



Photo Kironori Kirano

Index

屋内ラドン対策に関する我が国および諸外国の現状 小平 聡／ヤニック ミロソラフ／栗原 治	1
放射線被ばくと染色体異常 ～ 原子力災害を経験して ～…数藤由美子	6
〔コラム〕 92th Column 【がんとアルツハイマー病】.....中川 恵一	11
〔学生応援企画〕 福島県浜通り地域における放射能測定に関する研究と教育活動住浜 水季／加藤 歩都／近藤 真衣	12
〔放射能・放射線単位・元素名の由来〕 第15回 ハフニウム ₇₂ Hf：hafnium高橋 正	17
令和8年度放射線安全取扱部会年次大会（第67回放射線管理研修会）...	18
〔サービス部門からのお願い〕 返信用封筒はセロハンテープで確実に封をしてください.....	19

屋内ラドン対策に関する 我が国および諸外国の現状

小平 聡*1／ヤニック ミロソラフ*2／栗原 治*3

1. はじめに

地上に存在する自然放射線の主要な発生源の一つが、放射性ガスであるラドン（Rn-222）およびトリウム（Rn-220）である。これらは環境中のウランやトリウムの放射性崩壊によって生成され、アルファ壊変を繰り返しながらポロニウムなどの放射性子孫核種を生じる。これらの子孫核種の多くもアルファ線を放出するため、放射線防護の観点から重要な被ばく源となる。とりわけ屋内環境では、換気が不十分な場合、半減期約3.8日のラドンが滞留しやすく、吸入により肺に取り込まれる。吸入されたラドンおよびその短半減期子孫核種（Po-218、Po-214など）は肺の気道に沈着・壊変し、肺組織に放射線被ばくを与える。この過程が長期的に肺がんを引き起こす要因であることが知られており、ラドンは喫煙に次ぐ肺がんの主要なリスク因子と位置付けられている。

屋内ラドン濃度は、発生源となる岩石や土壌の地質学的特性に加え、建物の構造や建材、気象条件、換気の程度、さらには居住者の生活行動など、さまざまな要因によって変動する。職場環境も多様であり、比較的低濃度となる高層ビル内のオフィスから、高濃度となる可能性のある地下作業場に至るまで、幅広く存在する。また、被ばく状況は職種や労働時間によっても大きく左右される。こうした背景から、諸外国では一般住宅や職場を対象とした大規模な屋内ラドン調査が実施され、その成果はラドン濃度分布の把握、高リスク地域の特定、参照レベルの設定、さらにはラドン行動計画の策定に活用されてきた。疫学調査により、概ね100Bq/m³程度のラドン濃度においても肺がんリスクの有意な増加が確認されており¹⁾、WHO（World Health Organization:

世界保健機関）は100Bq/m³²⁾、IAEA（International Atomic Energy Agency：国際原子力機関）およびICRP（International Commission on Radiological Protection：国際放射線防護委員会）は一般住宅に対して300Bq/m³を参照レベルとして勧告している³⁻⁵⁾。職業被ばくについては、滞在時間を考慮した要件や指針がIAEAにより別途示されている。我が国においても昭和50年代から平成20年代前半にかけて屋内ラドンの大規模調査が実施された（例えば⁶⁾）。屋内ラドン濃度は平均で10～30Bq/m³程度と諸外国と比べて低い傾向にあることが示された一方で、WHOが示す100Bq/m³を超える家屋が一定数存在することが示唆されている。他方、職場環境を対象とした大規模調査は限られており、地下作業場や温泉地など高ラドン濃度となり得る環境に加え、ウラン・トリウム系列核種を含む自然起源放射性物質（Naturally Occurring Radioactive Materials：NORM）を取り扱う可能性のあるレアアース材料工場等における被ばく実態は十分に把握されていない。これらは現存被ばく状況として整理され、公衆被ばくまたは職業被ばくとしての区分に応じ、各国で独自のガイドラインや規制に基づく対応が取られている。このような状況を踏まえ、我が国においても屋内ラドン被ばくに対する適切な理解と対応は重要な課題である。

本稿では、我が国で実施された調査事例の文献調査および諸外国の規制当局・関係機関への聞き取り調査の結果を踏まえ、ラドン対応の現状を整理した。なお本稿は、原子力規制委員会による令和5・6年度放射線対策委託事業で実施した屋内ラドン対応および職業上のラドン対応に係る調査の成果^{7, 8)}を取りまとめたものである。

*1 Satoshi KODAIRA 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 放射線医学研究所

*2 Miroslaw JANIK

*3 Osamu KURIHARA



Figure 1 consists of two maps, (a) and (b), showing the spatial distribution of annual average radon concentration (R_n) in $Bq\ m^{-3}$.

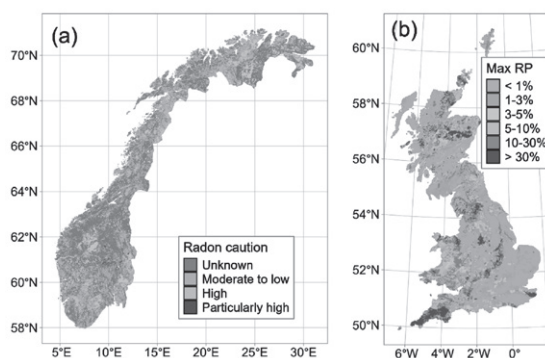
Map (a) shows the United States. The legend indicates the following ranges for R_n in $Bq\ m^{-3}$:

- (0,50]
- (50,100]
- (100,150]
- (150,200]
- (200,250]
- (250,300]
- (300,350]
- (350,400]
- NA

Map (b) shows Australia. The legend indicates the following ranges for R_n in $Bq\ m^{-3}$:

- (0,10]
- (10,20]
- (20,30]
- NA

屋内ラドン濃度は、地質的特徴や住居構造、生活様式などにより大きく異なる。図1にWHOデータベース⁹⁾を基に作成した平均ラドン濃度マップを示す。北欧諸国ではラドン濃度が高い一方、我が国やオーストラリアでは比較的低く、米国やオーストリアのように広い濃度分布を示す国もあり、平均ラドン濃度には国ごとの違いが認められる。家屋を対象とした大規模調査で得られたラドン濃度データをマップ化し、国民への情報提供を行っている国がある。また、ラドン濃度データと地質学的特性を考慮し、リスク評価や調査・対策の優先順位付けに活用するためのラドンポテンシャルマップを作成している国もある。図2に米国およびオーストラリアにおけるラドンマップの例を図3にノルウェーおよびイギリスにおけるラドンポテンシャルマップの例を示す。ラドンマッ



ブは、地域単位（例えば州など）で集計された屋内ラドン濃度の平均値を示すものである。一方、ラドンポテンシャルマップは、ラドン濃度測定

データに地質学的特性やリスク評価の要素を組み合わせ、より詳細な空間情報を提供している。後者における色分けは、ラドン曝露リスクの程度、あるいは参照レベルを超過する建屋の割合など、行動基準の設定に関連する指標を表している。アメリカでは、ラドン測定が実施された住宅の約3.5%の約70万軒に高濃度ラドンが確認された。平均屋内ラドン濃度は約1.3pCi/L（約50Bq/m³）であり、肺がん死亡者数の約13%に相当する年間約2万件がラドンに起因すると推定されている。一方、ノルウェーで実施された大規模調査では、平均屋内ラドン濃度は約88Bq/m³であり、約27%の住宅が100Bq/m³を、約9%が200Bq/m³を超えている。これらの高濃度は主に地質条件と寒冷な気候に起因し、他国と比べても深刻な問題として認識されている。我が国では、過去に複数回の大規模調査が実施されており、マップ化はされていないものの、平均屋内ラドン濃度は諸外国より低い⁶⁾。オーストラリアは我が国と同様に低い平均屋内ラドン濃度（約11Bq/m³）にあるが、ラドンマップやガイドラインが整備されている。

3. 諸外国をはじめとするラドン対応に係る現状

3.1. 公衆被ばくの観点

主に欧州ではDarbyらによるリスクモデル¹⁾、米国では電離放射線の生物影響に関する委員会（BEIR）の第Ⅳ報告書¹⁰⁾に基づき、ラドンによる健康リスク評価が行われている。これらの知見を踏まえ、各国では国際的な指針と整合する範囲である100～300Bq/m³を目安として、屋内ラドン濃度の参照レベルが設定されている。ラドン対策による肺がんリスクの低減を通じて、将来的な医療資源の投入や医療費の抑制を図るという考え方が主流となっている。このため、多くの国において、ラドン被ばくと肺がんリスクに関する科学的知見、屋内ラドンの測定方法および低減化措置を体系的に整理したガイドラインが策定され、国民への普及啓発活動が積極的に展開されている。一般住宅など公衆を対象としたラドン濃度の測定や低減化措置は、原則として勧奨とされており、アメリカでは不動産取引の際に住宅のラドン濃度が評価項目の一つとして扱われるケースもある。

ラドン濃度の測定には、設置が容易で低コストのパッシブ型測定器¹¹⁾（例えば図4のようなラドン

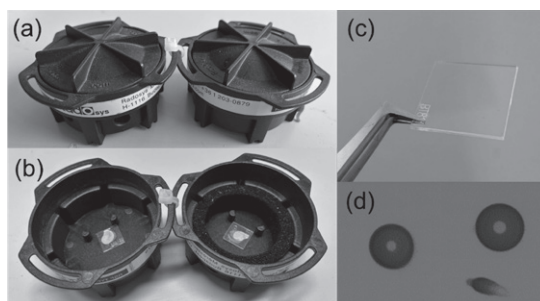


図4 パッシブ型測定の代表例である固体飛跡検出器（CR-39プラスチック）を用いたラドンモニター：(a) 外観、(b) 内部にCR-39を設置、(c) CR-39の外観、(d) アルファ線の飛跡画像

モニター内の固体飛跡検出器に生成されたラドンならびに子孫核種からのアルファ線の飛跡数からラドン濃度を測定）が主に用いられている。測定場所は居住者の滞在時間が長い居間や寝室が一般的であり、季節変動を考慮した約3か月の長期測定が標準とされている。運用面では、希望者に測定器を郵送し、一定期間設置・曝露後に返送することで測定結果を報告する方式が広く採用されている。測定結果の信頼性を確保するためには、測定技術の標準化および品質保証が不可欠であり、ラドンの標準場は約24か国に設置され、国際機関の勧告に基づく標準化が行われている。測定の結果、高いラドン濃度が確認された場合には低減化措置の実施が推奨される。住宅の床下土壤にパイプを設置し、土壤中から流入するラドンを含むガスを屋外へ排出する土壤減圧法は、効果的な対策として採用される事例が多い。

公衆への情報発信は、ラドン対策を所管する責任機関が関係行政機関やラドン協会等と連携して実施するのが一般的である。ウェブサイトによる情報公開に加え、相談窓口の設置や、電話・電子メールによる問い合わせ対応が行われている例が多い。また、ラドンキャンペーンやラドンウィークなどの集中的な周知活動も実施されており、例えば米国では、毎年1月が「ラドン重点月間」と位置付けられ、テレビCM等を通じた積極的な情報発信が行われている。欧州では、欧州ラドン協会（ERA）が各国の行政当局や研究者ならびにラドンサービス提供者を結びつける役割を担っている。ERAはリスクコミュニケーションに関する情報交換やベストプラクティスの促進に加え、国際ワークショップの開催や情報プラットフォームの運営を行っている。

3.2. 職業被ばくの観点

諸外国では、職場環境におけるラドン濃度調査データに基づき、高リスク地域の特定やラドン濃度の参照レベル設定を行い、これらを踏まえたラドン行動計画が策定されている。一般安全要件 (General Safety Requirements) IAEA GSR Part 3³⁾ では、職場における滞在時間を考慮し、参照レベルとして1,000Bq/m³が示されている。これは、一日の労働時間を8時間と仮定した場合、一般住宅に対する参照レベルである300Bq/m³と比べ、約3倍の濃度までを許容するとの考え方に基づくものである。作業員のラドン被ばく防護に関しては、IAEA GSR Part 3³⁾ において要件が設定された後、一般安全指針 (General Safety Guides) GSG-7「職業上の放射線防護」¹²⁾ において具体的な指針が示された。さらに近年、「ラドンによる被ばくに対する作業員の防護」を目的とした個別安全指針 (Specific Safety Guides) IAEA SSG-91¹³⁾ が発刊されている (詳細については既存の解説¹⁴⁾ を参照)。

諸外国におけるラドン対策は、体系的に進められている。図5は、58か国を対象として、職場におけるラドン対応に関するガイドラインまたは法規制の有無を整理したものである。2019年のWHOデータベース⁹⁾ によれば、ガイドラインを有する国は9か国であり (その後、2024年にオーストラリアが新たに設定し、現在は10か国)、法規制を有する国は35か国、いずれも有していない国は我が国を含め14か国である。なお、ラドン対応に特化した制度ではないものの、室内空気質に関する

法令の中にラドンが含まれている場合もある。英国や米国ではラドン行動計画が策定されており、定期的な見直しが行われている。前述のとおり、高ラドンとなる可能性のある建屋や地域の特定には、大規模調査結果や地質学的特性に基づいて作成されたマップが活用されている。

職場環境は職種や作業形態により多様であり、高層ビル内のオフィス業務のように高濃度となりにくい環境がある一方、地下作業場など高濃度となる可能性のある環境も存在する。また被ばく状況は労働時間によっても大きく左右される。水道施設や観光洞窟などの地下施設は高ラドン濃度となる可能性がある代表的な職場であり、とりわけ地下水利用の多い欧州では水道施設で非常に高い濃度が報告されている。例えばスイスでは水道地下施設の年間平均ラドン濃度が5,000Bq/m³を超えている。オーストラリアでは一般住宅のラドン濃度は低い水準にあるものの、多数の観光洞窟やウラン鉱山を有しており、これらを職場とする従業員を対象としたラドン対策が行われている。職業上のラドン被ばくが懸念される職場では、ラドン濃度測定が義務付けられている場合が多く、主にパッシブ型検出器が用いられている。参照レベルを超える場合には、換気設備や排気システムの設置などの低減措置が講じられる。測定や低減措置に要する費用は雇用主が負担するケースが多く、従業員への教育や規制当局への報告が義務付けられている国も少なくない。また、各国の規制当局の中には、自国のラドン対策プログラムに基づき、職場および従業員を対象とした教育・情報



図5 58か国の職場ラドン対応に係るガイドラインや法規制の有無に関する状況

提供を実施するとともに、測定や低減措置を担う事業者に対する認証制度を運用している例もある。

我が国は平均的なラドン濃度が低い国であるものの、ラドン温泉や観光洞窟等、高濃度となる可能性のある職場が存在する。我が国で実施された職場環境における大規模なラドン濃度調査は過去に1例のみ¹⁵⁾であり、国勢調査の産業分類に基づく屋内職場（事務所・工場に加え、学校や病院など）を対象として実施されたものである。これは調査目的や視点の違いによるものではあるが、潜在的に高ラドンとなる職場を重点的に選定したものではない。その他の知見は研究者による個別測定に限られ、測定器や条件の違いによりデータ品質が一様でない可能性がある。我が国では平均濃度が低い一方、以下に示すような高ラドンとなる可能性のある職場環境に関するサンプリングが十分とは言えない状況にある。

- ・地下鉱山、トンネル、地下施設、地下研究所、観光洞窟、食品貯蔵庫、NORM処理施設、温泉作業場等
- ・2003年の建築基準法の改正で義務付けられた換気システムが備わっていない古い建屋等
- ・地質学的に花崗岩や流紋岩など、ウラン・トリウム含有量の高い岩石が分布する地域に存在する建屋等

4. まとめ

諸外国では、疫学的知見に基づくリスク評価を背景として、屋内ラドン濃度の大规模調査、ラドンマップやラドンポテンシャルマップの整備、参照レベルの設定、公衆および職業被ばくの双方を対象としたラドン行動計画の策定が進められてきた。これらの取組は、肺がんリスクの低減を通じた公衆衛生の向上や、長期的な医療負担の軽減を目的とする予防的な放射線防護政策として位置付けられている。我が国の平均的な屋内ラドン濃度は諸外国と比べて低い水準にあるが、職場環境を対象とした体系的なラドン濃度調査は限られており、地下施設や温泉作業場、NORM関連施設、特定の地質条件下に立地する建屋など、潜在的に高ラドン濃度が懸念される職場環境については、実態把握が十分とは言えない。諸外国の事例からは、ラドン対策を効果的に推進するためには、参照レベルの設定に加え、測定手法の標準化と品質保証、測定および低減措置を担う体制整備、国民

や事業者への継続的な情報提供と教育、ならびに行政や規制当局等の明確な役割分担と責任体制の確立が重要とされている。我が国においては、平均的な屋内ラドン濃度が低いという特性を踏まえつつも、高ラドン濃度となる可能性のある環境や職場に着目した段階的かつ重点的な調査の実施、測定データの質を確保した体系的な情報の蓄積、ならびにそれらに基づいた合理的な対応方針を整理することが重要な課題と考えられる。国際的な動向との整合性を確保しながら、我が国の実情に即したラドン対応の在り方を検討・整理していくことが求められる。

謝 辞

本稿は、放射線安全管理に関わる事業者に対する屋内ラドン対応に関する理解の普及に資することを目的として、原子力規制委員会による令和5・6年度放射線対策委託費の事業成果を取りまとめたものである。

参考文献

- 1) S. Darby et al., BMJ, 330 (2005) 223.
- 2) WHO handbook on indoor radon: a public health perspective (2009).
- 3) IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (2014).
- 4) ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1) (2010).
- 5) ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3) (2014).
- 6) G. Suzuki et al., J. Radiat. Res., 51 (2010) 683.
- 7) 令和5年度放射線対策委託費(我が国の屋内ラドン対応の在り方検討に関する調査)成果報告書：<https://www.nra.go.jp/data/000473737.pdf>
- 8) 令和6年度放射線対策委託費(我が国の職業上のラドン対応に関する検討のための調査)成果報告書：<https://www.nra.go.jp/data/000476827.pdf>
- 9) WHO Radon Database
<https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/topic-details/GHO/gho-phe-radon-database>
- 10) National Research Council. Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters (BEIR IV) (1988).
- 11) S. Tokonami et al., Rev. Sci. Instrum., 76 (2005) 113505.
- 12) IAEA Safety Standards Series No. GSG-7 (2018).
- 13) IAEA Safety Standards Series No. SSG-91 (2024).
- 14) 佐々木, 荻野, Jpn. J. Health Phys., 60 (2025) 95.
- 15) S. Oikawa et al., J. Environ. Radioact., 87 (2006) 239.

放射線被ばくと染色体異常

～ 原子力災害を経験して ～



数藤由美子*

■はじめに

原子力災害をはじめとする電離放射線被ばく事故・事件における緊急被ばく医療では、患者の重症度に基づく振り分け（トリアージ）と治療計画の立案のために、患者ひとりひとりの被ばく線量の推定（線量評価）が必要です。線量が1～2 Gyを超えると治療を要するレベルの急性放射線症候群（acute radiation syndrome, ARS）を発症することが知られています。前駆期、潜伏期、発症期、回復期（または死亡）という経過をたどりますが、線量が高いほど早く症状が現れ、かつ症状が重くなり、また、放射線感受性の高い組織から症状が現れます。症状が現れるまでには時間がかかることがあり、重症化する場合は造血幹細胞移植をはじめとする高度な医療体制を準備しなければならないことをふまえ、被ばく事故後のできるだけ早い段階で迅速に線量推定を行う必要があります。

線量推定には、臨床像からの推定（症状の種類・重症度・発生時期や血球数の変化）、物理学的線量評価（個人線量計の値、空間線量と滞在時期・状況等行動調査からの推定計算など）、生物学的線量評価が用いられます。医師はこれらの情報が全て集まるのを待つのではなく、随時集まった情報を参考に総合的に判断します。

生物学的線量評価では受け入れ患者の体から得られた試料を用います。歯などを用いた電子スピン共鳴測定法も含まれますが、観測される現象や測定法は物理学的な手法となります。本稿では、被ばく者の細胞で観察される染色体異

常に基づく線量評価法の原理、代表的な手法、事故への適用例を中心に概説します。

1. 染色体による線量評価法の原理

私たちの身体には数十兆個の細胞が集まり、様々な組織や器官を構成しています。細胞の中の核には遺伝情報を伝達するDNAからできている染色体があります。ヒトの場合、二倍体は通常22対の常染色体と1対の性染色体からなります（図1）。人体が放射線に被ばくすると、放射線の電離作用によって直接DNAが切断されたり（直接作用）、体内の水や酸素から産生されたフリーラジカルにより細胞のDNA等が損傷を受けたりし（間接作用）、これらの傷が正常に修復されないと、異常な染色体が形成されます（図2）。このとき、染色体異常の生成頻度は、放射線の線質や線エネルギー付与率（linear energy transfer, LET）

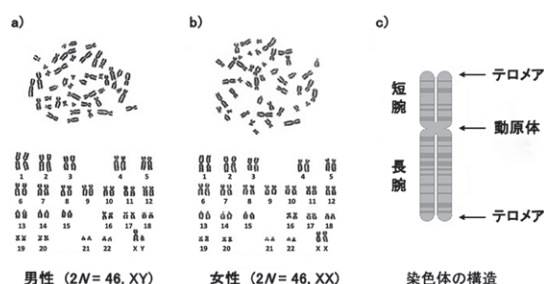


図1 ヒトの正常な核型と染色体の構造

末梢血リンパ球染色体標本をギムザ染色して得た分裂中期の細胞核の染色体像[a], b)上図]と、それらの染色体を染色体番号順に並べた核型[a], b)下図]を示す。正常な染色体の形態をc)に示す。[染色体写真：生物線量評価グループ ホームページより]

* Yumiko SUTO 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 放射線医学研究所 計測・線量評価部 生物線量評価グループ

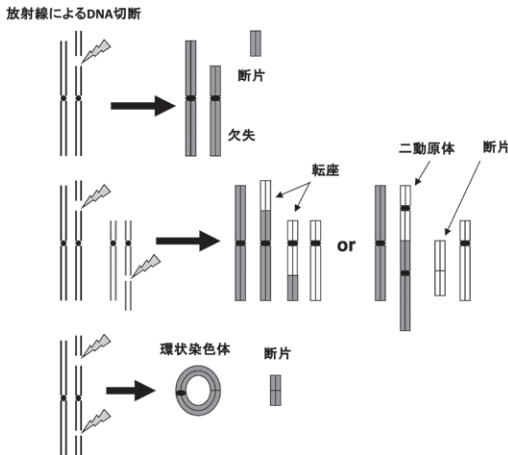


図2 放射線被ばくによる染色体異常の生成
放射線によって切断されたDNAが正常に修復されず、他の染色体との間で二動原体染色体や転座染色体を生じることがある。

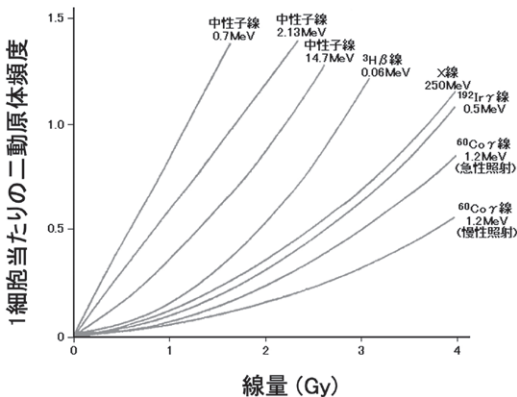


図3 線質の異なる放射線による二動原体染色体生成頻度[R. J. Dufraim *et al.* (1980)を改変]

等によって特徴的な線量効果関係を示すことが知られています（図3）。この線量効果曲線（検量線）は直線モデルや直線二次（LQ）モデルで表されます。患者の細胞で観察された特定の染色体異常頻度を、適した検量線（数式）に当てはめることで、線量を推定することが可能です。

では人体のどのような組織の細胞を用いるか、ですが、採取する際に患者にとってできるだけ侵襲性が低く、かつ、放射線感受性が高い（被ばく後早くから異常が現れる）、末梢血リンパ球が用いられます。採血で得たリンパ球を実験的に放射線照射した場合でも、実際に被ばくした人から採血した場合でも、同程度の線量効果

関係を示すため、事故に備えて予め調べたい線質の放射線を様々な線量で実験的に末梢血に照射して、線量ごとに染色体異常の生成頻度を計数し、検量線を用意しておきます。被ばく事故で搬送された患者の染色体異常生成頻度を調べ、適した検量線に当てはめることで、被ばく線量を推定することができます¹⁾。1細胞当たりの染色体異常生成頻度はポアソン分布することから、局所的被ばく（患者の体が体積比にして何%、何Gy被ばくしたか）を推定することも可能です。複数種類の線質からの被ばくでも、染色体異常を調べることで、被ばく患者の細胞への総合的な影響の度合いがわかり、被ばく医療の準備に役立ちます。

一般に末梢血中のリンパ球は休止期にあるので、細胞培養液にフィトヘマグルチニンを加えて活性化させて細胞分裂を開始させます。48時間の細胞培養を行い、紡錘系形成阻害剤を与えることで1回目分裂の中期（核ゲノムが染色体として観察できる時期）にとどまる細胞を得、回収・固定後、スライドガラスに播いて標本を作ります。標本は染色して顕微鏡で画像撮影し、染色体異常判定に用います。従来、安価なギムザ染色液による単色染色法が用いられて、染色体の形態的異常が検出されてきました（図4）。現在では、検出したい染色体特定部位の塩基配列に対して相補的な配列のプロンプを蛍光標識して用い、その部位を蛍光顕微鏡下で検出する手法（蛍光 *in situ* ハイブリダイゼーション法、FISH法）も用いることができます（図5）¹⁾。

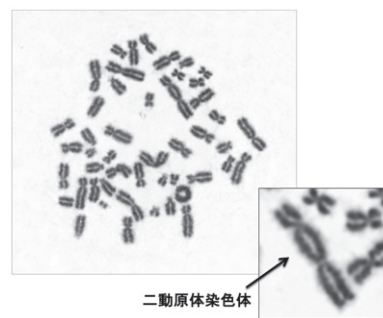


図4 ギムザ染色法による二動原体染色体の検出
中性子線1.0Gyを照射した末梢血の分裂中期染色体像。二動原体染色体が観察された（拡大図）。

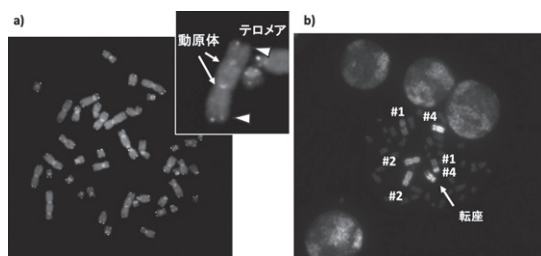


図5 蛍光 *in situ* ハイブリダイゼーション法による染色体異常検出例[Y. Suto *et al.*, 2011, 2015より改変]

末梢血リンパ球染色体標本で、a)動原体周辺のアルフォイド配列をCy3標識(赤色)、染色体末端共通のテロメア配列をFITC標識(黄緑色)したプローブを用いて、動原体(矢印)とテロメア(△)を検出し、二動原体染色体を見出した(拡大図)。b) 3つの染色体プローブを混合してFISHを行い、1番染色体: TexasRed標識(赤色)、2番染色体: FITC標識(黄緑色)、4番染色体: TexasRed & FITC標識(黄色)、その他の染色体(対比染色DAPI、青色)の4つの色で染め分け、転座染色体を検出した。

2. 線量評価に用いる染色体異常 ～二動原体染色体と転座染色体～

染色体には細胞分裂を正常に行う上で重要な部位があります。それが染色体の一部がくびれて見える動原体(セントロメア)です。このくびれが細胞分裂の際の紡錘系の着糸点です。正常な染色体はこれを1個だけもっています(図1c)。

放射線被ばくにより一部切断された染色体が正常に修復されるのではなく、他の切断染色体と融合すると、動原体を1個もつ転座染色体や、動原体を2個もつ二動原体染色体と動原体をもたない染色体断片が生じることがあります(図2、4、5)。

二動原体染色体や染色体断片は、細胞分裂で失われていくので、不安定型染色体異常に分類されます。二動原体染色体は、一般健康人の場合、細胞1,000個あたり0～1個しかみられないので、観察されれば直近の被ばくを反映すると考えられ、緊急時の線量評価の標準的な指標となっています¹⁾。二動原体染色体の生成頻度を指標とした線量評価法を【二動原体分析法】といいます。

一方、転座染色体は形態的には正常なので細胞分裂についていくことができ、安定型染色体

異常に分類されます。30年以上経ても観察されるため¹⁾、過去の被ばくの遡及的な線量推定に有用です。ふたつの異なる染色体が融合していますが、ギムザ染色では区別できません。異なる番号の染色体を別々の色に染め分けられるFISH法によって検出することができます(図5b)。このようなFISH法による線量評価法を【FISH転座解析法】といいます。

現在、このほかに微小核の生成頻度を指標とする線量評価法【小核分析】¹⁾も利用されますが、解説は別の機会に譲ります。以上の手法については、各国の線量評価責任機関で試験され、国際標準法が確立されました²⁻⁵⁾。私たちのラボでも国際標準法に基づいて受け入れ患者の検査を行っています。

3. 二動原体染色体による線量評価の実例 ～福島第一原子力発電所事故、緊急時の検査例～

2011年3月11日、東日本大震災に続いて、東京電力福島第一原子力発電所事故が発生し、日本は初めて「原子力緊急事態宣言」を発出する事態を経験しました。原子力災害に加えて大震災と続く津波の影響により、停電、情報通信機器の不通、交通網の機能停止、沿岸部をはじめとする医療施設の機能停止といった、一層の困難をともなう複合災害となりました。私たち放射線医学総合研究所(現・放射線医学研究所。以下、放医研)は、日本の原子力防災体制における被ばく医療中核機関として、災害発生直後から、原子力発電所事故現場作業従事者への対応、福島県民健康管理支援、一般電話相談、福島県や政府機関・関連国際機関への専門家の派遣など、様々な対応を行いました。

原子力災害単独の被災の場合、被ばく患者はまず、一次機関や二次機関の提携病院で受け入れます。しかしながら災害初期(3月)には、震災・津波の影響で、それらの病院での患者受け入れが困難でした。そこで放医研(千葉市)は自衛隊の協力を得て、ARSの発症が懸念される方々を研究所病院まで直接搬送していただくことで、検査と診断を滞りなく行うことができました。

当時（2011年3月～7月）、患者候補として受け入れた中に住民はみられず、その間に12名の原子力発電所事故現場の作業従事者を受け入れ、それ以降の緊急受け入れはありませんでした。幸い救急措置が必要な方はなく、表面汚染検査／洗浄を行い、詳しい問診を含む診察と被ばく線量評価を実施しました。この災害では、特に初期に原子力発電所の事故現場で多くの困難があり、作業従事者の個人線量計が実際の被ばくを正確に反映しているかどうかが不明でした。私たちは細胞分裂中期の染色体像の高速自動検出機能をもつ顕微鏡画像解析システム2台を用いて二動原体分析を行い、推定線量を直ちに担当医に伝えることで診断を支えました。二動原体分析による線量評価の値はいずれの作業従事者も計算値170 mGy未満、医療準備に用いられる95%信頼限界上限値300 mGy未満で、実際ARS発症例はありませんでした。1年後健診でも分析を実施し、着実な回復が確認されました。

以上の結果を発表した論文⁶⁾は、UNSCAREをはじめとする多くの文献や論文に引用されています。この研究は、事故発生後すぐに調査を開始した低線量被ばく者のヒトデータとして、また今後の緊急被ばく医療における実戦的な対応への示唆に富む経験《Lessons learned from Fukushima》として大きな関心を引きました。

4. 転座染色体による線量評価

～福島第一原子力発電所事故、遡及的検査例～

2011年3月14日から同年12月16日まで、緊急作業に従事する方の被ばく線量限度は100 mSvから250 mSvに引き上げられました。この間に福島第一原子力発電所で緊急作業に従事された約2万人を対象として、平成26年度（2014年）から、5年を1期とする厚生労働省委託の長期フォローアップ研究が進められています〔研究代表者：大久保利晃（現・労働安全衛生総合研究所）、第1期：東電福島第一原子力発電所緊急作業従事者に対する疫学的研究、第2期・第3期：放射線業務従事者の健康影響に関する疫学研究⁷⁾〕。私たちは物理学的線量評価の補完を目的としてFISH転座解析法による遡及的線量評価を試みて

います⁷⁾。二動原体染色体と異なり、染色体転座は血液採取時までの様々な影響を受けるため、ベースラインの値が二動原体染色体頻度のようにほぼ0というわけではありません。加齢によるDNA修復能力の低下に加えて、喫煙を始めとする生活習慣、それまでに曝されてきた医療被ばくや自然放射線その他の環境変異原などの影響があり、個人差もみられます。このような因子とその影響の度合を明らかにすることがより正確な線量評価につながるため、研究課題のひとつとなっています。

5. 原子力発電所事故を経験して得た課題の解決へ

従来、染色体異常の検出は顕微鏡撮影画像を専門家が目視観察することでなされていました。ヒトの染色体が46本であることは1956年に明らかにされ⁸⁾、1960年代にはギムザ染色法が、1970年代には各染色体を特有の縞模様染め分けするGバンド分染法が確立され、染色体の核型を分析し染色体の番号や異常を示す位置が判別できるようになりました⁹⁾。その後、自動核型解析ソフトウェアの開発が進み、1990年代には使用されるようになっていました。とはいえ今でも、異常な染色体は専門家が判定し直す必要が多々あります。臨床染色体検査ではひとりの患者につき20～100個の細胞の染色体を観察するのですが、放射線被ばくによる染色体異常は生成頻度が低く、ひとりの患者につき1,000個の細胞を観察するか、指標とする染色体異常を100個観察するまで細胞観察を行うように推奨されています^{1, 2, 4)}。1個の細胞には正常で46本の染色体があるわけですから、高度に熟練した観察者でも1,000個の細胞画像を目視判定するのには1000分（約17時間）以上かかる重労働になります。これでは大規模な被ばく事故の多検体染色体検査はとても難しいことがわかります。世界の各所で原子力発電所増設が進められ、また医療技術の進歩にともなう誤った被ばくの機会も増大するなど、計画外被ばくの可能性は少なからず増えています。核テロの脅威や広範囲に及ぶ原子力災害をも想定すると、被災者数が大規模となる事故・事件に対応できる画像解析手法が必

要といえます。

そこで、長年地域ネットワークを組んで複数のラボ間で相互協力するようになっていきます¹⁰⁾。私たちも国内ネットワークやアジアネットワークに参加しており、ヨーロッパネットワークや世界保健機関が主催するWHO BioDoseNetにも参加しています。現在ウクライナ周辺で原子力発電所が被弾するなどの恐れがあり、WHO BioDoseNetや国際標準化機構の生物学的線量評価対応ワーキンググループ (ISO/TC85/SC2, WG18) で、万一の原子力災害への染色体線量評価支援について話し合っています。

長年の努力の積み重ねはありますが、染色体異常を判定するのに全員が共通の観察基準をもつことが難しく、それぞれのネットワークは1年～数年に一度、ラボ間比較試験などを行い、判定の統一化と精度向上を目指しています。

近年では、人工知能 (AI) の技術が一段と発達し、深層学習を利用した画像認識技術を有効に導入できるようになりました。染色体の検出と染色体異常の分類に関しても、私たちのラボをはじめ、多くの研究グループが挑戦しています (図6)。今のところ国際標準化には至っておらず、玉石混淆といったところです¹⁰⁾。私たちは信頼性の高い教師データを作成してアルゴリズム開発を進め、線量評価のための染色体自動解析に関する国際標準プロトコルへの採用を目指しています。組織標本や染色体標本といった医用画像に対するAIアルゴリズム開発では、熟練度やプロトコルの違いで標本作製にラボ

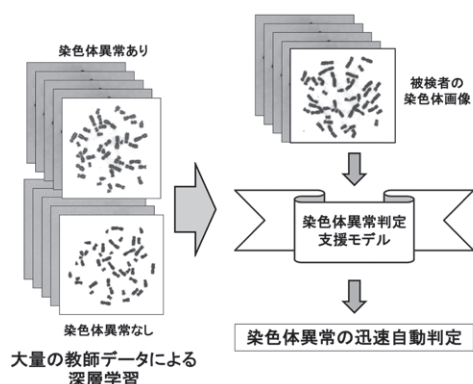


図6 深層学習法による染色体異常の自動画像判定モデル(アルゴリズム)の開発

間差が生じやすく、AIも深層学習で用いた教師データを作成したラボの標本に最適化してしまう傾向にあります。私たちのモデルも現在そのような状況にあり、国内ネットワークのいずれのラボの染色体標本画像にも対応できるよう、追加学習を含む開発を引き続き行っています。

■おわりに

放射線被ばくによって生じる染色体異常には、ヒトのゲノムの成り立ちも関わる様々な生物学的背景があり、染色体を観察していくだけでも発見があります。このような背景と数理的な分析を支えに、より適した線量評価モデルを構築することが可能であると考えられます。そのためには、医学生物学の専門家だけでなく、数理統計学やアルゴリズム開発など様々な分野の専門家の協力が必要です。本稿で研究協力のきっかけが生まれれば幸いです。

■参考文献

- 1) International Atomic Energy Agency (IAEA). Cytogenetic dosimetry: applications in preparedness for and response to radiation emergencies. Vienna: IAEA Publications; 2011.
- 2) International Organization for Standardization (ISO) 19238: 2023 (二動原体分析法)
- 3) ISO 21243: 2022 (大規模事故における二動原体分析法)
- 4) ISO 20046: 2019 (FISH転座解析法)
- 5) ISO 17099: 2024 (小核分析法)
- 6) Y. Suto *et al.*, Biodosimetry of restoration workers for the Tokyo Electric Power Company (TEPCO) Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. Health Physics 105: 366-373, 2013, doi: 10.1097/HP.0b013e3182995e42.
- 7) 放射線業務従事者の健康影響に関する疫学研究ホームページ <https://www.news.johas.go.jp>
- 8) J. H. Tjio and A. Levan, The Chromosome Number of Man, Hereditas 42:1-6, 1956, doi: 10.1111/j.1601-5223.1956.tb03010.x
- 9) Human Chromosomes: A Manual of Basic Techniques, 2nd (Ed., R. Verma and A. Babu), New York: McGraw-Hill Professional; 1995.
- 10) R. Wilkins *et al.*, Activities of ISO Working Group 18: Biological and Physical Retrospective Dosimetry, Disaster Med. Public Health Prep 19:1:e251, 2025, doi: 10.1017/dmp.2025.10095.



中川 恵一

東京大学医学部附属病院

がんとアルツハイマー病

がんとともに、人々が恐れる病気が認知症、とりわけアルツハイマー病です。

アルツハイマー病は、脳に異常なタンパク質がたまり、神経細胞が死んでいくことで、記憶や判断力が徐々に低下する進行性の病気で、認知症の約6～7割を占めます。

認知機能が低下するだけでなく、がんと同様、寿命が短くなります。過去の研究によると、アルツハイマー病と診断された人の平均余命は7～10年程度とされています。

私の父もこの病気によって、82歳で亡くなりました。がんと同様、遺伝の関与は大きくはありませんが、私自身も気になる病気です。

がんとアルツハイマー病は最も恐れられる病気のトップツアですが、同時に発症することはめったにありません。

アルツハイマー病の患者はがんを発症しにくく、がん患者はアルツハイマー病になりにくいというわけです。とくに、アルツハイマー病の患者では、がんのリスクは半減します。

この「がんとアルツハイマー病の逆相関」のメカニズムは解明されてはいませんが、がんは細胞が死ななくなる病気、アルツハイマー病は神経細胞が死んでいく病気ですから、死への方向性が逆向きなのは確かです。

アルツハイマー病が持つ細胞を死に向かわせる機序をがん治療に結びつけようとする研究が米国を中心に動き始めています。

さて、がんはある程度まで予防できる病気です。日本人男性の場合、発がん原因のうち、喫煙が24%でトップ。感染が18%、飲酒が8%、塩分過多が3%と続きます。女性では、感染が15%でダントツの一位、喫煙（受動喫

煙を含む）が5%、飲酒が3.5%です。

なお、感染で重要なのは、胃がんの原因となるピロリ菌、子宮頸がんのヒトパピローマウイルス、肝臓がんのC型・B型肝炎ウイルスです。

日本人男性では43%が、女性では25%が回避可能な発がん要因です。男女合計では、感染が17%、喫煙が16%を占め、生活習慣の改善や感染予防で、発がんリスクを36%減らせれます。

がんと同様、認知症（アルツハイマー病が約7割）の発症リスクも生活習慣などでかなり減らすことが可能です。中年期の生活がとくに大切で、難聴と高い悪玉コレステロールが認知症の原因のそれぞれ7%を占めます。次いで、うつ病、頭部外傷が3%、運動不足、糖尿病、喫煙、高血圧、肥満が2%となります。

若い頃の教育の不足、高齢期の社会的孤立はともに5%を占め、全体で45%が回避可能な要因とされています。

とくに、若い世代が一日中イヤホンを使っているのが心配です。今後、社会問題になる可能性もあります。なるべく大きな音を聞かないことが認知症に予防につながります。

悪玉コレステロールが難聴と並ぶ、認知症の二大原因であることもあまり知られていません。運動不足、糖尿病、肥満なども原因となることで分かるように、認知症は単なる脳の「変性疾患」ではなく、全身病と捉えるべきでしょう。

また、がんと同様、感染症によって発症が誘発されるという研究も進んでいます。とくにヘルペスウイルスの関与が注目を集めています。

带状疱疹ワクチンでアルツハイマー病のリスクが減るという研究もあり、私も遺伝子組み換えワクチンの接種を受けたところです。

福島県浜通り地域における 放射能測定に関する研究と教育活動

住浜 水季*1／加藤 歩都*2／近藤 真衣*3

岐阜大学教育学部理科教育講座（物理学）住浜研究室では、2018年から毎年、福島県浜通り地域で実施されている環境放射線研修に参加してきた。福島第一原子力発電所事故から学ぶべきことは多く、教員養成課程の学生にとって、現地で放射線を中心に学ぶ経験は大きな意義をもつ。

本研究室の学生は小学校・中学校理科の教員免許を取得し、多くが卒業後に学校教員となる。高校理科の教員となる学生もいる。そうした中で、浜通りで得られる科学データや、それを取得するための検出器の性能に関心を持ち、卒業研究のテーマとして取り組む学生も現れている。

これまでに、ゲルマニウム半導体検出器やヨウ化ナトリウムシンチレーション検出器の検出効率の評価、現地で採取した植物・土壌・石の放射能濃度測定、空間線量率の測定などを実施してきた。また、現地での活動を通して、役場職員や住民との交流もあり、学生たちはそれぞれに地域の思いに触れている。さらに、本研究室では現職の高校教員を対象とした放射線研修や高校生向けの研修も実施しており、教育への還元も積極的に行っている。活動の詳細については、浜ラボ（Hamadohri Science Lab）のウェブサイト（https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~hamalab/index.html?utm_source=chatgpt.com）を参照されたい。



本稿では、2025年度に卒業した2名の学生による卒業研究の内容を紹介する。これらの内容は一部日本放射線安全管理学会の第24回日本放射線安全管理学会学術大会にて発表し

ている。1名はすでに岐阜県内で中学校理科教員として勤務し、もう1名は大学院に進学しているが、教員採用試験に合格しており、将来は中学校理科教員として勤務することが決まっている。

これらの活動は、放射線に関する理解にとどまらず、災害、エネルギー、経済、税、過疎化といった社会課題を自分事として捉え、考える契機を与えるものである。自然科学の知見が社会の中で果たす役割を実感した学生たちが、将来、理科教育の現場に立つとき、この経験が活かされることを期待している。

空間線量率の地図化

2025年度卒業生 加藤 歩都

1. 研究の背景と目的

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴い、福島第一原子力発電所（以下、1F）で事故が発生し、放射性物質が環境中へ放出された。その結果、福島県浜通り地域の広範囲で空間線量率が上昇し、現在も避難や除染が継続している地域が存在する。

従来の空間線量率測定は特定地点での測定が中心であり、微細な分布や地形との関係を把握することが難しかった。そこで本研究では、空間線量率を連続的に測定し地図化することで、地域差や地形の影響、除染の効果を詳細に明らかにすることを目的とした。

2. 研究方法

携帯型放射線測定器「radiacode102」とスマートフォンを用い、地表から約1mの高さ

*1 Mizuki SUMIHAMA 岐阜大学 教育学部 理科教育講座(物理学) 教授/大阪大学 核物理研究センター 特任教授

*2 Ayuto KATO 岐阜大学 教育学部 2025年度卒業生/現在 岐阜県可見市立中部中学校 教諭

*3 Mai KONDO 岐阜大学 教育学研究科 教職実践開発専攻 教科指導能力開発コース サイエンス系 理科教育実践

における空間線量率を0.5秒間隔でGPS情報とともに記録した。取得したデータはExcelで処理し、線量率に応じて色分けしたドットとして地図上にプロットした。測定は「飯館村」「双葉町」「大熊町」の3地域で実施した。

3. 結果と考察

3.1 福島県相馬郡飯館村

カラーの空間線量率マップはこちら (https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~hamalab/report/img/Airdose_jitategovillage.pdf) です。



「市澤家」「庄司家」「小宮沼平」の3地点(1Fから約30~40km)で2025年8月と9月に測定を行った(図1)。実線(カラー版では赤枠)で囲った住宅周辺や道路など除染済み区域では $0.20\mu\text{Sv/h}$ 以下の値が多く見られた。一方、森林内部では $0.40\sim 1.40\mu\text{Sv/h}$ と高い値を示した。環境省が示す除染後の目安($0.23\mu\text{Sv/h}$)¹⁾と比較すると、生活圏では除染の効果が明確に確認できる。一方、森林は生活

圏から20mまでが除染対象であるため、内部では高い線量率が残存している。また、森林に近接する地点で線量率がやや高い傾向が見られ、周囲からの放射線の影響が示唆された。また、村内の「道の駅までい館」から綿津見神社までの空間線量率も同時期に測定した(図2)。空間線量率は北へと続く道沿いでは $0.50\mu\text{Sv/h}$ 程度のやや高い値が見られたが、 $0.10\mu\text{Sv/h}$ 以下と低い場所がほとんどであり、生活環境としては十分に低いレベルに抑えられている。

3.2 福島県双葉郡双葉町

カラーの空間線量率マップはこちら (https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~hamalab/report/img/Airdose_Futabatatown.pdf) です。



「山田地区」は1Fから西へ約4kmに位置する帰還困難区域である。双葉町から大熊町へ抜ける山道がある。その山道で2025年9月に測定を行った(図3)。入口付近では約 $0.40\mu\text{Sv/h}$ であったのに対し、山道の中腹では

市澤家

庄司家

小宮沼平

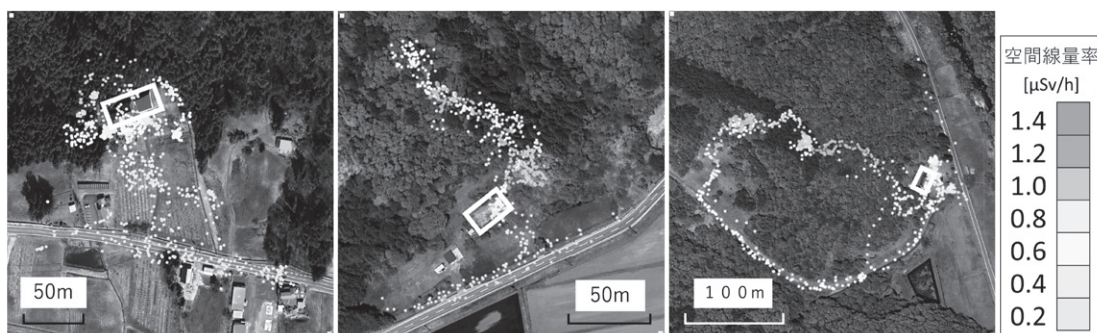


図1 「市澤家」「庄司家」「小宮沼平」の3地点の空間線量率の分布

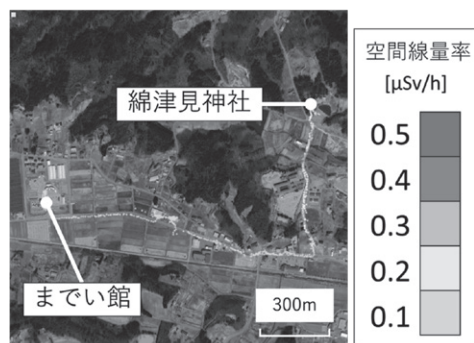


図2 「道の駅までい館」から綿津見神社までの空間線量率の分布

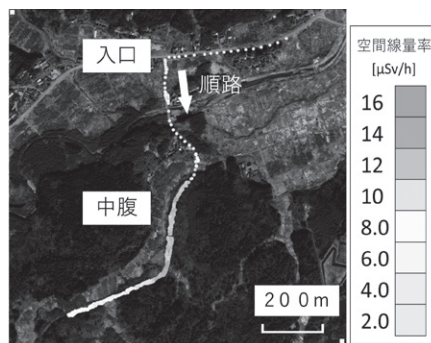


図3 山田地区の空間線量率の分布

最大 $15\mu\text{Sv/h}$ と高い値を示した。地形との比較から、高線量地点は谷部に位置していることが分かった²⁾。この要因として、以下の2点が考えられる。

- ①事故直後の風により放射性物質が谷へ集積した可能性
- ②谷では斜面からの放射線も加わり、検出値が高くなる地形的効果

3.3 福島県双葉郡大熊町

カラーの空間線量率マップはこちら (https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~hamalab/report/img/Airdose_Okumatown.pdf) です。

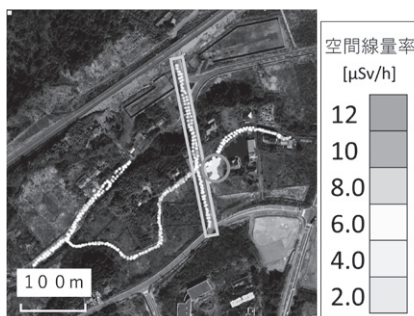


図4 夫沢3区の空間線量率の分布

「夫沢3区」は1Fのほぼ真西に約3kmに位置しており、1Fから夫沢3区に向かって平坦な地形が続いている。2025年11月に測定を行った(図4)。データを取得した地点は、南北を山に挟まれた谷である。この地区は除染されておらず帰還困難区域に指定されているが、四角(カラー版では水色)の枠で囲った中央を南北に走る道路だけは、アスファルトが張り替えられ、除染されている。この中央道路の空間線量率は $4.0\mu\text{Sv/h}$ 以下に抑えられていたが、周辺の空間線量率は最大で $11\mu\text{Sv/h}$ を示した。さらに、除染されていないにもかかわらず、中央道路の東側において周辺よりも比較的低い($1.3\sim 4.0\mu\text{Sv/h}$)値を示す領域(丸、カラー版では赤枠)が確認された。地図上では比較的低線量が低い $4.0\mu\text{Sv/h}$ 以下を示す(カラー版では黄緑)ドットが集中している部分に対応する。この地点について調査したところ、震災以前から砂利が敷設されていたことが分かった。これらの結果から、砂利は放射性物質を保持しにくい可能性が示唆された。現在、この地点における砂利および土壌の放射能濃度の詳細な測定を進



図5 北向地区の空間線量率の分布

めている。

北向地区は2024年から2025年にかけて除染が進行しており、その間、計4回の測定を実施した。その結果から、本地区の空間線量率の最大値は $3.83\rightarrow 3.67\rightarrow 2.39\rightarrow 2.28\mu\text{Sv/h}$ と減少しており、除染による線量低減効果が確認された。図5は2025年10月に実施した測定結果を示しており、実線(カラー版では水色)で囲んだ領域は除染済み区域である。除染済み区域周辺では線量が低い一方で、北側の山からの放射線の影響がみられ、また竹林や畦道などでは局所的に高い値が残存していた。

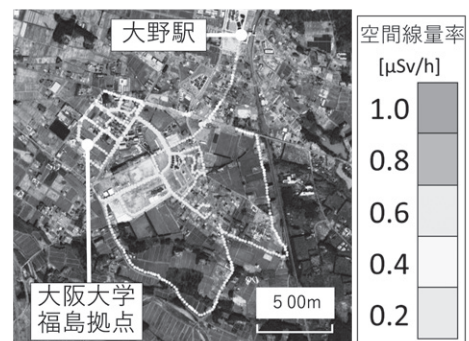


図6 大野駅および大阪大学福島拠点周辺の空間線量率の分布

大野駅および大阪大学福島拠点周辺は除染が完了し、居住も再開されている(図6)。空間線量率はほとんどの地点で $0.20\mu\text{Sv/h}$ 以下であったが、街路樹や構造物周辺では $0.60\mu\text{Sv/h}$ 以上のやや高い値が見られた。岐阜市の値(約 $0.06\mu\text{Sv/h}$)と比較すると、依然として高い水準にあるものの、生活環境としては十分に低いレベルに抑えられていると考える。

4. 結論

空間線量率を連続測定し地図化することで、

地域および地形に応じた分布の特徴を詳細に可視化することができた。その結果、以下の点が明らかとなった。

1. 除染地域では空間線量率が明確に低下する
2. 森林や未除染区域では高い値が残存する
3. 谷地形では放射性物質が集積しやすい可能性がある
4. 砂利など地表条件が線量率に影響を与える

さらに、本手法は従来の点測定では把握が難しい局所的な高線量地点の検出に有効であることが示された。今後は測定地点を拡充し、風向や地形との関係をより詳細に解析することで、空間線量率分布の理解を一層深めていく必要がある。さらに、これにより、地域の放射線環境に対する理解が進み、住民の不安の軽減にもつなげていきたい。

土壌から果樹への放射性セシウムの移行量

近藤 真衣

1. 背景

福島第一原子力発電所が所在する福島県双葉郡大熊町は、かつて果樹栽培が盛んな地域であった。2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う事故により、放射性物質が環境中へ放出された。なかでも半減期約30年のセシウム137 (Cs-137) は、事故から15年が経過した現在も、福島県浜通り地域の環境や生活に影響を及ぼしている。その影響の一つとして、植物によるCs-137の吸収が挙げられる。セシウムは植物の必須元素であるカリウム(K)と化学的性質が類似しているため、土壌中のCs-137が取り込まれることが知られている³⁻⁵⁾。大熊町では果樹園が放置されたままとなっている例も多い。先行研究では、このような環境で生育した果樹において、部位ごとにCs-137の放射能濃度が異なる可能性が示唆されている。

2. 目的

本研究では、果樹によるCs-137の吸収について、①果実・葉など部位による違い、②果樹の種類による違いの2点に着目し、それぞれの差異を明らかにすることを目的とした。

3. 採取方法

飯舘村小宮沼平では、2025年8月および10月に栗(タンバグリおよびヤマグリ)を3地

点で採取した。うち1地点は除染済み区域である。各地点において、栗の実、イガ、および土壌を採取した。土壌は表層から深さ30 cmコアを採取した。大熊町の帰還困難区域では、2025年10月にアケビを3地点、キウイフルーツを4地点で採取し、同年11月にはユズを9地点で採取した。各地点で果実・葉・土壌を採取し、土壌は果樹の根元付近の表層を採取した。試料は、栗はイガ・鬼皮・可食部に分離し、アケビおよびキウイは皮と種子を含む果肉に分け、ユズは皮と種子・果肉に分離した。果肉以外は乾燥後に粉碎し測定用試料とした。土壌試料は石や根を除去した後試料化した。これらの試料について、ゲルマニウム半導体検出器を用いてCs-137とK-40の放射能濃度を測定した。

4. 結果と考察

本稿では、日本の食品中の基準値(100 Bq/kg)を目安として結果を概観する。

除染済み地点で採取されたタンバグリは、すべての部位でCs-137の放射能濃度は100 Bq/kg未満であった。この地点では表層土壌のCs-137の放射能濃度は約1,500 Bq/kgであり、深部ではさらに低下していた。一方、未除染地点で採取したタンバグリおよびヤマグリでは、可食部が100 Bq/kgを超えていた。品種差や部位差について有意な違いは確認できなかった。土壌の放射能濃度は表層10 cmで数千から10,000 Bq/kg程度あり、深部ではさらに低下し、深さ30 cmでは100 Bq/kgを下回っていた。栗は深根性であることから、土壌表層部などからの養分の吸収が比較的高く、そのためCs-137の吸収率も比較的高い可能性があると考えている。

アケビはすべて帰還困難区域内で採取した。土壌のCs-137の放射能濃度は15,000~45,000 Bq/kgと高く、果肉の濃度は21~807 Bq/kgとばらつきが大きかった。アケビは浅根性で地下茎により広がるため、表層土壌からの吸収の影響を強く受けると考えられるが、吸収位置の特定が難しく、明確な傾向は得られなかった。

キウイフルーツの結果を図7で示す。カラーの図はこちら(<https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~hamalab/report/img/kiwi.jpg>)です。土壌のCs-137の放射能濃度(横向きに引かれた、カ



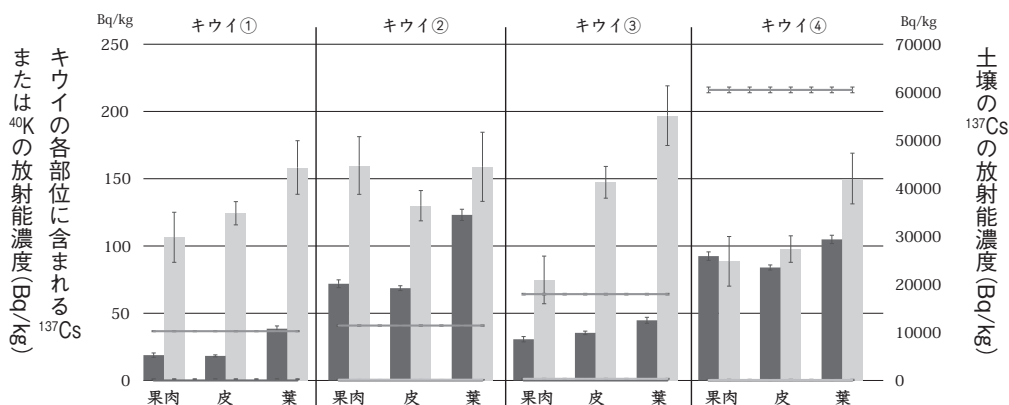


図7 土壌とキウイの部位ごとのCs-137とK-40の放射能濃度

ラー版では水色の実線)は8,000Bq/kg以上であったが、果肉はすべて100Bq/kg未満(棒グラフ左側、カラー版では赤色)であった。一方でK-40の放射能濃度(棒グラフ右側、カラー版では緑色)はCs-137と同程度またはそれ以上であった。キウイは浅根性・散根性であるにもかかわらず、果肉へのCs-137移行は小さく、吸収されにくい可能性が示唆された。部位間の差は小さかった。

ユズでは、土壌のCs-137の放射能濃度は20,000~80,000Bq/kgであり、果肉や皮では最大約800Bq/kgであった。特に皮および種子で高い傾向が見られた。

果肉を用いてCs-137の土壌からの移行係数を比較すると、キウイは約0.2%、ユズは約0.4%であった。一方、アケビは約2%、栗は2~9%と高く、果樹の種類による差が確認された。

5. まとめ

本研究では、複数の果樹について放射能濃度と土壌からの移行を測定した結果、果樹の種類による違いは見られた一方で、部位による明確な差は確認できなかった。また、自然環境下ではばらつきが大きく、明確な傾向を捉えることの難しさも明らかとなった。

今後は試料数を増やし、根系や土壌条件との関係を含めて詳細に検討していく必要がある。本研究で得られたデータが、住民の放射線理解の促進や不安の軽減に寄与するとともに、震災の記憶を継承する一助となることを期待する。

謝 辞

本研究は、原子力人材育成等推進事業費補

助金(原子力規制人材育成事業)「社会との共創による原子力規制人材育成プログラム」、福島イノベーションコースト構想「大学等の「復興知」を活用した人材育成基盤構築事業」ならびに令和7年度大熊町関係・交流人口拡大事業補助金により支援されています。また、本研究は、大熊町および飯舘村と大阪大学の連携・協力に関する協定のもとで、各自治体ならびに住民の方の協力により行われています。大阪大学福島拠点ならびに関係者の皆様のご協力にも感謝します。また、大阪大学放射線科学基盤機構の岡田美智雄教授、大阪大学核物理研究センター谷畑勇夫特任教授、中島裕夫特任教授、東京大学理学系研究科・原子核科学研究センター青井考教授のご支援、ご指導にも感謝します。

参考文献

- 追加被ばく線量年間1ミリシーベルトの考え方(環境省) https://shiteihaiki.env.go.jp/radiological_contaminated_waste/basic_knowledge/additional_exposure_dose.html
- 地理院地図-電子国土WEB(国土地理院) <https://maps.gsi.go.jp/#5/36.104611/140.084556/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1>
- 山口紀子 他「土壌-植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因」農業環境技術研究所報告, 第31号, pp. 75-129 (2012).
- Smolders, E. & Mertens, J. (2011) "The transfer of radiocesium from soil to plants." *Integrated Environmental Assessment and Management*
- 小山内暢 他「福島第一原子力発電所事故後におけるユズの放射性セシウム濃度とドレッシング作成による濃度変化」保健科学研究報告, 第16号, pp.27-33, (2025).

放射能・放射線 単位・元素名の由来

高橋 正

第 15 回

ハフニウム $_{72}\text{Hf}$: hafnium

＊元素名の由来や放射線関連分野で大きな足跡を残した科学者を紹介するシリーズ＊

ハフニウムは安定な元素の中では最も遅く発見された元素の一つで、1923年に物理学者のコスター (Dirk Coster, 1889–1950) と化学者のヘヴェシー (George de Hevesy, 1885–1966) によって発見された。二人はノルウェー産のジルコニウム鉱物中に原子番号72の元素が含まれることを、モーズリー (H. G. J. Moseley) が発見した特性X線の波長と原子番号の関係から示した。すぐにフッ素錯体塩 $(\text{NH}_4)_2 [(\text{Hf}, \text{Zr})\text{F}_6]$ の再結晶を何回も繰り返してハフニウムを濃縮し、X線分光分析によってハフニウムを定量した。これは最初の蛍光X線分析だった。この発見では、ボーア理論による72番元素の電子配置の推定が役に立った。元素の名称は、研究が行なわれたコペンハーゲンのラテン名「ハフニア (Hafnia)」からとられた。

ハフニウムは4族元素であり、通常+4価をとる。化学的性質は周期表の直上のジルコニウムに極めて似ていて、すべての元素中で両者の分離が最も難しい。ところが熱中性子吸収断面積はまったく違って、大きいハフニウムは原子炉の制御棒に、小さいジルコニウムは燃料棒の被覆に使われる。

発見者の一人、ヘヴェシーは放射化学分析や核医学の創始者としても知られている。ブダペストでユダヤ系貴族の家庭に生まれた。1908年に南ドイツのフライブルク大学で学位を得たあと、1911年から2年間、マンチェスター大学のラザフォード (E. Rutherford) のもとで研究した。

ヘヴェシーはラザフォードから、当時研究室に大量にあったラジウムD (RaD) [^{210}Pb]*を含む塩化鉛(II) PbCl_2 からRaDを分離する研究を提案された。試行錯誤を繰り返した末に分離は不可能との結論に達したが、RaDを既知量の鉛に添加して鉛を標識することを思いついた。この逆転の発想が、放射性指示薬法 (放射性トレーサー法) としてヘヴェシーのその後の研究で生かされた。1913年にパネート (F. Paneth) と、RaDを使って硫化鉛(II) PbS やクロム酸鉛(II) PbCrO_4 の溶解度を

同位体希釈法で決定した。これは最初のトレーサー実験でもあった。1920年にはゼクマイスター (L. Zechmeister) とトリウムB [^{212}Pb] を使って、水溶液中で二つの鉛(II)塩の Pb^{2+} が入れ代わることを明らかにして、アレニウス (S. Arrhenius) の電離説を直接的に支持した。

1920年にコペンハーゲンのボーア (N. Bohr) のもとに移った。そこでは質量の違いに基づく安定同位体の分離のほか、生物学的なトレーサーの応用を始めた。1923年にRaDを使ったソラマメの各部位へ土壌から鉛が移行する過程を、翌年には梅毒の治療薬との関連でラジウムE [^{210}Bi] を使ってラット中のビスマス化合物の代謝を研究した。1926年から1934年の間、フライブルク大学で教授を務めた。1934年にはユーリー (H. C. Urey) から提供された0.46%の重水を含む水を使って、ヒトの体内における水の動態を解析した。安定同位体を使った最初のトレーサー実験だった。

1934年にコペンハーゲンに戻ったが、この年に人工放射能が発見され、トレーサーの応用が拡大した。ヘヴェシーは ^{32}P , ^{24}Na , ^{24}K などを使って、動物の代謝を研究した。1935年の医師キーヴィッツ (O. Chiewitz) との、 ^{32}P の骨への吸収と再排出の実験はよく知られている。1936年にレヴィ (H. Levi) とRa-Be中性子線源を使って、ジスプロシウムやユウロピウムが放射化され易いことを見つけ、放射化分析を提唱した。

ヘヴェシーは1944年、同位体をトレーサーとして利用した業績で、1943年度のノーベル化学賞を受賞した。前年秋にストックホルムに亡命していたが、その前に、友人のラウエ (M. von Laue) と فرانク (J. Frank) のノーベル賞メダルを王水で溶かし、ドイツ軍の目につかないように隠した。戦後、その金は回収されて、ノーベル財団が新しいメダルにして二人の物理学者に贈った。ヘヴェシーは戦後もこの地で生理学的な研究を続け、しばしばフライブルクを訪れた。晩年肺がんを患い、1966年にフライブルクで没した。

* 現代的な表記を [] 内に示す。

令和 8 年度放射線安全取扱部会年次大会 (第67回放射線管理研修会)

開催日：令和 8 年10月22日(木)、23日(金)

会 場：コラッセふくしま（福島県福島市三河南町 1 番20号）

テーマ：不易流行～震災から15年、未来へのエール～

参加費：事前登録7,000円（学生会員無料）

当日登録9,000円

交流会は事前登録のみで8,000円（定員になり次第締切）

会場受付で現金による参加登録はできません（Web受付のみ）

参加登録の詳細はWebサイトをご確認ください

今年度の年次大会の担当は東北支部で、福島県福島市における現地開催とします。
多くの皆さまのご参加をお待ち申し上げております。

プログラム概要（予定）

- ◆東北地域では、東日本大震災と原子力災害を通じて、「不易」と「流行」の双方に向き合い、実践を積み重ねてきました。震災から15年の節目に、その経験と教訓を共有し、未来に向けた安全で有益な放射線利用のあり方を、ともに考える場としたいと考えています。特別講演では、「最近の放射線安全規制の動向」、「震災後、福島で行われてきた初等・中等放射線教育」、「ALPS処理水」や「緊急被ばく医療」に関する話題を予定しております。加えて、企画専門委員会によるシンポジウムも予定しております。
- ◆全国の様々な放射線施設で、放射線管理等の実務を担当されている方々の情報交換の場として、今回もポスター発表、交流会を予定しています。また、相談コーナーや機器展示について、新たな企画を検討しております。

【連絡先】：（公社）日本アイソトープ協会放射線安全取扱部会事務局

〒113-8941 東京都文京区本駒込2-28-45

Tel.03-5395-8081 Fax.03-5395-8053

E-mail nenjitaikai@jrias.or.jp

・詳しくはホームページをご参照ください。

(https://www.jrias.or.jp/annual_meeting/index.html)



サービス部門からのお願い

返信用封筒はセロハンテープで確実に封をしてください

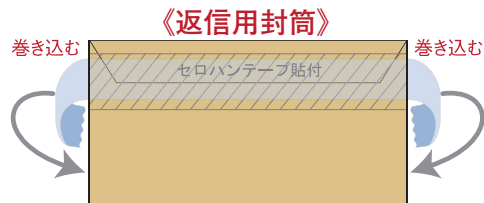
平素より弊社のガラスバッジサービスをご利用くださいまして、誠にありがとうございます。

ガラスバッジ測定依頼の際、返信用封筒をご利用のお客様は、セロハンテープで確実に封をしていただきますようお願いいたします。

セロハンテープは「セロハンテープ貼付」と書かれた位置に、封筒を巻き込むようにして、確実に貼り付けてください。

また、ホチキスの使用は、ガラスバッジが傷ついたり、完全に封ができない場合がございますので避けてください。

お客様のご理解とご協力をよろしくお願い申し上げます。



編集後記

- 夏の強い日差しのもと、環境の変化を肌で感じながら過ごしておられることと思います。一方、日常の中で「直接感じないもの」に思いを巡らせる機会は、意識しない限り多くはありません。今号でも、「直接感じないもの」をめぐる興味深いテーマについてご寄稿いただきました。
- 屋内ラドン対策に関するご寄稿では、自然由来のリスクに対する認識や対応が、国ごとに大きく異なる現実が示されました。自然に存在する放射線であっても、条件によっては健康影響が無視できないものとなる可能性があります。我が国では平均濃度が相対的に低いとされるものの、特に職場環境に着目した実態把握や対応方針の整理の重要性を改めて認識しました。
- 染色体異常による線量評価の解説からは、緊急被ばく医療における線量評価技術が高度に体系化されている一方、その背景には長年の研究の積み重ねがあることが伝わってきます。早期評価の精度向上に向けて、AI

技術の活用によるさらなる効率化にも期待したいところです。

- 好評連載中の中川先生のコラムでは、がんとアルツハイマー病という一見関連の薄い両者の関係について考察がなされ、疾病の理解や予防のあり方に対する視点が広がりました。
- 福島県浜通り地域における研究・教育活動の紹介からは、測定やデータの取得を通じて、地域の状況や背景を理解していく過程も伝わってきました。単なるデータの蓄積にとどまらず、現場に身を置くことで初めて得られる気づきや視点の大切さを示しているように感じます。将来の理科教育への還元が楽しみです。
- 元素発見の歴史（本号ではハフニウム）にご尽力された先人に思いをはせつつ、本号が、「直接感じないもの」について、読者の皆さまがそれぞれのご専門の立場から少し違った角度で捉え直す機会となればと願っています。(A.F.)

FBNews No.596

発行日／2026年 8月1日

発行人／井上任

編集委員／小山重成 小口靖弘 中村尚司 野村貴美 福土政広 青山伸 野島久美恵 藤森昭彦 川端方子
篠崎和佳子 高橋英典 田谷玲子 東元周平 堀口亜由美 松本和樹 丸山百合子 牟田雄一

発行所／株式会社千代田テクノ

所在地／〒113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル

電話／03-3518-5665 FAX／03-3518-5026

<https://www.c-technol.co.jp/>

印刷／株式会社テクノサポートシステム

記事に関するご意見や掲載希望の記事案については、こちらまでお送りください ctc-fbnews@c-technol.co.jp



—禁無断転載— 定価400円（本体364円）