Environment Research and Technology Development Fund Final Research Report

# 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

募 公 区 分 : 革新型研究開発(若手枠) 研究実施期間: 令和3 (2021) 年度 ~ 令和5 (2023) 年度 課 題 番 号 [1RF-2103] : 体系的番号 : (JPMEERF20211R03) 研究課題名 「原発事故地域における森林火災後の放射性物質・再拡散予測システ : ムの開発」 Prediction System for Radionuclides Redistribution due to Wild Fire in Research Title : **Contaminated Regions** 研究代表者名: 五十嵐 康記 研究代表機関名: 福島大学 研究分担機関名: 千葉大学 研究協力機関名: Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine 研 究 領 域 統合領域 : + -ワード : 原発事故、森林火災、放射性物質、大気モデル、水文モデル

令和6 (2024) 年5月

日	次
-	<i>v</i> 、

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書1
[課題概要]
1. はじめに(研究背景等)5
2. 研究開発目的
3. 研究目標
4. 研究開発内容
5. 結果及び考察11
6. 目標の達成状況と環境政策等への貢献23
(1) 研究目標の達成状況
(2) 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献25
7. 研究成果の発表状況
(1) 成果の件数
(2) 誌上発表
(3) 口頭発表
(4) 知的財産権
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施28
(6) マスメディア等への公表・報道等29
(7) 研究成果による受賞 29
(8) その他の成果発表 29
8. 国際共研究等の状況
9. 研究者略歴
Abstract

## [課題概要]

<課題情報>	

公募区分:	革新型研究開発 (若手枠)
研究実施期間:	令和3(2021)年度 ~ 令和5(2023)年度
課題番号:	【1RF-2103】
研究課題:	「原発事故地域における森林火災後の放射性物質・再拡散予測システムの開 発」
研究代表者:	五十嵐 康記(福島大学環境放射能研究所、特任講師)
重点課題(主):	【重点課題5】災害・事故に 伴う環境問題への対応に貢献する研究・技術開発
重点課題(副):	なし
行政要請研究テーマ (行政ニーズ):	該当なし
研究領域:	統合領域

<キーワード>

原発事故	
森林火災	
放射性物質	
大気モデル	
水文モデル	

<研究体制>

サブテーマ1「原発事故地域での森林火災後の放射性物質・再拡散予測システムの開発」

<サブテーマ1リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
福島大学	環境放射能研究 所	特任講師	リーダー:五十嵐 康記	
千葉大学	国際高等研究基 幹	教授	分担者:小槻 峻 司	2021 年 ~ 2023 年 度
福島大学	環境放射能研究 所	准教授	分担者:平尾 茂 一	2023年度

<サブテーマ1研究協力者>

機関名	部署名	役職名	氏名
-----	-----	-----	----

国立研究開発法人量子科	放射線医学研究所 計	<b></b>	Hu Jun (2021年~2022年
学技術研究開発機構	測 ・ 線量評価部	<b>妍</b> 九貝	度)

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	4,107千円	1,232千円	5,339千円
2022	4,107千円	1,232千円	5,339千円
2023	4,107千円	1,232千円	5,339千円
合計	12,321千円	3,686千円	16,017千円

<研究の要約>

2020年4月にチョルノービリで発生した森林火災(2020年ChEZ火災)は、数週間でチョルノービリ立入 禁止区域(ChEZ)の約20%を焼失した過去最大のものとなった。森林火災を起源とした<sup>137</sup>Csが、ウクライ ナ・キーウだけでなく、ヨーロッパ各地で観測された。放射性物質の濃度が高い地域での森林火災は、 大きな社会的影響を及ぼす可能性がある。したがって、森林火災により直接的に大気に放出される <sup>137</sup>Csの大気拡散や、鎮火後から水文過程による<sup>137</sup>Csの再拡散の把握は、一般市民への情報提供のため に重要である。本研究は、現地観測と衛星観測を用いて森林火災の発生面積と焼損度を迅速に推定し、 大気拡散モデルと水文モデルを用いて火災後の放射性物質の拡散を予測するための統合解析AIの開発 を目的とした。1996年4月から2020年4月までの期間 (過去20年)で合計33件の森林火災が発生し、500m 解像度の衛星観測(MODIS)超える火災は、2015年と2020年の2件だけであった。MODIS観測を入力と して延焼範囲を教師データとして用いない森林火災域判定AIを開発した。地上観測による延焼範囲を 真値として、延焼範囲の検出精度を幾つかの尺度を用いて森林火災域判定AIの精度を評価し、NASAや ESAのプロダクトと同等以上の検出精度を達成した。森林火災のリアルタイム運用として、2022年2月 のロシア軍によるウクライナ侵攻後の森林火災判定を実施した。開発されたアルゴリズムの日本におけ る適用性も検証し、30m解像度の衛星観測(LANDSAT)データを用いる事で、高解像度森林火災検出 の可能性が示された。2020年のChEZ火災によって大気中に放出された<sup>137</sup>Csの大気拡散を大気輸送モデ ルで計算した。火災により放出された<sup>137</sup>Csは数時間以内にキーウに到達し、大気中の濃度は、数十か ら数百 uBa/m<sup>3</sup>と、キーウのバックグラウンドレベルよりも約1桁高いことが示された。地表水循環モ デルによるシミュレーションでは、火災が発生した2020年に観測された高い<sup>90</sup>Sr濃度が森林火災の影響 である可能性が示された。また、2017年に福島県の帰還困難地域にて発生した森林火災を対象に、大気 中に放出された<sup>137</sup>Csの大気拡散を大気輸送モデルで計算した。実際の観測で検出された大気中<sup>137</sup>Cs濃 度の上昇が、「観測された<sup>137</sup>Csは十万山火災の発災地が直接のソースであった」あるいは「観測前に +万山火災の発災地から観測地及び下流方向に流された<sup>137</sup>Csが、観測期間中に観測地に押し戻され た」という2つのパターンで説明できる事を明らかにした。

1. はじめに(研究背景等)

2020年4月にチョルノービリで発生した森林火災(以下「2020年ChEZ森林火災」という。)は、数週 間でチョルノービリ立入禁止区域(ChEZ)の約20%を焼失した過去最大のものとなり、ChEZから約300 km離れたキーウ市内やヨーロッパ各地で大気中<sup>137</sup>Cs濃度の上昇が観測された(Talerko et al., 2021)。2020 年ChEZ森林火災時、地元の住民は「放射能を含むエアロゾルが、風により人口密集地に運ばれる」と いうことを心配した(New York Times, 2020)。このように、原発事故被災地など、環境中の放射性物質 濃度が高い地域における森林火災は、地元や近隣の住民にとどまらず、世界中に大きな心理的・社会的 影響を及ぼしうる。そのため、火災発生直後から大気拡散モデルや水文流出モデルなどによる放射性物 質の再拡散量を正確に把握・予測し、広く社会に周知する事が必要である。

2020年ChEZ森林火災では、合計で629 GBqの<sup>137</sup>Csがエアロゾルとして大気に放出されたと推定した (Protsak et al., 2020)。同時に、Evangeliou and Eckhardt (2020)は、2020年ChEZ森林火災で大気に放出され た<sup>137</sup>Csは10<sup>1</sup>~10<sup>3</sup> GBqと推定しており、放出量推定に用いる手法により2オーダー以上の差が生じてい る。これは推定の要となる、森林火災の発生地域(焼失面積)、及び、森林の焼損度の推定が極めて困難 な事に起因している。これまでChEZにおいて発生した森林火災は現地研究機関により焼損面積と焼損 度のモニタリングが実施されてきている。しかしながら、大規模火災時には遠隔地における焼損面積と 焼損度の把握が困難という状況があった。そこで、広域データを取得できる衛星観測を解析することで 火災発生地域と、その焼損度を推定するAIを開発し、焼損面積と焼損度を火災直後から迅速に推定で きるようになると考えた。これにより、森林火災により大気中に放出される放射性物質量の推定精度が 向上することが期待される。

原発事故影響地域においては、森林火災がない通常の場合においても、水と土砂の移動に伴って、 流域内にある放射性物質が再拡散する。例えば、流域内にある<sup>137</sup>Csの約0.015-2%(Helton et al., 1985; Smith et al., 2005),<sup>90</sup>Srの1% (Igarashi et al., 2020)が、毎年、河川を介して下流へ輸送されている。森林 火災がない状態でのエアロゾルとしての放射性物質の再拡散は、インベントリの0.0014-0.035% (Hollander and Garger, 1996)と推定される。つまり、河川における水と土砂の移動も放射性物質の再拡 散にとって重要な経路と考えられる。森林火災による流域の撹乱が、河川を介した放射性物質の再拡散 に影響し、結果として河川中の放射性物質濃度は介入を必要とする臨界レベルを超えるかどうかは、環 境影響と公衆衛生に関する重要な関心事である。しかしながら、森林火災が河川を介した放射性物質の

- Talerko, M., Kovalets, I., Lev, T., Igarashi, Y., Romanenko, O. (2021) Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wildland fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020. Atmos. Pollut. Res. 12, 193–204.
- New York Times (2020, April 11) Chernobyl Wildfires Reignite, Stirring Up Radiation. Retrieved from https://www.nytimes.com/2020/04/11/world/europe/chernobyl-wildfire.html (last access April 2, 2024)
- The Mainichi (2017, May 1) Wildfire rages in highly radioactive Fukushima mountain forest. Retrieved from https://mainichi.jp/english/articles/20170501/p2a/00m/0na/003000c (last access April 2, 2024)
- Protsak, V., Voitsekhovich, O., Laptev, G. (2020) Estimation of radioactive source term dynamics for atmospheric transport during wildfires in Chornobyl zone in spring 2020 (in Ukrainian). Kyiv.
- Evangeliou, N., Eckhardt, S., 2020. Uncovering transport, deposition and impact of radionuclides released after the early spring 2020 wildfires in the Chernobyl Exclusion Zone. Sci. Rep. 10, 10655.
- Helton, J.C., Muller, A.B., Bayer, A. (1985) Contamination of surface-water bodies after reactor accidents by the erosion of atmospherically deposited radionuclides. Health Phys. 48, 757–771. https://doi.org/10.1097/00004032-198506000-00004
- Smith, J.T., Belova, N. V, Bulgakov, A.A., Comans, R.N.J., Konoplev, A. V, Kudelsky, A. V, Madruga, M.J., Voitsekhovitch, O. V, Zibold, G., (2005) The "AQUASCOPE" simplified model for predicting <sup>89,90</sup>Sr, <sup>131</sup>I, and <sup>134,137</sup>Cs in surface waters after a large-scale radioactive fallout Health Phys. 89, 628–644.

https://doi.org/10.1097/01.HP.0000176797.66673.b7

- Igarashi, Y., Onda, Y., Smith, J., Obrizan, S., Kirieiev, S., Demianovych, V., Laptev, G., Bugai, D., Lisovyi, H., Konoplev, A., Zheleznyak, M., Wakiyama, Y., Nanba, K. (2020) Simulating dissolved <sup>90</sup>Sr concentrations within a small catchment in the Chernobyl Exclusion Zone using a parametric hydrochemical model. Sci. Rep. 10, 9818. https://doi.org/10.1038/s41598-020-66623-4
- Hollander, W., Garger, E. (1996) Contamination of Surfaces by Resuspended Material, ECP-1, Final Report, Rep. EUR 16527, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

### 2. 研究開発目的

本研究では以下の2点を研究目的とする。

(A) 現地・衛星観測の統合解析AIによる、迅速な森林火災域・焼損度推定

(B) 大気・水文モデルを用いた、森林火災後の放射性物質・再拡散予測

本研究により、森林火災の発生直後から大気・水文過程による放射性物質の拡散予測を可能とし、 担当行政機関や社会に向け正確な情報発信に資する基盤システムを開発する。

3.	研究	目標
υ.	- 10/ 764	-1 1示

	本研究の目的
	(A)現地・衛星観測の統合解析AIによる、迅速な森林火災域・焼損度推定
	(B) 大気・水文モデルを用いた、森林火災後の放射性物質の再拡散予測
	本研究の内容
	(I) 詳細な現地観測情報収集によるAI・モデル開発支援
	(II)現地・衛星観測の統合解析AIの構築
	(Ⅲ) 大気・水文モデルによる放射性物質拡散予測
	全体目標
	ウクライナ・チョルノービリ規制区域を対象として、森林火災面積・焼
	損度を推定するAIを構築する。さらに、森林火災監視AIの出力する焼損度
	を用いた、森林火災後の大気拡散・水文流出に関する再現実験を行う。特
	に火災規模の大きかった2015年、2020年のChEZ森林火災をターケットケー
	スに定め、最終的に本研究の推定値を学会発表・論文などで発表する。更
	に、森林火災推定AIの世界展開に同けた嚆矢として、日本・福島の森林火
	災の冉垷実験を行う。
	久理題の日博
	(I) 詳細か現地観測情報収集によるAI・モデル開発支援
	• 森林火災 AI システム構築のため、チョルノービリ規制区域内で過去 20
	年以内に起こった森林火災をGISデータとして整備する。
	<ul> <li>これまでの現地及び実験室における火災による森林や草地からの放射</li> </ul>
	性物質の拡散量推定係数(燃焼放出係数)をデータベースとして整備す
至  4日 悰	る。
	• 火災跡地からの表面流による溶存態・懸濁態それぞれでの放射性物質移
	行係数をデータベースとして整備する。
	• ChEZ とウクライナ・キーウ市における大気及び主要河川水中における
	放射性物質濃度の観測結果をデータベースとして整備する。
	<ul> <li>● チョルノービリ相制反応において 本林水災城・焼損産推定 AI システ</li> </ul>
	ムを構筑し 2015 年・2020 年本林水災を再現する
	<ul> <li>- 森林火災監視 AI@ChEZ のリアルタイム運用システムを構築する。</li> </ul>
	<ul> <li>森林火災監視 AI を、波江の火災でも検証する。</li> </ul>
	<ul> <li>森林火災監視 AI の精度は NASA の既存プロダクトと同程度以上の検出</li> </ul>
	精度を実現する。
	(III) 大気・水文モデルによる放射性物質拡散予測
	• AI の算出する焼損度を利用し、燃焼放出係数を用いて放出量推定サブ
	モデルを開発する。既存の大気拡散予測モデルを利用し、2015年や2020
	年の縦桥火災後の放射性物質・大気再拡散の再現実験を行う。 なん時代は毎週エブル CDUC た CDZ エジダブやか トント ### トス
	• 統合 座 奥 水 値 壊 セ テ ル SiBUC を、ChEZ で 計 鼻 可 能 な よ り に 整 備 す る。 更 た 、
	東に、     瓜州性物員・     瓜山ハノアクリビーンヨンを     写入の場合     マュニカフレアエデル     取取した上の     広は     安陸ならい     「     区     西     区     西     な     世     公     ロ
	ノオールへしてモアル開発した上で仏域夫缺を11い、原発争戦後 30 年 間の抜射歴物産満出書をエデルから明らかにする
	国の奴約11日初貝伽山里をモノルから切らかにする。

サブテーマ1	全体目標と同様
サブテーマ1実施機関	福島大学・千葉大学
サブテーマ1目標	全体目標と同様

4. 研究開発内容

< 【サブテーマ1】「原発事故地域における森林火災後の放射性物質・再拡散予測システムの開 発」の研究開発内容>

サブテーマ1では、本研究の目標(A)、(B)を達成するため、3課題を推進した。

#### (I) 詳細な現地観測情報収集によるAI・モデル開発支援

#### (II)現地・衛星観測の統合解析AIの構築

(III)大気・水文モデルによる放射性物質拡散予測

以下にその詳細を述べる。

(研究計画)

本研究の目標(A),(B)を達成するため、3課題を推進する。以下にその詳細を述べる。

#### (I)詳細な現地観測情報収集によるAI・モデル開発支援

五十嵐は、自身の現地調査やカウンターパートとの情報交換を踏まえ、詳細な現地観測情報を収集 する。なお、火災跡地からの表面流による溶存態・懸濁態それぞれにおける放射性物質拡散量の推定 は、先行研究において、一つのサブキャッチメントで放射性物質の流出量を表現するパラメタリゼーシ ョンを開発済みである(Igarashi et al., 2020)。本課題でも引き続き観測を継続し、更なる精度向上を図 る。

このうち令和3年度では、

#### [Ia] チョルノービリ・森林火災現場資料をGISデータとして整備

現地の消防及びChEZ管理庁により作成された森林火災現場資料(過去20年以内)を収集する。資料はGISデータとして整備し、森林火災AIの開発に結びつける。

令和4年度では、

#### [Ib] 燃焼放出係数を用いた放出量推定サブモデルの開発と実装

大気拡散・水文流出モデルを検証するための観測データは取得済みである。引き続き情報取得に努めつ つ、大気・水文再拡散モデルを開発するためのデータを構築する。火災による森林や草地からの放射性 物質の拡散量は、実験的に求められた係数及び経験式(燃焼放出係数:例えば、Yoschenko et al., 2006; Hao et al., 2018)を用い、パラメトリックに焼損度と放出量を決定する。

#### (II)現地・衛星観測の統合解析AIの構築

森林火災域については、MODISプロダクトが既に利用可能である。ただし、MODISプロダクトは全球 を対象にしたものであり、実際に現地観測とは分布が異なる(図1①と③)。本課題では、森林火災 域の<u>高解像度化と高精度化</u>、さらに<u>焼損度の推定</u>を目的とする。基本となるアルゴリズムは、極軌道衛 星の観測する可視・近赤外・赤外の波長情報から森林火災域を診断する、アンサンブル学習器Random Forestである。このプロトタイプは既にこれまでの研究で完成している。本研究では、人が恣意的にチ ューニングする必要なく閾値を推定する手法を、統合解析AIとして構築する。



図1(左)開発する森林火災(WF)監視システムの全体像と(右)現在の進捗状況。長方形・ひし形はそれ ぞれデータとデータ処理を意味し、「Algorithm」が開発する森林火災監視AIのメインパートである。 右は、① MODISによる火災推定場所、②申請時点におけるAIによる判定結果、③現地観測により焼損 が確認された箇所。★は、本研究でプロトタイプを更新し、精度向上を図る箇所を示している。

#### このうち、令和3年度では、

#### [IIa] 森林火災監視AI@ChEZの精度向上と現地観測を用いた高度化(小槻)

高解像度・高頻度な可視・赤外観測を整備する。1日に1度得られる500 m解像度のMODIS観測と16日に 1度得られる30 m解像度のLANDSAT画像を合成し、高解像度・高頻度な入力を整備する。その上で過 去のMODIS-WFを教師データとし、AIを訓練する。このAIを事前学習器とし、[Ia]で得られる詳細な観 測データに基づき更に訓練を深め、高精度化を図る。AIにより森林火災域を推定し、その上でMODIS の地表面温度情報から特異値をマスクアウトし、AIの予測情報とする。森林火災監視AIの精度はNASA の既存プロダクトと同程度以上の検出精度を実現する。

令和4年度では、

## [IIb] 森林火災監視AI@ChEZの長期解析。焼損度の推定へAIを高度化。(小槻)

チョルノービリ規制区域における過去20年分の森林火災データを用い、森林火災AIシステムを構築 し、2020年森林火災結果を再現する。また、リアルタイム運用により、研究期間中に森林火災のあった 場合に早期診断可能か確認する。なお、現地では2年に1度程度森林火災が発生している。ここまでで完 成したAIは、森林火災域の「面積」推定に特化したものであるが、更に現地観測で「焼損度」の情報 を予測値とし、AIによる焼損度推定を実施する。

令和5年度では、

#### [IIc]森林火災監視AI@東北で開発・実験(小槻・平尾・五十嵐)

ウクライナのチョルノービリ規制区域を対象として開発したアルゴリズム(森林火災監視AI)のうち焼損 面積判定を日本で適用する。チョルノービリ同様、森林火災域・非森林火災域のバンドヒストグラムか ら、自動的に(恣意的な人のチューニングなしに)閾値を推定する手法を適用する。森林火災監視AI の検証には、林野庁が作成した2017年福島県浪江町森林火災(以下「十万山火災」という。)報告書を 使用する。

2017年に福島県浪江町で発生した十万山火災を対象に、放射性物質の大気拡散モデルを適用し、気象場、<sup>137</sup>Csの大気拡散及び放出源情報の精度検証を行う。

### (Ⅲ)大気・水文モデルによる放射性物質拡散予測

ウクライナ原子力発電所安全規制機構により運用されている、大気による放射性物質の拡散予測モデル (Talerko et al., 2014; 2019)を用いる。小槻が開発してきた統合陸域水循環モデルSiBUC (Kotsuki et al., 2013, 2015)に、放射性物質流出モジュールを導入する。小槻はIgarashi et al. (2020)によるパラメタリ ゼーションを SiBUC の流出過程に組み込み、より広域の放射性物質・流出予測システムを構築する。 現実の観測量を再現可能か確認した上で広域実験を行い、原発事故後30年間の流域流出量が再現可能か どうかを明らかにする。

このうち、令和3年度では、

#### [**IIb**] 水文モデルSiBUC@ChEZの開発とパラメタリゼーションの導入(小槻)

小槻が開発してきた統合陸域水循環モデルSiBUC (Kotsuki et al., 2013, 2015) に、放射性物質流出モジュ ールを導入する。小槻はIgarashi et al. (2020) によるパラメタリゼーションを SiBUC の流出過程に組み 込み、より広域の放射性物質・流出予測システムを構築する。まず、SiBUCをChEZで実行可能なよう に入力・計算条件を整備し、現地観測降水量などを使った解析で、現地の水文量(流出量、蒸発散量、 地表面温度)が再現可能か明らかにする。その上、放射性物質・流出パラメタリゼーション導入する。 まず一つのサブ流域にフォーカスしてモデル開発・パラメータ推定を行い、現実の流出量を再現可能か 確認した上で広域実験を行い、原発事故後30年間の放射性物質流出量をモデルから明らかにする。

#### 令和4年度では、

#### [Ⅲa] 大気拡散予測モデルによる2020年、及び、過去の火災結果の計算(五十嵐)

ウクライナ原子力発電所安全規制機構により運用されている、大気による放射性物質の拡散予測モデル (Talerko et al., 2014; 2019)を用いる。前述の森林火災AIシステムにより推定された焼損面積をモデル の入力値とする。AIによる焼損度推定は行わず、既存文献から燃焼放出係数を3パターン(低・中・高 焼損)用意し、大気拡散・水文流出に関する再現実験を行う。焼損面積、燃焼放出係数の違いが最終的 な放出量に影響するかを定量的に示す。

令和5年度では、

## [IIIa,b]森林火災監視AIと大気拡散・水文輸送モデルを結合し、ChEZの複数流域における放射性流出・ 再現実験。現地データと比較し、検証する(五十嵐・小槻)

ウクライナ原子力発電所安全規制機構により運用されている、大気による放射性物質の拡散予測モデル (Talerko et al., 2014; 2019)を用いる。前述の森林火災AIシステムにより推定した焼損面積をモデルの入 力値とする。AIによる焼損度推定は行わず、既存文献から燃焼放出係数を3パターン(低・中・高焼 損)用意し、大気拡散・水文流出に関する再現実験を行う。焼損面積、燃焼放出係数の違いが最終的な 放出量に影響するかを定量的に示す。

小槻が開発してきた統合陸域水循環モデルSiBUC (Kotsuki et al., 2013, 2015)に、放射性物質流出モジュ ールを導入する。小槻はIgarashi et al. (2020)によるパラメタリゼーションを SiBUCの流出過程に組み込 み、より広域の放射性物質・流出予測システムを構築する。まず、SiBUCをChEZで実行可能なように 入力・計算条件を整備し、現地観測降水量などを使った解析で、現地の水文量(流出量、蒸発散量、地 表面温度)が再現可能か明らかにする。その上、放射性物質・流出パラメタリゼーション導入する。ま ず一つのサブ流域にフォーカスしてモデル開発・パラメータ推定を行い、現実の流出量を再現可能か確 認した上で広域実験を行い、原発事故後30年間の放射性物資流出量をモデルから明らかにする。

#### 結果及び考察

#### (I) 詳細な現地観測情報収集によるAI・モデル開発支援

### [Ia] チョルノービリ・森林火災現場資料をGISデータとして整備

ウクライナの研究協力者(ウクライナ原子力発電所安全規制機構/Talerko博士)と共に、現地の消防 及びChEZ管理庁により作成された森林火災状況報告を調査した結果、森林火災の焼損記録が残る1996 年4月から2020年4月までにChEZにて発生した森林火災の総件数が33件であった。森林火災域判定 AI([II])で使用するMODISの解像度は0.25 km<sup>2</sup>であり、それを超える火災は、2015年と2020年に発生し た2件のみであった。したがって、本研究では、2015年と2020年の森林火災を以降の解析対象とした。 ChEZの土地利用は、数ha程度の区域(ウクライナ語でvydil)と、複数のvydilをまとめたquartalsとして 一括管理されている。提供されたデータは全てのvydilにおける焼失面積の調査結果を含んでおり、こ れらの表データをGISデータとして整備した(図2)。整備されたGISデータは、[IIa]及び[IIb]で記載する 森林火災域判定AI(業績2)の検証データとして使用した。これにより、現地の森林火災現場資料(過去 20年以内)を収集し、GISデータとして整備し、森林火災AIの開発に結びつけるという目標を達成し た。

現地の消防及びChEZ管理庁により作成された森林火災調査は、焼損面積を明らかにすることを目的 に作成されており、森林火災による放射性物質の大気への放出量に寄与すると考えられる延焼域の焼損 度データを含んでいなかった。このため、2021年10月に延焼域の焼損度を明らかにするための現地調査 を実施した。現地カウンターパートから得られた延焼地の情報に加え、当該域の衛星画像(Sentinel-2)を 取得し、森林火災の焼損が特に激しいと考えられる地点から、焼損していない地点を抽出し実際に現地 に赴いた。調査地では、樹皮表面に残る燃焼痕(火災により樹皮が黒く焦げている部分)の高さを計測し た。現地調査の結果、焼損状況が以下の3つ、(1)高焼損:樹皮の燃焼痕が5 mを超え林冠部にまで 達し樹木が枯死、(2) 中焼損:樹皮の燃焼痕が5 m以内であるが樹木が枯死、(3)低焼損:樹皮の 燃焼痕が1-2 m程度で樹木が生存、に区分できた(図3)。2020年のChEZ火災の大部分における焼損と は、下層植生や林冠を形成する樹木樹皮の燃焼であった(Protsak et al., 2020)。しかし、焼損度が高いと 判定された地点では、Ao層上部のリター層だけでなく、その下にある腐食層も燃焼していたことがわ かっている(図4左)。本研究による現地調査の結果から、燃焼が腐食層にも及んだ地点においては、火 災から1年半後、主灰が完全に流亡し、BあるいはC層が剥き出しの状態が続いており、地表面植生の回 復もほとんど進んでいないことが明らかとなった(図4右)。



図2. 現地の消防及びChEZ管理庁により作成された2015年と2020年大規模火災範囲。赤枠内がチョルノ ービリ立入禁止区域。赤色斜線域は2015年火災範囲。黄色斜線域は2020年火災範囲を示している。図 は業績2より引用。

 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 ・
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1

図3.2020年ChEZ森林火災で延焼した地域の焼損状況



図4.2020年ChEZ森林火災時に現地で撮影された林床の燃焼状況(左)。2021年10月に左の写真と同じ サイトで撮影した林床の状況(右)。

### [Ib] 燃焼放出係数を用いた放出量推定サブモデルの開発と実装

大気輸送モデル及び水文輸送モデルにて必要となる初期沈着量データをノルウェー大気研究所デー タリポジトリ(https://radio.wp.nilu.no/)より取得した。これに加え、チョルノービリ周辺における、正確 な放射性物質沈着量を再現するため、ウクライナ原子力発電所安全規制機構 タレルコ博士及び、ノル ウェー大気研究所 ニコラウス・エヴァンゲリウ博士により作成された追加の詳細資料をもとに、原発 事故直後の放射性物質沈着量マップをGISデータとして再構築した(図5)。統合陸域水循環モデル SiBUC (Kotsuki et al., 2013, 2015)をChEZで実行可能にするため、チョルノービリエコセンターより現地 観測データを取得し整備した(図6)。

本研究では、火災により地表面から大気へ放出される放射性物質の拡散量 (Bq/m<sup>2</sup>) を、燃焼放出係数(k;%)と焼損場所のインベントリ(Bq/m<sup>2</sup>)から決定した。ChEZ内の植生は、森林と草地に分けられ、 それぞれk<sub>forest</sub> = 0.8 (%)、k<sub>grass</sub> = 0.005 (%)である (業績7)。

これにより、R3研究計画の「大気・水文再拡散モデルを開発するためのデータを構築」と、「火災 による森林や草地からの放射性物質の拡散量をパラメトリックに焼損度と放出量を決定」という、当初 目標を達成した。よって、計画通り進展したと言える。



図5. プリピャチ川流域における<sup>137</sup>Cs及び<sup>90</sup>Srの初期沈着量マップ。赤点は流域下端の観測点。放射性物質の初期沈着量データは、ウクライナ・チョルノービリエコセンターより取得した。



図6. ChEZの河川(Pripyat川)における事故直後から現在までの河川流量、溶存及び懸濁態<sup>137</sup>Cs濃度、<sup>90</sup>Sr 濃度の観測結果。河川流量・河川中の放射性物質濃度データは、ウクライナ・チョルノービリエコセン ターより取得した。

#### (II)現地・衛星観測の統合解析AIの構築

#### [Ⅱa] 森林火災監視AI@ChEZの精度向上と現地観測を用いた高度化

1日に1度得られる500 m解像度のMODIS観測を入力として、2020年の延焼範囲を教師データとして用 いない、森林火災域判定AIを開発した(図7)。このアルゴリズムのポイントは、森林火災前後の複数の 植生指標変化を利用することで、森林火災のシグナルを特定することにある。ここで、シグナル特定に 当たっては、既存研究では植生指標毎に閾値を手作業で調整する必要があった。本研究では、森林火災 の候補域と、森林火災では非候補域でそれぞれ植生指標のヒストグラムを作成し、両者を比較すること で、この閾値を自動決定することに成功した。本プロジェクトでは、適応型閾値(AT:adaptive threshold)、ATとランダムフォレスト(RF:random forests)の併用アルゴリズムを開発し、NASAの既存プ ロダクトと延焼範囲の検出精度を検討した(図8)。地上観測による延焼範囲を真値として、それぞれの 手法で推定された延焼範囲の検出精度を後討した(図8)。地上観測による延焼範囲を真値として、それぞれの 手法で推定された延焼範囲の検出精度を幾つかの尺度を用いて評価した(図9)。推定精度は様々な評価 手法があるが、総合的な評価としてはCritical Success Indexを確認するのが最も適切だと考えられる。 本プロジェクトによるTA及びTA/RF併用のCritical Success Indexは、NASAやESAによる既存プロダクト と同等か、それ以上の精度により延焼範囲を検出できることが示された(図9)。これにより、R3研究計 画の「森林火災監視AIの精度はNASAの既存プロダクトと同程度以上の検出精度を実現する」という、 当初目標を達成した。よって、計画通り進展したと言える。



図7. 本研究で開発した森林火災域検知AIの概要。業績5のFigure 1を改変したもの。



図8. 現地での延焼範囲の地上観測結果 (黄色コンター)と、延焼範囲推定値 (赤)の比較。(上)本研究の 手法、(中) NASAの既存プロダクト MCD64A1、(下) ESAの既存プロダクト Fire CCI51であり、2020年4 月の森林火災の例。業績5のFigure 5から引用。



図9. 適応型閾値(AT:adaptive threshold)、AT、ランダムフォレスト(RF:random forests)、NASAの既存プロダクト MCD64A1、(下) ESAの既存プロダクト Fire CCI51の、2015年・2020年の現地観測森林火災データとの比較。業績5のFigure 6から引用。

### [IIb] 森林火災監視AI@ChEZの長期解析。焼損度の推定へAIを高度化

これまで示したように、2020年ChEZ森林火災については、NASA・ESAを上回る精度での再現に成功 している。本プロジェクト推進中の2022年2月に、ロシア軍の侵攻を受けてウクライナは戦争状態に入 り、本研究で対象とするチョルノービリ原発汚染区域もロシア軍により占領された。現地の報道から、 チョルノービリ原発汚染区域においても戦禍の影響とみられる森林火災発生が示唆されていた。奇しく も、本プロジェクトではリアルタイム森林火災検知を目標に掲げて研究を始めており、2022年2月以降、 本戦争に伴う森林火災の影響推計を緊急対応として実施した(業績2)。診断結果を順次、現地の共同研 究者と共有し、放射性物質拡散の危険度をリアルタイムでモニタリングし、国内外の共同研究者と情報 を共有した (図10)。これにより、研究計画の「リアルタイム運用により、研究期間中に森林火災のあった場合に早期診断可能か確認」するという、当初目標を達成した。よって、計画通り進展したと言える。



図10.2022年春のチョルノービリ規制区域の森林火災域。2月(紫)、3月(緑)、それ以降(赤)に診断された森林火災域を示している。業績2を改変し引用。

#### [IIc]森林火災監視AI@東北で開発・実験

開発したアルゴリズムを日本でも適用可能か検証し、2017年に浪江町で発生した森林火災の再現性 を評価した(図11)。具体的には、業績2で開発済みのパラメータチューング不要の森林火災域検知アル ゴリズムについて、2017年4月の福島・浪江火災への開発アルゴリズムの適用・検証を進めた。日本で は、より高解像度の植生指標が必要となることから、500 m解像度のMODISではなく、30 m解像度の Landsat衛星の植生指標を用いて森林火災域の検知を行い、林野庁(2019)と概ね整合的であることを確認 した。この中で、当該地域の森林はコナラ等の落葉紅葉樹林や、スギを中心とする人工林がパッチ状に 分布していることもわかった。樹種毎の焼損面積や焼損度を加味した。更なる高精度な森林火災の検知 には、Landsat衛星のような低頻度観測衛星のデメリットを緩和するための複数衛星の利用、多様な土 地被覆データの利用についての更なる検討が必要であるとの知見に至った。



図11.2017年十万山火災についてH30年度林野庁国有林火災跡地におけるモニタリング (林野庁,2019)を 基に実際の延焼範囲を特定し森林火災AIを適用した (右図)。延焼範囲を概ね検出できている。

本研究では、2017年に福島県浪江町十万山にて発生した森林火災での大気中<sup>137</sup>Cs濃度に関する実測 データを整理し、大気拡散モデルにより再現すべき論点を整理した。森林火災は、2017年4月29日に発 災し、浪江町十万山山域の約75 haを焼損し、5月10日に鎮火した。鎮火するまでの間及び鎮火後にかけ て、福島県は、現場周辺において可搬型モニタリングポストによる空間線量率のモニタリングに加え て、大気浮遊じんのモニタリングを実施した。火災中に観測された大気中<sup>137</sup>Cs濃度のデータとして、 福島県「林野火災現場周辺の放射線モニタリングの結果(第16報)」から、やすらぎ荘(浪江町大字井 手字)、石熊公民館(双葉町大字石熊)、野上集会所(大熊町大字野上)の3地点(いずれも山火事5 km 圏内)において2017/5/1-16にかけて県が実施した大気中<sup>137</sup>Cs濃度観測を使用した。本研究では、福島県 内の観測地点で観測された大気中<sup>137</sup>Cs濃度を平常時として考えた。平常時として使用したデータは、 原子力規制委員会「原子力規制庁及び福島県による大気浮遊じんの測定結果」から、県内5地点におけ る2016~2018年までの大気中<sup>137</sup>Cs濃度の結果を使用した。それぞれの観測地点で観測された平均的な 大気中<sup>137</sup>Cs濃度は、観測地点の周囲から巻き上げられたダスト等の影響を受けていると考えられる。 したがって、地点間における大気中<sup>137</sup>Cs濃度の大小を比較するため再浮遊係数(1/m)を求めた。再浮 遊係数(1/m)は、観測された大気中<sup>137</sup>Cs濃度(Bq/m<sup>3</sup>)を、観測が実施された地点から半径5 km以内の 平均<sup>137</sup>Csインベントリ(Bq/m<sup>2</sup>)で除し求めた。解析の結果、石熊地点(発災場所から東南東に直線距 離で3.8 km)の再浮遊係数のみ、火災前後に福島県内の複数地点での再浮遊係数から最大で1オーダー 程度高くなっていた(図12)。ここで、地表面から大気へのフラックス(浮遊量)を変動させる要因は 複数あるが、除染活動を含む人為活動、風などの自然現象による擾乱、空気塊の起源が時間変化するこ とで生じると考えられ、火災前でも大気中<sup>137</sup>Cs濃度、つまり瞬間的に再浮遊係数が高くなったと考え られる。



図12.2016年から2018年における福島県内の複数地点での再浮遊係数 (1/m)。十万山火災期間中に福島 県により実施されたやすらぎ荘 (青)、石熊公民館 (赤)、野上一区地区集会所 (緑)の結果と、原子力規 制委員会による県内5地点における2016~2018年までの再浮遊係数。

図12で見られた再浮遊係数の上昇と、当時の風向との関係を検討した。本研究では、十万山に最も 近いAMeDAS浪江観測点データ(十万山から約7.8 km)の風向が、十万山の発災地、やすらぎ荘、石熊 公民館、及び野上集会所における時事刻々の風向と同じと仮定した。火災期間中とその後7日に渡り、 福島県により実施された大気中<sup>137</sup>Cs濃度観測の中で、十万山方向が観測期間中の主風向となった観測 (2017/5/8:やすらぎ荘と石熊公民館,2017/5/11:やすらぎ荘と石熊公民館,2017/5/16:石熊公民館,2017/5/17: 石熊公民館)では、再浮遊係数が通常時と考えられるレベルよりも高い結果となった(図13 オレンジ の範囲)。そして、十万山方向が観測期間中の主風向にならなかった場合(2017/5/12及び5/17:石熊公民 館)でも、再浮遊係数が通常時よりも上昇した観測(図13 赤の範囲)があることが判明した(図13)。



図13. 十万山火災期間中における各地点での再浮遊係数。やすらぎ荘(青)、石熊公民館(赤)、野上一 区地区集会所(緑)における結果は点で、黒破線は規制庁における長期観測地点(浪江、相馬、田村、 二本松、福島)における2017の平均値。オレンジで囲った部分は、十万山方向が観測期間中の主風向と なった観測。赤で囲った部分は、十万山が観測期間中の主風向で無いにも関わらず再浮遊係数が上昇し た観測。

当時の風向だけでは、各観測地点における再浮遊係数の上昇と十万山火災との因果関係を十分に説明 できなかった。したがって、本研究では、十万山火災において、火災による噴煙と、鎮火後も大気ダス トとして延焼地から<sup>137</sup>Csが大気に放出されたと仮定し、大気輸送モデルにより<sup>137</sup>Csの大気拡散を計算 した。気象場計算に使用したモデルは、理化学研究所計算科学研究センターが開発している SCALE (Scalable Computing for Advanced Library and Environment) version 5.4.5に含まれる領域モデル (SCALE-RM: SCALE-Regional Model) である(Nishizawa et al 2015; Sato et al 2015)。本モデルに<sup>137</sup>Csを模 擬したパッシブトレーサーの移流拡散を計算するモジュールを新たに導入した。ただし、放出地点のご く近傍を対象にしていることから、ここでは沈着過程を含めないこととした。雲微物理スキームとして 1 モーメントバルク法 (Tomita et al. 2008)、水平方向の渦粘性係数を計算する乱流スキームとして Smagorinsky-Lilly 型のサブグリッドスケール乱流モデル (Smagorinsky 1963; Lilly 1962; Brown et al.1994; Scotti et al. 1993)、乱流による鉛直混合を計算する惑星境界層スキームとしてMellor-Yamada レベル型 2。5 の改良スキーム (Mellor and Yamada 1982; Nakanishi and Niino 2004) 、放射スキームと して相関 k 分布法ブロードバンド大気放射伝達モデル(Sekiguchi and Nakajima 2008)をそれぞれ使用 した。地表面フラックスは、海面・陸面・都市モデルで逐次計算される地表面状態から求めたバルク交 換係数で計算した。バルクスキームは普遍関数によるバルク法 (Beljaars and Holtslag 1991; Wilson 2001) 、陸面スキームは熱拡散バケツモデル、都市スキームは単層キャノピーモデル (Kusaka et al. 2001)を使用した。海洋モデルは用いず、海面の温度 (SST)を初期値から与えられた計算開始時刻の 値で固定した。また、標高データと土地利用区分データは、United States Geological Surveyの GTOPO30 と Global Land Cover Characterization (GLCC ver. 2) をそれぞれ使用した。モデル計算における水平解像 度は 1km、鉛直 39 層である (最下層の層厚は 50 m、モデル上端は 15 km)。モデル出力は 1 時間ご とである。解析には高さ 10 m の風向風速、高さ 2 m の気温、を使用した。計算領域は福島浜通り全 域と一部太平洋を含む領域とした。初期値・境界値には、気象庁メソ解析データ (meso-scale analysis; MANL; Japan Meteorological Agency 2020) を使用した。これは 3時間ごと、水平解像度が 5 km の気 象データ (水平風速、気温、比湿、雲を構成する水物質、気圧) である。計算期間は 2017年4月28日 00UTCから 2017年5月18日 00UTCとした。計算開始から1日は助走期間とした。<sup>137</sup>Csの大気放出は、 37.448318532548036、140.91611496329537を含む格子からの体積線源として与えた。ただし、1kmの水 平解像度では十万山の山頂高度が十分に再現できないため、上空103-159mの高さから放出させた。こ こで、十万山火災では、火災による噴煙と、鎮火後も大気ダストとして延焼地から<sup>137</sup>Csが大気に放出 されたと仮定した。そして現状では、実際の放出量を正確に推定することが困難であった。このため、

本研究では、放出量 (Bq/sec) を任意の定数として与え、大気中<sup>137</sup>Cs濃度 (Bq/m<sup>3</sup>) は放出量で規格化す ることで相対的な値 (Bq/m<sup>3</sup>/Bq/sec) として表現した (図14右)。

2017/5/11に石熊公民館で実施された観測期間中、AMeDASの風向データは十万山方向が風上となる 270°を示していた(図14左)。そして、大気輸送モデルを用い<sup>137</sup>Csの大気拡散を再現した結果、 2017/5/11 12:00 (JST)における<sup>137</sup>Csの大気拡散状況も、十万山をソースとして東側の石熊公民館方向へ 流れていることが確認された(図14右)。ここでは、2017/5/11での石熊公民館における観測結果を例と して示したが、2017/5/8のやすらぎ荘と石熊公民館、2017/5/11のやすらぎ荘、2017/5/16の石熊公民館、 2017/5/17の石熊公民館と、全ての観測中に、十万山方向が観測期間中の主風向となっており、大気輸 送モデルを用い<sup>137</sup>Csの大気拡散の再現が十分できていたことを確認した。



図14. 石熊公民館における大気中<sup>137</sup>Cs濃度と浪江AMeDASにおける気象観測の結果 (左)。-:<sup>137</sup>Cs (mBq/m<sup>3</sup>),-: *W*<sub>s</sub> (m/s), •: *W*<sub>d(AMeDAS)</sub> (deg.), 赤桃黄:十万山風上。大気輸送モデルを用いた十万山からの <sup>137</sup>Csの大気拡散状況の再現 (右)。

図13で示したとおり、2017/5/12に石熊公民館で観測された再浮遊係数は、全観測期間を通して最大 であった。観測中の主風向はおおよそ90~180°と南東風であり、2017/5/12に石熊公民館で観測された 大気中<sup>137</sup>Cs濃度は、十万山火災がソースではないと考えられてきた。しかしながら、大気輸送モデル の結果から、石熊公民館における観測直前の風向が北西方向で十万山方向となっており、十万山方向か ら<sup>137</sup>Csが南東方向に流されている事がわかった(図15 a,b)。そして、観測が始まった10:57以降、周辺 の風向が180°程度変化し、それまで十万山方向から南東側に流されていた<sup>137</sup>Csが北西方向に押し戻さ れる状況が再現された(図15 c-f)。したがって、2017/5/12に石熊公民館で観測された最大の再浮遊係数 は、十万山火災により大気に放出された<sup>137</sup>Csの一部を捕捉した可能性が示された。また、2017/5/17 も、観測直前に十万山方向からの北西風で観測開始後に南東風となる同様の現象が確認された。大気輸 送モデルの結果から、図13で示した全ての観測値(再浮遊係数)が、「観測された<sup>137</sup>Csは十万山火災の 発災地が直接のソースであった」あるいは「観測前に十万山火災の発災地から観測地及び下流方向に流 された<sup>137</sup>Csが、観測期間中に観測地に押し戻された」という2つのパターンで説明できる事がわかっ た。

本研究の結果から、2017/5/8-16にかけて平常時の再拡散係数を大きく上回る7つのイベント全てが十 万山火災を起源としていたと考えられる。これらのイベントの中で、最大の大気中<sup>137</sup>Cs濃度は、0.0045 (Bq/m<sup>3</sup>) (5/12 石熊公民館)であった。「放射能濃度等測定方法ガイドライン」(環境省、平成25年3 月、第2版)では、3ヶ月間の平均濃度について<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csの場合として各濃度限度に対する割合の和 が1 (Bq/m<sup>3</sup>)を越えないとされている。福島県内において規制庁により大気中<sup>137</sup>Cs濃度が測定されてい る。また、福島県により火災中の大気中<sup>137</sup>Cs濃度も測定されている。この結果から、最大となった大 気中<sup>137</sup>Cs濃度が14日間(火災期間中)続いたと仮定し、90日平均大気中<sup>137</sup>Cs濃度を推定した(表1)。その結 果、相馬市中村および浪江下津島の観測点で推定された濃度は、放射能濃度等測定方法ガイドラインで 定める濃度の1/313、1/1250となった。したがって、十万山火災により大気中に<sup>137</sup>Csが放出されていた としても、それを原因とする追加被ばくの可能性は限りなく小さいものと考えられる。一方で、火災現 象は頻度が少なく研究の検証機会が少ないため、現地においては継続的な環境モニタリングに基づく科 学的な情報発信が今後も必要であると考えている。



図15.2027年5月12日に実施された観測直前から観測中における、大気輸送モデルによる風向風速場の 再現状況と、当時の規格化大気中<sup>137</sup>Cs濃度の再現結果 (Bq/m<sup>3</sup>/Bq/sec)。赤点はAMeDAS浪江観測点。

表1. 原子力規制庁及び福島県による火災中の大気浮遊じん(<sup>137</sup>Cs)の測定結果と、バックグラウンド濃度 が76日、火災期間に測定された最大大気中<sup>137</sup>Cs濃度が14日継続した場合の90日平均大気中<sup>137</sup>Cs濃度の 結果。

サイト	バックグラウンド大気中 <sup>137</sup> Cs	s 火災中の大気中 <sup>137</sup> Cs濃度	90日平均した大気中 <sup>137</sup> Cs濃度
	濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	(Bq/m <sup>3</sup> )	(Bq/m <sup>3</sup> )
相馬市中村	0.0029	0.0045	0.0032
浪江下津島	0.0002	0.0045	0.0008

[IIc]では、ウクライナのチョルノービリ規制区域を対象として開発したアルゴリズム(森林火災監視 AI)のうち焼損面積判定を日本で適用し、林野庁(2019)と概ね整合的であることが確認された。そし て、2017年に福島県浪江町で発生した十万山火災を対象に、放射性物質の大気拡散モデルを適用し、気 象場、<sup>137</sup>Csの大気拡散、及び放出源情報の精度検証を実施した。そして、観測点で検出された大気中 <sup>137</sup>Cs濃度の上昇は、「発災地から観測地まで風で流されたもの」と、「発災地から観測地を超えて流 れたもののうち風向きが変わった時に押し戻されてきたもの」がある事をモデルから明らかにすること はできた。本研究は当初予定していなかったが、ウクライナにおける現地観測研究の代替として、福島 の帰還困難区域における森林火災とそれによる<sup>137</sup>Cs大気拡散をシミュレーションから明らかにすることができ、当初目標を達成し、計画以上の進展となったと言える。

### (III) 大気・水文モデルによる放射性物質拡散予測

#### [IIIa] 大気拡散予測モデルによる2020年、及び、過去の火災結果の計算

2020年ChEZ森林火災により大気へ放出された<sup>137</sup>Csの拡散予測には、ウクライナ原子力発電所安全規制 機構により大気輸送モデル (Talerko et al., 2014; 2019)を用いた。地表面から大気への<sup>137</sup>Cs放出量は、 前述の森林火災AIシステムにより推定された焼損面積と既存文献で示された燃焼放出係数のパラメー タをモデルの入力値とした。大気輸送モデルの結果、ChEZの火災をソースとする<sup>137</sup>Csは、数時間以内 に約100 km離れたキーウに達することがある可能性が示唆された (業績7; 図16)。また、キーウにおけ る大気中<sup>137</sup>Cs濃度の日平均値は数十から数百(µBq/m3)に達することが示された (図17)。これは、キー ウにおける大気中<sup>137</sup>Cs濃度の通常時と比較すると1オーダー程度大きい値である。また、いくつかのシ ミュレーションにより、数千 km<sup>2</sup>を対象とした領域スケールでの長期距離輸送モデリングにおいて は、大気輸送モデルによる<sup>137</sup>Csの大気拡散の不確実性は、大気輸送モデル内で使用する雲微物理スキ ームや乱流スキームあるいは、放出源の高さよりも、放出量そのものに依存することがわかった。した がって、延焼面積をいかに正確に推定するかということが、放射能汚染地域における森林火災時の大気 輸送モデリングにおける不確実性を低減するための課題であると結論づけられる。



図16.2020年4月4日から20日までの森林火災に由来する大気中<sup>137</sup>Cs放射能濃(Bq/s/m<sup>3</sup>)の日時間積分モデル結果。業績7から改変し引用。



図17. キーウ市内(ウクライナ中央地質研究所)における大気エアロゾルサンプリングの結果(青)と、 対応するサンプリング期間を平均したシミュレーション結果(緑)の比較。業績7から改変し引用。

### [IIIb] ChEZの複数流域における放射性流出・再現実験。現地データと比較し、検証する

統合陸域水循環モデルSiBUC (Kotsuki et al., 2013, 2015) に、放射性物質流出モジュールを導入し、放射性物質の流域からの流出計算を実施した。Igarashi et al. (2020) による<sup>90</sup>Srの流出パラメタリゼーショ ンを SiBUC の流出過程に組み込み、より広域の放射性物質・流出予測システムを構築した。まず、 SiBUCをChEZで実行可能なように入力・計算条件を整備し、現地観測降水量などを使った解析で、現 地の水文量(流出量、蒸発散量、地表面温度)が再現可能かを明らかにした。その上で、放射性物質・ 流出パラメタリゼーションを導入した。ChEZ内のUzh川流域において、現実の流出量が再現可能かを 確認し、モデル上にて放射性物質・流出実験を実施し、原発事故後30年間の流域流出量を再現した。そ の際、初期条件には、図18左に示したようなEvangeliou et al. (2016) から提供される初期沈着量を用い た。<sup>137</sup>Csについては半減期による崩壊のみを考慮し、水溶性の<sup>90</sup>Srについては物理崩壊に加えて、流出 に起因する排出を考慮した(図18)。



図18. ChEZを含むウクライナ北部域を対象とした、放射性物質・水文シミュレーションの概要と結果。 ここで、(d)において、緑線・青線は流出に伴う排出を考慮しない/する実験を示しており、(e)は流出 放射性物質のパラメタリゼーションについては、Igarashi et al. (2020) により、日流量・日放射性濃度 のデータから、流量から放射性物質濃度を推定する経験的パラメタリゼーションが提案されている。こ のパラメタリゼーションは、現在対象としているUzh川よりも小規模なSakhan川で提案・検証されてい たものだが、これをより大規模なUzh川に適用する方法の開発を進めた。ここでは、森林火災の後に は、地表面に付着した放射性物質が洗い流されることで、観測される放射性濃度が高くなるのではない か、との仮説に基づき、陸域水循環モデルSiBUCの流出量を入力として、Sahan川流域における放射性 濃度の再現実験を試みた。

2017年までの観測流量・観測放射性濃度を用いて、パラメタリゼーションの経験的パラメータを推定し、2018,2019,2020年の放射性物質の予測計算に使用した。パラメータ推定に際しては、その不確実性を含めて評価可能なMCMCを用いた。森林火災のあった2020年のみ、観測される放射性物質濃度がモデル予測値よりも高く出るのではないかと予測として合致する結果が得られ、2020年の放射性物質濃度が特異的に高いことが示された (図19)。一方で、森林火災による河川中の放射性物質濃度の増加効果がどの程度継続するかはわかっておらず、今後も継続的な観測とモデルによる検証が望まれる。



図19. Sakhan川に放射性物質濃度の時系列変化。(左) 1990年から2022年までを示しており、(右) 2018年 から2020年。黒点と赤点は、それぞれ週平均の観測・モデル計算濃度を示す。

本研究では、火災による森林や草地からの<sup>137</sup>Csの放出量をパラメータ化して大気輸送モデルを実装 した。その上で、延焼面積推定の精度向上が領域スケールでの<sup>137</sup>Cs大気拡散を大気輸送モデルから明 らかにした。また、統合陸域水循環モデルSiBUCに、放射性物質流出モジュールを導入し、放射性物質 の流域からの流出計算を実施した。そして、森林火災が発生した2020年において、河川中の<sup>90</sup>Sr濃度上 昇が、特異的であったことを水循環モデルから明らかにした。これにより当初目標を達成し、計画通り 進展したと言える。

#### 6. 目標の達成状況と環境政策等への貢献

(1) 研究目標の達成状況

<	(全体の達成状況>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2	.	目標を	ト同	ろ成	果を	あじ	ギた

「原発事故地域における森林火災後の放射性物質・再拡散予測システムの開発」

全体目標	全体の達成状況

ウクライナ・チョルノービリ規制区域を対象とし て、森林火災面積・焼損度を推定するAIを構築す る。さらに、森林火災監視AIの出力する焼損度を 用いた、森林火災後の大気拡散・水文流出に関す る再現実験を行う。特に火災規模の大きかった 2015年、2020年ChEZ森林火災をターゲットケース に定め、最終的に本研究の推定値を学会発表・論 文などで発表する。更に、森林火災推定AIの世界 展開の嚆矢として、日本・福島の森林火災の再現 実験を行う。	森林火災面積を推定するAIを構築し、2015年と 2020年ChEZ森林火災で検証し、その結果を査読付 論文(業績2,5)、国際学会(業績6)として発表し た。チョルノービリでは、森林火災後の大気拡散 と水文流に関する再現実験を行った。チョルノー ビリで森林火災監視AIを2017年に浪江町で発生し た森林火災に適用し、現地観測結果を再現するこ とに成功した。その上で、2017年の浪江火災にお いては、大気モデルを用いることで発災場所から の <sup>137</sup> Csの大気拡散の状況を大気輸送モデルから明 らかにした。本研究においては、森林火災監視AI を2021年中に構築する事ができたため、2022年2 月から始まったウクライナ戦争とそれに関連した 森林火災の発生状況を2022年5月までに明らかに し、査読付論文(業績2)として世界で初めて報告 するとともに、現地政府機関等に向けて情報発信 が実現した。
「	
<b>開発支援</b> 1.1 森林火災AIシステム構築のため、チョルノー ビリ規制区域内で過去20年以内に起こった森林火 災をGISデータとして整備する。	1.1 ChEZで発生した大規模森林火災域をGISデー タとして整備した (図2) 。
1.2 これまでの現地及び実験室における火災によ る森林や草地からの放射性物質の拡散量推定係数 (燃焼放出係数)をデータベースとして整備す る。	1.2 2020年ChEZ火災における <sup>137</sup> Csの大気への放出 量のパラメータを決定した (Ib, p12)。
1.3 火災跡地からの表面流による溶存態・懸濁態 それぞれでの放射性物質移行係数をデータベース として整備する。	1.3 2020年ChEZ森林火災の延焼地を含む流域にお ける現在の <sup>137</sup> Cs及び <sup>90</sup> Srインベントリ(図5)と、河 川中の溶存態・懸濁態 <sup>137</sup> Cs及び <sup>90</sup> Sr濃度の時系列 をデータベースとして整備した(図6)。
1.4 ChEZとウクライナ・キーウ市における大気及 び主要河川水中における放射性物質濃度の観測結 果をデータベースとして整備する。	1.4 ChEZとウクライナ・キーウ市における大気中 <sup>137</sup> Cs濃度 (図17) と、主要河川水中における放射 性物質濃度の観測結果をデータベースとして整備 した (図6)。
(II) 現地・衛星観測の統合解析AIの構築 2.1 チョルノービリ規制区域において、森林火災 域・焼損度推定AIシステムを構築し、2015年・ 2020年森林火災を再現する。	2.1 チョルノービリ規制区域において、森林火災 域・焼損度推定AIシステムを構築し、2015年・ 2020年森林火災を再現した (図8)。
2.2森林火災監視AI@ChEZのリアルタイム運用シ ステムを構築する。	2.2森林火災監視AI@ChEZのリアルタイム運用シ ステムを構築し、2022年2月から始まったウクラ イナ戦争とそれに関連した森林火災の発生状況を 2022年5月までに明らかにし、査読付論文(業績2) として世界で初めて報告し、2022年にポーランド にて開催された会議においてウクライナ立入禁止 区域管理庁にも情報を提供した。
2.3 森林火災監視AIを、波江の火災でも検証する。森林火災監視AIの精度はNASAの既存プロダクトと同程度以上の検出精度を実現する。	2.3 森林火災監視AIを、波江の火災でも検証した (図11) 。森林火災監視AIの精度はNASAの既存プ ロダクトと同程度以上の検出精度を実現した(図 9)。 本研究の日本における発展版として、2017年に福

	島県浪江町十万山にて発生した森林火災を対象 に、大気輸送モデルを適用し再現性を確認した。 帰還困難区域における森林火災の影響を放射性物 質 ( <sup>137</sup> Cs) の大気拡散を初めて扱った研究であ る。
(III)大気・水文モデルによる放射性物質拡散予 測 3.1 AIの算出する焼損度を利用し、燃焼放出係数 を用いて放出量推定サブモデルを開発する。既存 の大気拡散予測モデルを利用し、2015年や2020年 の森林火災後の放射性物質・大気再拡散の再現実 験を行う。	3.1 2020年ChEZ火災を対象に、森林火災による <sup>137</sup> Csの大気拡散モデルを、森林火災監視AIにより 推定された焼損面積 (図8)を用い、森林火災を起 源とした大気中 <sup>137</sup> CSの輸送状況を推定し(図16)、 首都キーウにおける大気中 <sup>137</sup> Cs濃度を再現した(図 17)。
3.2 統合陸域水循環モデルSiBUCを、ChEZで計算 可能な様に整備する。更に、放射性物質・流出パ ラメタリゼーションを導入する。サブ流域にフォ ーカスしてモデル開発した上で広域実験を行い、 原発事故後30年間の放射性物資流出量をモデルか ら明らかにする。	3.2 統合陸域水循環モデルSiBUCを、ChEZで計算 可能な様に整備した。放射性物質・流出パラメタ リゼーションを導入することで、1990年以降の流 域からの放射性物質流出量をモデルから明らかに した(図18)。さらに、このモデルを森林火災後に も適用することで、2020年の森林火災後に観測さ れた河川水中の <sup>90</sup> Sr濃度が特異的に高かったこと をモデルから明らかにした(図19)。

<【サブテーマ1】達成状況>・・・・・・	<u>2. 目標を上回る成果をあげた</u>
「原発事故地域における森林火災後の放射性物質・	再拡散予測システムの開発」(全体目標と同様)
サブテーマ1目標	サブテーマ1の達成状況
全体目標と同様	全体目標と同様

(2) 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

森林火災面積を推定するAIを構築し、2015年と2020年のチョルノービリ森林火災で検証し、その結 果を査読付論文(業績2,5)と、国際学会(業績6,7)で発表した。本研究で開発された森林火災監視AI は、閾値を設定しないチューニングフリーという点において、手法的な革新性がある。さらに言えば、 従来の閾値を設定し土地利用区分を設定するリモートセンシング分野において、閾値を設定しない手法 は先導性があり、今後の発展が期待される。ウクライナにて開発した森林火災監視AIの国内発展とし て、2017年に福島県浪江町内の帰還困難区域にて発生した森林火災に対して適用し、現地観測結果を再 現することに成功した。

チョルノービリでは、水文輸送モデル、及び大気輸送モデル(業績7)を用い、森林火災後の放射性 物質動態の再現実験を行った。特に、放射性物質の大気輸送モデルに関して、領域スケールでの長期距 離輸送モデリングにおいては、焼面積の正確な評価がモデルの不確実性を低減するための課題であるこ とを明らかにした。

モデルを検証するために、チョルノービリ及び福島の原発事故被災地域における、大気及び河川中の放射性物質データを収集した。それらは、査読付論文(業績1,3,4)と、国際学会での発表(業績8,9,10,11,12,13)として取りまとめた。この中で、福島県阿武隈川における長期河川観測の結果とし

て、河川中における<sup>137</sup>Csの固液比が熱力学の理論式により説明できることを世界で初めて明らかにした (業績1)。この論文発表後、同様の事象が福島の他の河川 (Tsuji et al., 2024) や湖沼 (業績5) でも見られることがわかり、淡水中における<sup>137</sup>Cs動態解明に先導的な役割を果たすことができた。

<環境政策等への貢献に関する成果>

本研究で構築された森林火災監視AIを研究実施期間内にリアルタイム運用を開始し、2022年2月から 始まったウクライナ戦争とそれに関連した森林火災の発生状況を明らかにし、2022年10月にはウクライ ナ立入禁止区域管理庁に直接情報提供を実施した。

2017年に福島県浪江町十万山にて発生した森林火災を対象に、大気輸送モデルを適用した結果、火 災期間及び鎮火後1週間の間に通常時を超えた全ての観測値が、「観測された<sup>137</sup>Csは十万山火災の発災 地が直接のソースであった」あるいは「観測前に十万山火災の発災地から観測地及び下流方向に流され た<sup>137</sup>Csが、観測期間中に観測地に押し戻された」という2つのパターンで説明できることがわかった。 大気輸送モデルの結果は、季節風などが卓越しない条件では、陸海間での大気循環に伴う局地風が卓越 し、十万山火災をソースとする<sup>137</sup>Csの大気拡散もそれに従う事がわかった。したがって、今後、帰還 困難区域内で発生する可能性がある森林火災については、帰還困難区域が阿武隈山地から浜通り沿岸に 分布していると言う地理的条件と、そこで発生する局地風も考慮し、大気中<sup>137</sup>Csの観測等を実施する 必要があると提言する。

٦

## 7. 研究成果の発表状況

## (1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文:	5
査読付き論文に準ずる成果発表(人文・社会科学分野):	0
その他誌上発表(査読なし):	0
ロ頭発表(国際学会等・査読付き):	0
ロ頭発表(学会等・査読なし):	7
知的財産権:	0
「国民との科学・技術対話」の実施:	2
マスコミ等への公表・報道等:	0
研究成果による受賞:	0
その他の成果発表:	3

(2) 誌上発表

<査読付き論文>

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	Igarashi, Y., Nanba, K., Wada, T., Wakiyama, Y., Onda, Y., Moritaka, S., Konoplev, A., 2022. Factors Controlling the Dissolved <sup>137</sup> Cs Seasonal Fluctuations in the Abukuma River Under the Influence of the Fukushima Nuclear Power Plant Accident. J. Geophys. Res. Biogeosciences 127, 1– 16. https://doi.org/10.1029/2021JG006591
2	Hu, J., Igarashi, Y., Kotsuki, S., Yang, Z., Talerko, M., Landin, V., Tyshchenko, O., Zheleznyak, M., Protsak, V., Kirieiev, S., 2023. Application of a tuning-free burned area detection algorithm to the Chornobyl wildfires in 2022. Sci. Rep. 13, 5236. https://doi.org/10.1038/s41598-023-32300-5
3	Igarashi, Y., Onda, Y., Matsushita, K., Sato, H., Wakiyama, Y., Lisovyi, H., Laptev, G., Protsak, V., Samoilov, D., Kirieiev, S., Konoplev, A., 2023. Hydrological setting controls <sup>137</sup> Cs and <sup>90</sup> Sr concentrations in a headwater catchment in the Chornobyl Exclusion Zone. Sci. Total Environ. 891, 164384. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164384
4	Konoplev, A., Wakiyama, Y., Igarashi, Y., Nanba, K., 2023. Fate and Transport of Fukushima- Derived Radiocesium in the Environment: Key Findings and Challenges for the Future. Int. J. Plant, Anim. Environ. Sci. 13, 75–90. https://doi.org/10.26502/ijpaes.4490154

Hu, J., Igarashi, Y., Kotsuki, S., Yang, Z., Talerko, M., Landin, V., Tyshchenko, O., Zheleznyak, M.,
 Protsak, V., Kirieiev, S., 2024. A tuning-free moderate scale burned area detection algorithm — A case study in Chornobyl contaminated region. Int. J. Remote Sens.(Accepted on March 2, 2024)

<査読付き論文に準ずる成果発表(人文・社会科学分野)> 特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)> 特に記載すべき事項はない。

(3) 口頭発表

< 口頭発表(国際学会等・査読付き)> 特に記載すべき事項はない。

<口頭発表(学会等・査読なし)>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表(学会等・査読なし)
6	Hu, J., Kotsuki, S., Igarashi, Y., Talerko, M., and Ichii, K.: The burned area extracting in Chernobyl Exclusion Zone using Random Forest, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-5616, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-5616, 2021.
7	Talerko, M., Lev, T., Kovalets, I., Zheleznyak, M., Igarashi, Y., Paskevych, S., Kashpur, V., and Kireev, S.: Modeling study of the atmospheric transport of radioactivity after wildland fires and a dust storm in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-5134, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-5134, 2021.
8	Igarashi, Y., Nanba, K., Wada, T., Wakiyama, Y., Onda, Y., Moritaka, S., Konoplev, A., 2022.Dynamics and Temperature Dependence of Fukushima-Derived Radiocesium in Abukuma River in 2012-2019, AGU fall meeting, online, 13–17 Dec 2021, AGU H35ZA, 2021
9	Igarashi, Y., Kenji, N., Wada, T., Wakiyama, Y., Onda, Y., and Moritaka, S.: Factors controlling the dissolved <sup>137</sup> Cs seasonal fluctuations in the Abukuma River under the influence of the Fukushima Nuclear Power Plant accident, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-3340, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-3340, 2022.
10	Konoplev, A., Wakiyama, Y., Wada, T., Igarashi, Y., Laptev, G., Golosov, V., Ivanov, M., Komissarov, M., and Nanba, K.: Vertical distribution of 137Cs in bottom sediments as representing the time changes of water contamination: Chernobyl and Fukushima, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-6698, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-6698, 2022.
11	Igarashi, Y., Onda Y., Sato H., Wakiyama Y., Gusyev M., Laptev G., Zheleznyak M., Kirieiev S., Konoplev A. Mobilization and transportation of radionuclides in surface water are linked sub- catchment geochemistry and river connectivity. AGU fall meeting, Chicago USA, 14 Dec 2022, AGU- H25H-1210, 2022.
12	Igarashi, Y., Onda, Y., Matsushita, K., Sato, H., Wakiyama, Y., Lisovyi, H., Laptev, G., Samoilov, D., Kirieiev, S., and Konoplev, A.: Hydrological setting control 137Cs and 90Sr concentration at headwater catchments in the Chornobyl Exclusion Zone, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-2540, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2540, 2023.
13	Igarashi, Y., Onda Y., Sato H., Wakiyama Y., Laptev G., Kirieiev S., Konoplev A. How does radionuclides dynamics in river water link geochemistry and river connectivity at the Chornobyl Exclusion Zone in Ukraine. AGU fall meeting, San Francisco, USA, 15 Dec 2023, AGU-H41H-1868, 2023.

(4) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果	実施	
番号	年度	

【サブテーマ1】の実施状況

14		一般公開シンポジウム「原発事故から10年後の福島の"森・川・海"と"食" 〜復興に
	2021	向けて残された課題~」にて、「福島の河川における放射性物質の10年とこれから~
		阿武隈川黒岩地点における長期観測結果~」というタイトルで講演(主催:福島大学
		環境放射能研究所、2021年10月12日、コラッセ福島、観客約400名)
		第9回成果報告会「環境放射能の新たなフロンティア」にて、「陸域の放射性Cs循環の
15	2022	これまでとこれから」というタイトルで講演(主催:福島大学環境放射能研究所、
		2023年2月14日、コラッセ福島、観客約400名)

(6) マスメディア等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(7) 研究成果による受賞特に記載すべき事項はない。

(8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
16	Nanba, K., Moritaka, S., Igarashi, Y., 2022. Dynamics of Radiocesium in Urban River in Fukushima City, in: Behavior of Radionuclides in the Environment III. Springer Singapore, Singapore, pp. 137–152. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6799-2_8 (書籍)
17	Konoplev, A., Wakiyama, Y., Wada, T., Igarashi, Y., Kanivets, V., Nanba, K., 2022. Behavior of Fukushima-Derived Radiocesium in the Soil-Water Environment: Review, in: Behavior of Radionuclides in the Environment III. Springer Singapore, Singapore, pp. 33–68. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6799-2_4 (書籍)
18	五十嵐康記 原発事故の影響を受けた地域における森林火災は何をもたらすのか? 環境放射 能学入門, 歴史春秋社,2024(書籍)

8. 国際共研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

ウクライナのMykola Talerko博士と共同研究を実施した。Talerko博士には、現地の消防及びChEZ管理 庁により作成された森林火災状況報告調査、翻訳作業、及び2020年ChEZ森林火災を対象にした放射性 物質の大気輸送モデルの実装に当たり協力をいただいた。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国·地域名(本部所在地等)
Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine	ウクライナ (キーウ)

9. 研究者略歴

<研究代表者略歴>

4 主 耂 丘 々		(学歴	受け	<b>公 压</b>	11日 11出	印 忠 ニ ー 如 )
11.衣有以名	10位	(子腔、	子忸、	産産、	'	(切九 / 一 ~ 寺 /
	,	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••				• • •

	東京大学農学生命科学研究科博士課程修了
	博士 (農学)
五十嵐 康記	名古屋大学地球水循環研究センター、宇宙地球環境研究所研究員を経て、
	現在、福島大学環境放射能研究所 特任講師
	専門は水文学、研究テーマは放射能汚染地域における放射性物質の環境動態

## Abstract

### [Research Title]

## Prediction System for Radionuclides Redistribution due to Wild Fire in Contaminated Regions

Project Period (FY) :	2021-2023						
Principal Investigator :	Igarashi Yasunori						
(PI ORCID) :	ORCID: 0000-0003-1386-0977						
Principal Institution :	Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University Fukushima city, Fukushima, JAPAN Tel: +81-524-2114 Fax: +81- 24-503-2921 E-mail: y-igarashi@ipc.fukushima-u.ac.jp						
Cooperated by :	Chiba University						
Keywords :	Nuclear disaster, Forest fire, Radionuclides, Atmospheric model, Hydrological model						

## [Abstract]

The forest fire that occurred in Chernobyl in April 2020, known as the 2020 ChEZ forest fire, burned approximately 20% of the Chernobyl Exclusion Zone (ChEZ) and caused elevated levels of atmospheric <sup>137</sup>Cs observed as far as Kiev and various parts of Europe. Forest fires in areas with high concentrations of radioactive substances, such as those affected by nuclear accidents, can have significant societal impacts globally. Accurate estimation and prediction of the resuspension of radionuclides using atmospheric dispersion and hydrological models immediately after a fire are crucial for informing the public. This study aims to develop an integrated analysis AI for rapid estimation of forest fire areas and burn severity using local and satellite observations and to predict post-fire dispersion of radioactive substances using atmospheric and hydrological models. Based on collaborative efforts with Ukrainian research partners, including the Ukrainian State Nuclear Regulatory Inspectorate and Dr. Talerko, a total of 33 forest fires occurred in the Chernobyl Exclusion Zone (ChEZ) from April 1996 to April 2020. Only two fires exceeding the 0.25 km2 MODIS resolution occurred in 2015 and 2020, thus those were selected for further analysis. Using data provided by local firefighting and ChEZ management agencies, GIS data was compiled, integrating burn area records from the past 20 years. Advanced algorithms were developed for forest fire detection using MODIS observations, achieving detection accuracy equal to or surpassing existing NASA and ESA products (Hu et al., 2024). Real-time monitoring of forest fires was initiated as part of the project's emergency response following the invasion of Ukraine by Russian forces in February 2022 (Hu et al., 2023). The developed algorithms were also tested for applicability in Japan, demonstrating potential for high-resolution forest fire detection using Landsat satellite data. The resuspension of <sup>137</sup>Cs released into the atmosphere by the 2020 ChEZ fire was predicted using the atmospheric transport model. We demonstrated that <sup>137</sup>Cs from the fire could reach Kiev within a few hours, with concentrations in the air ranging from tens to hundreds of microbecquerels per cubic meter, about one order of magnitude higher than Kiev's background levels. Additionally, the SiBUC land surface water circulation model was used to forecast the outflow of radioactive substances, especially focusing on the Chernobyl Exclusion Zone. It considered the possibility of elevated radioactive concentrations post-forest fires, with simulations showing a significant increase in 2020.

[References] Hu et al (2023) Sci. Rep. 13, 5236. https://doi.org/10.1038/s41598-023-32300-5 Hu et al., (2024) Int. J. Remote Sens.(Accepted on March 2, 2024)

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF)

【1RF-2103】