

一般セッション | VII. 保健物理と環境科学：保健物理と環境科学

2024年9月11日(水) 10:00 ~ 11:55 会場(講義棟A棟1F A105)

[1C01-07] 放射線応用・環境放射能

座長:永井 晴康(JAEA)

10:00 ~ 10:15

[1C01]

DNA損傷の修復を考慮した放射線生物学での新規数理モデルに関する研究

*中島 和也¹、松尾 陽一郎¹、清水 喜久雄²、泉 佳伸² (1. 福井大学大学院、2. 福井大学附属国際原子力工学研究所)

10:15 ~ 10:30

[1C02]

DNA 二重鎖切断の数理モデルの構築およびシミュレーションによる検証

*藤田 祥太郎¹、佐藤 文信¹、秋山 庸子¹、真鍋 勇一郎¹ (1. 大阪大学大学院 工学研究科 環境・エネルギー工学専攻)

10:30 ~ 10:45

[1C03]

ソフトエレクトロンによるレモンのカビ殺菌

*片岡 憲昭¹、内田 海路¹、河原 大吾¹ (1. 都産技研)

10:45 ~ 11:00

[1C04]

トロンの連続吸入と分割吸入がマウス大腸炎の重症度に及ぼす作用の比較検討

*片岡 隆浩¹、直江 翔太¹、田中 歩¹、竹中 伶樹¹、的場 文哉¹、神崎 訓枝²、迫田 晃弘²、山岡 聖典¹ (1. 岡山大、2. JAEA)

11:00 ~ 11:15

[1C05]

大熊町の住家における繰り返し掃除機がけによる屋内ハウスダスト及び放射性セシウムの低減効果

*吉田 浩子¹、篠原 直秀² (1. 東北大、2. 産総研)

11:15 ~ 11:30

[1C06]

炭素/水素比を指標とした植物における有機結合型トリチウムの蓄積効率の評価

*佐藤 雄飛¹、今田 省吾¹、永井 勝¹、山上 睦¹、谷 享¹ (1. 環境研)

11:30 ~ 11:45

[1C07]

避難指示区域における屋外作業時の被ばく線量に関する評価

*斎須 要文¹、安藤 維彦¹、内山 恵三¹、上野 敏弘¹、瀧澤 孝一¹、遠藤 裕司¹、吉村 和也²、眞田 幸尚² (1. 東京電力HD、2. JAEA)

11:45 ~ 11:55

座長持ち時間

DNA 損傷の修復を考慮した放射線生物学での新規数理モデルに関する研究

Study on the new mathematical model considering DNA damage repair in radiation biology.

*中島 和也¹, 松尾 陽一郎¹, 清水 喜久雄², 泉 佳伸²

¹福井大院・工, ²福井大・原子力研

低線量及び低線量率照射により起こる特有の応答(放射線超感受性)や線量率効果を表現するために DNA 損傷の修復を考慮した数理モデルを構築した. 本発表では, モデルの概要, 出芽酵母細胞に対して軟 X 線を照射した際の生存率測定及び遺伝子発現量解析の結果, 数理モデルを用いた解析結果について報告する.

キーワード: 数理モデル, 放射線生物学, DNA 損傷の修復

1. 緒言

これまでに DNA 損傷の修復を考慮した数理モデルはいくつか報告されているが, 修復遺伝子の発現を取り入れた数理モデルは報告されていない. 修復遺伝子の発現を考慮した数理モデルであれば, 低線量及び低線量率照射の際に見られる細胞応答を表現できる可能性があると考えられる.

2. モデルの概要

式(1)-(6)にモデル式, 図 1 に数理モデルの概要を示す. 本モデルでは, 放射線が照射された細胞について 3 つの状態を取りうるとし, それぞれの濃度を $[X_1]$: 未損傷の細胞(個/ml), $[X_2]$: 亜致死細胞(個/ml), $[X_3]$: 致死細胞(個/ml)とした. $[X_1]$ と $[X_2]$ は, 線量率 D (Gy/min) と DNA 損傷の効率に関する係数 α (/Gy)の積によって時間変化し, X_2 から X_1 に状態が変化する場合, $[X_2]$ に比例し, 反応速度定数 r (/min)で時間変化すると仮定したモデルを r model とする. また, 放射線照射に伴う mRNA の誘導を反映し, 修復の効果が一定になるまでに T (min)の遅れが発生して, 境界値 T (min)まで修復の効果 r' (/min)は 1 次関数的に時間変化すると仮定したモデルを r' model とする.

$$\frac{d[X_1]}{dt} = -\alpha D[X_1] + r'[X_2] \quad (1)$$

$$\frac{d[X_2]}{dt} = \alpha D[X_1] - r'[X_2] - \alpha D[X_2] \quad (2)$$

$$\frac{d[X_3]}{dt} = \alpha D[X_2] \quad (3)$$

$$r = \text{Constant} \quad (0 \leq t < \infty) \quad (4)$$

$$r' = At + r/\beta \quad (0 \leq t < T) \quad (5)$$

$$r' = AT + r/\beta = r \quad (T \leq t < \infty) \quad (6)$$

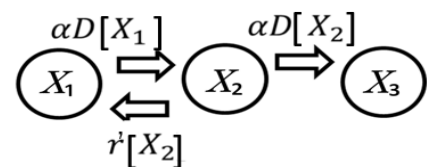


図 1 数理モデルの概要

DNA 損傷の効率に関する係数 α (/Gy)と DNA 損傷の修復に関する反応速度定数 r (/min)は, 修復遺伝子の活性を持つ出芽酵母の RAD^+ 株、および修復遺伝子が不活性である $rad52$ 株に軟 X 線を照射した際の生存率から決定した. また, 修復の効果 r' の境界値である T (min)と初期値 β は, RAD^+ 株に軟 X 線を照射した際の修復遺伝子 $RAD54$ の発現量解析の結果から決定した.

3. 結果

出芽酵母の RAD^+ 株および $rad52$ 株に軟 X 線を照射した際の生存率に対して, r model を用いて最小二乗法でフィッティングし, パラメータを決定した結果, $rad52$ 株の修復の効果 r が, RAD^+ 株に比べて低下したことが示された. また, 発現量解析に基づき $T=60$ min, 初期値 $\beta=1.4$ と定めた場合, RAD^+ 株の生存率に対する決定係数は, r model : $R^2=0.88$, r' model : $R^2=0.92$ を示し, r' modelの方が生存率に対して精度が良いことが示された(図 2).

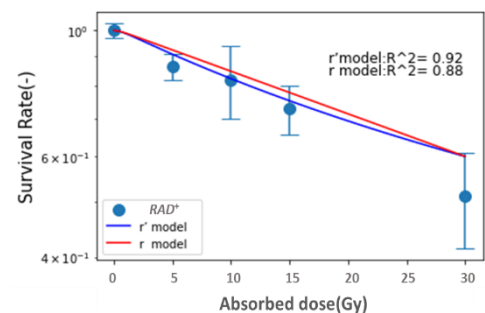


図 2 出芽酵母 RAD^+ 株に 0.5Gy/min の軟 X 線を照射した際の生存率(n=3)

*Kazuya Nakashima¹, Youichirou Matuo¹, Kikuo Shimizu² and Yoshinobu Izumi²

¹ Graduate School of engineering, Univ. of Fukui, ² Research Institute of Nuclear Engineering, Univ. of Fukui.

DNA 二重鎖切断の数理モデルの構築およびシミュレーションによる検証

Construction and Simulation Validation of a Mathematical Model of DNA Double-Strand Breaks

*藤田 祥太郎¹, 佐藤 文信¹, 秋山 庸子¹, 真鍋 勇一郎¹

¹大阪大学大学院 工学研究科 環境・エネルギー工学専攻

本研究は、放射線被ばくによる DNA 二重鎖切断（DSB）の数を予測する数理モデルを開発し、放射線治療の効果予測と最適化に寄与することを目指す。

キーワード：DSB、数理モデル、モンテカルロシミュレーション（MCS）、パラメータ最適化

1. 緒言

放射線被ばくによる DNA 二重鎖切断（DSB）の生成と修復メカニズムの解明は重要である。先行研究の数理モデルは、細胞内で発生する物理的、生物学的なメカニズムに基づいたモデルではなく、相関関係に基づいた統計モデルが多い。本質的なメカニズムに基づいていないという点で予測精度と信頼性に課題がある。本研究では、本質的なメカニズムに基づいて DSB の数を予測する新たな数理モデルを開発し、その精度向上を目指す。MCS でパラメータを最適化し、生物学的実験データに適用してモデルの妥当性を評価する。

2. 数理モデルの構築と検証

物理的および生物学的に簡略化したメカニズムに基づき、放射線照射終了時における 1 細胞に生じている DSB 数 N_{DSB} を導出する以下の数理モデルを構築した。

$$N_{DSB}(t) = \alpha_{DSB} \frac{r}{\beta D_{hit}} (1 - e^{-\beta t}) + \frac{\lambda_E}{\beta}$$

r [Gy/h]	線量率	t [h]	照射開始からの経過時間
β [h]	DSB の修復速度定数	λ_E [h]	内因性 DSB の発生頻度
D_{hit} [Gy]	放射線 1 ヒットによる吸収線量	α_{DSB} [/cell]	放射線 1 ヒットで生じる DSB 数

メカニズムが不明な現象によく用いられる MCS を用いて放射線被ばくによる DSB 発生をシミュレーションし、フェルミ推定や回帰分析によって導出された過去の文献値が我々のパラメータ D_{hit} と α_{DSB} とほぼ一致することを確認した。これにより、本研究で導出したパラメータが概ね妥当であることが確認された。

3. 結論

本研究により、数理モデルのパラメータの妥当性の高さを確認できた。実際の実験結果および論文との関連性についても議論するために、放射線による生体影響を線量率効果に注目して行なわれた希少な実験データであるラッセルらのメガマウス実験^[3]に、本研究で開発した数理モデルを適用したところ、DSB と突然変異発生率との間に相関関係があることが確認された。

参考文献

- [1] Y. Matsuya et al. J. Appl. Phys 126, 124701 (2019)
- [2] Y. Matsuya et al. Int. J. Mol. Sci. 21, 1701 (2020)
- [3] W. L. Russel, E. M. Kelly, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 79, 542 (1982)

*Shotaro Fujita¹, Fuminobu Sato², Yoko Akiyama¹ and Yuichiro Manabe¹

¹Osaka Univ.

ソフトエレクトロンによるレモンのカビ殺菌

Sterilization of mold on Lemon by Soft-electron

*片岡 憲昭¹, 内田 海路¹, 河原 大吾¹

¹ 東京都立産業技術研究センター

生レモンに 250 kV 以下の低エネルギー電子線を照射し、表皮のカビを殺菌後、長期保存を調査した。カビは殺菌できたが、レモンの皮が褐色化するメイラード反応が進行し、長期保存には適さなかった。

キーワード：食品照射, ソフトエレクトロン, 電子線殺菌, レモン, 長期保存, メイラード反応

1. 緒言

国内で流通しているレモンは 80 %以上が輸入品であるが、海上輸送による保存期間を考慮に入れ、レモンの外皮に防カビ材を塗布している。これに対して、国内で生産されるレモンは新鮮なうちに無農薬で流通し、海外産のレモンと差別化した。無農薬であるため国産レモンの保存期間は 1 か月程度と短く、旬な時期を過ぎると腐敗による廃棄ロスの問題が挙げられる。特に、小笠原諸島で栽培されるレモンは輸送に 1 週間かかるため、本土へ流通しても保存期間は限られる。そこで、水と薬剤を使用せず表皮 50 μ ~ 0.5 mm の深さまで殺菌可能なソフトエレクトロン（電子線）処理に着目し、実験した。

2. 実験

2024 年 12 月 12 日に岩崎電気株式会社で生のマイヤーレモンへ電子線を照射した。照射エネルギーは 80 kV, 100 kV, 150 kV, 200 kV, 250 kV で照射線量は 1 kGy, 2 kGy, 3 kGy で両面に照射した。1 条件当たり 3 個のレモンを使用した。レモンを 1 個ずつ袋に入れ冷蔵庫に保存後、「見た目」「硬さ」「匂い」「カビの有無」の経時変化を調査した。また、レモン表皮のクチクラ層を確認するためスダンⅢで染色し顕微鏡観察した。

3. 結果

図 1 に照射後 2 週間経過した時の写真を示す。レモンは左から未照射、80 kV, 100 kV, 150 kV, 200 kV, 250 kV、すべて 3 kGy のソフトエレクトロンを照射した。150 kV 以上の電子線ではレモンの表皮が褐色化した。水分の蒸散と、カビの侵入を防ぐ働きを持つレモン表皮のクチクラ層が 150 kV 以上で破壊されていた。その結果、水が蒸発し、レモン表皮に酸素が容易に侵入し、レモンの皮に含まれる酵素とメイラード反応を起こして褐色化したと考えられる。150 kV 未満では、電子が深部まで浸透せず殺菌不足となりカビが生えた。そのため、ソフトエレクトロンでレモンを長期保存することは不可能であった。



図 1 生レモンに 80 kV ~ 250 kV でソフトエレクトロンを 3 kGy 照射し、2 週間冷蔵庫に保存した写真

*Noriaki Kataoka¹, Kaiji Uchida¹ and Daigo Kawahara¹

¹Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute

トロンの連続吸入と分割吸入がマウス大腸炎の重症度に及ぼす作用の比較検討

Comparative study of the effects of continuous and divided
inhalation of thoron on the severity of colitis in mice

*片岡 隆浩¹, 直江 翔太², 田中 歩², 竹中 伶樹²,
的場 文哉², 神崎 訓枝³, 迫田 晃弘³, 山岡 聖典¹

¹岡山大学学術研究院保健学域, ²岡山大学大学院保健学研究科, ³JAEA 人形峠環境技術センター

トロンの連続吸入と分割吸入がデキストラン硫酸ナトリウム (DSS) 誘導マウス大腸炎の重症度に及ぼす作用に関して比較検討した。その結果, トロンの連続吸入は分割吸入に比べ早期に大腸炎に対して抑制効果のあることがわかった。

キーワード: トロン, 連続・分割吸入, 大腸炎, DAI スコア

1. 緒言

ウランの子孫で α 線放出核種であり唯一気体でもある身近なラドンの吸入は, マウス諸臓器中の抗酸化機能などを亢進させ, 酸化ストレス由来の障害を抑制することを我々は明らかにしている。本研究では, このラドンの放射性同位体であるトロンの連続吸入と分割吸入がデキストラン硫酸ナトリウム (DSS) 誘導マウス大腸炎の重症度に及ぼす作用に関して比較検討した。

2. 方法

マウスに疑似(Sham)吸入, トロン(500 Bq/m³)吸入を8日間の連続または1日おき分割して施した。吸入開始1日後から, 3% DSS 含有水の自由摂取を7日間行った。飼育期間中, 毎日体重を測定するとともに糞の状態による disease activity index (DAI) のスコアリングを行った。吸入または投与の終了後に安楽死させ, 大腸を摘出し試料に供した。結腸の長さは, ノギスで測定し群間で比較した。

3. 結果と考察

本実験条件下では, DAI スコアは経過日数に依存して増加したが, 大腸炎モデルの一般的な所見である体重減少や大腸の短縮がみられなかったことから, 大腸炎の症状は軽度であることがわかった。トロンを連続吸入した場合, 2日目で DSS 摂取のみより有意に減少し, 6日目で分割吸入より有意に増加したことから, 連続吸入2日目で大腸炎の抑制効果のあることがわかった。トロンを分割吸入した場合, DIA スコアは7日目で DSS 摂取のみに比べ低かったが, 抑制効果となる有意な差はなかった。

4. 結論

本実験条件下では, トロンの連続吸入は分割吸入に比べ早期に大腸炎に対して有意な抑制効果のあることがわかった。

*Takahiro Kataoka¹, Shota Naoe², Ayumi Tanaka², Reiju Takenaka², Fumiya Matoba², Norie Kanzaki³, Akihiro Sakoda³, Kiyonori Yamaoka¹

¹Faculty of Health Sciences, Okayama Univ., ²Graduate School of Health Sciences, Okayama Univ., ³Ningyo-toke Environmental Engineering Center, JAEA

大熊町の住家における繰り返し掃除機がけによる屋内ハウスダスト及び放射性セシウムの低減効果

Reduction of Indoor House Dust and Radiocaesium by Repeated Vacuuming in Dwelling Houses
in Okuma Town

*吉田 浩子¹, 篠原 直秀²
¹東北大, ²AIST

大熊町の木造住家 10 戸において定期的な掃除機がけにより集塵された重量当たりのハウスダストの中 Cs-137 濃度は、減少度が小さくほとんど変化が見られない住家もあった。外気中の Cs-137 濃度と換気回数により室内の沈着量を推定した結果、ハウスダスト中の Cs-137 濃度に対して外気の寄与は小さいと考えられる。
キーワード：住環境、繰り返し掃除機がけ、ハウスダスト、放射性セシウム、低減効果

1. 緒言

2022 年から定期的な掃除機がけを実施している。最初の 1 年では床面積当たりの集塵されたハウスダストの量が減少する傾向がいずれの住家でも観察された[1]。本研究では、2 年間ででのハウスダストの量及び放射性 Cs 濃度の変化について報告する。

2. 方法

大熊町の木造住家（～10 戸）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、ハウスダスト量を測定するとともにハウスダスト中の Cs-137 をゲルマニウム半導体検出器(HPGe)で測定・定量評価した。調査住家の換気率をトレーサーガス法（CO₂減衰）により評価し、2 戸においてはエアサンプラーにより外気中の放射性エアロゾルを継続的に捕集した。これらによりあらたな放射性 Cs の屋内への入り込み及び沈着量を評価した。

3. 結果・考察

集塵された床面積当たりのハウスダスト量は右下がりに減少していく傾向が顕著に観察された。一方、重量当たりのハウスダスト中 Cs-137 濃度（図 1）は、右下がりの減少傾向が観察されるものの前者の傾向と比較してその減少度は小さく、ほとんど変化が見られない住家もあった。明確な減少傾向が観察される ID_0_6 では、毎日ヒトの出入りと活動があり、コールドダストによる希釈効果が示唆される。外気中の Cs-137 濃度と換気回数の結果から、室内の沈着量を推定したところ、ハウスダスト中に検出される Cs-137 濃度よりかなり小さい値であった。本研究期間におけるハウスダスト中の Cs-137 濃度に対して外気の寄与は小さいと考えられる。

謝辞 本研究は令和 5 年度環境省委託事業「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）」において実施した。

参考文献

[1]吉田浩子, 篠原直秀 日本原子力学会秋の大会(2023)

*Hiroko Yoshida¹, Naohide Shinohara²

¹Tohoku Univ., ²AIST

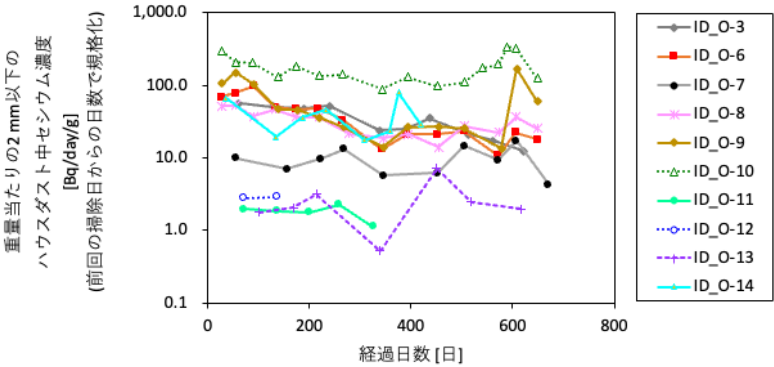


図 1 ハウスダスト（2 mm 以下）の重量当たりの Cs-137 濃度

炭素/水素比を指標とした植物における有機結合型トリチウムの蓄積効率の評価

Evaluation of accumulation efficiency of organically bound tritium in plants using C/H ratio

*佐藤雄飛¹, 今田省吾¹, 永井 勝¹, 山上 睦¹, 谷 享¹

¹公益財団法人 環境科学技術研究所

植物の種類、部位及び生育時期の違いによる植物中への有機結合型トリチウム (Organically bound tritium: OBT) の蓄積効率の変化について植物有機物中の炭素/水素比 (C/H 比) を指標とした調査を実施した。

キーワード: 有機結合型トリチウム (OBT), 植物有機物, 炭素/水素比 (C/H 比), 光合成

1. 緒言

トリチウム (³H) は原子力施設の定常運転や事故時に環境中へ放出される主要な放射性核種の一つである。そのため、同施設の定常運転時における安全評価や事故時のリスク評価の観点から、同核種の環境挙動を予め把握する必要がある。特に人の経口摂取による内部被ばくや生態系への被ばくを考えた際には、植物有機物中に蓄積しうる有機結合型トリチウム (OBT) の評価が重要である。本研究では、植物の種類、部位及び生育時期によって植物中への OBT の蓄積効率がどのように変化するかを調査した。

2. 実験方法

2-1. 炭素/水素比を指標とした評価

本調査では OBT の蓄積効率の指標として植物有機物中の炭素/水素比 (C/H 比) を測定した。炭素は光合成により生産される植物バイオマスの指標であり、水素はトリチウムを含む元素である。したがって高 C/H 比は植物中の OBT の蓄積効率が低いことを示す。

2-2. 対象植物

本調査においては、環境研構内の実験圃場で栽培した 4 種類 (クロマツ苗木、イネ、コマツナ、牧草) の植物について C/H 比を測定した。この際、各々の植物について栽培期間中に隔週～各月で試料採取を行った。採取した各試料は葉、茎または枝、根の部位別に分けて乾燥粉碎し、C/H 比を測定した。

3. 結果と考察

調査対象とした植物種の中で、クロマツ苗木の C/H 比は全ての部位において高く、我々の先行研究におけるリンゴ当年枝の実験結果 (Sato et al., 2022) と合わせて、樹木では C/H 比が高い傾向にあることが示唆された。植物の部位については、全ての植物種において根の C/H 比が高い傾向にあった。生育期間中の変化については、コマツナを除く全ての植物種において生育が進むにつれて C/H 比が増加する傾向にあった。これらの結果より植物への OBT 蓄積効率について、①樹木は低い、②根は低い、③成長と共に下がる傾向、ということが示唆された。

参考文献

Sato, Y., Imada, S., Tani, T., Ishimine, A., Arai, R. (2022) Investigation of ratio of carbon to hydrogen (C/H ratio) in agricultural plants for further estimation of their productivity of organically bound tritium. *Journal of Environmental Radioactivity* 246, 106845

謝辞

この研究は環境省委託事業「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)」において実施したものです。

*Yuhi Sato¹, Shogo Imada¹, Masaru Nagai¹, Mutsumi Yamagami¹ and Takashi Tani¹

¹Institute for Environmental Sciences

避難指示区域における屋外作業時の被ばく線量に関する評価

Statistical evaluation of individual external exposure dose of outdoor worker and ambient dose rate at evacuation ordered zones after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident

*斎須 要文¹, 安藤 維彦¹, 内山 恵三¹, 上野 敏弘¹, 瀧澤 孝一¹, 遠藤 裕司¹,
吉村 和也², 眞田 幸尚²
¹東京電力 HD, ²JAEA

避難指示区域の被ばく線量を推定・評価することを目的に、2020～2022 年度において、避難指示区域等における東京電力 HD 社員の屋外作業時の個人線量をのべ 201 人分計測し、既存の環境モニタリングによる空間線量率から単位時間あたりの個人線量への換算係数を評価した。

キーワード：個人線量，空間線量率，統合マップ，航空機モニタリング，福島第一原子力発電所事故

- 1. 緒言** 事故から 10 年以上が経過し、特定帰還居住区域、帰還困難区域に関する避難指示解除の検討には、当該区域における被ばく線量の推定・評価が重要である。東京電力 HD では、これまで避難指示区域等において社員が除草等の屋外活動を行った際の、個人線量計測を実施し、解析結果を公表してきた[1]。本発表では、避難指示区域の被ばく線量を推定・評価することを目的に、既存の環境モニタリングによる空間線量率データから屋外滞在所における個人線量への換算係数を統計的に解析・評価した。
- 2. 方法** 2020～2022 年度において、1 分単位で計測・記録できる個人線量計 DOSEc nano(富士電機社製)と GPS ロガー K-18U(ARKNAV International 社製)を携行し、それぞれ個人線量と緯度経度を計測した。滞在所(屋内、屋外等) 情報については、計測者自身が記録した。測定データは、5 分間以上屋外の同じ場所に滞在したときの測定データを抽出し、相互比較できるように 1 時間あたりの被ばく線量として換算し、n=1,564 のデータセットを得た。これらのデータについて、政府の公式データである航空機モニタリングによる空間線量率マップ、航空機モニタリングデータを地上測定データで統計学的に補正した統合マップを用い、単位時間あたりの個人線量から空間線量率の相関関係をスピアマンの順位相関係数、また換算係数を中央値からそれぞれ求め、評価した[2]。
- 3. 結果・考察** 航空機モニタリングデータとの比較では、換算係0.44、 $r=0.85(p<0.01)$ である一方、統合マップとの比較では換算係数0.77、 $r=0.86(p<0.01)$ となり、地上計測で得られる換算係数0.7と同程度となった。これは、統合マップが地上計測に合うように補正されているためと考察する[2]。

表 各環境モニタリングによる空間線量率から個人線量への換算係数について

環境モニタリング	データセット (n)	換算係数		
		25%タイル値	50%タイル値	75%タイル値
航空機モニタリング	1517	0.32	0.44	0.61
統合マップ	1564	0.57	0.77	1.12

参考文献

[1] Saisu. M et al., J. Radiat. Res., 43, 011502, 2023 [2] Saisu. M et al., J. Radiat. Res., 44, 021518, 2024

*Motofumi Saisu¹, Tadahiko Ando¹, Keizo Uchiyama¹, Toshihiro Ueno¹, Koichi Takizawa¹, Yuji Endo¹, Kazuya Yoshimura², and Yuhikisa Sanada²

¹ TEPCO HD, ² JAEA