

令和6年度 放射線の健康影響に係る研究調査事業

テーマ（１） 線量推計に資する研究

- 1-1 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
主任研究者：金 ウンジュ（量子科学技術研究開発機構） 1
- 1-2 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） 5
- 1-3 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） 9
- 1-4 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） 14
- 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） 18

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和6年度年度報告書

研究課題名	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
令和6年度研究期間	令和6年4月1日～令和7年2月28日
研究期間	令和5年度～令和7年度（2年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	金 ウンジュ	量研機構・主幹研究員
分担研究者		
若手研究者		

キーワード	インテリジェンスデータベース(IDB)、 外部被ばく線量、屋内遮へい効果
-------	--------------------------------------

本年度研究成果
I 研究背景 量子科学技術研究開発機構（以下、量研）では、東電福島第一原発事故（以下、福島原発事故）による住民の初期内部被ばく線量の推計を長年にわたり進めてきた。初期内部被ばくで最も重要なのは放射性ヨウ素による甲状腺内部被ばくであるが、主要核種である I-131 を対象とした人の実測データは極めて限られている。このため、事故発生から数カ月後に開始されたセシウムを対象としたホールボディカウンタ（WBC）の測定データ、人の実測データを有する個人の避難行動データ、放射性核種の大気拡散シミュレーションの結果を収集し、これらの情報を活用して線量推計を行ってきた¹⁻⁴⁾。今後は量研だけの研究に留めることなく、福島県立医科大学等の協力機関においても解析を行えるようにすること、及び、福島原発事故で得られた貴重なデータを将来のために管理・保全する環境を整備することが重要である。 II 目的 本研究は、先行研究で福島県住民の初期内部被ばく線量推計のために収集・解析された様々な種類のデータを有機的に統合し、GUI（Graphical User Interface）を介して多角的な解析を行えるインテリジェンスデータベース（IDB）を作成すること、及び、その成果を踏まえ、将来の原子力災害における被災者の健康調査や疫学調査に適したデータベースの管理・活用法を提案することを目的としている。 III 研究方法 WBC 被検者（約 5,000 名）の 3 月 11 日から 7 月 11 日までの行動データ及び福島県住民の外部被ばく線量推計のために作成されたシステムで用いられた空間線量率マップまたは公開済みの大気拡散シミュレーションを用いて外部被ばく線量推計用 IDB を試作した。試作した IDB では、GUI 上で、個人の線量以外、地域別・月別の平均線量分布や、屋内の遮へい効果を考慮した線量低減係数を反映

した外部被ばく線量等を可視化できるように設計した。また、一時帰宅による影響を調べるため、一時帰宅の回数（滞在時間）を指標にした外部被ばく線量推計結果や WBC 測定値（内部被ばく線量）との比較結果を GUI 上に表示できるようにした。

さらに、IDB の運用法の検討については、研究協力者および福島県民健康調査関係者を対象に、IDB 試作版の紹介の上、IDB に関する意見交換を実施した。その際に得られた意見を踏まえ、IDB の運用において懸念事項（個人の避難行動データの取扱いに関する配慮、ユーザビリティを向上させた IDB の画面デザイン、画面表示項目の集約等）を考慮の上、IDB 改良版を作成した。

<倫理面への配慮>

本研究で使用する個人の避難行動データの利用については、量研機構及び福島県立医科大学の両機関における臨床研究審査委員会から承認がえられている。(13-011)

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

WBC 検査被検者（約 5,000 名）の行動データを用いて試作した外部被ばく線量推計用 IDB により、個人の線量推計以外、地域別の集団線量、避難による低減効果等について調べた。その結果、地域別の集団線量では、飯舘村や川俣町の線量は、他地域の線量と比べて高く、これは、避難時期の違いによる起因している。また、WBC 検査被検者の外部被ばく線量をみると全体の 72%が 1mSv 未満、91%が 2mSv 未満であり、殆どの被検者が 3mSv 以下であることが確認された。避難による線量低減効果の検討では、居住地域に居続けたときの線量(避難無し)と避難行動による線量（避難あり）を比較した。その結果、地域によって差はあるものの、75 パーセントイル線量で約半分から 1 桁まで低減してことを確認した。現在、内部被ばく線量と外部被ばく線量の時系列関連性を含んだ解析等を進めている。

図 1 は IDB 改良版の表示画面の一例であり、任意の避難経路に該当する住民の各種線量が画面上のクリック操作で抽出できる。この IDB を活用することで、時系列による避難行動の類型化と線量分布の解析が迅速に行える。これにより、避難行動を有する WBC 検査被検者の線量分布を基に、WBC 検査を受けていない被検者においてもおよそその内部被ばく線量を把握することが可能となった。来年度は個人線量管理用 IDB 改良と利便性について検討しつつ、普及版に向けて意見交換等を引き続き進めていく予定である。

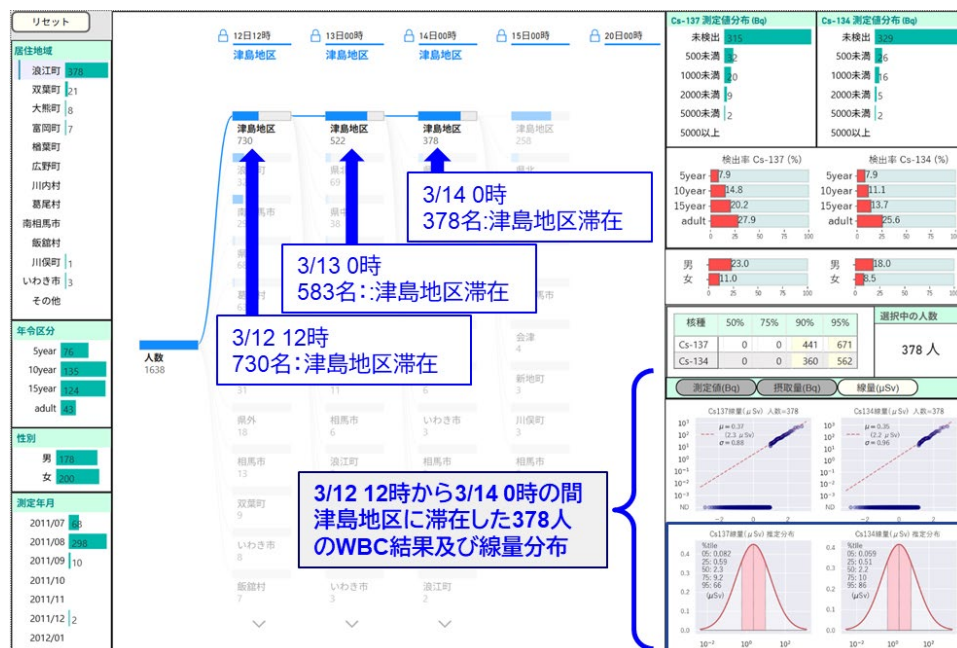


図 1 行動データを有する WBC 検査被検者の内、3 月 12 日 12 時から 3 月 14 日 0 時に津島地域へ移動・滞在していた 378 名の WBC 結果及び線量分布を抽出したもので、類似の行動データを持つ集団の内部被ばく線量分布が予測できる。

V 結論

外部被ばく線量推計用 IDB により、個人及び地域毎の線量情報を GUI 上で容易に抽出、避難行動に伴う線量低減効果（5 割から 9 割低減）等について調べた。また、本研究で作成した IDB の在り方・活用法の提案では、任意の避難行動に該当する集団に対する線量評価用 IDB の作成により、実測値のない集団に対する線量推計への活用可能性について検討した。

引用文献

- 1) Kim E, Kurihara O, Suzuki T. *Screening survey on thyroid exposure for children after the 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. National Institute of Radiological Sciences. Chiba, Japan, July 2012. NIRS-M-252, 59–66 (2012). Available at http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs_m_252.pdf
- 2) Kim E, Kurihara O, Kunishima N. Internal thyroid doses to Fukushima residents —estimation and issues remaining. *J Radiat Res* 57: i118–i126; 2016a.
- 3) Kim E, Kurihara O, Kunishima N. 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* 115(5): 451–464; 2016b.
- 4) Kim E, Yajima K, Shozo Hashimoto. Reassessment of internal thyroid doses to 1,080 children examined in a screening survey after the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys* 118(1): 36–52; 2020.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和6年度年度報告書

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6年度研究期間	令和6年4月1日～令和7年2月28日
研究期間	令和4年度～令和6年度（3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、染色体異常、ベースライン
-------	--------------------------------------

本年度研究成果
I 研究背景 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。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）。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検体当たり目視観察で1000 ゲノム以上¹⁾であり、時間と労力を要する。人工知能（AI）技術による支援が有望である。 II 目的 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、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。また、深層学習法を用いて交換型染色体異常のFISH画像自動判定技術を開発し、判定の標準化・迅速化を達成する。 III 研究方法 血液試料はインフォームドコンセントが得られた被検者から採取されたもので、プロトコルに従って利用した（研究倫理プロトコル番号08-016、17-018、18-023：量子科学技術研究開発機構）。 【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 ■令和6年度は対象を若年層に絞り、健常人ボランティア6名（非喫煙、19～20歳）の末梢血試料を得た。リンパ球48時間培養を行って染色体標本作製し、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。細胞分裂回数の確認のため、ブロモデオキシウリジン添加によるFPG法を応用した²⁾。熟練観察者による目視観察を行い、原則として1検体につき2500メタフェーズ以上¹⁾（最大25595個）の染色体異常解析を行った。一部の末梢血につ

き、 ^{60}Co -ガンマ線照射（線量率 0.4 Gy/min, 1.0 Gy, 2.0 Gy）を行い²⁾、被ばくによる細胞周期遅延の有無を確認した。長期内部被ばく症例 4 名（二酸化トリウムインジェクション約 35 年後に検体採取、約 50 年凍結保存標本）で M-FISH 解析と 3 色 FISH 解析のデータ比較を行った。

■研究期間 3 か年で得た染色体異常および細胞分裂回数のデータから、職業的被ばくの無い健常人における加齢・喫煙効果、職業被ばくとの比較、医療被ばくの線量推定を試みた。

【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

健常人ボランティア 1 名の末梢血試料由来の ^{60}Co -ガンマ線 2.0 Gy 照射標本（線量率 0.5 Gy/min）を用いた 3 色 FISH^{1,2)} により取得した画像データを用い、人工知能技術（深層学習法等）を適用し、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」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⁴⁾を作成した。令和 6 年度は実験的照射血ではなく、実際の被ばく症例の検体（調査研究 1 参照）で性能テストを行った。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

【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

1) 非喫煙・健常人（19～71 歳、15 名）バックグラウンドデータ（図 1）： 当初計画（4 名）を大幅に上回るデータ取得を果たし、今年度統合し分析した。染色体転座に関し、従来の報告^{1), 4)} [年齢補正式 $\text{Translocation Rate}(\text{age}) = 100 \times (\exp(-7.925) + \exp(-9.284) \times (\text{age} \times \exp 0.01062 \times \text{age}))$]（参考図）と異なり、明瞭な加齢効果が見出されなかった。適切的な線量評価や長期フォローアップ調査を行うにあたり、現状では年齢補正をするよりむしろ個体差の最大幅を考慮して安全管理を行うことが現実的であると思われる。今後、より大規模な健常人および計画的職業被ばく者調査についてデータ蓄積が必要である。

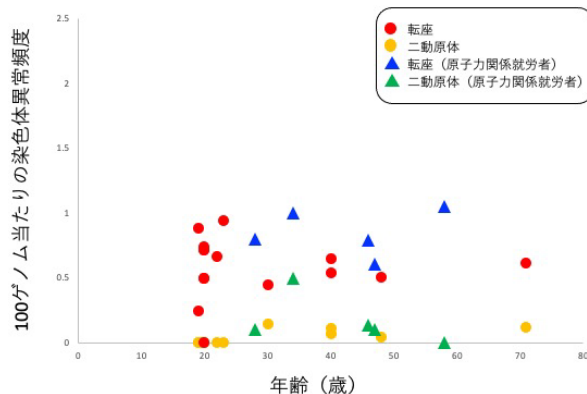
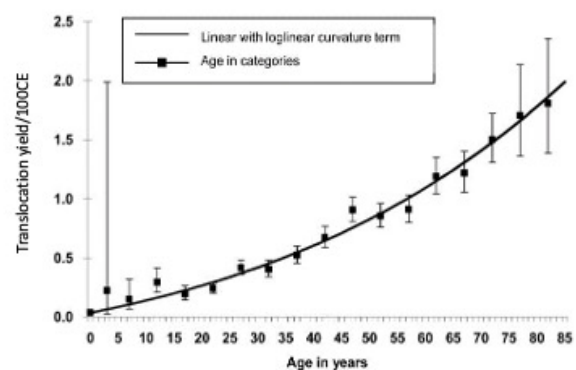


図1. 非喫煙者の年齢と染色体異常頻度の関係



（参考図）年齢と転座頻度の関係⁴⁾

2) 細胞周期： 4 検体の分析により、放射線傷害が少ない 2.0 Gy 以下の被ばく線量では細胞周期の遅延が観察されないことが確認できた。本研究 19～23 歳（10 名）の分析で、若年層では 2 回目分裂以上の細胞が比較的高頻度で観察される個体の存在が明らかになった（図 2）。頻度 10%以下であれば 2.0 Gy 以上の被ばく事故における線量の過小評価（患者の見逃し）は理論上起きないため、これまで FPG 法による細胞分裂回数確認を省略するラボも多かった。従来の研究報告では検体取得にバイアスがかかっていた可能性が考えられる（血液提供者の年齢層＝ラボの大学院生～中堅研究者への偏り）（図 2、25 歳以上を参照）。リンパ球の寿命、培養試薬への反応性の個体差、採血当日の感染症等、

原因は不明で今後の解明が俟たれるが、実践的には、1 回目分裂細胞のみとらえるより簡便な培養法の開発を行う。

3) 長期内部被ばく患者：100 ゲノム当たりの染色体異常数は二動原体約 5 倍、転座約 15～35 倍。検量線²⁾から累積線量は 2 Gy 程度と推定されるが、加齢効果補正が未確定のため、今

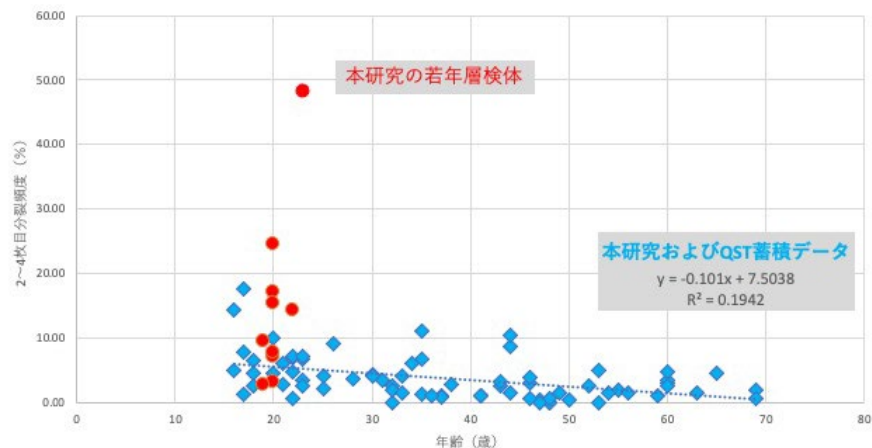


図 2. 2～4 回目分裂細胞の頻度と年齢の関係 [unpublished data]

後のいっそうの調査が必要である。

4) 3 色 FISH の染色体異常検出力：M-FISH データとの比較により、ほぼ理論通り (40%) であることが確認できた。全染色体の識別可能でもプローブ代が高額で解析に時間を要する M-FISH 法の代替として、3 色 FISH 法を染色体異常の高速スクリーニングに用いて良いと言える。

【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

患者画像解析試験： 本研究で深層学習法を導入して開発したモデルを用いて前述の長期内部被ばく患者標本の 3 色 FISH 画像解析を行った。正常染色体の検出率は健常人検体と同様に 97.2～99.1% と好成績が得られた。放射線被ばく検体の染色体異常の特徴として、低頻度であることが目視観察者の重労働につながっている。本モデルは現状、染色体の検出率はほぼ 100% と正確で、染色体異常の分類は正常細胞画像のスクリーニング (除外) に有効であると言える。現状のモデルでは学習材料に偏りが生じる (2 Gy 以下の線量では異常が低頻度なため)。染色体異常の誤判定を改善するには、今後、さらなる追加学習を行うか、分類に関して直近で報告があった新たなモデルを導入するなど、試していく予定である。

V 結論

【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

高精度 FISH 法により、非喫煙・健常人 (19～71 歳、15 名) のバックグラウンドデータを得ることができた。このデータコレクションを基盤として、今後、計画的職業被ばくや医療被ばくのデータ解析、加齢・喫煙他染色体異常生成に影響を与える因子の解明に利用できる。

【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

本研究の現モデルでは、染色体の検出率はほぼ 100% で、正常細胞のスクリーニング成績は患者検体を含め良好である。今後いっそう放射線被ばくによる染色体異常の分類性能をあげるために、学習データの偏りをなくす、新たな分類に適したモデルを別途導入するなど、引き続き改良を続け、近い将来には ISO の標準プロトコルへの採用や特許取得を目指す⁵⁾。

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.
- 4) Sigurdson AJ, et al., International study of factors affecting human chromosome translocations, *Mutat Res.* 652(2):112-121, 2008.
- 5) Wilkins R et al. (Suto Y 含む), Activities of ISO Working Group 18: Biological and Physical Retrospective Dosimetry, *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 2025, in press.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和6年度年度報告書

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6年度研究期間	令和6年4月1日～令和7年2月28日
研究期間	令和4年度～令和6年度（3年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	吉田 浩子	東北大学 先端量子ビーム科学研究センター・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
I 研究背景 避難指示区域及び特定復興再生拠点区域での解除とともに、帰還・あらたに居住する住民の増加が予想されるなか、住民がもっとも長い時間を過ごす住家内の汚染の状況及びその変化を把握することは重要である。同時に、屋内に残存する放射性物質を効果的に低減する具体的な方策を知ることは住民にとって生活再建のための大きな関心事である。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により、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ある程度大きくなったものは集塵されるものの、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を用いた繰り返し集塵による屋内残存放射性Csの低減効果の有無や、その長期的な効果はまだ調べられていない。 II 目的 大熊町を中心にヒトの出入り及びヒトの活動の頻度が異なる木造住家（最多で10戸）において定期的な掃除機がけを最長で3年間継続して行うことによりハウスダストを集塵する。集塵されたハウスダストに含まれる放射性Csを測定し、その経時変化を評価することにより定期的な繰り返し掃除機がけによる屋内残存放射性Csの低減効果を調べることを目的とする。同時に、住家の換気率や外気中及び屋内の気中放射性エアロゾルなども測定し、あらたな放射性Csの屋内への入り込みがどの程度あるのか、また、居住環境、ヒトの居住、出入りなどのヒトの活動が住家内放射性Csの挙動に与える影響について検討を行う。

III 研究方法

大熊町の木造住家のべ 10 戸（図 1）においてコードレススティック型掃除機を用いて定期的にハウスダストを集塵し、粒径別（ $<20\ \mu\text{m}$, $20\text{--}63\ \mu\text{m}$, $63\text{--}180\ \mu\text{m}$, $180\text{--}500\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}\text{--}1\ \text{mm}$, $1\text{--}2\ \text{mm}$, $>2\ \text{mm}$ ）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。換気率をトレーサースガス法 (CO_2 減衰)により評価する。電気が復旧した住戸において外気中及び屋内の気中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。スミア法により放射性 Cs の表面汚染密度を評価する。アンフォールディング手法により屋外・屋内の γ 線スペクトルについて解析を行う。

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。

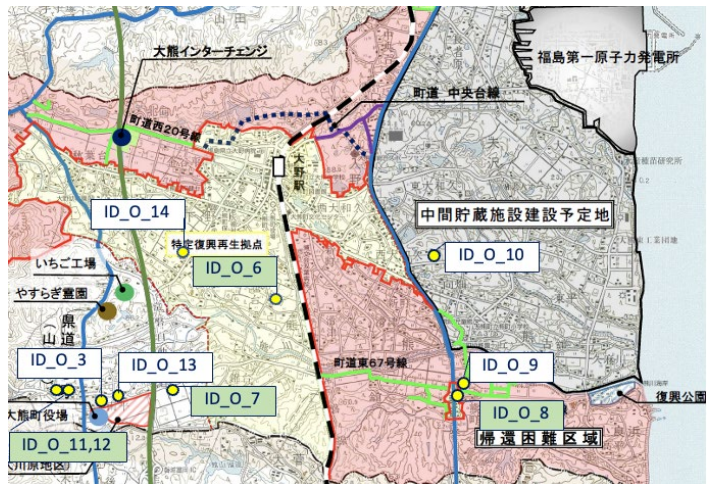


図1. 調査住宅の位置 屋外・屋内エアサンプラー配置住家

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

1. 繰り返し掃除機がけにより、床面積当たりのハウスダスト量は調査したのべ 10 戸のうち 7 戸で減少傾向が観察された。(10 戸のうち 2 戸は短期で調査が終了したため傾向の把握ができなかった。) 初期値のハウスダスト量が高い住家ほど減少が速い。減少が速くない住家は、ヒトの出入りが多い時期があり、その際に外からコールドダストの持ち込みがありハウスダスト量が増えたためと考えられる。粒径ごとのハウスダストを化学的性状により水溶性・塩酸溶性・残渣の 3 つに分けそれぞれ Cs-137 の測定を行った。この実測値を用いてハウスダストの経口摂取による内部被ばく線量（大人の Cs-137 による預託実効線量）を DCAL (ORNL/TM-2001/190, 2006) により算出した。ハウスダスト量の減少に伴い預託実効線量は減少する。

2. 掃除機がけにより除去されたハウスダスト中の重量当たりの Cs-137 濃度は、のべ 10 戸調査のうち 7 戸で減少傾向が観察され、換気に伴って入ってくるコールドダストによる希釈効果を示唆している。重量当たりのハウスダスト中 Cs-137 濃度が減少すると預託実効線量は減少する。しかし、1.の傾向と比較して 2.における減少度は小さい。この原因として、事故直後に家の中に入り込んだ放射性物質がハウスダストに付着してさまざまな隙間に残留しており、それらが徐々に室内に出て来ていることによることが推定される。一番減少速度が速い住家では、毎日ヒトの活動があり、コールドダスト持ち込みによる希釈効果が大きいことが示唆された。調査した 10 戸において Cs-137 濃度には大きな差がある。

3. 電気が復旧したのべ 4 戸において外気中及び屋内の気中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し、屋外・屋内の Cs-137 を評価した。気中浮遊粒子の Cs-137 濃度は、屋外・屋内とも変動が大きく、相関は見られず、屋内外が同等もしくは屋内の方が高いこともあった。Cs-137 屋内濃度は、平均で屋外濃度の 0.87 ± 0.27 倍であった。また、調査期間中に一定の変化傾向は見られなかった。気中 Cs 濃度は、 $0.49\text{--}0.69\ \mu\text{m}$ にピークを持つ単峰性の粒径分布を示していた。粗大粒子

は、海塩粒子や土壌粒子とされており²⁾、気中で見られた Cs の起源は海塩や土壌ではないことが示唆される。

4. スミア法による放射性 Cs の表面汚染密度の経時変化を調べた。住家ごとの表面汚染密度の分布の中央値の大きさの順は上述 2. で得た重量当たりのハウスダスト中 Cs-137 濃度の値の大きさの順と同じであった。スミアの採取箇所は主にタンスなどの家具の上（住民が掃除していないところ）であり事故直後に家屋内に入り込んだ放射性物質の残存物を観察している。一方、掃除機がけで観察している対象はヒトの活動が大きく影響する床の上のダストであるが、双方で傾向が同じということは、床の上のダスト中の放射性 Cs を支配しているのは事故直後に家屋内に入り込み残留している放射性物質であることを示唆すると考えられる。

5. 床面積当たりの Cs-137 濃度が最も高い住家と最も低い住家について、エアサンプラーによる測定値から屋外気中浮遊粒子の Cs-137 濃度を 1 mBq/m^3 とし、換気回数実測値を用いて無人の家屋における室内沈着量をストークスの式を用いて推定した。前者の住家では、少なくともこの 2 年間に採取したハウスダスト中の Cs-137 濃度に対して、外気の寄与はきわめて小さい (0.058%) が示されたが、一方、後者の住家では平均で 33.3% が外気からの寄与と考えられた。

6. アンフォールディング手法による γ 線スペクトルの解析を行い、除染前後の屋外・屋内の散乱線成分/直達線成分 (S/D) の比率に差があることが示した。この知見を含めて除染前後の屋内と屋外での放射線量の変化の違いは協力住民への説明に有用である。一方、屋根にあらたな放射性物質集積因子が観察される住家の S/D の比率に、集積が観察されない住家との差は認められなかった。

以上の成果に基づいた今後の研究方針を以下に述べる。

屋内で測定された気中 Cs-137 濃度の由来はあらたに屋外から入り込んだ Cs-137 のほかに既築住家屋内に残存している Cs-137 の付着したハウスダストである可能性が考えられる。このことを確認するために、新築の家での屋外・屋内の Cs-137 を測定し、外気からのあらたな放射性 Cs の屋内への入り込みと沈着に、新築の家と既築戸建住家で違いがあるのか、新築の家と既築戸建住家での比較検討を行うことが必要である。また、新築の家にあらたな放射性 Cs の屋内への入り込みと沈着が生じると、積算して屋内の放射性 Cs は増えてくる可能性がある。新築の家屋内での気中浮遊粒子及び沈着の状況を調べることも必要である。

V 結論

掃除機を用いた繰り返し集塵により、床面積当たりのハウスダスト量は調査したのべ 10 戸のうち 7 戸で減少傾向が観察された。初期値のハウスダスト量が高い住家ほど減少が速い。減少が速くない住家は、ヒトの出入りが多い時期（コールドダストの持ち込み）があったことと関係している。ハウスダストの経口摂取による預託実効線量はハウスダスト量の減少に伴い減少する。ハウスダスト量とともに重量当たりのハウスダスト中 Cs-137 濃度が減少すると預託実効線量はさらに減少するが、床面積当たりのハウスダスト量の減少の速さに比べて、重量当たりのハウスダストの中 Cs-137 濃度は減少度が小さいことがわかった。この原因として、事故直後に家の中に入り込んだ放射性物質がハウスダストに付着してさまざまな隙間に残留しており、それらが徐々に室内に出て来ていることによることが推定される。一番減少速度が速い住家では、毎日ヒトの活動があり、コールドダスト持ち込みによる希釈効果が大きいことが示唆された。エアサンプラーにより捕集した気中浮遊粒子の Cs-137 濃度は、屋外・屋内とも変動が大きく、両者に相関は見られなかった。Cs-137 屋内濃度は、平均で屋外濃度の $0.87 \text{ 倍} \pm 0.27 \text{ 倍}$ であった。調査期間中に一定の変化傾向は見られなかった。エアサンプラーによる測定値から屋外気中浮遊粒子の Cs-137 濃度を 1 mBq/m^3 とし、換気回数実測値を用いて無人の

家屋における室内沈着量をストークスの式を用いて推定した結果、床面積当たりの Cs-137 濃度が低い住家では、平均で 33.3%が外気からの寄与と考えられる。しかし、屋内で測定された気中 Cs-137 濃度の由来はあらたに屋外から入り込んだ Cs-137 のほかに既築住家屋内に残存している Cs-137 の付着したハウスダストである可能性が考えられる。このことを確認するために、新築の家での屋外・屋内の気中 Cs-137 を測定する調査がさらに必要である。

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) Whitby KT. 1978; The physical characteristics of sulfur aerosols. In Sulfur in the Atmosphere (pp. 135-159). Pergamon.

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和6年度年度報告書

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6年度研究期間	令和6年4月1日～令和7年2月28日
研究期間	令和4年度～令和6年度（3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原子力安全・防災研究所安全研究センターリスク評価・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
I 研究背景 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。 II 目的 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。 III 研究方法 令和6年度は、目的①に関連して、1) 屋内退避に関する情報提供資料の作成を実施した。また、目的②に関連して、1) 床材・行動別の室内再浮遊係数を評価するとともに、2) 各サイトにおける事故後初期の屋内退避時における被ばく線量評価を実施した。 目的①-1) の作業では、国・自治体・住民に向けての屋内退避に関する情報を提供する資料を作成

した。資料には、令和5年度に評価した屋内退避による被ばく低減係数（事故シナリオごと、国内のサイトごと）と当グループの有する屋内退避に関する知見（原子力規制庁受託及び内閣府受託）を組み合わせて、屋内退避の被ばく低減効果の依存性及び屋内退避時の行動に関する知見を整理した。

目的②-1) に関して、室内床面に沈着した放射性物質の再浮遊による被ばくを評価するためのモデルを開発した。室内再浮遊係数は粒径、床材、床面からの高さ、人の室内における行動により生じる風速場等の条件によって異なることが考えられるため、本研究ではこれらの条件ごとに室内再浮遊係数を実家屋内における実験によって求めた。また、目的②-2) に関して、実験的に得られた室内再浮遊係数を用いて、室内再浮遊放射性物質による吸入被ばく線量評価モデルを開発した。開発したモデルを用いて、事故発生から1年間自宅を離れて再度居住開始した場合の被ばく線量評価を行い、屋外グランドシャイン等の居住環境下における総被ばく線量に対する室内再浮遊による被ばく線量の寄与割合を評価した。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

目的①-1) の作業では、サイトごと及び事故シナリオごとに被ばく低減係数を評価した。その結果、実効線量で評価した場合の被ばく低減係数は、早期大規模放出、後期大規模放出及び福島事故相当の事故シナリオでは0.4～0.6であり、管理放出及び新規規制基準を踏まえた事故シナリオでは0.6～0.7であった。甲状腺等価線量で評価した場合の被ばく低減係数は、事故シナリオによらず0.4～0.6であった。事故シナリオ間の被ばく低減係数の違いは主に希ガス核種からの寄与割合に依存していることが示され、希ガス核種からの寄与が大きい事故シナリオほど被ばく低減係数が大きくなった。また、被ばく低減係数は風速によって大きく変動し、サイト内外での風速変動により約20～50%異なることが示された。これらの成果をとりまとめて学会発表¹⁾、報告書²⁾及び査読付論文³⁾として公開した。屋内退避に関する情報を提供する資料では、上記の情報に加えて、住宅の広さや気密性能による被ばく低減係数の違い、屋内退避の低減効果を高くするための行動を整理して記載した。また、作成した資料を利用して、アウトリーチ活動を実施した^{4,5)}。

目的②-1) の作業では、室内再浮遊係数を実験的に評価した。この際に、粒径、床材、床面からの高さ及び人の室内における行動による室内再浮遊係数の変動を評価できるように実験を設計した。この結果、室内再浮遊係数は、 $1.0 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ の範囲で変動した。室内再浮遊に関する先行研究では、本研究とは異なり試験チャンバーでの評価結果として $1.0 \times 10^{-8} \sim 7.2 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ の範囲が報告されており、本研究の成果と同程度であることを確認できた。このようにして実験的に評価した室内再浮遊係数を用いてコンパートメントモデルを開発した。

目的②-2) の作業では、上記で開発したコンパートメントモデルを用いて住民帰還後の被ばく線量評価を行った。事故後に一定期間避難した後、帰還して通常生活を送った場合の被ばく線量を評価した。評価では、避難期間に加え、自宅の換気率を変化させた。その結果、避難期間の長期化と換気率の増大によって室内再浮遊の影響が大きくなることがわかった。例えば、換気率を毎時1.0回として避難期間を1年とした場合、室内再浮遊を考慮すると室内の放射性物質からの被ばく線量の割合が再浮遊を考慮しない場合と比べて約20%増大した。さらに、避難期間1年として、ダストピックアップ率95%として床の清掃を行った場合、清掃しない場合に比べて被ばく線量が約5%に低減することがわかった。帰還後から継続して清掃することによって、室内再浮遊による被ばく線量は全体の線量と比較して、大きく低減できることを示した。これらの成果を取りまとめて学会発表を行った^{6,7)}。

V 結論

令和 6 年度に計画していた作業は、滞りなく完遂した。これにより、事故シナリオやサイト間の気象条件の違いを考慮して屋内退避による被ばく低減係数を評価し、その結果をもとにして、国・自治体・住民に向けての屋内退避に関する情報を提供する資料を作成した。また、室内再浮遊係数を実験的に評価し、事故影響評価のためのコンパートメントモデルを開発した。さらに、開発したモデルを用いて、事故発生から 1 年間自宅を離れて再度居住開始した場合の被ばく線量評価を行い、屋外グラウンドシャイン等の居住環境下における総被ばく線量に対する室内再浮遊による被ばく線量の寄与割合を評価した。

引用文献

- 1) 廣内淳, 渡邊正敏, 林奈穂, 長久保梓, 松井康人, 米田稔, 高原省五, 原子力事故後の居住環境における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その 4—原子力事故初期時の屋内退避による低減効果の評価—, 日本原子力学会 2024 秋の大会, 2024 年 9 月 11-13 日..
- 2) 廣内淳, 渡邊正敏, 林奈穂, 長久保梓, 高原省五, 各事故シナリオにおける原子力サイトごとの被ばく線量と屋内退避時の被ばく低減係数の評価, JAEA-Research 2024-015
- 3) Jun Hirouchi, Masatoshi Watanabe, Naho Hayashi, Azusa Nagakubo, Shogo Takahara, Effects of different accident scenarios and sites on the reduction factor used for expressing sheltering effectiveness, J. Radiol. Prot. 45, 011506.
- 4) 高原省五, 原子力災害時の屋内退避に関する考察について—被ばく線量シミュレーションの結果より—, 令和 6 年度鳥取県原子力防災講演会, 2024 年 12 月 10 日.
- 5) 高原省五, 福島第一原子力発電所事故の教訓—原子力災害時の対応について—, 令和 6 年度ラジエーションカレッジセミナー, 2025 年 1 月 28 日.
- 6) 長久保梓, 林奈穂, 廣内淳, 松井康人, 米田稔, 高原省五, 原子力事故後の居住環境における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その 5—室内粒子再浮遊係数の実験を基にした評価, 日本原子力学会 2024 秋の大会, 2024 年 9 月 11-13 日..
- 7) 林奈穂, 長久保梓, 廣内淳, 松井康人, 米田稔, 高原省五, 原子力事故後の居住環境における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その 6—室内再浮遊粒子を考慮した室内滞在時の被ばく線量評価, 日本原子力学会 2024 秋の大会, 2024 年 9 月 11-13 日..

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和6年度年度報告書

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6年度研究期間	令和6年4月1日～令和7年2月28日
研究期間	令和4年度～令和6年度（3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・副主任研究員
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 研究背景 2011年に発生した福島原発事故への対応に伴い同原発の敷地内に高濃度のトリチウム（^3H）を含む処理水が蓄積し、2023年中には蓄積許容量の上限に達することが見込まれた。そこで東京電力は、この処理水について2023年より海洋放出することを公表し、同年8月より放出を開始した。この放出に際しては、1,500 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たが、このトリチウム濃度はWHOが飲料水に定めた基準（10,000 Bq/L以下）と比較しても顕著に低い値である。また、放出後は海流によって速やかに希釈されるため、実際に第1回の放出直後に行われたモニタリングでは放出口の直近ですら検出下限値（10 Bq/L）以下のトリチウム濃度であった。このように、処理水の海洋放出には環境や人の影響につい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化水（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り有機結合型トリチウム（Organically bound tritium: OBT）に変化する。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)}。また、トリチウムによる内部被ばくを考える場合、OBTはHTOの化学形態に比べて体内の滞留時間が長く、影響が大きい^{1,2)}。これらを勘案すると、処理水放出に関して十分な安心感を担保するため、HTOのみならずOBTの環境動態も把握することが望ましい。本研究では海水中および海霧等で沿岸陸域に移行した処理水中HTOが、それらの領域に生息する一次生産者の光合成によりOBTに変化することを想定し、一次生産者によるOBT生産速度を評価した。また、取得したデータを用いて一次生産者におけるOBT蓄積過程の数値モデルを構築した。 II 目的 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一次生産者を対象としたOBT生産速度の取得を主目的とした。その中で、研究計画3年目の令和6年度は陸上植物2種（ミズナラ苗木及び牧草）と海藻2種（アオサ、オゴノリ）についてOBT生産速度を実験的に評価した。更に、昨年度までに取得したデータと合わせて、福島沿岸域における植物プランクトン

から底生魚への OBT 蓄積過程を数値モデル化し、この蓄積を評価した。更に、陸上植物の生育過程における OBT 蓄積過程の数値モデルを構築し、同植物中 OBT 濃度の推定を可能にした。

III 研究方法

昨年度と同様、水素の安定同位体 ^2H (Deuterium: D) で標識された水（重水）を HTO の模擬物質とし、系内に添加した重水から生産される有機態重水素（Organically bound deuterium: OBD）を測定することにより、OBT の生産状況を評価した。令和 6 年度はミズナラ、コマツナ、アオサ、オゴノリについて重水添加実験を実施し、植物中に生産された OBD 濃度を測定した。また、これまでの取得データを用いて、陸・水圏一次生産者における OBT 生産過程の数値モデルを構築した。さらに、福島沿岸海域における植物プランクトンから底生魚への OBT 蓄積を数値モデルにより評価した。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

各種一次生産者に関して、OBT 生産速度の推定に資する OBD 生産速度のデータを取得した（図 1）。

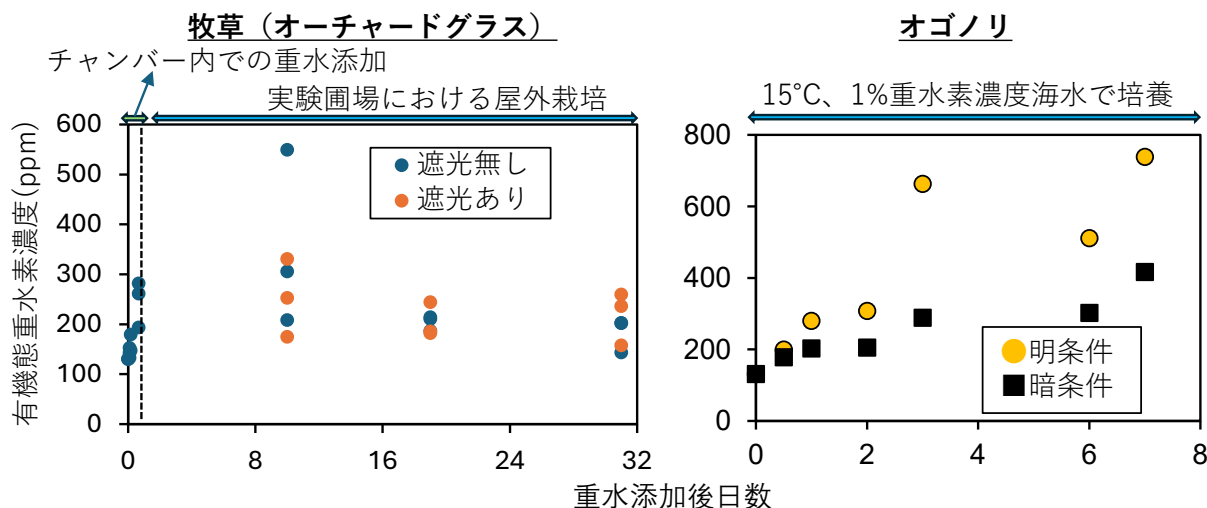


図 1. 重水添加実験における陸水圏一次生産者の OBD 濃度の時間変化

これまで得られた重水添加実験データを用いて、陸上植物中 OBD 濃度を再現する数値モデルを作成し、従来の研究で用いられているモデルよりも高い再現性があることを確認した（図 2）。

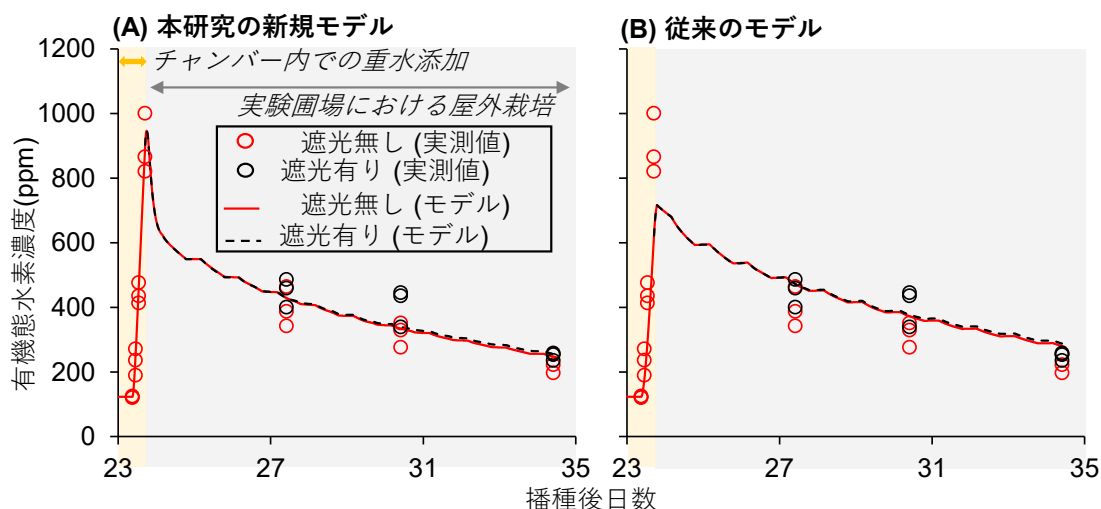


図 2. コマツナ中 OBD 濃度の数値モデルの計算結果

また、令和 5 年度に得られた植物プランクトンの OBT 生産速度データ³⁾と環境科学技術研究所における先行研究⁴⁾データを用いて、処理水放出時における福島沿岸域に生息する底生魚（ヒラメ）中

の OBT 濃度を推定する数値モデルを作成し、実際に計算を実施した結果、放出状況下におけるヒラメを摂取しても内部被ばくの影響は無視できる程度であることが示唆された⁵⁾。

V 結論

本調査で主目的とした陸・水圏一次生産者の OBT 生産速度に関する実測的データの取得は、十分に達成された。また、この実測データを用いて陸・水圏一次生産者の OBT 蓄積過程を数値モデルにより再現することが可能となった。これらの成果は、処理水に由来するトリチウムの環境動態や被ばく線量の具体的予測、ひいては同処理水に関連した風評被害の抑止に貢献することが期待される。

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.
- 3) Satoh, Y., Omori, Y. 2023. Evaluating production rates of particulate organic hydrogen by marine phytoplankton for estimating phytoplanktonic productivity of organically bound tritium. *Water Research*, 242, 120592.
- 4) Tani, T., Ishikawa, Y. 2023. A deuterium tracer experiment for simulating accumulation and elimination of organically bound tritium in an edible flatfish, olive flounder. *Science of the Total Environment*, 903, 166792.
- 5) Satoh, Y, Tani, T. 2024. Estimation of accumulation potential for tritium in olive flounder on exposure of treated water derived from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: Tritium transfer from seawater and food chain into organically bound tritium in the targeted fish. *Environmental Research*, 257, 119278.