

# 霧箱を使った科学コミュニケーションのための放射線可視化 システムの開発

北田大樹\*

2012年1月25日

## 論文要旨

本論文は情報メディア技術を用いた科学コミュニケーション手法の開発に関する論文である。福島第一原発事故による放射性物質拡散問題は、発生から10か月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。

このような問題が起きている中で、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化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データの情報を共有する手法を使ったYahoo! JAPANによる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。このようなセンサネットワーク技術、センシングデバイスを利用した放射線計測手法は今後とも改良が進んでいくだろう。

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や現状を知るための情報手段が増えたといえる。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、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課題がある。

本研究では、この課題に対して直感的に放射線理解を行える方法として、科学コミュニケーションと可視化技術に注目している。科学コミュニケーションとは、科学者と一般市民が科学に関する情報のやり取りをするといった科学理解のための手法である。また、可視化技術として、 $\alpha$ 線や $\beta$ 線および $\gamma$ 線といった放射線の存在を白いアルコールの霧として観察できる霧箱という観察装置を用いる。この2つを用いて、市民を対象とした科学コミュニケーション活動を行うことを計画し、双方的なやり取りが行えるワークショップという形で、自作のガイガー・カウンターや霧箱を用いたワークショップを「科学のひろば」、「KAITシンポジウム」で実施した。

また、「科学のひろば」でのワークショップと平成23年度神奈川工科大学公開講座「実感する科学・工学技術」の第2回公開講座「ガイガー・カウンターの原理を実感する」の受講者を対象に放射性物質問題に関するアンケートによる意識調査をそれぞれ実施した。その中でも公開講座で行った意識調査の結果、2時間の座学をもってしても、あいまいな回答しかできないことと仮に放射線が調べられる技術や放射線理解がしやすい教材があったとしても、科学コミュニケーションをしなくては、人々の理解は高まらないのではということを明らかにした。

また、霧箱ワークショップを実施して発見した課題を解決するために放射線可視化システムの動画像処理手法の開発および提案をおこなった。このシステムは、霧箱を使ったワークショップ実施の際に発生した霧箱を同時に観察できる人数が限られる、周囲の光源の関係や容器内を漂うアルコールの霧で放射線の飛跡が観察しにくい、記録として放射線の飛跡が出ている瞬間をカメラで撮影するのが難しいといった問題を解決するものである。この動画像処理手法を使うことで、大型ディスプレイやスクリーン使用による観察できる人数の増加、光源による影響の除去、放射線の飛跡画像撮影の自動化が行えるようになった。

以上、「霧箱を使った科学コミュニケーションのための放射線可視化システムの開発」としてまとめた。

# 目次

<b>1 まえがき</b>	<b>1</b>
1.1 背景 . . . . .	1
1.2 関連活動及び関連研究の動向 . . . . .	1
1.2.1 放射線教育活動 . . . . .	1
1.2.2 震災及び原発事故発生後の草の根計測活動と放射線理解を目的とした活動 .	2
1.2.3 ネットワーク活用による可能性 . . . . .	4
1.3 問題点 . . . . .	6
<b>2 科学コミュニケーションと可視化技術</b>	<b>8</b>
2.1 科学コミュニケーションと可視化の必要性 . . . . .	8
2.1.1 科学コミュニケーション . . . . .	8
2.1.2 可視化技術 . . . . .	8
2.2 ガイガーカウンターと霧箱による放射線の可視化と原理 . . . . .	10
2.2.1 ガイガーカウンターの原理 . . . . .	10
2.2.2 霧箱の原理 . . . . .	12
2.3 霧箱の製作 . . . . .	13
<b>3 ワークショップによる科学コミュニケーション活動と受講者の意識及び理解度の調査</b>	<b>15</b>
3.1 「科学のひろば」での霧箱ワークショップの設計と実施 . . . . .	15
3.1.1 「科学のひろば」の霧箱ワークショップ受講者を対象としたアンケートの実施	17
3.1.2 アンケートの考察 . . . . .	19
3.2 平成23年度神奈川工科大学公開講座「ガイガーカウンターの原理を実感する」 .	20
3.2.1 受講者を対象としたアンケートの実施 . . . . .	21
3.3 アンケート結果から考えられる仮説 . . . . .	26
3.4 KAITシンポジウム2011での霧箱ワークショップの取り組み . . . . .	27
<b>4 霧箱の効果的な画像処理プログラムの提案</b>	<b>29</b>
4.1 霧箱の効果的な画像処理手法の必要性について . . . . .	29
4.2 効果的な画像処理手法の模索 . . . . .	30
4.3 画像処理プログラムの開発 . . . . .	30
4.4 今後の展望 . . . . .	32
<b>5 むすび</b>	<b>33</b>
<b>6 謝辞</b>	<b>34</b>

# 1 まえがき

## 1.1 背景

2011年3月11日に発生した東日本大震災（以下、「震災」）によって引き起こされた東京電力福島第一原子力発電所の原子力事故（以下、「福島原発事故」）発生によって引き起こされた放射性物質拡散問題は、現在も土壤や海洋など周辺環境や飛散による広範囲の汚染、野菜や農作物への影響、局地的に高い放射線量が検出されるホットスポットなど多くの影響を及ぼしている。

このような問題が起きている中で、福島原発事故発生直後から国や行政の被害状況の調査とは別に今、何が起きているのか個人や放射線計測機器を使った草の根的な計測・調査活動をはじめ、様々な分野で調査活動、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ている。

## 1.2 関連活動及び関連研究の動向

### 1.2.1 放射線教育活動

日本科学技術振興財団から小学校～大学教育機関向けに放射線理解を目的とした授業教材「簡易放射線検出装置・はかるくん」（図1.1）<sup>1)</sup>の無償貸出が行われている。こういった授業教材を使って、震災および福島原発事故発生以前から、既に放射線教育を行っている学校もあり、学校によっては放射線教育が行われている<sup>2)</sup>。



図1.1: はかるくん（はかるくん HPより引用）

また、平成24年度の新学習指導要領<sup>3)</sup>において、中学理科第一分野の「科学技術と人間」の「エネルギー資源」の部分で放射線の性質と利用について触れることが決まっている。この授業内容に対応するために放射線分野の指導経験のない教員を支援する活動<sup>4)</sup>や文部科学省が小学校・中学校・高等学校向けに放射線等に関する副読本<sup>5)</sup>の公開が行われるなど、新学習指導要領による放射線教育実施に向けた準備や議論が活発に行われている。

### 1.2.2 震災及び原発事故発生後の草の根計測活動と放射線理解を目的とした活動

震災及び福島原発事故以前は、原子力関連施設周辺に設置されている空気中の放射線量を確認するためのモニタリングポスト<sup>6)</sup>（図1.2）や原子力施設の社会理解を深める活動などに限定されていた計測活動であるが、震災および福島原発事故発生直後から実際に自らガイガーカウンターをはじめとする放射線計測機器を入手または自作し、草の根的な計測活動に調査を行い、その計測された放射線量等のデータを情報共有するために公開する個人や団体が現れた。

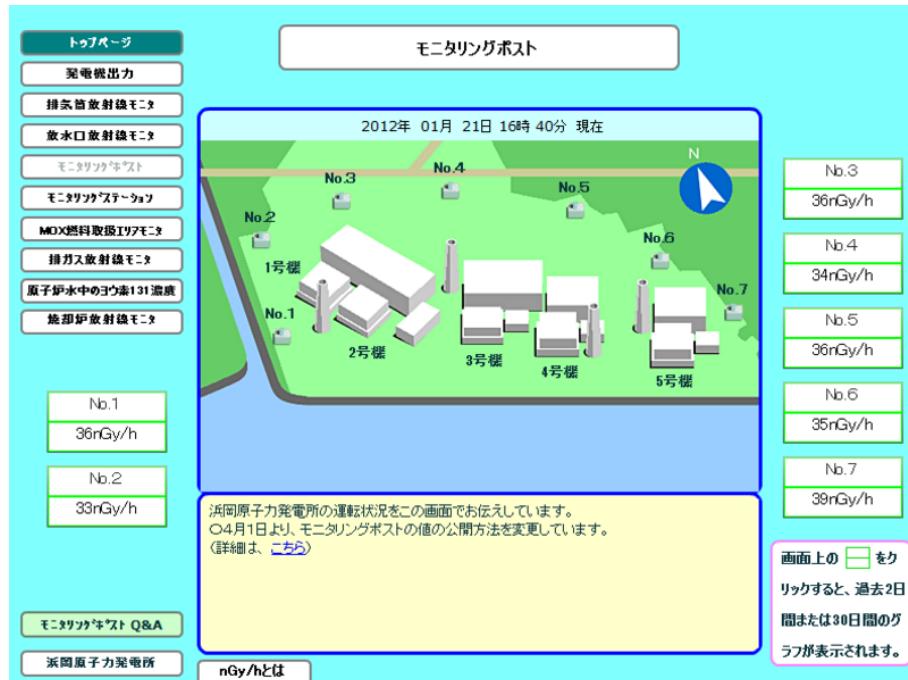


図 1.2: web サイト上で公開されているモニタリングポスト情報 ( HP より引用 )

主に計測活動を情報共有する手段としては、福島原発事故発生直後にガイガー・カウンターを使って、計測している様子を動画共有サービス「Ustream」で配信したり、個人が所有する web サイトやブログなどの CMS ( Contents Management System ) や様々な地域で計測したデータや有益な情報をまとめることを目的とした web サイトに情報を公開するなど様々な方法で情報の共有が行われている。なお、ネットワークを活用した事例に関しては少々節 1.2.3 にて詳しく紹介を行う。

このような草の根計測活動は、福島原発事故の被害の状況や放射性物質拡散の被害が明らかになるにつれて増加した。同時に一般家庭でも自分の住む地域の放射線量を確かめるために放射線線量計を購入するケースが増加するなどして、ガイガー・カウンターなど放射線線量計が品薄となり、入手が困難になった。入手が難しくなった背景としては、放射線を扱う職業（医療・原子力関係）や研究関係者など限られた分野で利用される計測器であり、そのため、生産規模の少ない・校正作業に時間がかかり、増産が難しいためと分析されている<sup>7)</sup>。こういった品薄の状況の中で、中国やロシアなどといった海外製の放射線量計が輸入され、市場に流通してきた。例として、中国製ガイガーカウンター FJ2000 を挙げる（図1.3）。



図 1.3: FJ2000  $x\gamma$  個人用線量計

このガイガー・カウンターは、5万円で研究調査用に購入したものである。付属品として日本語のマニュアルが同梱しているが、誤字や文法的におかしく、特に使い方や仕様に関しては、不明瞭で理解しにくいものであった。また、のちに国民生活センターから調査・発表された「比較的安価な放射線測定器の性能」<sup>8)</sup>にて、測定値にはらつきや信頼に欠ける製品であることが分かった。このように市場に流通している製品の中には、性能に問題があるものや測定器としての性能の詳細や説明が不十分であるものも存在する。また、一般市場に流通しているものは、サーベイメータ（図 1.4）<sup>9)</sup>のような信頼度の高いものではなく、簡易的な放射線量計であり、計測されたデータは鵜呑みせず、正しい測定知識を元に判断する必要がある。



図 1.4: 日立アロカメディカル製 GM サーベイメータ TGS-131 (日立アロカメディカル HP より引用)

しかしながら、ガイガー・カウンターの使い方を学ぶ機会は福島原発事故発生以前から行われていなかった。この状況を改善しようと、ガイガー・カウンターに関する正しい使い方と放射線に関する知識を学べる場として、購入したガイガー・カウンターなどの放射線量計を持ち寄り、正しい使い方を学ぶ講座を行われている。例としては、「ガイガーカウンターミーティング」<sup>10)</sup>という活動である（図 1.5）。また、ガイガーカウンターミーティングの他にも、実際にガイガー・カウンターを自作することで動作原理を理解し、放射線知識を学ぶハンズオン形式の講座も行われている<sup>11)</sup>。このように福島原発事故発生によって必要になった放射線知識を補うための機会を作る活動も草の根計測活動と同じく活発的に開かれるようになった。



図 1.5: ガイガーカウンターミーティングの様子（公式 HP より引用）

### 1.2.3 ネットワーク活用による可能性

少々節 1.2.2 で触れたように草の根計測活動における情報共有の方法において、ネットワークを活用した方法が多く用いられている。ネットワークを利用した活用した事例として、まず一つに「Radmonitor311 放射線量モニターデータまとめページ」<sup>12)</sup>（図 1.6）を挙げる。

この web サイトでは、Google が提供する web サイト上で動作するワードプロセッサソフト Google Docs の表計算機能をもった Google スプレッドシートを使って国や行政機関が提供する計測データをスプレッドシート上に入力することでデータベース化を行っている。

このスプレッドシートによるデータベースは、国や行政、東京電力から提供される放射線計測データをはじめ、機械可読なデータとしてデータ形式をそろえることで、グラフによる可視化や同じような方法で計測している地域との比較を行うためのデータの中間集積所のような役割を果たしている。こういった機械可読なデータを作成し、データベース化および可視化を行う活動は、放射線計測以外にも PDF 形式で配布されていた東京電力の計画停電（輪番停電）の際にも行われた。また、スプレッドシートや人間の手による入力作業をせず、放射線計測機器から自動的ネットワークを介して、データを取集する仕組みもすでに実現している。その一つが、Pachube<sup>13)</sup>（パッチベイ）を使った放射線計測である。

Pachube は、センサーから読み取ったデータをリアルタイムにタグ付けと共有が行える web サー

福島第一原発放射線量観測データ

福島県内各地方 環境放射能測定値(暫定値) (第XXX報)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	http://www.pref.fukushima.jp/j/index.htm 1時間毎の更新ですが、たまに断接があります。														すべての数式を表示	
2	福島県内各地方 環境放射能測定値(暫定値) (第XXX報)															
3	単位:μGy/h															
4	県北地方		県中地方		県南地方		会津地方		南会津地方		相双地方		いわき地方		文科省モニタリングポスト	
5	月 日	福島市農土保 健福祉事務所 事務局北側駐 車場	測定時刻	本宮市役所 同庁舎3階	郡山市農中合 田村市船引田 村総合体育館	玉川村福島空 港	白河市県南合 同庁舎駐車場	会津若松市会 南会津町南会 南相馬市南相 馬合同庁舎新 第2階	会津若松市会 南会津町南会 南相馬市南相 馬合同庁舎新 第2階	いわき合同庁 舎駐車場	伊達市役所	二本松市役所	田村市役 政局駐			
6	平常値	0.04	-	0.04-0.06	-	-	0.04-0.05	0.04-0.05	0.04-0.06	0.05	0.05-0.06	-	-			
7	2011/03/11	18:00					0.05									
8		20:00					0.06									
9		22:00					0.06									
10	2011/03/12	0:30					0.05									
11		3:00					0.06									
12		6:00					0.05									
13		8:00					0.06									
14		10:40					0.05									
15		15:30					0.06									
16		17:00					0.05									
17		17:46														
18		20:00					0.05									
19		21:00														
20		22:00														
21		22:57														
22		23:00					0.05									
23		23:52														
24	2011/03/13	2:00					0.06									
25		3:40					0.06									
26		6:10					0.05									
27		7:00					0.06	0.06	0.06		3.59	0.08				
28		7:23														
29		8:00	0.04				0.06	0.06	0.05		4.11	0.08				
30		8:30														
31		9:00	0.05				0.06	0.05	0.06		4.02	0.09				
32		9:15														

図 1.6: Radmoniter311 で行われている Google スプレッドシートを使った放射線量の記録 ( HP より引用 )

ビスである。この Pachube を使って、ガイガー・カウンター等の放射線計測機器から自動で計測値を取り出せるように電子回路に改良を施すことでネットワークを介して、Pachube 側にデータを送信する。これにより、計測値をリアルタイム計測し、計測データを情報共有させることが可能になる。また、Japan Geigermap : At-a-glance<sup>14)</sup> ( 図 1.7 ) のように世界中の放射線データを共有することを目的としているボランティア組織「SAFECAST」<sup>15)</sup>、個人、政府から提供されている Pachube を使った日本各地の計測データを視覚的に分かりやすくまとめられた web サイトも運営されている。特に震災および福島原発事故発生後に発売した放射線計測機器では、外部へのデータ出力機能が搭載されているものが増えたり、Arduino<sup>16)</sup> や mbed<sup>17)</sup> といったハードウェアを使ってネットワークが扱える放射線計測機器を自作し、ネットワークを使った活動が簡単に行えるようになった。

また、同様に Yahoo JAPAN! でも、慶應義塾大学の「地球環境スキャニングプロジェクト」と「SAFECAST」によって観測されたデータを元に放射線量リアルタイム表示 web サービス「放射線情報」<sup>18)</sup> ( 図 1.8 ) を開始した。先程の Japan Geigermap : At-a-glance と同様に日本地図上に全国の計測地点とその放射線量を地図上にマッピングしており、約 5 分ごとにほぼリアルタイムで各地点の詳細情報および、24 時間、直近 30 日・直近 90 日間の平均値をグラフで表示することができる。

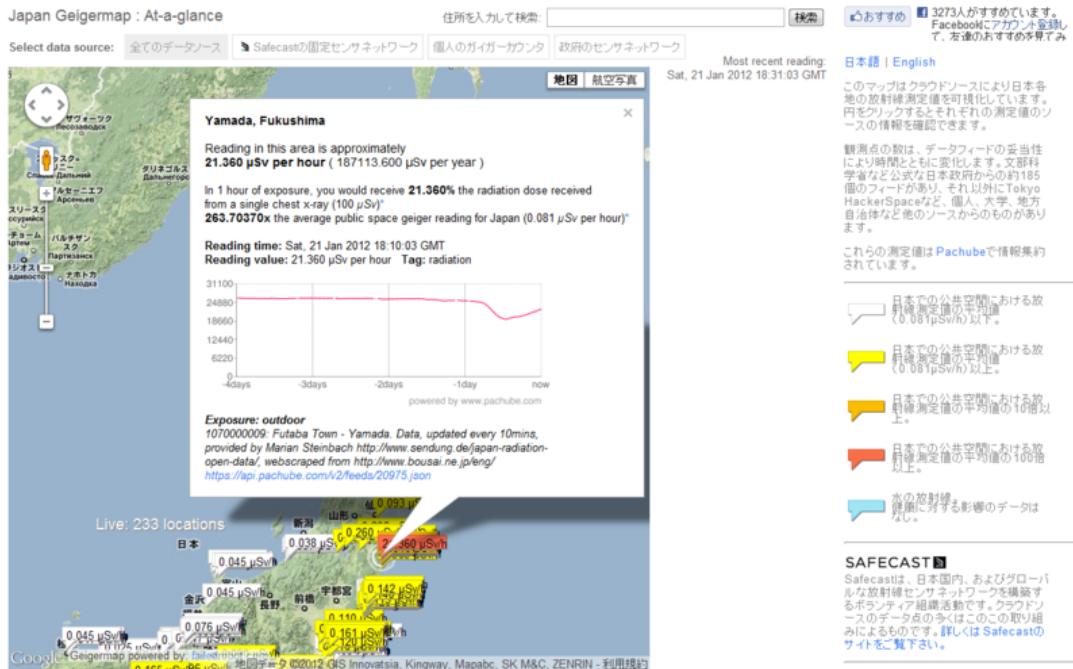


図 1.7: Japan Geigermap : At-a-glance ( HP より引用 )

今までに挙げたネットワーク活用手法は、個々人のボランティア活動や、国などの公的機関の公表や、SPEEDI（緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム）の予測情報といった情報に対して、第三者データとして有効に機能する可能性がある。今後もネットワークを介した放射線計測を行うためのセンサーネットワーク技術やセンシングデバイス開発技術の発展が進んでいくだろう。その可能性として、福島県飯館村で行われている携帯電話などの通信技術として使われている3G通信技術とArduinoを使った放射線のモニタリングポスト運用の事例が挙げられる<sup>19)</sup>。こういった3G通信が行える放射線計測機器が普及すれば、有線でのネットワーク接続が困難な地域での計測活動が行えるため、より広範囲のエリアで使用することが可能である。

### 1.3 問題点

小節1.2で挙げたように関連研究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手段が増えたといえる。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。以下にその問題の要因を列挙する。

――問題「放射線を学ぶもしくは教えるということは難しい」――

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。

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 1.8: Yahoo!JAPAN 放射線情報 (HP より引用)

まず、最初に要因(1)はどうしても放射線を学ぶ上で避けて通れないものである。例えば、なぜ放射線が発生するのか理解するのに、「原子核が崩壊する」という答えを知ったところで、そもそも原子核という言葉を知らないければ、理解はあやふやなものになってしまう。

次に要因(2)は、放射線は人間の目では見ることはできないが、当然ながらその実体は存在する。ただし、その実体を知ろうとすれば、その実体は $\alpha$ 線はヘリウムの原子核、 $\beta$ 線は電子、 $\gamma$ 線は電磁波となるが、先程挙げた要因(1)もあって、イメージしづらいものとなる。また、その存在を調べられる方法の一つであるガイガーカウンターなどの放射線計測装置で表される単位はシーベルト [Sv] やグレイ [Gy] といった単位で表される。その単位の前にミリ [m] やマイクロ [ $\mu$ ] といった単位の倍量・分量を 10 進数で表す SI 接頭辞と単位の後に毎時や毎秒といった空間と時間関係の単位がつく。このようにデータを理解するにもある程度の知識が必要になる。

最後に特に要因(3)は大きな問題であるといえる。要因(1)と(2)で挙げた要因を踏まえると、放射線を例え基礎的なレベルまで学ぶには、多くの知識量が必要になる上、教える側も相当工夫して教えなければ、短時間で学ぶ側に理解してもらうのは難しいといえる。特に座学によるテキストをだけを使った方法では、子供や理科嫌いの子供や大人が理解するのは難しいだろう。

現在では、こういった問題を踏まえた上で、教育や放射線理解を目的とした活動が行われていることが多いが、福島原発事故発生直後は少ない状況であった。

そこで、本研究ではこういった問題に対し、科学コミュニケーションと可視化技術に注目し、この2つをうまく組み合わせることで、問題解決につながる直観的な放射線理解につながる方法となるのではないかと考えている。

## 2 科学コミュニケーションと可視化技術

### 2.1 科学コミュニケーションと可視化の必要性

本章では、小節 1.3 で挙げた科学コミュニケーションと可視化技術について説明をおこなう。

#### 2.1.1 科学コミュニケーション

科学コミュニケーション (science communication) は、科学者と一般市民の科学に関する双方向的な議論によるやりとりを行うことを目的した活動のことである。歴史的な概要としては、1660 年に設立されたイギリスの科学アカデミーである王立協会を中心に科学を社会ニーズに合わせて応用していく動きが始まり、1820 年代にはファラデーの法則を発見したイギリスの科学者マイケル・ファラデーの指揮によって一般大衆を対象とした「金曜講座」や「クリスマスレクチャー」を始めたのが、初期の試みであるとされている<sup>21)</sup>。この「金曜講座」や「クリスマスレクチャー」は、イギリスで現在も続いている歴史的な科学講座とされている。

一方、日本における科学コミュニケーション活動としては、2005 年をサイエンスコミュニケーション元年と位置づけて、様々な活動を展開している<sup>22)</sup>。

#### 2.1.2 可視化技術

人間の目では見えない放射線を数値などではなく、視覚的に分かりやすい形で解釈できるようになることが、放射線における可視化技術といえる。技術的な例としては、医療用として放射線 ( $\gamma$  線) を使った人体の輪切り写真 (SPECT 撮影法) を撮影する用いられているガンマカメラ装置の技術を応用し、東芝が放射線量の高低を色の違いで表し、カメラの映像と重ね合わせることでホットスポットの特定が行える「ポータブルガンマカメラ」<sup>23)</sup>を開発した。

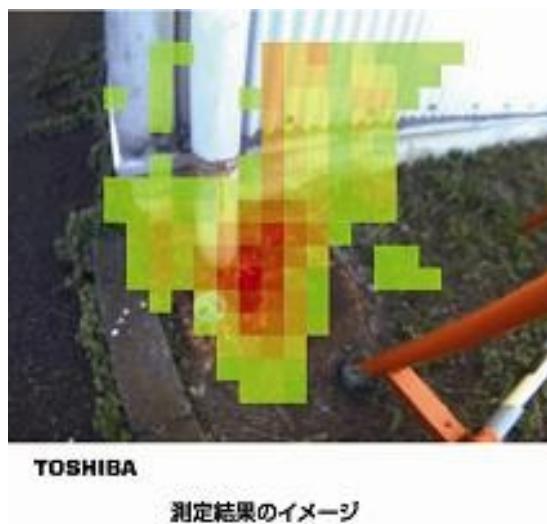


図 2.1: ポータブルガンマカメラ（東芝ニュースリリース HP より引用）

また、計測データを理解しやすい形で可視化することによって、新たな視点や社会理解を形成する活動も存在している。「microsievert.net」<sup>24)</sup>は文科省による都道府県別環境放射能水準調査のデータを元にパーティクル手法を用いて、各地で計測された1時間あたりの環境放射線を可視化したWebサイト（図2.2）である。放射線は、人間の触覚・聴覚・嗅覚・視覚によって存在を感じ取ることができない存在であり、ガイガーカウンターなどの放射線計測装置から得られる[ $\mu$  Sv/h]や[Bq]といった単位で表された計測値から存在を確認することが一般的な放射線の確認方法である。しかし、数値による表現ではどの程度危険なのか感覚的に理解することは難しい。また、その数値をどのように解釈するという点でも知識の有無と年齢によって変わり、人によって違う解釈や間違った解釈をしてしまうことも多い。「microsievert.net」では、パーティクル手法によって降り注ぐ粒子を放射線に例えて、「自然放射線の世界平均」、「東京からニューヨークの航空旅行時に受ける自然放射線」、「避難の準備を始める」、「直ちに避難する必要がある」という4つの参考モデルと関東各地の8ヶ所の可視化アニメーションをしたものである。これらを比較することで言語や知識、年齢に関係なく理解できるという点で評価できるだろう。



図2.2: 関東各地の環境放射能水準の可視化 microsievert.net ( HP より引用 )

## 2.2 ガイガーカウンターと霧箱による放射線の可視化と原理

前節にて、可視化技術の例として挙げた方法以外にも、放射線を可視化する手段として、放射線の研究や観察、新しい粒子の発見など研究分野で使われてきたガイガーカウンターと霧箱という観察装置が存在する。霧箱とは、 $\alpha$ 線や $\beta$ 線、 $\gamma$ 線といった荷電粒子（電荷を帯びた粒子）の飛跡（放射線が通過した跡）を観察することができる観察装置で、人間の目で放射性物質から出る放射線や自然に存在する自然放射線など放射線の存在を可視化することで確認することができる。こういった放射線の存在を知る方法としては、ガイガーカウンターなど放射線計測機器を使うことが多い。そこで、ガイガーカウンターと霧箱の原理を比較し、まとめたものを少々節2.2.1と2.2.2に列挙する。

### 2.2.1 ガイガーカウンターの原理

放射線計測機器の例として、CQ出版社から販売されているガイガーカウンター「ガイガーカウンタ・パーツ・セット」を例に説明を行う（図2.3）。

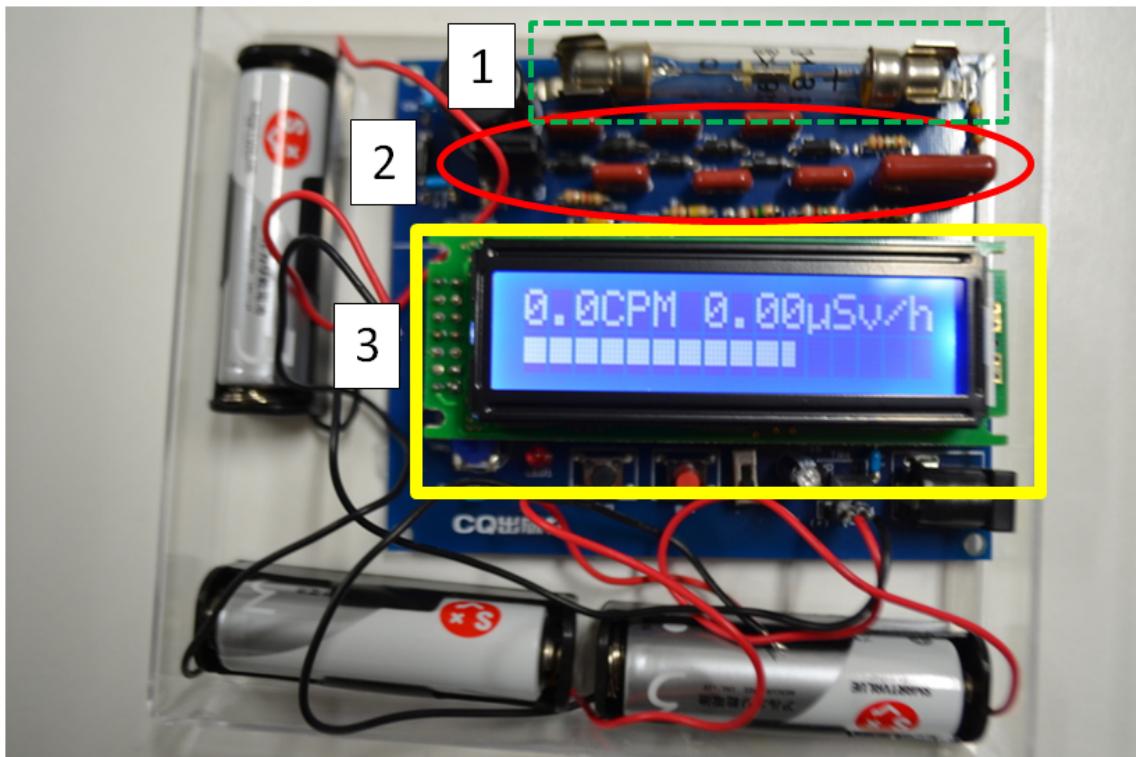


図2.3: ガイガーカウンターの各部詳細

緑色の点線の枠[1]の部品は、放射線計測を行う部品であるGM管である。赤い円の枠[2]の部品はGM管を動作させるための高電圧を発生させる部分、黄色い枠[3]は、ICやLCD、トランジスタなど制御・出力・放射線のカウントに使う部品で構成されている部分である。また、このガイガーカウンターに用いられているGM管は、ロシア製のCI-3GBというGM管である（図2.4）。

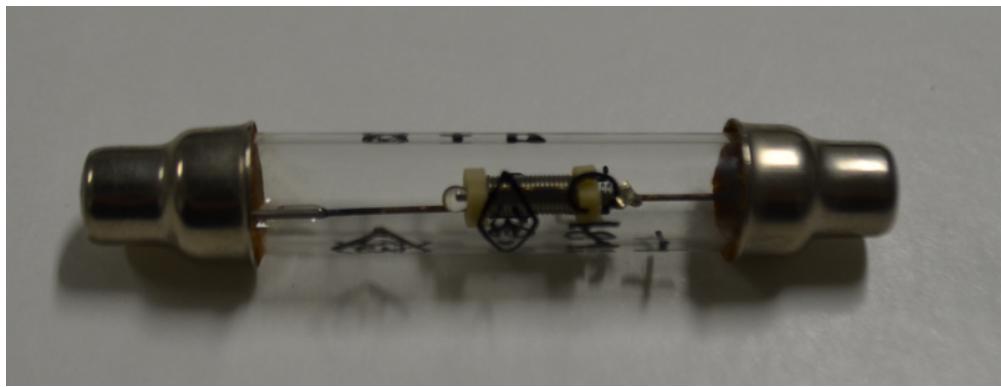


図 2.4: ガイガーミュラー計数管（ロシア製 CI-3GB）

GM 管に共通する簡単な原理としては、 $\beta$  線のような電離作用（原子の電子が飛び出して、原子をイオン化すること）を及ぼす放射線が計数管の中を通過し、計数管内に充填されているガスの分子（その物質が持っている最少の粒子）を電離することで発生するパルス電流と呼ばれる電流の発生回数を数え、CPM (counts per minute) と呼ばれる単位を用いて計測を行う点に特徴がある。これは、1 分間あたり放射線を計測した回数を表している。そして、この CPM からシーベルト [Sv] に変換し、計測値が表示されるものが多い。また、こういった放射線計測機器には、すべての放射線が計測できるのではなく、機器の種類によって計測できる種類の線種が異なる。

これは、放射線の通過力（図 2.5)<sup>25)</sup> が関係している。例えば、例として挙げているガイガーパンチ CI-3GB では、 $\alpha$  線は計測できない。図 2.5 で定義されているように、 $\alpha$  線は紙程度の障害物で通過をせずに遮蔽されてしまうからである。例えば、アルファ線を測定する場合はそれに対応した放射線計測機器を使うなど、測定する目的や線種によって、使い分ける必要がある。

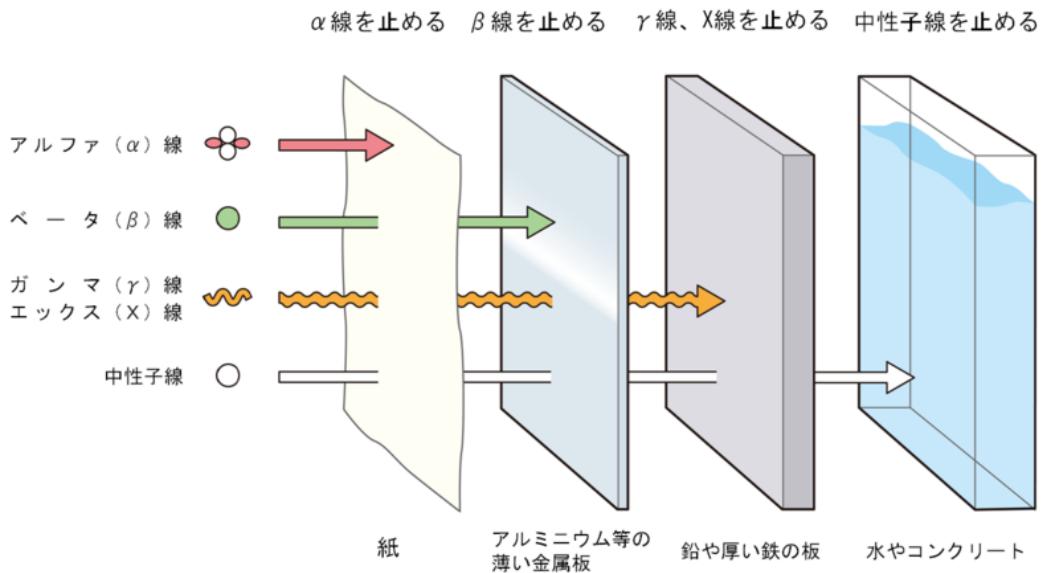


図 2.5: 各放射線の通過力

## 2.2.2 霧箱の原理

霧箱とは、小節 2.2 で述べたように  $\alpha$  線や  $\beta$  線、 $\gamma$  線など放射線の飛跡を観察できる装置である。先ほどのガイガー・カウンターとは比べると、放射線量の調査のために使われるものではなく、放射線研究のために用いられてきた装置である。現在は、研究用としての役割を終え、学校などの放射線教育の教材等で使われることが主流となっている。こういった霧箱の主な種類としては、イギリスの科学者ウィルソンが 1897 年に原理を発見し、1911 年に完成させた断熱膨張型霧箱（ウィルソン霧箱）と断熱膨張型霧箱を連続して観察できるようにラングスドルフが発明した拡散型霧箱の 2 種類がある。本研究では、ラングスドルフが発明した拡散型霧箱を調査の対象として用いる。

この拡散型霧箱は原理としては、ガラス容器内にアルコールを注ぎ、ドライアイスで底を冷却し、容器内の上で下で急激な温度勾配を作り出すことで、下部分に気化したアルコール蒸気による過飽和状態を生み出す（図 2.6）。この生み出された過飽和状態は不安定なもので、アルコール分子はお互いに結びつこうとする働きを生む。この過飽和状態の中に放射線が通ることで、通った線に沿って、容器内の窒素と酸素の期待分子の電子が跳ね飛ばされ、イオンが発生する。このイオンが核となり、アルコール分子が結びつこうと働き、凝結して液滴を作ることで、アルコールの霧として放射線の通った跡を可視化することができる<sup>26)</sup>。

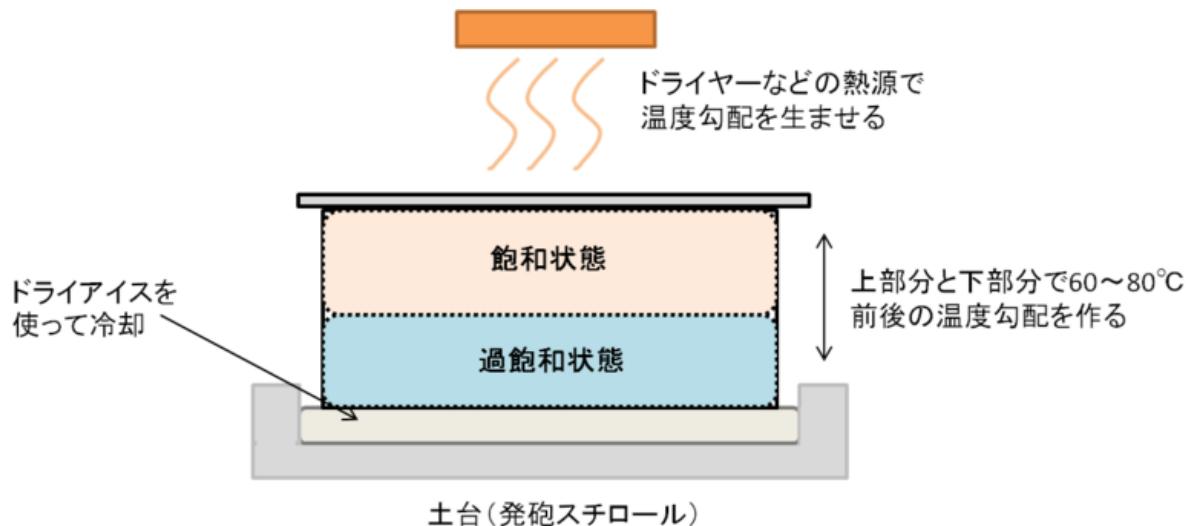


図 2.6: 拡散型霧箱の容器内の状態図

図 2.7 は実際にケニス株式会社で販売されている理科教育実験用拡散型霧箱「簡易霧箱セット KD」を使って、放射線を可視化している様子を撮影したものである。これは、 $\alpha$  線を出す放射性鉱石であるユークセン石を霧箱容器内に入れ、ユークセン石から出る  $\alpha$  線を撮影したものである。

このように霧箱を使うことで、実際に放射線の存在を可視化することができる。また、放射線が飛んでくる向きが分かる、長さなどから放射線の線種を割り出すことができるといった点や自然放射線や宇宙線も霧箱で可視化することができるので、ガイガーカウンターを使った教材よりも直観的に放射線について理解することができるだろう。

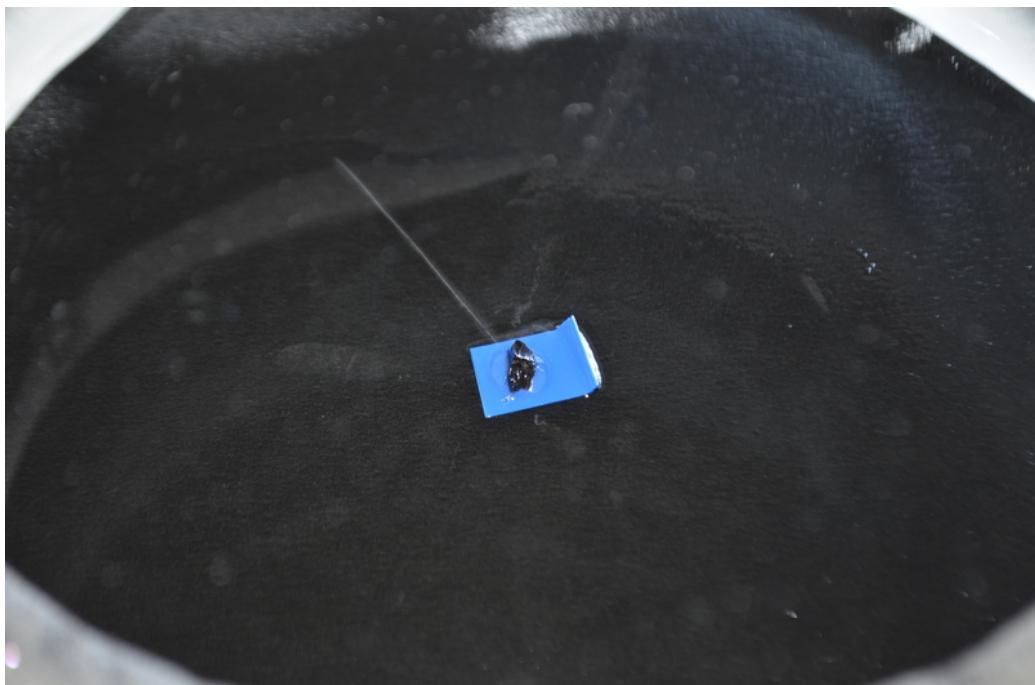


図 2.7: 霧箱内で観察できる放射線

### 2.3 霧箱の製作

本研究では、科学コミュニケーション活動と可視化技術に着目し、調査を進めてきたが、可視化技術に関しては特に霧箱に集中して研究している。上記のように「向き」や「線種」、「簡易的な材料で作ることができる」という点が本研究の課題に結びつくからである。また、一般市民に向けた予備実験として、2011 年 5 月 21 日の神奈川県青少年センターと神奈川工科大学主催の「科学のひろば」にて霧箱を使ったワークショップを実施するにあたり、市販品である株式会社ケニスで販売されている拡散型霧箱を使うほかに長時間展示を行うことも考えて、予備として拡散型霧箱の自作を行った。次の表 1 にて拡散型霧箱の材料を列挙する。

表 1: 霧箱の材料

品名	用途
パイレックス容器	霧箱の容器として使用
アクリル板	霧箱の容器の蓋として使用(サンラップで代用可)
すきまテープ	容器内でのアルコールの液溜め用
無水エタノール	アルコール蒸気発生用
ドライアイス	容器の冷却材
塩化ビニールパイプ	雑イオン除去用
黒紙	容器底を観察しやすくするため
発砲スチロール	霧箱容器の土台として使用

霧箱の製作には、特殊な技術や加工は必要なく、表 1 で列挙した霧箱の容器となるパイレックス容器の上部分にすきまテープを張り、容器の底に合うサイズの黒紙を容器の底に張り付けることで完成する(図 2.8)。土台となる発砲スチロールは、容器の底の大きさに合わせて、容器が埋まるように削ることで、冷却効果の高い土台となる。

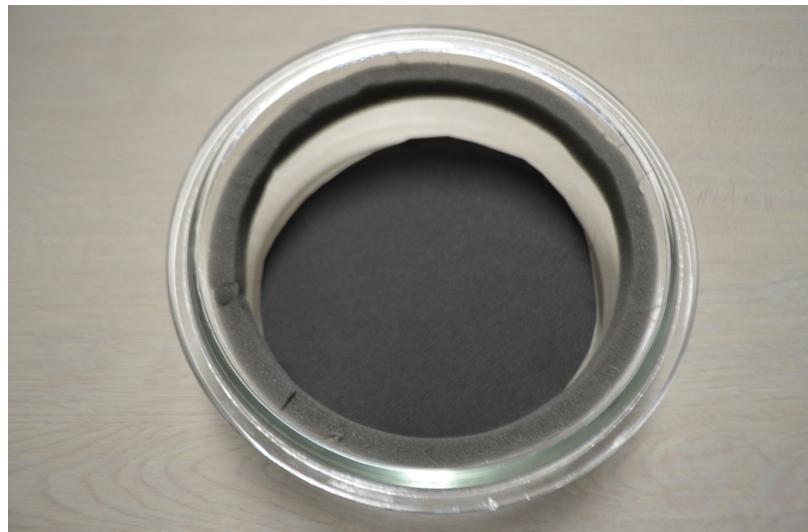


図 2.8: 霧箱容器の完成図

次に、実際に放射線を観察するまでの手順も以下に列挙する。

1. 土台に粉末状のドライアイスを盛り、平らにならし、霧箱容器を置く。少し時間をおいて、容器を冷却し、無水エタノールをすきまテープと容器底の黒紙にかける。
2. 蓋を閉め、容器の上と下で温度勾配が生まれるようにしばらく待つ。
3. 容器内に放射性鉱石を入れて、蓋を閉める。ティッシュ等で塩化ビニールパイプをこすり、静電気を帯電させ、蓋の上から左右に振ることで容器内の雑イオンを除去することで鮮明に放射線の飛跡を観察することができる。

### 3 ワークショップによる科学コミュニケーション活動と受講者の意識及び理解度の調査

#### 3.1 「科学のひろば」での霧箱ワークショップの設計と実施

放射線理解につながる活動および研究の一環として、2011年5月21日の神奈川県青少年センターと神奈川工科大学主催の科学に触れる体験型「科学のひろば」にて霧箱を使ったワークショップを実施することになった。この霧箱ワークショップを実施するにあたって、以下のワークショップの概要設計を行った。

- ( タイトル ): 霧箱でみる自然放射線
- テーマの目的: 家庭でもできる用品の組み合わせで、放射線を観察する霧箱を見て放射線を自分の目で観察する。
- 目標: 目で見えない、よく知らない放射線をただ恐れるのではなく、何がどういった点で怖いのか正しく理解する。
- 効果 : ・福島原発事故について自ら学ぶきっかけをつくる。・放射性物質拡散問題について正しく理解する。

この概要設計に基づき、著作の所属している白井研究室のブース内の一イベントとして、霧箱ワークショップ「霧箱でみる自然放射線」を実施した(図3.1)。



図 3.1: 科学のひろばでの霧箱ワークショップ(全体)

今回、著者である自分が行ったこのワークショップ実施中に行った作業としては、ワークショップの進行役を行っている白井先生のワークショップ進行中の助手的な補佐やワークショップ実施時間以外の展示説明などといった仕事を行っていたが、実際に参加者との生の意見や疑問に関して、参加者側と意見を交わすことができた。また、子供の参加者からはもっと放射線を自分で見てみたいとのことで、図3.2のように自分で実際に霧箱観察を行ったり、子供を持つ大人からは、その当時話題になっていた放射性物質拡散による農作物への影響など今、一般の市民が何を疑問に感じているのか、議論による双方向的なやり取りの中で感じ取ることができた。

今回、実施ワークショップは1回15分程度で設計し、座席は7席ほど用意した。霧箱の冷却のためにドライアイスを使用するため危険を伝えつつ、「温度」、「計る」、「二酸化炭素」、「ガイガーカウンタ」、「霧箱」、「ユークセン石」、「ラジウム鉱石」、「ラドン」、「放射線と放射性物質の違い」といったキーワードを伝えながら、ハンズオンの実験や時には参加者の子供たちが手を動かして、実演を終えた。



図3.2: 科学のひろばでの霧箱ワークショップ（参加者による霧箱の観察）

### 3.1.1 「科学のひろば」の霧箱ワークショップ受講者を対象としたアンケートの実施

同じブース内で行ったすべての展示物に関する下記のような霧箱ワークショップ受講者および見学者を対象としたアンケートを実施した。また、このアンケートの結果および結果の分析をおこなった。

科学のひろばのブース内アンケート回答者全体は33人（男性：12人、女性：9人、無回答：12人）で、そのうち、霧箱アンケートに答えたのは、22人（男性：7人、女性：4人、無回答：9人）だった（表2）。

表2: 科学のひろばアンケート回答者（全体）と霧箱アンケート回答者

アンケート（全体）の回答者性別

	人数
男性	12
女性	9
無回答	12
合計	33

霧箱アンケートの回答者性別

	人数
男性	7
女性	4
無回答	9
合計	20

また、アンケート回答者の年齢層は、一番多い年齢層が無回答であったが、10歳以下、10代を合わせて10人おり、回答者の半分を占めている（図3.3）。

アンケート回答者の年齢

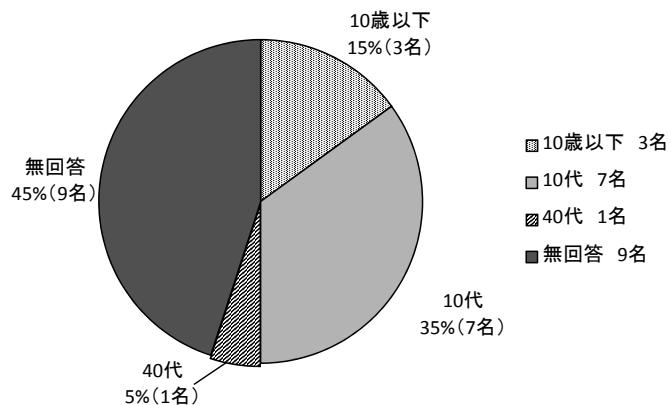


図3.3: アンケート回答者の年齢

問1. 昨今の放射性物質問題について「こわい」と思っていることを1つ選んでください(図3.4)。

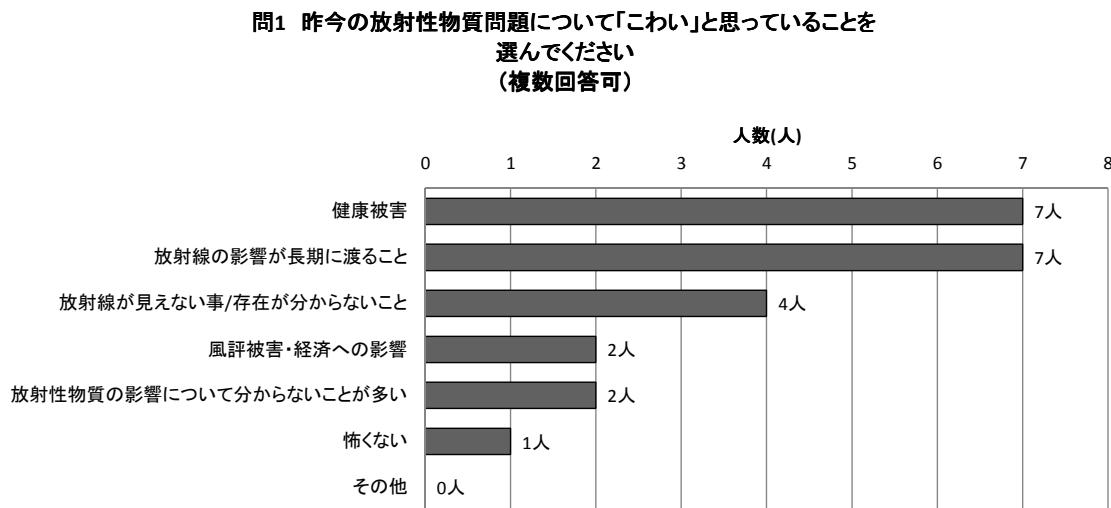


図3.4: 問1の結果

このグラフは、選択肢を選ばれた順に並び替えたものである。やはり、健康被害や放射線の影響の長期化が上位に選ばれている。こわくないを選んだ人の理由も知りたく、別途その理由を書く記述欄を設けたが、無回答だったため理由は分からなかった。

問2. 霧箱を知っていましたか?(図3.5)

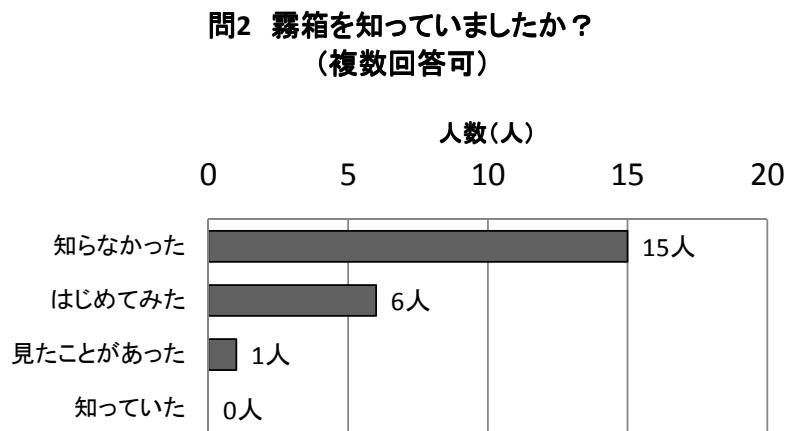


図3.5: 問2の結果

ほとんどの参加者が霧箱を知らないとを選択しており、霧箱はあまり一般的に知る機会がないものということが読み取れる。

問3. 霧箱を使ってみてみたいものはありますか？

一酸化炭素などまったく関係ないものが挙げられたり、ほとんどが無回答であった。

問4. 霧箱のように気軽に放射線を調べられる装置があったら、自分の家に欲しいですか（図3.6）？

#### 問4 霧箱のように気軽に放射線を調べられる装置 があったら、自分の家に欲しいですか？

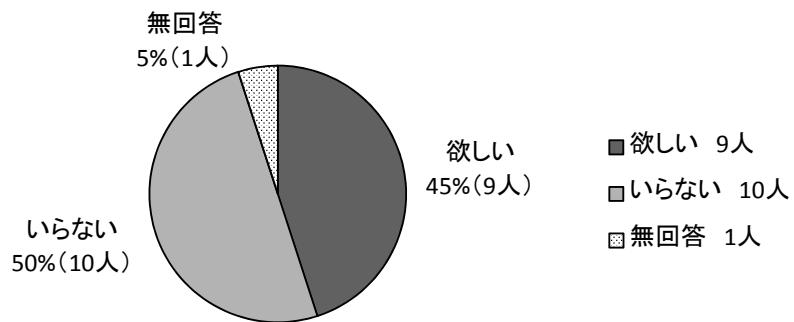


図3.6: 問4の結果

「いらない」が1人の差で欲しいを上回っており、ほぼ半分に意見が分かれた形となった。

#### 3.1.2 アンケートの考察

問1と問2は、ある程度予測できる結果であったが、問4の結果が半分に意見が割れて、「いらない」が上回るのは予想外の結果であった。また、運営的な問題点として、アンケートを書く場所を十分に用意していなかったのもあり、書かずにブースを出していく人も多かった予想される。他の意見としては、子供たちの母親からの意見が多く収集できた。多くの母親は現在（2011年5月）の状況、特に食品について不安を感じているが、ベクレル[Bq]やシーベルト[Sv]の違い、放射線と放射性物質の違いやセシウムやストロンチウムの環境への吸収メカニズムなどデータ読み方については積極的ではなかった。このことから、おおむね本ワークショップによる活動の本音は伝わり、良い反応と手ごたえがあった。

### 3.2 平成 23 年度神奈川工科大学公開講座「ガイガーカウンターの原理を実感する」

2011 年 10 月 1 日に行われた神奈川工科大学公開講座「ガイガーカウンターの原理を実感する」(図 3.7)において、この公開講座を担当する情報工学科の鈴木先生のご協力により、この公開講座の受講者を対象に一般市民向けのワークショップに対し、積極的に科学的知識を得ようとする人々について、その特性を明らかにするべき調査を行った。このアンケート調査では、全 6 問のうち、5 問を放射性物質拡散問題に関する選択式の問題を設け、うち 1 問を 120 分の公開講座の中で解説されたガイガーカウンターの動作原理(図 3.8)に関する記述式の問題を設けた。

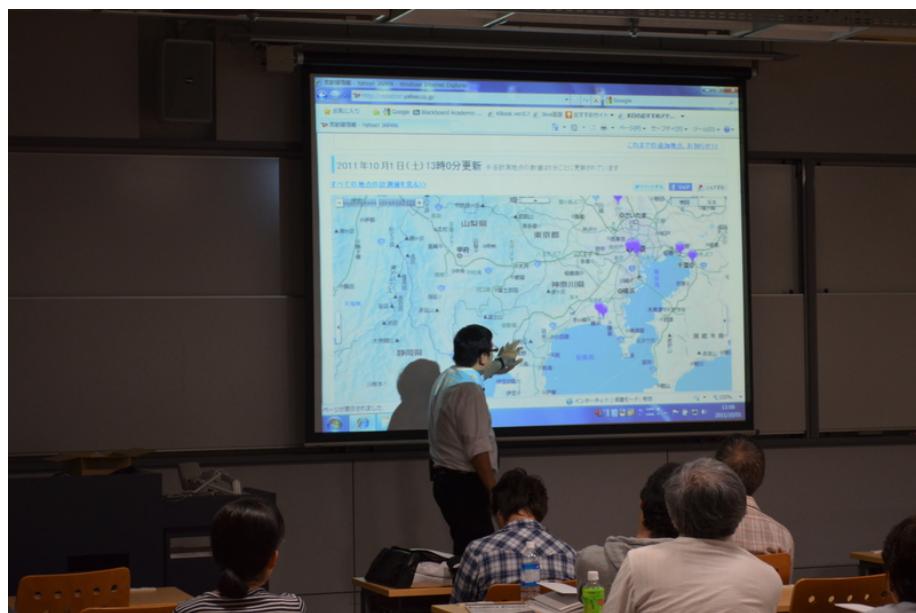


図 3.7: 公開講座の様子



図 3.8: ガイガーカウンターに関する説明をおこなっている様子

### 3.2.1 受講者を対象としたアンケートの実施

アンケートの回答者数（表3）は65人（男性：46人、女性：14人、無回答：5人）である。または性別とは別にアンケート回答者の属性（図3.9）と年齢（図3.10）についても調査をおこなった。

表3: アンケート回答者数

	人数
男性	46
女性	14
無回答	5
合計	65

アンケート回答者の属性としては、神奈川工科大学の学生が40%（26人）・厚木市在住18%（12人）・放射線関係が2%（1人）であった（図3.8）。無回答が神奈川工科大学の学生と同じく40%（26人）占めており、厚木市外からの受講者も含まれるのではないかと推測している。

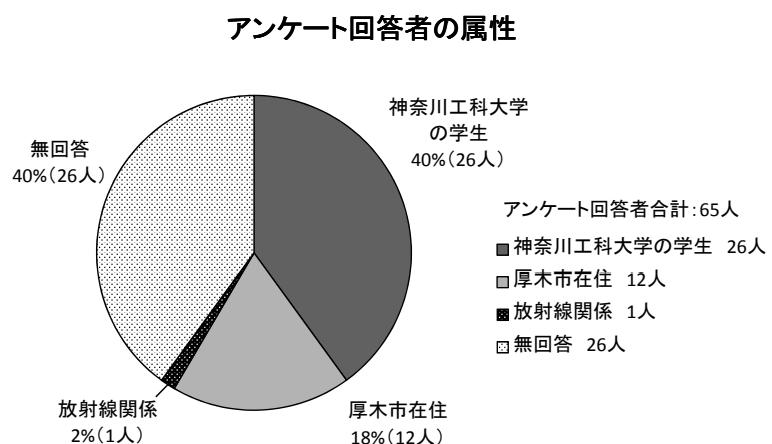


図3.9: アンケート回答者の属性

また、回答者の年代も選択してもらい、年代ごとに分類もおこなった（図3.9）。一番多い年代層としては、20代で30代を除いて、50～70代など幅広い年代が参加しているのが分かる。

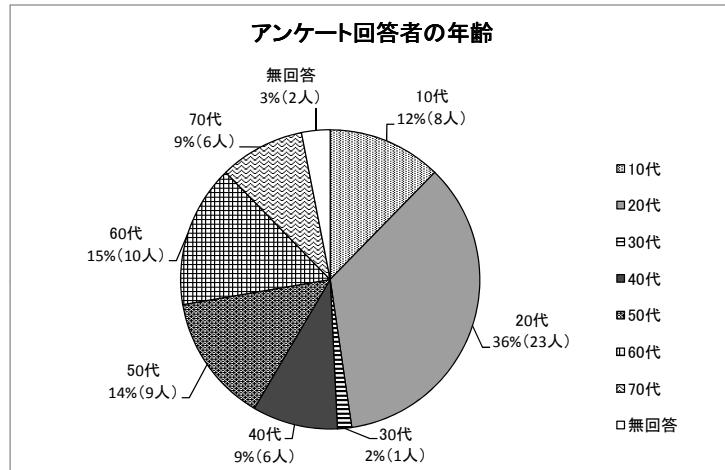


図3.10: アンケート回答者の年齢

1. 今回の公開講座を受けて、放射線量を測定する原理について実感できましたか（図3.11）？

**問1 今回の公開講義を受けて、放射線量を測定する原理について実感できましたか？**

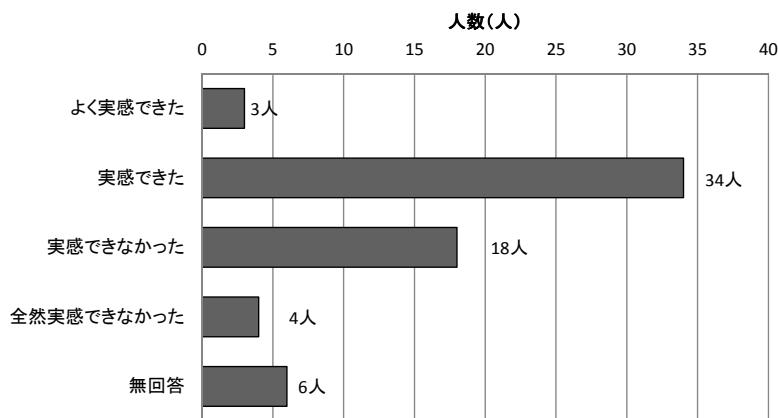


図3.11: 問1の結果

「実感できた」が一番多い回答であるが、「実感できなかった」と答える人も多かった。

2. ガイガーカウンターで、具体的に何が測れるか知っていますか(図3.12)?

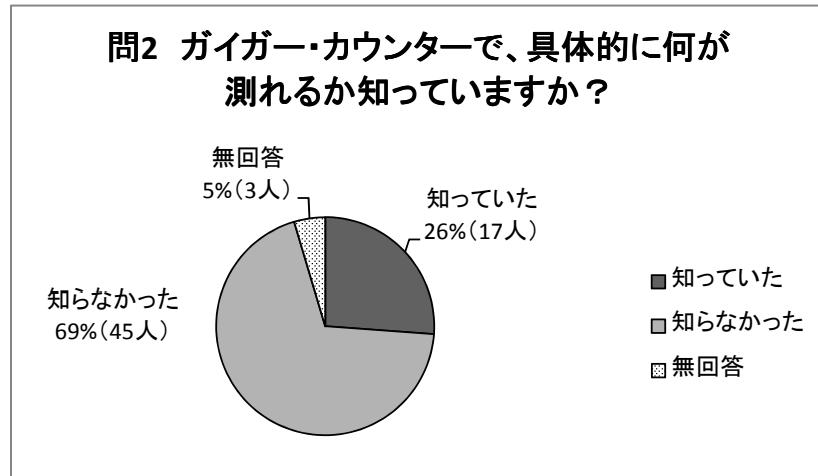


図3.12: 問2の結果

45%の半分以上の人人が何が測れるか知らなかった。

3. 次のガイガーカウンターの原理に関するクイズを答えて下さい。(図3.13)

問題

ガイガーカウンターは(①)線の(②)を測るものである。

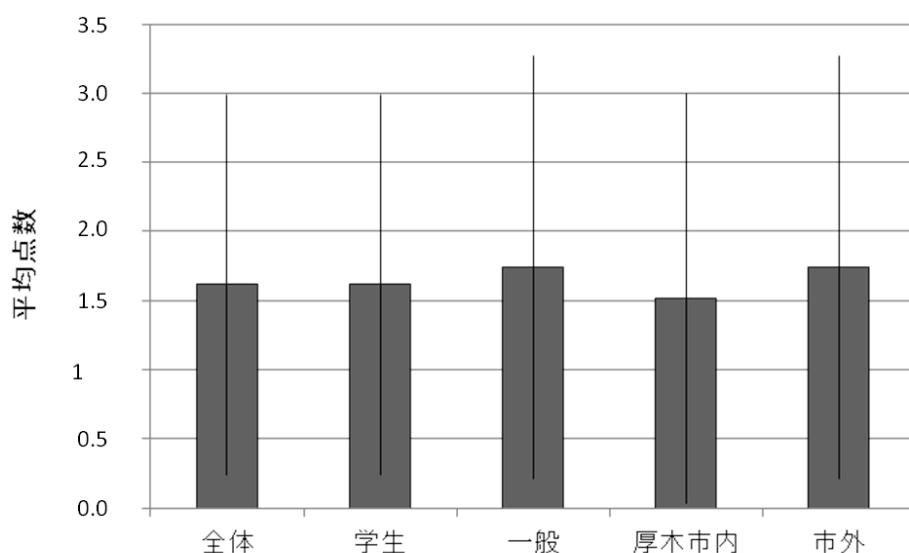


図3.13: 公開講座における受講者の属性と理解度

この問題は、ガイガーカウンターの動作原理についての記述式問題である。回答①の正答は「線」で配点2点あるが、「放射線」といったあいまいな回答は1点、「　　線」といった誤りを含む回答は0点とした。回答②の正答は「CPM ( count per minutes )」もしくは「パルス電流の通電回数」で配点3点であり、一方、「ガイガーカウンター」という「カウンター」が「何を測っているか」という視点に基づき、単に「カウント」、「パルス」、「電離作用によるパルス」、「管壁を通り越す 線」といったキーワードだけでは2点とした。値を比較すると、学生と一般の受講者では、標準偏差に違いが見られた。平均点数は一般受講者よりも低いが、標準偏差は少ないという統計結果が得られた（学生 = 1.38，一般 = 1.53）。希望して受講している一般受講者に対し、受講態度などに問題がある受講生も混ざっていた学生受講者であるが、知識のばらつきは一般受講者のほうが多いという結果であった。また、厚木市内・市外の結果においては、市外の受講者のほうが、平均点数が高かったが、標準偏差は厚木市内の受講者の方が低く、（厚木市 = 1.48，市外 = 1.53）知識のばらつきが市外の受講者よりも少ないという結果が得られた。なお、全問正解者は65人中1人だった。

#### 4. 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？(図3.14)

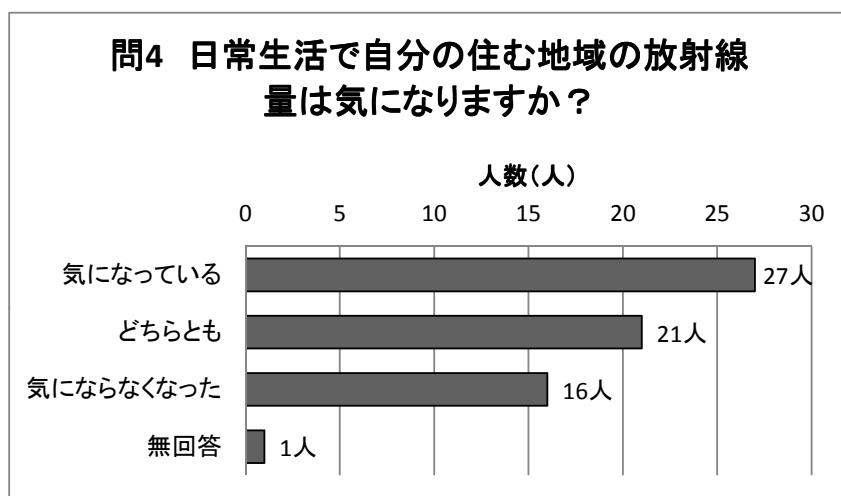


図 3.14: 問 4 の結果

「気になっている」を選んだ人が多いが、「どちらとも」、「気に入らなくなった」も予想以上に多かった。

5. (気になっていると選択した人向け) 自分の住む地域の放射線量の情報をどういった方法を使って入手しますか?(図 3.15)

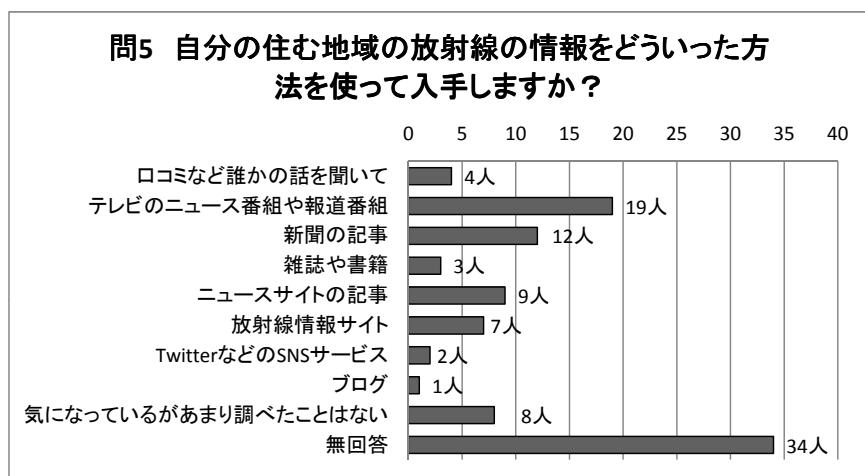


図 3.15: 問 5 の結果

気になっている人のみの選択にかかわらず、無回答が一番多かったのは予想外の結果であった。

(放射線情報サイトを選んだ人向け) 利用しているサイトを教えて下さい。(図 3.16)

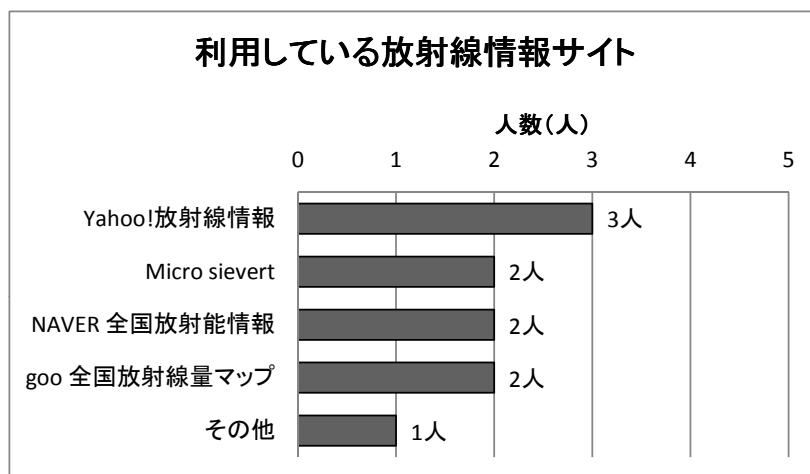


図 3.16: 利用しているサイトについて

6. 実際に放射線を測ったり、放射線について学べるワークショップや勉強会があった場合、参加してみたいですか?(図 3.17)

「興味はある」といったあやふやな回答の支持が多く、「参加してみたい」よりも「興味がない」のほうが多いのが残念であった。

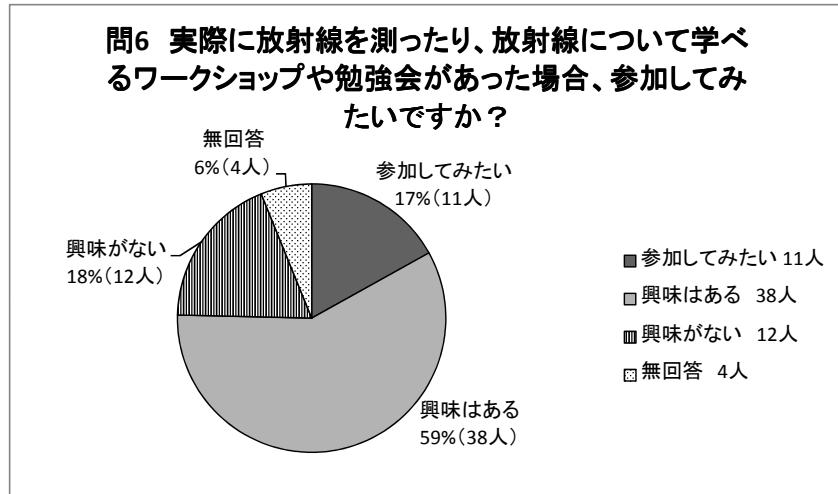


図 3.17: 問 6 の結果

### 3.3 アンケート結果から考えられる仮説

本調査において明らかになったことは、2時間の座学をもってしても「あいまいな回答」しかできないという点である。他の設問において「ガイガーカウンターで、具体的に何が測れるか知っていますか？」という設問があり、「知っていた」と答えている回答者が17%存在した。この結果は教授者のスキルで上下するべきではなく、社会の理解とともに継続的に調査されるべきであろう。また、より実感できる、体感できる手法を用いた場合でも、同様の統計的手法で評価を行うことができるだろう。仮に放射線が調べられる技術や放射線理解がしやすい教材があったとしても、科学コミュニケーションをしなくては、人々の理解は高まらないのではということも明らかにした。また他の設問についても、より深く調査を続けていきたい。市民の受講者には「情報を収集し理解したい」という意志が多く見受けられるが、反して「ガイガーカウンター」という計測器や「Sv/H」という単位が何を意味するのかについて、マスコミやネットメディアによる情報の授受では十分な理解が得られていないという現象も興味深く、この点についても、可視化手法やワークショップなどを通して、各人のバックグラウンドにあわせた科学理解の方法が採られる必要があると考える。

### 3.4 KAIT シンポジウム 2011 での霧箱ワークショップの取り組み

2011 年に行われた KAIT シンポジウムでは、前回開催したワークショップ「科学のひろば」と違い、子供や親子ではなく、シニア層がメインターゲットだった（図 3.18、図 3.19）。前回のワークショップではあまり聞かれなかった霧箱などの技術的な面を多く聞かれ、活発的な議論を交わすことができた。



図 3.18: KAIT シンポジウム（写真 1）



図 3.19: KAIT シンポジウム 2(写真 2)

## 4 霧箱の効果的な画像処理プログラムの提案

### 4.1 霧箱の効果的な画像処理手法の必要性について

第3章まで実際に霧箱を使ったワークショップ活動を通して、それについて報告を行ってきたが、霧箱を観察するワークショップに関して、次のような問題があると考えている。

#### ——霧箱ワークショップに関する3つの問題——

問題（1）霧箱を同時に観察できる人数が限られる。

問題（2）周囲の光源の関係で放射線の飛跡が観察しにくいときがある。

問題（3）放射線の飛跡が出ている瞬間をカメラで撮影することが難しい。

まず、問題（1）に関しては、霧箱を同時に観察できる人数は、周囲の環境の広さや展示の形によってかなり限られてしまうということである。例えば、テーブル一つに霧箱を設置し、ワークショップおよび展示を行うと、図4.1のような問題が発生する。



図4.1: 霧箱による問題（1）限られた人数でしか観察できない

このように霧箱自体が小さいので、それを見ようと霧箱周辺に人が集まることで、霧箱を観察できる人数が限られてしまう。また、問題（2）は、霧箱の容器がガラス製ということもあって展示場所によっては、照明の蛍光灯の光が映り込むことで観察がしにくくなる問題のことを示す。問題（3）は例えば、記録として霧箱で観察できる放射線をカメラで撮影しようと放射線が出ている瞬間を撮影しようとするが、なかなかタイミングが合わず、うまく写真が撮れないといった問

題である。こういった問題を解決するために、放射線可視化システムの可視化手法の提案および開発をおこなった。

#### 4.2 効果的な画像処理手法の模索

前節で挙げられたそれぞれの課題（1）霧箱を同時に観察できる人数が限られる、課題（2）周囲の光源の関係で放射線の飛跡が観察しにくいときがある。、課題（3）放射線の飛跡が出ている瞬間をカメラで撮影することが難しいにおける問題の解決方法を列挙する。課題（1）の解決方法としては、霧箱をカメラを使ってリアルタイムに撮影し、それをディスプレいやプロジェクタなどに出力する方法である。こちらも制限は確かにあるものの大勢の人が同時に観察することができるようになるだろう。課題（2）の解決方法としては、課題（1）の方法の実現と本体側に光の映り込みを防ぐ仕組みを作ることで、解決するだろう。課題（3）は放射線の存在を簡単に認識できる方法を探す。

そこで、本研究では、霧箱の映像を撮影し、放射線を撮影するシステムを放射線可視化システムと名付け、今回はその放射線の可視化システムの動画像処理手法の提案および開発を行うこととした。開発環境としては、Windows 7 Home Premium 64bit (Intel Core i5)、Visual Studio2008 を使い、C++言語と画像処理ライブラリの OpenCV2.3.1 を使って動画像処理プログラムを作成した。

#### 4.3 画像処理プログラムの開発

前節で挙げた問題を解決するための放射線可視化システムの動画像処理手法について提案および開発を行った。アルゴリズムとしては、プログラムを起動すると、二つのウィンドウを表示される。左ののウィンドウが霧箱内部を撮影している入力映像。右はあらかじめ登録された放射線のでていない霧箱内部の画像を元に現在の映像から切り出したフレームとの差分結果を表示するウィンドウである。今回は左のウィンドウは、霧箱を使って放射性鉱石のユーカセン石からなる $\alpha$ 線のビデオ映像を10秒撮影したものを使用する。この差分処理されたフレームを画像として保管用のフォルダ「sub\_frame」に保存し、保存された画像の画素値をx,y軸ごとに1ピクセルごとに読み取り、画像に $\alpha$ などの放射線の飛跡が写りこんでいると判断するための白色や白色に近いプログラマ側が定めたRGBの基準値と同じまたは低いものであれば、放射線がでていると判断し、指定の保管フォルダに差分画像と同じフレーム番号のカラー映像の画像が保存される。

このプログラムを完成させ、実際に動作させた様子が図4.2である。また、生成された差分画像は図4.3、放射線検出画像（入力画像）は図4.4である。

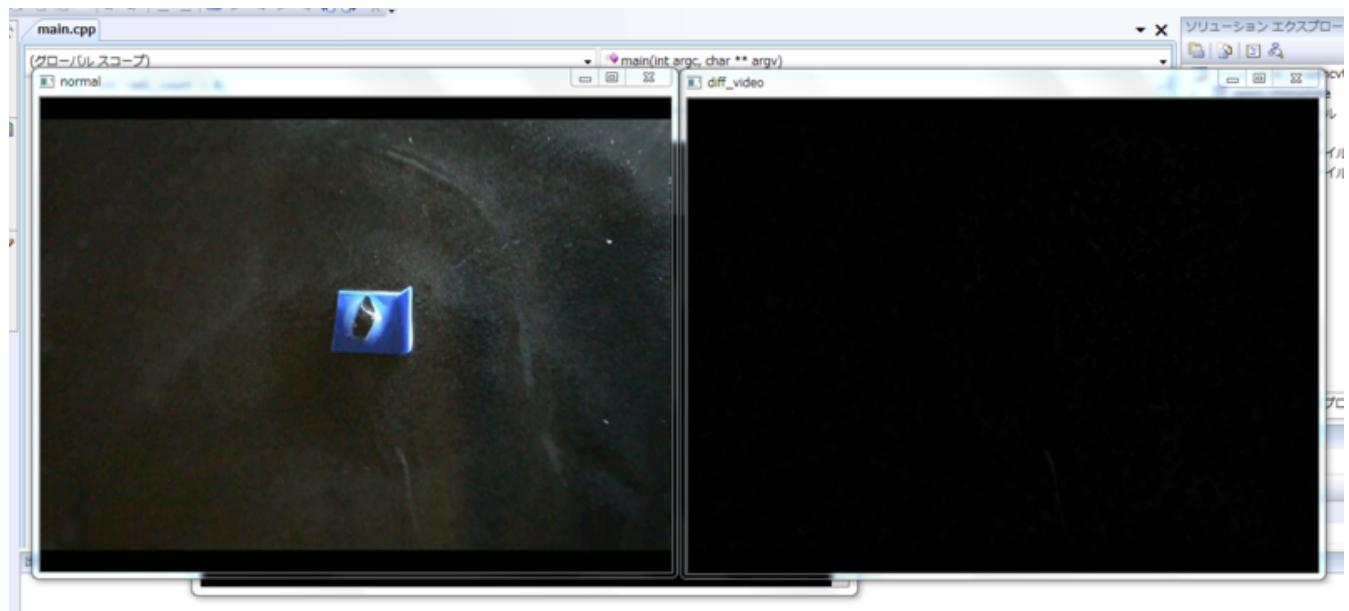


図 4.2: 放射線可視化システム動作時

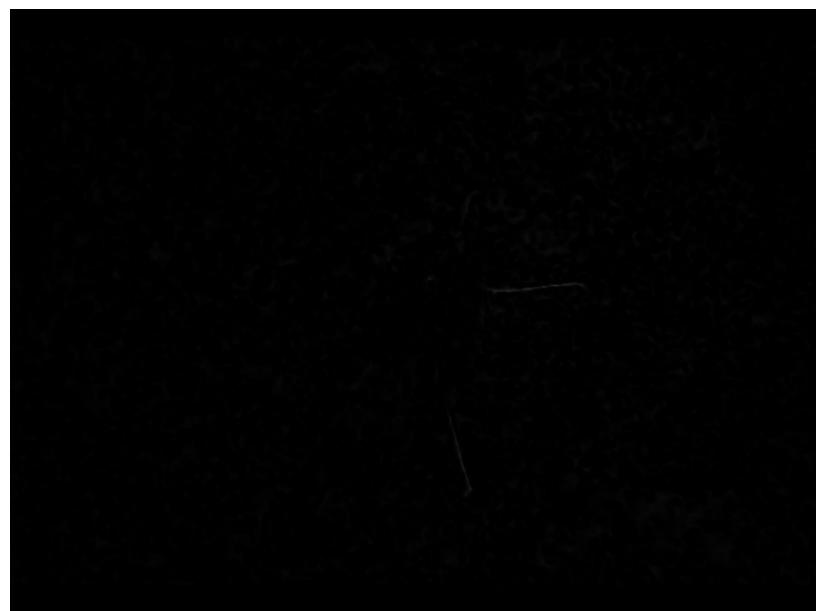


図 4.3: 生成された差分画像

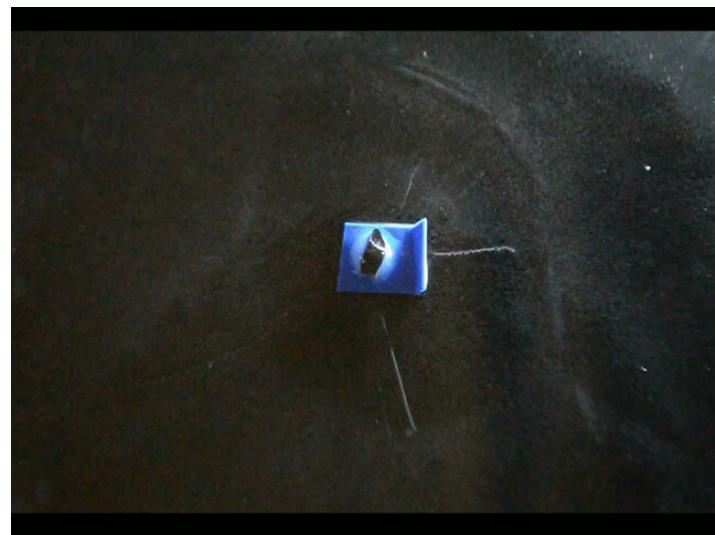


図 4.4: 放射線検出画像（入力画像）

#### 4.4 今後の展望

今後の展開としては、放射線検出アルゴリズムの改良や実際にカメラと霧箱使って、リアルタイム化が撮影が行えるように開発を進めていきたい。また、このシステムを使ったワークショップの実施も検討してきたいと考えている。

## 5 むすび

放射性物質拡散問題に対して、科学コミュニケーションと放射線を可視化する霧箱による可視化技術を使って5月に「科学のひろば」、11月に「ITシンポジウム」という場で霧箱を使ったワークショップを実施した。こういった活動の結果、子供を持つ親などをはじめ、議論による双方向的なやり取りを感じ取ることができた。

また、そういった活動に積極的に参加する一般市民の方を対象に神奈川工科大学の公開講座に参加した聴講者のアンケートによる意識調査を行った。この結果、2時間も座学を通して学んでもあいまいな知識しか得られないこと。科学コミュニケーションやハンズオンといった形式のほうが放射線を学ぶ方法として、いいのではないかということが読み取れた。今までの活動を通して、今後も科学コミュニケーションによる双方向的なやりとりを意識して、現在、試作段階の放射線可視化システムの改良など研究を進めていきたい。

## 6 謝辞

研究の手助けをはじめ、ワークショップ実施等でお世話になった神奈川工科大学 情報工学科の鈴木先生、基礎教育支援センターの栗田先生にこの場を借りてお礼を申し上げます。

## 参考文献

### 参考文献

- 1) はかるくん Web, <http://hakarukun.go.jp/img/hakaru.jpg>.
- 2) 放射線教育推進委員会, 放射線教育授業実践事例1:練馬区立中村中学校, <http://www.radi-edu.jp/contents/detail/practiceS#nakamura>
- 3) 文部科学省, 新学習指導要領, [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shotou/new-cs/youryou/chu/ri.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/youryou/chu/ri.htm)
- 4) 放射線教育推進委員会, らでい, <http://www.radi-edu.jp/>.
- 5) 文部科学省, 放射線に関する副読本, <http://radioactivity.mext.go.jp/ja/1311072/index.html>
- 6) 中部電力運転状況データ公開システム, <http://www.chuden.co.jp/hamaokastate1/RealMonitorPost.html>
- 7) 日経エレクトロニクス(日経BP社), 1万円を切る製品も登場、需要急増の放射線量計技術者が知っておくべき基礎, pp.82-88 (2011.12.26)
- 8) 比較的安価な放射線測定器の性能, [http://www.kokusen.go.jp/pdf/n-20110908\\_1.pdf](http://www.kokusen.go.jp/pdf/n-20110908_1.pdf)
- 9) 日立アロカメディカル製 GM サーベイメータ TGS-131, <http://www.hitachi-aloka.co.jp/products/data/radiation-002-TGS-131-PS-1202>
- 10) ガイガーカウンターミーティング, <http://g-c-m.org/>
- 11) 福島ガイガーカウンター勉強会#3inOgaki, <http://www.ustream.tv/recorded/16745695>
- 12) 放射線量モニターデータまとめページ, <https://sites.google.com/site/radmonitor311/home#00>.
- 13) pachube, <https://pachube.com/>
- 14) Japan Geigermap:At-a-glance, <http://japan.failedrobot.com/>.
- 15) SAFECAST, <http://blog.safecast.org/ja/>
- 16) Arduino, <http://www.arduino.cc/>
- 17) mbed, <http://mbed.org/>
- 18) Yahoo! JAPAN 放射線情報, <http://radiation.yahoo.co.jp/>.
- 19) Arduino用3Gシールド・アライアンス, <http://www.ustream.tv/recorded/19247374>
- 20) 研究者のための科学コミュニケーションStarter's Kit, <http://www.cshe.nagoya-u.ac.jp/scicomkit/01/index.html>
- 21) 梶雅範, 野原佳代子, 西條美紀:科学技術コミュニケーション入門 科学・技術の現場と社会をつなぐ, pp112-113, 培風館(2009).
- 22) 梶雅範, 野原佳代子, 西條美紀:科学技術コミュニケーション入門 科学・技術の現場と社会をつなぐ, pp123, 培風館(2009).

- 23) 東芝:ニュースリリース (2011-12-13):放射線ホットスポットを可視化するポータブルガンマカメラ装置の開発について, [http://www.toshiba.co.jp/about/press/2011\\_12/pr\\_j1302.htm](http://www.toshiba.co.jp/about/press/2011_12/pr_j1302.htm)
- 24) 関東各地の環境放射能水準の可視化 <http://microsievert.net/>
- 25) 原子力エネルギー図面集 2011,  
<http://www.fepc.or.jp/library/publication/pamphlet/nuclear/zumenshu/digital/index.html>.
- 26) 株式会社ケニス, 簡易霧箱実験セット KD (ドライアイス粉末冷却型) 取り扱い説明書, pp.4