

学校での放射線リスク教育

ガイドブック

編集

千葉大学 教育学部基礎医科学

杉田 克生

はじめに

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生

東日本大震災にともなう福島原子力発電所事故後、科学技術としての放射線への不信感が日本全土に蔓延している。有害事象とは本来因果関係は問わず結果的に生体に好ましくないできごとの総称であるが、これがすべて因果を有する副作用と認識される。戦後世界に類のない平和と安全な国家が日本で形成されたためか、日常生活上不可避な不確実性やリスクを正しく認識できないことが一要因と思われる。医療技術も含め科学技術を推進するには、リスクを正しく認識する必要性を国民が共通に認識すべきである。放射線教育を通して日本でのリスク認知やリスク教育を充実させる重要性がここにある。

日本の学校教育では、「安全教育」は指導要領にも組み込まれている。例えば文部科学省のホームページ (http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo3/022/siryo/07091003/003.htm) では、「現行の学習指導要領における食育、安全教育、性に関する指導に関する主な内容」と題されたページで、「食育」、「安全教育」、「性に関する指導」がそれぞれどの教科で指導されるか示されている。「安全教育」は体育・保健体育、社会科、理科、生活科、特別活動、道徳など各教科にわたって災害、事故、応急手当、生命尊重などが指導されることになっている。「教科横断的な内容で取り組むべき内容」とされているが、要は主体な教科ひいては教師がいないのが現状である。一方リスク教育については、中学校技術・家庭科学習指導要領解説の総説に「安全・リスクの問題も含めた技術と社会・環境との関係の理解」に関する記述がある。ただし学校での現状は前記した「安全教育」にとどまっており、リスクに関する知識や概念は指導されていない。

一方、放射線教育を実施するにあたり、放射線に関する用語にも注意を向けるべきである。原子力発電所は“nuclear power station”、核崩壊は“radioactive decay”、核分解は“nuclear fission”、核燃料や核廃棄物は“nuclear fuel and waste”である。放射性物質による被曝に関して日本では外部被曝と内部被曝に分けているが、このテキストでは“irradiation”と“contamination”に2分類して説明がある。前者は、体外での放射線源への暴露であり、後者は放射線源が体内に入った(enter)場合あるいは皮膚や衣服に付着

(get on)した際の用語と説明されている。

リスク教育に関しては、英語では“risk”の類語として“danger”がある。2つの用語がある以上、日本語で両者とも「危険」と訳しても本来のニュアンスは異なる。小学館オックスフォード英語類語辞典では、“risk”は「(悪いことが起こる)危険(性)、リスク」とあり、“danger”は「傷害・危害・殺害・損害・破壊が伴う危険、危機」とある。“danger”とは、“something like a clear possibility of harm if we are not careful”とし、“risk”とは“something like an uncertain possibility of harm”が英国人の通念である。従来安全と言われていた福島原子力発電所は、地震の際には“risky”ととらえていたが、現在でも大量の放射線を出している同発電所は“dangerous”と表現すべきである。

上記の現状を鑑み、現場の理科教員、養護教員向けに作成したのが「学校での放射線リスク教育ガイドブック」である。放射線リスク教育の日本ならびに欧州の現状、リスク教育に必要な生物統計学、子どもの放射線被曝影響、放射線リスク実験教育教材開発、レギュラトリーサイエンスを導入した放射線リスク教育などを解説した。また放射線の基礎的理解を深めるために、資料として放射線研究の科学的概説ならびに放射性元素の語源を付記した。本ガイドブックが多数の教員に活用され、学校での放射線教育の育充実につながることを期待したい。

なお本研究には、基盤研究(B)平成25年-28年「放射線教育を軸としたESD推進のための学習プログラム開発と理科教員養成」(研究代表者:杉田克生)ならびに基盤研究(B)平成28年度-30年度「レギュラトリーサイエンスを導入した放射線教育プログラム開発ならびに教員養成」(研究代表者:杉田克生)の助成を得た。

目次

はじめに

学校で行う放射線リスク教育の目的と実践

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 神田 玲子 3

放射線生体リスクを評価するための生物統計学

千葉大学大学院医学研究院臨床試験学 佐藤 泰憲 6

子どもの放射線被曝影響

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 柿沼 志津子 10

放射線に対する知識の現状

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 山中 有美 14

中学校理科における放射線教育の変遷

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 菅波 詩織 18

欧州での放射線リスク教育

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生 22

DNA 傷害・修復実験

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 土岐 香苗 飯田 祥子 24

レギュラトリーサイエンスを導入した放射線リスク教育

千葉大学大学院教育学研究科 前田 彩香 28

資料

X線ならびに放射線研究の歴史

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生 32

放射線元素の語源

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生 34

学校で行う放射線リスク教育の目的と実践

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 神田 玲子

1. 放射線教育とリスク教育の接点

現在、教育現場が抱える放射線教育への問題意識は、指導要領の改正や東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島原発事故と呼ぶ）以降、放射線の問題に学校が深く関わることになったことに端を発している。他方、福島原発事故対応として行われたリスクコミュニケーションでは、一般公衆の科学リテラシーやリスクリテラシーの不足が露見し、教育現場への期待を高めている。

またこれからの科学技術社会を担う子どもたちには、放射線に限らず、安全とは何か、科学技術のリスクとどのように折り合うのかといった教育もまた必要である。そこで本稿では、放射線を例題としたリスク教育の目的や具体的な方法について解説する。なお本稿は、以前発表した論文[1]を現在の状況に合わせて加筆修正したものである。

2. 放射線リスク教育の目的

安全とは「許容できないリスクがないこと」（ISO/IEC Guide 51）という定義があるように、リスクの大小だけで決められるものではない。特にリスクがさほど大きくない場合は、受け入れられるかどうかは個人差が生じる。こうした判断は「個人の自由」なのだが、生活が不便になる場合もある。よってリスクベースの合理的な判断ができ、今後、新規のリスクの問題に直面した時も、適切な対応が可能な人間を育てることが、放射線リスク教育の目的である。

福島原発事故対応として行われているリスクコミュニケーションも、単に正しい知識を得て、リスクを理解して安心することが目的ではない。放射線のリスクや便益あるいは線量低減に係るコストのバランスを考慮して、自らが合理的な判断ができるようになる点にある。この合理的な判断は、日常生活においても無意識に行われていることが多い。例えば無農薬野菜を買う／買わないといった判断は、農薬のリスク、価格、購入の頻度など、様々な要素を天秤にかけて行われている。しかしリスクが未知と判断された場合、秤にかけるべきリスクの推定が定量的でなく「危ない」か「危なくない」かの二択となることが多い。

そこで学校での放射線教育は、リスクの定量的理解のために学年のレベルに合わせた知識の習得を第1段階として行う

べきである。第2段階は、リスク、便益、コストを天秤にかけた合理的判断プロセスを身につけるための総合教育となるが、この第2段階は学校教育に限るものではない。そこで本稿は第1段階の教育のポイントを中心にまとめる。

3. リスクの定量的理解のための知識①：単位と実測

リスクリテラシーの基本は、量が多ければリスクは大きい、量が少なければリスクは小さい、という点にある。そこで単位を正しく理解することが重要である。福島原発事故以降、初めて見聞きする放射線の単位（Sv や Bq）に、多くの人が戸惑った。学校で Sv や Bq を教えるべきかどうかについては意見の分かれるところであるが、基本的な単位の概念を応用可能なレベルまで理解させるべきである。

放射線は目に見えない、匂いもしないと言われるが、人工的に匂いを付けている都市ガスのように五感で検知できる毒物の方がまれである。むしろ放射線ほど計測しやすいものはなく、空間線量率や被曝の累積線量などを個人が購入可能な機器で調べることができる。線量計を持って学校内を調べ、校内であつても測定場所によって値が変わること、同じ地点でも測定日時や機器によって値にばらつきがあるなどを生徒自らが発見することで、線量を定量的に考えるベースができる。

4. リスクの定量的理解のための知識②：半減期、遮蔽、自然放射線

定量的概念の習得に加え、放射線特有の性質については知識として知っておくべきことがある。表1は平成14年に日本原子力産業会議（当時）が高校生対象に行った調査であるが[2]、中学卒業までに、この6問を正答できること、つまりは半減期、遮蔽、自然放射線に関する知識を習得させることを学習の到達目標とすべきである。特に放射線の量を説明する際には、日常生活で受ける放射線（自然放射線、航空機被曝、医療被曝など）に関する知識が、線量や影響の理解のベースとなるだろう。

そこで、自然放射線と人工放射線については、線量が同じであれば影響には差がないことを、誤解を解く形で教える必要がある。概して、「自然のものは体にいい、人工は悪い」というイメージがあるが、自然界にも有毒物質は多くあること、害

を及ぼすかどうかは、自然由来か人工由来かが問題なのではなく、量の問題であることを総括的に伝えることが望ましい。

5. リスクの定量的理解のための知識③：イメージ

先に紹介した高校生対象の調査 [2] はアジア各国の高校生に対して行われているが、日本の高校生の知識レベルが特段低いというわけではない。しかし同時に行われた放射線に関するイメージに関するアンケート調査で、放射線は「管理できる」「身近である」と答えた高校生の割合が、日本のみ極めて低かったことは特記に値する。例えば「放射線は管理できる」という問いに、「そう思う」「ややそう思う」と答えた高校生の割合が最も高かったのはベトナム (75.0%)、日本に次いで低かったのはインドネシア (51.8%) であったが、日本の割合は 21.7% であった。

社会心理学研究からは、リスクの感じ方は「自分で制御管理できるか」「よく知っているリスクか」等の要因で左右されることが明らかになっている (表 2) [2]。つまり、放射線の量と影響に関する知識があっても、放射線は管理できない、未知のリスクであるというイメージがあれば、リスクを定量的に考える際にバイアスがかかることを意味している。

生徒たちの放射線に対するイメージは、福島原発事故の影響もあり、かなり画一的なものになっている。より放射線を身近なものと感じさせるためには、自然放射線の存在や放射線利用の例 (放射線検査、ビート版の加工、グレープフルーツの品種改良)、放射線の発見や利用の歴史、考古学や美術分野の利用例などを教えることも適当と思われる。

6. リスクの定量的理解のための知識④：生物影響

放射線の場合は、量に応じて誘発される影響の種類も変わる。このメカニズムについては、生物の細胞のしくみや遺伝を教える単元と結びつけて教えることが望ましい。細胞に放射線が当たると、DNA が損傷することがある。DNA 損傷の大部分は酵素により短時間に修復されるが、中には細胞死や遺伝子の変化を起こすものもある。放射線の量が多くなれば、細胞死の量が増え、障害の発生頻度と重篤度が増す。一方非致死性の変化は、遺伝性影響やがんの原因となり、線量が増えると疾患発生の頻度が増す。

また放射線以外にも発がん性や催奇性のある物質が身の回りにはあり、放射線を受けた、受けないにかかわらず、ある一定の割合でそうした疾患が見られることも、知識として得ることが望ましい。リスクのイメージを修飾する要素に「子どもへの影響」があることから、特に女子には、放射線の次世代影響については、正確な情報を伝える必要がある (表 3) が、理科教育というより、保健教育の範疇でと思われる。

7. 合理的判断プロセスを身につけるための学習：リスクの比較と制御

合理的判断プロセスを身につけるには、家庭も含めた社会との相互作用によるリスクに関するセンスを養う必要があり、学校教育だけで完結するものではない。そこで、学校で行うべきことは、身の回りのリスクを意識させ、安全とは何かということを考えるきっかけを与えること、そして、リスク、便益、コストの面から、自分たちが今後の科学技術を取捨選択する立場にあることを自覚させることにある。

放射線の量やリスクの定量的な理解には、自然放射線あるいは自然発生による疾患率との比較が重要であることは既に述べた。さらに深くリスクを理解する上でよく行われるのは、異なるリスク同士の比較である。特に身近と感じられているリスクと比較することにより、未知のリスクも判断できるセンスは現代人にとって必要である。例えば死亡リスクが 10^{-6} (100 万人のうち 1 人死亡する) と言われても実感がわかないのは当然であるが、飛行機 1 回乗った時の死亡リスクと同程度という情報を得た時に、このリスクを自分が受け入れられるかどうかを判断できるようにするためには、日頃から身の回りのリスクを意識している必要がある。

学校教育では、交通安全教育や防災教育 (避難訓練)、実験での諸注意などの折に触れ、リスクの頻度や重篤度などを伝え、「危ない・危なくない」ではなく「どれほど危険か」というとらえ方をするように指導し、さらに「どうしたらリスクを下げられるか」という思考パターンを形成することが望ましい。

参考文献

- [1] 神田玲子 放射線リスクコミュニケーションの基盤となる学校教育 エネルギー環境教育研究 2013;8:78-81.
- [2] 日本原子力産業会議 FNCA 各国高校生の放射線についての知識 関心等に関する合同アンケート調査報告書 平成 15 年 3 月
- [3] Fischhoff, B. et al Acceptable Risk. New York Cambridge University Press, 1981.
- [4] ICRP Pregnancy and Medical Radiation. Ann. ICRP 30 (1), 2000

表 1. 高校生の知識調査（平成 14 年実施）[2]

問い	正解	正答率
放射線の強さは時間がたっても変わらない	×	64.2%
放射線を出す物質は地球ができた時から自然界に存在する	○	62.7%
放射線の進む方向は強い風によって変わる	×	50.3%
放射線は微量だが普通の食物の中からも出ている	○	49.0%
放射線は微量だが常に身体からも出ている	○	41.9%
自然放射線と人工放射線は性質が異なる	×	19.3%

表 2. リスクのイメージを修飾する要素[3]

容認しにくいリスク	受け入れやすいリスク
押しつけられたもの	自発的なもの
他人が制御管理	自分で制御管理可能
利益がない	利益がある
人為的・人工的	自然由来
不公平に及ぶ	公平に及ぶ
破滅的	統計に基づいている
リスク源が信用できない	リスク源が信用できる
経験がない、外来	熟知している
子どもへの影響	大人への影響

表 3. 放射線による疾患率とベースラインの比較[4]

胚・胎児の吸収線量*	小児がんにならない確率	子どもが奇形を持たない確率
0 mGy	99.7%	97%
1	99.7	97
5	99.7	97
10	99.6	97
50	99.4	97
100	99.1	97
>100	より低くなる	97に近い

* 吸収線量：単位は Gy(グレイ)。1Gy は物質 1kg 当たり 1 ジュール (J) のエネルギーが吸収されることを意味する。γ線、β線の場合、1Gy は 1Sv(シーベルト)に相当する。

放射線生体リスクを評価するための生物統計学

千葉大学大学院医学研究院グローバル臨床試験学 佐藤 泰憲

1. はじめに

日常生活のなかには、災害、病気、事件等の様々なリスクがあり、生命・健康を脅かすものは数多くある。そのため、リスクという危険というイメージが強いのではないだろうか。我々は、風邪等の病気になると薬を服薬するひが多いと思われる。「くすり」を逆から読むと「リスク」である。昔から、「毒と薬は紙一重」と言われ、薬はもともと毒であるが、これを注意して上手に利用すれば、病気を治すことができる[1]。まさに、「くすり」と「リスク」は表裏一体の関係を意味している。そのため、リスクは危険のみを考えるのではなく、「ベネフィットを得るためにリスクを負う」という考えも必要であろう。また、リスクを科学的に評価するためには、何らかの合理的な定義が必要であるが、様々な分野においてそれぞれ関心のある事象や指標が異なっており、統一的な定義をすることは困難であろう。

放射線生体リスク評価では、「リスク」は放射線被曝によって生ずる有害な健康影響の大きさを表現するための定量的概念として用いられており、様々な指標が利用されている。これらのリスクはデータに基づいて評価するため、データの取得・提示・活用の各側面で、データの取り扱いが重要である。本稿では、データの提供と利用の注意点・留意点について、統計学的視点から概説する。

2. 母集団と標本

もともと統計というものは、本当に存在している人の集団について、人数や所有物の量等を調べ、数量的にその集団を把握するものであった。やがて集団全体を調べなくても、集団の一部を調べれば全体がかなりよく把握できることがわかり、一部のみを調べることが行われるようになった(図1)。このときの集団の中で調べられる一部分を集団からの「標本(sample)」と呼び、元の集団を「母集団(population)」という[2]。

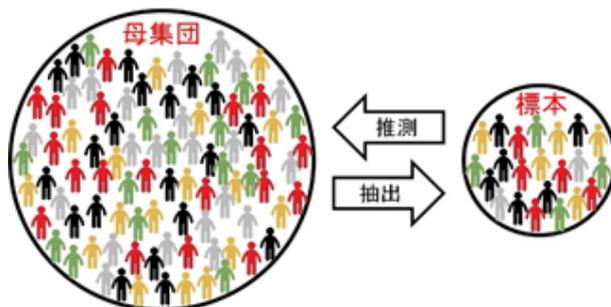


図1. 母集団と標本

我々が扱うデータの多くは母集団から抽出された標本である。データを評価する際に、① 母集団の規定、② 標本の抽出方法が重要なポイントである。母集団の規定においては、標本が母集団の主な特徴を反映するように取得されなければならない。たとえば、定点観測地点の放射線量測定データは、測定機器の設置場所周辺の測定時点での大気を母集団とすることが正しいが、測定地点から離れた住民の生活圏の大気を母集団とすることは正しくない。

次に、標本の抽出方法は、理想的には、母集団からランダムに選ばれることが望ましい。この場合のランダムとは、母集団のどの部分も標本に選ばれる可能性が同じであることを意味する。放射線生体リスクを評価するために、収集されたデータの母集団がどのような集団であるか定義(場所や時期等)を明確にし、どのようにデータが収集されたかを確認することが重要であろう。

3. 系統誤差と偶然誤差

データのとり方やまとめ方によって結論が大きく異なることがある。そのようなことが起こる本質的な原因のひとつは、データがばらつきを伴っていることである。ばらつきとは、同じようなものの測定値の集まりが、同じ値にならず、色々違った値になることである。ばらつきが生じる原因は、測定環境、測定方法、測定誤差、はっきりしない様々な要因の影響として生じているのであろう。これらの誤差は偶然誤差と系統誤差に大きく分けられる[2]。

前者は、原因が特定されることなく偶発的に発生する誤差である。たとえば、ガイガーカウンターで同じ場所・同じ時刻に空間線量を複数回測定した場合に、線量は一定にならず、わずかに測定値がばらつくことがあり、これが偶然誤差である(図2)。

一方、系統誤差は、ある特定の原因によって系統的に発生する誤差である。たとえば、常に高く測定してしまう壊れたガイガーカウンターで先ほどと同じ条件で複数回測定した場合、正常なガイガーカウンターで測定した値よりも常に高くなる。このようにある原因により一定方向に偏ることを系統誤差という(図2)。疫学分野では、系統誤差を偶然誤差と明確に区別して「バイアス」と呼ぶことが一般的である[3]。

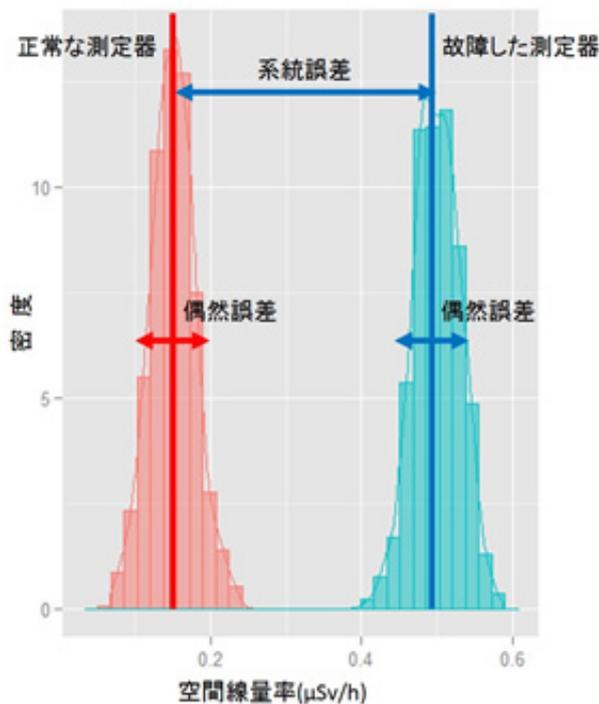


図 2. 偶然誤差と系統誤差

同じ誤差であっても、両者はまったく意味や取り扱いが異なり、偶然誤差は測定者がいくら努力しても偶発的に生じるため取り除くことはできないが、測定を複数回繰り返すことにより小さくすることはできる。一方、系統誤差は原因が必ず存在するため、その原因を見つけ、取り除く必要がある。

我々が利用するデータには、ばらつきが存在するため、ばらつきを小さくするような工夫や効率的にデータを集める方法を研究計画段階から吟味する必要がある。

4. 交絡

仮想的な事例として、低自然放射線地域(地域A)の住民と高自然放射線地域(地域B)の住民を20年間調査し、死亡割合を比較した。その結果、表1のような結果が得られた。

表 1. 二つの地域の死亡割合

地域	死亡	生存	合計
地域 A	3,250 (65%)	1,750 (35%)	5,000
地域 B	1,900 (38%)	3,100 (72%)	5,000
合計	5,150 (52%)	4,850 (48%)	10,000

地域 A の死亡割合は 65%、地域 B の死亡割合は 38%であり、低自然放射線地域の方が、約 30% 死亡割合が高い。

死亡と高齢は相関することから年齢(65歳未満、65歳以上)でサブグループ解析すると表2のようになった。

表 2. 年齢で層別した結果

地域	年齢	死亡	生存	合計
地域 A	65歳以上	3,150 (80%)	1,350 (20%)	4,500
	65歳未満	100 (20%)	400 (80%)	500
地域 B	65歳以上	1,200 (80%)	300 (20%)	1,500
	65歳未満	700 (20%)	2800 (80%)	3,500

65歳以上のグループでは、どちらの群も死亡割合は80%であり高い。一方、65歳未満のグループでは、どちらの群も死亡割合は20%であり低い。また、この結果から地域Aと地域Bとの死亡割合は同じである。

このように結果のまとめ方によって、なぜ結論が変わってしまうのだろうか。表1及び表2の結果を図示すると図3のようになる。

死亡割合(%)

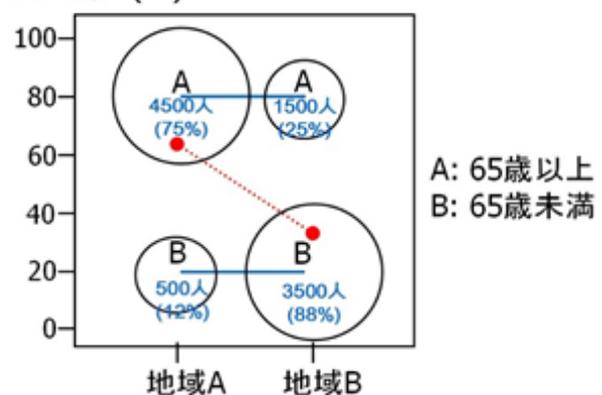


図 3. 交絡の仕組み

図3の結果をよくみると、地域Aでは、全体の被験者数に対して65歳以上の割合が、地域Bよりも高く、地域Bでは地域Aよりも65歳未満の占める割合が高いことがわかる。つまり、65歳以上の高齢者は、20年も追跡調査をすれば寿命等で亡くなるリスクが高いことから、高齢者が多い地域ほど死亡割合が高くなる。

このように、「興味ある要因」が「結果」に与える効果を正しく評価できない現象を交絡といい、そのような影響する要因を交絡因子という[3]。この事例では、年齢が交絡因子である。

研究から得られた結果を評価する際に、交絡の存在を見落としてしまうと、誤った結論が導きだされる可能性がある。そのため、交絡因子の存在と交絡の可能性を常に意識して統計解析することが重要である。また、研究開始前に交絡因子の存在がわかっている場合は、交絡を除去するような研究計画を立てることが重要である。

5. 欠測値・外れ値の取り扱い

医学・生物実験において、欠測値や外れ値が必ず存在する。これらは、統計解析のなかで最も取り扱いに困るものである。欠測値は、本来の計画では得られるはずだったにもかかわらず、何らかの理由でデータが得られないことである。例えば、実験途中で動物が死亡したり、臨床試験では転院等で被験者が脱落して測定値が得られないことがある。また、単純なミスによる測り忘れ、検体の取り違い、操作ミスによる試料の破壊等もある。このような欠測が偶然かつランダムに発生するのであれば、解析結果に影響を与えることはない。

しかし、欠測値が厄介なのは、欠測の存在自体が処理の影響である可能性を秘めていることである。例えば、放射線量と発がんの影響を評価するために、低線量、中線量、高線量をマウスに照射したとする。線量が強すぎたため、高線量群で死亡が増え、データが欠測になってしまった。このような状況では、欠測値を無視して解析すると放射線量の影響を過小評価することになり、正しい結果が得られない。

欠測値の取り扱いの留意点は、1) データの持つ情報を過不足なく取り入れる、2) 欠測のメカニズムを十分反映させて解析を行う、3) 欠測に伴う結論の偏りを無くす、4) 欠測による情報の損失を適切に評価することである[4]。欠測値に関する対処法としては、1) ひとつでも欠測値がある被験者は取り除き、完全データとして解析、2) 被験者のどこかの変数に欠測があっても得られた測定値を利用して解析、3) 欠測に何らかの値を補完して解析、4) 欠測はそのままモデル化して解析することである[4]。どの手法を用いればよいかは、欠測のメカニズムに依存しているため、欠測メカニズムを考慮して、適切な統計手法を選択することが重要である。

外れ値に関しては、欠測値よりも取り扱いが難しい。その理由のひとつとして、外れ値の定義が明確でないことである。直観的には、ひとかたまりのデータにおいて、1～2個飛び離れた値があるときにこれを外れ値という。外れ値が存在すると、「外れ値＝異常値」と認識し、統計解析の際に、異常だから除外してよい判断する者も多いが、それは間違いである。

外れ値の対処法として、1) ノンパラメトリック法、あるいは頑健な統計手法を用いて解析する 2) 外れ値を除いた場合と除かない場合の両方の解析結果を比較し（感度分析）、結果を併記し結論を利用するときに考慮する 3) 外れ値が多いときは、実験の結果も信頼できないため、研究をもう一度やりなおす[5]。このような原則的視点のもとで、状況に応じて対処すべきである。

6. 統計モデルを利用した解析

我々の生活において、「モデル」という言葉をよく見聞きする。モデルという術語は、分野によって異なる意味を持っているが、その異なる中にもある種の共通性がある。それはある形質に注目しているときには代用品として使えるものという性質である[2]。統計学で用いるモデルは、確率変数という概念を導入して、測定値の構造を数式で表現したものであり、数学モデル、確率モデルと同様である[6]。

放射線リスク評価の重要な課題のひとつは、がんの発症に関して、放射線量や性別、年齢、喫煙、家族歴、被曝歴等の要因を考慮してリスクを数量的に推定することである。そのための方法のひとつが、統計モデルを利用したものである。例えば、我が国の原爆被曝者の疫学調査データに基づき、がんによる死亡年齢、被曝時年齢、放射線被曝線量、性別をパラメータとして、がんの発症リスクを推定するモデルが提案されている[7]。その結果、被曝線量によって増加する年齢別のがん死亡確率や1Svあたりのがん誘発の確率を臓器ごとに算出することができる[8,9]。

このように統計モデルを利用すると、要因ごとに定量的にリスクを推定することができるため、非常に有益である。しかし、統計モデルを利用する際に注意すべきことは、モデルは現実と完全に同じではないことである。例えば、上記のがんの発症リスクモデルでは、過剰相対リスク（「被曝で増加したがん死亡率」の「自然がん死亡率」に対する比）が、時間によらず一定であると仮定している。現実的には、リスクの時間的な変化が一定とは限らないため、このような仮定が妥当なのか吟味したうえで統計モデルを利用する必要がある。

医学・疫学研究から得られたデータは、メカニズムや因果関係が不明であることが多い。このような場合に、データの特徴をモデル化して有用な情報を集約することが重要である。また、データの図示を通じて、変数間の関連を見つけ出し、

因果関係の有無やデータが特殊な構造になっていないかを確認し、データの発生過程を考慮してモデル化することも重要であろう。

著名な統計学者 George Box は「すべての統計モデルには間違いがあるが、役に立つモデルも存在する [10]」と述べているように、統計モデルが現実に完璧に当てはまることはなく、誤った結論を導かないように検証を行ない、十分に吟味し統計モデルに基づいた解析結果を受け入れるというのが現実的態度であろう。そのため、統計家・疫学者のみで統計モデル作成やその結果の解釈を行うのではなく、分子生物や放射線等の専門家とコミュニケーションを図りながら、生物医学的側面と統計学的側面からの議論することが重要である。

参考文献

- [1] 佐久間昭 薬の効果・逆効果—臨床薬理学入門 講談社 1981
- [2] 吉村功 医学・薬学・健康の統計学—理論の実用に向けて サイエントリスト社 2009
- [3] 矢野栄二 (翻訳) ロスマンの疫学—科学的思考への誘い 篠原出版新社 2013
- [4] 岩崎学 不完全データの統計解析 エコノミスト社 2002
- [5] 吉村功 毒性・薬効データの統計解析 サイエントリスト社 1987
- [6] 丹後俊郎 統計モデル入門 (医学統計学シリーズ) 朝倉書店 2000
- [7] 柴田義貞 放射線リスク 行動計量学 2016;43:35-43,
- [8] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann ICRP. 1991; 21:1-3.
- [9] ICRP. The 2007 Recommendations of the international commission on radiological protection (ICRP Publication 103). Ann ICRP. 2007; 37(2-4):1-332.
- [10] Box GEP. Science and Statistics. J Am Stat Assoc. 1976; 71: 791-799.

子どもの放射線被曝影響

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 柿沼 志津子

はじめに

福島原発事故後、放射線被曝後の健康影響について多くの方が心配されている。子どもは、大人に比べてその影響が大きいと考えられているため、子どもの放射線被曝による健康影響は特に心配されている。放射線の健康影響を理解するためには、放射線について正しく理解することが大切である。ここでは、はじめに放射線の基礎知識について、続いて子どもの放射線被曝による影響について、ヒトの疫学データと動物の研究データを紹介する。

1. 放射線の基礎知識

1) 放射線は、私たちの回りにいつもある

放射線（放射性物質）は、今からおよそ 137 億年前に宇宙がビッグバンによって生まれた時に生成した。そのため、今でも常に宇宙からの放射線（宇宙線）が地球に降り注いでいる。また、地球は 46 億年ほど前に宇宙の塵が集まって誕生したため、大地には放射性物質（放射線を出す物質）が多く含まれている。人を含む全ての生物が放射性物質を含み、放射線が存在する中で生まれ進化してきた。したがって、私たちは、日常生活のなかで見たり感じたりできないが常に自然からの放射線を浴びている。

空気には、主にラドン（岩石から微量に放出される希ガス）という放射性物質が含まれている。また、大地で作られる食べ物には主にカリウム 40 という放射性物質が含まれている。カリウムは、植物の三大栄養素だが、人間の健康にも欠かせない栄養素で、体重の約 0.2% 含まれている。したがって、私たち日本人は、自然からの放射線（空気、大地、食べ物など）として年間約 2.1 ミリシーベルト（世界平均は 2.4 ミリシーベルト）を浴びている [1]。

2) 放射線の存在は 100 余年前に分かった

放射線ができたのは宇宙ができたときだが、私たち人類がそれに気がついてからまだ 100 余年しかたっていない。レントゲンやベクレルそしてキュリー夫妻らの研究の結果である。放射線の物を通り抜ける性質が、体の中を検査するために大切な技術になった。私たちは、レントゲン検査で体の中の骨の形が見えることを知っている。放射線が周りの組織に比べて骨は通りにくいためである。

＊	137 億年前	ビッグバン 宇宙誕生
		放射性物質（放射線）生成
＊	46 億年前	星、地球の生成
＊	2 億 3000 万年～ 6500 万年前	恐竜誕生
＊	200 万年前	人間の先祖誕生
＊	1895 年	レントゲン X 線 放射線の発見
＊	1896 年	ベクレル キュリー夫妻 放射能
現在		自然の放射線が存在

図1. 放射線の生成と発見

2. 放射線の被曝影響

私たちの生活で心配される放射線被曝は、医療における放射線を使った検査や治療が主なものになる。その他には、福島原発事故後の環境中に残っている放射性物質からの被曝も心配されている。その被曝量は、低線量・低線量率の被曝が中心で、このようなレベルの放射線影響は被曝後長時間立ってから発生するがんである。

1) 人の疫学研究からわかったこと

人への放射線被曝影響については、広島・長崎の原爆被曝生存者についての長期のフォローアップによる疫学研究がある。被曝した線量とがん死亡のリスクの関係について図2に示した。（小笹ら [2]）。被曝線量が 100 m Gy 以上で発がんリスクが有意に増加し、線量の増加に伴って発がんリスクが増加することがわかる。一方、100mGy 以下ではリスクの増減は見えなくなることもわかった。

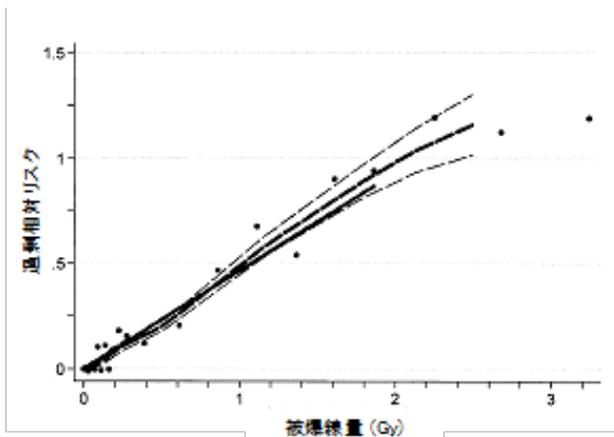


図2. 原爆被曝後のがんの発症リスク ([2] より改定)

被曝年齢と発がんリスクの関係は、被曝時年齢が若いほど同じ年齢に到達した時の発がんリスクが大きいことが示された。また、高い線量（1～4Gy）を被曝した集団では、被曝時年齢が若い方ほどリスクの値は大きく、子どもは大人より2～3倍大きいこと、また、女性は男性よりリスクが大きいことが分かった (Prestonら [3])。しかし同じ解析の中で、低い線量（0.005～0.5Gy）を被曝した集団では、被曝時の年齢にかかわらずリスクの値は小さく、発がんリスクの有意な増加は認められなかった。これらの結果から、子どもの被曝影響は、高い線量の時のみ大人に比べて大きいことがわかる。

表1. 被曝時年齢、被曝線量、性別による発がんリスクの相対リスク^a

被曝時年齢 (歳)	男性		女性	
	0.005-0.5 ^b	1-4	0.005-0.5 ^b	1-4
0-9	0.96	3.8	1.12	4.46
10-19	1.14	2.07	1.01	2.91
20-29	0.91	1.37	1.15	2.30
30-39	1.00	1.31	1.14	1.84
40-49	0.99	1.20	1.05	1.56
50+	1.08	1.33	1.18	2.03

a, 0.005Gy以下のグループに対する相対リスク（1に近いと差が小さいことを意味する。）

b, 大腸の線量（Gy）

さらに、胎児期と子ども期の被曝影響を比較すると、子ども期の被曝による発がん過剰相対リスクは、大きく、過剰相対リスクは1.7、胎児期被曝は子ども期被曝に比べてリスクが小さく過剰相対リスクは0.42であることが示された。（過剰相対リスク：被曝しない場合のリスク1とした場合のリスクの増加分を示す）[3]

現在、日本人の死因の1位はがんで、がん死亡率は約25%である。その発がんの原因は、タバコや食事、ウイルス感染であることが報告されている。また、原爆被曝者の疫学調査の解析から、放射線以外の生活環境要因が発がんリスクに影響することが報告されている。例えば、タバコは放射線被曝による発がんリスクを増加させる。タバコの本数が増えるとリスクが増加するが、タバコを1日1箱以上吸う人は、タバコによる発がんリスクが大きいため、放射線被曝によるリスクは逆に小さくなることも明らかになった[4]。また、緑黄色野菜や果物の摂取は、これらをあまり摂取しない人に比べて発がんリスクを低減させることがわかった[5,6]。このように、人の疫学データは、生活環境要因が影響しているため、放射線被曝だけの影響を見ることは難しいことがわかる。

2) 動物を用いた影響研究

人のデータは、上述のように複数の生活環境に影響を受けるのに対して、実験動物を用いた実験は、飼育環境、被曝線量、被曝時年齢、性別をコントロールできるため、放射線の影響を観察することができる。

私たちのグループでは、胎児期、子ども期の放射線被曝リスクを明らかにし、そのメカニズムを解明する必要があると考え、研究を行ってきた。ガンマ線被曝の研究からは、1) 寿命短縮に対する被曝時年齢の影響、2) 臓器により放射線発がん感受性時期のウインドウが異なること、3) 子どもの細胞の放射線応答は大人とは異なることが分かってきたので紹介する。

寿命短縮に対する被曝時年齢依存性

B6C3F1マウスの雄雌両方を用いて被曝時期年齢依存性を解析した。被曝時年齢は、胎児期、子ども期、成体期から7ポイントについて解析した。照射後、マウスを生後飼育して寿命を解析し、照射しない場合に比べた寿命短縮率や生存率に基づくリスクのハザード比を算出した。この研究から分かってきたことは、以下の3点である。

- ① 成体期被曝では、雌は雄に比べてリスクが高い。
- ② 子ども期（1週齢）被曝は、他の週齢の被曝に比べて最もリスクが高く、雌雄差は認められない。
- ③ 胎児期後期の被曝は、子ども期の被曝に比べてリスクが小さい。

得られた結果は、上述の人の疫学データとおおよそ一致する結果となっている。特に、出生前後で放射線感受性が大きく変動することが明らかとなった。

臓器によって放射線発がん感受性時期のウインドウは異なる

上記の B6C3F1 雌雄のマウスを用いた寿命試験や、いくつかの発がんモデル動物を用いた研究から、発生するがんの種類によって、発がんしやすくなる被曝時年齢のウインドウがあることが明らかになってきた。その結果を図4にまとめた。

胎児期後期から新生児期に被曝すると脳腫瘍や腎がんが、新生児期の被曝では、T細胞白血病や肝がん、ヒト家族性大腸腺腫症の発生率が高くなった。これに対して、急性骨髄性白血病は成体期の被曝で発がんしやすく、小児期の被曝では発がんしにくいことが分かった。このような発がん感受性時期のウインドウが狭いタイプのがんに対して、乳がんは、胎児期被曝でリスクは低く、幼若期（1週齢）から成体期（7週齢）の間の被曝でリスクの高いことが分かった[7]。肺がんは、明らかな被曝時年齢依存性は認められなかった[8]。興味深いことに、ラットの乳がんも肺がんも化学発がん物質は子ども期（2～3週齢）の投与が最も発がんしやすく[7,8]、放射線被曝による発がん感受性のウインドウと発がん化学物質によるウインドウが異なることも分かった。

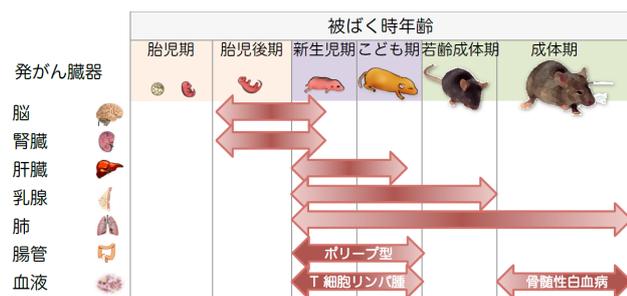


図4. 発がん感受性時期のウインドウ

矢印の時期に被曝すると、それぞれの臓器の将来のがん発生リスクが高くなる。必ずしも子ども被曝でリスクが高くならない。

子どもの細胞の放射線応答は大人とは異なる。

子どもの放射線感受性が高い理由としては、細胞分裂が盛んなことがあげられるが、それ以外にも被曝時年齢依存性をもたらすメカニズムがあることが分かってきた。

小脳のがん（髄芽腫）を発症する特殊なマウス（Ptch1+/-マウス）で調べた。このマウスは、出生前後に放射線を被曝すると、がんの発生率が被曝しない場合より高くなるが、生後10日以降に被曝してもがんは増えなかった。この理由を調べてみると、Ptch1 遺伝子が出生前後の脳の発生段階で重要な役割があるため、この時期に Ptch1 遺伝子に異常があると髄芽腫が発生することがわかった。原因遺伝子が発生段階の特定時期に重要な場合には、発がん感受性の時期が限定される例である。

発達期と成体期における被曝後の放射線応答の違いを、生

体組織の中でも特に放射線感受性の高い腸管のアポトーシスを指標に比較した。その結果、成体期では、これまでに報告されているように傷ついた細胞を排除するシステムであるアポトーシスが高頻度で起こるが、発達期では、細胞増殖停止が起こり、アポトーシスは起こらなかった。傷ついた細胞が除去されないことが発がんのリスクを高めている原因のひとつかもしれない。

子ども期の放射線発がん感受性について研究を進めることで、子ども期と成体期の放射線影響の違いが少しずつ明らかになってきた。今後は、そのメカニズムを明らかにすることで、放射線防護や被曝後の発がんリスクを低減できる方策を提示できるように研究を進めていきたいと思う。

最後に

私たちの生活空間において、空気や光は直接見ることができないが、その存在を意識することができる。放射線も同じように生活空間に存在するが、見ることも感じることもできない。放射線が私たちの周りに常にあるが、少ないながら被曝していることや、発がんの原因は生活習慣が大きく影響していることを、理解することが大切である。

参考文献

- [1] 「生活環境放射線」原子力安全研究協会
- [2] K. Ozasa, Y. Shimizu, A. Suyama, F. Kasagi, M. Soda, E.J. Grant, R. Sakata, H. Sugiyama, K. Kodama, Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950–2003: an overview of cancer and noncancer diseases, Radiat Res, 2012 ; 177 : 229–243.
- [3] D.L. Preston, H. Cullings, A. Suyama, S. Funamoto, N. Nishi, M. Soda, K. Mabuchi, K. Kodama, F. Kasagi, R.E. Shore, Solid cancer incidence in atomic bomb survivors exposed in utero or as young children, J Natl Cancer Inst, 2008 ; 100 : 428–436.
- [4] K. Furukawa, D.L. Preston, S. Lonn, S. Funamoto, S. Yonehara, T. Matsuo, H. Egawa, S. Tokuoka, K. Ozasa, F. Kasagi, K. Kodama, K. Mabuchi, Radiation and smoking effects on lung cancer incidence among atomic bomb survivors, Radiat Res, 2010 ; 174 : 72–82.
- [5] J. Nagano, S. Kono, D.L. Preston, H. Moriwaki, G.B. Sharp, K. Koyama, K. Mabuchi, Bladder-cancer incidence in relation to vegetable and fruit consumption: a prospective study of atomic-bomb survivors, Int J Cancer, 2000 ; 86 : 132–138.
- [6] C. Sauvaget, J. Nagano, M. Hayashi, E. Spencer, Y. Shimizu, N. Allen, Vegetables and fruit intake and cancer

mortality in the Hiroshima/Nagasaki Life Span Study, *Br J Cancer*, 2003 ; 88 : 689–694.

[7] T. Imaoka, M. Nishimura, K. Daino, T. Kokubo, K. Doi, D. Iizuka, Y. Nishimura, T. Okutani, M. Takabatake, S. Kakinuma, Y. Shimada, Influence of Age on the Relative Biological Effectiveness of Carbon Ion Radiation for Induction of Rat Mammary Carcinoma, *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2013 ; 85 : 1134–40.

[8] Y. Yamada, K.I. Iwata, B.J. Blyth, K. Doi, T. Morioka, K. Daino, M. Nishimura, S. Kakinuma, Y. Shimada, Effect of Age at Exposure on the Incidence of Lung and Mammary Cancer after Thoracic X-Ray Irradiation in Wistar Rats, *Radiat Res*, 2017 ; 187 : 210–220.

[9] K. Iwata, Y. Yamada, A. Nakata, Y. Oghiso, S. Tani, K. Doi, T. Morioka, B.J. Blyth, M. Nishimura, S. Kakinuma, Y. Shimada, Co-operative effects of thoracic X-ray irradiation and N-nitrosobis(2-hydroxypropyl) amine administration on lung tumorigenesis in neonatal, juvenile and adult Wistar rats, *Toxicol Appl Pharmacol*, 2013 ; 267 : 266–275.

放射線に対する知識の現状

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 山中 有美

学校現場では放射線教育が求められているが、未だいじめ問題などが生じていることから、放射線教育が十分でないことが伺える。その原因の一つに、教員の放射線知識が不十分であることが考えられる。学校現場で子どもたちに放射線について正しく理解させるにあたり、教員らの放射線についての理解が求められている。そこで学校現場において、放射線の生体影響を指導する任にある養護教諭と、科学的視点から放射線について指導する任のある理科教諭を目指す大学生に知識調査を実施した。また、医学的な側面から放射線や放射線について学ぶ機会のある医学部の学生や、健康スポーツ学科の学生の知識情報を紹介する。

1. 対象

- ・千葉大学教育学部養護教諭養成課程学生（以下、養学と表記）70名
（一年生36名、三年生34名）
- ・千葉大学教育学部 理科専修学生（以下、理学と表記）38名
- ・医学部学生（以下、医学と表記）175名
- ・健康スポーツ学科学生（以下、健学と表記）94名

2. 方法・および内容

調査紙による回答（正誤問題）。質問内容は長崎大学の松田尚樹の論文[1]から抜粋している（表1）。

3. 調査期間

2015年7月～12月

4. 放射線知識状況

設問ごとの正答率は以下の表の通りである（表2）。なお養学に関しては、学年別と全体平均とで分けている。養学1年と3年の結果に大差がないことから、高校以前の放射線教育における知識で回答していることがうかがえる。

表1. 放射線に対する正誤問題 20 問の内容

	質問	正解
1	単純撮影や頭部 CT などの放射線診断には γ 線が用いられる	×
2	マンモグラフィではエネルギーの低い X 線が使用されている	○
3	X 線と γ 線の本体はいずれも電磁波である	○
4	β 線の本体は電子である	○
5	X 線照射室では、照射後短時間の間放射線が残存している	×
6	^{125}I による密封小線源（シード）治療を受けた前立腺がん患者の病室では、室内中の放射線濃度が高まる可能性がある	×
7	核医学検査を受けた直後の患者からは、主として γ 線が放出されている	○
8	ポジトロンとは陽子のことである	×
9	放射線の生物影響は主として DNA 損傷に起因する	○
10	放射線による DNA 変異が体細胞に生じた場合が癌、生殖細胞に生じた場合が遺伝的影響となる	○
11	放射線の確率的影響とは、放射線による発癌と遺伝的影響のことである	○
12	放射線により固形癌の発生が増加することは、疫学的研究では証明されていない	×
13	放射線の遺伝的影響は、疫学的研究では証明されていない	○
14	放射線の健康被害の大きさは X 線、 γ 線、中性子線などの放射線の種類によらず一定である	×
15	白内障は放射線の急性影響の一つである	×
16	全身 CT 程度の線量では DNA 損傷は生じない	×
17	腹部 CT 程度の線量では胎児の奇形発現の「しきい値」を超える	×
18	骨髄は皮膚よりも放射線感受性が強い	○
19	病棟撮影の際には、放射線防護上、医師及び看護師は可能な限り病室から退室することが好ましい	×
20	実効線量 20mSv 程度では、不妊あるいは胎児への影響が生じる恐れはない	○

表 2. 各設問の正答率 (%)

問	養学 1	養学 3	養学	理学	医学	健学	平均
1	72.2	55.9	64.1	29.0	50.1	55.0	49.5
2	86.1	82.4	84.2	60.6	68.8	58.2	67.9
3	47.2	47.1	47.1	73.3	57.5	51.7	57.5
4	69.4	58.8	64.1	63.2	73.4	52.8	63.4
5	22.2	17.6	19.9	26.3	30.3	25.3	25.5
6	55.6	41.2	48.4	29.0	39.3	42.9	39.9
7	47.2	35.3	41.3	47.4	53.0	45.1	46.7
8	61.1	41.2	51.1	50.0	28.7	40.7	42.6
9	97.2	94.1	95.7	84.2	89.6	73.6	85.8
10	77.8	88.2	83.0	84.2	76.7	69.2	78.3
11	66.7	73.5	70.1	60.5	61.4	58.2	62.6
12	52.8	61.8	57.3	60.5	60.8	59.3	59.5
13	36.1	20.6	28.3	47.4	37.7	45.1	39.6
14	88.9	100.0	94.4	94.7	81.3	68.1	84.6
15	41.7	35.3	38.5	44.7	38.0	44.0	41.3
16	44.4	26.5	35.5	21.1	39.4	31.9	31.9
17	36.1	67.6	51.9	36.1	46.0	44.0	51.2
18	66.7	61.8	64.2	76.3	76.9	59.3	69.2
19	13.9	14.7	14.3	21.1	16.1	20.1	18.1
20	38.9	32.4	35.6	39.5	42.1	30.1	37.0
平均	56.1	52.8	54.5	48.8	53.3	48.8	51.3

マンモグラフィの設問（問 2）の養学の正答率は先行研究の正答率（7 割程度）を上回り 84.2%である（図 1）。調査対象の性別正答率を以下の表 3～6 に示す。養学の正答率の高さに性別は関与しないことがわかる。放射線の健康被害の設問（問 14）に関しては、メディアで多く取り上げられていた内容のため正答率が全体的に高い（図 2）。放射線に関する知識量は個人の興味関心や、メディアの影響が大きいことが明らかと思われる。

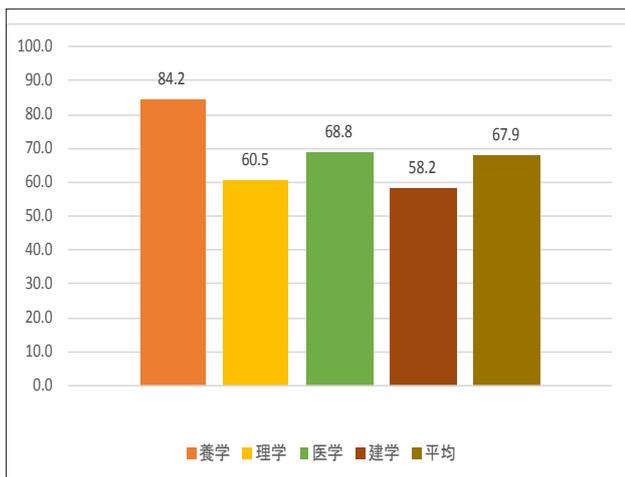


図 1. マンモグラフィに関する設問（問 2）の解答率

表 3. 養護教諭養成課程学生マンモグラフィの知識性別正答率

養学	女性	男性
人数	70	0
正答率 (%)	84.2	—

表 4. 理科専修学生マンモグラフィの知識性別正答率

理学	女性	男性
人数	12	26
正答率 (%)	36.4	70.4

表 5. 医学部学生マンモグラフィの知識性別正答率

医学	女性	男性
人数	56	112
正答率	64.11	72.09

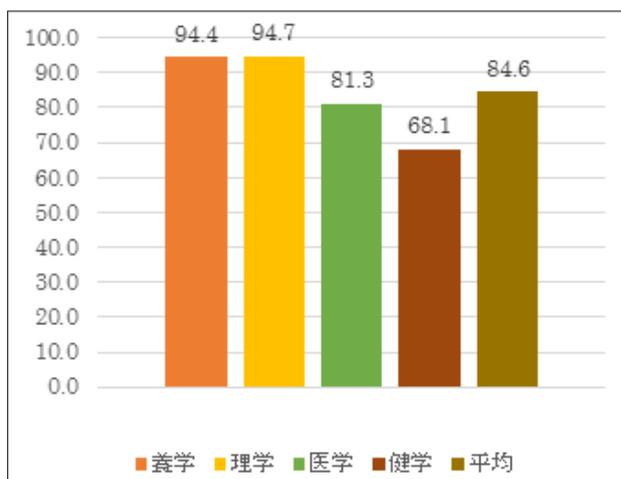


図 2. 放射線の健康被害に関する設問（問 14）の解答率

放射線の生物影響の設問の結果（図 3）からは、「放射線が DNA に影響を及ぼして生体影響を引き起こしている」ことの理解がされていることがわかった。

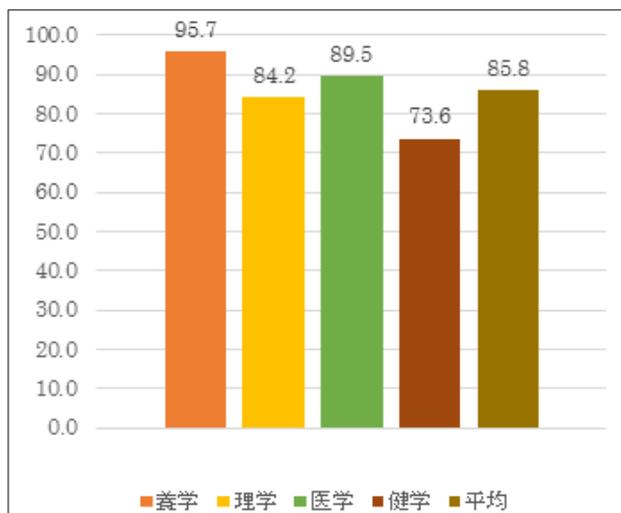


図 3. 放射線の生物影響に関する設問（問 9）の解答率

しかし放射線の確率的影響の設問の結果（図 4）をみると、完全に理解されているとは言えない。まだ放射線についての学習が不十分であることがうかがえる。

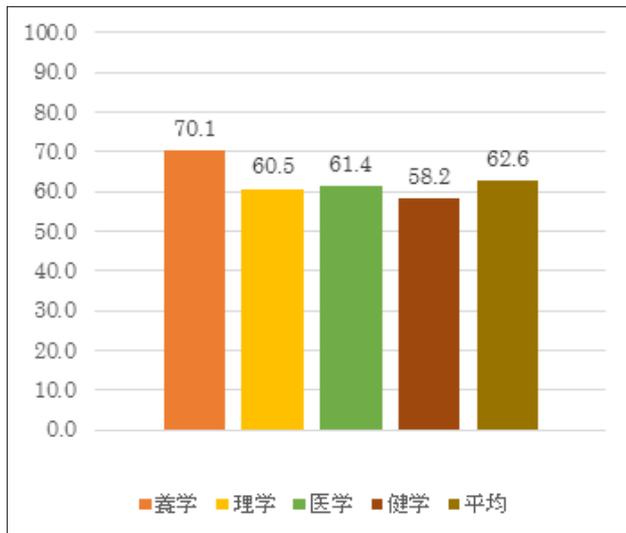


図 4. 放射線の確率的影響に関する設問（問 11）の解答率

放射線治療の設問の正答率は、全体として高くはなかった（図 5）。「放射線は人に伝染する」などの放射線への間違ったイメージがあることがわかる。X 線照射の設問の正答率は低かった（図 6）。「放射線は残る」というイメージが強いことがわかる。また、放射線防護の設問の結果（図 7）からも放射線への不安感、恐怖感を多くの人が持っていることが伺えた。

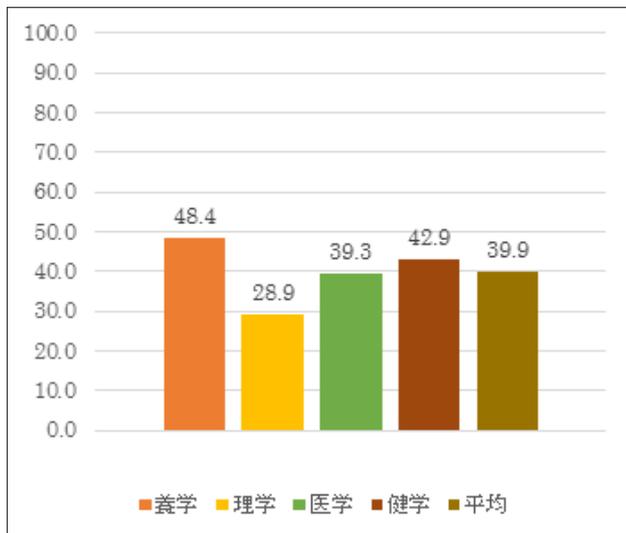


図 5. 放射線治療に関する設問（問 6）の解答率

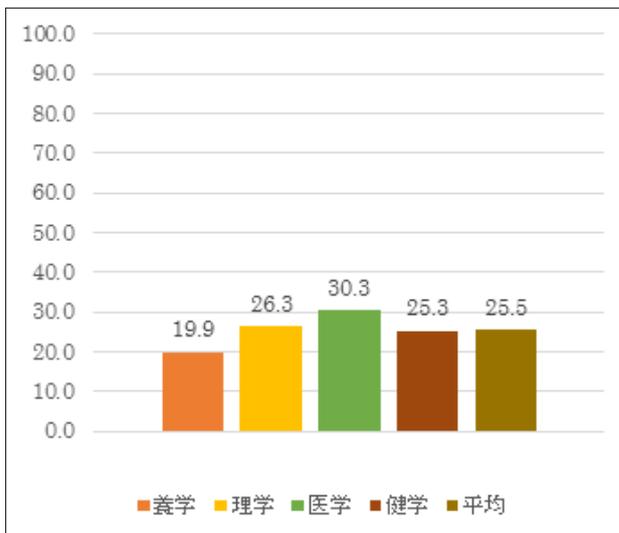


図 6. X 線照射に関する設問（問 5）の解答率

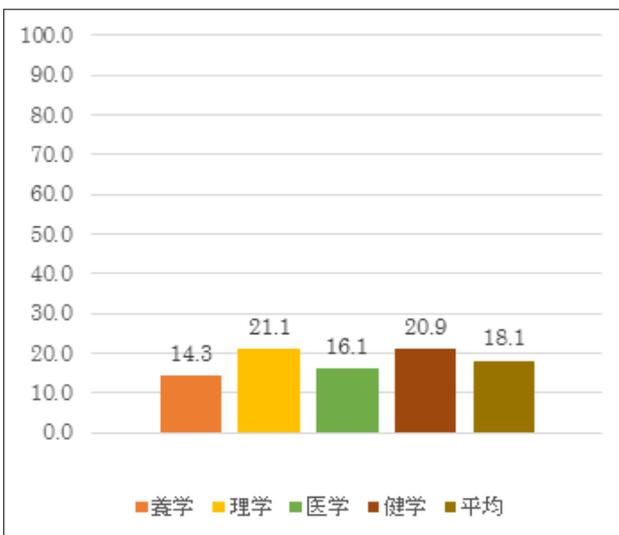


図 7. 放射線防護に関する設問（問 19）の解答率

一方で、CT 検査の設問の結果（図 8）からは放射線への過剰な恐怖感は見られなかった。医療現場で取り扱う放射線など、放射線の活用についての理解がされていないことが推察される。またリスク教育が求められる結果となった。



図 8. CT 検査に関する設問（問 16）の解答率

5. 放射線教育の課題

放射線教育には学校教育が大きく関連している。教科書の改訂前後で知識量に差が生じるかどうかを見ていく。養学の三年生は教科書改訂前、一年生は教科書改訂後の教育を受けている。結果をグラフで示す（図9）。設問によって、多少差はあるもののどちらかの正答率が高い、低いという結果は得られなかった。しかし、教科書改定後の初年度の学生に調査をしたため、教科書改訂の効果が明確に示された結果とは言い難い。今後の放射線教育に期待したい。

学校教育で放射線教育を行う場合、副読本[2]や教科書などの充実だけに頼らずに現場の教員らの指導方法の工夫も必要である。しかし、将来教育する側になる理学、養学の放射線知識量が不足していることが明らかである。指導する側・教員らの放射線学習が必要であるのと同時に、放射線生体リスク学習プログラムの開発も重要である[3]。

参考文献

- [1] 松田尚樹、三浦美和、山内基弘、奥野浩二 臨床研修医への放射線教育から見てきたもの—放射線の理解とリスク認知度の解析—「RADIOISOTOPES」2014；63：435-442.
- [2] 放射線等に関する副読本掲載データ（文部科学省ホームページより）http://www.mext.go.jp/b_menu/shuppan/sonota/attach/1313004.htm
- [3] 川崎靖奈、前田彩香、杉田克生、野村純、加藤徹也、高橋博代 放射線知識調査を基にした放射線生体リスク学習プログラムの開発「千葉大学教育学部研究紀要」2017;65:375-382.

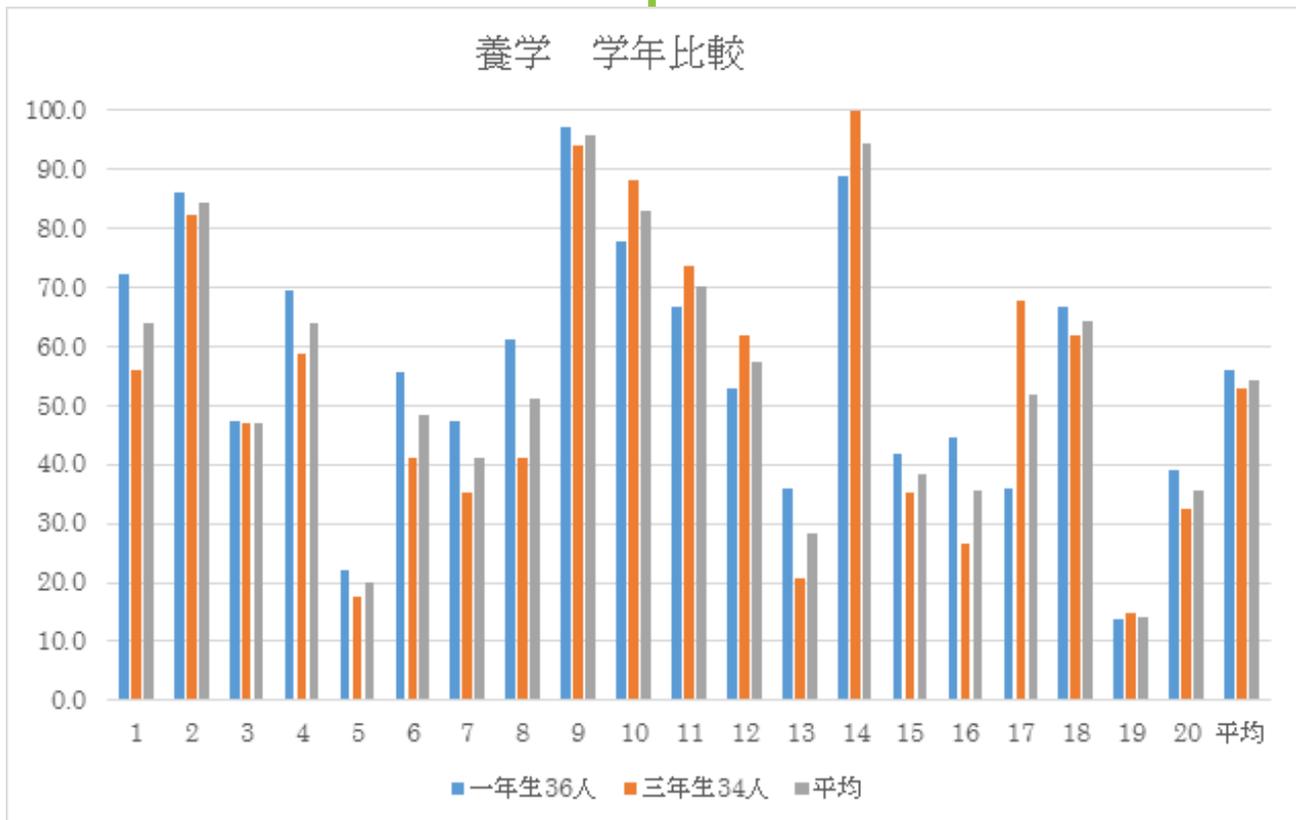


図9. 養学学年比較

中学校理科における放射線教育の変遷

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 菅波 詩織

1. はじめに

現在の教育課程において、放射線に関する教育は主に中学校3年の理科と高等学校の物理科において行われている。その際指導の基盤となる教材が「教科書」である。日本で使用されている教科書は4年ごとに文部科学省の検定を受け、その都度改定されている。特に現在の中学校の教科書は平成27年に検定を受け、平成28年度から使用が開始された。つまり福島第一原子力発電所事故以来初めて改定された教科書が、本年度から使用されていることになる。

本項では、放射線に関する分野の記述量と内容において、改定前後で教科書がどのように変化したかについて紹介する。

2. 対象教科書

中学3年の理科の教科書のうち、文部科学省の教科書検定を平成27年に通過した教科書[「新編新しい科学3[1]」(東京書籍)、「中学校科学3[2]」(学校図書)、「自然の探求 中学校理科3[3]」(教育出版)、「未来へひろがるサイエンス3[4]」(啓林館)、「新版理科の世界[5]」(大日本図書)]と、平成23年に通過した教科書[「新しい科学3[6]」(東京書籍)、「中学校科学3[7]」(学校図書)、「自然の探求 中学校理科3[8]」(教育出版)、「未来へひろがるサイエンス3[9]」(啓林館)、「理科の世界[10]」(大日本書籍)]を対象とする。

3. 調査結果

1) 学習指導要領と中学校理科の教科書

日本で使用されている教科書は、文部科学省が発行する学習指導要領[11]をもとに作成されている。学習指導要領は各学校で教育課程を作成する際の基準を定めたものであり、法的な拘束力を有する。なお、文部科学省は学習指導要領のより詳細な事項を記載した学習指導要領解説[12]も発行している。この学習指導要領解説に法的な拘束力はないが、教科書は事実上この学習指導要領解説に準じて作られている。学習指導要領は基本的に10年に1度改定されており、現行の学習指導要領は平成20年に作成されたものである。これまでの学習指導要領における放射線に関する記述は、表1のように推移している。

表1. 中学校学習指導要領(理科)における放射線関連項目の推移

年	内容
S.26	科学技術の発展としての放射線利用 (X線の性質と利用)
S.33	原子力平和利用の学習 (放射性同位体、放射線の種類)
S.52	-
H.20	エネルギー教育 (放射性の性質と利用)

(「第12回原子力委員会資料第1-2-2号 学校における放射線教育[13]」より改変)

昭和52年以降、学習指導要領から放射線に関する記述は削除されていたが平成20年から約30年ぶりに復活した。平成20年の中学校学習指導要領、学習指導要領解説における放射線に関する記述は表2,3の通りである。

表2. 中学校学習指導要領

中学校学習指導要領(第2章-4節 理科)
第2 各分野の目標及び内容
2 内容
(7) 科学技術と人間 - ア. エネルギー
(イ) エネルギー資源
人間は、水力、火力、原子力などからエネルギーを得ていることを知るとともに、エネルギーの有効な利用が大切であることを認識すること。
3 内容の取扱い
(8) - イアの(イ)については、放射線の性質と利用にも触れること。

表 3. 解説における放射線に関する記述

中学校理科学習指導要領解説
 第2章 理科の目標及び内容
 第2節 各分野の目標及び内容
 2 第1分野の内容
 (7) 科学技術と人間
 (イ) エネルギー資源について
 原子力発電ではウランなどの核燃料からエネルギーを取り出していること、核燃料は放射線を出していることや放射線は自然界にも存在すること、放射線は透過性などをもち、医療や製造業などで利用されていることなどにも触れる。

2) 中学校理科の教科書における放射線に関する記述の量

旧版と新版の教科書を比較して、放射線に関する記載があるページの数には5社の平均でおよそ2倍に増加している。特にその増加の幅が大きかったのは東京書籍である。旧版では『原子力発電では、ウランなどの核燃料から放射線が発生する。放射線には、物質を透過しやすいという性質があり、人体や作物の内部に入ると悪影響をあたえる場合がある。しかし、実は、放射線には宇宙空間から降り注ぐものや、自然界に存在する放射性物質から出るものなどもあり、わたしたちは日常的にある程度の放射線をあびている。

放射線は、その透過性を利用して、医療に利用されたり、物体内部の検査に利用されたりしている。』(「新しい科学3年」H23 東京書籍)と学習指導要領解説に記されている最低限の内容を記すにとどまっていた。対して新版の教科書では5ページにわたって記載があり、教科書全体を占める量としては、およそ8倍に増加している。このように教科書全体を占める割合は増加しているが、各出版社によって取扱いの量には差がある。特に学校図書と教育出版の間には、新版においてもその記載の量が2倍異なっている。以下表4に各社の記述量の比較を示す。

表 4. 放射線・原発に関する記載の量

放射線・原発に関するページ数 / 教科書全体		
	H23 年	H27 年
東書	0.5/272 (0.2%)	5/317 (1.6%)
学図	3/291 (1%)	6/319 (1.9%)
教出	1.5/237 (0.6%)	3/317 (0.9%)
啓林	2.5/249 (1%)	3.5/297 (1.2%)
大日	4/313 (1.3%)	5.5/333 (1.7%)
5社平均	2.3/272 (0.8%)	4.6/317 (1.5%)

3) 中学校理科の教科書における放射線に関する記述の内容
 原子力発電所の仕組みや長短については旧版、新版ともに全社が示している。原子力発電所の長所としては、少量の燃料で一定で大量のエネルギーを生み出すことができること、発電の過程で二酸化炭素や有害なガスが出ないこと、短所としては、発電の過程で発生する放射線や放射性物質について管理や廃棄が難しいことなどを記載している。特に「未来へひろがるサイエンス3」(H27年 啓林館)では『ウランなどの放射性物質が出す放射線は、生物や環境に影響をおよぼすおそれがある。事故などで原子力発電所から外部に放射性物質が放出されると、広範囲に長期間にわたって強い放射線が発生し、生物や環境に大きな影響を与える。』といった、事故を想定した記載もみられる。

この原子力発電所の事故については、旧版では1/5社、新版では全社が取り扱っていた。旧版で扱われているのはチェルノブイリの原子力発電所事故であったが、新版では全社が福島第一原子力発電所での事故について記載している(図1)。



図 1. 爆発した福島第一原子力発電所

(「未来へひろがるサイエンス3」H27年 啓林館より)

「中学校科学3」(H27年 学校図書)では『放出された放射性物質が大量に降った地域では、放射線の影響を避けるため、多くの住民が自宅をはなれて非難し、現在も多くの人たちが避難生活を送っています。被害を受けた地域では、放射線の影響を減らすため、放射性物質が付着した土や草木を取り除く除染作業など、復興・再生に向けての取り組みが進められています。私たちは放射線についての基礎知識をもち、科学的な根拠のないうわさに惑わされないよう、科学的な見方や考え方を身につけなければなりません。』と記し、除染作業の様子やモニタリングポストの写真も掲載している(図2)。



図 2. 除染作業の様子

(「中学校科学 3」H27 年 学校図書より)

次に放射線に関する記載について、学習指導要領解説に示されている記事事項は放射線の性質、利用、自然界での存在の 3 点である。旧版、新版ともに全社がこれを満たしているが、その取扱いの内容については出版社や旧版、新版の間で差がある。

まず放射線の性質について、旧版では透過力について記述があるのみで、放射線の電離作用や放射線が目に見えないことについては取扱っていない出版社が見られる。対して新版では放射線の性質として透過力があることや電離作用があることについて全社で述べているほか、放射線には電離作用によって物質を変質する作用があることや放射線が放出されるしくみについても触れている。

放射線の利用については、旧版、新版ともに写真を用いて掲載している出版社が多くみられる。放射線は医療、工業、農業などのさまざまな分野に利用されているとして、各社が CT 検査やがん治療、品質改良を取り上げている。

放射線の自然界での存在については、新版の啓林館と東京書籍が自然放射線が宇宙などのほかに、食物や温泉、人間自身といった身近な物からも放出されていることを記している。他(図 4)のようなグラフも掲載している。また旧版では 1/5 社、新版では 3/5 社が、自然放射線に関連して人工放射線についても触れている。

一方、学習指導要領解説を越えた内容についても記載がある。特に放射線の単位や放射線に関する言葉の定義、半減期、放射線発見の歴史については旧版と新版の間で取り扱っている出版社の数に差がある。

放射線の単位について取り扱っているのは旧版では 2/5 社であるのに対し、新版では全社で記載がある。また、旧版で取り扱われている単位はシーベルトのみであるが、新版ではシーベルトについては全社で記載され、グレイ(3/5 社)、ベクレル(4/5 社)についても記載がある。加えて図 5 のようにイラストでの記載も見られる。また、新版の教科書のうち 4/5 社が、ミリシーベルトやマイクロシーベルトについても触れている。しかし、シーベルトについて、臓器ごとに影響の大きさが異なることについて記述があるのは、新版においても 1/5



図 4. 自然放射線

(「中学校科学 3」H27 年 学校図書より)

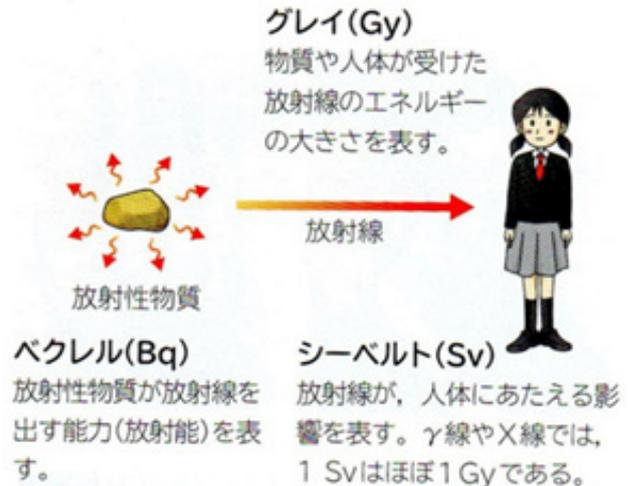


図 5. 放射線の単位

(「新版理科の世界」H27 年 大日本図書より)

社にとどまった。

次に言葉の定義について、新版では被曝や汚染など専門的な言葉の意味についても取り扱う出版社が増加している。特に注目したいのは放射線、放射能、放射性物質の定義の違いについて全社が述べていたことである。これらの言葉については、政府の公式会見においても「放射能漏れ」という言葉が使われるなど、混同して使用されている現状がある。この 3 つの言葉の違いについて、旧版では言及されていたのが 1/5 社であったのに対し、新版ではこれも全社が記載している。「未来へひろがるサイエンス」(H27 年 啓林館)では「なお、『放射能がもれた』という表現が用いられることもあるが正しく

は『放射性物質がもれた』である。」と明記されたり、新版の学校図書と東京書籍ではこの3点の違いを懐中電灯に例え

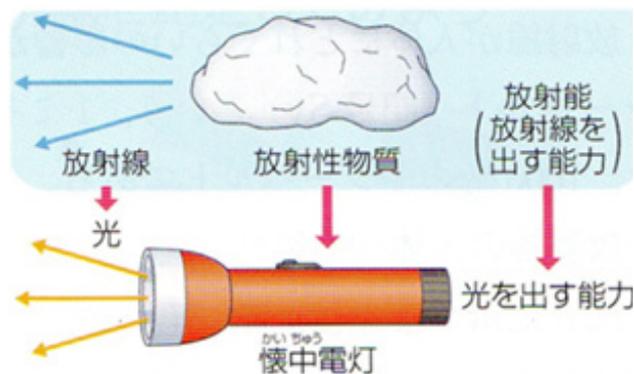


図 6. 放射線を光にととると
(「中学校科学 3」H27 年 学校図書より)

た図が掲載されたりしている (図 6)

また半減期については、旧版で 1/5 社、新版では 4/5 社が取り扱っている。放射線発見の歴史についても、旧版で 1/5 社、新版では 4/5 社が取り扱っている。

放射線の種類、生体影響、放射線の測定などについては旧版、新版ともに記載が見られるが、特に生体影響については記載の内容が詳しくなっている。例として啓林館では、旧版で『放射線は(中略)大量に浴びると生物や人体に異常を引き起こすので危険である。』(「未来へひろがるサイエンス」H23 年 啓林館)という記載が、新版では『放射線はさまざまな場面で活用されている一方で、放射線を生物が浴びる(被曝する)と、細胞や DNA が傷ついてしまう可能性がある。浴びた放射線の量が少なければ、ほとんどの場合、細胞は回復するが、一度に多量の放射線を浴びると回復できなくなり、さまざまな病気を誘発したり、ときには死にいたりするなど、健康被害を生じることもある。』(「未来へひろがるサイエンス」H27 年 啓林館)と変化している。放射線の生体影響が DNA に起因することや、放射線によって DNA が損傷してもそれを修復する機構があることについても記述している点の特徴である。また図 7 のようなイラストの記載も見られる。

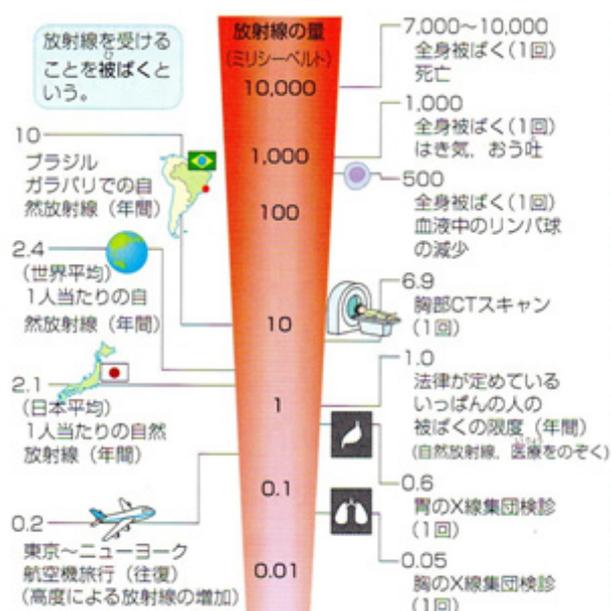


図 7. 身のまわりの放射線被曝
(「中学校科学 3」H27 年 学校図書)

参考文献

- [1] 岡村定矩他 新編新しい科学 3 東京書籍 2016 ; 277 : 280-283.
- [2] 霜田光一他 中学校科学 3 学校図書 2016 ; 260-265.
- [3] 細矢治夫他 自然の探求 中学校理科 3 教育出版 2016 ; 111-113.
- [4] 吉川弘之他 未来へひろがるサイエンス 3 啓林館 2016 ; 192-195.
- [5] 有馬朗人他 新版理科の世界 大日本図書 2016 ; 282-283, 286-290.
- [6] 岡村定矩他 新しい科学 3 年 東京書籍 2012
- [7] 霜田光一他 中学校科学 3 学校図書 2012
- [8] 細矢治夫他 自然の探求 中学校理科 3 教育出版 2012
- [9] 塚田捷他 未来へひろがるサイエンス 3 啓林館 2012
- [10] 有馬朗人他 理科の世界 大日本図書 2012
- [11] 文部科学省 中学校学習指導要領 2008
- [12] 文部科学省 中学校学習指導要領解説 理科編 2008 ; 63,65
- [13] 田中 隆一 第 12 回原子力委員会資料第 1-2-2 号 学校における放射線教育 NPO 法人放射線教育フォーラム 2010

欧州での放射線リスク教育

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生

英国での放射線教育の取り組みを初めに紹介する。英国は原子の中の荷電粒子（電子）を発見したトムソン、 α 線をヘリウムイオンと結論付けたラザフォードなど放射線研究では錚々たる研究者を輩出している。教科書検定制度がない英国では、一般に認められた参考書として、14歳から16歳向けに General Certificate of Secondary Education (GCSE) がイングランド、ウェールズ、北アイルランド共通に学術書として出版されている。各教科のテキストがあるが、放射線関連を例にすると Science のテキストでは、物理領域 (Physics の P) として P2 (Radiation and life), P3 (sustainable energy), P6 (Radioactive materials) に解説されている。

内容を一部紹介すると、P2の章では、X線や γ 線の医療での有効利用を取り上げながらも、Dr. S Stewart & Dr. G Knealeによる“妊婦のX線照射と生れた子どもの発がんの関連報告”を記述してある。この結果から、「医師はX線使用により注意を払うようになった」とし、細胞分裂が更新している胎児や乳幼児への危険性を解説し、“So the risk associated with X-rays for small children and pregnant woman usually outweigh any benefit.”と明確に記述している。電離放射線のX線フォトンが生体分子をイオン化し、DNA分子に作用した場合は“particularly risky”だとし、発がんの機序を簡単ではあるが化学的に記述してある。その後では、“Reducing the risk”の項目で放射線障害軽減の方策を示しているが、随所に“risk”対策が記述され、少なくとも科学や物理を学ぶ中高生はリスク観念が植えつけられる[1][2]。

P6の章では、何故放射性物質を学ぶかが解説されている。医学的に興味のあるのは、がん治療への応用の箇所とリスク軽減方法の項目である。“Living with radon”の箇所では、炭鉱夫のラドンガスによる肺癌について記述されている。2008年のデータとして引用されているが、「ラドンのリスクとして毎年1100名が癌で亡くなる一方、喫煙では35000人、紫外線による皮膚がんは1400人アスベストによる癌は4000人」と表に示してある。

甲状腺がんの放射線治療 (radioiodine treatment) についても概説されている。“Radioiodine naturally collects in your thyroid, because this gland uses iodine to make its hormone.”と記され、「 β 線によりがん細胞を殺す」と明記し

ている。

放射線実験に関しては、放射線リスク教育を中高校生向けに実践しているオランダのウトレヒト大学講座内容を紹介する[1]。同大学内科学・数学教育研究所が運営する The Ionising Radiation Laboratory (以下オランダ語略 ISP) である。ここでは、放射性物質ならびにX線源を用いた実験を実施している。当然ながら、放射線管理区域での実験となる。

ISPが中高生向けに実験ラボを開講しているのには、2つの理由がある。第1に、通常の中学、高校では比較的高価な放射性物質、X線源や計測装置を購入する財源や放射線実験に必要な許可証や注意文書を準備することが難しいため、それらを統括する意味がある。第2に、実験施設がなければ理論だけの授業となるが、実際に手をくだす実験 (hands-on experiments) により、中高生の主体的動機づけが可能となり、さらに放射線という社会的重要事項に関しての概念形成を育むことを理由にあげている。低地が広がるオランダでは、地球温暖化対策としてのエネルギー問題は国家的重要案件であることの反映でもあると思われる。

主な内容としては、電離放射線の特性、放射能、半減期、吸収、半値層、飛程などを学習するプログラムである (<http://www.fi.uu.nl/isp/english/index.php>)。学習プログラムのテキストには、23項目の実験解説ならびに参考情報5項目が掲載されている(表1)。実際に見聞して印象深かったのは、“Radioactive Decay of Radiation-220”である。トリウム232崩壊により産生されるラドン220からの α 線による電離作用を電流量に換算して提示する実験である。さらにX線CTの実験コーナーでは、検査対象を回転させながらX線照射により断層画像が得られる仕組みが理解できる装置が置かれていた(図1)。また検査対象を交換することでX線吸収度の違いを可視化させ、人体での異なった組織や器官が描出される原理を学ぶことがこの装置を通じて理解できる。ちなみにこれら実験装置は通常の学校実験室にも配送設置可能であり、いわば「出前授業」も依頼があれば実施している。

一方表1中の“Information”の一つに、“radiation risk”の項目がある。「通常オランダでは1年間で自然放射線1.8 mSvの暴露があるが、それに加えて0.6 mSvの医療放射線の暴露がある」と説明されている。10 mSvの暴露量での20

年あるいは40年での各種癌による死亡数が表示されているが、「実際の癌死亡数に比して医療放射線による癌死亡数は極小である」と明示している。さらに「1mSvによる遺伝影響について、100万人に2人の遺伝子異常児が出生」と記載されており、「他の要因によって同じく100万人あたり6万から9万の遺伝子異常児が生まれている」と説明している。大量放射線被曝については、「10 Svでの消化管障害、50 Sv以上での中枢神経障害により、数時間あるいは数日で死亡」と記載されている。ただし「これら大量被曝は原子爆弾によるとされ、被曝者の死因は熱波に起因する」との説明があり、日本人が犠牲になった原爆被害の実態は日本の学校現場で児童に正しく伝えるべきと思われる。原爆被曝者から得られた放射線の生体影響の知見が統計疫学的見地から教科書に掲載され、放射線教育を通じてバランスのとれたリスク認知能力を児童に育むことが重要である。



図1.X-ray CT実験 中央の円柱のボックスに検査対象を入れ、回転させながらX線照射し、断層像を算出してパソコンディスプレイ上に提示

参考文献

- [1] 杉田克生 日欧での放射線教育の現状 放射線生物研究 2015 ; 50 : 281-290,
 [2] 杉田克生 英国での放射線リスク教育 日本醫事新報 2015 ; 4735 : 70-72,
 [3] www.fisme.science.uu.nl/isp

表 1.Experiments with Radioactive sources and X-Ray Devices [3]

Experiments(1-23)

1. Range of Alpha Particle in Air
2. Radioactive Decay of Radon-220
3. Statistical Variation
4. Back Scattering of Beta Particles
5. Absorption of Beta Particles in Aluminum and Perspex
6. Geiger-Müller Tube
7. Energy of Beta Particles
8. Radiation Intensity and Distance
9. Wilson Chamber
10. Mini Generator: The Barium Cow
11. Detection of Lead
12. Absorption of Gamma Radiation by Lead
13. Qualitative Identification of Radioactive Sources
14. X-Ray Device
15. Ionisation of Air by X Rays
16. Bragg Reflection
17. Gamma Spectrometry
18. Elastic Modulus of Rubber
19. Range of Alpha Particles and Air Pressure
20. Radioactive Decay of Protactinium-234
21. Age of Radioactive Sources
22. Coefficient of Absorption of Aluminium for Gamma Radiation
23. X-Ray Computed Tomography

Information(1-5)

1. Table of Isotope
2. Single Logarithmic Graph Paper
3. List of Concepts
4. Radiation Risk
5. Radiation Exposure

DNA 傷害・修復実験

千葉大学教育学部養護教諭養成課程 土岐 香苗 飯田 祥子

1. 放射線の生体影響に関する教育の現状

平成 28 年度の中学校教科書改訂に伴い、各社において放射線に関する内容の充実化が図られた。その結果、放射線の生体影響に関しても触れることとなり、『放射線により DNA が傷害されるという』記述が追加された教科書もあった。しかしながら、放射線による DNA 傷害とはどのような物なのか、また、傷害の結果人体にどのような影響があるのか、については具体的に説明されているものは少なく、放射線の生体影響を理解するためには不十分であると考えられる。そこで今回、放射線による DNA の傷害・修復の機序を説明するとともに、視覚的に実感することのできる「コメットアッセイ」実験ならびに染色体異常を教材として扱う。

2. DNA 傷害

放射線や紫外線を受けると、DNA 中の塩基同士が結合したり、鎖構造の骨格がある頻度で傷を受ける。また、DNA に損傷を与えるのは放射線に限らない。身の周りの化学物質（天然のもの、人工のものも含め）が DNA の塩基に結合したり、塩基同士を結合させたり、鎖を切断することもあり、DNA は周囲の環境や化学物質から損傷を受けやすい分子であるといえる。上にあげたように、

- ① 塩基の損傷・消失
- ② 2 本鎖 DNA の片側の鎖のみ切断
- ③ 2 本鎖 DNA の両鎖切断

などのパターンが存在する。しかし、放射線により DNA はどのように傷害されるのか、また、傷害された DNA は、損傷前と比較してどのような違いがあるのかを、体感的に確認することができる教材は少ない。そこで、視覚的に確認できる教材の一つとして、コメットアッセイ実験を紹介する〔1〕。

3. コメットアッセイ実験

1) 意義

目に見えない放射線による生体影響を、ヒト培養細胞に X 線を照射し、DNA 損傷・回復の様子を視覚化することで理解させる。

2) 原理

損傷の入った DNA を電気泳動によりアガロースゲル内で移動させ、蛍光染色することで、顕微鏡下では DNA が彗星（コメット）のように見える。これは、損傷が入った DNA は鎖がほどけた構造になり、より早く陽極側に移動することで、尾（テール）部分となり、一方、損傷のない DNA は核領域に残り頭部を形成するためである（図 1）。

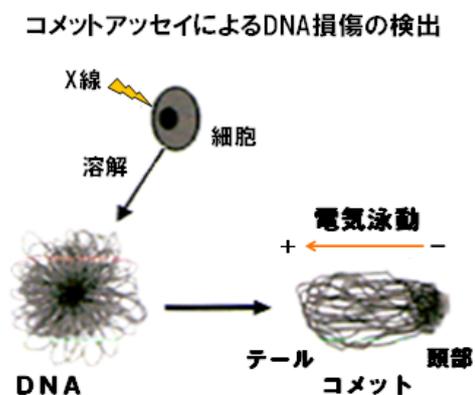


図 1. コメットアッセイの原理

3) 準備

[試薬]

細胞溶解液、リン酸緩衝液 (PBS)、LMP (低融点アガロース)、電気泳動用緩衝液 (中性条件)、DNA pre-precipitation 溶液、70%エタノール溶液、DNA 染色蛍光試薬 (サイバークリーン溶液)

[器具]

ピペット、チップ、チップ捨て、セルスクレーパー、1.5mL チューブ、ウォーターバス、ヒーター、冷蔵庫、アルミホイル、恒温槽、(37°C、42°C)、ビニール手袋、アスピレーター、遠心分離機、鉛筆、スライドガラス、ピンセット、バット、竹串、電気泳動装置、ビニール袋、蛍光顕微鏡

4) 実験手順

① 培養ヒト細胞の X 線照射

- ・ 培養ヒト細胞として HeLa (図 2) を用いる。
 - ・ X 線照射装置を使用し、10Gy の X 線を照射する。
- ※ X 線照射と非照射での DNA 像の違いを比較するため、X 線照射しない細胞 (0Gy) も以下の手順で蛍光観察する。

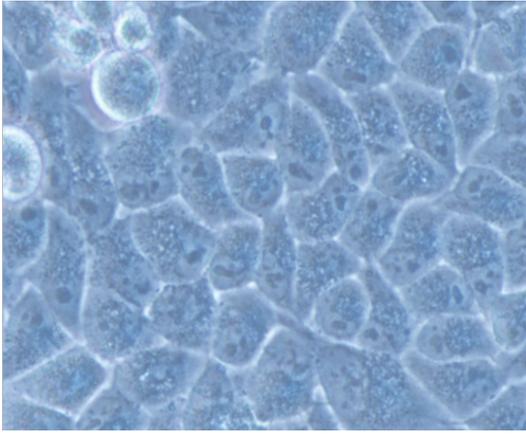


図 2.HeLa 細胞

なお学校での実験する場合には DNA 傷害として放射線照射に代え、過酸化水素により同様の実験が実施可能である。その場合、アルカリ条件下で実験を進める。その場合の手順も以下に記載する

- ・培養液を取り除き、過酸化水素水を含む培養液で 30 分おく。
- ・比較として片方の細胞に過酸化水素水のかわりに培養液を入れる。

②細胞回収

- ・ほぼ一面に細胞が接着している直径 3.5cm のシャーレに PBS0.8mL を加え、細胞をかきとった後、細胞浮遊液を 1.5mL チューブに回収する
- ・細胞溶液を遠心し、細胞の沈殿をさわらないように上澄みを取り除く。
- ・細胞を均一にするためチューブをピペティングし、細胞浮遊液を作成する。

③低融点アガロースゲル内への細胞固定

- ・1.5mL チューブに LMP(低融点)アガロース 250 μ L と細胞浮遊液 25 μ L を入れよく混合する。
- ・混合液 50 μ L をスライドガラスのサークル上に乗せ均一に広げる。
- ・周辺にゲルをはがれなくするためのリングが現れるまで、冷暗所にて 30 分間放置する。

④細胞溶解

- ・細胞を固定したスライドガラスを冷細胞溶液に浸し、冷暗所にて 1 時間放置する。
- ・スライドガラスの余分な細胞溶液をアスピレーターで取り除き、中性電気泳動緩衝液に浸し、冷暗所にて 30 分間放置する。

⑤電気泳動

- ・中性を保つため、泳動装置に泳動緩衝液を入れておく。
- ・泳動すると熱が発生するので、泳動装置をアイスボックスにセットする。
- ・スライドガラスを泳動装置に設置し、21V、4°C の環境で 1

時間電気を流す。

⑥ DNA 固定・細胞乾燥

- ・スライドガラス上の余分な泳動緩衝液を取り除く
- ・スライドガラスを DNA precipitation 溶液に浸し、暗室にて 30 分間放置する。
- ・スライドガラスを 70%エタノール溶液に浸し、暗室にて 30 分間放置する。
- ・全ての細胞を同一平面上に並べるため、スライドガラスを 42°C 恒温槽にて 10 分間放置し、アガロースを乾燥させる。

⑦蛍光染色による DNA 染色

- ・スライドガラス上の各細胞リングにサイバークリーン溶液を 100 μ L 加え、冷暗所にて 5 分間放置する。
- ・スライドガラス上の余分な染色液をアスピレーターで取り除き、42°C 以下で完全に乾燥させる。

⑧蛍光顕微鏡下での観察

励起波長 494nm, 放出波長 521nm で観察する。

5) 結果

結果の写真と比較すると、X 線照射なし細胞の DNA は丸くテールがほとんど観察されない(図 3)が、10 Gy の X 線を照射した細胞の DNA が横に伸びていることがわかる(図 4)。これは、電気泳動させることで、損傷の入った DNA の鎖がほどけた構造になり、より早く陽極側に移動し、テール部分となり、核領域に残った DNA は頭部を形成するためである。時間がたつと、DNA の修復が行われるため、X 線照射線量 0Gy の細胞と 10Gy の細胞の DNA の形状差は小さくなることも考察させる。

4. コメットアッセイ実験の解説

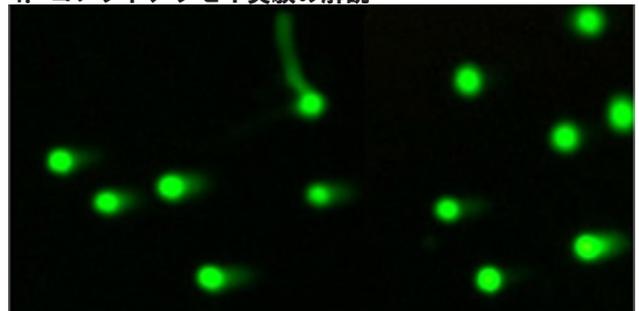


図 2. 放射線照射なしの HeLa 細胞の観察

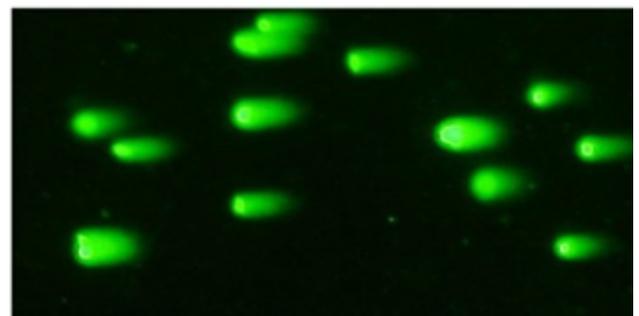


図 3. 放射線照射後の HeLa 細胞の観察結果

comet assay experiment is a method where the cell membrane of irradiated cells is dissolved, and electrophoresis is performed, allowing observation of DNA damage patterns. The experiment uses HeLa cells. Radiation causes DNA damage, which is proven by comparing irradiated and non-irradiated cells.

After irradiating cells, they are fixed in a gel and a slide is made. Cell membranes are dissolved, and DNA is observed as it migrates towards the positive electrode. Damaged DNA fragments migrate towards the positive electrode, while control cells show no migration.

To observe this, cells are dried and stained with Cy3.

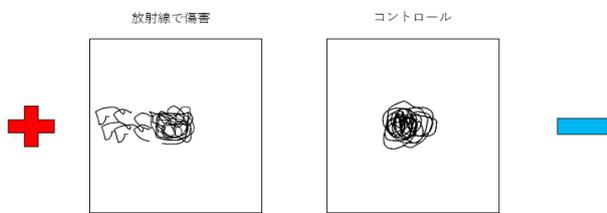


図 5. 電気泳動

After staining with Cy3 and observing under a fluorescence microscope, irradiated cells show a tail of DNA fragments, while non-irradiated cells show a single spot.

Over time, damaged DNA is repaired.

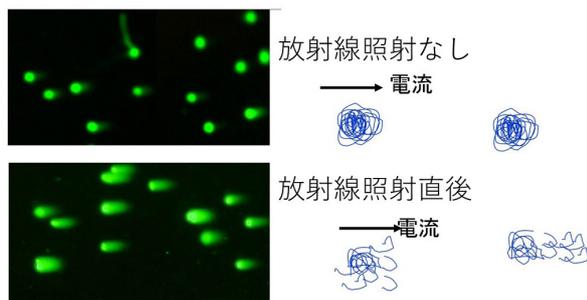


図 6. コメットアッセイ観察結果

It is known that DNA is repaired. This is because organisms have repair mechanisms. Details are discussed in the next section.

5. DNA の修復

When discussing DNA damage, it's important to mention repair mechanisms. If only the damage process is considered, it's a misconception that DNA damage leads to cancer.

When DNA is damaged, it can't function as a gene, and cells can't divide. This leads to cell death or mutations like translocations (Fig 7.8).

Cells have various repair mechanisms to survive.

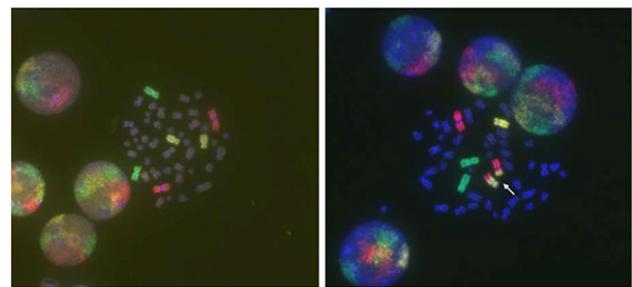


図 7. 3-color FISH 法により検出された染色体転位 (#1, red; #2, green; #4, yellow) ([2] より引用)

Radiation-induced chromosome aberrations

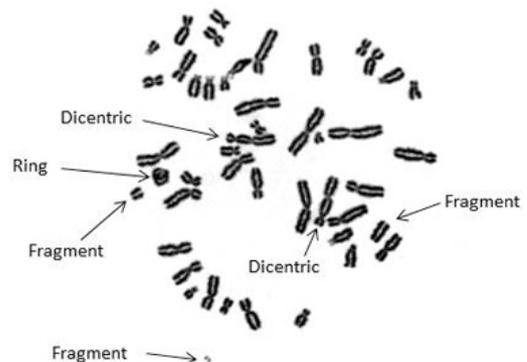


図 8. ヒトの中期細胞。末梢血中のリンパ球を 60Co-ガンマ線 (5 Gy) で照射した。二動原体染色体 (dicentric chromosomes) と環状染色体 (ring chromosome) と断片 (fragment) が観測された ([2] より引用)

Repair is the ability of DNA to return to its original state after damage. The degree of damage affects repair: ① base damage/deletion, ② single-strand break, and ③ double-strand break. Repair mechanisms include using the undamaged strand as a template or homologous recombination.

DNA 損傷があると、DNA 修復が終わるまで細胞分裂の進行を抑えるチェックポイント調節機構なども働く。このような仕組みを幾重にも持つことにより、日々発生する DNA 損傷を持つがん候補となる細胞が生き残ることのないようになっている。

しかし、受けた放射線量などが非常に大きくなると、姉妹染色体が両方とも切断を受けたり、傷を受けてしまうこともある。その結果、修復ができなかった細胞は、自ら死（アポトーシス）を迎えることとなる。

DNA の修復、チェックポイント・アポトーシスにより、普段の生活の中で多くの DNA 損傷を受けながら、最終的にがん化する細胞を非常に少なく抑える仕組みが、人体には備わっている。コメットアッセイ実験等を通し、放射線による生体影響を教育で扱う際は、これらの人体の機能を説明し、いたずらに放射線に対する恐怖心や、破壊的なイメージのみを必要以上に植え付けることのないよう、留意して行う必要がある。

参考文献

[1] 山本菜月・杉田克生・加藤徹也・他：リスク教育導入のための放射線実験プログラム作製 千葉大学教育学部研究紀要 2015；63：381-391.

[2]<http://www.nirs.qst.go.jp/ENG/core/rmd/05.html>

レギュラトリーサイエンスを導入した放射線リスク教育

千葉大学教育学研究科 前田 彩香

1. レギュラトリーサイエンスとは何か

平成 23 年 8 月に閣議決定された科学技術基本計画では「科学技術の成果を人と社会に役立てることを目的に、根拠に基づき確かな予測、評価、判断を行い、科学技術の成果を人と社会とも調査の上で最も望ましい姿に調整するための科学」と定義されている。本来の科学（ここではアカデミックな科学）とはまた異なったもう一つの科学としてレギュラトリーサイエンスが提示されている（図 1）。

アカデミックな科学において不明や未知なことは「わからない」と言うことができ、なおかつ時間的な制約はなく無制限に探求していくことが可能である。その反面、レギュラトリーサイエンスは規制のための科学であり、未知や不明な場合においても、基準値の設定や規制を設けなければいけないという違いがある。またアカデミックな科学と規制との間にある大きなギャップを埋めると同時に橋渡しする役割を担っている。

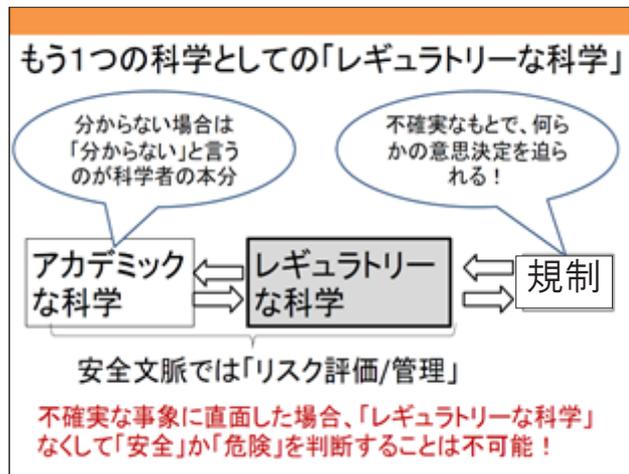


図 1. 岸本充生, 安全な作法としての「レギュラトリーな科学」より

放射線においても様々な規制が存在する。具体的には、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律、原子力基本法、食品衛生法、放射性同位元素等車両運搬規則などがあげられ、放射線一つをとってみてもこれだけ多くの法律によって具体的な数字で基準値を設けて規制がされている。実際、私たちの生活の中には膨大な数の規制が張られてるが、一方で提示された基準値をそのまま受け入れて生活していることがほとんどであり、どこに根拠があるのか、どのよ

うに設定されたのかまで考えて生活している人は少ないと思われる。

様々な価値観を持った人々からなる社会において、「受け入れられるリスク」になる基準値設定が求められていると同時に、どのように「受け入れられるリスク」を算出したのか、それらの根拠などを理解した上で生活することが重要と考える。

2. 基準値による混乱

福島第一原子力発電所の事故以前は、放射線に不安を抱きながら生活していた人は少なかったと思われる。しかし発電所の事故以降、病院での X 線撮影を拒否したり、年間被曝線量へ対する不安から海外に移住する人などが現れた。学校現場においては、給食における牛乳の停止、弁当の持ち込みなどが相次ぎ対応に追われていた。対応している教員側も基準値以内であるにも関わらず、拒否申請を受け付けてしまうなど基準値が役割を果たせずにいた。多くの人が基準値を超える、超えないということに対して敏感になっていた時期である。

さらに深刻であったのは、基準値という数値だけの判断も不安になる人が続出したということだ。基準値の根拠を知っていればモノサシとして利用できるが、その数値の持つ意味が分からなかったため、基準値があるのに人々はその基準値を信頼することができず個人個人の信念で行動していたのである。

私たちは基準値を目の前にしたとき、その一線を超える超えないで一喜一憂してしまう。健康診断などの時に検査値で一喜一憂している経験がある人も多いのではないだろうか。しかし実際は基準値以下なら安全、それを超えたとたんに危険というようないわゆる、安全 / 危険の二分化ということは起こらない。なぜならゼロリスクは常にありえないからである。ほとんどの場合、ある程度の大きさのリスクを受け入れていることが多い。では基準値はどのようにして決められるのか考えてみる。

3. 放射線の基準値、根拠はどこにあるのか

避難の基準値「20mSv/年」はどのようにして決められたのか。ピンとくる人もいるかもしれないが、職業被曝の線量限度と一致する。

適用	線量限度 ¹⁾	
	職業被曝 ²⁾	公衆被曝 ³⁾
実効線量	決められた5年間の平均が1年あたり20mSv ²⁾	1年に1mSv ³⁾
年等価線量		
眼の水晶体	150mSv	15mSv
皮膚 ⁴⁾	500mSv	50mSv
手先および足先	500mSv	-

- この限度は特定の期間の外部被曝からの該当する線量と、同一期間内の摂取による50年預託線量(子供に対しては70歳まで)との合計に適用される。
- 実効線量は任意の1年に50mSvを超えるべきではないという付加条件つき。妊娠している女性の職業被曝には、妊娠が告知された後の残りの期間の腹部の表面について2mSvという補助的な等価線量限度を適用する。
- 特殊な状況では、5年間にわたる平均が年あたり1mSvを超えなければ、単一年にこれよりも高い実効線量が許されることがありうる。
- 実効線量をこの値に制限することにより、確率的影響に対し皮膚は十分に防護される。局所被曝については、確定的影響を防止するための追加の限度が必要である。

まず受け入れられるリスクとしては「年間死亡リスクを1000人当たり1人」と設定した。この考えをもとに死亡リスクを計算したのが下記の表である。年間死亡リスクが65歳まで「1000人当たり1人」を超えない線量を見ていくと、20mSv/年以下となったことから、職業被曝線量限度は20mSv/年へと決定された。これが日本においては避難の基準値の根拠となっている。

表 2. 線量による年間死亡リスク表

線量 (mSv/年)	年齢	30	40	50	60	65	70	75
10		0.008	0.037	0.114	0.295	0.445	0.65	0.93
15		0.013	0.055	0.117	0.44	0.65	1	1.4
20		0.017	0.075	0.23	0.59	0.89	1.3	1.9
30		0.025	0.11	0.34	0.88	1.3	2	2.8
50		0.042	0.19	0.57	1.5	2.2	0.32	4.7

では私たちにより関係のある公衆被曝の線量限度についてである。現在の線量限度は1mSv/年(パリ声明)である。ICRPの1990年勧告において5mSv/年(1977年勧告)から見直しがされた。その際に妥当な数値なのか2つアプローチで検証された。

- ①「受け入れられるリスクのレベル」と比較するという方法
- ②自然放射線の線量レベルの変動をもとに判断するという方法

①は職業被曝線量限度と似ている。公衆被曝線量限度は年間5mSv/年を連続に被曝した場合のリスクを検討し、死亡リスクが、それぞれの年齢の平均的死亡リスクと比較しても増加は非常に小さい。②は、まず受け入れられないリスクを「地域間における線量」とした。例えば、引越しなどの時に自然放射線が以前より高い土地であった仮定すると、その影響はゼロとは言えないかもしれないが、通常の場合は受け入れることができるリスクであると考えられた。

放射線には様々な種類があるが、ラドンは地域によってばらつきが大きい。1990年勧告では、自然放射線量の変動量算定の上で、ばらつきの大きいラドンは含まないとされた。そこで自然放射線源からラドンを除いた場合の実効線量は1mSv/年であり、放射線が平均よりも高い地域の実効線量は、少なくともその2倍になると説明された。つまり少なくとも1mSv/年は地域によって変動があるため、これは受け入れることができるだろうと考えられた。以上2つの検証アプローチのうちより厳しい②を採択することになり、年間限度被曝線量は1mSv/年に決まったのである。どんな数値も科学的根拠があると考えてしまう傾向があり、その数値は絶対的と思ってしまうのが基準値の怖いところである。

4. 教育現場におけるレギュラトリーサイエンスの導入状況

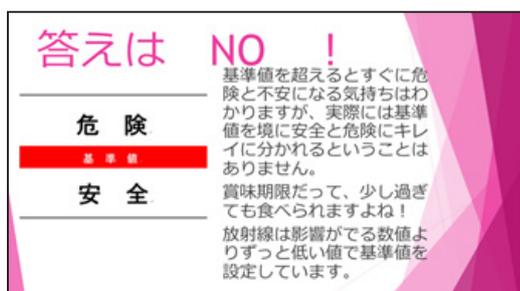
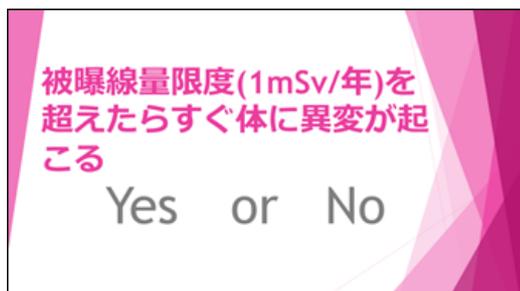
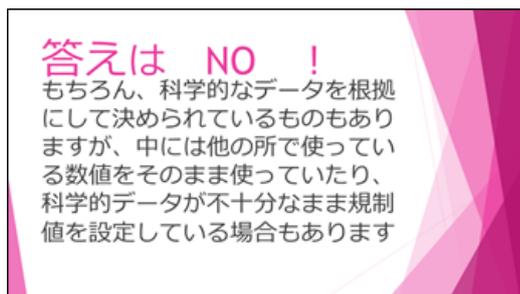
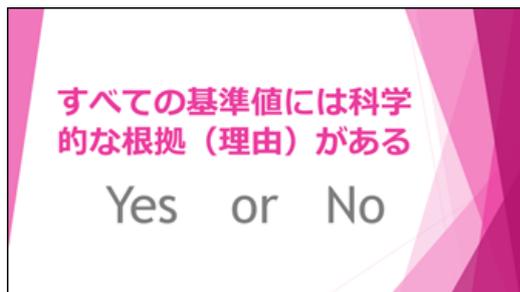
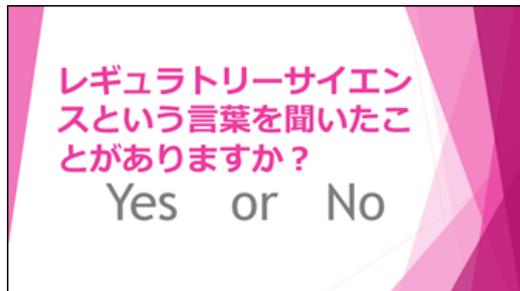
義務教育と高等学校までの教育ではレギュラトリーサイエンスが登場する機会はほとんどない。概念自体も新しいものであり、まだまだ世間に浸透していないことも理由の一つであろう。「現在我が国では、東京大学、名古屋市立大学、慶應義塾大学、武蔵野大学をはじめとする幾つかの薬学系大学においてレギュラトリーサイエンス関連の教育と研究が進められつつあるが、東京大学を除いて大半は2010年以降に設立されたものである。」とのことで、やっと大学レベルで教育が始まっている段階である。また理系における普及であり、ごく限られた人が学んでいる状況であるといえる。

5. 放射線リスク教育におけるレギュラトリーサイエンスの在り方

中学校3年生の使用する教科書の中には、年間の被曝線量や、医療被曝による線量など、線量について記載されている。しかしどのようにして決められたのか、その基準値がどんな意味を持つのかを記載している教科書は存在しない。年間被曝線量や医療被曝について説明をする際に、関連してレギュラトリーサイエンスについて学ぶことができる。

5. 授業ですぐに使えるパワーポイント資料

限られた時間の中で学習できるように発問はすくなく、関心が高まるようにクイズ形式のものを作成した。



参考文献

- [1]<http://rs-medhu.umin.jp/regulatoryscience/>, 北海道大学レギュラトリーサイエンス部門 HP
- [2] 村上道夫, 永井孝志, 小野恭子, 岸本光生, 基準値のからくり 講談社 2014
- [3]http://www.scicomsociety.jp/wp-content/uploads/2012/08/sc_20120801_kishimoto.pdf, 岸本充生, 安全な作法としてのレギュラトリーな科学
- [4] 塚本桂 アメリカにおけるレギュラトリーサイエンスの教育と研究の現状報告 2015
- [5] 松田尚樹 健康と医療の安全・安心 - 放射線と健康 Radioisotopes 2014

資料

X線発見ならびに放射線研究の歴史

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生

ドイツ・ヴュルツブルグ大学の Friedrich Conrad Röntgen (レントゲン) は、陰極線がガラス管の壁に当たるとガラスが緑色の蛍光を発生し、別のある種の化合物に対しても蛍光を出す冷光現象に注目していた。1895年11月この冷光現象をより鮮明に見ようと、外からの光を遮るため紙に包んだ陰極線管を動作させた際に、1mほど離れた所に置いてあったシアン化白金バリウムを塗った紙が蛍光を発生するのを観察した。通常陰極線は大気圧で数 cm しか通過しないため、陰極線以外の放射線が生じていると理解した。彼はとりあえず“X線”と名付けた。レントゲンがX線を発見した研究室は現在レントゲン記念館となっている(図1,2)。



図1. レントゲン環状通り8番地のヴュルツブルグ大学旧物理学研究所(現在レントゲン記念館)



図2. 1905年から1937年まで、レントゲン記念館外壁に掲げられていた記念銘板(左)、1905年のX線発見10周年とレントゲン60歳の誕生日にドイツの有数な物理学者らにより贈られた

1900年にはバイエルン政府の要請でミュンヘン大学物理学主任教授となり、1920年まで務めた。1901年のノーベル賞受賞後、バイエルン国王から“von”の称号を呈示されたが受諾を辞退した。この清貧の科学者は、第1次世界大戦後のインフレ経済に追い詰められ、1923年大腸がんで死去した(図3)。



図3. レントゲンの終焉の家、ミュンヘンのマリア・テレジア通り11番地

このレントゲンの研究に興味をそそられたのがフランスの Antoine Henri Becquerel (ベクレル) である。蛍光を発生するウラン化合物が、写真乾板を感光することを見つけ、当初はベクレル線と呼ばれた。ウラン化合物と写真乾板の間に骨を入れると、骨の写真が写ったが、X線ほど鮮明でなかったため注目はされなかった。ただしベクレルの発見は、キュリー夫妻(Marie Sklodowska Curie と Pierre Curie) に受け継がれた。夫妻はウラン鉱物であるピッチブレンドを化学処理し、1898年ポロニウム元素を発見している。同年末には、ウラン化合物の250万倍強い放射線を出す元素ラジウムを発見している。ちなみに放射線を出しているのはウランなどの元素であることを実験で示し、その能力を「放射能」と名付けたのはキュリー夫妻である。1903年キュリー夫妻とベクレルはノーベル物理学賞を分かち合った。

なおX線が身体に有害であることは、初期の段階で認識されていた。レントゲン自身も長い露光の後、皮膚に腫瘍ができ、髪の毛が抜けることに気づいていた。X線装置を扱う人々

に放射線皮膚障害が広く見られていた。一方シカゴの医学生、エミール・グルッペはX線が治療能力を持つことを認識し、1896年に乳がんの女性に用いた。フランスでの胃癌治療、ウィーンでの皮膚癌治療、スウェーデンでの頭部および頸部の癌治療が実施され、放射線による癌治療が期待された。

一方、ベクレルは何時間が胸ポケットにラジウムを入れたままにし、そのため数週間皮膚に潰瘍ができた。放射性元素はX線と似た生理学的影響をもつことがわかり、放射性物質に直接接触れるがん治療である小線源治療が開発された。現在の放射線治療は、電子線、陽子線、中性子線などの粒子線とX線やγ線などの電磁放射線を用いて、悪性腫瘍の治療が行われている。例えばラジウムやコバルト60などの密封線源を利用した癌治療などである。

なお、X線発見に関しては園部利彦「命と医学を考えると知っておきたい科学者と科学史」（近代文芸社）の一読を薦める。

放射性元素の語源

千葉大学教育学部基礎医科学 杉田 克生

ウラン（元素記号：U）は、英語は uranium、ドイツ語 Uran である。1789 年、Martin Heinrich Klaproth がピッチブレンドの中から発見した。同時期に天文学者の Herschel が Uranus(天王星)を発見・命名にちなんで uranium と名付けられた。Uranus の語源はギリシャ神話における天空の神 Ouranos(ウラノス)である。ウラノスは一時全世界の支配権を手に入れるが、その王座を自らの子のクロノスによって暴力的に奪われてしまう。また、クロノスもその子ゼウスによって統治権を奪われる。本来「天、天空」を意味するギリシャ語 uranos の派生語には、天文の分野だけでも uranography(天文学)、uranolith(隕石)、uranoscopy(天体観測)などがある。

なお Klaproth は uranium との類推により、元素チタン(titanium : Ti) も 1795 年に命名している。鉱物の分析から新しい金属酸化物が見出されるようになった時代、この元素チタンは鉱物中から発見され、神話のティターン(Titan)にちなんで命名された。チタンは天の神ウラヌスと地の神ガイアの子である。他に Titan に由来する用語には次のものがある。土星の衛星 Titan(タイタン)、豪華客船 RMS(Royal Mail Steamer) Titanic(タイタニック号)、恐竜の Titanosaurus(ティタノサウルス)などがある。手元の辞書では、「Titanic」とは、「絶対安全と考えられていたものが災禍に遭遇する場合に使われることがある」と補足説明がある。福島第一原子力発電所事故に使用できるかどうかは疑問である。

次にポロニウム(Polonium:Po)であるが、ラテン語のポーランド(Polonia)が由来である。この元素の発見者キュリー夫人の祖国がポーランドであったため、国名に因んで名付けられた。英語 Poland は地元では Polska とよばれ、「野原、平地」を意味するロシア語 поле との関連が言われている。またラジウム(Radium : Ra)はラテン語 radius(放射)が語源である。ラジウムによる放射線が細胞に影響を与えることは発見の初期から分かっていた。また放射性物質ラドン(Radon: Rn)は、ラジウムの崩壊によって生まれることから、RADium emanatiON の略で Radon と名付けられた。

語源としての radio- (母音の前で radi-) は、「放射の、電波、無線」の連結形である。派生語として、radioactive(放射能の、放射性的)、radioactive isotope(放射性同位元素)、radio astronomy(電波天文学)、radio carbon dating(放

射性炭素年代測定法)、radio frequency(無線周波数)、radio frequency heating(高周波加熱)、radiogram(無線電報、X線写真)、radiology(放射線医学)、radioscopy(X線透視)、radio source(宇宙の電波源)、radio telegraph(無線電信)、radius(半径、車輪の輻、放射)などがある。ただし radio- には橈骨の意味での radius も派生語である。車輪の軸と輪とを放射状につなぐ棒である「輻」のことも radius と言い、解剖学上橈骨が車輪の輻に似ているところから名づけられたと言われている。

放射線治療に用いられるコバルト(Cobalt : Co)はギリシャ語 kobold(地中の妖精、中世の妖精)が由来である。コバルト(Kobold, Kobolt)はドイツの民間伝承として語られてきた醜い妖精、精霊である。英語ではゴブリンと訳されることもある。青の顔料として古くはエジプトの陶器やイランのガラス球の着色に用いられていた。この元素を含む鉱物は冶金が難しく、16世紀のドイツの鉱山労働者たちはドイツ民話の醜い山の精コバルト(Kobold, Kobolt)が鉱石に魔法をかけているのであろうと考えた。その後、この元素は18世紀にスウェーデンの化学者イエオリ・ブランド(1694-1768)によって初めて分離された。ベルグマンによって新元素であると確認され、コバルトに因んだ名前が付けられた。語源は同じだが説明が若干異なる他の説によると、妖精が山野に出現し中世すでに有用であった鉄を盗んだという。その廃鉱石が Kobalt と名付けられ、その石から発見された元素にコバルトという名前が付けられたという話である。

コバルトはドイツ民話の山の精が由来であるが、トリウムは北欧神話の雷神(Thor)に由来するなど、元素名の由来を辿ると各地の神話に行きつく。27核種の同位体すべてが放射能をもつトリウムは、スウェーデンの化学者ベルセーリウス(1779-1848)がトール石(ノルウェーの鉱物)の中から発見した。雷神であり農耕神でもあるトールの使命は霧の国の巨人と闘って神々の世界を守ることであった。トールはどのような敵でも一撃で倒すミヨルニーというハンマーを持っているが、ある時巨人トリムによってそのハンマーが盗まれてしまった。トールはハンマーを取り返すために美しい女神の格好をしてトリムの元へ行ったが、なぜそのような格好をしたのか不明である。ちなみに、木曜日 Thursday はトールの日である。

元素名の由来に神話に関わっている例は多くある。日本人はギリシャ語、ラテン語の素養がなく、ましてやギリシャ神話やローマ神話など少なくとも学校教育では正式には習わない。科学立国を目指す日本の生徒にも、科学用語の語源になっているギリシャ語やラテン語を学ぶ機会が望ましい。また放射線元素語源をより知りたい方には、池田黎太郎監修、市毛みゆき、杉田克生著「元素名語源集」千葉大学教育学部養護教諭養成課程（平成26年3月31日発行 ISBN978-4-903328-16-4）の一読を薦める。また、1. 竹村文祥「神話、伝説、医学用語」東明社、2. 竹本喜一、金岡喜久子「化学語源ものがたり」化学同人、杉田克生「放射性元素の発見と命名由来」STETHOSCOPE 2014；215：12-14.なども参考となる。

ISBN978-4-903328-22-5

<http://doi.org/10.20776/B9784903328225>



CHIBA UNIVERSITY

発行 平成 29 年 3 月 15 日

編集 千葉大学教育学部基礎医科学

杉田 克生

出版元 千葉大学教育学部養護教諭教育講座

〒 263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1 - 33

TEL 043-290-2584

サイエンススタジオCHIBA <http://www.edu.chiba-u.jp/ssc/>

表紙デザイン 飯田 祥子