</sup>であることに留意して、管電圧が異なる 2 種類の結果のビーム軸(領域 A)のみえ方の違いを考察する。Fig. 5(a)の下段の結果(40 kV のとき)をみると、ビーム軸上で光電効果およびコンプトン散乱して生成された電子の飛程が短いので、ビーム軸の範囲に留まっていることがわかる。一方、Fig. 5(b)の下段の結果(120 kV のとき)をみると、ビーム軸上で空気と相互作用して発生した電子が比較的長い距離を移動していることがわかる。この結果を踏まえて、Fig. 4 の結果を比べると、管電圧 40 kV の結果[Fig. 4(b)]はビーム軸がはっきりとしているのに対し、管電圧 120 kV の結果[Fig. 4(c)]ではビーム軸がぼやけていることがわかる。管電圧を上げることで、飛程の長い電子の割合が増え、ビーム軸がはっきりとしなくなると理解できる。

Fig. 4 において、鉛板の左側のビーム軸上(領域 A)とその上方の領域(領域 C)を比べると、管電圧 40 kV では領域 A の方が領域 C よりも濃い霧を生じているのに

対し、管電圧 120 kV ではビーム軸上(領域 A)と上方(領域 C)で、同程度の濃さの霧が発生していることがわかる。Fig. 5 の上段に示した光子の飛跡をみると、コンプトン散乱の発生源は、霧箱の壁面であることがわかる。X 線エネルギーが 40 keV 以下と低い場合は、光電効果の断面積がコンプトン散乱の断面積よりも大きい。実験で得られた結果をみると、Fig. 4(b)の結果は、領域 A では主に光電効果を起こし、領域 C ではコンプトン散乱した光子が再び光電効果やコンプトン散乱を通して電子にエネルギーを与え、霧が生じていると解釈できる。一方、X 線エネルギーが高い Fig. 4(c)の結果は、領域 A で光電効果を起こす割合が非常に少なくなり(光電効果の断面積はエネルギーの 3.5 乗に逆比例するといわれている<sup>14)</sup>)、壁面でコンプトン散乱した光子は領域 A と領域 C に同程度入射するので、同じような霧の濃さになったと解釈できる。

最後に、Fig. 4 において、領域 C と領域 D の違いを考察する。管電圧 40 kV の結果[Fig. 4(b)]では領域 C と領域 D の違いはみられないが、管電圧 120 kV では領域 C の方が領域 D よりも濃い霧が発生している。このことは、Fig. 5(a)と(b)を比べると理解できる。Fig. 5(b)では鉛板から領域 A および C 方向に、散乱 X 線が入射していることがわかる。すなわち、領域 C は領域 D に比べて、鉛からの散乱線が多く入射するため、より多くの霧が発生する。この散乱 X 線の大部分は、鉛の特性 X 線である。鉛の K 吸収端(88 keV)よりも大きいエネルギーの光子が入射すると、光電効果によって光子を吸収するが、同時に特性 X 線を発生させる。この過程は、鉛の表面近傍で起こっているため、領域 A および領域 C 方向へ散乱線(特性 X 線)が発生する。

### 3-4 霧箱を使った実験を行う意義

2-1 の実験では、自然放射線由来の  $\alpha$  線の飛程を視覚的に捉えることができる。複雑な理論モデルや半実験式を用いずに、 $\alpha$  線の飛程が短いということを理解できる。霧箱を使った実習で典型的な  $\alpha$  線の飛程を理解していれば、放射線の防護をする際に、これらの経験が役に立つ。また、自然放射線由来の  $\gamma$  線が相互作用をした後の電子線の飛跡を観察することで、われわれの生活環境には非常に多くの自然放射線が存在していることを実感できる。この経験から、われわれがこれらの自然放射線によって絶えず被曝していることも理解できるようになる。初学者は、とすれば、1 個の放射線が当たることに恐怖感を感じていることもあるが、非常に多くの自然放射線に絶えず晒されている事実を理解し、被曝の管理はあくまでも定量的に行わなければなら

ないということを考察するきっかけになる。

2-2の実験を通して、医療用に用いられているX線の性質を視覚的に説明できる。診療放射線技師にとって、有益な画像を得るための1次X線の知識と同様に、Fig. 4の領域CやDにおける現象で想定できる介助者や術者への余分な被曝の原因となる散乱X線の知識も非常に重要である。この実験を通して、エネルギーの違いで散乱X線がどのように変化するかということの説明できる。さらに、それらを理解するためには、放射線物理学という基礎学問が重要な役割を果たしていることを実感できる。

診療放射線技師の養成校では、目にみえない放射線の挙動を学生に理解させることに苦心しがちであるが、本論文で示したように、霧箱を使った実験から大きな教育効果を期待できると考える。

#### 4. 結論

観察可能領域が60 cm四方である中型の拡散型霧箱を開発した。この霧箱は、非常に安定した状態を維持できるので、自然放射線の飛跡の観察に加えて、X線

装置を用いた実験に適している。本論文では、診断用のX線装置を用いて、管電圧の違いによって散乱X線がどのように変化するかを確認する実験を例示し、霧箱を使った実験で電子の飛程やX線と物質との相互作用を理解できることを示した。さらに、これらの解析が正しいことを、モンテカルロシミュレーションコードEGS5を援用して説明した。このような実験は、診療放射線技師の養成校で有用であると考えられ、特に初学者に対して教育効果を発揮することが期待できる。

#### 謝 辞

本研究で開発した霧箱はオープンキャンパス用の展示品として製作しました。運転条件は、徳島大学医学部保健学科の大西大氏、鹿重俊哉氏、および山本悠太氏の協力によって明らかになりました。沖野啓樹氏および笠井洋平氏にはX線を用いた実験の協力をいただきました。また、研究の初期には名古屋大学アイソトープ総合センターの柴田理尋教授に助言をいただきました。ご協力いただきました皆様に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 加藤貞幸. 放射線計測, 新物理学シリーズ 26. 東京: 培風館, 2003.
- 2) 林 熙崇. 磁場入り高感度霧箱を用いた原子物理分野の実験教材開発. 物理教育 2007; 55(4): 297-302.
- 3) 矢野淳滋. 高温拡散型霧箱. 物理教育 1972; 20(1): 20-22.
- 4) 有限会社ラド, <http://www.kiribako-rado.co.jp/radotop.html>
- 5) フィグラ株式会社, <http://www.figla.co.jp/>
- 6) 株式会社テックジャム, <http://www.tech-jam.com/>
- 7) 日立アロカメディカル株式会社, <http://www.hitachi-aloka.co.jp/>
- 8) 林栄精器株式会社, <http://www.repic.co.jp/>
- 9) Hirayama H, Namito Y, Bielajew AF, et al: The EGS5 Code System, SLAC Report number: SLAC-R-730, KEK Report number: 2005-8.
- 10) 林 裕晃, 福本 晃, 花光宏樹, 他. EGS5コードを用いた診断用X線スペクトルの実用的な計算手法. 医用画像情報誌 2012; 29(3): 62-67.
- 11) 波戸芳仁, 平山英夫, 高村 篤, 他. CGVIEW - 飛跡とジオメトリ表示プログラム - マニュアル. 高エネルギー加速器研究機構, 2009.
- 12) 松本満臣. 診療放射線技師教育の流れ - 第2報 大綱化カリキュラムと教育目標 -. 日放技学誌 2001; 57(2): 185-189.
- 13) 日本アイソトープ協会 編. アイソトープ便覧. 丸善株式会社, 東京, 1995: 9, 291-293, 819-820.
- 14) Knoll GF. 放射線計測ハンドブック. 東京: 日刊工業新聞社, 2001.

問合せ先

〒770-8509 徳島市蔵本町3-18-15 徳島大学医学部保健学科A-23号室  
徳島大学大学院ヘルスバイオサイエンス研究部医用理工学講座 林 裕晃