

放射線の飛跡を捉える高感度クラウドチャンバー製作
と放射線観察

2016年12月20日
大島商船高等専門学校
自然エネルギー研究会

1. 研究背景

福島第一原発発電所の原子力事故発生によって引き起こされる放射性物質拡散問題は、発生から5年が経過した現在も周辺環境の汚染や食品への影響、ホットスポットなど多くの影響を及ぼしており、今後とも長期に渡って向き合っていかなければならない問題である。図1は、2011年3月に地表に落ちた放射性物質がそのままの状態で作成されている場所の2011年12月時点の放射線量を示している（早川群馬大教授作成）。

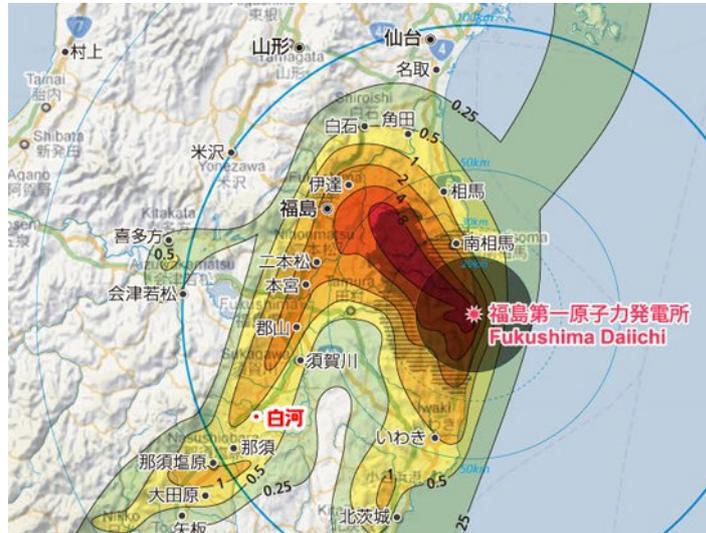


図1 福島原発放射線マップと白河市

このような問題が起きていの中で、原発事故発生直後から草の根的な計測・調査活動、勉強会の開催、学校教育における放射線教育の実施など放射線理解を目的とした活動や教育への取り組みの動きが活発的に行われるようになった。また、放射線量を知る方法として、インターネットを介して自動でリアルタイムに放射線計測器からセンサーデータの情報を共有する手法を使った放射線量リアルタイム表示 web サービス「放射線情報」が登場するなど、手軽に放射線量などの情報を入手することができるようになった。このように原発事故発生直後から、放射線について学ぶ機会は今を知るための情報伝達手段が増えたと言える。しかし、放射線について学ぶ方法に関しては、物理学など専門的な知識が必要であり、人間の目では放射線を見ることができないのでイメージがしづらい、座学で学ぶことが多いという問題がある。

【放射線教育の問題点】

原発事故発生直後から、放射線について学ぶ機会や現状を知るための情報伝達手段が増えた。しかし、こういった活動や手段があったとしても依然として、「放射線を学ぶ、もしくは教えるということは難しい」という問題が存在する。その問題の要因を列挙する。

- ・ 要因1：物理学などをはじめ、ある程度、科学的な知識が必要である。
- ・ 要因2：人間の目では放射線が見えないので、存在をイメージしづらい。
- ・ 要因3：座学で学ぶことが多くなる。

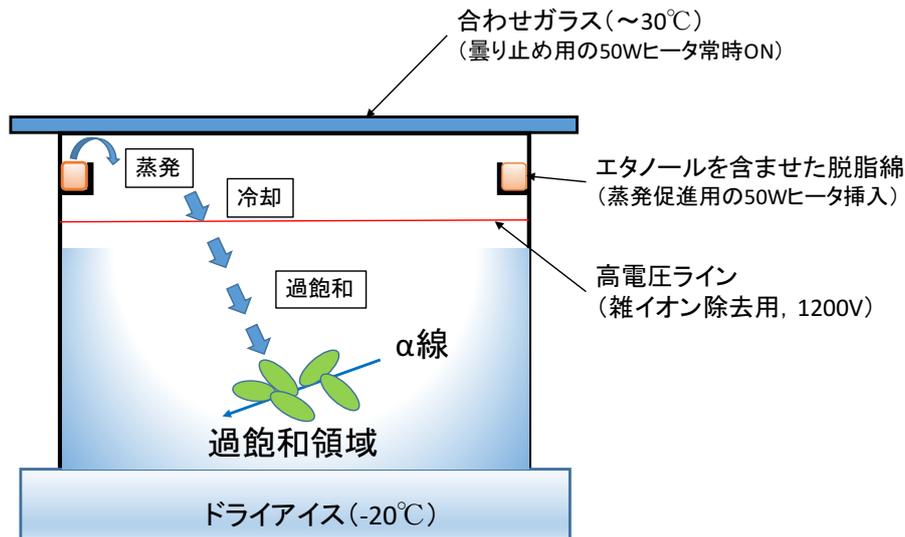


図3 チャンバー内の構造

図4は今回製作したクラウドチャンバー及び計測装置の全体図を示す。チャンバーのサイズは300mm×200mm×200mmのガラス製矩形容器である。容器上部には厚さ5mmの耐熱性のガラス板を設置し、曇り止め用の50Wのラバーヒータを取り付けている(図4参照)。またチャンバー底部のガラス面の外側には厚さ3mmのアルミ板を設置した。チャンバーの下部から50mmまでは図4に示すように発泡スチロールに覆われており、チャンバー底部はドライアイスによって常に冷却されている。

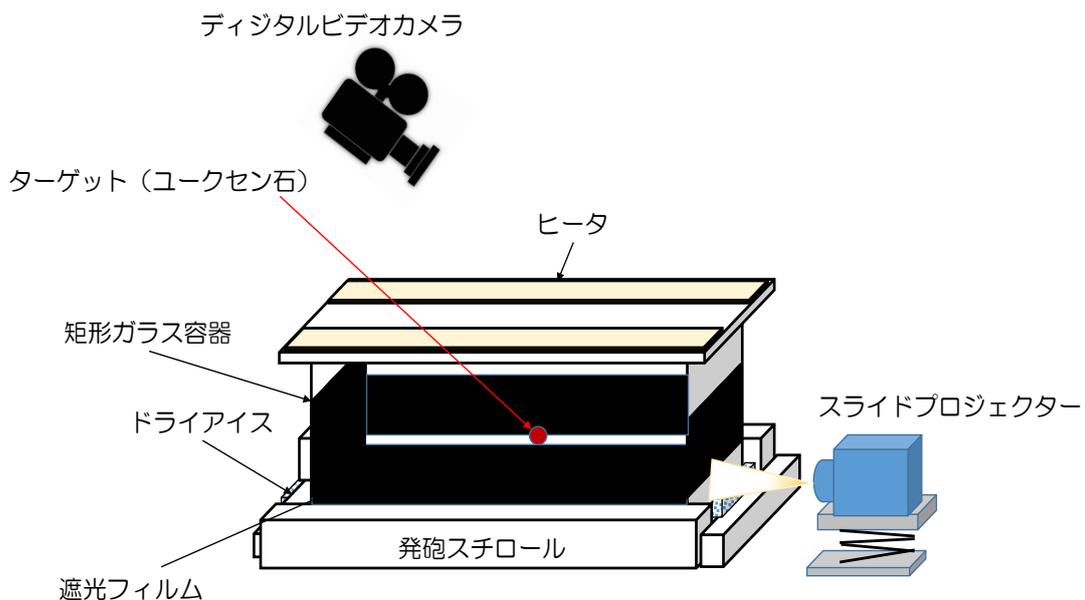


図4 クラウドチャンバー及び計測装置の全体図

今回の実験では過飽和状態を作る原料としてエチルアルコール(沸点: 78.3°C, 101.3kPa)を用いた。この原料は常温でも早く蒸発し、飽和蒸気圧が高いので今回の実験では好都合である。エチルアルコールを十分に染み込ませたスポンジ(5mm×5mm×5mm)は、チャンバー上部から50mmの位

置に設置した L 字の治具に挿入される。図 5 はエチルアルコールの温度と飽和蒸気圧の関係を示す。今、チャンバー上部のスポンジに染み込ませたエチルアルコールの温度が 20℃ であると、盛んに蒸発して飽和蒸気圧 (0.0580 気圧) になっているとする (図 5 中の実線の矢印)。チャンバー底部はドライアイスで冷却されているので、このエチルアルコールを含む空気は下降し、例えば -20℃ のような低い温度になる (図 5 中の粗い点線の矢印)。この温度での飽和蒸気圧は 0.0036 気圧と非常に低いので、その差 0.0544 気圧 (0.0580-0.0036) のアルコールの蒸気は余ることになり、いわゆる過飽和状態という不安定な状態になる。

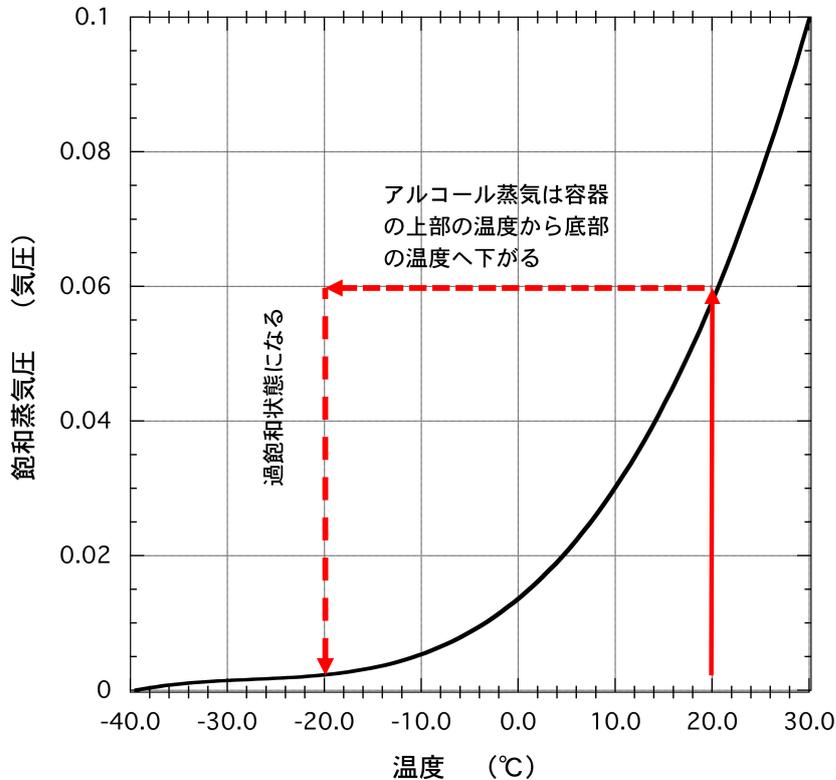


図 5 エチルアルコールの温度と飽和蒸気圧の関係

また外部からの光を抑制し、チャンバー内部の現象を感度良く撮影するため、チャンバー壁面には下部から 80mm の位置まで遮光フィルムを貼った。チャンバー内へ光をあてるため、この部分だけは遮光フィルムを取り外し (チャンバー底部から上部へ 20mm の隙間)、チャンバー外部からスライドプロジェクターを用いて、光を内部へ照射した。内部で起きている現象はチャンバー上部からデジタル CCD ビデオカメラを用いて撮影した。今回の実験で利用した放射源は、図 6 に示すユーロセウム石 (直径 10mm) である。これをチャンバーの底部の中心部に設置した。



図6 実験で使した放射源 (ユークセン石)

4. 実験結果

4.1 放射線の可視化観察

図7は今回の実験で撮影されたチャンバーの様子であり、異なる時間帯で撮影された2枚の写真を示す。全体的に特にチャンバーの右側で白く見えるのは、過飽和状態にあるエタノールの空気の混合ガスがチャンバー内の塵や埃によって白くなっているからである。その中で、時間の変化と共に不規則な方向に筋が走っているのが確認される。

(t_1 sec)



(t_2 sec)



図7 撮影されたチャンバー内の様子

これがユークセン石から出ている放出されている放射線の軌跡である。この部分を拡大した写真を図8に示す。これらの軌跡は放射源であるユークセン石から放射状に不規則に非定常的に放出されているのが確認された。また形成される軌跡の長さはある一定の長さであり、時間の経過とともに消えていく。

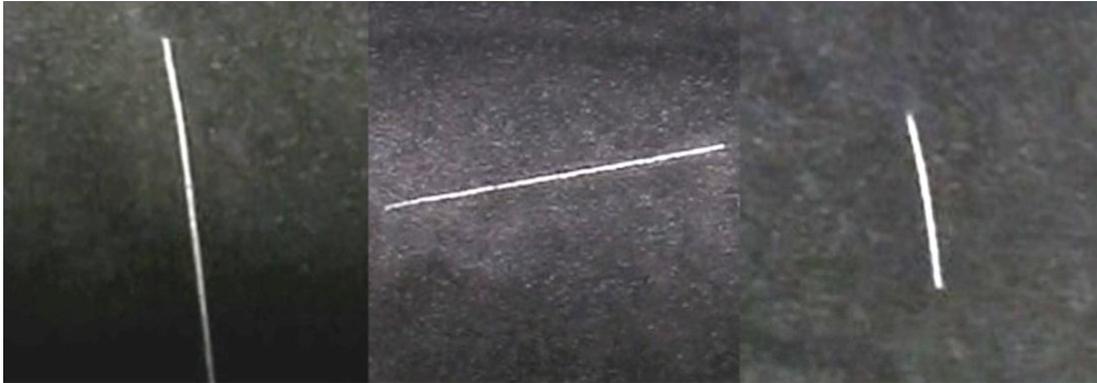


図8 放射線軌跡の拡大写真

4.2 教育上の効果

これまで、放射線の理解につながる活動を行ってきたが、今回高感度で安定的に放射線を観察することができるクラウドチャンバーを製作し、実際に学生達に自分の目で観察してもらい、放射線に対する意識の変化について調査を行った。その結果を図9から図12に示す。アンケートの質問は全部で4つである。先ず問1として、「昨今の放射性物質問題について“怖い”と思っていること」（複数回答可）について6つの中から選択するようにした（図9参照）。この中で一番多かったのが、「放射線が目に見えないこと／存在が分からないこと」であり、今回の研究目的である「放射線の軌跡観察」に対応した結果になった。放射線を理解させるためには、やはり現象をイメージさせる工夫が必要であることが確認された。次に回答が多かったのが、「健康被害」、「放射線の影響」そして「風評被害・経済への影響」であった。

問1. 昨今の放射性物質問題について「怖い」と思っていることを選んで下さい(複数回答可)

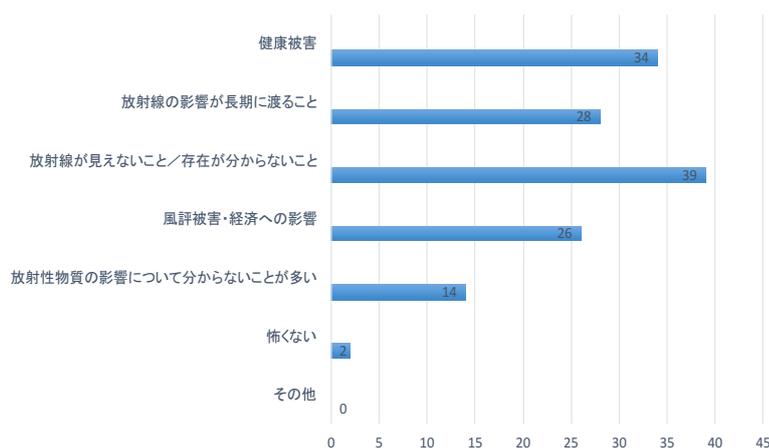


図9 「昨今の放射性物質問題について“怖い”と思っていること」の回答結果

次に図10に「クラウドチャンバーを知っていましたか」について4つの中から選択させた。その結果、大半の学生が「知らなかった」、「初めて見た」ということであり、放射線を実際に観察するのは参加者全員初めてのことであった。

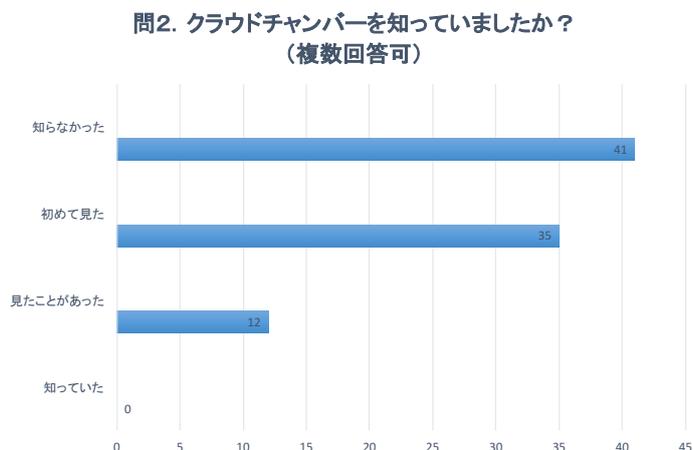


図10 「クラウドチャンバーを知っていましたか」についての回答結果

図11は「日常生活で自分の住む地域の放射線量は気になりますか」について3つの中から選択させた。一番多かったのは「気になっている」という回答だが、一方で「どちらとも」という回答もあり、事故から時間の経過と共に放射線についての意識が低下してきているものと思われる。

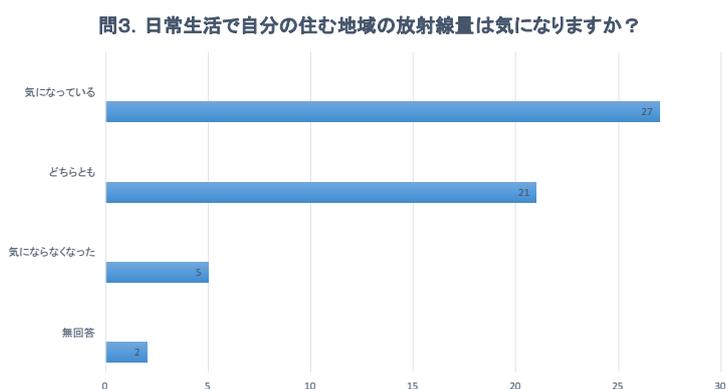


図11 「日常生活で自分の住む地域の放射線量は気になりますか」についての回答

図12は「クラウドチャンバーで放射線を観察した結果、放射線に対する意識は変わりましたか」について、3つの中から選択してもらった。その結果、実際に自分の目で放射線を観察したことから、「放射線に対する意識が高まった」という結果になり、さらに「放射線について学んでみたい」という気持ちも芽生え始めてきた。

以上のことから、放射線教育を学生達に広めていくためには、先ず放射線のイメージを直感的にわかってもらうような工夫が非常に重要であるということがこの結果から分かった。

問4. クラウドチャンバーで放射線を観察した結果、放射線に対する意識は変わりましたか？(複数回答可)

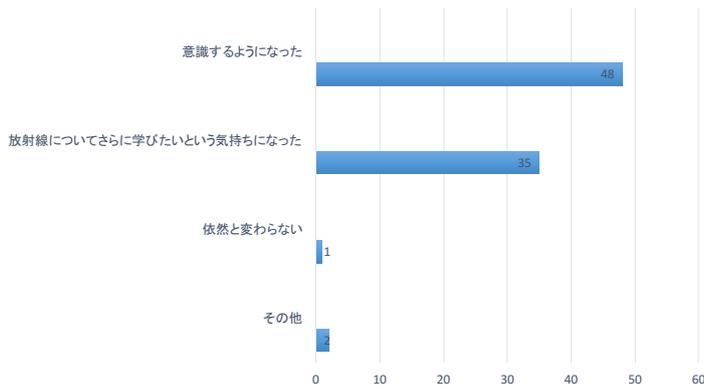


図1 2 「クラウドチャンバーで放射線を観察した結果、放射線に対する意識は変わりましたか」についての回答

図1 3は今回製作したクラウドチャンバー内の現象を真剣に観察している学生たちの姿を示す。

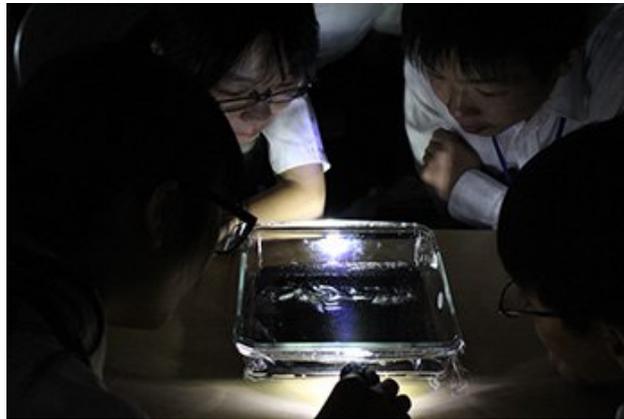


図1 3 放射線観察の様子

図1 4は、後に開催された「放射線に関する講演会」における学生たちである。



図1 4 放射線に関する講演会の様子

4.3 チャンバー内の温度と霧の成長

第3章で述べたようにクラウドチャンバーでは、温度の高い部分で蒸発し、飽和蒸気圧に近い状態になっている気体が、温度の低い部分へ拡散してくると過飽和状態になる。このような気体では、小さな塵などを核として、あるいは大きな攪乱が原因で霧が成長していく。しかし、過飽和の程度が相当大きくなければ、霧は成長を続けることができない。一方、放射線が気体中を走行すると、気体を電離しイオンを生成する。このイオンが核となり、水やエタノールの有極性分子の小さな霧滴が発生する。こうしてできた電荷を持った霧滴は電荷を持たない霧滴に比べて、過飽和の程度がそれほど大きくななくても成長を続けることができる。すなわち、放射線が通過した時のみ、霧滴が成長し、目に見えるようになるということになる。霧の発生の説明にはチャンバー内の温度分布に関する情報が欠かせない。文献[7]では温度分布を理論的に算出しているが、今回我々は実験的にチャンバー内の温度分布を計測し、霧が成長する仕組みについて検討した。

図15はチャンバーをドライアイス上に置いた時からの温度低下の様子を示す。

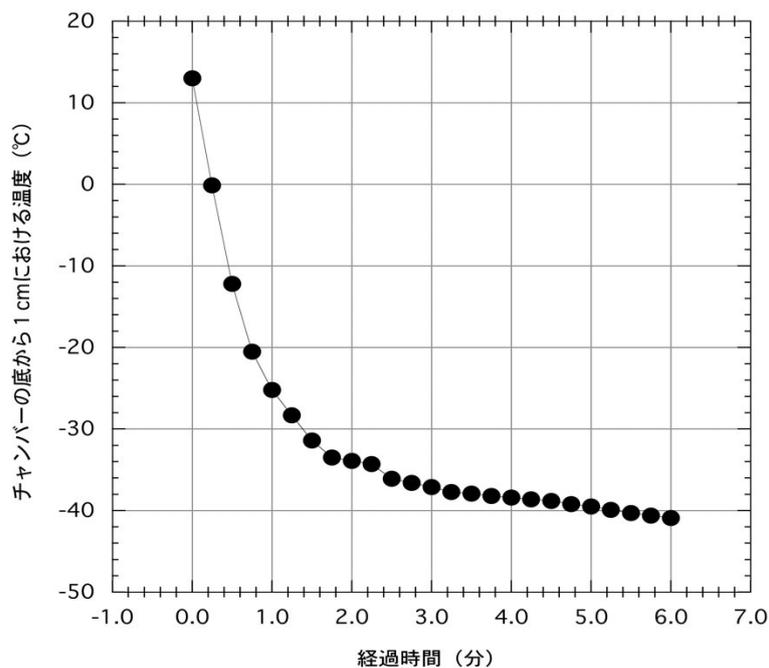


図15 チャンバーをドライアイス上に置いてからの装置内（底から1 cmの高さ）の温度変化

計測は直径0.1mmのW-Re熱電対の先端を装置の中心軸上で底面から10mmの位置に固定した。経過時間4分以降では、ほとんど一定値である -40°C に達するが、実質的には1分から2分で温度は十分に低下している。このことは、チャンバーをドライアイス上に置いてからほとんど1分程度で放射線の飛跡が見え始めていることに対応している。

図16は、チャンバー中心軸上における底面からの高さ方向の温度分布を示す。熱電対の先端の位置を動かすにつれて、ほとんど瞬間的に起電圧変化が得られ、すぐに安定するので、熱電対の熱容量及び外部からの熱伝導の影響は無視できることがわかる。

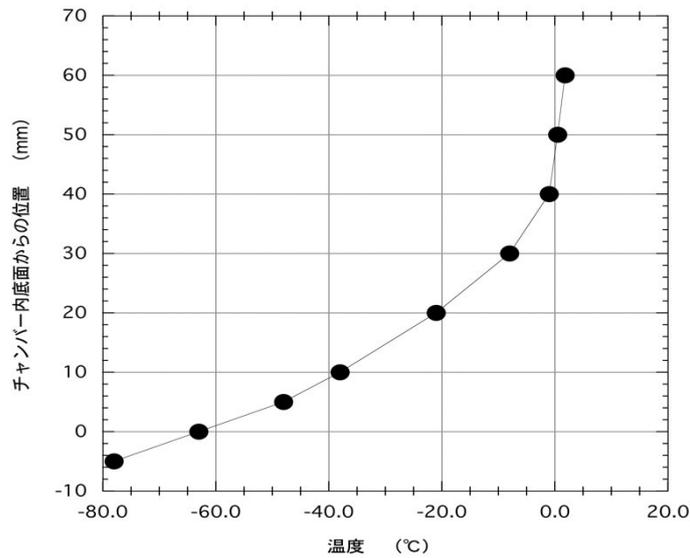


図 16 チャンバー内の中心軸上の温度分布

4.4 霧の成長における表面張力及び静電気反発力の影響

半径 r の液滴の表面エネルギー W_s は、 σ を表面張力 (N/m) とすれば次式で表される。

$$W_s = 4\pi r^2 \sigma \quad (1)$$

表面張力は、表面に仮想的に考えた単位長さ当たりの線に垂直に、表面を引きつけるように働く力 (ファンデルワールス力) であるから、常に表面積を最小に保つように作用する。ここで、この球の半径を Δr だけ増加したときに、表面積が増加することによる表面エネルギーの変化 ΔW_s は次式で得られる。

$$\begin{aligned} W_s &= \frac{d}{dr} (4\pi r^2 \sigma) \Delta r \\ &= 4\pi \left(2r\sigma + r^2 \frac{d\sigma}{dr} \right) \Delta r \approx 8\pi r \sigma \Delta r \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、上式の右辺 2 行目で $d\sigma/dr \approx 0$ としたが、実際 $d\sigma/dr$ は負の極めて小さな値である。結局、液滴には常に半径を小さくしようとする力が働いており、半径を大きくしようとするれば、外部からエネルギーを供給しなければならない。一般に、液面が平面で気中が飽和蒸気圧になっている場合、気中から液面にそうとつしてトラップされる分子の数は等しく、液面の位置は変化しない。もし、ほんのわずかでも過飽和蒸気圧になっていれば液面は上昇する。しかし液滴の場合、球が大きくなるには表面エネルギーが増加しなければならないので、飽和蒸気圧よりもかなり高い過飽和蒸気圧がなす仕事が必要なければ液滴は大きくなれない。式 (2) で示すエネルギーが供給されて初めて球は大きくなる。

一般に、圧力 p 、体積 V 、絶対温度 T の理想気体の状態方程式は $pV = nRT$ で表される。ここで、 n はモル数、 R は気体定数で $8.31451 \text{ (J/mol} \cdot \text{K)}$ である。

いま、液滴の周辺の体積 V に含まれる蒸気を過飽和になっている圧力 p から飽和圧力 p_0 まで低下 (膨張) することによって、液滴の半径 r が大きくなる場合を考えてみる。

この場合に、蒸気がする仕事 W_j は、

$$W_j = - \int_p^{p_0} V dp = - \int_p^{p_0} \frac{nRT}{p} dp = nRT \ln \frac{p}{p_0} \quad (3)$$

いま、半径 r の液滴が半径 Δr だけ大きくなる場合には、この増加に必要な分子のモル数 n は、 ρ を液滴の密度、 M を分子量とすれば次式で表される。

$$n = \frac{4\pi r^2 \rho \Delta r}{M}$$

したがって、このときに過飽和蒸気が外部にする仕事は、

$$\Delta W_j = \frac{4\pi r^2 \rho \Delta r}{M} RT \ln \frac{p}{p_0} \quad (4)$$

$\Delta W_j = \Delta W_s$ を満たす式は、平衡に達する半径と過飽和に達した気体の割合（過飽和度 S ）の p/p_0 の関係を示す。この平衡を与える割合を $(p/p_0)_B$ とすれば、

$$\frac{4\pi r^2 \rho \Delta r}{M} RT \ln \left(\frac{p}{p_0} \right)_B = 8\pi r \sigma \Delta r \quad (5)$$

したがって、以下の式を得る。

$$\left(\frac{p}{p_0} \right)_B = \exp \left(\frac{2M\sigma}{RT\rho r} \right) \quad (6)$$

エタノールに対して、 $M = 46$ 、 $\sigma = 26.8 \times 10^{-3} (N/m, at -40^\circ C)$ 、 $R = 8.31451 (J/mol \cdot K)$ 、 $T = 233 (K)$ 、 $\rho = 0.789 \times 10^6 (g/m^3)$ を代入して、 p/p_0 と r の関係を求めたのが、図17の曲線(a)である。電荷を持たない液滴がこの線上にある場合には平衡を保って、その大きさは変化しない。この線よりも下側に液滴Aがある場合には、過飽和度 S が足りないため、液滴は成長せず消えてゆく（ \leftarrow --- A）。一方、線の上側にあるBの場合には、十分な過飽和度があるために液滴は成長する（--- \rightarrow B）。図では矢印は水平に描かれているが、より厳密には左上がりまたは右下がりの若干の傾きを持つ。

次に、半径 r の球表面に電荷 e を持つ球体の場合を考える。この球の静電エネルギー W_e は、

$$W_e = - \int_0^e \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} dq = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (7)$$

いま、この球の半径を Δr だけ大きくしたときの静電エネルギーの変化 ΔW_e は、

$$\Delta W_e = \frac{d}{dr} \left(\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \right) \Delta r = - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r^2} \Delta r \quad (8)$$

すなわち、液滴の半径を大きくしようとするれば、球から外部へエネルギーが放出される。球表面の静電気は相互の反発のために球をできるだけ大きくしようとしている。したがって、静電荷を有する球は、上述の過飽和蒸気圧の低下に伴うエネルギーの供給は少なくてよいことになる。

次に、液滴が電荷 e を持っている場合における平衡条件 $\Delta W_j = \Delta W_s + \Delta W_e$ を満たす関係を求める。

$$\frac{4\pi r^2 \rho \Delta r}{M} RT \ln \left(\frac{p}{p_0} \right)_B = 8\pi r \sigma \Delta r - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r^2} \Delta r \quad (9)$$

故に、

$$\left(\frac{p}{p_0}\right)_B = \exp\left\{\frac{M}{RT\rho}\left(\frac{2\sigma}{r} - \frac{e^2}{32\pi^2\epsilon_0 r^4}\right)\right\} \quad (10)$$

式(10)に、 $e = 1.6022 \times 10^{-19}$ (C)、 $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$ (C²/N·m²)を代入して得た結果を図17の(b)に示す。実線(b)は、平衡を保って、液滴のサイズが変化しない条件を示す線である。この線よりも上の状態にある電荷を持つ液滴Cは成長する。しかし、点Dの状態にある液滴は成長していくにつれて、実線(b)に突き当たる。したがって平衡状態になり、それ以上に半径が大きくなることはない。電荷を持つ液滴が点CやEの状態にある場合には成長を続ける。Fの状態にある液滴は曲線(b)に突き当たり、平衡状態になる。実線(b)のピーク時の液滴の半径は、式(10)を微分して得られる。

$$r = \left(\frac{e^2}{16\pi^2\epsilon_0\sigma}\right) = 8.81 \times 10^{-10} \text{ (m)} \quad (11)$$

この時の p/p_0 は、式(10)に式(11)の値を代入することによって得られ、「イオンリミット」と呼ばれる。これは電荷を持つ霧滴が大きくなっていくのに必要な最低の過飽和度で、ここでは $(p/p_0)_L$ と記述することにする。エチルアルコールの場合、-40℃において3.951であるが、この値以上の過飽和度がなければ、式(11)で示される半径以下の電荷を持つ小さな液滴が成長することはできない。

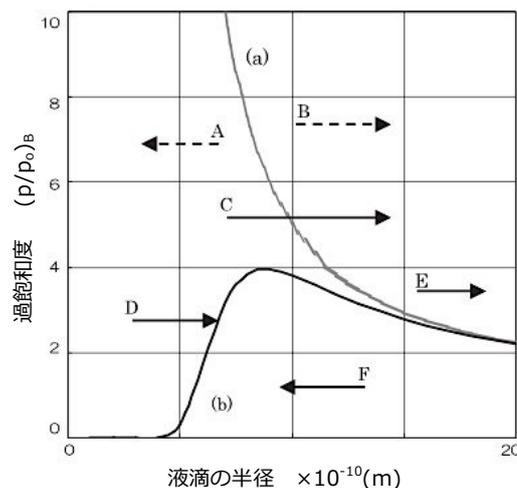


図17 チャンバー内の液滴の半径とその半径が変化しないで平衡状態を保つための蒸気の過飽和度を示す曲線

図18にチャンバー内における霧滴の成長の条件を示す。縦軸はチャンバーの底面からの高さである。下の横軸は、その高さにおけるチャンバーの中心軸上の温度の実測値であり、太い実線で示す。上の横軸は、式(10)にその高さにおける温度を代入して、イオンリミット $(p/p_0)_L$ を計算した結果を示す。上の横軸には、過飽和度 $S(= p/p_0)$ を同時に示す。過飽和度は、文献[7]では複雑な式を用いて計算しているが、本報告では第一近似として、チャンバー内の上部の温度-10℃における飽和蒸気圧を、それぞれの高さにおける温度に対応した飽和蒸気圧で除した値を用いた。したがって、 S の値は正確ではないが、ここでは半定量的な理解には役立つと思われる。すなわち、その場所の

過飽和度 S の値がイオンリミットよりも大きくなければ、小さな霧滴はイオンリミットのピークを超えることができず、成長が止まることになる。 S とイオンリミットの交点は底面から約 11mm の位置にあるので、この高さから下の領域で飛跡が観察できることになる。

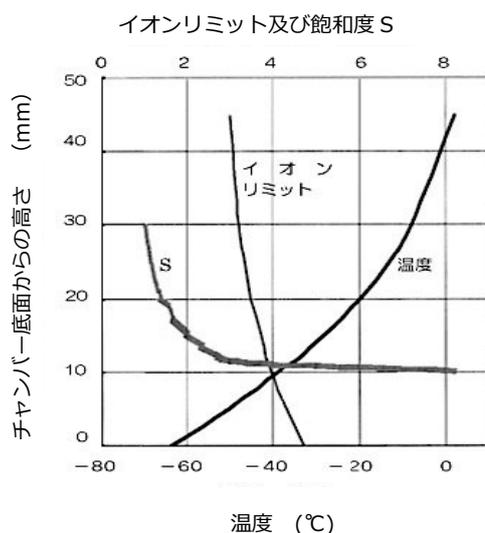


図 1 8 液滴が成長することのできる領域

4.5 チャンバー内温度差の放射線飛跡の数の関係

次にチャンバー内の温度差と観測される飛跡の数の関係を調査した。具体的には、チャンバー内の上面と下面の温度を、それぞれ熱電対を用いた温度センサーによって計測し、ドライアイスによる容器全体の冷却の様子を観察し、さらに上面を加熱して、上面と底面との温度差を作ることで放射線の飛跡の数、見え方の違いを検証した。図 1 9 は上面と底面との温度差を変化させた場合における放射線の飛跡の数の関係を示したものである。なお、放射線の飛跡の数は、デジタルカメラ撮影した動画 (3 分間) で放射線の飛跡の数を数え、放射線の個数として定義した。

上面をヒータを使って温めて温度差を大きくしていくと、観察できる放射線の飛跡の数が増えていく傾向にあるが、温度差 70°C を超えると逆に減少していくことがわかった。

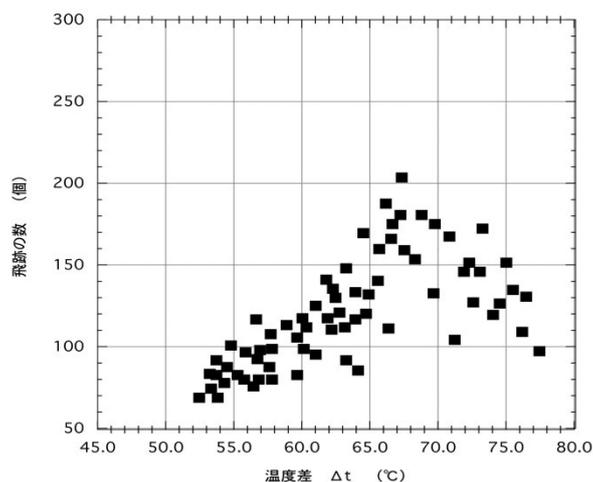


図 1 9 チャンバー上面と底面の温度差と放射線の数との関係

図20は、過飽和領域（チャンバー底面から約10mm付近）の様子を直接側面から撮影した画像を示す。この画像は、同図(a)は実験開始直後で上面を加熱していない状態、同図(b)は上面を加熱した後の状態を示す。飛跡の数、液滴の数共に(b)の方が多く、霧が成長している領域も(a)に比べて(b)の方が大きいことがわかった。

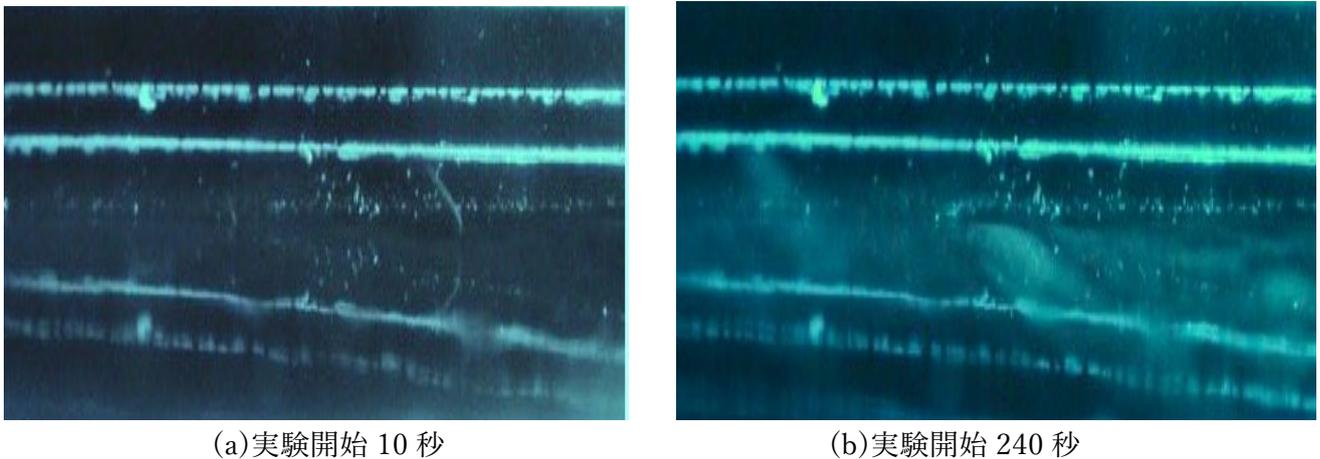


図20 過飽和領域（チャンバー底面から約10mm付近）の様子を直接側面から撮影した画像

5. 結論

これまで報告されてきた放射線観察の方法をもとにして、高感度なクラウドチャンバーの製作を行い、実際に放射線を可視化することによって以下の知見が得られた。

- (1) クラウドチャンバーを製作し、実際にチャンバー内で飛跡している放射線を自分の目で確認することで、放射線について関心が強くなった。
- (2) 放射線の可視化するための過飽和の現象について理論と実験の両方から理解することができた。
- (3) チャンバーを改良することで、放射線の見え方が大きく改善することを経験することができ、「見るだけの実験から実感できる実験」にすることができた。

6. 参考文献

- [1] 米村傳次郎「小学生にもつくれる静電気 GM 巻」物理教育 Vol. 41-2
- [2] 後藤道夫「放射線のルーツを探る」第22回東レ理科教育賞受賞作品集（1990）
- [3] 田中佳典「拡散簡易霧箱で放射線を見よう」1992 青少年科学の祭典・札幌資料
- [4] A.H. コンプトン「光学の一部門としての X 線」
- [5] P.M.S. ブラケット「霧箱による原子核および宇宙線の研究」
- [6] C.T.R. ウィルソン「電離作用をする粒子のイオンと飛程を可視化する霧の方法について」
- [7] 三浦功，菅浩一，俣野恒夫，放射線統計学，裳華房