

テーマ（１）放射線健康管理に資する線量評価に関する研究

- 1-1 人工被覆面の放射能深度分布調査及び空間線量率への影響に関する研究
主任研究者：小林 光（東北大学）1
- 1-2 市街地の空間線量率の経時変化に対する人為的な影響に関する研究
主任研究者：吉村 和也（日本原子力研究開発機構）5
- 1-3 個人避難行動及び大気拡散シミュレーションに基づく福島第一原発事故における住民の初期内部被ばく線量推定の精緻化に関する研究
主任研究者：栗原 治（量子科学技術研究開発機構） 10
- 1-4 浜通り地域を対象とした帰還住民の天然および人工放射性核種からの被ばく線量調査
主任研究者：細田 正洋（弘前大学） 20
- 1-5 陸・水圏植物における有機結合型トリチウム（OBT）生産速度の網羅的把握
主任研究者：佐藤 雄飛（環境科学技術研究所） 23
- 1-6 大熊町など福島第一原発に近い地域の住家における掃除による屋内放射性物質の低減効果
主任研究者：吉田 浩子（東北大学） 27
- 1-7 原子力事故後の居住環境における室内外の物質移行を考慮した住民の被ばく線量評価に関する研究
主任研究者：高原 省五（日本原子力研究開発機構） 31
- 1-8 乳歯を用いた福島県在住小児の被ばく線量評価事業
主任研究者：佐々木 啓一（東北大学） 36

1-9 複数の生物学的指標を組み合わせた長期放射線影響の予測と社会実装に向けた取り組み	
主任研究者：盛武 敬（量子科学技術研究開発機構）	40
分担研究者：中村 麻子（茨城大学）	
1-10 FISH 解析法による低線量被ばく評価に向けた基盤構築	
主任研究者：数藤 由美子（量子科学技術研究開発機構）	44

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度研究報告書

研究課題名	人工被覆面の放射能深度分布調査及び空間線量率への影響に関する研究
令和4年度研究期間	令和4年4月1日～令和5年2月28日
研究期間	令和2年度 ～ 令和4年度（3年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	小林 光	東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻・教授
分担研究者		
若手研究者		

キーワード	人工被覆面、放射能深度分布、放射線測定、放射線解析、 γ 線境界条件
-------	---

本年度研究成果
<p>I 研究背景</p> <p>福島第一原子力発電所事故被災地の住民の帰還では、残存する放射性物質に起因する放射線に留意して、生活の場である建物を再建する必要がある。発災後一定期間を経た被災地の建築空間の放射線量率分布は、主に建物周囲の地表面に沈着、浸透したセシウム137（以降Cs-137）由来のγ線によって形成される。建物周りの地表面のほとんどが土壌露出面、透水性・不透水性アスファルト舗装面、コンクリート舗装面の何れかであることから、これら地表面ごとの放射線源としての特性の把握が望まれる。この特性はCs-137の地中の深度分布に応じて決まる。これまで土壌露出面については多くの調査、研究があり、時間と共に地中へ浸透するCs-137の深度分布を指数関数で表現可能であることが示されている^{1,2)}。その一方で人工被覆面のデータはごく少なく³⁾、人工被覆面の放射能深度分布調査及び空間線量率への影響に関する研究が必要であると考えられた。</p> <p>II 目的</p> <p>本研究では人工被覆面の放射線源としての特性を把握するため、放射能深度分布調査を中心とした以下の4課題を目的とした（〔課題①〕避難指示区域における人工被覆面へのセシウムの沈着状況調査、〔課題②〕人工被覆種別ごとのCs-137深度分布の傾向分析及び地上への影響評価、〔課題③〕試験体を用いたCs-137深度に関するウェザリング影響評価、〔課題④〕空間線量率予測のための実用的γ線境界モデルの検討）。また、その成果となる人工被覆面の放射能沈着実態データを学術論文として公開することで基礎資料の充実に貢献する他、成果を用いた建築空間の放射線解析、建築的対策案の効果試算結果の公開などを通じて、安心な復興の一助となることを目的とした。</p> <p>III 研究方法</p> <p>〔課題①〕福島県内の避難指示区域にて、3種の人工被覆面（不透水性アスファルト舗装、透水性ア</p>

スファルト舗装、コンクリート面)のコア試料を採取し、採取した試料を地表面側より薄く切削して深度毎に得た切削粉をGe半導体検出器にて分析することで、Cs-137濃度の深度分布を調査した。

〔課題②〕人工被覆面のCs-137深度分布を分析すると共に、地上への影響を把握する為、コア試料採取地における放射線測定結果と深度分布を比較検討した。

〔課題③〕人工被覆面に沈着したCs-137が濃度勾配に応じた拡散と雨水の移流で地中に輸送される状況を確認するため、採取したコア試料を恒温恒湿槽内に保管し、湿潤(注水の繰返し)と乾燥(注水無)の2条件で1年間保管した後に、課題①と同じ方法で深度分布を得て比較した。

〔課題④〕課題①で得たCs-137深度分布を用いた放射線解析で建物周りの垂直境界面(敷地境界等)及び水平境界面(地表面)を通過する γ 線を整理し、放射線解析に用いる γ 線境界条件を作成した。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

〔課題①②〕各コアのCs-137深度分布を人工被覆種別ごとに評価した結果、コンクリートと不透水性アスファルトは採取地によらず地表面から3mm以内にはほぼ全てのCs-137が沈着していることが明らかになった。深度分布は指数関数で近似可能と考えられる。一方、透水性アスファルトは指数的に濃度が減衰した後に一度増加し、再度減少するS字型の分布傾向を示した。地表面付近は不透水性アスファルト同様の分布であり、それ以深の透水層では、移流による移行が継続していると考えられる。地上での放射線測定と深度分布の比較に於いては、何れの被覆もCs-137が地表近くに存在するため、有意な差を見出すことが出来なかった。〔課題③〕コア16個を湿潤条件8、乾燥条件8に分け、湿潤は降雨再現を意図した週2回の注水を行った。その結果(図1)、コンクリートと不透水性アスファルトでは条件間で差異が認められないのに対し、透水性アスファルトでは湿潤条件でS字型カーブの地中ピークが深くなる傾向が確認された。このことから、不透水性アスファルト及びコンクリートにおいて、雨水による移行はほぼ生じず、現在確認される深度分布は発災後早期に形成されたと推定される。透水性アスファルトは発災後早期は不透水性と同様な深度分布であったものが、以後の移流により徐々にS字分布を形成したと推定された。〔課題④〕土壌面を含む4種の地表面種別ごとに、水平及び垂直境界面を通過する γ 線のフルエンスの角度分布をエネルギー階級別に整理した。水平境界面については発災後一定期間を経過して地中へのCs-137の移行が進んだ土壌面の場合、散乱線の割合が高く、放射方向はランベルト面的特性となる一方、人工被覆面は何れもCs-137の深度が浅く、直接線の割合が高く、放射方向は等方的な特性を示した。垂直境界面では、特に人工被覆面の場合、水平に近い角度の γ 線が卓越する。即ち地面の汚染量が同等であれば、土壌の場合よりも人工被覆の方が、建物の外壁に入射する γ 線が多くなることが示された。これらの整理に基づき人工被覆毎に γ 線境界条件モデルを作成して木造2階建て建物内の線量率を評価し、可用性を確認した。

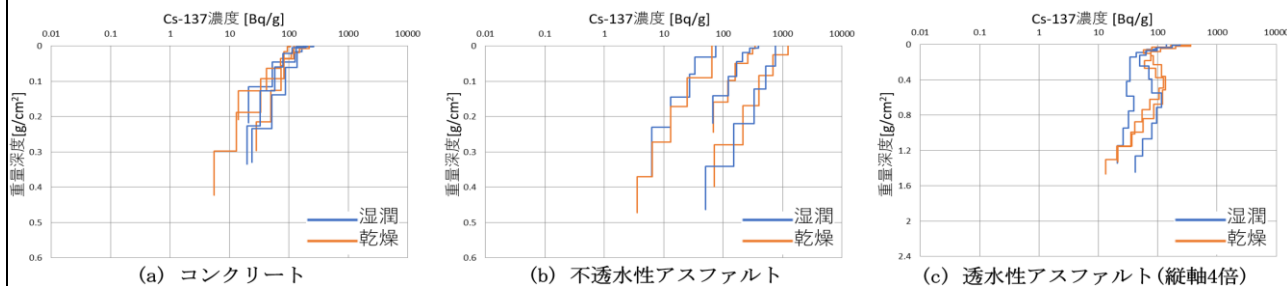


図1. 課題③による乾燥・湿潤条件間の比較

V 結論

人工被覆面のCs-137深度分布について、Cs-137は復興期(発災後約10年)においてもその表層のご

く浅い範囲に大部分が存在することを確認した。Cs-137 深度分布の経時変化について透水性アスファルトでは降水に起因して変化が生じる可能性を確認した。これらを踏まえた解析用 γ 線境界モデルの開発を通じ、人工被覆面が放射する γ 線は土壌面に比べて水平方向に強い指向性を持つことを確認した。本研究から得られた知見の復旧・復興作業への適用に関して①緩和策としての Cs-137 の効率の良い除去、②適応策としての、水平方向の γ 線に配慮した遮蔽対策を提案する。また、今後、人工被覆面の水平の指向性や透水性アスファルトの特性が建築内外の γ 線の空間線量率にどう影響するかを計算し、効果的な除染のあり方などの提案を検討する。

提案①Cs-137 の効率の良い除去

汚染された人工被覆面全てを更新できない場合でも、不透水アスファルト、コンクリートでは表層を 5 mm 程度削り取ることで相当量の Cs-137 の除去が期待できる。廃棄物発生量を抑え、削り過ぎないことで舗装面を継続使用できる可能性もある。透水アスファルトでも表層 5 mm で多くの除去が期待できるが、地中の Cs-137 の除去のためには 15 mm 程度の除去で効果が期待できる。

提案②水平方向の γ 線に配慮した遮蔽対策

建物周辺の人工被覆面が放射する水平方向の γ 線が懸念される場合は、簡易なコンクリート塀や築山等を建築周辺に築造することで建物の低層部分の線量率を下げる簡易な適応策が可能になる。

引用文献

1. International Commission on Radiation Units and Measurements : Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU Report 53, 1994.
2. 日本原子力研究開発機構. 福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査研究 成果報告書. 平成 23 年度原子力規制庁委託事業, 2013 ; 第 2 編 ; 2_3-16 <https://fukushima.jaea.go.jp/fukushima/try/pdf/pdf05/02-03.pdf>. Accessed 1 May 2023.
3. K. Yoshimura, T. Watanabe, H. Kurikami. Vertical and horizontal distributions of ^{137}Cs on paved surfaces affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environment Radioactivity*. 2020; 217: Article 106213

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度研究報告書

研究課題名	市街地の空間線量率の経時変化に対する人為的な影響に関する研究
令和4年度研究期間	令和4年4月1日～令和5年2月28日
研究期間	令和2年度 ～ 令和4年度（3年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	吉村 和也	日本原子力研究開発機構・研究主幹
分担研究者		
若手研究者		

キーワード	空間線量率、Cs-137 沈着量、経時変化、人間活動、シミュレーション、機械学習
-------	--

本年度研究成果
<p>I 研究背景</p> <p>空間線量率の減少傾向は、放射線防護や住民とのリスクコミュニケーションに有用な情報である。従来の研究により、空間線量率は市街地で他の環境よりも早く減少することが報告されている¹⁻³⁾。また空間線量率は、市街地の主要な被覆要素である舗装面で、草地や土壌などの非舗装面よりも速やかに減少することがヨーロッパ⁴⁻⁶⁾や福島県⁷⁻⁸⁾で示されている。以上の情報は、被ばく線量の推定モデルにおいて重要なパラメータとなる^{9,10)}。主要な線源となる放射性セシウムは、舗装面で非舗装面よりも速やかに減少し、市街地における速やかな環境回復に寄与していることが示唆されている¹¹⁻¹²⁾。このような市街地や舗装面における放射性セシウム、空間線量率の低減要因として人間活動の影響が示唆されているが^{2-3,13)}、これを直接的に評価した研究は除染による低減効果を除きなされていない。</p> <p>II 目的</p> <p>空間線量率の減少傾向に対する人間活動の影響について、除染とその他の活動を区別したうえで定量的に評価することを目的とした。</p> <p>III 研究方法</p> <p>本研究では、試験的アプローチとして空間線量率や放射性セシウムの減少と人間活動の関係について、現地観測を基に評価するとともに、観測結果をパラメータとしたシミュレーション解析により人間活動による空間線量率の低減効果を評価した。併せて統計的アプローチとして、原子力規制庁が広域で継続的に取得している空間線量率のモニタリングデータを用い、その変化傾向と人間活動を表す社会環境データの関係について評価した。</p> <p>試験的アプローチでは、大熊町、及び富岡町内で除染の影響を受けておらず、人間活動量が異なる帰還困難区域、及び居住区域を対象に、空間線量率と舗装面上の Cs-137 沈着量、交通量を観測した</p>

12)。シミュレーションは昨年度までに開発した 3D-Air Dose Rate Evaluation System (3D-ADRES)、及び Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) により実施した。統計的アプローチでは、走行サーベイデータ (約 117 万データ) を用い、機械学習 (LASSO) により空間線量率の環境半減期を求めた。人間活動を表す夜間灯火量、流動人口を用い、空間線量率の環境半減期との関係を解析した。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

空間線量率、及び舗装面の Cs-137 沈着量は、共に人間活動のある居住区域で、人間活動のない帰還困難区域よりも早く減少し、その減少速度は帰還困難区域の約 2.5 倍であった。また人間活動を表す指標の一つである交通量は、Cs-137 沈着量の減少量と有意な負の相関を示した。以上の結果から、車両通行による道路の摩耗などといった除染以外の人間活動により、Cs-137 沈着量の低減が促進され、空間線量率の減少に寄与することが示された。一方で、車両通行に伴う路面の摩耗は、放射性浮遊塵の再浮遊による内部被ばく線量の増大に寄与する可能性がある。実際、人間活動のある日中には、大気中の放射能濃度が 2 倍ほどになる¹⁴⁾。しかし大気浮遊塵に由来する内部被ばく線量は、外部被ばく線量の 1%未満であり¹⁵⁾、車両通行に伴う再浮遊の内部被ばくへの影響は限定的である。

土壌面における放射性セシウムの沈着量の減少は放射性崩壊に従うこと¹⁶⁾、舗装面における放射性セシウムの下方浸透は生じないこと¹⁷⁾を考慮した場合、空間線量率の低減は線源となる放射性セシウムの放射性崩壊、舗装面における沈着量の減少、及び土壌面における下方浸透に起因する。そこで放射性セシウムの放射性崩壊に加え、本研究で居住区域、及び帰還困難区域それぞれで得た舗装面における Cs-137 沈着量の減少速度 (それぞれ人間活動が「ある」場合と「ない」場合を想定)、並びに土壌面における下方浸透速度¹⁸⁾を考慮し、2022 年から 10 年後の空間線量率の減少率と舗装率の関係をシミュレートした (図 1)。人間活動がある場合とない場合の減少率の差は、舗装面における放射性セシウムの減少を反映し、舗装率が大きくなるほど顕著であった。一般的に、低層住宅地や商業・業務用地における道路面と土壌面の比は、30~100%である¹⁹⁾。この比を舗装率とした場合、上記 10 年間での空間線量率の減少は、人間活動により約 0.5~24%促進されると推定された。人間活動の程度は地域により異なるため、後述するようその程度を示す指標を用いることで、より実際的な人間活動の影響を定量的に評価できると考えられる。

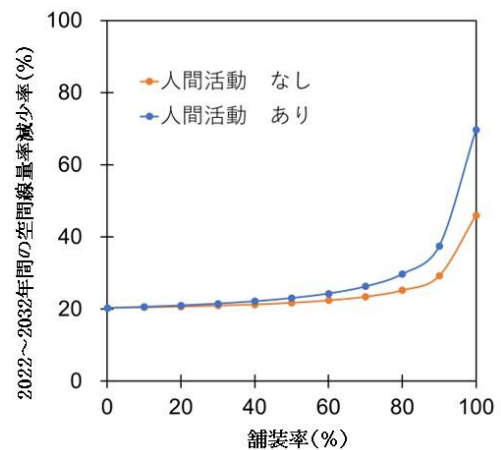


図 1 空間線量率の減少率と舗装率

広域での走行サーベイデータと機械学習を用いた解析により、空間線量率の減少は多くの地点で環境半減期が異なる 3 成分で表され、特に最も環境半減期の短い成分が、地点間の減少傾向の差に寄与していることが明らかとなった。この短半減期と人間活動量を示す社会環境データ (夜間灯火量、及び流動人口) は有意に負の相関を示し、人間活動により普遍的に空間線量率が低減していることが確認された。また得られた相関関係から、流動人口を変数とした環境半減期を表す二重対数式を求め、上述のよう人間活動の程度に応じた、環境半減期の推定に有効なモデルを導出した。

今後は本研究で得られたモデルの妥当性を検証すると共に、これまでに本事業の観測結果を公開してきた自治体のオンラインコンテンツに、土地利用と空間線量率の関係マップや、空間線量率の予測といった成果を反映させることで、有用な情報発信を行うことが望ましいと考える。

V 結論

除染以外の人間活動により、空間線量率の低減が促進されることが現地での観測データ、及び膨大なモニタリングデータの双方から示された。シミュレーションとモニタリングデータの統計解析により、人間活動による空間線量率の低減効果を定量的に示すとともに、流動人口を変数とした環境半減期の推定に有用なモデルを導出した。

引用文献

1. Kinase S, Takahashi T, Sato S et al. Development of prediction models for radioactive caesium distribution within the 80-km radius of the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Radiat. Prot. Dosimetry.*, 2014; 160: 318–321.
2. Saito K, Mikami S, Andoh M et al. Temporal Change in Radiological Environments on Temporal Change in Radiological Environments in Fukushima, *J. Radiat. Prot. Res.*, 2019; 44: 128–148.
3. Andoh M, Mikami S, Tsuda S et al. Decreasing trend of ambient dose equivalent rates over a wide area in eastern Japan until 2016 evaluated by car-borne surveys using KURAMA systems, *J. Environ. Radioact.*, 2018; 192: 385–398.
4. Golikov V, Balonov M, Erkin V et al. Model validation for external doses due to environmental contaminations by the chernobyl accident, *Health Phys.*, 1999; 77: 654–661.
5. Golikov V, Balonov M, Jacob P. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident, *Radiat. Environ. Biophys.*, 2002; 41: 185–193.
6. Saito K, Jacob P. Gamma Ray Fields in the Air Due to Sources in the Ground, *Radiat. Prot. Dosimetry.*, 1995; 58: 29–45.
7. Nakama S, Yoshimura K, Fujiwara K et al. Temporal decrease in air dose rate in the sub-urban area affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident during four years after decontamination works, *J. Environ. Radioact.*, 2019; 208–209: 106013.
8. Yoshimura K, Saegusa J, Sanada Y. Initial decrease in the ambient dose equivalent rate after the Fukushima accident and its difference from Chernobyl, *Sci. Rep.*, 2020; 10: 1–9.
9. WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, 2012.
10. UNSCEAR. Annex, A. Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami in UNSCEAR 2013 Report: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 2013.
11. Yoshimura K, Air dose rates and cesium-137 in urban areas—deposition, migration, and time dependencies after nuclear power plant accidents. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2021; 59: 25-33.
12. Yoshimura K, Nakama S, Fujiwara K. Radiation Monitoring in the Residential Environment: Time Dependencies of Air Dose Rate and ¹³⁷Cs Inventory. *J. Radiat. Prot. Res.*, 2022; 47: 30-38.
13. Andersson KG, Roed J, Fogh CL. Weathering of radiocaesium contamination on urban streets, walls and roofs, *J. Environ. Radioact.*, 2002; 62: 49–60.
14. 日本原子力研究開発機構, 令和2年度 特定復興再生拠点区域における大気放射能濃度調査事業 委託業務成果報告書. 2021.
15. 日本原子力研究開発機構, 特定復興再生拠点区域におけるモニタリング及び被ばく評価手法の検討. JAEA-Research. 2019; DOI:10.11484/jaea-research-2018-016
16. Mikami S, Tanaka H, Matsuda H, et al. The deposition densities of radiocesium and the air dose rates in undisturbed fields around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant; their temporal changes for five years after the accident, *J. Environ. Radioact.*, 2019; 210: 1–12.
17. Yoshimura K, Watanabe T, Kurikami H. Vertical and horizontal distributions of ¹³⁷Cs on paved surfaces

affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, J. Environ. Radioact., 2020; 217: 106213.

18. 日本原子力研究開発機構, 令和3年度東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約事業 成果報告書. 2022. <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/646/list-1.html>
19. 古米弘明, 都市域の雨天時汚濁負荷流出解析の現状と課題, 水環境学会誌, 2002; 25: 524-528.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度研究報告書

研究課題名	個人避難行動及び大気拡散シミュレーションに基づく福島第一原発事故における住民の初期内部被ばく線量推定の精緻化に関する研究
令和4年度研究期間	令和4年4月1日～令和5年2月28日
研究期間	令和3年度 ～ 令和4年度（2年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	栗原 治	量子科学技術研究開発機構・部長
分担研究者		
若手研究者		

キーワード	福島第一原発事故，線量評価，初期内部被ばく，ヨウ素，避難行動，大気拡散シミュレーション
-------	---

本年度研究成果
<p>I 研究背景</p> <p>福島第一原発事故を受けて、福島県では県民の健康影響を長期にわたり見守るための大規模調査（福島県民健康調査）が2011年6月から開始された。同調査の中には、事故発生当時年齢が18歳以下の全県民を対象とした甲状腺検査（いわゆる、超音波診断装置を用いた診断）が含まれており、その結果や検査自体の意義については様々な議論があり、県民に対しては今まで以上に科学的エビデンスに基づく丁寧な説明をしてゆくことが望まれる。甲状腺検査が18歳以下の全県民を対象とした理由は、事故による甲状腺線量の把握が十分に行えなかったためであるが、甲状腺検査の結果を科学的かつ公平に解釈するためには、事故後の一人一人の避難行動の違いを考慮に入れた正確な線量推計値を得ることが不可欠である。本研究は、申請者らがこれまでに実施してきた福島県住民、特に原発近隣地域からの避難住民に対する甲状腺内部被ばく線量の推計を継続・発展させるものであり、福島県民健康調査への貢献が期待されるとともに、県民の安心にも繋がるものである。</p> <p>II 目的</p> <p>福島第一原発事故の発生から10年以上が経過し、この間、国内外の多くの研究者によって、同事故による福島県住民の被ばく線量の調査が行われてきた^{1,2)}。研究代表者らが所属する量子科学技術研究開発機構（以下、量研）においても、主として放射性ヨウ素による事故初期の甲状腺内部被ばく線量の推計を2012年度から継続してきた。2012年度の推計では、国が事故直後に実施した小児甲状腺被ばくスクリーニング検査及び福島県が避難地域の住民に対してホールボディカウンタ（WBC）を用いて行った放射性セシウムを対象とした内部被ばく検査から得られた人の実測データを基礎とし、これに大気拡散シミュレーションを補完的に用いることにより、避難地域各自治体の住民が受けた甲状腺等価線量の代表値（90パーセンタイル値）を導出した³⁾。この結果は、後に行われた他の研究者</p>

による推計値と大きく乖離するものではない。2012年度以降、量研では福島県立医科大学から前述の実測データを有する者の避難行動データの提供を受け、事故直後の避難行動とWBC実測値との関連性について解析を行うとともに、膨大な避難行動の類型化やアップデートされた大気拡散シミュレーションを用いた吸入摂取量の算出等を行ってきた^{4,6)}。また、本事業の先行研究(2019-2020年度)において、研究のために収集及び加工した様々な形式のデータのアーカイブ化を実施した⁷⁾。本研究(2021-2022年度)は、これまでの研究を発展させ、本事業において優先的に取り組むべき課題とされている福島県住民の初期内部被ばく線量の推計について、更なる精緻化と信頼性の向上を図ることを目的とするものである。研究最終年度となる今年度は前年度に引き続き、大気拡散シミュレーションを用いた放射性ヨウ素(特に¹³¹I)の吸入線量の妥当性評価を中心に検討を行った。

III 研究方法

本事業の先行研究(2019-2020年度)⁷⁾において作成した避難行動データ及び線量データのアーカイブ、ならびに、2020年に公開されたWSPEEDI-IIによる大気拡散シミュレーションデータ(¹³¹I, ¹³⁷Cs等の地表大気中時系列マップの内、3km平方メッシュのもの)⁸⁾を使用した。個人の吸入摂取量は、解析対象者の避難行動データから推定される各時刻(毎時)の居場所(緯度経度)から、これに最も近いWSPEEDI-IIの計算格子点の空气中濃度を抽出し、これに年齢グループに応じた単位時間当たりの吸入量を乗じ、評価対象期間である2011年3月12日から31日まで積算して求めた。屋内防護係数については、後述するとおり、吸入線量に対する感度解析を行った。

(倫理面への配慮)

甲状腺中ヨウ素または全身セシウムを対象とした人の実測値及び個人の避難行動データの本研究での利用については、研究代表者らが所属する量研及び福島医大の臨床研究審査委員会での承認を得ている(量研13-011, 福島医大1892)。研究目的外での利用、また、他機関への譲渡はしない。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

1. 研究結果

① 大気拡散シミュレーションによる吸入線量推計の検証

大気拡散シミュレーションによる初期内部被ばく線量、特に放射性ヨウ素の吸入による甲状腺等価線量の検証について、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者の内、避難行動データを有する約300名について前述した方法で当該線量を計算し、実測値(¹³¹I甲状腺残留量)から求めた甲状腺等価線量との比較を行った。同検査被検者の2011年3月11日から31日までの滞り場所は図IV-1に示すとおりであり、飯館村及びいわき市の被検者については、大量放出のあった15日以降に自主避難者の増加があったが、3月下旬にかけて同自治体に帰還している様子が確認された。

甲状腺中ヨウ素の実測値と避難行動データの両方を有する308名について、実測値から推定された甲状腺等価線量と新旧のWSPEEDI-IIから計算した甲状腺等価線量(屋内防護係数は0.5に設定)を比較した結果を図IV-2に示す。ここで、新旧のWSPEEDI-IIとは、それぞれ2020年及び2012年に発表された大気拡散シミュレーションの結果であり^{8,9)}、ソースタームの設定や放射性核種の地表沈着プロセス等のスキームが両者で異なる。また、実測値に基づく甲状腺等価線量は、摂取日を3月15日に設定し、測定日までの¹³¹I甲状腺残留量の減少を考慮し算出した。図IV-3には、実測及び新旧のWSPEEDI-IIから導出した甲状腺等価線量分布をそれぞれ示した。以上の結果から、新旧のWSPEEDI-IIともに、実測値に基づく甲状腺等価線量に対する再現性は個人毎に見れば低いものの、被検者全体の甲状腺等価線量分布に関しては、新しいWSPEEDI-IIにおいて再現性が向上した。

② 屋内防護係数の検討

屋内防護係数は屋滞在時に見込まれる吸入摂取量（放射能）の低減効果を考慮するファクターであり、WSPEEDI-II によって得られる ^{131}I の地表高空中濃度に対する屋内の空气中濃度の比として定義される。屋内防護係数の検討を行う前に、実測値及び WSPEEDI-II から得られる甲状腺等価線量分布の特徴について QQ プロットを用いて確認したところ、図 IV-4 に示すように両者とも対数正規分布に近いことが分かった。ただし、前者については、未検出者が約半数を占めるために打切り分布となることから、QQ プロット上で直線回帰を行い線量分布の再構成を行い、各累積頻度（5%、10%、25%、50%、75%、90%及び95%）における甲状腺等価線量を求めた。WSPEEDI-II からの甲状腺等価線量についても屋内防護係数毎に同様に算出し、実測値から得られる甲状腺等価線量との比較を行った（表 IV-1）。

同表中の数値が示すように、WSPEEDI-II からの甲状腺等価線量は屋内防護係数によって変化し、屋内防護係数が 0.3 から 0.7 の範囲で約 2 倍の変化があった。実測値から得られる甲状腺等価線量は、①3 月 15 日を摂取日に設定した場合と②WSPEEDI-II と避難行動データから吸入量が最大となる日を摂取日に設定した場合の両方について求めた。後者の摂取日は被検者毎に個別に設定している。①の場合、屋内防護係数を 0.5 に設定したときに実測値及び WSPEEDI-II からの甲状腺等価線量が最も良く一致する結果となった。

③ 福島第一原発近隣住民の甲状腺等価線量推計値

先行研究⁷⁾においてアーカイブ化を行った福島第一原発近隣自治体住民の避難行動データを用い、同様な方法により、 ^{131}I の吸入摂取による甲状腺等価線量を計算した。ここで、使用した避難行動データは 2011 年度の WBC 被検者（3 歳以上）から得られたものであり、前述の屋内防護係数は 0.5 に設定した。表 IV-2 に計算結果の一例（5 歳児群 {3 歳から 7 歳まで} と成人群 {18 歳以上}）を示す。また、行動データを有する WBC 被検者 5,401 名（浪江町，大熊町，富岡町，双葉町，楡葉町，飯舘村，広野町，川内村，川俣町及び葛尾村の被検者全員）について、甲状腺等価線量分布を計算した結果、甲状腺等価線量の中央値は 1.6 mSv，90%累積頻度値は 12.3 mSv となった。

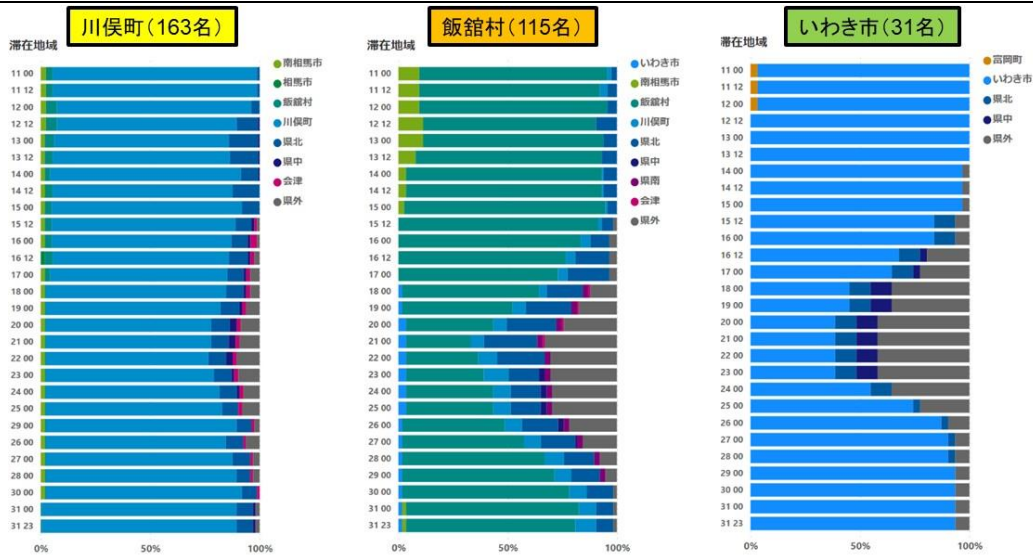


図 IV-1 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者の滞在場所の時系列

※行動データが得られた 309 名の内 1 名は被検者照合が行なえなかったため線量計算からは除外

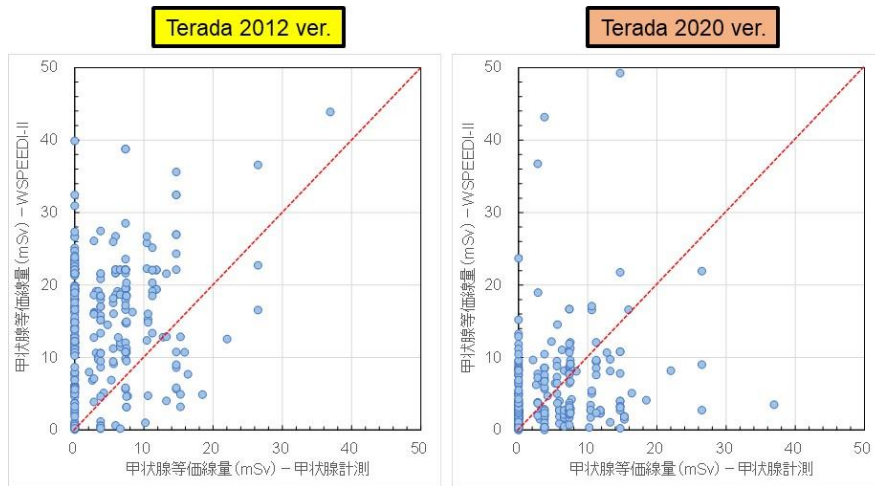


図 IV-2 実測値（甲状腺 ^{131}I 残留量）及び WSPEEDI-II（屋内防護係数 0.5）から算定した甲状腺等価線量の比較

※左パネル：WSPEEDI-II (2012)⁹⁾，右パネル：WSPEEDI-II (2020)⁸⁾



図 IV-3 実測値（甲状腺 ^{131}I 残留量）及び WSPEEDI-II（屋内防護係数 0.5）から算定した甲状腺等価線量分布の比較

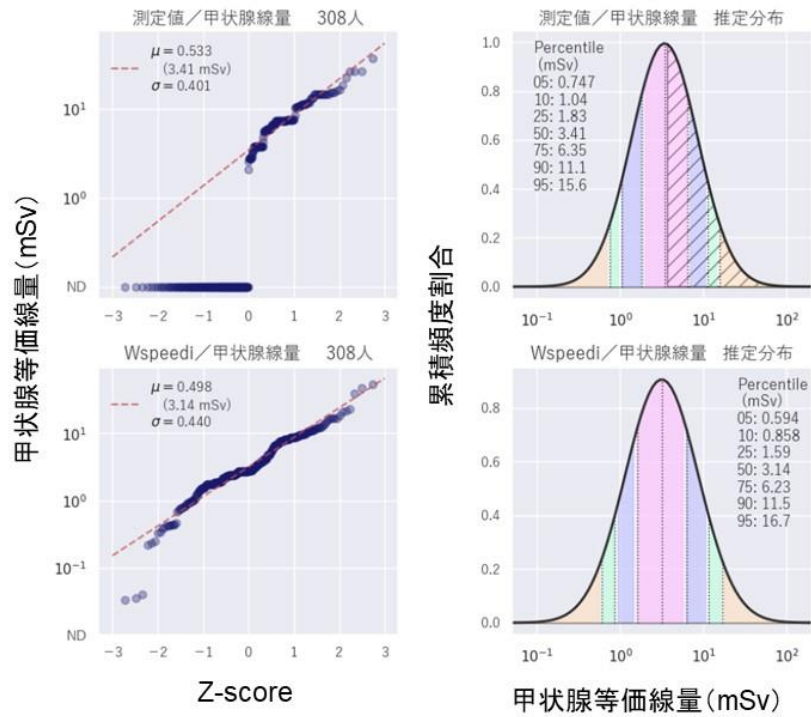


図 IV-4 甲状腺等価線量分布の再構成

※上段：実測値（甲状腺¹³¹I残留量），下段：WSPEEDI-II（2020年版，屋内防護係数0.5）

表 IV-1 実測値（甲状腺¹³¹I残留量）及びWSPEEDI-IIから算出した甲状腺等価線量分布の比較

累積 頻度	実測		WSPEEDI-II (Terada 2020 ver.)				
	摂取日		屋内防護係数				
	3/15	WSP 最大日	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
5%	0.7	0.5	0.1	0.4	0.6	0.8	1.1
10%	1.0	0.8	0.2	0.5	0.9	1.2	1.5
25%	1.8	1.4	0.3	1.0	1.6	2.2	2.8
50%	3.4	2.8	0.7	1.9	3.1	4.4	5.6
75%	6.3	5.5	1.4	3.8	6.2	8.7	11.1
90%	11.1	10.0	2.5	7.0	11.5	16.0	20.5
95%	15.6	14.5	3.7	10.2	16.7	23.2	29.7

(mSv)

表 IV-2 WSPEEDI-II から算出した近隣自治体 WBC 被検者の甲状腺等価線量分布

5歳年齢Gr(屋内防護係数=0.5) (mSv)							成人年齢Gr(屋内防護係数=0.5) (mSv)						
累積 頻度	浪江	双葉	大熊	富岡	飯舘	川内	累積 頻度	浪江	双葉	大熊	富岡	飯舘	川内
(人数)	347	151	242	221	90	31	(人数)	316	211	282	338	47	31
10%	0.2	0.4	0.6	0.1	0.6	0.1	10%	0.1	0.2	0.3	0.1	0.9	0.1
25%	0.5	0.9	1.3	0.3	1.3	0.3	25%	0.5	0.6	0.7	0.2	1.7	0.2
50%	1.8	2.1	2.7	0.9	3.2	1.0	50%	1.6	2.2	1.5	0.7	3.3	0.6
75%	6.5	4.8	5.6	2.6	7.8	2.8	75%	6.0	7.2	3.5	2.0	6.6	1.4
90%	20.5	16.5	11.0	6.8	17.3	7.3	90%	19.2	21.2	7.3	5.5	12.2	3.1

2. 考察

福島第一原発事故に際し、近隣住民の事故初期の内部被ばく線量に最も寄与したとされる¹³¹Iについては、人及び環境の実測データが限られているため、線量推計及びその精度検証は課題とされてきた。大気拡散シミュレーションは、広範囲の時空間的な放射性核種の挙動を再現することができるため、実測値が全く得られていない地域については有効な線量評価手法ではあるものの、実測値に基づく甲状腺等価線量との比較検証が必要である。図 IV-2 に示すように個人線量に対する一対一の再現性は低く、新しい WSPEEDI-II でも改善は見られなかった。この原因として、WSPEEDI-II で計算された空气中放射性物質濃度の精度の問題に加えて、呼吸量や代謝等の生理学的パラメータに関する個人差や屋内防護係数のばらつき等の要因も大きく影響した可能性が考えられる。他方、実測値に基づく甲状腺等価線量についても、NaI(Tl)サーベイメータを用いて得られた計測値であることから、主にその統計変動に由来するファクター2程度の計測誤差が見込まれる¹⁰⁾。また、吸入摂取と比べて小さいと考えられるものの、潜在的な経口摂取による線量寄与も含むものである。以上から、WSPEEDI-II による個人線量の推計には限界があるものの、結果的に解析対象者全体の甲状腺等価線量分布は良好に再現された(図 IV-3)。新旧の WSPEEDI-II による線量推計に及ぼす顕著な違いは川俣町と飯舘村の被検者に現れており、3月15日の当該地区の空气中濃度が新しい WSPEEDI-II では減少したために、甲状腺等価線量もそれに準じた結果となった。

屋内防護係数については、表 IV-1 に示す結果から 0.5 程度に設定するのが適当と考えられる。この結果は過去の報告例^{11,12)}とも整合している。しかしながら、屋内防護係数は建屋の放射性プルームによるばく露時間や放射性ヨウ素の性状にも影響することにも留意する必要がある^{13,14)}。解析対象者は全般的に屋内滞在時間が長く、屋内防護係数は甲状腺等価線量に大いに影響することが示されたが(表 IV-1)、同様な傾向は避難地域住民にも当てはまるものと思われる。

以上の検証結果を踏まえ、WSPEEDI-II 及び避難行動データを用いて近隣自治体の甲状腺等価線量分布を算出した(表 IV-2)。成人と子供が同一の行動をしていれば、両者の甲状腺等価線量の差異は、それぞれの呼吸量と線量係数の違いによって決まり、5歳児群は成人群の約2倍の線量になるが、浪江町や双葉町等では線量の差は比較的小さかった。この結果は、両年齢群の避難開始時期や屋内退避時間の差異によるものであり、5歳児群の方が成人群に比べて、より線量低減効果の高い避難行動をしていたことを示唆している。同一家族であれば両年齢群の行動履歴はほぼ同じと考えられるが、この点に関して、各自治体及び各年齢群の避難行動データを網羅的に解析することで明らかにする必要がある。なお、避難行動データには同一家族を識別できる情報は付与されていない。

他の線量推計法と比較するため、昨年度報告した浪江町、双葉町、大熊町、及び、富岡町の WBC

成人被検者のセシウム吸入摂取による実効線量から、摂取量比 ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$) を用いて 1 歳児群及び成人群の甲状腺等価線量 (90%累積頻度値) を算出した結果を表 IV-3 に示す。この方法は研究代表者らの論文に解説されており^{15, 16)}、摂取量比は 3.9 とした¹⁷⁾。同表中の早い避難 Gr と遅い避難 Gr は、3 月 12 日 15 時点の福島第一原発から推定滞在場所までの距離によって分類しており、前者は 25 km 圏外、後者は 25 km 圏内とした。なお、1 歳児群と 5 歳児群は、それぞれの吸入量と線量係数の積はほぼ同じであるため、1 歳児群の数値は表 IV-2 の 5 歳児群のものと比較できる。二つの推計方法を比較すると、浪江町の早い避難 Gr を除き、摂取量比を用いる方法の方が全体的に高い線量となっている。ただし、昨年度報告したとおり、浪江町以外については、一時帰宅 (自家用車による自宅からの物品搬出が許可された第 2 巡目以降) に伴う微量な着衣汚染の影響が WBC 測定において確認された事例があったことから、セシウムの実効線量を過大評価している可能性がある¹⁸⁾。この詳細については論文査読中であるため、説明は別の機会に譲る。

表 IV-3 摂取量比 ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$) を用いて推定した甲状腺等価線量の 90%累積頻度値

90% 頻度値線量 (mSv)	浪江		双葉		大熊		富岡	
	早い避難Gr	遅い避難Gr	早い避難Gr	遅い避難Gr	早い避難Gr	遅い避難Gr	早い避難Gr	遅い避難Gr
実効線量(Cs)	0.043	0.13	0.13	0.16	0.093	0.12	0.080	0.089
甲状腺等価線量(成人)	4.3	12.8	12.8	15.9	9.3	11.8	7.9	8.9
甲状腺等価線量(1歳児)	8.4	25.1	25.0	31.1	18.3	23.0	15.6	17.5

3. 今後の研究方針

本研究の後継研究「原子力災害時における被災者の個人被ばく線量把握及び健康管理に資するインテリジェンスデータベースの構築」が本事業において採択され、2023 年度から 3 ヶ年の予定で研究を遂行する予定である。後継研究では、研究代表者らがこれまでに収集または導出した福島第一原発近隣住民の様々な線量関連データを最大限に利活用するために、動的解析が可能なデータベースの開発を行うとともに、将来の原子力災害における公衆の被ばく線量推計に必要なデータベースの要件定義を示すことを予定している。

V 結論

研究最終年度となる今年度は、WSPEEDI-II を用いた ^{131}I 吸入摂取による甲状腺等価線量の推計の妥当性評価を主に行った。結論として、現時点では WSPEEDI-II による線量推計は不確実性が大きく、個人を対象とした線量推計に用いることは適当ではないものの、他の手法による線量推計結果と比較することを前提として、対象地域住民の線量分布を把握するには有効な手段と思われる。大気拡散シミュレーションの線量推計における最大の利点は、放射性プルームによる主要な曝露イベントを個人の行動履歴と併せて推定できることであり、これは人の実測値から線量評価を行う際にも必要となる摂取シナリオを決定するための有力な検討材料となることである。小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者 309 名については、大量放出のあった 3 月 15 日を摂取日とする急性摂取シナリオを用いることで、適度に保守的な線量推計を行えることを確認した。WSPEEDI-II による同被検者の甲状腺等価線量の分布は、屋内防護係数を 0.5 に設定した場合に、実測値から推定された分布と全体的によく一致した。

引用文献

1. Ishikawa T. Radiation doses and associated risk from the Fukushima nuclear accident: a review of recent publications. *Asia. Pac. J. Public Health*, 2017; 29 (Suppl 2): S18 –S28.
2. Kurihara O. Review: external and internal dose assessments of Fukushima residents after the 2011 nuclear disaster. *J. Natl. Inst. Public Health*, 2018; 67: 11–20.
3. Kim E, Kurihara O, Kunishima N, et al. Internal thyroid doses to Fukushima residents—estimation and issues remaining. *J. Radiat. Res.*, 2016; 57: i118–i126.
4. Igarashi Y, Kim E, Hashimoto S, et al. Difference in the cesium body contents of affected area residents depending on the evacuation timepoint following the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys.*, 2020; 119: 733–745.
5. Kim E, Igarashi Y, Hashimoto S, et al. Estimation of the early ^{137}Cs intake of evacuees from areas affected by the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident using their personal behavioral data and the latest atmospheric transport and dispersion model simulation. *Health Phys.*, 2021; 121: 133–149.
6. Kim E, Igarashi Y, Hashimoto S, et al. Estimation of the thyroid equivalent doses to residents in areas affected by the 2011 Fukushima nuclear disaster due to inhalation of ^{131}I based on their behavioral data and the latest atmospheric transport and dispersion model simulations. *Health Phys.*, 2022; 122: 313–325.
7. 栗原治. 避難行動データの多角的解析に基づく福島原発事故初期の内部被ばく線量推計. 環境省. 令和2年度 放射線健康管理・健康不安対策事業（放射線の健康影響に係る研究調査事業）報告書等.
8. Terada H, Nagai N, Tsuduki K, et al. Refinement of source term and atmospheric dispersion simulations of radionuclides during the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *J. Environ. Radioact.*, 2020; 213: 106104.
9. Terada H, Katata G, Chino M, et al. Atmospheric discharge of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. Part II: verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion. *J. Environ. Radioact.*, 2012; 112: 141–154.
10. Kim E, Yajima K, Hashimoto S, et al. Reassessment of internal thyroid doses to 1,080 children examined in a screening survey after the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys.*, 2020; 118: 36–52.
11. 日本原子力研究所. 保健物理—管理と研究—No. 29 (1986 年度) 3.3 環境放射線管理技術の開発. *JAERI-M87-147*: 225–227. 1987.
12. Ishikawa T, Sorimachi A, Arae H, et al. Simultaneous sampling of indoor and outdoor airborne radioactivity after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Environ. Sci. Technol.*, 2014; 48: 2340–2435.
13. US EPA. Manual of protection action guides and protection actions for nuclear incidents. 1992.
14. Horiuchi J, Takahara S, Komagamine H, et al. Penetration factor and indoor deposition rate of elementary and particulate iodine in a Japanese house for assessing the effectiveness of sheltering for radiation exposure. *J. Radiol. Prot.*, 2021; 41: S139–S149.
15. Kim E, Kurihara O, Tani K, et al. Intake ratio of ^{131}I to ^{137}Cs derived from thyroid and whole-body doses to Fukushima residents. *Radiat. Prot. Dosim.*, 2016; 168: 408–418.
16. Kim E, Yajima K, Igarashi Y, et al. Intake ratio of ^{131}I to ^{137}Cs derived from thyroid and whole-body doses to residents of Iwaki City in Japan’s Fukushima Prefecture. *Health Phys.*, 2021; 120: 387–399.
17. Kim E, Kurihara O, Kunishima N, et al. Early intake of radiocesium by residents living near the TEPCO Fukushima Dai-ichi nuclear power plant after the accident. Part 1: internal doses based on whole-body

measurements by NIRS. *Health Phys.*, 2016; 111: 451–464.

18. Momose T, Takada C, Nakagawa T, et al. Whole-body counting of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident. In: *Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident*. Chiba, Japan: National Institute of Radiological Sciences, NIRS-M-252, 2012; 67–82.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度研究報告書

研究課題名	浜通り地域を対象とした帰還住民の天然および人工放射性核種からの被ばく線量調査
令和4年度研究期間	令和4年4月1日～令和5年2月28日
研究期間	令和3年度 ～ 令和5年度（2年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	細田 正洋	弘前大学・教授
分担研究者		
若手研究者		

キーワード	浜通り地域、自然放射線、人工放射線、外部被ばく、内部被ばく、被ばく線量
-------	-------------------------------------

本年度研究成果
<p>I 研究背景</p> <p>我々は、浪江町において放射線の健康影響に係る研究調査事業「浪江町民のための被ばく線量調査」を2017年度から2019年度にかけて実施した^{1,2)}。この調査事業ではフィールド調査のみでなく、浪江町民との交流も積極的に行なった。浪江町内での活動の中で、放射線と向き合って生活するためには、自然放射線に関する情報や他地域の放射線量の実態を知りたいとの声を多く聞いた。原発事故以前より自然界にはラドンをはじめとしてさまざまな放射性物質による被ばくがあったのにも関わらず、その実態は理解されていない。さらに、浜通り地域において多くの研究機関が地域に根付いた調査を実施しており、機関間の連携も浜通り地域の活性化において重要な課題である。</p> <p>II 目的</p> <p>富岡町、川内村および大熊町において自然放射線と原発事故由来の人工放射線からの被ばく線量の実態を明らかにし、自然放射線源からの被ばく線量を“ものさし”とすることで人工放射線による線量との比較が住民自身で容易にできるような資料を提供することを目的とする。</p> <p>III 研究方法</p> <p>1. 外部被ばく線量評価</p> <p>1) 自然放射線と人工放射線による線量率マップの作成</p> <p>富岡町、川内村及び大熊町のメッシュサイズを2 km × 2 km とした。NaI(Tl)スペクトロメータを用いて、1メッシュあたりで最低1ヶ所のガンマ線波高分布を15分間計測によって取得した。解析には応答行列法を用いることで、天然成分と人工成分とを弁別して空間線量率を評価した。</p> <p>2. 内部被ばく線量評価</p> <p>1) 大気中の放射性セシウムの吸入摂取</p>

令和3年度中に決定したそれぞれの観測地点において3ヶ月ごとに可搬型ハイボリュームエアサンプラを用いて大気中ダストの採取を行い、高純度ゲルマニウム半導体検出器によって放射性セシウムを定量することで土壌から大気へと再浮遊した放射性セシウム濃度を評価した。

2) 家屋内外のラドン・トロンの吸入摂取

富岡町、川内村の各30家屋内及び大熊町内の10家屋にパッシブ型ラドン・トロン弁別モニタ(RADUET³⁾)とラドン・トロン子孫核種モニタ⁴⁾を設置する。季節変動を評価するためモニタを3ヶ月毎に交換し、4期の測定を実施した。また、比較対象地域として、弘前市内、北海道および沖縄県内の全30家屋で同様の調査を実施した。

3) 飲料水中の放射性セシウムの経口摂取

屋内ラドン濃度の調査を実施する各町村のそれぞれ10家屋において、3ヶ月ごとに2Lの飲料水を採水した。弘前大学において高純度ゲルマニウム半導体検出器によって放射性セシウムを分析した。

4) 飲料水中のラドンの経口摂取

屋内ラドン濃度の調査を実施する各町村のそれぞれ10家屋において、3ヶ月ごとに500mLの飲料水を採水した。可搬型ラドンモニタによって飲料水中ラドン濃度を評価した。

これらの個人の線量評価を行うための基礎情報(行動記録や家屋構造等)を取得するにあたり、弘前大学大学院保健学研究科に設置された倫理委員会の承諾を得た(承認番号:2020-56)。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

本年度で測定可能な全95メッシュの周辺線量当量率の測定が終了し、応答行列法により天然成分と人工成分に弁別したマップを作成した。天然成分は0.023-0.071 $\mu\text{Sv/h}$ と評価され、人工成分は0.015-3.805 $\mu\text{Sv/h}$ と広く分布していることが明らかとなった。本年度で、川内村での屋内ラドン濃度の調査が終了した。川内村のラドン濃度及びトロン子孫核種濃度の年間平均値は、それぞれ $20 \pm 11 \text{ Bq/m}^3$ 及び $1.1 \pm 1.9 \text{ Bq/m}^3$ であった。富岡町では3期間(4月から1月まで)の調査が終わった。これまでのラドン濃度とトロン子孫核種濃度の算術平均値は $18 \pm 15 \text{ Bq/m}^3$ 及び $0.3 \pm 0.5 \text{ Bq/m}^3$ であった。大熊町では2期間(9月から3月まで)の調査が終わった。これまでのラドン濃度とトロン子孫核種濃度の算術平均値は $15 \pm 19 \text{ Bq/m}^3$ 及び $1.0 \pm 0.1 \text{ Bq/m}^3$ であった。屋内ラドン濃度の全国調査の結果によれば、我が国の平均値は約 16 Bq/m^3 であり⁵⁾、3町村の平均濃度は標準変化を加味すれば概ね国内の平均レベルである。一方、トロン子孫核種濃度に関する情報は国際的にも少なく本調査結果は貴重なデータとなり得る。また、大気中の放射性セシウム濃度に関して、川内村の2地点では全ての季節において¹³⁴Cs及び¹³⁷Csは検出下限値以下($\sim 0.06 \text{ Bq/L}$)であった。一方、富岡町と大熊町で全てのサンプリング地点で¹³⁷Csが検出され、その濃度範囲は $27\text{--}120 \mu\text{Bq/m}^3$ であった。川内村の全家屋において地下水を飲用に利用しており、その平均ラドン濃度は $18\text{--}351 \text{ Bq/L}$ であった。富岡町と大熊町では、全ての家屋において水道水が飲用に利用されており、そのラドン濃度は検出下限値以下(3 Bq/L)であった。一部の家屋では地下水も利用していたが、そのラドン濃度は富岡町(3家屋)で $6\text{--}29 \text{ Bq/L}$ 、大熊町(1家屋)で 6 Bq/L と評価された。一方、¹³⁷Csは全ての飲料水で検出下限値以下であった。最高値を示した家屋の飲料水中のラドン濃度を、①ラドンの散逸防止に配慮したサンプリング手法を用いた場合、②通常の飲用方法を想定して蛇口から直接サンプリングした場合、③飲用水を煮沸した場合でそれぞれ評価した。その結果、それぞれの手法で得られたラドン濃度は $399 \pm 30 \text{ Bq/L}$ 、

316 ± 26 Bq/L、19 ± 2 Bq/L と評価され、煮沸によってラドン濃度は 5%程度まで低減された。

令和 5 年度は、富岡町の第 4 期分のモニタ回収と共にデータ解析を実施、大熊町及び比較対象地域の 2 期分の調査を終了させる。各自治体との協議の上、得られた結果を可視化することで効果的な結果説明をするとともに、各自治体が出版する広報誌に結果を公開し広く情報共有に努める。

V 結論

令和 3 年度にコロナ禍による遅れが生じたが、地元自治体と他大学との強い連携によって本年度は順調に調査及びデータの解析が進められた。季節変動を考慮した線量評価を実施するとともに、効果的な結果の伝達手法について今後検討を進める。

引用文献

1. Ploykrathok T, Ogura K, Shimizu M et al. Estimation of annual effective dose in Namie Town, Fukushima Prefecture due to inhalation of radon and thoron progeny, *Radiat Environ Med* 2021;10: 9–17.
2. Ogura K, Hosoda M, Tamakuma Y et al. Discriminative measurement of absorbed dose rates in air from natural and artificial radionuclides in Namie Town, Fukushima Prefecture, *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:978.
3. Tokonami S, Takahashi H, Kobayashi Y et al. Up-to-date radon-thoron discriminative detector for a large scale survey, *Rev Sci Instrum* 2005;76:113505.
4. Tokonami S. Characteristics of thoron (^{220}Rn) and its progeny in the indoor environment, *Int J Environ Res Public Health* 2020;17:8769.
5. Sanada T, Fujimoto K, Miyano K et al. Measurement of nationwide indoor Rn concentration in Japan. *J Environ Radioact* 1999;45:129–37.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度研究報告書

研究課題名	陸・水圏植物における有機結合型トリチウム（OBT）生産速度の網羅的把握
令和4年度研究期間	令和4年4月1日～令和5年2月28日
研究期間	令和4年度 ～ 令和6年度（1年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	佐藤雄飛	公益財団法人環境科学技術研究所・研究員
分担研究者		
若手研究者		

キーワード	福島原発処理水、トリチウム、有機結合型トリチウム、光合成
-------	------------------------------

本年度研究成果	
I	<p>研究背景</p> <p>2011年に発生した福島原発事故への対応に伴い、現在まで同原発の敷地内には高濃度のトリチウムを含む処理水が蓄積し続けており、2023年中には蓄積許容量の上限に達することが見込まれている。そこで東京電力は、この処理水について2023年中に徐々に海洋放出することを公表した（東京電力処理水ポータルサイトより）。この放出に際しては、自然海水による希釈等によって1500 Bq/L以下のトリチウム濃度とした上で放出する計画となっているが、この濃度はWHOが飲料水について定めた基準（10000 Bq/L以下）と比較しても顕著に低い値である。また、放出後は福島沿岸の海流によって更に速やかに希釈されることが想定される。このように、処理水の海洋放出に関しては環境や人への影響に対して十分な配慮がなされている。一方、処理水中のトリチウムは主にトリチウム水（HTO）の化学形態で存在するが、このHTOの一部は一次生産者の光合成によって有機結合型トリチウム（Organically bound tritium: OBT）に変化する。OBTは生物中の有機物に固定されたものであるため、このOBT生成は環境中におけるトリチウムの局在化を促す可能性がある^{1,2)}。加えて、トリチウムによる内部被ばくの影響を考える場合、OBTはHTOの化学形態に比べて影響度合いが大きい^{1,2)}。これらのことから、処理水の放出に関して十分な安心感を担保するためには、HTOのみならずOBTの環境動態も把握しておくことが望ましい。本研究では海水中および海霧等により沿岸陸域へ移行した処理水中のHTOが、それらの領域に生息する一次生産者の光合成によってOBTに変化することを想定し、各種一次生産者によるOBT生産速度を評価することとした。ここで得られる情報は、処理水を海洋放出した際にOBTを考慮したトリチウム動態の解析に資するものである。</p>
II	<p>目的</p> <p>本研究では、日本の東北地方太平洋沿岸域において一般的に生息する水圏および陸圏の一次生産者を対象として、OBT生産速度の取得を目的とした。その中で、計画初年度の今年度は、各種生産者についてOBT生産速度を評価可能とする実験系の構築を到達目標とした。</p>

III 研究方法

本研究では水素の安定同位体である²Hで標識された水（重水）をHTOの模擬物質と見なし、実験系内に添加した重水から一定時間内に生産される有機態重水素（Organically bound deuterium: OBD）を測定することによって、一日あたりに生産されるOBT量を評価することを計画した。これにあたって、まずは各種一次生産者の栽培体制を確立すると共に、OBT動態解析や一次生産者の成長過程に関する基礎情報（安定元素組成、等）を取得した。

対象とした一次生産者は水圏では植物プランクトン、陸圏では抽水性植物としてイネ、草本として牧草（オーチャードグラス）およびコマツナ、樹木としてクロマツおよびミズナラ（共に3年生苗木）を選定し、各種について栽培および経時的な試料採取の各体制を検証した。また採取した試料については、元素分析計を用いて安定元素（炭素、水素、窒素）を測定し、各元素濃度の経時変化に関する情報を取得した。また、生長速度は他種に比べて顕著に早い植物プランクトンに関しては、栽培体制の確立が速やかに進行したため、重水添加実験を実施し、OBT生産速度に資する情報を取得した。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

結果と考察

各一次生産者について研究所内の実験室および実験圃場における栽培体制を確立した（下図）。また、これに合わせて定期的な試料採取および試料処理（乾燥、粉碎等）が滞りなく可能であることを確認した。採取した試料に関して安定元素濃度を測定し、陸域の各一次生産者について部位別に炭素/水素比（C/H比、重量比）を評価した。なお、このC/H比は有機物へのトリチウムの移行効率を判断する上で有用な指標となるものである。C/H比を測定した結果、同比は6~8の範囲であり、その値は部位や季節によって変動することが明らかとなった。これは、部位や季節によりOBTの蓄積効率が変化する可能性を示唆するものである。また、植物プランクトンに関して、重水添加実験によりOBT生産速度に関する情報を取得した結果、同速度は植物プランクトンの種類によって1桁程度の幅があることが明らかとなった。一方で水温に関しては、15–25℃を比較した場合、各種において最大で倍程度の差であった。このことから、現場海水中において植物プランクトンによるOBT生産を考慮する場合、特に植物プランクトン群集の種組成が生産速度の重要な規定要因となることが示唆された。

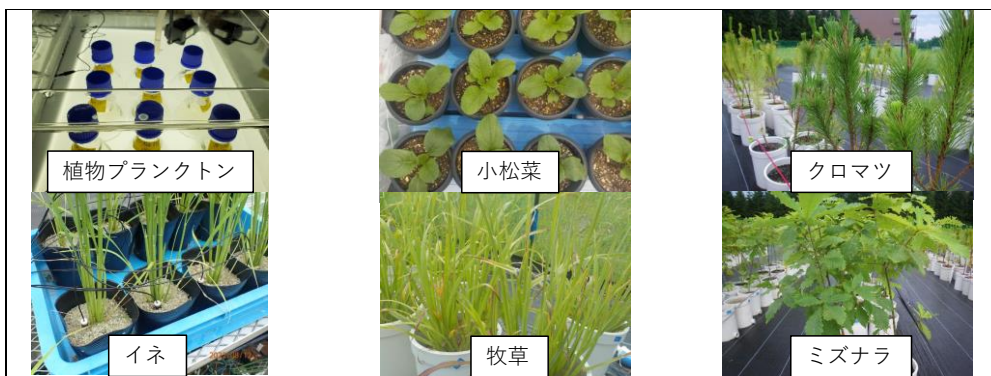


図. 各種一次生産者の栽培状況

今後（来年度）の方針

陸上植物に関しては重水を用いた栽培実験を実施する。水圏植物に関しては植物プランクトンに加え、海藻類について栽培体制の確立および重水添加実験を実施する。また、今年度得られたC/H比や植物プランクトンにおける生産速度については、論文として成果を公表する予定である。

V 結論

年度当初の計画に予定されていたように、重水を用いた実験により各種一次生産者のOBT生産速度を評価可能な体制を整えた。

引用文献

1. Eyrolle F, Ducros L, Le Dizès S, Beaugelin-Seiller S, et al. An updated review on tritium in the environment, *J. Environ. Radioact.*, 2018; 181, 128-137.
2. IAEA. Transfer of tritium in the environment after accidental releases from nuclear facilities, IAEA-TECDOC-1738, 2014.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度研究報告書

研究課題名	大熊町など福島第一原発に近い地域の住家における掃除による屋内放射性物質の低減効果
令和4年度研究期間	令和4年4月1日～令和5年2月28日
研究期間	令和4年度 ～ 令和6年度（1年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	吉田 浩子	東北大学サイクロトロン・ ラジオアイソトープセンター・研究教授
分担研究者		
若手研究者		

キーワード	福島第一原発、住家屋内、掃除、放射性セシウム、低減効果、ハウスダスト
-------	------------------------------------

本年度研究成果
<p>I 研究背景</p> <p>平成28～30年度の原子力災害影響調査等事業で実施した「住家内汚染の包括的研究及びこれによる内部被ばく線量評価」において、1回だけの掃除機がけでは、ある程度大きくなった放射性セシウム（以下放射性Csという。）を含むハウスダストは集塵するものの、床表面などに付着した放射性Csは残存したままであることを示したり。一方、令和3年度事業「被ばく線量に影響を及ぼす住家内外の要因に関わる研究」での調査結果では、避難指示が解除された飯舘村及び南相馬市小高区の住家で居住（帰還）している住家のほうが表面汚染密度の値が明らかに低くなるという傾向が示された。住民が日常的に行う掃除機による低減効果の有無、そしてその効果がある場合どの程度あるのかなど、その長期的な効果はまだ調べられていない。</p> <p>II 目的</p> <p>大熊町を中心に人の出入りの頻度が異なる木造住家（～10戸）において定期的な掃除機がけを3年間継続して行うことによりハウスダストを集塵し、集塵されたハウスダストを測定し、その経時変化（ハウスダストの低減率）を評価することにより掃除機がけによる除去効果を調べることを目的とする。同時に、住家の換気率や屋外の外気中放射性エアロゾルなども測定し、居住環境、人の居住、出入りなどの人的活動が住家内放射性物質の挙動に与える影響について検討を行う。</p> <p>III 研究方法</p> <p>大熊町の木造住家10戸（図1）において掃除機で定期的にハウスダストを集塵し、粒径別（<20 μm, 20–63 μm, 63–180 μm, 180–500 μm, 500 μm–1 mm, 1–2 mm, >2 mm）に分離した後秤量し、ハウスダスト中のCs-137をゲルマニウム半導体検出器(HPGe)で測定・定量評価する。調査住家の換気率をトレ</p>

一サーガス (CO₂)とガスセンサーを用いて評価する。さらに、気密測定機器により住家の隙間がどのくらいあるかを評価する。電気が復旧した2戸において外気中及び屋内の放射性エアロゾルをエアサンプラーにより継続的に捕集する。床面などに沈着している放射性物質(ダストに付着)の表面汚染密度を測定する。屋外・屋内のγ線スペクトルについて解析を行い直達線/散乱線の分別評価方法を検討する。

本研究は、東北大学大学院薬学研究科ヒトを対象とする研究に関する倫理委員会にて令和4年3月31日に承認を受けた手法により実施した。



図1 調査住宅の位置 *:屋外・屋内エアサンプラー配置 (令和4年7月1日時点での解除済み区域と帰還困難区域)

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

今年度の研究成果と考察を述べる。

1. 床面積当たりのハウスダスト量 (<20 μm-2 mm) (g/m²)は最初の掃除機がけの日から200日あたりまでは掃除機をかけるたびに減少する傾向がいずれの住家でも観察された。200日を超えたあたりで減少傾向は小さくなった。なお、2戸(図1のID_O_6とID_O_10)においてはハウスダスト量が増える回もあった。この原因として、ヒトの生活活動や動物による持ち込みの影響が示唆される。
2. 床面積当たりのハウスダスト(<2 mm)中 Cs-137 濃度(Bq/m²)の経時変化は、1.の床面積当たりのハウスダスト量(g/m²)とほぼ同じ傾向を示していた。
3. 重量当たりのハウスダスト(<2 mm)中 Cs-137 濃度(Bq/g)は、前回調査(2016-2019)結果²⁾と同様に小さい粒子ほど高濃度であった。掃除機をかけた回数には関わらず重量当たりのCs-137濃度(<2 mm)はほぼ一定の傾向にあるが、床面積当たりのハウスダスト量が増えたケースでは、重量当たりのCs-137濃度が下がっており、非放射性物質による希釈効果があることが示唆された。
4. ハウスダストの粒径分布は、前回事業での調査(2016-2019)結果²⁾と同等で、63-180μmの粒子が最も多く、続いて20-63μmや180-500μmが多かった。いずれの住家でも掃除の回数ごとにおける粒径分布に差は観察されず、常にほぼ同等であった。このことは掃除機がけによりすべての粒径のハウスダストがほぼ均等に除去されていることを示唆する。粒径ごとの化学的性状解析は放射能測定の実施するため、現在進行中である。
5. エアサンプラーを図1で*印で示したID_O_7(令和4年4月開始、現在も継続)、ID_O_11及び12(令和4年4月から令和5年2月まで)、ID_O_6(令和5年2月開始、現在も継続中)に設置した。屋内の気中粒子濃度(g/m³)は、屋外の気中粒子濃度と相関がみられたが、屋内の方が低かった。一方、気中Cs-137濃度(Bq/m³)は、屋内外で相関は見られず、屋内外で同等もしくは屋内の方が高い傾向がみられた。気中粒子の粒径分布は、2.1-3.5・3.5-5.2 μmと0.30-0.49・0.49-0.69μm辺りにピークを持つ二峰性の粒径分布であり、既存の研究結果と同様の結果だった。一方、気中Cs-137濃度は、0.49-0.69μmにピークを持つ単峰性の粒径分布を示していた。大気エアロゾルの粗大粒子(1 μm以上の粒子)は、海塩粒子や土壌粒子とされており³⁾、大気中で見られるCs-137粒子の起源は土壌や海塩では

ないことが示唆される。

6. 換気回数は、前回事業での調査（2016–2019）（ 0.40 ± 0.35 /h; 0.02 – 1.8 /h）と同等であった。一方、隙間相当面積（C 値）は、最近建てられた一般住家と比較して大きめであった。調査住家に比較的古い住家が多いこと、東日本大震災時に隙間ができた後に修復されていないことが原因と考えられる。

7. スミア法により Cs-137 の表面汚染密度を評価した。住家ごとの表面汚染密度の値の大きさの順は上述 2. で得た床面積当たりのハウスダスト(<2 mm)中 Cs-137 濃度の値の大きさの順と同じであった。

（ID_O_10 の値が一番大きく、ID_O_7, ID_O_11, ID_O_13 が低い。）双方とも面積当たりの汚染を反映していると考えられる。調査住家のうち 6 戸では、掃除機がけを開始した 1-2 年前にスミア法による評価を行っており、今回の値と比較した。4 戸では中央値は最大 50%まで減少していた（物理減衰は最大で 4.7%）が、1 戸では変化はなく、2 戸では約 10%増加していた。増加した 2 戸の住家（図 1 の ID_O_6 と ID_O_10）ではハウスダスト量が増える回もあったことから、ヒトの生活活動あるいは動物によるあらたな Cs-137 の住家内への持ち込みの可能性が示唆される。

8. 除染前の屋外・屋内の γ 線スペクトルを用いてアンフォールディング手法による直達線/散乱線の分別評価を検討した結果、この手法により分別が可能であり、屋外に比べ屋内の方が人工核種の散乱線が多い傾向が確認できた。また、線量率が高くなるにつれて人工核種の散乱線比率は低下する傾向があるが、セメン瓦の住家では線量率が低い場合でも屋内の散乱線比率が低下することがわかった。以上の成果に基づいた今後の研究方針を以下に述べる。

引き続き定期的な掃除機がけを実施し、粒径別に分離・秤量しハウスダスト中の Cs-137 を HPGe で測定・定量評価する。これにより、上記 1.～ 4.までの項目について掃除機がけごとの経時変化のより長期の傾向を調べるとともに、様々な要因との関連性について着目して検討を行う。5. の項目についても引き続き、エアサンプラーによるサンプリングを継続して行い、屋外・屋内の気中粒子濃度及び気中 Cs-137 濃度についてより長期の傾向を調べる。6.の項目については令和 4 年度は春と冬に測定を行ったので、令和 5 年度では夏と秋に測定を実施して季節による変動の有無を調べる。7.のスミア法による Cs-137 の表面汚染密度の評価は令和 5 年度後半に再度実施し、さまざまな要因との関連性について着目して検討を行う。8.の項目について、さらに多くの計測例で分別評価を行いどの程度の精度で分別が可能であるか検討を進める。

V 結論

令和 4 年度の調査結果から、定期的な掃除機がけにより住家内から除去される床面積当たりのハウスダストの量及び Cs-137 濃度は掃除機をかけるたびに減少する傾向がいずれの住家でも観察された。200 日を超えたあたりで減少傾向は小さくなっており、引き続き掃除機がけを行うことにより長期での傾向の変化を調べる必要がある。スミア法による Cs-137 の表面汚染密度の調査を行うことで残留している Cs-137 の評価も行い、掃除機がけにより除去されたハウスダストに付着した Cs-137 だけでなく残留放射能の双方の観点から検討を行う。掃除機がけによる効果は、ヒトの生活活動や動物による持ち込み、換気回数や隙間などさまざまな要因との関連性を考慮しながら検討を進めることが重要である。

引用文献

1. Yoshida-Ohuchi, H, Shinohara, N. Estimated internal exposure doses due to indoor radiocaesium contamination in residential houses after the Fukushima nuclear accident. *Sci. Rep.* 2020; 10: 17212.
2. Shinohara, N, Yoshida-Ohuchi, H. Radiocesium contamination in house dust within evacuation areas close to the Fukushima Daiichi nuclear power plant. *Environment International* 2018; 114: 107-114.
3. 浮遊粒子状物質対策検討会編（環境庁大気保全局大気規制課監修）：浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル, 1997; 17-18, 273, 東洋館出版社.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度研究報告書

研究課題名	原子力事故後の居住環境における室内外の物質移行を考慮した住民の被ばく線量評価に関する研究
令和4年度研究期間	令和4年4月1日～令和5年2月28日
研究期間	令和4年度 ～ 令和6年度（1年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	高原 省五	日本原子力研究開発機構 安全研究センター 原子炉安全研究ディビジョン リスク評価・防災研究グループ・グループリーダー
分担研究者		
若手研究者		

キーワード	原子力事故、住民被ばく線量、再浮遊、屋内退避、被ばく低減効果
-------	--------------------------------

本年度研究成果
<p>I 研究背景</p> <p>家屋の内外を含む居住環境における放射線被ばくは、原子力事故後の初期から長期間にわたって汚染地域での住民生活を管理するために必要不可欠な情報の一つである。特に、福島事故の経験を経て、原子力防災分野においては、事故後初期に自宅への屋内退避が防災計画の主軸の一つとして位置付けられている。また、福島事故後に避難指示を受けた地域についても、避難指示の解除が進み帰還した住民の日常生活が開始されようとしている。このような社会的な背景を踏まえると、事故後初期において屋内退避をした場合にどのくらいの被ばくが想定されるのか（または、どのくらいの被ばく低減効果が見込まれるか）ということと、帰還後の生活においてどのくらいの被ばくが想定されるのかという情報は、原子力防災計画や帰還後の住民に対する放射線防護対策を策定する国・自治体や住民にとって重要な情報である。</p> <p>II 目的</p> <p>本研究では、上記のような研究背景のもとで、①事故後の初期における屋内退避時における住民被ばく線量の評価と、②事故後の長期における帰還後の居住環境での被ばく線量評価を実施することを目的とする。</p> <p>III 研究方法</p> <p>上記の目的に記載した目的を達成するためには、再浮遊に係る現象論的モデルの開発に加え、地域や季節による社会条件や気象条件の変動を考慮した確率論的な影響評価を実施する必要がある。これらの方法を実現するため、初年度となる、令和4年度は、令和4年度は、目的①に関連して、1) 各サ</p>

イトの地域性・季節性及び社会状況に関するデータの整備を実施する。また、目的②に関連して、1) 室外再浮遊モデルの評価への組み込みと、2) 室内再浮遊モデルに関する解析及び実験の設計を実施する。なお、確率論的事故影響評価は、既に原子力機構が開発した確率論的事故影響評価コード OSCAAR (Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Release in Reactor Accident) ¹⁾ を用いて実施する。OSCAAR は、国際比較計算への参加等する等して移行モデルに関する検証等を行い、適用性能の確認や機能の検証が行われてきたコードである ²⁾。なお、本事業の成果発表会において、OSCAAR で同心円メッシュを利用することの妥当性について、委員から指摘を受けた。この点について、過去に OSCAAR と直交格子メッシュを採用している他のコードの結果を比較した経験があり、これによると両者において距離別の被ばく線量の統計値に大きな違いは見られておらず、メッシュの違いによる解析の結果への影響はないことが確認されているところである ³⁾。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

研究方法①-1) の作業では、OSCAAR での解析を実施するため、国内の原子力発電所を有する全サイトに対して、気象と建蔽率のデータを整備した。気象データとして、気象庁が提供している数値予報モデルを利用して算出された Grid Point Value (GPV) ⁴⁾ をもとに、風速、風向及び降雨量を整備した。また、建蔽率は、2分の1地域メッシュ全体の面積を、同メッシュに含まれる建物面積で除して算出した。2分の1地域メッシュ全体の面積は統計局の市区町村メッシュ・コード一覧 ⁵⁾ をもとに算出した。また、建物面積は、国土地理院ベクトルタイル ⁶⁾ を用いて算出した。これにより、各サイトで確率論的事故影響評価及び再浮遊解析を実施するために必要な情報の整備を完了した。

研究方法②-1) の作業では、地表面からの再浮遊を「再浮遊係数」を用いてモデル化することとした。再浮遊係数は、沈着が発生した時点での表面濃度と評価対象時点での空气中濃度の比で定義され、複数の先行研究 ^{7) 8) 9)} が知られている。しかし、これらの研究は国外での研究に限定されており、福島事故後の沈着状況かつ我が国の環境状況に適した再浮遊係数を見出すための研究開発が求められていた。そこで、本研究では、福島事故の影響を踏まえて開発された再浮遊係数を利用した解析を実施することにした。再浮遊は沈着後の経過時間により異なる現象で生ずると考えられることから、事故後の早期と長期に分けて再浮遊係数を評価することにした。早期及び長期のそれぞれについて、早期成分は福島事故後の実測に基づくモデル ¹⁰⁾ を採用し、後期成分には JAEA が作成した室外再浮遊モデル ¹¹⁾ を利用した。なお、高原 ¹⁰⁾ によれば、事故後の早期 (1か月程度) にて再浮遊核種の吸入による被ばく線量は全体の約数%程度を占めており、無視できない経路であることが示されている。

研究方法②-2) の作業では、室内での再浮遊モデルを開発するにあたり、第一に、令和5年度以降の実験の設計及び CFD 解析における室内の再浮遊粒子性状を決めるための調査 ^{12) ~23)} を行った。この結果、文献値と整合性があり、吸入被ばくへの寄与の大きな粒径で、かつ、バックグラウンドの影響が小さいとの観点から、粒径 $1\mu\text{m}$ ~ $250\mu\text{m}$ の TiO_2 と標準粉体を利用することにした。また、第二に、実験装置の開発を行うため、既存装置に対する改良点の抽出を行った。今回の実験では、粒子の浮遊に関して、粒子の浮遊初速度と高さ毎の粒径分布を測定する必要がある。また、実験の際の室内条件 (室内表面材、気流の外乱源) についても令和5年度以降の実験条件を検討しておく必要がある。これらに関して、令和4年度の実験では、パーティクルサイザーと PIV 装置での予備的な測定を行う実験系を構築し、ダストの分布や初速度を実験的に評価可能であることを確認するとともに、効率化等に関する課題を抽出した。この結果、次年度以降の実験系の改良点として、(i) 既存の模擬装置について、サンプル交換効率的に行える機工、上面と側面を可能な限り平滑にする、レーザーの反射を抑

えるため、黒色に塗装する。さらに、使用する機器を精度よく設置できる機工を設ける、(ii) 表層の粒子を観測するための専用チャンバーを作成する、(iii) PIV システムを連続照射可能なレーザーと超高速カメラの組み合わせに変更することが見いだされた。

V 結論

令和4年度の作業は、滞りなく予定通り完遂した。これにより、各サイトで確率論的事故影響評価及び再浮遊解析を実施するために必要な情報の整備と再浮遊モデルのOSCAARへの実装を完了するとともに、室内環境での再浮遊モデル開発のための実験装置の整備を完了することができた。

引用文献

1. JAEA, OSCAAR コードパッケージの使用マニュアル, JAEA-Testing 2020-001; 65 Pages.
2. 本間俊充, レベル 3PSA の現状, 第 3 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループ, 資料 3. (https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/genshiryoku_jishuteki/pdf/003_03_00.pdf (最終閲覧日 2023 年 5 月 23 日))
3. 日本原子力研究開発機構, 令和 2 度原子力規制庁委託成果報告書「原子力施設等防災対策等委託費(被ばく解析手法の整備)に関する研究」(<https://www.nra.go.jp/data/000359619.pdf> (最終閲覧日 2023 年 5 月 23 日))
4. 気象業務支援センター, オンライン気象情報. (<http://www.jmbasc.or.jp/jp/online/online.html> (最終閲覧日 2023 年 4 月 21 日))
5. 総務省統計局, 市区町村メッシュ・コード一覧. (https://www.stat.go.jp/data/mesh/m_itiran.html (最終閲覧日 2023 年 4 月 21 日))
6. 国土交通省国土地理院, ベクトルタイルとその提供実験について. (<http://maps.gsi.go.jp/development/vt.html> (最終閲覧日 2023 年 4 月 21 日))
7. L.R. Anspaugh, J.H. Shinn, P.L. Phelps, et al., Resuspension and Redistribution of Plutonium in Soils. *Health Phys.* 1975; 29; 571–582.
8. K.R. Lassey, The possible importance of short-term exposure to resuspended radionuclides. *Health Phys.* 1980; 38; 749–761.
9. Wicker, J.J., Breshears, D.D., McNaughton, M. et al., Radionuclide resuspension across ecosystems and environmental disturbances. *J. Environ. Radioact.*, 2021; 233; 106586.
10. 高原 省五, 原子力発電所事故後の汚染地域における住民の被ばく線量評価と管理に関する研究. 京都大学, 2016, 博士論文.
11. M. Ota, S. Takahara, K. Yoshimura et al., Soil dust and bioaerosols as potential sources for resuspended ^{137}Cs occurring near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, *J Environ Radioact* (Accepted)
12. T. L. Thatcher and D. W. Layton, Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence, *Atmos Environ*, 1995; 29; 1487-1497.
13. R. D. Edwards, E. J. Yurkow, and P. J. Liroy, Seasonal deposition of housedusts onto household surfaces, *Sci Total Environ*. 1998; 224; 69-80.
14. C. M. Long, H. H. Suh, and P. Koutrakis, Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors, *J Air Waste Manage Assoc*, 2000; 50; 1236–1250.
15. C. He, L. Morawska, J. Hitchins, and D. Gilbert, Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses, *Atmos Environ*, 2004; 38; 3405–3415.
16. R. J. Kopperud, A. R. Ferro, and L. M. Hildemann, Outdoor versus indoor contributions to indoor particulate matter (PM) determined by mass balance methods, *J Air Waste Manage Assoc*, 2004; 54; 1188–1196.
17. J. Qian and A. R. Ferro, Resuspension of dust particles in a chamber and associated environmental factors, *Aerosol Sci Tech*, 2008; 42; 566–578.
18. J. Qian, A. R. Ferro, and K. R. Fowler, Estimating the resuspension rate and residence time of indoor particles, *J Air Waste Manage Assoc*, 2008; 58; 502–516.

19. Y. Kubota and H. Higuchi, Aerodynamic particle resuspension due to human foot and model foot motions,” *Aerosol Sci Tech*, 2013; 47; 208–217.
20. A. Benabed and K. Limam, Resuspension of Indoor Particles Due to Human Foot Motion, in *Energy Procedia*, 2017; 139; 242–247.
21. C. Lanzerstorfer, Variations in the composition of house dust by particle size,” *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, 2017; 52; 770–777.
22. N. Shinohara and H. Yoshida-Ohuchi, Radiocesium contamination in house dust within evacuation areas close to the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Environ Int*, 2018; 114; 107–114.
23. L. Li, Y. Oiu, A. Gustafsson et al., Characterization of residential household dust from Shanghai by particle size and analysis of organophosphorus flame retardants and metals, *Environ Sci Eur*, 2019; 31; 94.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度研究報告書

研究課題名	乳歯を用いた福島県在住小児の被ばく線量評価事業
令和4年度研究期間	令和4年4月1日～令和5年2月28日
研究期間	令和4年度 ～ 令和5年度（1年間）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	佐々木 啓一	東北大学歯学研究科・教授 東北大学 理事・副学長
分担研究者		
研究者		

キーワード	福島第一原発事故、乳歯、内部被ばく、イメージングプレート、 ⁹⁰ Sr、 ¹³⁷ Cs
-------	---

本年度研究成果
<p>I 研究背景</p> <p>東京電力福島第一原子力発電所事故（原発事故）による環境汚染がヒトや動物にどのような影響を与えるかについて様々な領域で研究がすすめられており、小児の甲状腺がんを始め、各種疾患の発症リスク上昇の有無について高い関心が払われている。また、被災動物の研究においても、染色体異常、生殖機能への影響など、精力的に研究が進められている。一方、放射線の生物影響についての研究を進める上での問題点の一つとして、個体単位で正確な被ばく量を把握する手段が限られている点あげられる。特に過去にまで遡って被ばく量を知ることは難しく、地域の空間線量率や行動シミュレーションからの推定も誤差が大きい。本研究班では、歯がその形成期に⁹⁰Srや¹³⁷Csなどの放射性物質を歯質中に取り込み、それらは代謝されることなく歯質中に保持される¹⁻⁴⁾ことに着目し、歯質の放射線量や放射性物質量の測定から、これらを個体の内部被ばく状況を把握する試みである。</p> <p>II 目的</p> <p>本研究の目的は、原発事故被災地およびその周辺地域に居住する小児を中心に、永久歯列への交換過程で自然脱落する乳歯を、福島県を中心に全国から収集し、それらの乳歯に蓄積した放射性物質量を評価することにより、歯を用いて個体の内部被ばく状況を個体レベルで推定し、今回の福島第一原子力発電所事故による放射線の人体への影響を評価するための基礎資料を得ることにある。また、その結果を市民に還元し、原発事故に関係する市民の健康管理に資することを目的としている。</p> <p>III 研究方法</p> <p>令和4年度中に福島県在住小児を中心に全国から凡そ500本の乳歯を収集し、令和1年度から令和3年度までに収集した1,800本を併せ、合計2,300本の乳歯を研究対象として用いた。乳歯の収集か</p>

ら結果の開示に至るまでの一連の過程については、東北大学、奥羽大学、福島県歯科医師会における各倫理委員会の承認のもとに行った。収集した乳歯は、東北大学歯学研究科においてバンク化した³⁾。これら乳歯を、歯の形成が始まる年齢と原発事故時の小児の年齢を基準とし、原発事故前に形成された歯、歯質の一部が原発事故後に形成された歯、歯質のすべてが原発事故後に形成された歯の3群に分け、それら乳歯中の放射線量を、イメージングプレート (IP) を用いて QL 値として測定した³⁾。それらの測定結果について、原発事故後に形成された乳歯中の放射能値が、原発事故以前に形成された乳歯に比べ高くなっているか否かについて検討した。一方、原発事故以後に形成された乳歯中の QL 値に上昇がみられた場合、その原因として、⁹⁰Sr や ¹³⁷Cs の上昇が考えられる。しかし、QL 値の上昇が、どちらの同位元素に起因しているかを通常の IP 技術では判断することはできない。また、⁹⁰Sr、¹³⁷Cs のどちらの化学測定法においても、歯一本のサンプル量 (0.2-0.5g) の少なさや、測定限界値の問題から、歯ごとに、それらの値を知ることは困難である。特に ⁹⁰Sr の測定の場合、測定の過程において、歯を破壊・溶解する必要があり^{1, 2)}、オートラジオグラフィー等、以後の検索を行うことができなくなる。そこで、本研究では、IP を用いて乳歯中に含まれる放射性核種を推定するため、放射線輸送コード PHITS を用いて、歯質中に含まれる放射性核種である ⁹⁰Sr、¹³⁷Cs、および歯質中の代表的な自然放射性核種である ⁴⁰K から放射される β 線と γ 線について、IP の sensitive layer (SL) の吸収線量率、SL を通過した電子または光子の流束、及び流束のエネルギー分布を計算することにより、それぞれの核種が、QL 値の発生にどのように寄与するかについて基礎的な検討を行った⁵⁾。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

事故前に形成された歯、歯質の一部が事故後に形成された歯、歯質のすべてが事故後に形成された歯の3群の QL 値の間には、統計的に有意な差は認められなかった。また、事故後に形成された歯について、福島県と他県(沖縄県、静岡県、北海道、新潟県)からの収集歯の QL 値を比較した場合にも、両者に有意な差は認められなかった。これらの結果は、今回の原発事故により、福島県在住小児は、問題となるような内部被ばくは受けていないことを示唆している。今後、さらに乳歯の収集と、放射線量の測定を継続することが必要であるが、現時点での結果を見る限り、本研究で得られた結果は、放射線被ばくによる健康不安を懸念している福島県在住小児への安心材料の提供になると思われる。また、本研究で得られる成果は、福島県民健康調査で得られた内部被ばく調査(「ホールボディカウントによる内部被ばく検査」、「甲状腺検査」など)で得られている結果を補完する重要な研究成果にもなり得る。さらに、IAEA, UNSCEAR, ICRP などの報告書への掲載も可能と考えられる。

本研究では、IP を用いて歯質中に含まれる乳歯中に含まれる放射性核種を推定するため、放射線輸送コード PHITS を用いた検索を行った。その結果、IP の SL の吸収線量は、β 線の寄与が大部分を占めること、核種により線量に大きな違いがある事、SL を通過する電子と光子の変化が、線源に含まれる核種により大きく異なること等が明らかとなった。このことから、乳歯試料と IP の間に厚みが異なる遮蔽版を挟むことに依って、乳歯中に含まれる放射性核種を推定することが可能であることが示唆された⁵⁾。

V 結論

測定対象として、2018年4月以降、2022年末までに収集した乳歯、凡そ2,300本を用いた。これら乳歯を、原発事故前に形成された乳歯、歯質の一部が原発事故後に形成された乳歯、歯質のすべ

てが原発事故以降に形成された乳歯の3群に分け、それら乳歯中の放射線量を比較した。その結果、現在のところ、3群の間には、統計的に有意の差は認められなかった。また、事故後に形成された乳歯のQL値は、福島県と他県の間には差は認められなかった。歯質中の放射性物質の量は、歯の形成期に体内に取り込まれた放射性物質の量に比例することから、福島県在住小児は、今回の原発事故により、問題となるような内部被ばくは受けていないことが示唆された。本研究は、福島県内の地域を基盤とした放射線被ばくに関する疫学調査であり、その成果は、安心材料の提供、県民健康調査との連携など、地域に密着した総合的な災害リスク管理の策定と実施の基礎資料として有用と考えられる。

本研究において採用しているIPによる線量測定は、ダイナミックレンジが極めて広く、微量の放射性物質を含む多数のサンプルを同時にスクリーニングすることが可能である³⁾。また、放射線輸送コードPHITSの併用、遮蔽板の導入などにより、乳歯中の放射性核種をIPから推測できる可能性が示された⁵⁾。

本研究は、歯が持つ非代謝性、記録性に着目し、この特性を積極的に活用することにより、歯から個人の被ばく状況を、過去にまで遡って得ようとする新しい試みである。ヒトにおいて、内部被ばく状況を知る手段は限られており、シミュレーションによる推定が用いられることが多い。この点、歯からは物理的な数値を得る事が可能である。また、本研究で用いている、歯から被ばく量を推定するという考え方は、被ばく量の推定が困難な被災動物に対しても応用が可能であり、放射線の生物影響に関する研究分野への新たな貢献になると考えられる。

引用文献

1. Koarai K, Kino Y, Takahashi A, 他. ^{90}Sr in teeth of cattle abandoned in evacuation zone: Record of pollution from the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant accident, *Sci. Rep.*, 2016; 6:24077
2. Koarai K, Kino Y, Takahashi A, 他. ^{90}Sr specific activity of teeth of abandoned cattle after the Fukushima accident -teeth as an indicator of environmental pollution, 2018; *J. Environ. Radioact.*, 2018; 183:1-6
3. Takahashi A, Chiba M, Tanahara A, 他. Radioactivity and radionuclides in deciduous teeth formed before the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant accident, *Sci. Rep.*, 2021; 11:10355.
4. 篠田 壽. 歯から内部被ばくを知る, 放射線読本 (福本 学編著、三輪書店、東京、2023) pp.243-247
5. 尾田晃平、光安優典、山下琢磨、他. イメージングプレートを用いた試料中放射性核種推定法の開発, *KEK Proceedings*, 2023; accepted.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度研究報告書

研究課題名	複数の生物学的指標を組み合わせた長期放射線影響の予測と社会実装に向けた取り組み
令和4年度研究期間	令和4年4月1日～令和5年2月28日
研究期間	令和3年度 ～ 令和5年度 (2年目)

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	盛武敬	量子科学技術研究開発機構・部長
分担研究者	中村麻子	茨城大学・教授
若手研究者		

キーワード	放射線、レドックス、ミトコンドリア、DNA、晩期障害、バイオドシメトリ
-------	-------------------------------------

本年度研究成果
<p>I 研究背景¹⁾</p> <p>原子力災害等に起因する予期せぬ放射線被ばくでは、多数の放射線業務従事者や周辺市民が被ばくし、生命や健康が脅かされる恐れがある。放射線災害発生後の初期対応において、対象者の被ばく線量を推定することは緊急被ばく医療の優先度の決定および選別のために非常に重要であると同時に、災害発生数年～数十年後に発生しうるがん、白内障、心疾患などの晩期障害発症リスクを見積もる上でも重要である。一方で、被ばく線量から推定できるのは晩期障害発症リスクであって、将来的にその疾患の発症に繋がるバイオインディケーターや初期症状はほとんど同定されていない。</p> <p>酸化ストレスは様々な病気との関連が指摘されており、放射線においても照射された細胞でミトコンドリアからの活性酸素が増加し、細胞死や細胞老化の一因となっていることが報告されている²⁻⁴⁾。また、慢性的に放射線被ばくを受ける医療従事者、福島第一原発事故で被災した牛、チョルノービリ原発付近の高線量地域に生息する松の木に関する調査でも、酸化ストレス関連指標が増加しているとの報告がある⁵⁻⁷⁾。興味深いことに、多くの放射線晩期障害(例えば、がん、白内障、高血圧、慢性炎症、動脈硬化など)は、酸化ストレスの亢進によっても引き起こされる⁸⁾。これらのことから、放射線晩期障害の発症は被ばくによる酸化ストレスの増加によって仲介されている可能性があると考えられており、我々は、放射線被ばくという物理現象と生物影響とをつなぐ鍵として、酸化ストレス(関連指標)に着目している。</p> <p>II 目的 (①⑤⑥を盛武が担当、③④を中村が担当、②を志村(研究協力者)が担当)</p> <p>① 昨年度までに、ミトコンドリア損傷(Parkin)、抗酸化指標(Nrf2)、全血抗酸化能(i-STrap)がバイオドシメトリ指標として有用であり、さらにこの3指標とDNA損傷(γH2AX)を組み合わせることで(4指標の組み合わせで)、被ばく線量をレトロスペクティブに推定できる(急性被ばく、被ばく後1～7日間)ことを、明らかにした。今年度および来年度は、慢性被ばくでの推定精度の確認を行う。</p>

- ② 上述の通り、被ばく後にミトコンドリアの代謝異常が見られることから、ミトコンドリア解析を通して、さらに新規のバイオドシメトリ指標を探索する。
- ③ テロメア長変化が新規のバイオドシメトリ指標となりうるか解析する。
- ④ 迅速に DNA 損傷(γ H2AX)を評価する PDMS チップを開発する。
- ⑤ 抗酸化能関連指標が晩期障害(白内障)のバイオインディケーターとなりうるか解析する。
- ⑥ 福島野生ニホンザルの抗酸化能を解析する。

III 研究方法

- ① 量子技術研究開発機構(量研)でガンマ線の連続照射(0.105mGy/min \times 476 時間=20 日間で 3Gy、または 0.21mGy/min \times 238 時間照射=10 日間で 3Gy)照射し、照射終了後 24、48、72、168 時間後に採血した。全血 100 μ L を i-STrap に供して、残りの血液からリンパ球を抽出し、茨城大と保健医療科学院へ送付し、茨城大が γ H2AX、保健医療科学院が Parkin と Nrf2 の評価を行った。
- ② 新たな生物学的指標としてミトコンドリアタンパク質 Tom20 とエネルギーセンサーである AMP 活性化プロテインキナーゼ(AMPK)の活性化を検討した。
- ③ ヒト初代培養細胞に 0.5、2Gy 照射後、1 日～4 週間の経時的なテロメア長変化を測定した。
- ④ 放射線照射した血液サンプルに対して、照射線量を秘匿化したのち、開発した PDMS チップを用いて γ H2AX レベルの検出および線量推定を行った。
- ⑤ 量研のガンマセルを用いて、放射線白内障へのなりやすさが異なる複数系統のマウスに 5Gy を急性照射(0.5Gy/min)後、経時的(50 日後 100 日後・・・)に採血し、抗酸化能を測定している。照射後 300 日と 600 日にはマウスを安楽死させて、水晶体の状況を観察する予定である。また、上記①で使用したマウスの水晶体を回収し、抗酸化能を解析している。
- ⑥ 福島の提携自治体で処分されたニホンザルから血液を採取し、抗酸化能の解析を行っている。

IV 研究結果、考察および今後の研究方針

- ① i-STrap で総線量を 3Gy とした場合、0.21mGy/min (10 日間照射)以上の線量率で有意な抗酸化能低下が認められたが、0.105mGy/min (20 日間照射)では有意な抗酸化能の変化が認められなかった。Parkin、Nrf2、Tom20 では、0.21mGy/min の 10 日間照射で照射 1～3 日後に増加傾向が見られたが、個々の指標で有意差を観察できなかった。 γ H2AX は解析中である。
- ② AMPK の活性化は 3 Gy の照射 1 日後に観察された。TOM20 の発現量は 3 Gy の照射 1 日後に増加し、照射 2 日後には減少した。
- ③ 0.5Gy 以上の被ばくによるテロメア長短縮が検出されたことに加え、その短縮レベルは被ばく後 4 週間にわたり、同レベルで継続して検出された。
- ④ PDMS チップでは 1Gy 以上の推定被ばく線量評価が可能であることが示された。
- ⑤ 本申請書作成時点で照射後 200 日を経過しており、経過観察中である。被ばく後の抗酸化能の変化パターンはマウスの系統によって異なる傾向が見られた。
- ⑥ これまでに合計 67 匹分のサンプルを収集した。

V 結論

繰り返し実験によりデータを積み上げている最中であるため、現時点で何かを結論づけるのは困難であるが、テロメア長が長期安定な被ばくのマーカーとして有望であると考えられる。マウスの系統

によって被ばく後の抗酸化能の変化パターンが異なることは、ヒト集団(性別・年齢・人種など)においても変化パターンが異なる可能性があり、今後放射線治療患者を対象とした臨床試験によりヒトでの変化パターンを明らかにする必要がある。PDMS チップも同様に、ヒトサンプルによりその有用性を明らかにする必要がある。来年度は本研究計画の最終年であるため、データを取りまとめ、結論づけをして行く予定である。

(倫理審査等)

本研究にかかるマウス実験は量子科学技術研究開発機構動物実験委員会の承認を得ている(承認番号：21-1017)。なお、野生ニホンザル試料に関しては、自治体によって駆除されたサルから入手しているため、動物実験に該当しない。

引用文献

1. 盛武敬、中村麻子、複数の生物学的指標を組み合わせた長期放射線影響の予測と社会実装に向けた取り組み、令和3年放射線健康管理・健康不安対策事業（放射線の健康影響に係る研究調査事業）報告書、2022, 187-222. <https://www.env.go.jp/content/000120095.pdf>
2. Kobashigawa S, Kashino G, Suzuki K et al., Ionizing radiation-induced cell death is partly caused by increase of mitochondrial reactive oxygen species in normal human fibroblast cells. *Radiat Res*, 2015; 183: 455-464.
3. Ogura A, Oowada S, Kon Y et al. Redox regulation in radiation-induced cytochrome c release from mitochondria of human lung carcinoma A549 cells. *Cancer Lett*, 2009; 277: 64-71.
4. Tominaga H, Kodama S, Matsuda N et al., Involvement of reactive oxygen species (ROS) in the induction of genetic instability by radiation. *J Radiat Res*, 2004; 45: 181-188.
5. Volkova P Y, Geras'kin SA and Kazakova EA, Radiation exposure in the remote period after the Chernobyl accident caused oxidative stress and genetic effects in Scots pine populations. *Sci Rep*, 2017; 7: 43009.
6. Urushihara Y, Kawasumi K, Endo S et al., Analysis of plasma protein concentrations and enzyme activities in cattle within the ex-evacuation zone of the Fukushima Daiichi nuclear plant accident. *PloS one*, 2016; 11: e0155069.
7. Malekirad AA, Ranjbar A, Rahzani K et al., Oxidative stress in radiology staff. *Environ Toxicol Pharmacol*, 2005; 20: 215-218.
8. Sun L, Ynaba Y, Sogo Y et al., Total body irradiation causes a chronic decrease in antioxidant levels. *Sci Rep*. 2021; 11, 6716.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度研究報告書

研究課題名	FISH 解析法による低線量被ばく評価に向けた基盤構築
令和4年度研究期間	令和4年4月1日～令和5年2月28日
研究期間	令和4年度～令和6年度（1年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	数藤 由美子	量子科学技術研究開発機構・グループリーダー
分担研究者		
若手研究者		

キーワード	低線量被ばく、FISH 法、人工知能、画像解析、染色体
-------	-----------------------------

本年度研究成果
<p>I 研究背景</p> <p>交換型染色体異常は放射線被ばく後の線量評価や長期フォローアップ調査研究に利用可能である。低線量被ばく影響研究のためには課題が2つある。</p> <p>1) 健常人バックグラウンドデータは不十分である。従来の調査は観察数・基準がまちまちで、また、検査者の熟練度により画像判定基準が変動する（再現性の問題）。</p> <p>2) FISH 画像による染色体異常判定は未だ自動化されていない。低線量被ばく調査で必要な観察細胞数は1検体当たり5000個以上であり、人工知能技術による支援が有望である。</p> <p>II 目的</p> <p>本研究では、ヒト1、2、4番染色体ペインティングプローブによるFISH解析法を用い、低線量被ばく評価に向けた基盤構築を行う。より具体的には、</p> <p>1) 健常人の染色体異常頻度バックグラウンド値の高精度レファレンスデータを作成する。</p> <p>2) 深層学習法を用いて交換型染色体異常のFISH画像自動判別技術を開発し判別の標準化・迅速化を達成する。</p> <p>令和4年度（1年目）においては、</p> <p>1) 健常人ボランティア1名につき、データ取得・作成する。</p> <p>2) 自動判別のためのモデルのプロトタイプを作成する。</p> <p>III 研究方法</p> <p>本研究において、健常人末梢血はインフォームドコンセントが得られたボランティアから採取し、プロトコルに従って使用している（プロトコル18-023：量子科学技術研究開発機構、令和3年8月14日承認）。</p>

1) 調査研究1：染色体異常バックグラウンドレファレンスデータ作成

健康人ボランティア1名（30歳、男性）の末梢血試料よりリンパ球細胞48時間培養を行って染色体標本を作製し、ヒト1,2,4番染色体ペインティングプローブ（Zeiss/Metasystems社）を用いた3色FISH^{1,2)}を行った。自動画像スキャニング顕微鏡システムMetafer4（Zeiss/Metasystems社）を用いて画像データを取得し、ソフトウェアMetaClient・ISIS（Zeiss/Metasystems社）を用いて熟練観察者による目視観察を行い、染色体異常解析を行った。

2) 調査研究2：人工知能技術による染色体画像自動判別技術開発

健康人ボランティア1名（48歳、女性）の末梢血試料由来の⁶⁰Co-ガンマ線2.0Gy照射標本（線量率0.5Gy/min）を用いた3色FISH^{1,2)}により、1)と同様に画像データを取得した。一部の画像につき熟練観察者によりアノテーションを行った。人工知能技術（深層学習法等）を基盤とし、原子力規制庁令和3年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費「染色体線量評価のためのAI自動画像判定アルゴリズム（基本モデル）の開発」（研究代表者 数藤由美子）³⁾において開発したQSTモデルをもとに、自動染色体画像判別モデルのプロトタイプを作成した。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

1) 25,594個のメタフェーズの染色体異常解析を行ってデータを取得した。転座染色体、二動原体染色体の出現頻度はそれぞれ0.18%、0.06%であった。

研究外部評価委員のコメントにしたがい、本研究2年目、3年目により多くの血液提供ボランティアを募り、データを得ることとした。

2) 教師データ画像505枚（染色体23,006個）を用いて自動判別モデルのプロトタイプを作成し検証した。本プロトタイプモデルでは染色体の自動検出に成功した。染色体異常の自動分類)に関しては改善の余地があるものの良好な傾向がみられた。本プロトタイプにより自動アノテーションが可能となり、令和4年度末までに9,179枚の画像データを追加作成することができた。研究期間残り2年のさらなる画像データ追加・学習・開発で性能を向上させる。

V 結論

1) 調査研究1：染色体異常バックグラウンドレファレンスデータ作成

今後より多くの血液提供ボランティアを募り、レファレンスデータを充実させ、公開していく。

2) 調査研究2：人工知能技術による染色体画像自動判別技術開発

深層学習法を基盤としたアルゴリズムにより、3色FISHによる染色体画像の自動判別が実現可能であることが明らかとなった。今後画像データを増やし、より性能の高いアルゴリズムを開発する。

引用文献

1. 国際標準化機構. ISO 20046, Radiological protection – Performance criteria for laboratories using Fluorescence In Situ Hybridization (FISH) translocation assay for assessment of exposure to ionizing radiation, 2019.
2. Suto Y, Akiyama M, et al., Construction of a cytogenetic dose-response curve for low-dose range gamma-irradiation in human peripheral blood lymphocytes using three-color FISH, *Mutat Res - Genet Toxicol Environ Mutagen* 794: 32-38, 2015
3. 原子力規制庁令和3年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費「染色体線量評価のためのAI自動画像判定アルゴリズム（基本モデル）の開発」（研究代表者 数藤由美子），年度末報告書, 2022.