

長期シミュレーションによる福島県河川流域における放射性セシウム動態の不確実性評価 Uncertainty Assessment of Environmental Fate of Radioactive Cesium in the River Basins of Fukushima Prefecture through Long-term Simulation

○入戸野 瑛 (大阪大学) 池之上 翼 (日本原子力研究開発機構)

嶋寺 光 (大阪大学) 松尾 智仁 (大阪大学) 近藤 明 (大阪大学)

Akira NITTONO*1 Tsubasa IKENOUE*2 Hikari SHIMADERA*1 Tomohito MATSUO*1 Akira KONDO*1

*1 Osaka University *2 Japan Atomic Energy Agency

The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident caused extensive ^{137}Cs contamination. Long-term simulations have been conducted to predict the amount of ^{137}Cs outflow from river basins to the ocean. However, there are uncertainties about the influences of rainfall, tree types and dams to the ^{137}Cs outflow. This study focused on how much these three factors influence the ^{137}Cs outflow in eastern Fukushima river basins from 2011 to 2040. The ^{137}Cs outflow varied by -10 to +17% depending on precipitation, and by -16 to +19% depending on tree species, decreased by 21% by dams.

はじめに

福島第一原子力発電所 (FDNPP) 事故により、大量の放射性核種が放出された。放射性セシウム (^{137}Cs) は半減期が長く、線量が顕著に大きい¹⁾ため、環境中に長期的に残留する。 ^{137}Cs 沈着量のモニタリング結果²⁾から、原子力発電所から 80km 圏内を中心に多くの ^{137}Cs が沈着していることが示された。また、福島県東部の河川におけるモニタリング^{3, 4)}により、短期的な豪雨により陸域からの ^{137}Cs 流出量が急激に増加する一方、河川への ^{137}Cs 流出量は年々減少していることが示された。また、長期シミュレーションにより福島県東部における ^{137}Cs 動態を推定する研究⁵⁾が行われているが、将来的な気候の変化や入力データ等の不確実性により、 ^{137}Cs の環境中の分布の推定結果については、不確実性が大きい。そこで本研究では、福島県東部の河川流域を対象として、降水量、森林の樹種、ダムにおける堆積の3つの要素について、長期的な ^{137}Cs 動態に対する感度解析を行うことを目的とする。

1. 研究方法

1.1 計算方法

気象データ、地理データ、土壌侵食パラメータ、 ^{137}Cs 初期沈着量の入力データを使用し、水文モデルで河川流量、土壌輸送モデルで土壌移動量、 ^{137}Cs 輸送モデルで ^{137}Cs の輸送量が計算された。

1.2 計算条件

計算領域は Fig.1 に示す阿武隈川と沿岸部の 13 河川流域、水平格子解像度は 1 km とした。計算期間は 2011 年から 2040 年とした。土地利用は森林、市街地、畑、水田

の 4 種類とした。計算領域の ^{137}Cs 初期沈着量データ⁵⁾を Fig.2 に示す。

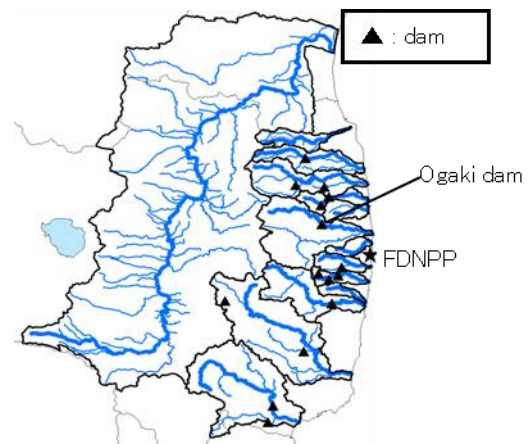


Fig.1 Computational domain

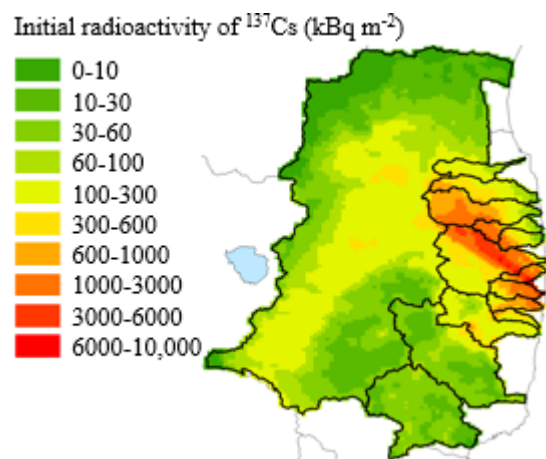


Fig.2 Initial radioactivity of deposited ^{137}Cs

1.3 感度解析

(1) 降水量感度解析

土壌流出の予測には、統計モデル USLE⁶⁾を用いた。式 (1) に示す係数の積によって、単位面積から単位時間に流出する平均的な土壌粒子流出量 A_{ssl} が計算される。

$$A_{ssl} = RKLSC_i P_i \quad (1)$$

A_{ssl} : 土壌粒子流出量 ($\text{t ha}^{-1} 10 \text{ min}^{-1}$), R : 降雨係数 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} 10 \text{ min}^{-1}$), K : 土壌係数 ($\text{t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), L, S : それぞれ斜面長, 斜面勾配を表す地形係数 (-), C : 作物係数 (-), P : 保全係数 (-)

降水量から、降雨係数が計算され、式 (1) により土壌粒子流出量に影響を与える。降雨係数は式 (2) によって求められる。本研究では、降雨係数を 10 分ごとに計算した。

$$R = 0.119 + 0.0873 I_e I_{30} \log 6 I_e \quad (2)$$

I_e : 降雨強度 ($\text{mm } 10 \text{ min}^{-1}$), I_{30} :

一連続降雨中の最大 30 分間降雨強度 (mm)

気象の将来的な不確実性を考慮し、2011-2020 年の気象データを 10 年ごとに繰り返し適用する Base ケースと、福島県内の 2011-2020 年における 24 時間降水量の年間最大値が最大の 2019 年と、最小の 2018 年のデータを 2021 年以降に繰り返し適用する Max, Min ケースで ^{137}Cs 流出量を比較した。

(2) 森林樹種感度解析

本研究における森林モデルでは、RIFE1.5 モデル⁷⁾に基づき、5つの区画 (1: 樹体外部 (葉, 枝, 樹皮), 2: 樹体内部, 3: リター層, 4: 有機土壌, 5: 無機土壌) を設定し、区画間での ^{137}Cs 輸送を計算した。また、森林の樹種は落葉広葉樹, 常緑針葉樹, 低木・草・ササなどの 3 つに分類した。落葉広葉樹と常緑針葉樹では、事故直後の ^{137}Cs の初期沈着, 樹体・土壌での輸送が異なる。森林樹種感度解析における Base ケースでは、自然環境保全基礎調査第 5 回植生調査⁸⁾に基づき格子ごとに単一の樹種を設定した。ただし、実際には格子内に異なる樹種が混在する。さらに、第 5 回植生調査では、小円選択法により格子中央の約 5 ha の円内で最大の面積を占める群落で格子を代表している。そのため、格子ごとの代表群落についても、不確実性がある。これらを踏まえ、本研究では Base ケースに加えて、樹種を落葉広葉樹, 常緑針葉樹に統一する DB, EC ケースで森林から河川への ^{137}Cs 流出量を比較した。Table 1 に森林の各区画の初期 ^{137}Cs 沈着量を、Fig.3 に計算領域の Base ケースにおける樹種分布を、Fig.4 に森林モデルの概念図を示す。

Table 1 Initial ^{137}Cs deposition in Forests

	1	2	3	4	5
DB	0.17	0	0.11	0.41	0.31
EC	0.34	0	0.09	0.34	0.23

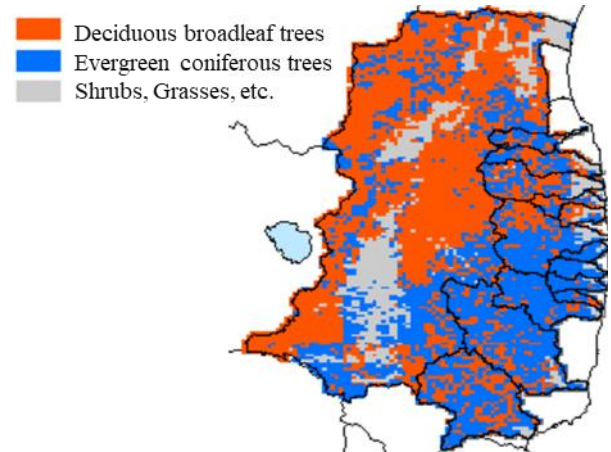


Fig.3 Distribution of dominant tree species

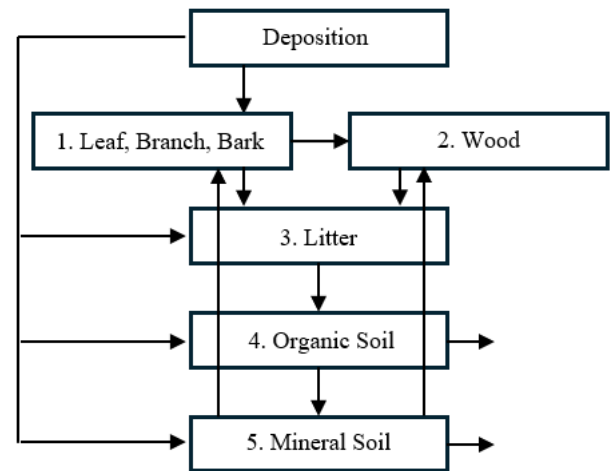


Fig.4 Diagram of forest model structure

(3) ダムによる堆積の感度解析

ダムに流入した ^{137}Cs の一部は堆積によりダムへ蓄積される。ダムにおける沈降はダム内の流れ場やダムの運用に大きく影響される。本研究では、トラップ効率 TE (流入する土壌粒子のうち、堆積する割合) を用いて、ダムへの土壌粒子の流入量に $1 - TE$ を乗じて、ダムからの土壌粒子の流出量を算出した。まず、福島県沿岸部 13 河川のダムにおける浮遊粒子堆積のある (ON) ケースとない (OFF) ケースで河川から海洋への ^{137}Cs 流出量を比較した。さらに、 ^{137}Cs 流入量の大きい請戸川の大柿ダムにおいて、トラップ効率の変化に対する河川からの ^{137}Cs 流出量の変化を推定した。大柿ダムにおいて、ダムへの ^{137}Cs 流入量に対するダムに堆積した ^{137}Cs の割合は、2013-2017 年の

7-11月で0.88⁹⁾であった。この観測値をもとに、3つのト
ラップ効率を設定した。Table 2 に計算ケースを示す。

Table 2 Calculation cases of TE (Trap Efficiency)

Calculation case	TE
1	0.69
2	0.83
3	0.96

2. 結果

2.1 降水量感度解析

Fig.5 に降水量感度解析の結果を示す。事故発生からの
30年間で、Base ケースでは 60 TBq 流出したのに対し、
Max ケースでは 17%増加し、Min ケースでは 10%減少した。
Max ケースにおいては 2021 年以降に毎年短期間で大き
く ¹³⁷Cs 流出量が増加しており、これは 2019 年は台風
19 号の影響で福島観測地点の 24 時間最大降水量が 250
mm に達していることが原因と考えられる。Fig.6 に降雨
係数の年間の合計値について、2011-2020 年平均、2019 年、
2018 年の空間分布を示す。降雨係数については、10 年間
の平均値では福島県沿岸部流域の東部・南部、阿武隈川流
域の南部を中心に 6000 を超える地域があった。2018 年
では、対象流域全体で 4000 を下回る地域が大部分を占め
た。一方、2019 年では、福島県沿岸部流域ではほぼ全
域で 6000 を超え、6000 を下回るのは阿武隈川流域の北
部と南部の一部のみであった。Fig.7 に Base, Max, Min
ケースにおける 30 年間の土壌粒子流出量の空間分布を示
す。Base ケースと比較して、全体としては降雨係数が大き
く増加した地域で土壌流出量が顕著に増加した。Max ケ
ースは特に 14 河川付近で流出量が大きくなった。一方、
河川から離れた場所では Max ケースでも 30 年間の土壌粒
子流出量が 1 kt を下回る地域が多かった。降雨係数に加
えて、土地利用や傾斜などの地形、土壌の種類なども土
壌粒子流出特性に影響するため、降雨係数の変化に対して
、感度が小さい地域が存在すると考えられる。

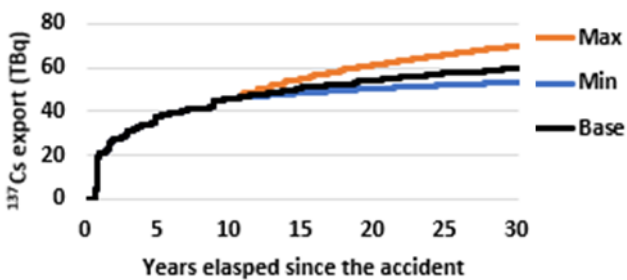


Fig.5 Cumulative ¹³⁷Cs export from eastern Fukushima 14 river basins

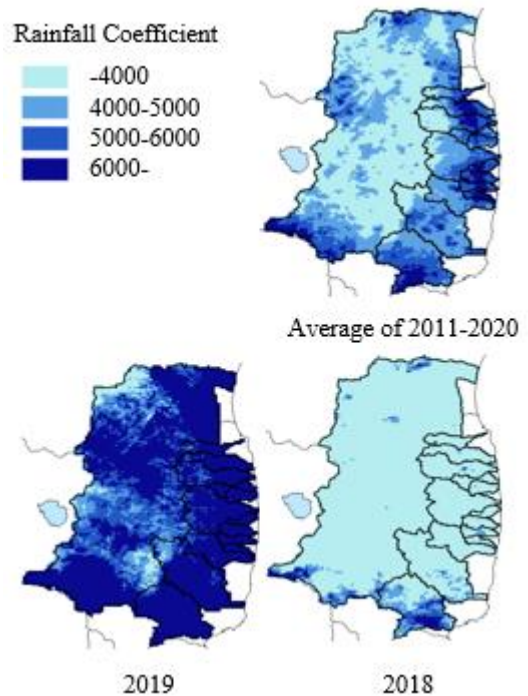


Fig.6 Rainfall coefficient in eastern Fukushima river basins

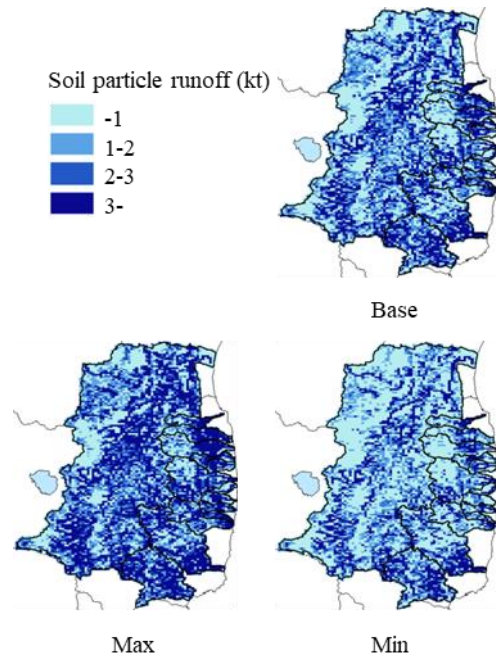


Fig.7 Cumulative soil particle runoff

2.2 森林樹種感度解析

Fig.8 に樹種感度解析の結果を示す。事故発生からの 30
年間で、森林から河川への ¹³⁷Cs 流出量は、Base ケースの
32 TBq に対して、落葉広葉樹 (DB) ケースで 19%増加し、
常緑針葉樹 (EC) ケースで 16%減少した。これは、事故
直後に落葉広葉樹では ¹³⁷Cs が直接有機土壌に沈着する割
合が大きかったことが原因と考えられる。一方、事故後
10 年目から 30 年目にかけては、常緑針葉樹の方が ¹³⁷Cs

流出量が多かった。常緑針葉樹では、事故直後には樹体外部やリターへの沈着割合が高いため、その後有機土壌に輸送され、長期間徐々に流出すると考えられる。

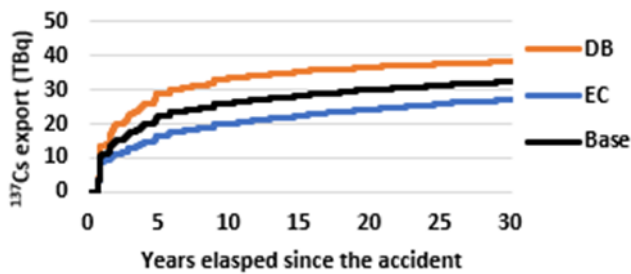


Fig.8 Cumulative ¹³⁷Cs export from forests

2.3 ダムによる堆積の感度解析

Fig.9 に福島県沿岸部 13 河川における、ON ケースと OFF ケースの河川から海洋への ¹³⁷Cs 流出量を示す。事故発生からの 30 年間で、ダムによる浮遊粒子の沈着により 9.2 TBq (21%) 流出量が減少した。2つのケースにおける流出量の差は計算期間全体を通して大きくなった。一方で、流域からの ¹³⁷Cs 流出量が減少しているため、時間の経過に伴い 2つのケース差の増加速度は減少した。

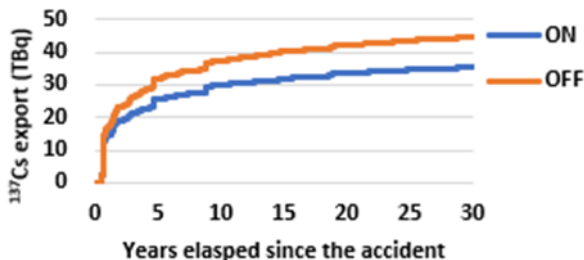


Fig.9 Cumulative ¹³⁷Cs export from coastal 13 river basins

Fig.10 に大柿ダムのトラップ効率の変化に伴う、請戸川からの ¹³⁷Cs 流出量の変化を示す。トラップ効率が 0.69 のケースでは、30 年間で 13.8 TBq 流出したが、トラップ効率が 0.1 上がると、流出量はおおよそ 0.8 TBq 減少した。

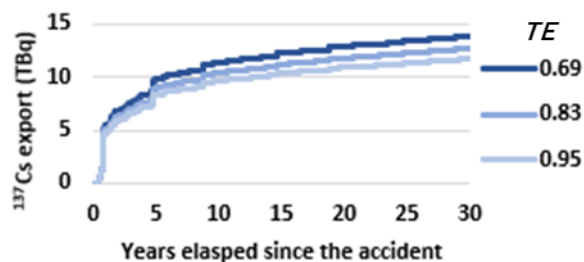


Fig.10 Cumulative ¹³⁷Cs export from Ukedo river

3. まとめ

本研究では、福島第一原子力発電所で事故が発生した 2011 年から 30 年間にわたって、福島県東部の河川流域

を対象として、降水量、樹種分布、ダムによる堆積が ¹³⁷Cs 流出に与える影響を長期シミュレーションにより推定した。降水量については、30 年間の河川から海洋への ¹³⁷Cs 流出量が、2021 年以降の降水量として 2011-2020 年で最大 24 時間降水量が最も大きい 2019 年の降水量を用いたケースで 17%増加し、最も小さい 2018 年の降水量を用いたケースでは 10%減少した。樹種分布については、30 年間の森林から河川への ¹³⁷Cs 流出量が、流域内の森林の樹種を落葉広葉樹に統一したケースで 19%増加し、常緑針葉樹に統一したケースで 16%減少した。ダムについては、ダムにおける浮遊粒子の堆積によって福島県沿岸部河川から海洋への ¹³⁷Cs 流出量が 21%減少した。また、大柿ダムにおけるトラップ効率が 0.1 上がると、請戸川からの ¹³⁷Cs 流出量はおおよそ 0.8 TBq 減少した。

参考文献

- 1) 文部科学省: 放射線量等分布マップの作成等に関する報告書 第 1 編
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/inkai/teirei/siryo2012/siryo11/siryo1.pdf>
- 2) 日本原子力研究開発機構: 放射性物質の分布状況等調査による航空機モニタリング
https://emdb.jaea.go.jp/emdb_old/portals/b1020201/
- 3) Ueda, S., Hasegawa, H., Ohtsuka Y., Ochiai, S., Tani T. T., 2021. Ten year radiocesium fluvial discharge patterns from watersheds contaminated by the Fukushima nuclear power plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 240, 106759
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106759>
- 4) Suzuki, S., Amano, Y., Enomoto, M., Matsumoto, A., Morioka, Y., Sakuma, K., Tsuruta, T., Kaeriyama, H., Miura, H., Tsumune, D., Kamiyama, K., Wada T., Takata H. H., 2022. Temporal variability of ¹³⁷Cs concentrations in coastal sediments off Fukushima. *Science of Total Environment*, 831, 154670
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154670>
- 5) 池之上翼, 2023. 河川を通じた ¹³⁷Cs の供給が福島沿岸海域における海底堆積物中の ¹³⁷Cs の長期的挙動へ及ぼす影響の評価, 大阪大学大学院工学研究科博士論文
- 6) Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses A Guide to Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture Agriculture Handbook No. 537.
- 7) Hashimoto et al., 2020. New predictions of ¹³⁷Cs dynamics in forests after the Fukushima nuclear accident. *Science Report* 10, 29
https://doi.org/10.1038/s41598019_568005
- 8) 環境省: 自然環境保全基礎調査第 5 回植生調査
- 9) 大柿ダムの放射性セシウムの実態と対策 第 2 版 東北農政局