

JAEA-Technology 2024-022 DOI:10.11484/jaea-technology-2024-022

令和5年度緊急時対応技術適用のための バックグラウンド航空機モニタリング及び 無人航空機による放射線モニタリングに係る技術開発 (受託研究)

Background Aerial Monitoring and UAV Radiation Monitoring Technology Development for Emergency Response and Preparedness in the Fiscal Year 2023 (Contract Research)

普天間章 眞田 幸尚 中間 茂雄 佐々木 美雪
越智 康太郎 澤幡 義郎 川崎 義晴 岩井 毅行
平賀 祥吾 萩野谷 仁 松永 祐樹 圷 雄一郎
新井 仁規 平岡 大和 石田 睦司 卜部 嘉 工藤 保

Akira FUTEMMA, Yukihisa SANADA, Shigeo NAKAMA, Miyuki SASAKI Kotaro OCHI, Yoshiro SAWAHATA, Yoshiharu KAWASAKI, Takeyuki IWAI Shogo HIRAGA, Masashi HAGINOYA, Yuki MATSUNAGA, Yuichiro AKUTSU Yoshinori ARAI, Hirokazu HIRAOKA, Mutsushi ISHIDA, Yoshimi URABE and Tamotsu KUDO

> 原子力安全・防災研究所 原子力緊急時支援・研修センター

Nuclear Emergency Assistance and Training Center Nuclear Safety and Emergency Preparedness Institute

Japan Atomic Energy Agency

March 2025

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。 本レポートの成果(データを含む)に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の 条件で利用してください。(<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja</u>) なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課 〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49 E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2025

令和5年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング及び 無人航空機による放射線モニタリングに係る技術開発

(受託研究)

日本原子力研究開発機構 原子力安全・防災研究所 原子力緊急時支援・研修センター

普天間 章、眞田 幸尚、中間 茂雄、佐々木 美雪、越智 康太郎、澤幡 義郎^{*1}、 川崎 義晴^{*1}、岩井 毅行^{*1}、平賀 祥吾^{*1}、萩野谷 仁^{*2}、松永 祐樹^{*2}、圷 雄一郎^{*3}、 新井 仁規^{*3}、平岡 大和、石田 陸司^{*1}、卜部 嘉^{*1}、工藤 保

(2024年11月19日受理)

2011年(平成 23 年)3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波が原因で、東京電力福 島第一原子力発電所事故が発生し、大量の放射性物質が周辺環境に飛散した。事故直後から、放 射線の分布を迅速かつ広範囲に測定する手段として、有人ヘリコプター等を用いた航空機モニタ リングが活用されている。日本原子力研究開発機構は、原子力規制庁からの受託事業として、本 モニタリング技術を原子力施設等の事故時における緊急時モニタリングに活用し、モニタリング 結果を迅速に提供するため、全国の発電所周辺におけるバックグラウンド放射線量や地形的特徴、 管制空域等の情報を事前に整備している。令和5年度の受託事業では以下について実施した。九州 電力(株)川内原子力発電所の周辺について航空機モニタリングを実施し、バックグラウンド放射 線量及び管制区域等の情報を整備した。緊急時における航空機モニタリングの実効性向上に資す るため、原子力総合防災訓練において航空機モニタリングを実施するとともに、国内初となる原 子力防災訓練での無人機の訓練フライトを実施した。無人航空機による放射線モニタリングの技 術開発を進め、緊急時モニタリングに必要とされる要件を満たす無人航空機を選定し、その飛行 性能を調査した。本報告書は、これら令和5年度の受託研究において得られた結果及び抽出された 技術的課題についてまとめたものであり、今後の緊急時対応技術向上に資する知見を提供する。

*1 株式会社 NESI

*2 検査開発株式会社

*3 原子力エンジニアリング株式会社

本調査研究は、日本原子力研究開発機構が原子力規制庁との委託契約により実施した「令和5年 度原子力施設等防災対策等委託費(航空機モニタリング運用技術の確立等)事業」の成果を取り まとめたものである。

原子力緊急時支援・研修センター:〒311-1206 茨城県ひたちなか市西十三奉行 11601-13

Background Aerial Monitoring and UAV Radiation Monitoring Technology Development for Emergency Response and Preparedness in Fiscal Year 2023 (Contract Research)

Akira FUTEMMA, Yukihisa SANADA, Shigeo NAKAMA, Miyuki SASAKI, Kotaro OCHI, Yoshiro SAWAHATA^{*1}, Yoshiharu KAWASAKI^{*1}, Takeyuki IWAI^{*1}, Shogo HIRAGA^{*1}, Masashi HAGINOYA^{*2}, Yuki MATSUNAGA^{*2}, Yuichiro AKUTSU^{*3}, Yoshinori ARAI^{*3}, Hirokazu HIRAOKA, Mutsushi ISHIDA^{*1}, Yoshimi URABE^{*1} and Tamotsu KUDO

Nuclear Emergency Assistance and Training Center, Nuclear Safety and Emergency Preparedness Institute Japan Atomic Energy Agency Hitachinaka-shi, Ibaraki-ken

(Received November 19, 2024)

On March 11, 2011, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake caused a tsunami that led to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident, releasing radioactive material into the environment. Since then, Aerial Radiation Monitoring (ARM) using manned helicopters has been employed to measure radiation distribution. As a commissioned project from the Nuclear Regulation Authority, the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) utilizes this technology for emergency monitoring during nuclear facility accidents, aiming to provide prompt results by pre-arranging information on background radiation, topography, and control airspaces around nuclear power plants nationwide. In fiscal year 2023, the commissioned project included conducting ARM around the Sendai Nuclear Power Station and preparing related information. To enhance effectiveness during emergencies, ARM and the first domestic training flight of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) were conducted during the FY2023 Nuclear Energy Disaster Prevention Drill. Furthermore, UAVs radiation monitoring technology was advanced by selecting UAVs and investigating their performance. This report summarizes the results and technical issues identified providing insights to improve emergency preparedness.

Keywords: Aerial Radiation Monitoring, Nuclear Emergency Preparedness, Unmanned Aerial Vehicles

This report summarizes results that the Japan Atomic Energy Agency carried out as a commissioned project by "the projects of the radiation monitoring using manned helicopter around Nuclear Power Stations" of the Nuclear Regulation Authority in the fiscal year 2023.

*1 NESI Inc.

*3 Nuclear Engineering Co., Ltd.

^{*2} Inspection Development Company Ltd.

目次

1.	はじる	はじめに1				
2.	有人へリコプターのモニタリングシステム					
	2.1.	航空機モニタリングシステム	6			
	2.2.	ヘリコプターの選定				
	2.3.	RSI システムの保守				
3.	デー	タ取得及び解析方法	13			
	3.1.	航空機モニタリング及び地上測定の方法				
	3.2.	キャリブレーションフライト方法				
	3.3.	解析のフロー				
	3.4.	空間線量率への換算方法				
		3.4.1. 空気中核種及び宇宙線由来のγ線計数率				
		3.4.2. 対地高度補正係数 HF の算出方法				
		3.4.3. 空間線量率への換算係数 CD の算出方法				
		3.4.4. 空間線量率への換算方法				
	3.5.	検出限界值				
	3.6.	不確かさ				
	3.7.	補間方法				
	3.8. 空気中ラドン子孫核種の弁別手法					
		3.8.1. ラドン子孫核種				
		3.8.2. ラドン弁別手法の概略				
		3.8.3. <i>GI</i> の高度補正方法				
	3.9.	天然放射性核種の濃度換算手法				
4.	モニク	タリング結果と考察				
	4.1.	ヘリコプターによるフライト及び地上測定の実績				
	4.2.	換算パラメータ				
	4.3.	空間線量率マップ				
		4.3.1. 地上測定による天草市現地調査				
		4.3.2. GPS 測位データの比較				
		4.3.3. 換算パラメータの再算出及び空間線量率マッピング結果				
	4.4.	空間線量率マップと地質情報の比較考察	52			
	4.5.	地上測定値との比較	55			
	4.6.	天然放射性核種の濃度	59			
	4.7.	ラドン弁別手法の適用	68			
		4.7.1. パラメータ (<i>RI</i> 及び <i>GI</i>)の決定	68			
		4.7.2. ラドン弁別手法の適用結果及び標準的解析手法との比較	71			
	4.8.	放射性セシウムの沈着量				

5. 原子力防災訓練における緊急時航空機モニタリング及び無人機の訓練フライト				
5.1. 原子力総合防災訓練等に係る航空機モニタリングの経緯				
5.2. 令和5年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングの全体概要			84	
	5.2.1.	無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンによる訓練フライト	84	
	5.2.2.	自衛隊の有人ヘリコプターによる緊急時航空機モニタリング	91	
5.3.	訓練か	ら得られた緊急時航空機モニタリングの課題と課題に対する取り組み	99	
	5.3.1.	無人機の訓練フライトについて	99	
	5.3.2.	緊急時航空機モニタリングについて	100	
無人劇	抗空機用	放射線モニタリングシステムの開発	102	
6.1.	背景		102	
6.2.	無人航	空機搭載用放射線測定システムについて	105	
	6.2.1.	システム概要	105	
	6.2.2.	環境用測定システム	106	
	6.2.3.	緊急時用測定システム	108	
6.3.	放射線	検出器の照射試験	113	
	6.3.1.	試験概要	113	
	6.3.2.	試験結果	113	
6.4.	地上運	転試験	115	
	6.4.1.	試験概要	115	
	6.4.2.	試験結果	116	
緊急	寺モニタ	リングで活用できる無人航空機の調査	118	
7.1.	無人航	空機に関する調査	118	
	7.1.1.	緊急時モニタリング用無人航空機の選定	118	
	7.1.2.	無人航空機を飛行させるための手続きの調査	125	
7.2.	機体の	展開性能の確認	127	
7.3.	飛行試	験の事前準備	131	
	7.3.1.	飛行試験の概要と目的	131	
	7.3.2.	事前準備	131	
7.4.	手動飛	行試験の実施	133	
	7.4.1.	飛行試験の内容及び評価結果	133	
7.5.	自動飛	行試験の実施	150	
	7.5.1.	試験内容	150	
	7.5.2.	自動帰還の機能の確認	150	
	7.5.3.	緊急時モニタリングを想定した自動飛行試験	152	
まとる	りと緊急	時モニタリングに資する知見の整理	162	
謝辞165				
今文献.			166	
	原子ブ 5.1. 5.2. 5.3. 無人 6.1. 6.2. 6.3. 6.4. 緊急 7.1. 7.2. 7.3. 7.4. 7.5. 来文献.	原子力防災訓 5.1. 原子力 5.2. 令和5 5.2.1. 5.2.2. 5.3. 訓練か 5.3.1. 5.3.2. 無人航空機用 6.1. 背景 6.2. 無人航 6.2.1. 6.2.3. 6.3. 放射線 6.3.1. 6.3.2. 6.4. 地上運 6.4.1. 6.4.2. 緊急時モニタ 7.1. 無人航 7.1.1. 7.1.2. 7.2. 機体の 7.3. 飛行試 7.3.1. 7.3.2. 7.4. 手動飛 7.5.1. 7.5.3. まとめと緊急	 原子力防災訓練における緊急時航空機モニタリング及び無人機の訓練フライト	

Contents

1.	Introduction						
2.	Monitoring system for manned helicopters						
	2.1.	ARM s	system	6			
	2.2.	2. Helicopters					
	2.3.	Mainte	nance of RSI system	10			
3.	Data acquisition and analysis method						
	3.1. ARM and ground measurement methods						
	3.2.	Calibra	tion flight methods	15			
	3.3.	Analys	is flow				
	3.4.	Conve	rsion to dose rate				
		3.4.1.	Gamma radiation count rates from airborne and cosmic sources				
		3.4.2.	Calculation of altitude correction factor (HF)	25			
		3.4.3.	Calculation of conversion factor to dose rate (CD)	25			
		3.4.4.	Methods for conversion to dose rate				
	3.5.	Detect	ion Limits	27			
	3.6.	. Uncertainty					
	3.7.	7. Interpolation					
	3.8.	8. Methods for discriminating airborne radon progeny					
		3.8.1.	Radon progeny	29			
		3.8.2.	Theory of radon discrimination methods	31			
		3.8.3.	Altitude correction method for GI	33			
	3.9.	Conve	rsion methods for natural radioactive nuclide concentrations	33			
4.	Moni	Monitoring results and discussion					
	4.1.	.1. Results of manned helicopter and ground measurements					
	4.2.	Conversion parameters					
	4.3.	Dose r	ate maps	42			
		4.3.1.	Field surveys with ground measurements in Amakusa city	46			
		4.3.2.	Comparison of GPS positioning data	46			
		4.3.3.	Recalculation of conversion parameters and dose rate mapping results	47			
	4.4.	Compa	rison of dose rate maps with geological information	52			
	4.5.	.5. Comparison with ground measurements		55			
	4.6.	. Concentration of natural radioactive nuclides		59			
	4.7. Application of radon discrimination methods			68			
		4.7.1.	Determination if parameters (RI and GI)	68			
		4.7.2.	Comparison of radon discrimination methods and standard analysis method				
	4.8.	Deposi	tion of radioactive Cs	81			

5.	Emer	gency A	RM and UAVs training flights in nuclear disaster drills	83	
	5.1.	1. History of ARM in nuclear disaster drills			
	5.2.	iew of emergency ARM in the FY2023 Nuclear Energy Disaster Prevention Drill	84		
		5.2.1.	UAVs training flights	84	
		5.2.2.	Emergency ARM with self-defense force manned helicopter	91	
	5.3.	Challe	nges and efforts from training	99	
		5.3.1.	UAVs training flights	99	
		5.3.2.	Emergency ARM with manned helicopter	100	
6.	Devel	lopment	of radiation monitoring system for UAVs	102	
	6.1. Background				
	6.2.	Radiat	ion measurement system for UAVs	105	
		6.2.1.	System overview	105	
		6.2.2.	Environmental measurement system	106	
		6.2.3.	Emergency measurements system	108	
	6.3.	Radiat	ion detector irradiation tests	113	
		6.3.1.	Test overview	113	
		6.3.2.	Test results	113	
	6.4.	Ground	d operation tests	115	
		6.4.1.	Test overview	115	
		6.4.2.	Test results	116	
7.	Inves	tigation	of UAVs for emergency ARM	118	
	7.1.	Investi	gation of UAVs	118	
		7.1.1.	Performance requirements for UAVs	118	
		7.1.2.	Procedures for flying UAVs	125	
	7.2.	Verific	cation of transport and deployment performance	127	
	7.3.	Prepara	ations for flight tests	131	
		7.3.1.	Flight test overview and objective	131	
		7.3.2.	Preparations	131	
	7.4.	Manua	al flight tests	133	
		7.4.1.	Evaluation of flight tests	133	
	7.5.	Autom	natic flight tests	150	
		7.5.1.	Test description	150	
		7.5.2.	Verification of automatic return function	150	
		7.5.3.	Automatic flights for emergency ARM	152	
8.	Sumn	nary and	l insights for emergency monitoring	162	
Ack	nowled	dgments		165	
Ref	erences	5		166	

Table list

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL (一部抜粋)	5
Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧	17
Table 3-2 RSI システムと機体の組み合わせと空気中核種由来の計数率平均値及び CR-Index	24
Table 3-3 ラドン子孫核種の放出するγ線	30
Table 4-1 ヘリコプターのフライト距離及び速度とフライト回数	36
Table 4-2機体とシステムの組み合わせと空気中核種由来の平均的な計数率及び採用した CR-Index	<i>:</i> 38
Table 4-3 2023 年度に取得した AF データー覧	40
Table 4-4 2023 年度に取得した <i>CD</i> データー覧	40
Table 4-5 解析に用いた換算パラメータのまとめ	41
Table 4-6 高精度 GPS システム測位データに基づく <i>CR-Index</i> の再算出結果	48
Table 4-7 高精度 GPS システム測位データに基づく AF の再算出結果	49
Table 4-8 高精度 GPS システム測位データに基づく <i>CD</i> の再算出結果	49
Table 4-9 再解析に用いた換算パラメータのまとめ	49
Table 4-10 天然放射性核種濃度への換算パラメーター覧	61
Table 4-11 解析に用いた <i>RI</i> 及び <i>GI</i> の一覧	70
Table 5-1 原子力総合防災訓練等における航空機モニタリング実施状況	84
Table 5-2 無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンによる訓練フライトのタイムテーブル	86
Table 5-3 令和 5 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングに係るタイムテー	ブ
ル(2023年10月29日)	92
Table 5-4 UH-60 に対する換算パラメータの一覧	92
Table 7-1 調査対象とした無人航空機及び調査項目ごとの調査結果	. 121
Table 7-2 PF2 及び M300 に関する詳細なヒアリング結果	. 125
Table 7-3 輸送後の機体展開及び検出器搭載に要した時間	. 128
Table 7-4 PF2 の操作訓練の内容	. 133
Table 7-5 飛行試験の内容	. 134
Table 7-6 基本水平飛行中の対地高度変化	. 137
Table 7-7 基本旋回飛行中の対地高度変化	. 139
Table 7-8 基本旋回飛行中の水平変化	. 139
Table 7-9 基本昇降飛行中の水平変化	. 141
Table 7-10 組み合わせ飛行 1 (8 の字) 中の高度変化	. 143
Table 7-11 組み合わせ飛行 2 中の水平変化	. 145
Table 7-12 衝突防止機能の確認結果	. 149
Table 7-13 ドローンを用いたキャリブレーションフライトによる空気減弱係数 AF と空間線量率	換
算係数 CD	. 155
Table 7-14 自動飛行試験の項目	. 156

Figure list

Fig. 2-1 RSI システムのブロック図	7
Fig. 2-2 RSI システムの外観	7
Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧	8
Fig. 2-4 川内 (前期) の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell430 (JA02AX))	9
Fig. 2-5 川内 (後期) の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell412 (JA6929))	9
Fig. 2-6 システムのエネルギー分解能及びゲインの推移 (川内 (前期))	. 11
Fig. 2-7 システムのエネルギー分解能及びゲインの推移 (川内 (後期))	. 12
Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (川内 (前期) 及び川内 (後期))	. 14
Fig. 3-2 航空機モニタリングデータ取得のイメージ	. 15
Fig. 3-3 航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージ	. 15
Fig. 3-4 テストラインフライトのイメージ	. 18
Fig. 3-5 川内 (前期及び後期) におけるテストライン及びテストポイントの場所 (鹿児島県出水市)	18
Fig. 3-6 テストポイントフライトのイメージ	. 19
Fig. 3-7 宇宙線フライトのイメージ	. 19
Fig. 3-8 空気中核種フライトのイメージ	. 19
Fig. 3-9 オーバーラップフライトに用いた測線 (鹿児島県出水市)	. 20
Fig. 3-10 解析のフロー	. 22
Fig. 3-11 空気中核種フライトで取得した陸上と海上でのγ線スペクトル例	. 24
Fig. 3-12 海抜高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例	. 24
Fig. 3-13 IDW に入力するパラメータとマップの関係	. 29
Fig. 3-14 ウラン系列及びトリウム系列	. 30
Fig. 3-15 空気中ラドン子孫核種測定用の検出器とヘリコプターへの搭載状況	. 32
Fig. 3-16 空気中ラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ	. 32
Fig. 3-17 航空機モニタリングで取得できるγ線スペクトル例	. 34
Fig. 3-18 天然放射性核種ごとの対地高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション結果)	. 35
Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例	. 38
Fig. 4-2 川内 (前期) 及び川内 (後期) のテストポイントにおける地上測定値	. 39
Fig. 4-3 オーバーラップフライトによるヘリコプター間の CR-Index・HF 補正計数率の比較	. 41
Fig. 4-4 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果	. 43
Fig. 4-5 川内における空間線量率マップ (RSI システム GPS データに基づく)	. 44
Fig. 4-6 川内における空間線量率マップの比較	. 45
Fig. 4-7 熊本県天草市における地上測定値	. 46
Fig. 4-8 RSI システムの GPS 及び高精度 GPS システムに基づく海抜高度と DEM データの比較	. 47
Fig. 4-9 高精度 GPS システム測位データに基づくオーバーラップフライトによるヘリコプター間	りの
CR-Index ・ HF 補正計数率の比較	. 50
Fig. 4-10 高精度 GPS システム測位データに基づく川内における空間線量率マップ	. 51

Fig. 4-11 地質情報の比較考察の対象としたエリア	54
Fig. 4-12 川内 (前期) 及び川内 (後期) の測線近傍における地上測定値	57
Fig. 4-13 川内における航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較	58
Fig. 4-14 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較 (2015 年度から 2020 年度ま	で
の全データ)	59
Fig. 4-15 川内の K-40 濃度マップ	62
Fig. 4-16 川内の U 系列濃度マップ	63
Fig. 4-17 川内の Th 系列濃度マップ	64
Fig. 4-18 川内の放射性核種濃度測定結果 (左)と地球化学図 (右)の比較 (K-40)	65
Fig. 4-19 川内の放射性核種濃度測定結果 (左)と地球化学図 (右)の比較 (U 系列)	66
Fig. 4-20 川内の放射性核種濃度測定結果 (左)と地球化学図 (右)の比較 (Th 系列)	67
Fig. 4-21 海上及び陸上における NaI(TI)検出器の計数率と LaBr ₃ (Ce)検出器の計数率の関係	69
Fig. 4-22 川内におけるラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ	75
Fig. 4-23 川内における空気中のラドン子孫核種由来の計数率マップ	76
Fig. 4-24 川内における標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上	.測
定値との比較 (直交距離回帰による RI 及び GI を用いた場合)	77
Fig. 4-25 川内におけるラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較(最	い二
乗法による RI 及び GI を用いた場合)	79
Fig. 4-26 空気中核種フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子孫核	種
由来の計数率の比較	80
Fig. 4-27 川内における放射性セシウム沈着量マップ	82
Fig. 5-1 無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンの飛行範囲と飛行予定経路	87
Fig. 5-2 モニタリングに用いた機体及び放射線検出器	88
Fig. 5-3 訓練フライトに用いたシステムの構成	89
Fig. 5-4 無人ヘリコプターモニタリングによる上空での空間線量率の解析結果(新潟県柏崎市柏	崎
中央海水浴場)	89
Fig. 5-5 ドローンモニタリングによる上空での空間線量率のリアルタイムマッピング結果(新源	県
柏崎市柏崎中央海水浴場)	90
Fig. 5-6 無人航空機モニタリングによる空間線量率解析結果 (福島 RTF)	90
Fig. 5-7 令和5年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングのフライトプラン.	93
Fig. 5-8 令和5年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングに使用したヘリコン	プタ
— (UH-60)	94
Fig. 5-9 航空機モニタリングシステムの搭載状況	94
Fig. 5-10 令和5年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングのヘリコプター内	での
測定状況 (訓練)	95
Fig. 5-11 リアルタイムデータ通信システムにより電子地図上に表示された航空機モニタリング	デ
ータ	96

Fig.	5-12 令和 5 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングによる空間線量率分	}布
	マップ	. 97
Fig.	5-13 緊急時航空機モニタリング中の対地高度の推移	. 98
Fig.	5-14 スタッドボルトを設置する位置決めを行うための目印付き紐	101
Fig.	6-1 既存の無人機によるシステムと原子力災害時に備えるべき無人航空機システム	103
Fig.	6-2 無人航空機 Penguin C の概要	104
Fig.	6-3 無人航空機搭載用放射線測定システムの概要	105
Fig.	6-4 環境用測定システム外観図面	106
Fig.	6-5 環境用測定システム接続図面	107
Fig.	6-6 環境用測定システム機体搭載時の外観	107
Fig.	6-7 地上局で確認できる測定システムの動作確認画面の例	108
Fig.	6-8 緊急時用測定システム外観図面	110
Fig.	6-9 緊急時用測定システム接続図面	111
Fig.	6-10 緊急時用測定システム機体搭載時の外観	111
Fig.	6-11 緊急時における放射線測定環境	112
Fig.	6-12 線源試験時の様子	113
Fig.	6-13 環境用測定システムにおけるγ線照射試験結果	114
Fig.	6-14 緊急時用測定システムにおけるγ線照射試験結果	115
Fig.	6-15 地上運転試験時の様子	116
Fig.	6-16 環境用測定システムの地上運転試験結果	117
Fig.	6-17 緊急時用測定システムの地上運転試験結果	117
Fig.	7-1 無人航空機の調査結果	123
Fig.	7-2 PF2 の輸送コンテナ収納状況	128
Fig.	7-3 M300の標準ケース収納状況	129
Fig.	7-4 PF2 へのホスウィッチ型検出器の搭載状況	129
Fig.	7-5 M300 へのホスウィッチ型検出器の搭載状況	130
Fig.	7-6 展開後の写真 (PF2)	130
Fig.	7-7 展開後の写真 (M300)	130
Fig.	7-8 飛行性能試験に使用した場所 (福島 RTF 瓦礫・土砂崩落フィールド)	132
Fig.	7-9 衝突防止機能試験に使用した場所(福島 RTF 屋内試験場)	132
Fig.	7-10 PF2 の取り扱い慣熟のための訓練に使用した場所 (真野交流センター)	133
Fig.	7-11 水平飛行 (前後左右移動) のイメージ	135
Fig.	7-12 水平飛行 (斜め移動) のイメージ	135
Fig.	7-13 PF2の水平飛行中の経過時間に対する対地高度の変化	136
Fig.	7-14 M300の水平飛行中の経過時間に対する対地高度の変化	136
Fig.	7-15 基本旋回飛行のイメージ	137
Fig.	7-16 PF2の基本旋回飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの距離の)変
	化	138

Fig.	7-17 M300の基本旋回飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの距離	の
	変化	138
Fig.	7-18 基本昇降飛行のイメージ	139
Fig.	7-19 PF2の基本昇降飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの距離の	D変
	化	140
Fig.	7-20 M300の基本昇降飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの距離	の
	変化	140
Fig.	7-21 組み合わせ飛行 1 (8 の字) のイメージ	141
Fig.	7-22 PF2の組み合わせ飛行1(8の字)中の経過時間に対する対地高度の変化	142
Fig.	7-23 M300の組み合わせ飛行1(8の字)中の経過時間に対する対地高度の変化	142
Fig.	7-24 組み合わせ飛行 2 のイメージ	144
Fig.	7-25 PF2の組み合わせ飛行2中の経過時間に対する対地高度の変化	144
Fig.	7-26 M300 の組み合わせ飛行 2 中の経過時間に対する対地高度の変化	145
Fig.	7-27 PF2 の組み合わせ飛行 2 のイメージ	146
Fig.	7-28 M300の組み合わせ飛行2のイメージ	146
Fig.	7-29 操縦位置と通信の構成	147
Fig.	7-30 衝突防止機能試験の結果	150
Fig.	7-31 電波途絶時の PF2 の送信機上のコマンド画面	151
Fig.	7-32 電波途絶時の M300 の送信機上のコマンド画面	152
Fig.	7-33 歩行モニタリングによる空間線量率の測定結果	153
Fig.	7-34 キャリブレーションフライトで得られた対地高度と計数率の関係	154
Fig.	7-35 PF2 の自動飛行試験において GPS 測位データが途切れた例	156
Fig.	7-36 ホスウィッチ型検出器で取得されるγ線スペクトルの例の例	157
Fig.	7-37 PF2 による空間線量率の算出結果	158
Fig.	7-38 M300 による空間線量率の算出結果	159
Fig.	7-39 自動飛行試験の各項目についての空間線量率平均値の比較結果	161
Fig.	8-1 川内周辺における管制空域に係る情報	164

This is a blank page.

1.はじめに

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)では、2011年(平成23年)3月11日に発生し た東北地方太平洋沖地震に起因した東京電力福島第一原子力発電所(以下、福島原子力発電所) 事故以降、周辺環境における放射性物質の分布調査を目的に、有人のヘリコプターを用いた航 空機モニタリング技術の開発を進めてきた。事故から約13年にわたり、航空機モニタリング の継続実施とともに手法の改善及び体制整備が行われてきた¹⁾⁻²¹)。原子力防災の一環として航 空機モニタリングを有効に機能させるには、事故時における具体的な運用方法、機器の恒久的 な管理体制の維持、技術の継承等の課題が挙げられる。このような課題と福島原子力発電所事 故の教訓に基づき、事故後に整備された「原子力災害対策マニュアル」²²には、航空機モニタ リングに関する方針が次のように定められている。

原子力災害対策マニュアル 第2 関係省庁における対応要領 第1編 事態ごとの組織・応急対策業務等 第4章 全面緊急事態 第2節 応急対策業務 13 緊急時モニタリング結果等の情報の収集及び共有 <放射線班>(規制庁等) (1)緊急時モニタリングの実施業務 ② 緊急時モニタリングの実施・支援 ERC チーム放射線班は、原子力事業所周辺以外の広範囲にわたって事故の影響が懸念される場合には、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と連携して航空機モニタリング を実施するとともに、必要に応じてモニタリングカーによる測定や環境放射能水準調査の 結果等を活用して、汚染の状況を把握する。自衛隊等の関係機関は、航空機モニタリング に対して ERC チーム放射線班からの調整があった場合には、必要に応じて、対応可能な範

囲内で、航空機によるモニタリング支援を行う。

原子力機構は、原子力災害時における迅速かつ広範囲なモニタリング体制の確立を目的と した事業を原子力規制庁(以下、規制庁)から受託している。この受託事業は、原子力災害対 策マニュアルに基づき、航空機モニタリングの運用方法、緊急時対応体制の整備、技術の維持 及び継承を行うものである。同マニュアルでは、航空機モニタリングを放射性物質の分布状況 を広範囲かつ迅速に把握するための重要な手段として位置づけており、特に原子力発電所から 概ね半径 5 kmから 30 km 圏内の「緊急防護措置を準備する区域」(Urgent Protective action Zone、 以下、UPZ)外では、モニタリングポスト等の常設観測装置の数が限られるため、航空機モニ タリングが主要なデータ収集手段となる。さらに、航空機モニタリングは、原子力災害対策指 針²³⁾に定められた防護措置の実施判断基準(Operational Intervention Level、以下、OIL)に基づ き、空間線量率 500 µSv/h を超える地域(OIL1)、20 µSv/h を超える地域(OIL2)や及び 0.5µSv/h を超える地域(飲食物に係るスクリーニング基準)の特定にも活用される。 Table 1-1 に原子力災害対策指針における OIL の詳細を示す。また、原子力災害時に航空機 モニタリングを機能的かつ効率的に実施するには、事前に想定地域でフライト訓練を行い、地 域の特性 (飛行場から原子力発電所までの距離、地形の影響、フライト開始までの最短時間評 価等)を把握しておくことが重要である。さらに、測定データを解析して情報を公表するまで の時間についてシミュレーションしておくことにより、航空機モニタリングによる迅速なデー タ取得と共有が可能となる。原子力災害時における緊急時モニタリングにおいて航空機モニタ リングを適切に活用するためには、平常時から航空機モニタリングを実施することにより、測 定及びデータ解析の経験を蓄積し技術維持及び品質向上に努めることも重要である。

福島原子力発電所事故後に同原子力発電所周辺で行われている航空機モニタリング^{20)等}では、 周辺環境に沈着した放射性セシウムから放出されるγ線を測定している。放射性セシウムの影 響が天然放射性核種からの影響に比べて比較的高い場所を測定する場合には、天然放射性核種 の影響は無視できるが、福島原子力発電所事故よりも比較的小さな事故を想定した場合は、天 然放射性核種の影響を考慮しなければならない。バックグラウンドの影響を除いた空間線量率 を算出するには、γ線エネルギースペクトルからバックグウランド計数率を減算する手法が考 えられるが、スペクトル弁別には計数を一定程度蓄積する必要があり、一般的に時間がかかる。 原子力災害時等の緊急時にモニタリング対象となることが想定される地域のバックグラウンド を事前に調査しておくと、緊急時に迅速かつ正確にバックグラウンドを減算したうえで空間線 量率の評価が可能となる。また、事故が発生する前にフライトすることによって、地域特有の 航空管制の情報、測定拠点として用いることのできる空港等の特徴や利用方法及び山間部等の フライト上の危険個所の抽出等、緊急時における迅速かつ確実な航空機モニタリングの実施に 資する情報を予め整備できる。このため、規制庁からの受託事業として 2015 年度 (平成 27 年 度) から国内の原子力発電所周辺において航空機によりバックグラウンドの測定を目的とした モニタリング (以下、バックグラウンドモニタリング)を実施してきた^{7,9,11,13,15,17,19,21)}。

福島原子力発電所事故後、無人航空機(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)を活用した放射線測 定技術の開発が進められている。原子力機構では、福島原子力発電所周辺のモニタリングや河 川敷のモニタリングにヤマハ発動機社製の自律型無人へリコプターを活用している²⁴⁾⁻²⁶⁾。ま た、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)と共同で燃費効率の良い飛行機型 UAVを用いた放射線モニタリングシステム(Unmanned Airplane Radiation Monitoring System : UARMS)を開発した²⁷⁾⁻²⁹⁾。UARMSは既に試作機まで開発されており、実用化のための基礎 データを福島原子力発電所周辺で取得することにより実用機開発が進められている²⁷⁾。UAV は遠隔地からの放射線測定が可能であり、有人へリコプターを用いる従来技術の代替として期 待されているとともに、原子力防災への適用も見据えた技術としての発展が見込まれる。また、 UAVによる放射線計測は、測定作業者の被ばく線量を低減することが可能である。原子力災 害対応にUAVを適用することを念頭に、規制庁からの受託事業として2019年度(令和元年度) からUAVの開発及び運用試験を開始し、無人航空機 Penguin C (Edge Autonomy 社製)につい て性能評価を行うとともに、国内での運用に当たっての課題を抽出しその解決を図ってき た^{15),17),19),21)}。この技術的検討がベースとなり、政府の緊急時対応計画の一環として、原子力 災害対策指針補足参考資料³⁰⁾に緊急時モニタリングにおける無人機を用いた航空機モニタリ ングに関する記載が追加された。

これまで規制庁からの受託事業として実施した原子力発電所周辺における航空機によるバ ックグラウンドモニタリング及び無人航空機の運用方法の開発に関する概要及び経緯は以下の 通りである。

2015 年度 (平成 27 年度)には、鹿児島県にある九州電力川内原子力発電所 (以下、川内) 周辺の 3 km~80 km 圏内について航空機を用いたバックグラウンドモニタリングを実施し、フライト時の地域特性を踏まえた注意点を抽出した。また、天然放射性核種の放射能濃度マップの作成手法を整備した⁷⁾。

2016年度(平成28年度)には、福井県にある関西電力大飯発電所並びに高浜発電所(以下、 大飯・高浜)及び愛媛県にある四国電力伊方発電所(以下、伊方)周辺3km~80km 圏内におけ るバックグラウンドモニタリングを実施した⁹。

2017 年度 (平成 29 年度)には、北海道にある北海道電力泊発電所 (以下、泊)、新潟県にある 東京電力柏崎刈羽原子力発電所及び佐賀県にある九州電力玄海原子力発電所 (以下、玄海) 周 辺 3 km~80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した¹¹⁾。

2018 年度 (平成 30 年度)には、島根県にある中国電力島根原子力発電所 (以下、島根) 及び静岡県にある中部電力浜岡原子力発電所周辺 3 km~80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した¹³⁾。

2019 年度(令和元年度)には、青森県にある東北電力東通原子力発電所並びに日本原燃六ヶ 所再処理工場及び石川県にある北陸電力志賀原子力発電所周辺3km~80km 圏内におけるバッ クグラウンドモニタリングを実施した。また、当年度より、無人航空機を用いた原子力防災へ の運用技術開発に着手し、機器の選定及び仕様の確認のためのフライト試験を実施した¹⁵⁾。

2020年度(令和2年度)には、福井県にある関西電力美浜発電所並びに日本原子力発電敦賀 発電所(以下、美浜・敦賀)及び大阪府にある近畿大学原子力研究所並びに京都大学複合原子 力科学研究所における研究用原子炉(以下、近大炉・京大炉)周辺3km~80km 圏内における バックグラウンドモニタリングを実施した。ただし、美浜・敦賀及び近大炉・京大炉の測定範 囲は2016年度(平成28年度)の大飯・高浜の測定範囲と重複する領域を除いた。また、無人航 空機 Penguin C の原子力防災への運用技術開発の一環として、機体の運用を慣熟することを目 的としたフライト試験を実施するとともに機体に搭載する放射線検出器や通信システム等を試 作し、本試作機を搭載したフライトを実施して得られたデータ及び原子力防災への運用に際し ての今後の技術開発課題等を取りまとめた¹⁷⁾。

2021 年度 (令和3年度)には、2016年度 (平成28年度)以来、2回目となる大飯・高浜周辺3 km~80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した。また、Penguin C の運用 技術開発を進め、フライト試験を引き続き実施するとともに、機体に搭載する放射線検出器や 通信システム等の基本設計及び製作を行った。本システムを搭載してフライトを実施すること で得られたデータ及び緊急時モニタリングへの運用に際しての更なる課題等について取りまと めた¹⁹⁾。

2022 年度 (令和4年度)には、美浜・敦賀及び伊方の周辺3 km~80 km 圏内においてバック グラウンドモニタリングを実施した。なお、美浜・敦賀及び伊方での測定はそれぞれ 2020 年 度(令和2年度)及び2016年度(平成28年度)以来2回目となる。また、原子力災害時の緊急 時モニタリングにおける無人航空機 Penguin Cの運用技術開発の一環として、2021年度(令和 3年度)に引き続き、フライト試験による慣熟訓練を実施するとともに、原子力災害時におけ る緊急時モニタリングのツールとして運用する際に必要となる機能等について検討した²¹⁾。

2023 年度 (令和5年度)の規制庁受託事業では、川内の周辺3 km~80 km 圏内においてバッ クグラウンドモニタリングを実施した。なお、このモニタリングは7月と11月の2回に分け て実施しており、必要に応じて「川内(前期)」「川内(後期)」と表記する。また、原子力災害 時の緊急時モニタリングにおける無人航空機 Penguin C の運用技術開発の一環として、無人航 空機 Penguin C に搭載する放射線検出器の開発、Cs-137 点線源を用いた放射線応答試験、地上 での運転試験による緊急時モニタリングへの適合性について調査した。さらに、緊急時モニタ リングで活用できる無人航空機の調査を実施し、基本的な飛行動作試験と放射線モニタリング の結果から運用上の課題を抽出した。また、内閣府主導の原子力防災訓練における緊急時航空 機モニタリングの実施を通して課題を抽出した。この訓練には、有人ヘリコプターの緊急時モ ニタリング訓練に加え、国内で初となる無人航空機や無人ヘリコプター、ドローンによる訓練 フライトも含まれる。本報告書では、第2章に有人へリコプターのモニタリングシステムにつ いて、第3章でデータの取得及び解析方法を示す。第4章では、2023年度(令和5年度)に実 施した、川内周辺のバックグラウンドモニタリング結果を示す。第5章で、内閣府主導の令和 5 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリング訓練を実施した結果及び抽出し た課題について報告する。第6章では、無人航空機 Penguin C に搭載する放射線検出器の開発、 Cs-137 点線源を用いた放射線応答試験及び地上運用試験の結果を報告する。第7章では、緊急 時モニタリングで活用可能な無人航空機、特にドローンの性能調査を行い、2機種を選定して 基本飛行試験及び放射線モニタリング試験結果を取りまとめる。

	基準の種類	基準の概要	初期設定値			
緊急防	OIL1	地表面からの放射線、再浮遊した放射 性物質の吸入、不注意な経口摂取によ る被ばく影響を防止するため、住民等を 数時間内に避難や屋内退避等させるた めの基準	(地上1 mで言	500 µSv/h 計測した場合の空間放射線量率)		
護 措 罟	011.4	不注意な経口摂取、皮膚汚染からの外の地域になります。		β線: 40,000 cpm (皮膚から数cmでの検出器の計数率)		
凹	UIL4	部彼はくを防止するため、除衆を請する ための基準	β 線: 13,000 cpm【1か月後の値】 (皮膚から数cmでの検出器の計数率)			
早期防護措置	OIL2	地表面からの放射線、再浮遊した放射 性物質の吸入、不注意な経口摂取によ る被ばく影響を防止するため、地域生産 物を制限するとともに、住民を1週間程 度内に一時移転させるための基準	20 µSv/h (地上1 mで計測した場合の空間放射線量率)			
飲	飲食物に係る スクリーニング 基準	OIL6による食物摂取制限を判断する準 備として飲食物中の放射性核種濃度測 定を実施すべき地域を特定する際の基 準	(地上1 mで言	0.5 μSv/h (地上1 mで計測した場合の空間放射線量率)		
食物摂取制限		経口摂取による被ばく影響を防止する 011.6 ため、飲食物の摂取を制限する際の基	核種	飲料水 牛乳·乳製品	野菜類、穀類、肉、 卵、魚、その他	
			放射性ヨウ素	300 Bq/kg	2,000 Bq/kg	
	OIL6		放射性セシウム	200 Bq/kg	500 Bq/kg	
		準	プルトニウム 及び 超ウラン 元素 のア ルファ核種	1 Bq/kg	10 Bq/kg	
			ウラン	20 Bq/kg	100 Bq/kg	

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL²³⁾ (一部抜粋)

2. 有人ヘリコプターのモニタリングシステム

2.1. 航空機モニタリングシステム

一般的に、航空機モニタリングシステム (Aerial Radiation Monitoring System: ARMS) には、 大型の NaI(Tl)シンチレーション式検出器(以下、NaI(Tl)検出器) を用いたスペクトル測定型の 放射線検出器の情報と GPS (Global Positioning System, 全地球測位網) による位置情報をリンク してデータ保存するシステムが用いられる。

今回のモニタリングで使用した Radiation Solutions Inc. (RSI, Canada) 製のシステム (以下、 RSI システム) は、機内に装着するタイプである。RSI システムのブロック図を Fig. 2-1 に示し、 外観を Fig. 2-2 に示す。検出部には、2"×4"×16"の NaI(TI)検出器 3 本を組み込んだ検出器の ユニットを 2 台使用している (合計: 12.6 L)。なお、NaI(TI)検出器の上部に設置してある LaBr₃(Ce)シンチレーション式検出器 (3"×3"、以下、LaBr₃(Ce)検出器) は空気中ラドンの子孫 核種に起因する γ線計数率の弁別 (3.8 節に詳述する) に使用する。検出器で計測した 1,024 ch (0 ch~1,023 ch) の γ線のスペクトルは 1 秒ごとに同期する GPS による位置データとともに、 RS-701 と呼ばれる NaI(TI)検出器上部に取り付けてあるデータ収集装置に保存される。検出器 2 台のデータは RS-501 という装置で統合される。RS-501 は PC と接続でき、PC にインストー ルされている専用のソフトウェア (RadAssist) を使用することによって GPS による位置情報や γ線の計数率情報をリアルタイムに確認できる。また、RSI システム全体は外付けのバッテ リーで駆動し、完全充電で 5 時間の稼働が可能である。現在、航空機モニタリングで用いられ ている機器は複数あり、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリング²⁰⁾で主に使われ ている 2 システム (RSI 1 及び RSI 2) と区別するため、本報告書では RSI 3 と表記する。

また、RSIシステムのGPS受信機とは独立して高精度GPSシステムも機内に搭載している。 当該システムでは高精度GPS受信機 (CORE 社製 QZNEO) が用いられており、RSIシステムの GPS 受信機と比較して利用可能な信号が多い。具体的には、準天頂衛星システム (通称:みち びき)からの情報を利用できるほか、L1-SAIF と呼ばれる補強信号を受信することにより、精 度の高い位置情報の測定を行うことができる。測定された γ線計数率とその位置情報との紐付 けは基本的にRSIシステムのGPS で取得された緯度及び経度を基に行うが、RSIシステムの GPS が異常値を示す例が確認されている^{8),10)}。そのような事象が起きた際には、位置情報を高 精度GPS で取得された緯度、経度及び高度に置換する。







Fig. 2-2 RSI システムの外観

2.2. ヘリコプターの選定

RSI システムはヘリコプター機内に搭載するタイプであるため、ヘリコプターの機底に燃料 タンクがある場合、燃料タンクの材料及び燃料によるγ線の遮へい効果を考慮する必要がある。 そこで、γ線測定値の誤差を低減するため、ヘリコプター機体は機底に燃料タンクのないもの に限定した。航空機モニタリングに使用できる機底に燃料タンクのない機種の例を Fig. 2-3 に 示す。2023 年度 (令和5年度) に使用したヘリコプター機種 (機体番号) は、機体繰りの都合か ら、川内 (前期) では Bell430 (JA02AX)、川内 (後期) では Bell412 (JA6929) とした。これら使 用機体を Fig. 2-4、Fig. 2-5 に示す。



Bell430 ベル・ヘリコプター・テキストロン社製

Bell412 ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



AS332 アエロスパシアル社製



S-76 シコルスキー・エアクラフト社製

Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧



Fig. 2-4 川内 (前期) の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell430 (JA02AX))



Fig. 2-5 川内 (後期) の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell412 (JA6929))

2.3. RSI システムの保守

RSI システムの健全性をチェックするため、RSI システムに組み込まれているプログラムに より、フライト前に1日1回、以下の事項を確認した。

- ・RSI システムの接続チェック: データ収集装置 (RS-701 及び RS-501) に表示されるエラーラ ンプチェック
- ・チェックプログラムによる検出器の特性確認 (環境中に存在する TI-208 の 2,614 keV のピー クに対するエネルギー分解能 (Energy Resolution) と信号増幅回路 (Amplifier: アンプ) の振幅 利得 (Gain: ゲイン) をチェック)

2,614 keV のピークに対するエネルギー分解能については、メーカーから 6 %以下という保 守の推奨値が示されている。日常の点検で常に数値を確認し、この推奨値を超えた場合には高 圧電源の電圧を変更するなど再調整を実施する。また、アンプのゲインについても同様にメー カーから示されている推奨値である 0.8 を下回る場合に再調整を行うこととしている。川内 (前期) 及び川内(後期)の測定期間におけるエネルギー分解能とアンプのゲインの推移について Fig. 2-6 及び Fig. 2-7 に示す。図中の RSI 3 以降の枝番は配置してある検出器の番号である。川 内(前期) 及び川内(後期)のモニタリング期間を通じて、エネルギー分解能は安定しており、 ゲインの再調整を行う必要性は生じなかった。今までの経験から、気温が低下した場合にゲイ ンが若干上昇する傾向にあることが分かっている。これは周囲の気温が低下するにつれて RSI システム自体の温度上昇も鈍くなることで、光電子増倍管に使用される電子素子のインピーダ ンスが減少しゲインが上昇するという、温度特性が反映されていると考えられる。このことか ら、気温の低い時期のモニタリングの際には注意が必要であり、ヘリコプター機内はなるべく 気温が下がらないように対策を講じる必要がある。RSI システムには一定期間ごとに自動でゲ インを補正する機能があり、この温度特性はある程度までは自動で補正可能である。



Fig. 2-6 システムのエネルギー分解能及びゲインの推移 (川内(前期))



Fig. 2-7 システムのエネルギー分解能及びゲインの推移 (川内(後期))

3. データ取得及び解析方法

3.1. 航空機モニタリング及び地上測定の方法

航空機モニタリングでは、測定対象となるエリアにおいて予め設定した飛行経路(以下、測線)の上空をフライトし、γ線計数率と位置情報のデータを取得する。以下に、航空機モニタ リングによるデータ取得方法の詳細を記述する。

航空機モニタリングによる測定データは下記のようなフライト条件で取得した。なお、これらの条件は気象状況や地形の高度勾配によって若干変化する。

[フライト条件]

- 速度:160 km/h を基準とし、130 km/h~180 km/h の範囲
- 基準対地高度: 300 m (=1,000 ft)
- 対地高度の許容範囲:0m~約500m(=1,750ft)
- 測線間隔:5 km、10 km または20 km

測定データは1秒ごとに GPS による位置情報と検出器のγ線の計数率を記録し、対地高度の 許容範囲から逸脱した測定データは不確かさが比較的多く含まれるため、空間線量率等の算出 には用いないこととした。Fig. 3-1 に川内(前期)及び川内(後期)における予定測線を東西方向 の実線で示す。本測線は2015 年度(平成27 年度)に実施した川内におけるバックグラウンドモ ニタリングから一部間引いたもので、測線間隔は基本的に5 km であるが、一部で10 km また は 20 km とした。航空機モニタリングの拠点として、鹿児島空港に併設されている株式会社ノ エビアアビエーション鹿児島空港事務所を使用した。なお、航空機モニタリングによる測定は 以下のような仮定に基づいている。

[航空機モニタリングにおける仮定]

- 航空機モニタリングで計測される計数率は、上空を頂点とし対地高度を高さとした円錐の底面部分に該当する地表面範囲における平均値とする。
- 測定対象となる地表面は、平坦かつ放射線の分布は一様とする。

Fig. 3-2 に航空機モニタリングデータ取得のイメージを示し、Fig. 3-3 に航空機モニタリング における測定範囲のイメージについて示す。また、航空機モニタリングにより評価する空間線 量率の妥当性を検証するため、Fig. 3-1 に示した測線の近傍(黄色及び水色丸点)の 30 地点にお いて、NaI(TI)検出器(アロカ株式会社製 TCS-172B)を用いて、地表面から1mの高さの空間線 量率の測定(以下、地上測定)を行った。地上測定地点には周囲に建物等の遮へい物がなく地 形的に平坦な場所を選定し、NaI(TI)検出器の時定数を10秒とし、各測定地点にて地面に対し て水平方向にプローブを30秒間保持してから開始した。およそ5秒間隔でサーベイメータに 表示されるデジタル値を5回記録し、その平均値に校正乗数を乗じた値を小数点第3桁で四捨 五入して小数点第2桁とし、その地点における地上測定値とした。



Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (川内 (前期) 及び川内 (後期)) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 3-2 航空機モニタリングデータ取得のイメージ



Fig. 3-3 航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージ

3.2. キャリブレーションフライト方法

航空機モニタリングにより上空で取得したγ線計数率を地表面から1mの高さの空間線量率 や地表面の放射性セシウムの沈着量に換算するためのパラメータを求めるため、各種キャリブ レーションフライトを実施する。キャリブレーションフライトの種類と目的について以下に示 す。また、Table 3-1 に各キャリブレーションフライトの概略をまとめた。

・テストラインフライト

実際のフライトでの対地高度と基準対地高度 (300 m) とのずれによって生じる γ 線計数率 の多少を補正するための実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor: *AF* (m⁻¹))を求めるフラ イトである。本フライトは、線量や地形の変化が少ない地点において距離が約 3 km のライ ンを設定し、その上空において対地高度を変化 (300 m、450 m、600 m、750 m、900 m 及び 1,500 m) させてフライトを実施する。上記の各対地高度でフライトした際の対地高度の平均 値と γ 線計数率の平均値をプロットし、それらプロットに対する指数近似曲線の傾きを *AF* とする。テストラインフライトのイメージを Fig. 3-4 に示す。本報告において、テストライ ンフライトの実施場所は鹿児島県出水市の周辺とした。また、テストラインとして選定した具体的な場所について Fig. 3-5 に直線で示す。

・テストポイントフライト

空間線量率の勾配が小さく、かつ地形の平坦な地点 (テストポイント)を選定し、テスト ポイントの中心点から半径 500 m の範囲内において、対地高度 300 m を維持して 3 分間ホバ リングして γ線計数率を取得するものである。また、テストポイントの中心点から半径 500 m の範囲内で 30 地点を目安に NaI(Tl)検出器を用いて地上測定を行う。本フライトとテスト ポイントにおける地上測定値を相互比較することにより、基準対地高度 (300 m) における γ 線計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するための係数 (Conversion factor of Dose-rate: *CD* ([s⁻¹]/[µSv/h]))が求まる。本報告において、テストポイントフライトの実施場 所はテストラインフライトと同様とした。テストポイントとして選定した具体的な場所を Fig. 3-5 に半径 500 m の円で示す。テストポイントフライトのイメージを Fig. 3-6 に示す。

・宇宙線フライト

宇宙線の影響を差し引くため、地上からのγ線の影響が極めて少ないと考えられる海上を 約300m~2,400mまで上昇し、宇宙線に起因するγ線計数率データを取得するものである。 宇宙線フライトにより取得されるγ線計数率は海抜高度の上昇に伴って増加し、その上昇の 度合いは測定エリアにはほとんど依存せず、概ね一定であることが見出されている⁴⁾。一方 で、測定時期や使用するヘリコプター機種の違いが宇宙線フライトにおけるγ線計数率の上 昇の度合いに及ぼす影響に関する知見はやや不十分である。そこで、本知見を拡充するた め、各測定エリアで航空機モニタリングを実施する度に宇宙線フライトを実施することと している。宇宙線フライトのイメージを Fig. 3-7 に示す。フライト場所は陸地から十分に離 れた海上であれば場所は問わないので、天候等を見ながら海上の適当な位置で実施する。 なお、本報告において宇宙線フライトは鹿児島県の長島から南西方向または熊本県の天草 諸島から南西方向に少し離れた東シナ海上で実施した。

・空気中核種フライト

地上からの放射線の影響が極めて少ないと考えられる対地高度(海上の場合は海抜高度) 約900mに保ち、約3分間のフライトを継続し、ヘリコプター機体及びその周辺の空気中に 存在する放射性核種由来のγ線計数率を取得する。空気中核種フライトのイメージを Fig. 3-8に示す。本報告において、空気中核種フライトは鹿児島県の長島から南西方向または西 方海岸から西方向に少し離れた東シナ海上で実施した。

・オーバーラップフライト

換算パラメータの内、各ヘリコプター機体に設定する CD の妥当性評価を行うために、各 ヘリコプター機体で同一の測線 (距離 10 km、間隔 1 km、本数 4 本) をフライトして取得し た γ線計数率データを比較するものである。本フライトは、他のキャリブレーションフライ トとは異なり、換算パラメータの取得が目的でなく、実際に解析に用いる換算パラメータ の妥当性を検証することを目的としている。本報告におけるオーバーラップフライトに用 いた測線を Fig. 3-9 に示す。なお、オーバーラップフライトは川内 (前期)の終期と川内 (後 期)の始期にそれぞれ実施した。

名称	目的	方法	頻度
テストライン フライト	空気減弱係数を算出	テストライン上で対地 高度を変化 (300 m、450 m、600 m、750 m、900 m及び 1,500 m)させてフ ライト	測定期間中に少な くとも2回
テストポイント フライト	空間線量率換算係数 を算出	テストポイント範囲内で、対地高度 300 m で 3分間ホバリング	測定期間中に少な くとも2回
宇宙線 フライト	宇宙線の影響を調査	海上を海抜高度 300 m~ 2,400 m まで上昇	測定期間中に少な くとも2回
空気中核種 フライト	 ヘリコプター機体及 びその周辺の空気中 に存在する放射性核 種の影響を調査 	対地高度 (または海抜高 度) 900 m を 3 分間フラ イト	毎日
オーバーラップ フライト	空間線量率換算係数 の妥当性確認	特定の測線を対地高度 300 m でフライト	1 つのエリアで測定 を前期、後期の2回 に分けて行うと き、前期の終期と 後期の始期でそれ ぞれ1回

Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧



Fig. 3-4 テストラインフライトのイメージ



Fig. 3-5 川内 (前期及び後期) におけるテストライン及びテストポイントの場所 (鹿児島県出水市)

(背景地図は、ESRI, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community を使用。)



陸上または海上

Fig. 3-8 空気中核種フライトのイメージ



Fig. 3-9 オーバーラップフライトに用いた測線 (鹿児島県出水市)

3.3. 解析のフロー

航空機モニタリングによって上空で計数されるγ線は、主に以下の4種類に分けられる。

- 地表面からのγ線
- ② 空気中核種からのγ線
- ③ 宇宙線
- ④ 放射性セシウムのγ線

本報告で測定した川内周辺においては④の影響は非常に小さく無視できる。そのため、主 目的である①を評価するためには、全計数率から②及び③起源の計数率を減算し、さらに対地 高度の補正や空間線量率への換算を行う必要がある。これらを考慮した解析のフローを Fig. 3-10に示す。本報告では、このフロー図に則った標準的な解析方法を「標準的解析手法」と呼 称する。なお、本章以降の空間線量率とは、周辺線量当量率(1 cm線量当量率)を意味する。

解析の具体的な手順は次の通りである。3.4 節では、主目的である①の評価方法及びこれを 空間線量率に換算する方法について述べる。3.4.1 項で、全計数率から②及び③を減算する方 法を説明する。3.4.2 項では、対地高度補正係数 HF の算出方法を示す。これは、対地高度の変 化による計数率の変動を補正するためのものである。3.4.3 項では、空間線量率への換算係数 CD の算出方法を示す。これは、計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するため の係数である。3.4.4 項では、上記のパラメータを用いて計数率を空間線量率に換算する具体 的な方法を示す。

この解析手法により、バックグラウンドとなる空間線量率を評価することが可能となる。 なお、*CR-Index、AF、CD*といった全計数率から空間線量率に換算するための各種係数を総称 して「換算パラメータ」と呼ぶ。



Fig. 3-10 解析のフロー
3.4. 空間線量率への換算方法

大地にはカリウム 40 (K-40)、ウラン系列核種、トリウム系列核種等の天然放射性核種が含 まれており、これらから放出されるγ線が空間線量率に寄与している。本報告における航空機 モニタリングでは、これらのγ線を測定し、地表面からの放射線分布を評価することを主目的 としている。そのため、全計数率から空気中核種及び宇宙線由来の計数率を減算し、さらに対 地高度の補正や空間線量率への換算を行う必要がある。本節では、これらの解析手法について 詳述する。

3.4.1. 空気中核種及び宇宙線由来のγ線計数率

航空機モニタリングにおいて、全γ線計数率から空気中核種及び宇宙線由来の計数率を減算 し天然放射性核種からのγ線を評価する。本項では、これら計数率の減算方法について示す。 空気中核種由来のγ線計数率については、空気中核種フライト(地上からの放射線がほとん ど届かないと考えられる対地高度(または海抜高度)900 m以上)で取得したデータを用いる。 本報告においては、鹿児島県の長島から南西方向または西方海岸から西方向に少し離れた東シ ナ海上で空気中核種フライトのデータを取得した。空気中核種フライトで取得した計数率の算 術平均値を Table 3-2 に示す。ここで、空気中核種フライトによって陸上及び海上で取得した スペクトルの例¹⁷⁾を Fig. 3-11 に示す。このように、空気中核種フライトで得られるスペクト ルには陸地と海上とで顕著な差異はなく、対地高度を十分に取れば陸地で得られたデータでも 空気中核種からのγ線計数率の減算に用いることが可能である。なお、空気中核種フライトの データを用いることなく、空気中ラドン子孫核種による計数率を減算する手法(ラドン弁別手 法)については 3.8 節に詳述する。

これまでの経験 ⁵⁾⁻²¹⁾から海抜高度の上昇に伴い宇宙線由来の計数率が上昇することが分かっ ている。宇宙線由来の γ 線は RSI システムが測定している全エネルギー範囲 (30 keV~3,000 keV) で計数されており、TI-208 が放出する 2,614 keV の γ 線及びその散乱線の影響により、 2,614 keV 以下の計数から宇宙線による計数を弁別することは難しい。そこで、宇宙線だけを 計数していると考えられる 2,800 keV 以上の計数に着目した。Fig. 3-12 に海抜高度と宇宙線の 計数率の関係例を示す。この例は、沖縄と北海道での海上において、海抜高度 50 m~2,000 m で取得したデータのうち、2,800 keV 以上の γ 線の計数率をプロットしたものである。なお、 RSI システムにおいて、3,000 keV 以上の γ 線の計数率なアロットしたものである。この ように、海抜高度と 2,800 keV 以上の γ 線の計数率は正の相関にあり、計測する場所に影響さ れない。宇宙線由来の計数率を推定するため、宇宙線フライトで取得したデータを用いて *CR*-*Index* 設定した。*CR-Index* は、2,800 keV を超える γ 線の計数率と 2,800 keV 以下の γ 線の計数 率の比として算出される。*CR-Index* の算出結果を Table 3-2 に示す。*CR-Index* は機体と検出器 の組み合わせごとに設定し、測定データにおける 2,800 keV 以上の γ 線計数率に *CR-Index* を乗 じることで全エネルギーにおける宇宙線由来の計数率を推定し、全計数率から差し引く。具体 的な減算方法は 3.4.4 項に示す。



Fig. 3-11 空気中核種フライトで取得した陸上と海上でのγ線スペクトル例¹⁷⁾





(a: 沖縄海域, b: 北海道海域) (図中の曲線は、測定データの指数関数による近似曲線である。)

Table 3-2 RSI システムと機体の組み合わせと空気中核種由来の計数率平均値及び CR-Index

測定エリア	RSIシステム	ヘリコプター 機種 (機体番号)	運航会社	空気中核種由来の 計数率平均値(s ⁻¹)	CR-Index
川内(前期)	RSI 3	Bell430 (JA02AX)	朝日航洋 株式会社	232	3.46
川内(後期)	RSI 3	Bell412 (JA6929)	朝日航洋 株式会社	324	3.71

3.4.2. 対地高度補正係数 HF の算出方法

各測定点における対地高度と基準対地高度とのずれによって生じるγ線計数率の多少を補正 するために、テストラインで取得したデータを基に、空気減弱係数 *AF* を求め、計算式 [1] か ら対地高度補正係数 *HF* を算出した。なお、*AF* は非線形最小二乗法により算出した。

$$HF = \exp[AF (H_{std} - H_m)]$$
^[1]

ここで、

HF: 対地高度補正係数(Height correction Factor (m⁻¹))

AF:空気減弱係数 (Attenuation Factor (m⁻¹))

H_{std}: 基準対地高度(300 m)

*H*_m:対地高度(楕円対地高度-DEM-ジオイド高) である。

対地高度の算出には、GPS で記録した楕円対地高度から、10 m メッシュの数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM)³¹⁾及びジオイド高³¹⁾を差し引いて求めた*¹。テストラインフラ イト中の対地高度及び計数率の平均値をプロットし、Python3 を用い非線形最小二乗法による 指数関数回帰を実施し、最適化された曲線の傾きから *AF* を得た。指数関数回帰のあてはまり の良さは残差分散 (本報告では、実測値と回帰による推定値との差の平方和を、データ数一説 明変数の個数 (2 個) で除算することで算出した。以下、*RV*) で評価した。*RV* は非負であり、 小さいほど実測値と回帰による推定値がよく一致していることを意味する。実際に使用した換 算パラメータについては、4.2 節に詳述する。

3.4.3. 空間線量率への換算係数 CD の算出方法

航空機モニタリングによるγ線計数率を地表面から1mの高さの空間線量率に換算するための換算係数 CD ([s⁻¹]/[μSv/h])は、テストポイントにおける地上測定値の平均値とテストポイントの対地高度 300 m を 3 分間ホバリングして得られた計数率の平均値との比から求めた。地上 測定値として、3 分間のホバリング中の緯度及び経度の平均値を求め、その地点から半径 500 m 円内における平均値を用いた。テストポイントにおける地上測定値及び算出した CD については 4.2 節に詳述する。

^{*&}lt;sup>1</sup> GPS で測定される高度は、世界測地系で使用している楕円体表面からの高さになっており、 標高 (飛行体の場合は対地高度)を求める場合には、測地学的に定義されている海水面の高さ (ジオイド高)を差し引く必要がある。ジオイド高は、地域によって異なるが、日本においては 30 m~40 m である。

3.4.4. 空間線量率への換算方法

上記のパラメータを用いて計数率を空間線量率に換算する方法について以下に示す。また、 計算式を式 [2] 及び式 [3] に示す。

① 測定で得られたγ線スペクトルから以下のエネルギー領域の計数率を計算する。

- (1) 全計数率 (**C**_{all})
- (2) 2,800 keV を超えるエネルギーの計数率 (C>2.800 keV)
- ② 式 [2] で用いられる、C_{net}を算出するために、C_{>2,800 keV}に CR-Index を乗じて全エネルギー領域に対する宇宙線由来の計数率 (C_{cos})を推定する。
- ③ 空気中核種フライトで取得したデータを空気中核種由来の計数率 (Cair) とする。
- ④ *C*_{all}から*C*_{cos}と*C*_{air}を差し引いた計数率を地表面由来の計数率*C*_{net}とし、*CD*及び*HF*を用いて地表面から1mの高さの空間線量率Dを算出する。

$$D = \frac{C_{\text{net}} \times HF}{CD}$$
[2]

ここで、

D: 地表面から1mの高さの空間線量率(µSv/h)

C_{net}:地表面由来の計数率(s⁻¹) (= C_{all} − C_{cos} − C_{air} (ただし、C_{cos} = C_{>2,800 keV} CR-Index))
HF:対地高度補正係数 (m⁻¹)

CD:空間線量率換算係数 ([s⁻¹]/[µSv/h])

である。式 [1] を式 [2] に代入すると、測定で得られたγ線スペクトルから地表面 1 m の高さの空間線量率 D に換算する式 [3] が得られる。

$$D = \frac{C_{\text{net}} \exp[AF (H_{\text{std}} - H_{\text{m}})]}{CD}$$
[3]

定義した各記号の凡例を改めて以下に示す。

D: 地表面から1mの高さの空間線量率(µSv/h)

 C_{net} :正味の計数率(s⁻¹) (= $C_{\text{all}} - C_{\cos} - C_{\text{air}}$ (ただし、 $C_{\cos} = C_{>2,800 \text{ keV}}$ CR-Index))

AF: 空気減弱係数 (m⁻¹)

H_{std}: 基準対地高度 (300 m)

*H*_m: 対地高度 (m)

CD:空間線量率換算係数 (s⁻¹/[μSv/h])

以下では、*CR-Index、AF や CD* といった、全計数率から空間線量率に換算するための換算 係数等を総称し「換算パラメータ」と呼ぶ。 3.5. 検出限界値

検出限界 (Limit of Detection) と信頼性について評価を行った。まず、式 [3] に示した航空機 モニタリングにおける空間線量率への換算方法の評価式を基に、検出限界値を計算する。式 [3] に示したように、航空機モニタリングにより算出される空間線量率 D は正味の計数率 C_{net} (= $C_{all} - C_{cos} - C_{air}$)を用いて求められ、その検出限界値は $C_{air} \ge C_{cos}$ の影響を受ける。 C_{cos} はこ れまでの測定結果 ⁵⁾⁻²¹⁾を見ると 200 s⁻¹~500 s⁻¹の範囲となり、 C_{air} は約 400 s⁻¹であることから、 ここでは、標準的な検出下限値を求めることを目的とし、 $C_{air} + C_{cos} = 900$ s⁻¹ として評価を行 った。

一般的に、検出限界値を求める際には、バックグラウンド計数率 (N_B)の標準偏差 (σ) を式 [4] に示した Currie の式³²)に当てはめ、検出限界値 (N_D)を算出する。

$$N_{\rm D} = 4.653\sigma_{N_{\rm P}} + 2.706$$
 [4]

ここで、N_Bを900 s⁻¹とすると、N_Dは142 s⁻¹となる。これに、RSI システムの標準的な空間 線量率換算係数 CD (13,000 [s⁻¹]/[µSv/h]) から RSI システムによる空間線量率の検出下限値を計 算すると、約 0.01 µSv/h となった。

3.6. 不確かさ

航空機モニタリングの手法において、不確かさの要因としては、式 [1] から以下の事項が挙 げられる。

- 検出器の計数誤差:一般的に、計数率に対して統計的な誤差が生じる。
- CD の選択:キャリブレーションのためのデータ取得には、測定条件により 20 %程度の誤 差が生じる。本測定の経験を重ねてきた現在では、その不確かさは小さくなってきている。
- 高度補正係数の選択: CD と同様に、キャリブレーションのためのデータ取得の状況により係数の選択時の不確かさが生じる。
- 高度情報に係る誤差:航空機モニタリングにおいて海抜高度は GPS で測位しているが、 衛星の位置等の測位状況によっては、海抜高度に最大 30 m 程度の誤差が生じる。本誤差 の低減は今後の課題である。

3.7. 補間方法

航空機モニタリングにより得られる測定データは、GPSで記録した位置における値であり、 これらのデータだけでは連続的な放射線分布を把握することが難しい。測定エリア全域全体の 空間線量率の分布を連続的に示すマッピングを行うため、測定データが未知の地点における値 を推定するための補間が必要となる。空間線量率や放射性物質沈着量のマッピングについては、 国際原子力機関 (IAEA) から標準的な方法が示されている³³⁾。補間方法には、IDW (Inverse Distance Weighted:逆距離加重法)、クリギング (Kriging)、スプライン (Spline)、Natural Neighbor 等の多くの方法が存在する。福島原子力発電所周辺の航空機モニタリングでは、2011年(平成23年)4月6日~29日にかけて実施された第1次の解析を担当した米国エネルギー省が用いた IDW を踏襲している。IDW とはある補間地点の近傍にある複数のサンプル点の 測定値を補間地点からサンプル点までの水平距離の逆数のべき乗関数により重み付け平均することで、ある補間地点における値を推定する方法である。IDW による補間点における推定値 は以下の式 [5] で表される³⁴⁾。

$$\widehat{z_0} = \frac{\sum_{i=1}^{s} d_{\mathrm{NT}}(p_0, p_i)^{-\lambda} z_i}{\sum_{i=1}^{s} d_{\mathrm{NT}}(p_0, p_i)^{-\lambda}}$$
[5]

ここで、

20:補間地点における空間線量率の推定値

 $d_{NT}(p_0 p_i)$ (i = 1, 2, ..., s):補間地点 p_0 からサンプル点 p_i までの水平距離

z_i:各サンプル点が持つ実測値

s:補間地点から近傍のサンプル点数

である。

IDW による補間の条件として「補間地点とサンプル点間の距離が大きくなるにつれて、その補間地点においてサンプル点が推定値に与える影響が減衰していく」ことが前提になる。そのため、推定する (重み付け平均)値は補間地点から近傍 s 点の最高値より大きくならず、最低値より小さくなることはない。また、IDW には複雑なパラメータ設定が不要である。必要となるのは、補間地点とサンプル点間の距離に応じて影響度を制御するべき乗数 λ と内挿処理の対象となるサンプル点数 s の 2 つである。IDW では λ と s の設定によって結果が異なってくるが、最良の値を決定するための基準が存在していない。λ が大きいほど補間地点近傍データの影響力が相対的に大きくなる。λ として一般的に 2 がよく用いられるが、必ずしも 2 が最良であるとは限らない。本報告では、今まで積み上げてきた経験から、λ として 2.3、s として 400を採用した。Fig. 3-13 にパラメータ設定の異なる 2 パターンの空間線量率マップの例を示す。 λ を 2.3、s を 180 とした Fig. 3-13 a) と λ を 2.0、s を 12 とした Fig. 3-13 b)を比べると、両者の分布傾向は概ね一致しているが、a)の方が線量のレンジの境界がなめらかになっていることが分かる。

航空機モニタリングにおいては、前述した通り 300 m 上空からの測定を実施するため、測定 される範囲は、ヘリコプター直下の地上半径 300 m 円内における放射線量の平均値となる。空 間線量率等のマッピングにおいては、地域基準メッシュ (1 km)内に収めることを考慮して、 メッシュサイズを 250 m とした。





3.8. 空気中ラドン子孫核種の弁別手法

3.8.1. ラドン子孫核種

地殻中に存在するウランやトリウムの壊変系列には、Fig. 3-14に示すようにラドンが含まれ、 気体であるラドンの一部は大気中に散逸する。Table 3-3 にラドン子孫核種が放出するγ線エネ ルギーについて示す。地殻中から大気中に散逸したラドン (Rn-222: ラドン、Rn-220: トロ ン)は、Po、Pb、Biなどのラドン子孫核種に壊変し、大気中の微粒子に吸着して大気中を浮遊 する。航空機モニタリングにおける基準測定高度である対地高度約 300 m 付近における空気中 ラドン子孫核種濃度の測定例はほとんどないものの、地上におけるラドン濃度は広く測定され ており、日本の屋外における濃度レベルは 6 Bq/m³程度とされている³⁵⁾。このラドンの濃度レ ベルは比較的低いものの、航空機モニタリングにおいてはヘリコプターの周辺に存在するよう な場合、測定される計数率に一定の影響があると考えられる。また、日単位や季節単位で空気 中における空気中ラドン子孫核種濃度が変動することが知られており、航空機モニタリングの 測定データに及ぼす影響も常に一定とは限らないと推察される³⁶⁾。これまでの航空機モニタ リングにおいても、空気中ラドン子孫核種の影響により、航空機モニタリングによるγ線計数 率を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算した際に、過大評価となる例が報告されてい る ^{5,-7}。そのため、航空機モニタリングによる空間線量率を適切に算出する観点から、空気中 ラドン子孫核種由来のγ線計数率を除去する必要がある。

これまでの航空機モニタリングにおいては、空気中ラドン子孫核種の影響を除去するため、 2015 年度 (平成 27 年度) に空間線量率の計算高度化のための検討を実施し⁷⁾、2016 年度 (平成 28年度)には大量のデータに適用できるように既存の航空機モニタリング解析システムに開発 した手法を組み込んだ⁸⁾。また、組み込んだ解析プログラムを使用して 2016 年度 (平成 28 年 度)から 2022 年度 (令和 4 年度)に実施した原子力施設周辺におけるモニタリングデータを解 析し、大気中のラドン子孫核種の影響について考察した^{9,11,13,15,17,19,21)}。2023 年度 (令和 5 年度)も引き続き川内周辺の航空機モニタリングデータに本手法を適用した。以下、空気中ラ ドン子孫核種の影響の除去手法を「ラドン弁別手法」と呼称する。



Fig. 3-14 ウラン系列及びトリウム系列 (核種名の下の数値は半減期を表す。)

Nuclide	Series	Gamma energy (keV)	Branching ratio (%)	Note
Pb-212	Th	239	43.3	
Pb-214	U	352	37.6	
TI-208	Th	583	84.5	Cs-134: 569 keV (15.4 %)
Bi-214	U	609	46.1	Cs-134: 605 keV (97.6 %)
Bi-214	U	768	4.94	Cs-134: 796 keV (85.5 %)
Bi-214	U	1,120	15.1	
Bi-214	U	1,765	15.4	
TI-208	Th	2,615	99.2	

Table 3-3 ラドン子孫核種の放出する γ線

3.8.2. ラドン弁別手法の概略

前述したように、ラドン子孫核種は大気中だけでなく地表面及び地殻にも存在し、そのγ線 エネルギー領域は広範である。よって、航空機モニタリングで取得される全計数率から、空気 中ラドン子孫核種に起因するγ線計数率のみをスペクトル分析によって弁別することは一般に 難しい。航空機モニタリングにおいて空気中ラドン子孫核種に起因するγ線計数率を推定する 方法として、全計数率を取得する検出器に加え、空気中ラドン子孫核種から放出されるγ線を 測定するための検出器を使用し、両者の計数率とそれらを基にして算出される換算パラメータ を用いる方法が示されている³³⁾。原子力機構では当該手法を参考にして、空気中ラドン子孫 核種に起因するγ線を測定する検出器に LaBr₃(Ce)検出器を採用してラドン弁別手法を実施す るための測定体系の構築を行い、NaI(TI)検出器と LaBr₃(Ce)検出器のγ線計数率を基にした換 算パラメータの設定方法について検討と改良を重ねてきた⁷⁾⁻²¹⁾。本項では、これまでの研究か ら得られたラドン弁別手法の概略を示す。

LaBr₃(Ce)検出器をヘリコプター内に搭載した状況を Fig. 3-15 に示す。地表面の放射性核種 から放出されるγ線をなるべく遮へいし、空気中ラドン子孫核種由来のγ線のみを測定できる ようにするために、LaBr₃(Ce)検出器は NaI(TI)検出器の上方に配置した。Fig. 3-16 にヘリコプ ター機内の検出器とγ線放出核種の位置関係のイメージを示す。NaI(TI)検出器と LaBr₃(Ce)検 出器の位置関係から地表面の放射性核種が存在する場合及び存在しない場合の LaBr₃(Ce)検出 器の計数率に対する NaI(TI)検出器の計数率の比をそれぞれ「グラウンドインデックス」及び 「ラドンインデックス」とし、その差からラドン子孫核種由来のγ線計数率を弁別するもので ある。

- ・ラドンインデックス (以下、*RI*):地表面の放射性核種から放出される γ 線による影響がな いと考えられる海上で取得したデータにおける LaBr₃(Ce)検出器の計数率 ($C_{LaBr,a}$)に対す る NaI(TI)検出器の計数率 ($C_{NaI,a}$)の比 ($C_{NaI,a} / C_{LaBr,a}$)。ラドン子孫核種由来の γ 線は等方 的に飛来することから、NaI(TI)検出器による遮へいの影響を受けにくく、LaBr₃(Ce)検出 器の計数率にさほど影響を及ぼさないと考えられる。
- ・グラウンドインデックス (以下、*GI*):地表面の放射性核種から放出される γ 線による影響 が支配的な陸地で取得したデータにおける LaBr₃(Ce)検出器の計数率 ($C_{\text{LaBr,g}}$) に対する NaI(Tl)検出器の計数率 ($C_{\text{NaI,g}}$)の比 ($C_{\text{NaI,g}} / C_{\text{LaBr,g}}$)。ラドン子孫核種由来の γ 線はヘリコ プター下方から飛来することから、NaI(Tl)検出器に遮へいされて LaBr₃(Ce)検出器では比 較的計数されにくい。*GI*は、*RI*よりも大きくなると推察される。

これら2つのパラメータを利用して式[6]より地表面の放射性核種から放出されるγ線による影響が支配的な陸地で取得した NaI(Tl)検出器の計数率C_{Nal,g}を求め、空気中ラドン子孫核種 由来の計数率を減算した後の地表面由来の計数率とする。これを空間線量率に換算してマッピ ングする。

$$C_{\text{Nal,g}} = \frac{GI(C_{\text{Nal,all}} - RI C_{\text{LaBr,all}})}{GI - RI}$$
[6]

ここで、

C_{Nal,all}: NaI(Tl)検出器における全計数率 (30 keV~2,800 keV) (s⁻¹)

 $C_{\text{LaBr,all}}$: LaBr₃(Ce)検出器における全計数率 (50 keV~700 keV) (s⁻¹) である。

ヘリコプターの機種または機体によって γ 線の遮へい効果が異なるのに付随して、RI 及び GI もヘリコプターの機種または機体に依存すると考えられることから、使用するヘリコプタ ーごとに海上及び陸地で実際に取得したデータを基に RI 及び GI を設定することとしている。 RI 及び GI を決定するために取得したデータと両パラメータの算出結果については 4.7 節に詳 述する。



Fig. 3-15 空気中ラドン子孫核種測定用の検出器とヘリコプターへの搭載状況



Fig. 3-16 空気中ラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ

3.8.3. GIの高度補正方法

GI については、2015 年度 (平成 27 年度) に実施した予備的な調査により、対地高度に依存 して数値が変化することが分かった⁷⁾。しかしながら、実環境中ではラドン子孫核種の寄与が ないデータを取得することは不可能である。そこで、2017 年度 (平成 28 年度) に計算シミュレ ーションにより実際の測定体系を模擬し、GIの高度補正手法について検討した⁹⁾。その結果、 式 [7] に示す関係にあることが見出された。本報告において、式 [7] に基づいて、GI の高度補 正を行った。

$$GI_{\rm corr} = 0.0333 \times (H_{\rm m} - H_{\rm std}) + GI$$
^[7]

ここで、

GI_{corr}:高度補正後の GI H_m:測定時における対地高度 (m) H_{std}:基準対地高度 (300 m) GI:高度補正前の GI である。

3.9. 天然放射性核種の濃度換算手法

一般的に、γ線スペクトルを利用して放射性核種を特定し、その放射能を定量化する手法が 用いられている。航空機モニタリングにおいても、γ線スペクトルが取得できることから、天 然放射性核種ごとに放射能の定量化が可能である。Fig. 3-17に対地高度 300 m で取得できる典 型的なγ線スペクトル例⁷⁾を示す。このように、散乱線の影響の比較的少ない高エネルギー領 域において自然放射性核種である K-40 (1,461 keV)、U系列 (Bi-214: 1,765 keV、2,204 keV)及 び Th系列 (TI-208: 2,614 keV) が検出される。1,000 keV 以上の比較的高エネルギーのγ線は低 エネルギー側と比較して検出効率が悪いため、スペクトルが識別できるまで測定時間をかける 必要がある。航空機モニタリングでは、空間線量率の算出にスペクトルの全エネルギーの計数 率を利用するため、1 秒ごとに取得したデータを使用しているが、天然放射性核種の濃度換算 では計数率の誤差を考慮し、20 秒のデータを積算したγ線スペクトルを使用して目的のエネル ギーにおけるピークの計数率を求めた。

航空機モニタリングの取得データから地上における天然放射性核種濃度を求めるためには、 それぞれの核種に対する濃度換算係数と高度補正係数が必要となり、スペクトル解析ではエネ ルギーピークごとにその数値を決定する必要がある。まず、濃度換算係数 CC [(s⁻¹)/(Bq/kg)] を 求めるためには、テストポイント内における地上測定値と上空での計数率との比較が必要であ る。ここでは、Fig. 3-5 で示したテストポイント内の 5 地点において可搬型ゲルマニウム半導 体検出器 (以下、可搬型 Ge 検出器) により、地表面から1 m の高さにおいて 120 分間の測定を 行い、K-40、U 系列及び Th 系列の濃度を測定し、その平均値を核種濃度 (Bq/kg) とした。な お、可搬型 Ge 検出器による測定値は測定時期により大きな変動がないと推測されることから 川内 (前期) にのみ実施し、ここでの測定値を川内 (後期) の解析にも使用した。テストポイン ト上における計数率については、川内 (前期) と川内 (後期) それぞれにおいて、基準対地高度 である 300 m でホバリングして計数率データ (s⁻¹) を取得し、可搬型 Ge 検出器による核種濃度 との比を取って CC [(s⁻¹)/(Bq/kg)]を求めた。また、式 [1] に示したように対地高度補正係数の 評価に必要な空気減弱係数 (AF) については、EGS5 (Electron Gamma Shower Version 5)³⁷⁾によ るシミュレーションの結果⁷⁾を利用した。当該計算には、無限平板を模擬した半径 2,000 m の 線源が仮定され、その上空 50 m、100 m、150 m、200 m、300 m、400 m 及び 500 m の計数率 が計算された。計算した対地高度と計数率の関係について、上空 50 m で得られた結果を 1 に 規格化したものを Fig. 3-18 に示す。このように対地高度と計数率は指数関数の関係となり、 Microsoft Excel[®]の指数近似機能によって得られた傾きをそれぞれの天然放射性核種に対する AF とした。よって、天然放射性核種濃度マップの作成に用いる AF は非線形回帰でなく指数関 数の両辺を対数変換して線形回帰して得られたものであることに留意する必要がある。



Fig. 3-17 航空機モニタリングで取得できる γ 線スペクトル例⁷⁾



(EGS5 によるシミュレーション結果 ⁷⁾)

4. モニタリング結果と考察

4.1. ヘリコプターによるフライト及び地上測定の実績

2.2 節に記した通り、川内(前期)及び川内(後期)の航空機モニタリングでは Bell430 (JA02AX)及び Bell412 (JA6929)を使用した。フライトに要した期間は以下の通りである。ま た、ヘリコプターごとにフライトした距離や平均フライト速度、回数等を Table 4-1 にまとめ た。測線上をフライトしたときに取得した GPS 測位データを基に、ヘリコプターの飛行平均 速度を算出したところ、3.1 節で示した速度の範囲内であった。また、地上測定に要した期間 についても以下に示した通り、航空機モニタリングと同時期であった。

- [フライト及び地上測定に要した期間]
- 川内(前期)
 - ・航空機モニタリング: 2023年(令和5年)7月25日~7月28日(延べ8フライト)
 - ・地上測定:同年7月25日~7月28日
- 川内(後期)
 - ・航空機モニタリング:2023年(令和5年)11月12日~11月15日(延べ7フライト)
 - ・地上測定:同年 11 月 12 日~11 月 15 日

モニタリングエリア ヘリコプター機種 (機体番号)	測線フライト距離 (km)	総飛行距離 [※] (km)	平均速度 (km/h)	測定開始日	測定終了日	延べフライト回数
川内 (前期) Bell430 (JA02AX)	694	2,591	143	2023年7月25日	2023年7月28日	8
川内(後期) Bell412(JA6929)	664	2,443	130	2023年11月12日	2023年11月15日	7

Table 4-1 ヘリコプターのフライト距離及び速度とフライト回数

※測線フライト以外の、空輸やキャリブレーションフライト等による飛行距離も含む。

4.2. 換算パラメータ

3.4.1 項に示した方法により算出した *CR-Index* を Table 4-2 に示す。これらのパラメータを実際の解析に使用し、空気中核種及び宇宙線由来の計数率の減算を行った。

3.4.2 項で示した方法により対地高度補正係数 HF を求めた。Fig. 4-1 に対地高度と計数率の 関係を例示する。HF を求めるために必要な実効的な空気減弱係数 AF は、テストラインフラ イトで取得したデータを基に、非線形最小二乗法による指数関数回帰で求めた (Table 4-3)。ま た、テストポイントフライトで取得したデータを基に、3.4.3 項で示した方法によりγ線計数率 を地表面から1mの高さの空間線量率に換算するための換算係数 CD を求めた (Table 4-4)。CD を算出するために用いたテストポイントにおける地上測定値を Fig. 4-2 に示す。なお、本図に 示した空間線量率 (μSv/h) は NaI(TI)検出器の指示値である。

以上で求めた AF 及び CD の内、テストラインフライトデータ及びテストポイントフライト

中のγ線計数率及び対地高度等の一定性を評価し、最も信頼できるパラメータを1組選定した。 選定したパラメータを Table 4-5 に示す。AF については RV が最も小さいデータとして川内(前 期)では7月26日、川内(後期)では11月13日に取得した数値を採用した。CDについてはγ 線計数率及び対地高度が最も安定して取得できていたデータとして、川内(前期)では7月26 日に取得した数値を採用した。川内(後期)ではいずれのCDも同値であるが、11月15日に取 得したデータの方がγ線計数率及び対地高度が比較的安定しているという観点から良好である。 また本表には参考として、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングで使用している 換算パラメータを併記した。これら換算パラメータについて、Bell430 (JA02AX) については 2021 年度 (令和3年度) に複数取得したデータから最も信頼できる数値を選定したものであり、 Bell412 (JA6928 及び JA412N) については、2012 年度 (平成 24 年度) から 2014 年 度(平成 26 年 度)に取得したデータの算術平均値である。なお、後者については Cs-137 の地表面沈着量が比 較的大きな地域で取得したものが多く含まれる。このように、同様のヘリコプター機種を用い たとしても、本報告における AF 及び CD の値は福島原子力発電所周辺の航空機モニタリング で用いている数値とやや差異が見られた。また、川内(前期)と川内(後期)とで用いたヘリコ プター機種及び測定時期は異なるが、同一の場所で取得したため AF 及び CD は概ね同様であ った。これらに見られた差異については測定した主要な y 線エネルギー (K-40 (1.461 keV) また は Cs-137 (662 keV))の違い、ヘリコプター機体底部の γ 線遮へい能力といった要因が複雑に 絡み合って数値が変動するものと推察される。

ここで、川内(前期)及び川内(後期)の航空機モニタリングデータ解析に使用する CD の妥 当性の確認を行うために、Fig. 3-9に示した測線において Bell430 (JA02AX) で 2023 年 (令和 5 年)7月 28 日に、Bell412 (JA6929) で 2023 年 (令和 5 年)11 月 12 日に対地高度 300 m でオーバ ーラップフライトを実施し、得られた γ 線計数率の比較を行った。当該フライトで得た全計数 率に対して、同日における空気中核種フライトで取得した計数率及び Table 4-2 に示した CR-Index を適用して空気中核種及び宇宙線由来の γ 線計数率を減算した後、Table 4-3 に示した AF を基に算出した HF により、基準対地高度 (300 m)における計数率に補正して(以下、CR-Index・HF 補正計数率)比較した(Fig. 4-3)。Fig. 4-3 に示した回帰直線式の傾きがヘリコプター 間の CR-Index・HF 補正計数率の比であると解釈でき、この傾き (0.82) が Table 4-5 に示した CD の比と一致することが理想的である。すなわち、Bell412 (JA6929) / Bell430 (JA02AX) \simeq 0.76 が理想値となる。この比が回帰直線の傾きと 20 %以上異なる場合、いずれかのヘリコプ ターの CD に対し、当該回帰直線における傾きと一致するように補正を施すことを検討する。 本報告で得られた回帰直線の傾きと理想値との差異は 8 %であり、よく一致していたことから、 CD の補正を施す必要性はないと判断された。

測定エリア	RSIシステム	ヘリコプター 機種 (機体番号)	運航会社	空気中核種由来の 計数率平均値(s ⁻¹)	CR-Index
	RSI 3	Bell430 (JA02AX)	朝日航洋 株式会社	232	3.46
川内(後期)	RSI 3	Bell412 (JA6929)	朝日航洋 株式会社	324	3.71

 Table 4-2 機体とシステムの組み合わせと空気中核種由来の平均的な計数率及び採用した CR-Index



Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例¹⁹⁾

(Bell412 (JA9616)、2022 年 11 月 11 日、TestLine (愛媛県東温市) にて実施。本図中の RV は指数回帰における残差分散を表す。)



Fig. 4-2 川内 (前期) 及び川内 (後期) のテストポイントにおける地上測定値

モニタリング	へリコプター機種(機体番号)	RSIシステム	事 新 年 日	テストライン名	AF	
	(運航会社)		-		µ(m ⁻¹)	RV
「七、北部、	Bell430 (JA02AX)		2023/07/26		-0.00759	0
「ろ、別―――」	(AAC)	6 190	2023/07/27	÷	-0.00438	51
「内(絵曲)	Bell412 (JA6929)	5 ICH	2023/11/13	Ϋ́Ξ	-0.00632	0
三三人名	(AAC)		2023/11/15		-0.00513	9
					※AAC : 朝日航	洋株式会社
				※RV:指数]	貫数回帰におけ	+る残差分散

齓
1
×
Ĩ
ĩĹ
リハ - 「ト
4
Ĺ,
5
 طالب
ふき
町
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
奥
年
23
20
e
4
le
ab
Ë

Table 4-4 2023 年度に取得した CD データー覧

CD	€ (s ⁻ⁱ /[µSv/h])	18,100	1 14,900	13,800	13,800	AC:朝日航洋株式会社
Ŕ	標本標準偏き (2 の)	3	2	10	4	₩¥
トフライトデー	対地高度 (ff)	1,152	617	1062	626	
テストポイン	標本標準偏差 (2の)	131	148	121	195	
	('_s) (s⁻')	1,286	1,617	1364	1574	
	相対標準偏差 (%)	40	36	35	33	
地上測定値	標本標準偏差 (2 σ)	0.02	0.02	0.02	0.02	
	(ч/∧Srl) 率曹왕倡ฉ	90'0	90'0	90'0	90'0	
: - - - - -	ナストホイント名		Ę	ΎΞ		
         	美施牛日	2023/07/26	2023/07/27	2023/11/13	2023/11/15	
	KSIンスナム		, 190	5 102		
へリコプター機種(機体番号)	(運航会社)	Bell430 (JA02AX)	(AAC)	Bell412 (JA6929)	(AAC)	
1 	モニタリンク	「市」	川ろ(則規)	三百八年	川内(夜朔)	

	ヘリコプター機種	換算パ	ラメータ
モーダリングエリア	(機体番号)	$AF(m^{-1})$	<i>CD</i> (s ⁻¹ /[µSv/h])
川内(前期)	Bell430 (JA02AX)	-0.00759	18,100
福島原子力発電所	Bell430 (JA02AX)	-0.00692	12,100
川内(後期)	Bell412 (JA6929)	-0.00632	13,800
福島原子力発電所	Bell412 (JA6928及7ŇJA412N)	-0.00720	11,000

Table 4-5 解析に用いた換算パラメータのまとめ



Fig. 4-3 オーバーラップフライトによるヘリコプター間の CR-Index・HF 補正計数率の比較

4.3. 空間線量率マップ

航空機モニタリングの測定結果を基に、地表面から1mの高さのバックグラウンド空間線 量率の分布状況を示した「空間線量率マップ」を作成した。この時、位置情報にはRSIシス テムのGPS測位データ用いた。川内から半径3 km圏内は航空機モニタリングの対象範囲外 であるためマッピングしない。また、2015年度(平成27年度)当時から測線を間引いたこと に伴い、測定データが取得できなかった一部の諸島や半島部はマッピングの対象外とした。 空間線量率マップの色合いについては、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリング で適用している設定²⁰⁾に準じた。次に、今年度及び過去の航空機モニタリングによる空間 線量率マップとFig.4-4に示す日本地質学会のホームページ³⁸⁾に掲載されている、地殻中に 存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果を比較した。このとき、空間線 量率の分布傾向を分かりやすく視覚化し、かつ日本地質学会による自然放射線量マップとの 比較を容易にするために、航空機モニタリングによる空間線量率の色分け(コンターインタ ーバル)を0.02 µSv/hと詳細化し、0.06 µSv/h 未満~0.16 µSv/hを超える範囲までの7段階 に設定した。

なお、日本地質学会のホームページに掲載されている自然放射線量マップは日本各地で採 取された河川堆積物試料中のU、Th及びKの濃度を基に計算によって求める方法⁴²⁾で作成 されている。この計算手法では、「ベータ線とガンマ線の場合には全身に均等に吸収された とき1Gy = 1Svと換算できる」³⁸⁾という仮定を採用し、空気吸収線量率(µGy/h)から実効 線量(µSv/h)に単位変換を行っていることから、当該マップは実効線量として意味づけがな されていると考えられる。3.3 節に記述した通り、航空機モニタリング値は周辺線量当量率 (1cm線量当量率)であり、日本地質学会の自然放射線量マップとは必ずしも1対1で比較で きるものではないことに注意を要する。また、日本地質学会の自然放射線量マップ作成に際 して計算に使用された試料の採取密度が概ね10km×10kmに1試料であり、それらの試料 の各元素濃度の測定結果には0.5~2.0倍程度の誤差が伴っていること、核種濃度の測定結果 が得られなかった地点については内挿補間で色づけされていることから、自然放射線量の計 算値にはある程度の不確かさがあり、その分解能は10km程度である。結果の比較には以上 の点を念頭に置く必要がある。

川内におけるバックグラウンドモニタリングの結果得られた空間線量率マップを Fig. 4-5 に示す。航空機モニタリング値の最大値は熊本県天草市の北東部で約 0.24 µSv/h であった。 空間線量率の色分けを詳細化し 2015 年度 (平成 27 年度) 測定及び日本地質学会の自然放射 線量マップと比較したものを Fig. 4-6 に示す。Fig. 4-6 (中央) から、中央部においては 2023 年度 (令和 5 年度)の空間線量率は 0.10 µSv/h 程度であり、日本地質学会の自然放射線量マッ プ (Fig. 4-6 (右))と概ね同等であることが確認された。北西部においては、Fig. 4-6 (左)か ら、2015 年度 (平成 27 年度)の航空機モニタリング値は 0.06 µSv/h 程度であったのに対し、 2023 年度 (令和 5 年度)の航空機モニタリング値は 0.08 µSv/h から 0.10 µSv/h であり、0.16 µSv/h を超える領域 (Fig. 4-6 (中央、赤丸で図示した範囲))も認められた。北東部について は日本地質学会のマップでは概ね 0.05 µGy/h 程度であるのに対し、2023 年度 (令和 5 年度) の航空機モニタリング値は概ね 0.10 µSv/h 程度であった。なお、日本地質学会のマップでは 熊本県の天草諸島に色づけされていないが、これは河川堆積物試料が同エリアで採取されて おらず、自然放射線量のマッピングができなかったためと推察される。

上述した通り熊本県天草市の北東部において、2023 年度 (令和5年度) と 2015 年度 (平成 27年度)の航空機モニタリング値に顕著な差異が認められた。本現象の原因を確かめるため、 以下の2項目について調査を行った。

(1) 熊本県天草市周辺の空間線量率が実際に上昇していないか

(2) 航空機モニタリングで使用した RSI システムの GPS 測位情報に不具合がないか

(1) については、熊本県天草市周辺において地上測定値を追加で取得し、航空機モニタリ ング値と比較することとした。本追加調査の詳細については 4.3.1 項に示す。(2) について は、2.1 節で述べた通り、RSI システムに用いられている GPS の測位データが異常値を示し た可能性があることから、調査項目に加えた。また、測位データが異常値を示さなかったと しても高さ方向の測位誤差が大きい場合は高度補正係数が妥当に算出されず、空間線量率に 影響する⁸⁾。本調査の詳細については 4.3.2 項に示す。



Fig. 4-4 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果 (日本地質学会ホームページ³⁸⁾より)



Fig. 4-5 川内における空間線量率マップ (RSI システム GPS データに基づく) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ( (c) Esri Japan) を使用。)





4.3.1. 地上測定による天草市現地調査

熊本県天草市北東部において追加の地上測定を 2024 年 (令和6年)1月15日及び16日に 航空機モニタリング測線の概ね近傍11地点で行った。地上測定は3.1節に記載した方法と同 様であるが、地上測定に用いた NaI(Tl)検出器はアロカ株式会社製 TCS-171B である。本地 上測定の実施地点を測定結果とともに、Fig. 4-7 に示す。天草市周辺の地上測定値は 0.07 µSv/h~0.09 µSv/h であり、Fig. 4-6 (中央) に見られたような 0.16 µSv/h を超える地点は存在 せず、熊本県天草市周辺の空間線量率が実際に上昇したのではないことが確認された。



Fig. 4-7 熊本県天草市における地上測定値 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用)

4.3.2. GPS 測位データの比較

熊本県天草市の北東部をフライトした 2023 年 (令和5年)7月26日9時30分~9時50分の GPS 測位データ (RSI システムの GPS 及び高精度 GPS システム)から海抜高度を算出した。これを DEM データ (10 m メッシュの数値標高モデルデータ)と比較し、地形に沿って海抜高度が変化しているかを確認した (Fig. 4-8)。RSI システムの GPS と高精度 GPS システムの海抜高度に、100 m~150 m の差異が一部で認められた。両者ともに DEM データの変化に概ね追従できているが、高精度 GPS の方が比較的よく追従できている。詳細な原因は判

然としないが、熊本県天草市の北東部をフライトした際に、RSI システムの高さ方向の測位 誤差が大きくなった可能性があると推察し、高精度 GPS システムによる測位データを用い て一連の換算のパラメータを再算出し、空間線量率マッピングを実施することとした。



Fig. 4-8 RSI システムの GPS 及び高精度 GPS システムに基づく海抜高度と DEM データの 比較

4.3.3. 換算パラメータの再算出及び空間線量率マッピング結果

高精度 GPS システムによる測位データに基づき、*CR-Index、AF*及び *CD* を再算出した。 この時、オーバーラップフライトの結果を用いて、*CD* 設定値の妥当性検証も併せて行った。 高精度 GPS システムによる *CR-Index* の再算出結果を Table 4-6 に示す。再算出した *CR-*

Index は、Table 3-2 に示した RSI システムの GPS 測位データに基づいて算出した CR-Index とほとんど同値であった。

高精度 GPS システムによる AF の再算出結果を Table 4-7 に示す。再算出した AF は、Table 4-3 に示した RSI システムの GPS 測位データに基づいて算出した AF と概ね同様であったが、 2023 年 7 月 26 日に取得した AF に差異が見られた。再解析に使用する AF は、RV が最も小 さいデータとして川内 (前期) では 7 月 26 日、川内 (後期) では 11 月 15 日に取得した数値を 採用した。

高精度 GPS システムによる *CD* の再算出結果を Table 4-8 に示す。再算出した *CD* は、 Table 4-4 に示した RSI システムの GPS 測位データに基づいて算出した *CD* と概ね同様であ ったが、2023 年 7 月 26 日に取得した *CD* に比較的大きな差異が見られた。再解析に使用す る *CD* は γ線計数率及び対地高度が最も安定して取得できていたデータとして、川内 (前期) では7月26日、川内(後期)では11月13日に取得した数値を採用した。各換算パラメータの再算出により、空間線量率マッピングに用いることとなった数値をTable 4-9に示す。

ここで、空間線量率マッピングに用いる *CD* の妥当性の確認を行うために、4.2 節で示し た方法と同様に、オーバーラップフライトの結果を比較した。なお、2023 年 (令和5年) 11 月 12 日のオーバーラップフライトにおいて、Fig. 3-9 に示した最も北側の測線を飛行した 際、高精度 GPS システムの測位データがほとんど欠落していたため、*CR-Index・HF* 補正計 数率の比較には、他の測線 3 本をフライトして得られたデータのみを用いることとした。そ の結果、比較点数が Fig. 4-3 では 532 点あったのに対し、高精度 GPS システムの測位データ を使用した場合には 380 点に減少した。オーバーラップフライトの比較結果を Fig. 4-9 に示 す。本図における回帰直線の傾き (0.89) が Table 4-9 に示した *CD* の比と一致することが理 想的である。すなわち、Bell412 (JA6929) / Bell430 (JA02AX)  $\approx$  0.91 が理想値となる。回帰 直線の傾きと理想値との差異は 2%であり、非常によく一致していたことから、*CD* の補正 を施す必要性はなく、再解析に用いる数値として妥当であると判断された。

Table 4-9の換算パラメータを用いて、空間線量率マッピングを行った結果を Fig. 4-10 に 示す。測定エリア中央部及び北東部においては、再解析結果の方がやや空間線量率が高く算 出される場所が散見されたが、Fig. 4-6 (中央) において 0.16 µSv/h を超えていた領域が概ね 0.08 µSv/h~0.10 µSv/h に収まり、Fig. 4-7 で示した地上測定値とほとんど一致した。なお、 再解析による航空機モニタリング値の最大値は熊本県球磨郡山江村の北部で約 0.16 µSv/h と なった。同エリアの 2015 年度 (平成 27 年度) 航空機モニタリング値 (Fig. 4-6 (左)) は約 0.15 µSv/h であり、互いによく一致した。以上の結果から、高精度 GPS システムの測位データに 基づく解析結果の方が、空間線量率を妥当に評価できていると結論した。よって、本項以降 では、Fig. 4-10 に示した空間線量率マップを基に、地質情報との比較や測線近傍における地 上測定値との比較を行う。

測定エリア	RSIシステム	ヘリコプター 機種 (機体番号)	運航会社	空気中核種由来の 計数率平均値(s ⁻¹ )	CR-Index
川内 (前期)	RSI 3	Bell430 (JA02AX)	朝日航洋 株式会社	232	3.43
川内(後期)	RSI 3	Bell412 (JA6929)	朝日航洋 株式会社	324	3.79

Table 4-6 高精度 GPS システム測位データに基づく CR-Index の再算出結果

モニタリング	ヘリコプター機種 機番	RSIシステム	実施年日	テストライン名	非線形最小二 指数関数回	こ乗法による 1帰の結果
	(建机云杠)				<i>AF</i> (m⁻¹)	RV
三百八前世)	Bell430 (JA02AX)		2023/07/26		-0.00568	4
加四人的地方	(AAC)	001.0	2023/07/27	÷	-0.00439	50
	Bell412 (JA6929)		2023/11/13	Ŕ	-0.00599	10
三人名法	(AAC)		2023/11/15		-0.00593	0
					部日語・くくくど	* オ キ キ ヤ キ

Table 4-7 高精度 GPS システム測位データに基づく AFの再算出結果

※AAC:朝日航洋株式会社 ※*RV*:指数関数回帰における残差分散

Table 4-8 高精度 GPS システム測位データに基づく CD の再算出結果

5	(台来外線)戦線一名とこいへ			- - -		地上測定値			テストポイン	トフライトデー	4	CD
モニタリンク	(運航会社)	RSIシステム	実施年日	テストホイント名	空間線量率 (µSv/h)	標本標準偏差 (2の)	相対標準偏差 (%)	計数率 (s ⁻¹ )	標本標準偏差 (2 σ)	对地高度 (ft)	標本標準偏差 (2 <i>の</i> )	(s ⁻¹ /[µSv/h])
「「生」」	Bell430 (JA02AX)		2023/07/26		0.06	0.02	40	1,286	131	1,051	72	13,800
	(AAC)	6 190	2023/07/27	÷	0.06	0.02	36	1,617	148	917	71	15,700
111 中 (2条 世)	Bell412 (JA6929)		2023/11/13	÷	0.06	0.02	37	1,364	151	1,020	109	12,500
川ろ(夜湖)	(AAC)		2023/11/15		0.06	0.02	34	1,574	195	928	114	13,300
											vv≫	C:朝日航洋株式会社

Table 4-9 再解析に用いた換算パラメータのまとめ

			6	
エーケニン。 デート	軽毅一 る		換算パラメータ	
モーダリング エリア	(機体番号)	CR-Index	$AF(m^{-1})$	<i>CD</i> (s ⁻¹ /[µSv/h])
「田治」も三	Bell430	67 C	000560	
三人の「三人」	(JA02AX)	0.40	-0.00308	13,800
	Bell412	01 0		10 500
川内(夜朔)	(JA6929)	0./9	-0.00383	12,300



Fig. 4-9 高精度 GPS システム測位データに基づくオーバーラップフライトによる ヘリコプター間の CR-Index・HF 補正計数率の比較



Fig. 4-10 高精度 GPS システム測位データに基づく川内における空間線量率マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用)

4.4. 空間線量率マップと地質情報の比較考察

本報告では、2023年度(令和5年度)の高精度 GPSシステムの測位データに基づく航空機 モニタリング値が 0.10 µSv/h を超えるエリアが一定以上広がっていた地域及び 2015年度(平 成 27年度)の航空機モニタリング値と相違が見られた地域を対象として、日本シームレス地 質図³⁹⁾を基に、空間線量率に影響を与えた要因について考察を行った。本報告において考 察対象としたのは、熊本県の北側から、①天草市の北東部、有明町上津浦、有明町赤崎、有 明町楠甫の近辺、②天草市の北東部、岳倉町宮田の近辺、③八代市坂本町の球磨川流域及び 油谷ダムの近辺、④球磨郡山江村の北西部、万江川の流域、⑤球磨郡球磨村の北西部、川内 川の流域、⑥球磨郡錦町の中央部及び⑦球磨郡錦町の中央部、高柱川の流域の7ヶ所である。 これら7ヶ所の場所を Fig. 4-11 に示す。なお、川内周辺の航空機モニタリングエリアにお いて、日本シームレス地質図の基盤情報である地質調査レポートは現時点で非公開のものが 多数あり、考察に十分な情報量がないのが現状である。

① 天草市の北東部、有明町上津浦、有明町赤崎、有明町楠甫の近辺について

有明町上津浦、有明町赤崎、有明町楠甫の近辺で航空機モニタリング値が 0.08 μSv/h ~0.10 μSv/hの領域が広がっており、0.10 μSv/hを超える領域が局所的に認められた。日 本シームレス地質図によると、本地域は海成層や泥岩が主体であるが、花崗閃緑岩とト ーナル岩から成る岩体及び閃緑岩と石英閃緑岩体から成る岩体が局所的に分布している。 ヘリコプターが飛行した場所の近傍には航空機モニタリング値の上昇に寄与する岩石類 は確認できない。また、ヘリコプターが飛行した場所から約 2 km 南方に花崗閃緑岩とト ーナル岩から成る比較的大きな岩体が認められるものの、これが本地域の航空機モニタ リング値の上昇に顕著な影響を及ぼすとは考えにくい。2015 年度 (平成 27 年度) 当時に おける同地域の航空機モニタリング値は 0.06 μSv/h~0.08 μSv/h であったが、2023 年度 (令和 5 年度)の航空機モニタリング値と大きな差異はなく、異常値ではないと考えられ る。

② 天草市の北東部、岳倉町宮田の近辺について

岳倉町宮田の近辺で航空機モニタリング値が 0.10 μSv/h を超える領域があった。日本 シームレス地質図によると、本地域は①と同様な地質分布であるが、閃緑岩や石英閃緑 岩から成る岩体が特に広く分布している点で異なる。航空機モニタリング値が比較的高 く算出された場所では、この岩体が有人へリの周囲を取り囲む状況であった。よって、 地質的な要因に加えて地形的な要因が航空機モニタリング値の上昇に寄与したと推察さ れる。

③ 八代市坂本町の球磨川流域及び油谷ダムの近辺について

本地域では航空機モニタリング値が 0.10 µSv/h を超える領域が点在し、0.12 µSv/h を 超える領域が局所的に認められた。日本シームレス地質図によると、本地域は粘土板、 砂岩、チャート及び石灰岩から成る地層 (通称:与奈久層) が主体であり、航空機モニタ リング値の上昇に寄与する岩石類は確認できない。一方で、与奈久層には走向断層、小 断層、小褶曲が多く見られる急峻な地形であることから、地形的な要因が航空機モニタ リング値の上昇に寄与した可能性がある。2015 年度 (平成 27 年度)の同地域の航空機モニ タリング値は概ね 0.10 μSv/h 未満であったが、2023 年度 (令和 5 年度)の航空機モニタリ ング値と同程度である。

④ 球磨郡山江村の北西部、万江川の流域について

航空機モニタリング値が 0.10 μSv/h を超える領域が比較的大きく広がっており、0.16 μSv/h を超える領域が局所的に認められた。特に航空機モニタリング値が高く算出され たのは日本シームレス地質図によると、チャート、粘板岩、砂岩から成る地層が分布す る範囲であり、この地層には航空機モニタリング値の上昇に寄与する岩石類の存在は確 認できない。本領域の地形は急峻であり、地形に沿ってヘリコプターの対地高度を下げ て山間に入り、周囲を地形物に囲まれた状況下で航空機モニタリング値が高く算出され たと推察される。2015 年度もこれと同様の状況が生じており、同領域における航空機モ ニタリング値は 0.14 μSv/h 程度であった。

# ⑤ 球磨郡球磨村の北西部

本地域では航空機モニタリング値が 0.10 µSv/h を超える領域が点在した。日本シーム レス地質図によると、本地域は海成層砂岩や海成層泥岩等の堆積岩が複雑に入り組んで 分布しているが、空間線量率の上昇に寄与する岩石類の存在は確認できない。本領域の 地形は急峻であり、地形に沿って有人へリの対地高度を下げて山間に入り、周囲を地形 物に囲まれた状況下で空間線量率が高く算出されたと推察される。2015 年度 (平成 27 年 度) もこれと同様の状況が生じており、同領域における航空機モニタリング値は 0.14 µSv/h~0.16 µSv/h であった。

#### ⑥ 球磨郡錦町の中央部

本地域では航空機モニタリング値が 0.10 µSv/h を超える領域が点在した。日本シーム レス地質図によると、本地域は海成層砂岩や砂岩泥岩互層といった付加体が主に分布し ているが、航空機モニタリング値の上昇に寄与する岩石類の存在は確認できない。本領 域の地形は急峻であり、⑤と同様に周囲を地形物に囲まれた状況下で航空機モニタリン グ値が高く算出されたと推察される。2015 年度 (平成 27 年度) もこれと同様の状況が生 じており、同領域における航空機モニタリング値は 0.10 µSv/h~0.12 µSv/h であった。

⑦ 球磨郡錦町の中央部

航空機モニタリング値が 0.10 µSv/h~0.12 µSv/h の領域が広範囲に認められた。本領 域は段丘堆積物が主体である堆積岩の分布地帯と砂岩泥岩互層及び海成層泥岩が主体で ある付加体の分布地帯との境界付近である。いずれの岩石体にも航空機モニタリング値 の上昇に寄与する岩石類の存在は確認できず、また、地形は急峻でなく比較的平坦であ る。2015 年度 (平成 27 年度) 当時の航空機モニタリング値は 0.06 µSv/h 程度であり、 2023 年度 (令和5年度) の空間線量率が2倍程度高く算出された理由は不明確である。

以上のように、地質の分布情報の関連付けが難しい場所が多く、空間線量率が比較的高く 算出された②~⑥では、地質的な要因というよりは地形的な要因が強く関与していることが 推察された。



Fig. 4-11 地質情報の比較考察の対象としたエリア (本図中の赤丸で囲った領域が比較考察の対象としたエリアを意味する。) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用)

## 4.5. 地上測定値との比較

航空機モニタリングによる空間線量率 (以下、航空機モニタリング値)の妥当性を検証す るため、Fig. 3-1 に示した 30 地点 (川内 (前期): 15 点、川内 (後期): 15 点) において NaI(Tl) 検出器により空間線量率の地上測定を実施した。地上測定による空間線量率測定結果(以下、 地上測定値)を Fig. 4-12 に示す。航空機モニタリング値と地上測定値とを散布図及び相対誤 差のヒストグラムで比較したものを Fig. 4-13 に示す。Fig. 4-13 には参考として、2015 年度 (平成27年度)の川内の比較結果も掲載した。なお、相対誤差は(航空機モニタリング値ー地 上測定値) / (地上測定値) により算出した。散布図を見ると、航空機モニタリング値が地上 測定値のファクター2に収まっていた割合については、2023年度(令和5年度)では約97% (全 30 点中 29 点)、2015 年度(平成 27 年度)では 100%(全 30 点中 30 点)であった。次に、 相対誤差のヒストグラムを見ると、0以下(航空機モニタリング値の方が地上測定値よりも 小さい) に分布がやや偏る傾向が見られた。平均値及び中央値については、2023 年度(令和 5年度)では-0.10及び-0.15、2015年度(平成27年度)では-0.01及び-0.03であった。2023 年度の川内では、航空機モニタリング値は地上測定値よりも概ね10%~15%程度、過小評価 したことが窺える。2015年度(平成27年度)の川内については平均値と中央値ともに0に近 かったことから、2023年度(令和5年度)の川内の航空機モニタリングと地上測定との整合 について、過去の結果と比べるとやや妥当性が低いように考えられる。

さらに、航空機モニタリング値が地上測定値に対して、絶対値としてどの程度乖離しているのかを調査するために、地上測定値に対する航空機モニタリング値の平方根平均二乗誤差 (Root Mean Squared Error: *RMSE*)を以下の式 [8] に従って算出した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (D_{a,i} - D_{g,i})^2}$$
[8]

ここで、

RMSE:平方根平均二乗誤差 (µSv/h)

*n*:データ数

*D*_{ai}: i番目の航空機モニタリングによる空間線量率 (μSv/h)

Dg,i: i番目の地上測定値 (µSv/h)

である。

*RMSE* は非負であり、0 に近いほど航空機モニタリング値が地上測定値とよく合致するこ とを意味する。原子力施設等周辺におけるバックグラウンド航空機モニタリングが一巡した 2015 年度 (平成 27 年度)から 2020 年度 (令和 2 年度)までのデータについて、航空機モニタ リング値と地上測定値を比較した結果を Fig. 4-14 に示す。散布図を見ると、93% (全 429 点 中 399 点)がファクター2 に収まり、相対誤差は 0 付近をピークとした正規分布に近い形を しており、その平均値及び中央値は 0 に近く、*RMSE* は 0.025 μSv/h であった。これらのこ とから、今までに評価してきた原子力施設等周辺のバックグラウンド空間線量率は一定の水準で正確性を有するものの、地上測定値に対して 0.03 µSv/h 程度の誤差が生じると見込まれる。よって、2023 年度 (令和 5 年度)の測定データから評価した *RMSE* がこれを下回るか否かが航空機モニタリングによる空間線量率の換算結果の妥当性を判断する指標の一つとなると考えられる。

RMSE を過去の結果と比較すると、2023 年度 (令和5年度) では約0.019 µSv/h、2015 年度 (平成27年度) では約0.015 µSv/h であった。異なるデータセット間で一概に比較できるもの ではないが、2023 年度 (令和5年度) の航空機モニタリングによる空間線量率の測定結果は 過去の測定結果に比べて RMSE が大きいが、その差は僅かであった。2015 年度 (平成27年 度) から2020 年度 (令和2年度) までのデータから求めた上記の指標0.03 µSv/h に照らし合 わせると、両モニタリングにおける空間線量率の算出結果は概ね誤差範囲に収まっており妥 当なものであると考えられる。



- 57 -



Fig. 4-13 川内における航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較 (上:2023 年度、下:2015 年度⁷⁾) (左:散布図、右:相対誤差の頻度分布)




## 4.6. 天然放射性核種の濃度

3.9 節に示した方法により求めた濃度換算係数 CCと空気減弱係数 AFの数値を Table 4-10 に 示す。本節では、本表に示したパラメータを利用し、天然放射性核種濃度をマップ化した結果 を示す。なお、日本における K-40、U系列及び Th 系列の核種濃度は、それぞれ 100 Bq/kg~ 700 Bq/kg、10 Bq/kg~50 Bq/kg及び 7 Bq/kg~50 Bq/kgとされている⁴⁰⁾。次に、天然放射性核 種濃度の分布マップの妥当性を検証するために、産業技術総合研究所地質調査総合センターホ ームページに公開されている海と陸の地球化学図⁴¹⁾との比較結果を示す。この海と陸の地球 化学図の元素濃度マップは日本各地における河川堆積物試料の元素濃度測定結果に対して Beck et al.⁴²⁾の換算係数を適用して作成されており、その中でも K-40、U系列及び Th系列の濃 度測定結果は 4.3 節で示したように、日本地質学会の空間線量率マップに使用されている。し かしながら、海と陸の地球化学図では河川堆積物試料中の元素濃度 (%または ppm)を示してお り、航空機モニタリングによる計算結果 (Bq/kg) との単純な比較は難しいことを念頭に置く必 要がある。

K-40、U系列及びTh系列の濃度マップをFig. 4-15~Fig. 4-17に示す。K-40、U系列及びTh 系列の各最大濃度については、約1,770 Bq/kg (鹿児島県出水市の南西部)、約200 Bq/kg (鹿児 島県いちき串木野市の北東部、薩摩川内市との境界付近)及び約120 Bq/kg (熊本県人吉市の南 西部)であった。また、測定エリア全体における K-40、U系列及びTh系列の各平均濃度につ いては、約730 Bq/kg、約60 Bq/kg及び約50 Bq/kgであり、上記各元素の平均濃度レベルと概 ね整合した。

航空機モニタリングによる天然放射性核種濃度マップと海と陸の地球化学図による元素濃度マップの比較を K-40、U 系列、Th 系列の順に Fig. 4-18~Fig. 4-20 に示す。なお、海と陸の

地球化学図において熊本県の天草諸島に色付けされていないのは、河川堆積物試料の採取地点 がないためである。測定エリアの北東部及び中央部付近で各元素ともに比較的高濃度であると いう大まかな分布傾向は一致した。また、Fig. 4-10 に示した空間線量率マップにおいて航空機 モニタリング値が比較的高く算出された場所と、K-40、U 系列及び Th 系列濃度が高く算出さ れた場所は概ね一致した。K-40、U 系列、Th 系列のいずれについても、航空機モニタリング によるマップと海と陸の地球化学図によるマップとで、測定エリアの北東部及び中央部付近で 比較的高濃度であるという点で概ね同様な分布傾向であった。特に、K-40の濃度マップにつ いては、海と陸の地球化学図と航空機モニタリングによるマップとで分布傾向はほとんど同一 であった。しかしながら、U 系列濃度と Th 系列濃度については、航空機モニタリングによる マップでは U 系列濃度の方が高いのに対し、海と陸の地球化学図によるマップでは Th 系列濃 度の方が高いという点で、分布傾向が逆であった。海と陸の地球化学図によるマップの U 系 列濃度については、1.90 ppm 未満の領域が川内エリアの大部分を占めている中に、1.90 ppm 及 び 2.77 ppm を超える領域も散見される。このような海と陸の地球化学図の U 系列濃度の高い 領域と航空機モニタリングによる U 系列濃度の高い領域は概ね一致した。しかしながら、例 えば鹿児島県いちき串木野市、薩摩川内市及び薩摩郡さつま町の付近では、前者の U 系列濃 度は周囲と比べてやや高濃度な程度であるのに対し、後者の U 系列濃度は周囲と比べて非常 に高濃度である。航空機モニタリングでは U 系列濃度をかなり過大に評価している可能性が ある。Th 系列濃度について、海と陸の地球化学図によるマップでは、鹿児島県薩摩郡さつま 町の西部で特に高濃度な領域が見られた。当該地点の付近で採取された河川堆積物試料におけ る Th 系列濃度は約 24.5 ppm であり、川内エリアにおける他の河川堆積物試料の Th 系列濃度 が10 ppm 未満である中で際立って高濃度である。この Th 系列濃度が特に高い河川堆積物試料 の採取地点の近傍で、航空機モニタリングデータを取得しているものの、航空機モニタリング による Th 系列濃度は周囲に対して高濃度ではない。このような特殊なケースを除けば、航空 機モニタリングは海と陸の地球化学図の Th 系列濃度の分布傾向を再現できている。

以上のことから、地上の河川堆積物試料中の元素濃度測定結果に基づく元素濃度マップを 再現するのが難しい箇所があるものの、航空機モニタリングにより、一定の信頼性をもつ天然 放射性核種濃度マップの作成が可能であると考えられる。しかしながら、U系列濃度とTh系 列濃度に航空機モニタリングと海と陸の地球化学図によるマップとで齟齬が見られた。海と陸 の地球化学図による元素濃度マップが完成したのが2010年(平成22年)であり、その当時から 各種元素の分布状況が変化している可能性がある。信頼性のより高い現存の天然放射性核種の 分布マップを構築するために、3.9 節に示した航空機モニタリングによる濃度換算手法の更な るブラッシュアップを目指したい。

Measurement Area	Parameters	K-40	U-series	Th-series
山山(新知)	<i>CC</i> (s⁻¹[Bq/kg])	0.020	0.120	0.080
川内(削州)	$AF (ft^{-1})^*$	-0.0054	-0.0070	-0.0063
	<i>CC</i> (s⁻¹[Bq/kg])	0.020	0.130	0.070
川内(夜朔)	$AF (ft^{-1})^*$	-0.0054	-0.0070	-0.0063

Table 4-10 天然放射性核種濃度への換算パラメータ一覧

*EGS5のシミュレーション結果より⁷⁾



Fig. 4-15 川内の K-40 濃度マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 4-16 川内の U 系列濃度マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ( (c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 4-17 川内の Th 系列濃度マップ

(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)





を使用。)



(背景地図は、ESRI, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

を使用。)



(背景地図は、ESRI, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community を使用。) 4.7. ラドン弁別手法の適用

4.7.1. パラメータ (RI 及び GI) の決定

式 [6] を用いたラドン弁別手法の信頼性は GI と RI の設定精度に依存する。ヘリコプター の遮へいによる γ線計数率の変化に付随して、これらのパラメータも変化すると考えられる ため、使用したヘリコプター機種ごとに実測データから数値を決定した。

計数率の変動による影響をなるべく低減するために、川内の航空機モニタリングにおいて 取得した計数率データ及び高精度 GPS データ (緯度、経度及び飛行高度)を 40 秒平均し、全 計数率から宇宙線及びヘリコプター機体に起因する γ 線計数率の寄与をバックグラウンドと して減算したうえで RI 及び GI の算出に用いた。このとき、RI については海上でフライトし たデータの内、海抜高度が 300 m ± 150 m で取得したデータを抽出し、GI については陸上で 取得したデータの内、対地高度が 290 m~320 mのデータのみを抽出した。抽出したデータ に対して線形回帰 (ただし、切片が 0 であることを前提とする)を実施して得られた線形回 帰式の傾き(回帰係数)を RI及び GIとする。これまで、データ数が少ない或いはばらつきが 比較的大きく外れ値が含まれるデータに対して最小二乗法による線形回帰を実施した場合に 回帰係数に悪影響を及ぼすケースが過去に見られた¹⁷⁾。また、外れ値の影響を緩和した上 で回帰係数を得るため最小絶対値法によるロバストな線形回帰を導入したものの、外れ値が 生じない場合には効果を発揮せず、当該手法は汎用性に乏しいという知見が得られた²¹⁾。 これらいずれの手法も x 軸 (LaBr₃(Ce)検出器の計数率) または y 軸 (NaI(Tl)検出器の計数率) のいずれか一方にのみ有意な誤差が含まれるという仮定の下に線形回帰を行っており、この 仮定が RI 及び GI の算出に悪影響を及ぼす可能性があると考えられる。そこで、本報告では x軸及び y軸の両方向の誤差を考慮に入れた回帰手法である直交距離回帰 43)を導入した。直 交距離回帰は測定データ点と回帰直線の直交距離の二乗和を最小とする回帰アルゴリズムで あり、LaBr₃(Ce)検出器及び NaI(Tl)検出器の計数率の両者に含まれる誤差を考慮した上で回 帰係数が求めることが可能である。

*RI*及び*GI*の算出に係る NaI(TI)検出器の計数率と LaBr₃(Ce)検出器の計数率の関係を Fig. 4-21に示す。本図には最小二乗法及び直交距離回帰による線形回帰で得られた近似直線と回 帰式を併記した。本図の上段に示した *RI*の算出に用いたデータは、海上で取得したもので ありラドン子孫核種に起因する計数率のみが反映されていると考えられるが、ややばらつき が大きい。これは大気中ラドン子孫核種の分布の不均一さや抽出対象とするデータの海抜高 度範囲が広いことに起因すると推測される。また、Fig. 4-21 の下段に示した *GI*の算出に用 いたデータについては、陸上で取得したものであり実環境中においてラドン子孫核種による 影響が含まれないデータを取得することは困難であることから、*GI*にはラドン子孫核種の 影響がある程度含まれていることに留意する必要がある。

最小二乗法と直交距離回帰の結果を比較すると、Fig. 4-21 から GI について差異はほとん ど見られなかった。一方、RI については差異が比較的大きく、直交距離回帰の方が回帰係 数は大きくなる傾向にあった。本報告では、RI 及び GI は直交距離回帰による回帰係数をメ インとして解析に使用することとし、最小二乗法による回帰係数を用いた場合の解析結果との比較は4.7.2項にて地上測定値を用いて行う。

ラドン弁別手法に使用するパラメータを Table 4-11 にまとめた。 Bell430 (JA02AX) につ いては *RI*を 20.8、*GI*を 28.2 とし、Bell412 (JA6929) については *RI*を 22.4、*GI*を 29.5 とし た。また、本表には参考として、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングで使用 しているパラメータを併記した。*RI* には比較的ばらつきが見られ、ヘリコプター機種が同 ーであっても差異が大きい。これには大気中ラドン子孫核種の分布の不均一さや抽出対象と するデータの海抜高度範囲が広いことに起因することが推察される。*GI* については、回帰 に用いるデータが比較的多くなるため、ヘリコプター機種や測定場所に依らず、概ね 29 前 後に収まる傾向にある。



Fig. 4-21 海上及び陸上における NaI(TI)検出器の計数率と LaBr₃(Ce)検出器の計数率の関係 (上段: *RI*、下段: *GI*)

モニタリング名	開始日	終了日	ヘリコプター機種(機体番号)	RI	GI
川内(前期)	2023/07/25	2023/07/28	Bell430 (JA02AX)	20.8	28.2
川内 (後期)	2023/11/12	2023/11/15	Bell412 (JA6929)	22.4	29.5
	2023/09/28	2023/10/18	Bell430 (JA05TV)	20.4	28.9
東日本14次モニタリング	2023/09/20	2023/09/25	Bell430 (JA02AX)	16.3	27.7
	2023/09/25	2023/10/16	Bell412 (JA412N)	27.9	29.7

覧
1
6
Б
3
5
R
RI
た
2
Ĩ
$\overline{\mathbf{n}}$
1
朽
角
Ξ.
4
le
ab
Ĥ

4.7.2. ラドン弁別手法の適用結果及び標準的解析手法との比較

前項に記した *RI* 及び *GI* を川内の航空機モニタリングデータに適用し、ラドン弁別手法によ る空間線量率マップ及び空気中ラドン子孫核種由来のγ線計数率マップを作成した。なお、今 までの経験から *GI* を実測データに基づく数値よりもある程度小さく設定した方が、航空機モ ニタリング値が地上測定値とよく整合するという知見が得られている。これに再現性があるか を検証するために、前項で示した直交距離回帰による *GI* を基準値とし、基準値から 1 及び 2 を減じた場合についても解析を実施した。すなわち、川内(前期)及び川内(後期)についてそ れぞれ 28.2 及び 29.5 を *GI* 基準値として解析し、他にも 27.2 及び 28.5、26.2 及び 27.5 とした 場合についても解析し、それぞれの場合で空間線量率マップ及び空気中ラドン子孫核種の計数 率マップを作成した。なお、*GI*を1及び2減じる程度の範囲においては、式[6]において*C*_{Nal,g} が大きくなるため空間線量率は大きくなる。

空間線量率マップについては地上測定値 30 点と比較し、その妥当性を検証した。この時、 Fig. 4-10 に示した標準的解析手法 (ラドン弁別手法を適用しない場合の航空機モニタリングに よる空間線量率解析手法) による比較結果も併記し、ラドン弁別手法が空間線量率の換算結果 の妥当性向上をもたらすかを検証した。また、Fig. 4-21 に示した最小二乗法に基づく RI 及び GI を用いた場合についても解析を実施した。この時、上記のように最小二乗法における GI の 基準値を定め、この基準値から1及び2減じた場合の空間線量率の換算値についても、地上測 定値と比較した。最後に、航空機モニタリングにおいて空間線量率マップを作成するに際に評 価対象外となるγ線計数率の除去効果の有効性を検証した。以下に詳細を述べる。

(1) 空間線量率マップ及び空気中ラドン子孫核種由来のγ線計数率マップ

Fig. 4-22 及び Fig. 4-23 に空間線量率マップ及び空気中ラドン子孫核種由来のγ線計数率マッ プを示す。空間線量率マップについては比較のため、標準的解析手法によるマップ (Fig. 4-10 と同一) も掲載した。ラドン弁別手法を適用すると、測定エリア北西部において航空機モニタ リング値が 0.08 μSv/h を超える領域の面積が、標準的解析手法の場合よりも明らかに増加した。 一方で測定エリア北東部の航空機モニタリング値が 0.10 μSv/h~0.12 μSv/h となる領域に着目 すると、ラドン弁別手法を適用した方が標準的解析手法よりも減少する領域も認められた。ま た、ラドン弁別手法において、空間線量率は *GI* を基準値から減じるほど大きくなる傾向にあ り、測定エリア北西部において航空機モニタリング値が 0.10 μSv/h を超える領域の面積が増加 した。

空気中ラドン子孫核種由来の計数率マップは、NaI(Tl)検出器における空気中ラドン子孫核 種由来の計数率をマッピングしたものである。この計数率は NaI(Tl)検出器における全計数率 から、式[6]により算出した*C*_{Nal,g}を減算し、求めたものである。測定日時が場所により異な るため、空気中ラドン子孫核種由来の計数率は離散的である。また、空気中ラドン子孫核種の 起源としては中国大陸からの大気輸送と測定地近傍における地殻からの放出が考えられ、前者 の影響は特に日本海側の冬季に大きくなる傾向にある⁴⁴⁾⁻⁴⁶⁾。本手法で検出されたラドン子孫 核種がどちら由来なのか弁別することは困難であり、本結果はその地域におけるラドン子孫核 種の分布傾向を決定付けるものではないことに留意する必要がある。Fig. 4-23 について、川内 エリアの大部分で空気中ラドン子孫核種由来の計数率は 100 s⁻¹ を下回る程に小さかったが、 中央部から北東部にかけて 100 s⁻¹ 以上の領域が広がり、この領域と航空機モニタリング値が 比較的大きく算出された領域とが概ね一致した。しかしながら、航空機モニタリング値が比較 的高い北西部の領域において、空気中ラドン子孫核種由来の計数率はさほど高くなかった。以 上をまとめると、川内の航空機モニタリング値が比較的高く算出された領域の内、中央部から 北東部については、航空機モニタリングで得られた全計数率に対して、空気中ラドン子孫核種 由来のγ線計数率が占める割合が比較的大きく、従ってラドン弁別手法を適用すると、標準的 解析手法の場合よりも空間線量率の比較的高い領域の面積が減少する傾向にあったと推察され る。北西部については、逆に全計数率に対して空気中ラドン子孫核種由来のγ線計数率が占め る割合はさほど大きくなく、本地域をフライトした際のヘリコプター周囲の地形的状況といっ た測定状況に関する要因が比較的強く関与していることが推察される。

## (2) RI 及び GI の設定値及びラドン弁別手法による空間線量率の妥当性の検証

標準的解析手法及び直交距離回帰により求めた GI の各設定値を用いてラドン弁別手法を適 用した場合の航空機モニタリング値と地上測定値との比較結果を Fig. 4-24 に示す。また、最 小二乗法により求めた GI の各設定値を用いた場合の同比較結果を Fig. 4-25 に示す。散布図に おいて、ファクター2 の範囲に収まっているプロットの数に着目すると、標準的解析手法で 97% (全 30 点中 29 点) であったのに対し、ラドン弁別手法では、直交距離回帰の場合、川内 (前期) の GI = 28.2、川内(後期) の GI = 29.5、川内(前期) の GI = 27.2 及び川内(後期) の GI = 28.5 のとき 97% (全 30 点中 29 点)、川内(前期) の GI = 26.2 及び川内(後期) の GI = 27.5 のと き 93% (全 30 点中 28 点) となった。最小二乗法の場合、川内(前期) の GI = 28.1、川内(後期) の GI = 29.2、川内(前期) の GI = 27.1 及び川内(後期) の GI = 28.2、川内(前期) の GI = 26.2 及 び川内(後期) の GI = 27.5 の全てにおいて 97%(全 30 点中 29 点)であった。ラドン弁別手法適 用前後でほとんど差異は見られなかった。また、ラドン弁別手法を適用した結果同士で比較す ると、GI を基準値よりも小さく設定しても、ほとんど差異は見られなかった。さらに、直交 距離回帰と最小二乗法により求めた GI の設定値による差異もほとんど見られなかった。

相対誤差については、標準的解析手法では平均値が-0.10、中央値が-0.15、1 標本標準偏差 が 0.28 であったのに対し、ラドン弁別手法の直交距離回帰により求めた *GI*を用いた場合、川 内 (前期) で *GI* = 28.2、川内 (後期) で *GI* = 29.5、川内 (前期) で *GI* = 27.2 及び川内 (後期) で *GI* = 28.5 としたときの平均値は 0.10 以下、中央値は 0 前後、1 標本標準偏差は 0.42 であった。川 内 (前期) で *GI* = 26.2 及び川内 (後期) で *GI* = 27.5 としたときの平均値は 0.12、中央値は 0.04、 1 標本標準偏差は 0.42 であり、ラドン弁別手法における他 2 つの結果よりもやや妥当性が低い ように見られる。最小二乗法により求めた *GI*を用いた場合、川内 (前期) で *GI* = 28.1、川内 (後期) で *GI* = 29.2、川内 (前期) で *GI* = 27.1 及び川内 (後期) で *GI* = 28.2 としたときの平均値 は 0.10 程度、中央値は 0 に比較的近く、1 標本標準偏差は 0.40 程度であった。川内 (前期) で *GI* = 26.1 及び川内 (後期) で *GI* = 27.2 としたときの平均値及び 1 標本標準偏差は、これら 2 つ の結果と同様であったが、中央値が 0.08 と比的大きくなった。ラドン弁別手法では標準的解 析手法の場合よりも相対誤差のばらつきがやや大きいものの、空間線量率の換算結果の妥当性 が僅かに向上したように見られる。また、ラドン弁別手法においては、直交距離回帰または最 小二乗法のいずれかで求めた *GI* を用いても、空間線量率の換算結果に顕著な差異は認められ なかった。

式 [8] に基づいて *RMSE* を計算した結果、標準的解析手法で 0.019 µSv/h であったのに対し、 ラドン弁別手法では、直交距離回帰により求めた *GI* を用いた場合、川内 (前期) の *GI* = 28.2 及 び川内 (後期) の *GI* = 29.5 のとき 0.021 µSv/h、川内 (前期) の *GI* = 27.2 及び川内 (後期) の *GI* = 28.5 のとき 0.022 µSv/h、川内 (前期) の *GI* = 26.2 及び川内 (後期) の *GI* = 27.5 のとき 0.021 µSv/h であった。また、最小二乗法により求めた *GI* を用いた場合、川内 (前期) の *GI* = 28.1 及 び川内 (後期) の *GI* = 29.2、川内 (前期) の *GI* = 27.1 及び川内 (後期) の *GI* = 28.2 及び川内 (前 期) の *GI* = 26.1 及び川内 (後期) の *GI* = 27.2 の全てにおいて 0.021 µSv/h であった。以上より、 ラドン弁別手法の適用前後及びラドン弁別手法における *GI* の算出方法によらず、*RMSE* はほ とんど同一であった。

(3) γ線計数率の除去効果の有効性

空間線量率マップを作成するにあたって評価対象外となるγ線計数率の除去効果の有効性を 検証するため、標準的解析手法において空気中核種フライトで求めた計数率と、GIに基準値 を設定しラドン弁別手法を適用して求めたラドン子孫核種由来の計数率を比較した。3.2 節 「空気中核種フライト」の項目に記載した通り、空気中核種フライトは鹿児島県の長島から南 西方向または西方海岸から西方向に少し離れた東シナ海上で実施した。また、本図には比較の ため、2023年(令和5年)9月20日~10月18日にかけて実施した、福島原子力発電所から半 径 80 km 圏外における航空機モニタリング(以下、東日本第14次モニタリング)のデータにつ いて同様に比較した結果も示した。東日本第14次モニタリングでは、空気中核種フライトは 海域だけでなく、陸域で行っている場合もあり、Bell412 (JA412N)については埼玉県本庄市の 周辺、埼玉県深谷市の周辺、栃木県芳賀郡益子町の周辺、栃木県真岡市の周辺、Bell430 (JA05TV)については福島県須賀川市の周辺、宮城県登米市の周辺において実施された。 Bell430 (JA02AX)の空気中核種フライトについては、全て海域で実施された。

標準的解析手法において空気中核種フライトで取得した計数率と GI に基準値を設定しラド ン弁別手法を適用して求めた空気中ラドン子孫核種由来の計数率を比較した結果をFig. 4-26 に 示す。Fig. 4-26 を見ると、川内(前期)及び川内(後期)で使用した Bell430 (JA02AX)及び Bell412 (JA9616) については、全データを平均すると、ラドン弁別手法で求めた空気中ラドン 子孫核種由来の計数率の方が両者とも1.3 倍程度高くなった。また、東日本第14次モニタリン グにおいても、いずれのヘリコプター機体についても、標準的解析手法で用いた空気中ラドン 子孫核種由来の計数率よりもラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子孫核種由来の計数率の方 が高くなる傾向にあった。具体的には、Bell412 (JA412N)では約1.8 倍、Bell430 (JA02AX)及 び Bell430 (JA02AX) では約1.2 倍程度であった。このように、川内と東日本第14次モニタリ ングでは、標準的解析手法とラドン弁別手法で求めた空気中核種由来の計数率における大小関 係はほとんど同様であった。以上より、ラドン弁別手法を採用するとバックグラウンド減算が やや過剰となり、標準的解析手法よりも空間線量率が低く算出される傾向にあると推察される。 しかしながら、Fig. 4-22 で示したように、ラドン弁別手法による空間線量率マップの方が、標 準的解析手法によるものより、測定エリアの北部域で 0.08 µSv/h~0.10 µSv/h の領域が増加し ており、上述した推論とは矛盾する。当該エリアのほとんどは測線間隔が 10 km と広く、また 測線距離が短く、測定データが少ない中で、内挿補間 (IDW) によって空間線量率が算出され ている。このため、当該エリアについては、標準的解析手法よりもラドン弁別手法の方がバッ クグラウンド減算がやや過小となり空間線量率が高く算出された地域が内挿補間により広域に 広がったものと推察される。

標準的解析手法では、地表面に分布する放射性核種由来のγ線計数率を算出するために、測 定日ごとに空気中核種フライトを実施し計数率を取得し、その日の測定エリア全体における全 計数率から減算する。空気中核種フライトで取得される計数率には空気中ラドン子孫核種由来 の計数率も含まれており、ある程度正確に空気中ラドン子孫核種の影響を差し引くことが可能 であると考えられる。しかしながら、空気中核種フライトを実施する場所と測線フライトを実 施する場所が離れてしまった場合、測定エリア近傍における地殻から放出される空気中ラドン 子孫核種由来の計数率を適切に除去できない可能性が高い。一方、ラドン弁別手法では、各測 定点における全計数率から、空気中ラドン子孫核種(遠方からの輸送及び近傍の地殻から放出 されたものを含む)に起因する計数率を切り出して除去できるという強みがある。ラドン弁別 手法の信頼性を向上させることができれば、空気中核種フライトが不要となり、航空機モニタ リングの測定期間やデータの解析に掛かる時間の短縮等の効率化に寄与することとなる。よっ て、ラドン弁別手法の更なる改良と信頼性の向上に係る検討を重ねることは意義深いことであ り、RI及び GI の算出方法について、今後も知見を蓄積し更なる改良に向けた検討を行ってい く必要があると考える。現状では、RI及び GI の算出に用いている回帰方法に外れ値の影響を 緩和した上で、回帰係数を求めるロバストなアルゴリズムを持たせていない。外れ値が生じた 場合にはロバストな回帰アルゴリズムにより、外れ値の影響を緩和して算出される RI を用い ると、GI を人為的に変化させる必要なく、ラドン弁別手法において空間線量率の換算結果が より良くなる見込みが得られた²¹⁾。今後は最小二乗法及び直交距離回帰にロバスト性を持た せ、RIの算出方法の更なる改良を検討したい。



Fig. 4-22 川内におけるラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ( (c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 4-23 川内における空気中のラドン子孫核種由来の計数率マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 4-24 川内における標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と 地上測定値との比較 (直交距離回帰による *RI* 及び *GI* を用いた場合) (左:散布図、右:相対誤差のヒストグラム)

(1/2)



Fig. 4-24 川内における標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と 地上測定値との比較 (直交距離回帰による *RI* 及び *GI* を用いた場合)

(2/2)



Fig. 4-25 川内におけるラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (最小二乗法による RI 及び GI を用いた場合)



Fig. 4-26 空気中核種フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子孫 核種由来の計数率の比較

## 4.8. 放射性セシウムの沈着量

川内における航空機モニタリング結果から、放射性セシウムの沈着量を評価した。放射性 セシウムの沈着量マップを Fig. 4-27 に示す。このように、全範囲において検出限界値以下 (≦ 10 kBq/m²) となり、本測定エリアにおいて放射性セシウムは検出されなかった。なお、放射性 セシウムの沈着量の計算手法及びマップの色合いの設定については、福島原子力発電所周辺に おける航空機モニタリング²⁰)と同様とした。



Fig. 4-27 川内における放射性セシウム沈着量マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ( (c) Esri Japan) を使用。)

5. 原子力防災訓練における緊急時航空機モニタリング及び無人機の訓練フライト

本章では、規制庁受託の一環として実施した、2023 年度(令和5年度)の内閣府主導によ る原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングの概要及び本訓練で得られた実働 上の課題について述べる。本訓練の対象サイトは柏崎刈羽原子力発電所であった。無人航空 機、無人へリコプター及びドローンによる訓練フライトは、柏崎中央海水浴場を離発着点と して実施した。しかし、当日は悪天候であったため、後日、当該モニタリングの一部を公益 財団法人福島イノベーション・コースト構想推進機構福島ロボットテストフィールド(以下、 福島 RTF)にて実施した。また、有人へリコプターについては、航空自衛隊新潟分屯基地を 離発着点として、新潟県の柏崎市、上越市及び十日町市の周辺において緊急時航空機モニタ リングを実施した。

5.1. 原子力総合防災訓練等に係る航空機モニタリングの経緯

第1章で述べた通り、緊急時モニタリングの一環として、航空機モニタリングを実施する ことが原子力災害対策マニュアル²²⁾に定められている。緊急時における航空機モニタリン グの実効性向上に資するため、内閣府が主体となって実施する原子力総合防災訓練等におい て規制庁及び防衛省(自衛隊)と連携して航空機モニタリングに協力してきた(Table 5-1)。 なお、令和3年度(2021年度)の北海道原子力防災訓練については防衛省(陸上自衛隊)から 航空機モニタリングシステムの使用許可が得られなかったため、モニタリングは実施せず、 事前に策定したフライトプランに沿ってフライトするのみに留まった。

訓練名		使用機体	機体の
	(モーダリングまたはノフイト地域)		<u>離 策 宿 地 只 </u> れ に れ の の に の れ の の の の の の の の の の の の
加 至 破 モーメリング 訓練 (2016 年 11 日 7 日)	(チャーク) (	0 ⁴⁷ (陸上白街隊太軍津駐古地)	一 一 天 示 大 百 注 駐 古 地
		(在工日南欧小文准配七地)	小文件社名地
一一人25年度	玄海	UH-60	福岡県
(2017年9月4日)	(長崎県壱岐市)	(航空自衛隊芦屋基地)	芦屋基地
平成30年度			
原子力総合防災訓練	てしたのであります。		<b>石川県</b>
(2018年8月26日)	(滋貨県高島巾)	(航空目衛隊小松基地)	小松基地
平成30年度	沾	1114 1 1	北海洋
北海道原子力防災訓練	12 (北海道小樽古から今古郡去サ川村)		1. 伊理 丘珠駐市地
(2018年10月22日)	(北海道小樽川から宗川卻が弁川村)	(陸工日開隊止坏駐屯地)	山坏缸电地
令和元年度	島根	114-60	自相同
原子力総合防災訓練 ¹⁵⁾	(鳥取県米子市、南部町、島根県安来	(航空白衛隊昔屋其地)	「「「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「
(2019年11月8日~10日)	市)	(机主日南陈卢庄圣地)	天体坐地
令和2年度	<del>7</del> 111	  新刑コロナウイルス 咸染症に関する	、堅刍車能合言の発会に
原子力総合防災訓練 ¹⁷⁾	タ川 (宮城県祭平市から宮城那松阜町)	供い 由止となった	来心宇芯旦日の元日に
(2021年2月7日)	(古城朱豆木市から古城都伝島町)		
令和3年度	泊	114-11	北海道
北海道原子力防災訓練 ¹⁹⁾	(北海道小樽市から余市郡赤井川村)	(陵上白衛隊丘井駐古地)	1. 一 一 元 一 但 一 一 元 一 但 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一
(2021年10月27日~28日)	※フライトのみ実施	(陸工日開隊立外社宅地)	山外虹七地
令和3年度	<del>7</del> 111	  訓練対応考に新型コロナウイルス属	成処症の躍串者が認めら
原子力総合防災訓練 ¹⁹⁾	シカ (京城県祭米市から京城郡松阜町)	わたため、中止となった。	
(2022年2月11日~12日)	(日朔朱豆木市為)5日朔都位西南)	101212037(1 単2:0 5)2:8	
令和4年度	美浜	114-60	悉知旧
原子力総合防災訓練 ²¹⁾	(岐阜県揖斐郡揖斐川町、滋賀県米原	(航空白衛隊小牧其地)	
(2022年11月4日~6日)	市、長浜市、高島市)	(机主日南冰小快率地)	小快坐地
令和5年度		無人航空機 (Penguin C)	
原子力総合防災訓練	柏崎刈羽	無人ヘリコプター (FAZER R G2)	新潟県
(2023年10月28日)	(新潟県柏崎市)	マルチコブター (Matrice 300 RTK)	柏崎中央海水浴場
		(株式会社JDRONE)	
〒和5年度 西子も公会吐巛訓練	柏崎刈羽	UH-60	新潟県
「「「「「「「「「」」」「「「」」」「「」」「「」」「「」」「「」」「「」」	(新潟県柏崎市、上越市、十日町市)	(航空自衛隊新潟分屯基地)	新潟分屯基地

Table 5-1 原子力総合防災訓練等における航空機モニタリング実施状況

5.2. 令和5年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングの全体概要

令和5年度原子力総合防災訓練における原子力発電所事故の想定⁴⁷⁾を以下に示す。

『新潟県上中越沖を震源とした地震が発生する。これにより、運転中の柏崎刈羽子力発電 所7号機は緊急停止する。さらには、設備の故障が重なり、原子炉注水機能を喪失する事象 が発生し、施設敷地緊急事態、全面緊急事態に至る。』

このように事故が進展していく中で周辺環境中に放射性核種が放出されたと想定し、規制 庁緊急時対応センター (以下、ERC) 放射線班から原子力緊急時支援・研修センター (以下、 NEAT) に航空機モニタリング出動要請が発出された。放射性核種は発電所から南西方向に 拡散したと想定された。

5.2.1. 無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンによる訓練フライト

無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンの訓練フライトは柏崎中央海水浴場を離発着 点として実施した。事前に計画した飛行範囲及び飛行予定経路を Fig. 5-1 に示す。無人航空 機、無人ヘリコプター及びドローンによる訓練フライトに必要な資機材は 2023 年 (令和 5 年)10月 27日に福島県南相馬市から新潟県柏崎市までバン型車両 3 台にて陸上輸送した。 翌日の 10月 28日に柏崎中央海水浴場において、無人航空機(Edge Autonomy 社製 Penguin C、Fig. 5-2 (a))、無人ヘリコプター(ヤマハ発動機社製 FAZER R G2、Fig. 5-2 (b))及びドローン(DJI 社製 Matrice 300 RTK、Fig. 5-2 (c))の各機体のフライト準備作業及び訓練フライトを実施した。また、当日それぞれの機体に搭載した放射線検出器も Fig. 5-2 (d)、Fig. 5-2 (e)及び Fig. 5-2 (f)に併せて示す。それぞれ、検出器の情報を地上にリアルタイムにダウンリンクするシステムを有している(Fig. 5-3)。無人ヘリコプター及び無人航空機には、原子力機構が開発したリアルタイム通信及び逐次解析システム(準リアルタイムに地表面から1 mの高さの空間線量率への換算及びマッピングが可能なシステム)を使用した。また、ドローンについては、規制庁の所有する松浦電工社製の KURAMA をベースとした LTE 通信によるデータ収集が可能な検出器を採用した。なお現状のドローンは、検出器の情報の収集のみ可能であり、地表面から1 mの高さの空間線量率への換算機能は有していない。

当日の訓練フライトのタイムテーブルは Table 5-2 の通りである。当日は降雨及び強風の 悪天候であり、訓練フライトの中止も想定しながらの対応となった。当日 13 時までに基地 局準備と無人航空機、無人へリコプター及びドローンのフライト準備作業を完了し、13 時 以降、気象予報や現地での風雨の状況から降雨及び強風の無い訓練フライトに適した時間帯 を判断し、無人へリコプターについては 2 回、ドローンについては 3 回のモニタリングを実 施した。なお、無人航空機については放射線検出器の搭載、フライト準備作業 (エンジンテ ストまで)を進めた時点で離陸及び飛行は可能な状況であったが、強い横風が吹く状況での 着陸が避けられず、着陸予想エリアが海上または飛行範囲外となるリスクが想定されたこと から、当日のフライトは断念した。

無人ヘリコプターに搭載した放射線検出器で測定した計数率を空間線量率に換算し、マッ ピングした結果を Fig. 5-4 に示す。また、ドローンに搭載した放射線検出器で測定された上 空での空間線量率のリアルタイムマッピングの状況を Fig. 5-5 に示す。悪天候のため、訓練 フライトは飛行予定経路の一部のみで実施したが、放射線検出器を搭載したフライト及び空 間線量率分布のリアルタイムなマッピングに成功した。なお、これら空間線量率マップは、 空間線量率の分布が視覚的に分かりやすくなるよう、コンターインターバルを細かく設定し た。また、これらモニタリングを実施したエリアの大部分は海上であることと、当日は荒天 であり地表面が雨に濡れていたため、空間線量率の値は必ずしも正確でない。

無人航空機については、別途、2023年(令和5年)12月19日に福島 RTF において33分間 のフライトを実施し、Fig. 5-6に示すように空間線量率分布のマッピングに成功した。

## Table 5-2 無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンによる訓練フライトのタイム テーブル

<b>吽</b> 刻		実施	内容	
☞≪□ (2023年10月28日)	無人航空機 Penguin C	無人ヘリ FAZER R G2	ドローン Matrice 300 RTK	基地局
10:00				
				基地局準備
11:00				
	進備			
12:00		進備	▲ 淮借 ↓	
13:00	エンジンテスト	エニタリング(14公)	モニタリング(10分)	
	※悪天候のため	ーーブリンク(14万) 		
14:00			モニダリンク(12分)	
15:00		モニタリング(26分)		
			モニタリング(18分)	
16:00				基地局撤去



Fig. 5-1 無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンの飛行範囲と飛行予定経路 (背景地図は、地理院地図 Vector⁴⁸⁾に飛行範囲及び飛行予定経路を追記して掲載)



Fig. 5-2 モニタリングに用いた機体及び放射線検出器

機体:(a) 無人航空機 (Edge Autonomy 社製 Penguin C)、(b) 無人ヘリコプター (ヤマハ 発動機社製 FAZER R G2)、(c) ドローン (DJI 社製 Matrice 300 RTK) 放射線検出器:(d) プラスチックシンチレータ及び BGO、(e) LaBr₃(Ce)検出器、(f) KURAMA



*上空の空間線量率情報のみ 地上換算機能なし

Fig. 5-3 訓練フライトに用いたシステムの構成



Fig. 5-4 無人ヘリコプターモニタリングによる上空での空間線量率の解析結果 (新潟県柏崎市柏崎中央海水浴場)

(背景地図は、地理院地図 Vector⁴⁸⁾に飛行軌跡及び空間線量率を追記して掲載)



Fig. 5-5 ドローンモニタリングによる上空での空間線量率のリアルタイムマッピング結果 (新潟県柏崎市柏崎中央海水浴場)

(背景地図は、地理院地図 Vector⁴⁸⁾に飛行軌跡及び空間線量率を追記して掲載)



Fig. 5-6 無人航空機モニタリングによる空間線量率解析結果 (福島 RTF) (背景地図は、地理院地図 Vector⁴⁸⁾に飛行軌跡及び空間線量率を追記して掲載) 5.2.2. 自衛隊の有人ヘリコプターによる緊急時航空機モニタリング

有人へリコプターによる緊急時航空機モニタリングは、航空自衛隊新潟分屯基地を離発着 点として、測線1の西端から進入し、以降は測線2から測線5まで順番に飛行するプランと した (Fig. 5-7)。この時、基準対地高度は300 m (≒1,000 ft)、上限対地高度は530 m (≒1,750 ft)、下限対地高度は0 m と設定した。

航空機モニタリングシステムは緊急時モニタリング用ラック¹¹⁾に取付け、リアルタイム データ通信システム¹³⁾も含めて、2023年(令和5年)10月27日にNEATから新潟分屯基地 へ輸送した。10月28日に新潟分屯基地で航空機モニタリングシステムを積み下ろし、本訓 練で使用したヘリコプターUH-60 (Fig. 5-8)に搭載し、ケーブル接続等を行った。搭載完了 後の航空機モニタリングシステムをFig. 5-9に示す。また同日、航空機モニタリングシステ ム及びリアルタイムデータ通信システムから発せられる電磁ノイズが UH-60 に備えられて いる計器類に悪影響を及ぼすか否かを確認するため、簡易的な電磁干渉試験を UH-60 に対 して実施し、問題がないことを確認した。

本項の冒頭に述べたフライトプランに基づき、10月 29日に緊急時航空機モニタリングを 実施した。Table 5-3に当日のタイムテーブルを示す。航空機モニタリング要員としてNEAT から参加した 3名が現地対応し、内2名が機体に搭乗して2時間 20分程度モニタリングを 行った (Fig. 5-10)。なお、リアルタイムデータ通信システムのイリジウム衛星²へのデータ 送信間隔は 30秒に1回に設定した。緊急時航空機モニタリングのフライト中は新潟分屯基 地のパイロットと NEAT 航空機モニタリング要員とで密にコミュニケーションを取り、RSI システム及び高精度 GPS システムに備えられているナビゲーション機能も適宜利用して、 パイロットへのフライト指示を確実に行った。残りの1名は地上に待機し、緊急時航空機モ ニタリングのフライト中にリアルタイムデータ通信システムにより、航空機モニタリング データがリアルタイムに電子地図上に表示されることを確認した (Fig. 5-11)。なお、測線 2 のフライト中に高精度 GPS システムの不調が見られ、当システムの再起動に時間を要した ため、測線 2 に関するデータは本図にプロットしていない。それ以外の箇所についてもデー タの途切れが時々見られたが、これはリアルタイムデータ通信システムの異常ではなく、イ リジウム衛星の使用状況や天候の状況により発生する偶発的事象である。

緊急時航空機モニタリング終了後はデータ解析及びマッピングを行った。UH-60に対する 換算パラメータは過去に取得したものの内、最も信頼性が高いパラメータセットを選定し適 用した。具体的には、*CR-Index*及び*AF*については平成 30 年度原子力総合防災訓練で取得 した数値、*CD*については2011年に福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングで取 得した数値を用いた (Table 5-4)。前述の通り、モニタリング中に高精度 GPS システムの不 調により測線の一部で測位データが欠落したため、RSIシステムの GPS 測位データを代わり

^{*&}lt;sup>2</sup> イリジウム衛星は、地球低軌道を周回する 66 基の通信衛星で構成されるグローバルな衛 星通信ネットワークである。地上の通信インフラが整備されていない地域でもデータ通信が 可能である。リアルタイムデータ通信システムにおいては、ヘリコプター機内からγ線計数 率及び GPS 測位データの送信に利用される。

に用いた。解析結果を基に作成した空間線量率分布マップを Fig. 5-12 に示す。なお、緊急時航空機モニタリングを実施したエリアは荒天であり地表面が雨で濡れていたため、空間線量率の換算値は必ずしも正確でない。本マップの色分けは住民等に対する防護措置の実施判断に活用しやすくするため、以下の基準に沿って設定した。

- ・赤色:500 µSv/h 超過 (緊急防護措置としての OIL1 を超過)
- ・ 黄色: 20 µSv/h~500 µSv/h (早期防護措置としての OIL2 を超過)
- 緑色: 0.5 µSv/h~20 µSv/h (飲食物に係るスクリーニング基準を超過)
- 水色: 0.5 µSv/h 未満 (防護措置を実施する判断基準未満)

データ解析を開始してから空間線量率分布マップを完成させNEAT本部に報告を完了する まで、25分程度であった。その後、本マップをNEAT本部から ERC 放射線班へメールで送 付し、緊急時航空機モニタリングの結果を報告した。

緊急時航空機モニタリング中に取得した GPS 測位データに基づいた対地高度の推移を Fig. 5-13 に示す。測線上では基準対地高度である 1,000 ft 付近を概ね維持しながらフライトでき た。測線 5 の東端付近において雲がヘリコプターの進路上にあり、安全確保のため測線から 一時的に離脱した。その後、雲が通過したのを確認した上で、当該測線に戻るよう NEAT 航 空機モニタリング要員からパイロットに指示を行い再測定した。Fig. 5-13 に「測線 5 再測 定」とあるのはこのためである。

Table 5-3 令和5年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングに係るタイム テーブル (2023年10月29日)

時刻	実施内容
6:40	新潟分屯基地に入域
7:00	飛行決心
7:10	防衛省及びJAEA:RSIシステムチェック等の航空機モニタリング準備
8:00	新潟分屯基地を離陸
8:30~9:50	測線1~測線5をフライト
10:25	新潟分屯基地に着陸、航空機モニタリングシステムの取り外し
10:45~11:10	航空機モニタリングデータの解析、空間線量率分布マップの作成及び結果報告
12:10	新潟分屯基地から航空機モニタリング機材の搬出作業
12:30	新潟分屯基地から退域

Table 5-4 UH-60 に対する換算パラメータの一覧

CR-Index	AF	CD
(-)	$(m^{-1})$	(s ⁻¹ /[µSv/h])
2.45	-0.00394	10,300

※CR-Index及びAFについては、平成30年度原子力総合防災訓練で取得したものである。 ※CDについては、2011年に福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングで取得した数値である。





Fig. 5-8 令和5年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングに使用した ヘリコプター (UH-60)



Fig. 5-9 航空機モニタリングシステムの搭載状況


Fig. 5-10 令和 5 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングの ヘリコプター内での測定状況 (訓練)







5.3. 訓練から得られた緊急時航空機モニタリングの課題と課題に対する取り組み

令和5年度原子力総合防災訓練で実施した無人機の訓練フライト及び緊急時航空機モニタリングの各作業において抽出した課題を以下にまとめる。

5.3.1. 無人機の訓練フライトについて

• 無人機訓練について

国内初の無人機の総合防災訓練での訓練フライトを実施できた。福島県南相馬市に配備さ れている3種の無人機の訓練フライトを現地で実施するために車両5台(バン型車両3台、普 通乗用車2台)、原子力機構4名、運用事業者である株式会社JDRONE7名で対応した。当日 は、午前中から降雨約2.5 mm/h、地上風速9.8 m/sという悪天候であったが、システムの展開 は1時間程度で完了できた。今後、原子力発電所立地地域での訓練を重ねることで、より多く の課題を抽出できると考えられる。

•天候不良時の対応について

無人ヘリコプター、無人航空機は降雨 5 mm/h、地上風速 10 m/s での運航が可能とされてい る。しかしながら、無人航空機については、パラシュートでの着陸に十分なスペースが確保さ れていることが制約条件となる。今回の気象条件、フライト場所の条件では、近傍の海水浴場 でパラセーリングなどを行っている利用者がいたため、無人航空機のフライトを断念せざるを 得なかった。また、それぞれに搭載している検出器は防水機能を有しておらず、今後更なる適 用条件の拡大のため検出器の防水機能の付加について検討すべきと考える。ドローンについて は、検出器のみならず機体についても防水機能がなく、降雨時のフライトは難しい。今後、防 水型のドローンの採用を検討すべきと考える。

•無人機のシステムについて

原子力機構が開発した無人へリコプター及び無人航空機用のリアルタイム通信並びに逐次 解析システムについて、所定の性能及び有効性を確認できた。本システムは、Web ブラウザ で稼働する仕様となっており、専用のソフトウェアのインストールなしに PC での操作が可能 である。将来的には、現地のPCと規制庁や自治体などのPCをインターネット経由で接続し、 情報共有が可能となるような基盤構築を進めていく予定である。ドローンについては、データ の通信は確認できたものの、地表面から1mの高さの空間線量率への換算システム機能を有し ていないのが現状である。飛行時間やペイロードの特徴が異なる無人機プラットフォームの使 用のタイミングを検討しつつ、情報共有システムの統合及び機能の最適化を検討する必要があ る。

• 原子力災害時の対応体制について

今回の訓練では、原子力機構のモニタリング専門家4名及び無人機運用事業者7名が対応した。訓練を通じて、以下の課題が明らかとなった。これらの課題に対し、今後の訓練や検討を通じて、実際の原子力災害時における最適な対応体制の構築を目指す。

・迅速な人員招集と対応体制の確立:原子力災害時に専門家や無人機の運用事業者を速や

かに招集し、現場対応するための手順や通信体制の整備が必要である。

- ・平常時の体制維持と訓練の継続実施:機材の保守管理や人員の技術向上を図るため、定 期的な訓練やトレーニングの実施が必要である。
- ・他機関との連携強化:自治体等の関係機関との情報共有や協力体制を強化し、統合的な 対応ができる仕組みを構築する必要がある。
- •訓練の対応計画について

国内初の試みということもあり、無人機のフライト場所の調整、手続き及び当日のスケジュ ールなど対象自治体の担当者と事前に密な打合せを実施した。実際の事故時にはこのような事 前打ち合わせは不可能であるため、予め無人機の離発着可能な場所、原子力発電所の立地地域 の特徴及び航空管制の状況などを確認し、手順化することが必要である。

5.3.2. 緊急時航空機モニタリングについて

航空機モニタリングシステムの輸送について

本訓練では民間の輸送業者に委託して航空機モニタリングシステム等測定機材をNEATから ヘリコプターの離発着地点まで輸送した。しかしながら、原子力災害時等においては、民間の 輸送業者や自衛隊等の他機関から輸送に係る協力を得られない可能性もあるため、原子力機構 が当該輸送を担う方法について検討する必要がある。

• 航空機モニタリングシステムの UH-60 への搭載について

航空機モニタリングシステムのヘリコプターへの搭載作業にあたっては、新潟分屯基地の 隊員からの協力を得て、概ね 30 分程度で設置及び動作確認を完了した。なお、昨年度に抽出 された課題²¹⁾に対して以下のように改善を施した。これらの改善策は、当該作業の標準化に 資するものである。しかしながら、その有効性の確認は UH-60 を用いる場合のみに留まって いるのが現状である。今後、緊急時航空機モニタリングに用いる可能性のある UH-1Jや CH-47 等についても、当該作業に関する知見を蓄積していく必要がある。

▶スタッドボルトを設置する位置決めの迅速化

UH-60 機内床にスタッドボルトを設置できるポイントが多数あり、ラックにフィットする スタッドボルトの設置ポイントが確定できず、ラックの設置作業が難航していた²¹⁾。今回、 使用すべきスタッドボルトの設置ポイントを一目で分かるようにするため、簡易的な目印付 き紐 (Fig. 5-14) を作製し活用した。この紐に付けた黄色い目印がラックのボルト穴の位置で あり、Fig. 5-14 のようにヘリコプター機体の床面に紐を広げ、これら黄色い目印と重なる場 所が使用すべきスタッドボルトの設置ポイントを確認できる。これにより、現地で試行錯誤 に要する時間が不要となり、ラックの設置ポイントの確定に要する時間を短縮することがで きた。

▶スタッドボルトのナット締めに掛かる労力軽減

UH-60 機内の限られたスペースで、工具を用いてスタッドボルトのナット締めを迅速に行 うのに難航していた²¹⁾。そこで、ナット締め作業を非常に狭いスペースで行うことを想定し た事前練習を NEAT で実施した。また、平ワッシャーを数枚重ねてスタッドボルトのねじ部 分を埋めることで、ナット締めに必要な深さを短くした。これにより、ナット締め作業に掛かる労力が軽減された。

•データ解析、空間線量率マッピングついて

昨年度まで用いていた緊急時航空機モニタリング専用のデータ解析ソフトウェア「AMS Total System」を廃止し、現在のバックグラウンド航空機モニタリングに用いている解析シス テムを本訓練でも使用した。平常時と緊急時で解析作業手順に一貫性が生まれたことにより、 現地の解析対応者が把握すべき情報量が軽減された。データの解析に着手してから空間線量率 分布マップの作成及び NEAT 本部への報告完了まで概ね 25 分程度で完了した。緊急時航空機 モニタリングで取得された全測定データから、空間線量率のマッピングに用いるデータを選別 し抽出する作業に 10 分程度要したため、本作業の迅速化に資するツール群の構築が課題であ る。

リアルタイムデータ通信システムついて

Fig. 5-11 に示した通り、リアルタイムデータ通信システムでは、RSI システムの測定データ (γ線計数率)をそのまま電子地図上に表示するのに留まっているのが現状である。本システム を住民等に対する防護措置の実施判断に活用しやすくするためには、地表面から1mの高さの 空間線量率 (μSv/h) に換算した上で電子地図上に表示が可能となるプログラムの開発及び導入 が必要となる。



Fig. 5-14 スタッドボルトを設置する位置決めを行うための目印付き紐

### 6. 無人航空機用放射線モニタリングシステムの開発

#### 6.1. 背景

福島原子力発電所事故後、原子力災害時における事故後の対応について「原子力災害対策 マニュアル²²⁾」が大幅に改定された。改定された原子力災害対策マニュアルでは、緊急時モ ニタリング体制の強化や情報伝達手段の見直しなどが盛り込まれた。これに対応するためには、 モニタリング技術の高度化や関係機関との連携体制の強化等に取り組み必要がある。原子力施 設敷地外に放射性物質が放出された場合、数時間以内に緊急時防護措置を準備する区域 (Urgent Protective action planning Zone : UPZ)の OIL (Operational Intervention Level)の区域設 定や、スクリーニングの重要性分類のため、エリアの空間線量率の測定 (緊急時モニタリング) を迅速かつタイムリーに実施する必要がある。本研究では、この必要性に応えるため、無人航 空機を活用した迅速な緊急時モニタリングシステムの開発と、その運用体制の構築に取り組ん でいる。

福島原子力発電所事故後、発電所周辺の放射線分布測定のため無人へリコプター等の無人 航空機が活用されている^{24),25)}。無人航空機によるモニタリングは車両や人手によるモニタリ ングと比較して、モニタリング要員の被ばくを低減できる他、モニタリングに際して陸路を用 いないため住民の避難との干渉を防ぐことができ、モニタリングポストのような点での測定と 比較して面的な放射線分布の評価が可能であること等の特長がある。しかし、現行の無人航空 機システムでは、緊急時のモニタリングに即座に対応できる機能や体制が十分に確立されてお らず、運用に際していくつかの課題がある。Fig. 6-1 に既存の無人航空機による測定システム の課題と、原子力災害時に備えておくべきシステムの概要を示す。原子力災害時に備えておく べきシステムとして、以下の要件が挙げられる。

- ・長距離通信機能の実装: UPZ 外からでも無人航空機を遠隔操作し、データをリアルタイムで取得及び伝送できるシステムが必要である。これにより、モニタリング要因の被ばくリスクを低減し、安全な場所からの運用が可能となる。
- ・リアルタイムなデータ監視及び共有システムの構築:放射線検出器の動作状況等をリアルタイムで監視し、測定データを共有及び保存することで、異常発見時の即時対応やデータの一元管理が可能となる。これにより、情報の伝達と的確な意思決定が支援される。
- ・自動解析システムの開発:上空で取得した測定データを自動的に地表面から1mの高さの 空間線量率に換算し、可視化するシステムが必要である。これにより手作業を減らし、迅速な情報共有が可能となる。無人航空機用の放射線検出器の開発:無人航空機に搭載可能 で、長距離通信やリアルタイムなデータ監視が可能な放射線検出器が必要である。既存の 検出器はサイズや重量の関係上、無人航空機に搭載が困難である。

本研究では、これらの課題解決に向けた取り組みを実施してきた。2019 年度 (令和元年度) から 2022 年度 (令和 4 年度) にかけて、長時間運用が可能である商用化された無人航空機 Penguin C (Fig. 6-2) を用いて、緊急時モニタリングにおける無人航空機の運用のための慣熟訓 練を実施するとともに、原子力災害時に無人航空機を運用する際に必要となる機能等の検討を 行ってきた^{15),17),19),21)}。2023 年度(令和5年度)は、上述した緊急時モニタリングにおける無人 航空機に係る課題を踏まえ、これまで検討してきた機能と統合可能な無人航空機搭載用放射線 測定システムの開発及び製作を行った。本章では開発した無人航空機搭載用放射線測定システ ムの概要及び動作試験を行った結果について詳細を述べる。



Fig. 6-1 既存の無人機によるシステムと原子力災害時に備えるべき無人航空機システム

名称	Penguin C					
メ <b>ーカー</b> (国)	Edge Autonomy (ラトビア)					
サイズ	翼長 3.3 m					
最大離陸重量 (kg)	23					
燃料	混合燃料 (ガソリン+オイル)					
最大航続時間 (分)	1200					
離着陸方法	カタパルトで離陸 パラシュートで着陸					
最 <b>大</b> 通信距離 (km)	180 *高出力電波使用時					
最大積載重量 (ペイロード)	燃料と合わせて7.64 kg					



Fig. 6-2 無人航空機 Penguin C の概要 ⁵⁰⁾

6.2. 無人航空機搭載用放射線測定システムについて

### 6.2.1. システム概要

本報告では原子力災害時の放射線モニタリングを想定し、無人航空機 (Penguin C) に搭載し て使用する無人航空機搭載用放射線測定システムを製作した (Fig. 6-3)。Fig. 6-3 において黄色 で示した部分が令和5年度の受託研究において製作したものであり、環境中の放射線モニタリ ング用検出器 (以下、環境用測定システム)と、緊急時の放射線モニタリング用検出器 (以下、 緊急時用測定システム)の2種類の検出器を製作した。環境用測定システムは、災害後の長期 に渡る環境中の放射線モニタリング等での使用を想定したもので、搭載する検出部を最大限大 きく確保し、低線量下でも計数率を確保できるように設計した。緊急時用測定システムは、災 害直後の高線量下で放射性物質が浮遊している状態でも測定できるように設計した。

また、それぞれの放射線測定情報を Penguin C の機体通信を用いて地上局で確認できるシステムを構築した。各検出器のシステム詳細概要及び動作試験結果を以下に述べる。



Fig. 6-3 無人航空機搭載用放射線測定システムの概要

# 6.2.2. 環境用測定システム

環境用測定システムの外観図面を Fig. 6-4 に、接続図面を Fig. 6-5 に示す。環境用測定シス テムの機体搭載部分の総重量は約 1.9 kg であり、サイズは約幅 207 mm×奥行 219 mm×高さ 163 mm である。環境用測定システムの検出部は幅 25 mm×奥行 25 mm×高さ 25 mm の High Energy Resolution Gd₃(Al,Ga)₅O₁₂(Ce) (以下、HR-GAGG) シンチレータを4 つ搭載し、光半導体素子に SiPM (Silicon Photomultiplier) を使用している。環境用測定システムでは、各検出部の測定ス テータス (検出器電圧や温度)、γ線計数率、γ線スペクトル(1,024 ch)、GPS 取得データ(時刻、 緯度、経度及び高度)、気温、湿度、気圧が 1 秒ごとに得られ、csv 形式でシステム本体に保存 され、地上局に無線通信でデータが送信及び保存される。本システムには運行用カメラが搭載 されており、地上局においてリアルタイムでカメラ映像を確認することができる。Fig. 6-6 に 環境用測定システムを機体に搭載した際の外観図を、Fig. 6-7 に地上局で確認できる測定シス テムの動作状況確認画面の例を示す。



Fig. 6-4 環境用測定システム外観図面







Fig. 6-6 環境用測定システム機体搭載時の外観



Fig. 6-7 地上局で確認できる測定システムの動作確認画面の例

6.2.3. 緊急時用測定システム

緊急時用測定システムの外観図面を Fig. 6-8 に、接続図面を Fig. 6-9 に示す。緊急時用測定 システムの機体搭載部分の総重量は約 1.3 kg であり、サイズは約幅 207 mm × 奥行 219 mm × 高さ 194 mm である。緊急時用測定システムは 2 種類の検出部を保持しており、幅 25 mm ×奥 行 25 mm ×高さ 0.3 mm のプラスチックシンチレータを 1 つ、幅 10 mm × 奥行 10 mm × 高さ 10 mm の HR-GAGG シンチレータを 2 つ搭載している。緊急時用測定システムでは、各検出部の 測定ステータス (検出器電圧や温度)、γ線計数率 (HR-GAGG)、HR-GAGG シンチレータのスペ クトル (1,024 ch)、β線計数率 (プラスチックシンチレータ)、プラスチックシンチレータのスペ クトル、GPS 取得データ (時刻、緯度、経度及び高度)、気温、湿度、気圧が 1 秒ごとに得られ、 csv 形式でシステム本体に保存、また地上局に無線通信でデータが送信及び保存される。緊急 時用測定システムには運行用カメラが搭載されており、地上局においてリアルタイムでカメラ 映像を確認することができる。Fig. 6-10 に緊急時用測定システムを機体に搭載した際の外観図 を示す。

本システムは複数の放射線検出部を用いることで、機体の周辺汚染状況と地面からの放射 線寄与を弁別することが可能であり、個々の検出器結晶からγ線計数率を取得し、遮へい率の 違いから、各寄与からの放射線計数率を推定する。Fig. 6-11 に緊急時における放射線測定環境 を示す。Fig. 6-11 の環境において、地表面及び機体周辺の放射性物質の寄与で検出した放射線 計数率には以下のような関係が成り立つと仮定する。

$$y_{\rm A} = A_{\rm c} + A_{\rm g} \tag{9}$$

$$y_{\rm B} = B_{\rm c} + B_{\rm g} \tag{10}$$

ここで、y_Aは検出部 A (機体底部側に設置された HR-GAGG シンチレータ)の全計数率、y_Bは 検出部 B (機体上部側に設置された HR-GAGG シンチレータ)の全計数率、A_c, B_cは各検出部で 機体周辺の放射性物質に起因する放射線計数率、A_g, B_gは地表面に存在する放射性核種に起因 する放射線計数率である。 機体周辺に汚染がなく、全計数率が地表面に存在する放射性核種に起因する計数率のみと 見なせる場合、AgとBgの比は一定であると仮定すると、以下の式 [11] が成り立つ。

$$B_{g} = SC_{1} \times A_{g}$$
^[11]

ここで、SC1は遮へい係数であり、遮へい体や各検出部の配置によって変化する。

次に、地表面に存在する放射性核種に起因する計数率の影響がほとんどなく、全計数率が 機体周辺の放射性物質に起因する計数率のみであると見なせる場合、*A*_cと*B*_cの比は一定である と仮定すると以下の式 [12] が成り立つ。

$$\boldsymbol{B}_{c} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{C}_{2} \times \boldsymbol{A}_{c}$$
[12]

ここで、 $SC_2$ は遮へい係数であり、遮へい体や各検出部の配置によって変化する。  $SC_1 \neq SC_2$ のとき、以下の連立方程式 [13] から $A_c$ ,  $A_g$ を推定することが可能となる。

$$\begin{cases} y_{\rm A} = A_{\rm c} + A_{\rm g} \\ y_{\rm B} = SC_2 A_{\rm c} + SC_1 A_{\rm g} \end{cases}$$
[13]

$$A_{g} = \frac{SC_{2} y_{A} - y_{B}}{SC_{2} - SC_{1}}, \sigma_{g} = \sqrt{\left(\frac{SC_{2}}{SC_{2} - SC_{1}}\right)^{2} y_{A} + \left(\frac{1}{SC_{2} - SC_{1}}\right)^{2} y_{B}}$$
[14]

$$A_{\rm c} = \frac{SC_1 y_{\rm A} - y_{\rm B}}{SC_1 - SC_2}, \sigma_{\rm c} = \sqrt{\left(\frac{SC_1}{SC_1 - SC_2}\right)^2 y_{\rm A} + \left(\frac{1}{SC_1 - SC_2}\right)^2 y_{\rm B}}$$
[15]

ここで、*o*gと*o*cは*A*gと*A*cの標準偏差である。*SC*1と*SC*2の差が大きいほど、推定精度は向上する。 ただし、*A*cの影響が機体に対して均一ではなく部位によってばらつきがある、または各検出 部の計数率が低く測定精度が担保できない場合等では、式 [13]の関係性が大きく崩れるとき、 本方式での各計数の推定精度は低くなる。

ここで、 $A_c \varepsilon A_g$ のバックグラウンドと考えると、 $A_g$ の検出限界値 $N_g$ は式 [16] により算出される。

$$N_{\rm g} = A_{\rm c} + 3\sigma_{\rm c} \tag{16}$$

上記で示した手法により、緊急時用測定システムは地表面の放射性核種からの寄与と、機体周辺の放射性核種からの寄与とに大まかに弁別することは可能だが、機体周辺の放射性核種 からの寄与について、機体周辺に存在する放射性プルーム等からの寄与と、機体自体に付着し ている放射性核種からの寄与とに詳細に弁別することが難しいという課題がある。そこで本シ ステムでは、 $\beta$ 線測定用として検出部 C (プラスチックシンチレータ)を機体表面汚染検知のた めに搭載している。検出部 C の計数率と機体表面汚染の $\gamma$ 線成分の間に相関関係にあると仮定 し、そこから算出された機体表面汚染成分を $A_c \ge B_c$  (=  $SC_2 A_c$ )から減算することで、機体周辺 の放射性核種からの寄与の影響を推定することができる。



Fig. 6-8 緊急時用測定システム外観図面



Fig. 6-9 緊急時用測定システム接続図面



Fig. 6-10 緊急時用測定システム機体搭載時の外観



Fig. 6-11 緊急時における放射線測定環境

## 6.3. 放射線検出器の照射試験

## 6.3.1. 試験概要

各放射線検出器を無人航空機 (Penguin C) に搭載し、各方向から放射線照射を行うことで、 放射線検出器の方向特性を確認した。放射線源には Cs-137γ線源 (約 10 MBq) を使用し、機体 の前、後、右、左、上、下の方向からγ線を照射し、それぞれ 10 分測定を行った (Fig. 6-12)。 線源は検出器中央部から約1m離して設置した。線源を設置しない状況におけるバックグラウ ンド値 (60 分測定) も併せて取得した。なお、機体の燃料はほぼ空の状態で測定を行った。



Fig. 6-12 線源試験時の様子

### 6.3.2. 試験結果

環境用測定システムに各方向からγ線照射を行い、得られた計数率の結果を Fig. 6-13 に、緊 急時用測定システムの結果を Fig. 6-14 に示す。Fig. 6-13 の環境用測定システムの試験結果を 見ると、右と左で検出器ごとに計数率が異なった。これは検出器が横並びに配置されており、検 出部による遮へいが大きく影響していると考えられる。各検出部の平均を見ると、前、上、下 は同レベルの計数率を示し、それらと比較して後、右、左の計数率は約40%低い傾向を示した。 本結果より、環境用測定システムは前方向優位の検出特性を有していることが分かった。Fig. 6-14 の緊急時用測定システムの試験結果を見ると、特に検出部 A の下方向の計数率が大きく 検出された。検出部 C の計数率は全て 1 s⁻¹~2 s⁻¹程度であり、どの方向から  $\gamma$ 線照射を行って もほとんどバックグラウンドレベルであった。検出部 A と B の各計数率の違いについては、 結晶配置の違いが大きく影響していると考えられる。ここで、バックグラウンド計数率を  $A_c$ 、 $B_c$ 、下方向に線源を設置し測定したデータを $A_g$ 、 $B_g$ としたとき、 $SC_1 \geq SC_2$ を算出した結果、  $SC_1 = 0.576$ 、 $SC_2 = 0.987$  ( $SC_1 \neq SC_2$ ) であった。本結果より、緊急時用測定システムにより  $A_c$ 、 $A_g$ を推定することが可能であることが分かった。ただし、本試験で算出したパラメータ は面線源ではなく、点線源で算出したパラメータである。今後、空間線量率の高いエリアでの フライト試験 (面線源での評価)及び機体への模擬線源吹付試験 (機体汚染が与える影響の評 価)等を行うことで、より精度の高いパラメータを取得することができると考えられる。併せ て $SC_1 \geq SC_2$ に、より大きな差をつける工夫をすることで、推定精度をより高めることができる と考えられる。また各測定結果を見ると、両結果共に後方向の計数率が低く測定されたが、こ れは機体後方のエンジン部の遮へいが大きく影響していると考えられる。環境用測定システム と同様、製作した緊急時用測定システムは前方向優位の検出特性であることが分かった。

なお、本試験では機体エンジンに燃料をほとんど入れずに試験を行った。今後、精度の高 い計数率評価を行うためには、機体エンジンの残存燃料の変化に伴う遮へい率の変化傾向を取 得する必要がある。また、本試験では各放射線検出器を機体に搭載してフライト試験を行って いない。実際のフライト状況での性能を評価するため、今後、各放射線検出器を搭載してのキ ャリブレーションフライト、フライト試験による空間線量率の測定及び地上測定値との比較評 価を行う必要がある。



Fig. 6-13 環境用測定システムにおけるγ線照射試験結果



Fig. 6-14 緊急時用測定システムにおけるγ線照射試験結果

## 6.4. 地上運転試験

6.4.1. 試験概要

搭載したシステムが電磁波ノイズ等を発し、機体制御やGNSS 情報等に影響を及ぼさないか 安全性を確認するため、フライト試験の前段階として地上運転試験を実施した。地上運転試験 では、各放射線検出器を無人航空機 (Penguin C) に搭載し、地上でエンジンを回転させながら 放射線測定試験を行うことで、機体に搭載したシステムに影響を及ぼさないか、また機体の振 動による検出器へのノイズの混入がないかを確認した。試験は福島県南相馬市海岸にて行った。 Fig. 6-15 に、地上運転試験時の様子を示す。地上運転試験では、機体を台座に固定し、機体の エンジン回転数を 0 rpm (静止状態)、3,000 rpm、3,500 rpm、4,000 rpm、4,500 rpm、5,000 rpm、 5,500 rpm、6,000 rpm 及び 6,100 rpm と変化させ、各回転数において 5 分ずつ各放射線検出器 で測定を行った。なお、フライト時の機体エンジン回転最小値は約 3,000 rpm、最大値は約 6,100 rpm である。



Fig. 6-15 地上運転試験時の様子

## 6.4.2. 試験結果

地上運転試験の結果、搭載した機器による機体制御、また GNSS 情報等への影響は見られな かった。各測定システムを機体に搭載してフライト試験を実施しても、運用上問題ないと考え られる。

地上運転試験における放射線検出器の計数率と機体エンジン回転数の関係について、環境 用測定システムの測定結果を Fig. 6-16 に、緊急時用測定システムの測定結果を Fig. 6-17 に示 す。これらの図より、エンジン回転数に伴う計数率の変動や、計数率及び放射線スペクトルへ のノイズ混入は確認されなかった。本試験では地上での運転試験のみを行ったが、フライト時 の機体の振動影響は地上での試験環境と若干異なるため、各放射線検出器を放射線モニタリン グ等に運用するためには、各放射線検出器を搭載してフライト試験を行い、ノイズ混入の有無 確認など各機器の信頼性評価を行う必要がある。



Fig. 6-17 緊急時用測定システムの地上運転試験結果 (図中のエラーバーは各値の標準偏差を示している。)

7. 緊急時モニタリングで活用できる無人航空機の調査

7.1. 無人航空機に関する調査

7.1.1. 緊急時モニタリング用無人航空機の選定

中国⁵¹⁾、フランス⁵²⁾、アメリカ⁵³⁾をはじめとする世界各国で、ドローン等の無人航空機の 開発が進められている。6.1 節に記載した、原子力災害時における無人航空機運用の課題を考 慮した上で、緊急時モニタリングに活用する無人航空機を選定する必要がある。今回は、緊急 時モニタリングで要求される要件(性能、価格、量産性、放射線検出器統合等)を満たす機体 かどうかについて、無人航空機のカタログや無人航空機メーカーへのヒアリングにより調査し た。調査対象とした無人航空機は全11機体であり、日本製が5機体、中国製が2機体、ラト ビア製が4機体である。調査対象とした無人航空機及び各調査項目に対する調査結果をTable 7-1に示す。また、各無人航空機の調査結果を調査項目ごとにFig. 7-1に集計した。

本調査の結果、緊急時モニタリングに適した無人航空機は日本製の占める割合が最も高かった。放射線検出器を搭載できるペイロードのある産業機で、入手がしやすい機体としては中 国製及び日本製が選択肢となる。これらの機体は航空局による審査や認証を受けている機種も 多く、無人航空機を飛行させる際の手続きが簡便であり、特に国産機においては情報セキュリ ティ面での安心感が高い。中国産の機体の特徴として、機体を運用するソフトウェアの完成度 (安定性やユーザーインターフェースの分かりやすさ)、機体を操縦する際の挙動の安定性、位 置保持精度の高さなどが挙げられる。ラトビア産の機体は、国内での認証等はないが、垂直離 着陸機 Vertical Take-Off and Landing (以下、VTOL機)を開発している。VTOL 機は固定翼機と 回転翼機の特性を併せ持ち、回転翼機より長時間の滞空を得意としており、緊急時モニタリン グに際しては、対象とするエリアの範囲や測定時間に応じて回転翼機と使い分けが必要である。 回転翼機は低空及び低速での飛行が可能であることから、狭いエリアを高い位置分解能で調査 することに適している。VTOL 機と回転翼機は機体の離着陸地点の制約が比較的少なく、日本 のように電信柱や家屋が多い環境であっても、緊急時モニタリングを実施するに際して運用上 の制限を受けにくい。また、VTOL を含む固定翼機は、揚力を固定翼により得ているため燃費 が高く、UPZ または PAZ 外からの長距離及び長時間の運用が可能である。

動力の種類としてはバッテリー駆動の割合が高く、バッテリー駆動の機体を用いる場合に は予備バッテリーを準備することが必要である。一方、ガソリン駆動の機体を用いる場合、対 応するガソリンの種類を明確にするとともに、給油方法の手順を整備しておく等の対策が必要 である。ペイロードは機体により大きく異なることから、緊急時モニタリングの目的に応じて、 放射線検出器やその外部電源などの搭載物の重量に対応した機体を選択しなければならない。 最低運用人数は回転翼機では1人だが、固定翼機及びVTOL機では2人が必要である。より長 距離での飛行を目的とする際には、より多くの運用人数が必要となる。一部の回転翼機では手 動飛行が可能であることから、狭いエリアで飛行プランを柔軟に変更して緊急時モニタリング を実施することが可能である。今回調査対象とした機体では全て自動飛行が可能であり、予め 飛行プランを策定しておくことで、迅速な緊急時モニタリングに供することが可能である。

巡航・最大飛行速度では、回転翼機と固定翼機及びVTOL機で大きな違いが見られたことか ら、緊急時モニタリング結果の共有に求められる迅速性に応じた機体の選択が必要である。航 続可能時間と距離でも同様の違いが見られたことから、重点的な緊急時モニタリングが必要な 場所を事前に選定し、最適な位置に基地局を選定することで迅速なモニタリングに資する。回 転翼機及びVTOL機では、ホバリングが可能であることから、後述の空間線量率換算係数や空 気減弱係数といった換算パラメータの算出が短時間内で可能である。一方、固定翼機ではホバ リングが不可能であり、3.2 節に記載したテストラインフライトと同様の手順を踏む必要があ り、パラメータ算出に比較的長時間を要する。今回調査対象とした機体は全て雨天時でも飛行 可能だが、検出器やカメラなどの搭載物が防水仕様でない場合、ケースに収納するなど対策が 必要である。

緊急時モニタリングの際の安全確認は、カメラでの映像とリアルタイムに取得される機体 ログを基地局ソフトウェアで確認することによって達成される。衝突防止機能も機体の安全を 担保する有効な手段であるが、当該機能を有しているのは現状として回転翼機のみであるため、 その他の機種では自動飛行に向けて予め対象エリアの障害物や地形を鑑みて、安全な飛行計画 を策定することが有効である。飛行中に無線通信が断絶した際、今回調査対象とした全機体と もに自動で帰還することが可能であるため、より安全な飛行運用に資する。機体の価格につい て、回転翼機は安く、固定翼機及び VTOL 機は高い傾向にあった。FIXAR 025 のように量産性 が低い機体については、価格が高くなる傾向にある。複数の拠点において無人航空機を用いた 緊急時モニタリング体制を整備するためには、機体の量産性と価格が重要な要素となる。 FIXAR 025 は開発段階にあり、放射線検出器を搭載するには機体内部の構造と電源供給の方式 について検討が必要である。検出器の搭載が可能である機体についても、機体の種類によって 求められる機体構造の位置情報が異なる。PF2-AE Inspection と ATLAS PRO は、カメラ以外の ものを搭載することが想定されておらず、緊急時モニタリングに適用するのであれば、PF2-AE Delivery などの他の機体の方が適している。MATRICE 300 では、搭載する検出器とバッテ リーの総重量が 300 g 程度であれば、緊急時モニタリングに活用することが可能である。 SOTEN に関しては、バッテリー容量が小さく飛行時間も少ないことから、緊急時モニタリン グに適用する場合、より小型の検出器の開発が必要となる。

原子力発電所事故に限らない複合災害発生時には、放射線検出器だけでなくカメラによる 機体周辺の状況把握が非常に有効である。しかし、カメラと放射線検出器の同時搭載は、ペイ ロードの観点から一部の回転翼機では限定される。また、機体に備えられているポートから放 射線検出器に電源供給可能な機体もあったが、一部の回転翼機では飛行のためのバッテリーを 放射線検出器に配分することになるため、飛行時間が短縮されてしまう。よって、モバイルバ ッテリーのような別系統の電源供給システムを用意する必要がある。FAZER R G2 や Penguin C のように、機体の通信機能を利用して放射線測定システムへデータを送受信できるように開 発された機体を除く、ほとんどの機体でデータ送受信が不可能であったことから、検出器単体 でシステムへデータ送受信できるような通信システムを別途開発しなければならない。併せて、 長距離通信機器を利用して、広範囲のモニタリングで得られるデータをリアルタイムで基地局 に転送することも検討が必要である。

国内のドローン企業の活動が目立ち始めた 2016 年 (平成 28 年)時点では、既に主力機 Phantomの第四世代機を送り出していた DJI 社製ドローンの飛行性能に対して、国産機が太刀 打ちできるものではなかった。しかし、近年は機体の技術開発が進むことで、無人航空機とし ての国産機の飛行性能は、外国産の機体と遜色がなくなってきた。以上の調査の結果から、国 内を代表するリーディングカンパニーとして国内初のレベル4(有人地帯の目視外飛行)対応機 の開発及び実証飛行等で実績を持つ ACSL 社製及び世界トップシェアでドローン業界のデファ クトスタンダードとなっている DJI 社の製品を選定した。DJI 社の米国市場シェアは一般向け で 7 割以上 ⁵⁴⁾と、ドローンを初めて操作する者でも利用しやすい製品を展開していることか ら、日本国内でも不自由なく機体の操縦できることが想定される。一方で、メーカーが中国企 業であり今後の政府方針によって調達に支障を来すリスクを抱えている ⁵⁵⁾ため、運用にあた り注視が必要である。

緊急時モニタリングに約2kgの放射線測定器を搭載可能なドローンとして、ACSL 社製 PF2 と DJI 社製 MATRICE 300 RTK (以下、M300) の2機種を選定した。選定した2機種について、 緊急時モニタリングに必要な項目をヒアリングした結果の一部を Table 7-2 に示す。PF2 は専 用コネクタからの電源供給が可能で、M300 は複数の USB-C ポートを備え、さまざまな機器に 柔軟に電力供給が可能である。ただし、通信機能については、どちらの機体も放射線測定デー タのリアルタイム送受信機能は標準装備していない。リアルタイムでのログ取得についても、 PF2 はリアルタイムログの取得が不可で、M300 も標準ではリアルタイムの取得は非対応だが、 飛行後にログの抽出が可能である。また、カメラと放射線検出器の同時搭載については、両機 体とも FPV カメラを機首に固定し、検出器を機体下部に設置することで実現可能である。長 距離通信機能に関しては、PF2 は標準機体での搭載が不可で、M300 の純正セルラー通信モジ ュールは日本国内では非対応である。PF2 には衝突防止機能を有さない従来モデルと、衝突防 止機能を有する後継機モデル PF2-AE がある。両機体は、縮尺や電源機構などの基本的な構造 が同一である。自動飛行試験を含む衝突防止機能以外の試験を PF2 の従来モデルで実施し、衝 突防止機能の試験のみ PF2-AE で実施した。選定した2機種の手動飛行試験及び自動飛行試験 について、それぞれ 8.2 節及び 8.3 節に述べる。

ごとの調査結果
へ航空機及び調査項目
Table 7-1 調査対象とした無人

-
ົ
5
÷

馬鹿 (1)         馬鹿 (1)         三葉 (1)         一葉 (1)         一述 (1)         一葉 (1)         一述 (1)         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1 <th>御 「 「</th> <th>項目</th> <th>Þ</th> <th></th> <th>後</th> <th></th> <th>/ \</th> <th>-</th>	御 「 「	項目	Þ		後		/ \	-
0         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)         (0)		恒代	K	E	K	K		A
1         敏速面         日本         中面         日本         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1	0	機種	PF2	MATRICE 300RTK	PF2-AE Delivery	PF2-AE Inspection	SOTEN(蒼天)	W
2         一般なの電頻         回転実機         回転実機         回転実機         回転実機         回転実備         回転実備         回転実備         回転実備         回転           3         ~<	-	製造国	日本	中国	日本	日本	日本	
3 $\mathfrak{w} \mathcal{A}$ $\Lambda \gamma \tau J - J$ $\Lambda \tau J -$	2	機体の種類	回転翼機	回転翼機	回転翼機	回転翼機	回転翼機	
4 $\ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ $	e	動力	バッテリー	バッテリー	バッテリー	バッテリー	バッテリー	14.
5 $\mathfrak{g}(\mathfrak{k} \mathbb{H}), \mathfrak{M}$ 1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1 <td>4</td> <td>ペイロード(kg)</td> <td>2.75</td> <td>2.7</td> <td>1.3</td> <td>2.7</td> <td>0.28</td> <td></td>	4	ペイロード(kg)	2.75	2.7	1.3	2.7	0.28	
6         手動飛行の可否         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1	5	最低運用人数	-1	1	1	1	1	
7 $l = m_{m} RH_{ID} cn d A$ $\eta$ <td>9</td> <td>手動飛行の可否</td> <td>피</td> <td>न्</td> <td>피</td> <td>피</td> <td>च</td> <td></td>	9	手動飛行の可否	피	न्	피	피	च	
8         巡航・最大飛行速度 (m/s)         10         13         10         15         10         15         10         15         13         23         29         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         4         6         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7         7	7	自動飛行の可否	미	쾨	피	미	쾨	
9	[∞]	巡航・最大飛行速度 (m/s)	10	23	10	10	15	2
10         航続可能距離通信距離((m))         4         8%         4         4         4         4         8           11         ホメパリングの可否         可         可         可         可         可         可         可         可         可         一         6           12         カメラでの映確認定の可否         可         可         可         可         可         可         可         一         可         一         一         一         一         1         1         一         1         一         1         一         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1	6	航続可能時間(最大)(分)	30	55	18	23	29	4
11         ホバリングの司否         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T <th< td=""><td>10</td><td>航続可能距離(通信距離) (km)</td><td>4</td><td>×80</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>õ</td></th<>	10	航続可能距離(通信距離) (km)	4	×80	4	4	4	õ
12         雨天時のフライトの可否         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         0         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1	11	ホバリングの可否	Ъ	미	Ш	च	쾨	]π.
13         カメラマの映像確認の可否         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         0         可         0         1         1         世         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1 <th1< th=""> <th1< th="">         1         &lt;</th1<></th1<>	12	雨天時のフライトの可否	Ъ	미	Ш	च	쾨	Π.
14         衝突防止の司否         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         T          T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T         T	13	カメラでの映像確認の可否	Ъ	쾨	Ш	可	쾨	]α.
15         機体口グのリアルタイム取得の可否         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10         10<	14	衝突防止の可否	可 ※※※	미	ц	च	쾨	]π.
16         機体口グのリアルタイム取得の仕様         基地局ソフトウェア上         基地局ソフト         での確認         での           21     22	15	機体ログのリアルタイム取得の可否	미	쾨	Ш	Ш	쾨	π΄
10         000000000000000000000000000000000000	1	☆休 □ グ ∩    マ    ク / ∫ 町 垣 小 H 桂	基地局ソフトウェア上	基地局ソフトウェア上	基地局ソフトウェア上	基地局ソフトウェア上	基地局ソフトウェア上	基地局ソフ
17         無線通信斯絶時の自動帰還         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         140         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100         100<	P T	滅谷日ノジンノンタイム共行シニュ	るの確認	での確認	での確認	での確認	での確認	らら
18         機算価格(機体一式) (万円)         350         150         150         350         140         140         10           19         一重産性         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         不可          四          23         機体から放射線検出器の同時搭載の可否         可         可         可         不可         不可         不可         不可          不可           23         機体から放射線検出器等への電源供給の可否	17	無線通信断絶時の自動帰還	म	म्	च	च	Ъ	[¤'
19         重産性         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         不可         他         不可         他         不可         他	18	概算価格(機体一式) (万円)	350	150	350	350	140	10
20         放射線検出器の搭載の可否         可         可         可         不可         元         元         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二         二	19	量産性	피	च	피	Ш	Ъ	[α.
21         放射線検出器を搭載するために必要な情報         機体下部の構造         機体下部の構造         機体下部の構造         機体上部の構造         機体上部の構造         機体上部の構造         機体上部の構造         機体上部の構造         機体上部の構造         機体上部の両指         機体上部         不可         可         不可         不可         不可         不可         不可         而           23         機体から放射線検出器等への電源供給の可否         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         元         不可         可         元         不可         可         元         不可         1         元          不可         1         元          1         元          1         元         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1	20	放射線検出器の搭載の可否	피	可	피	上山	不可	]α.
22         カメラと放射線検出器の同時搭載の可否         可         可         可         不可         不可         不可         不可         不可         不可         而           23         機体から放射線検出器等への電源供給の可否         可         可         可         可         可         可         可         不可         不可         可         元           23         機体から放射線検出器等への電源供給の可否         可         可         可         可         可         可         可         可         元          不可         不可         可         元          元           元            の総          の総          の総          の総          の総          の総          の総            の総                   ご                        ご         ご         ご         ご         ご          ご         ご         ご         ご         ご	21	放射線検出器を搭載するために必要な情報	機体下部の構造	機体下部の構造	機体下部の構造	機体下部の構造	機体上部の構造	機体上部
23 機体から放射線検出器等への電源供給の可否         可         可         可         可         可         不可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1 <th1< th="">         1         1         1<td>22</td><td>カメラと放射線検出器の同時搭載の可否</td><td>미</td><td>쾨</td><td>미</td><td>不可</td><td>不可</td><td>]α.</td></th1<>	22	カメラと放射線検出器の同時搭載の可否	미	쾨	미	不可	不可	]α.
24         機体から放射線検出器等への電源供給の仕様 複数の機体が一トから 複数の機体の 25         複数の機体ポートから 機体の通信機能を利用した         複数の機体ポートから の給電         複数の機体ポートから の給電         複数の機体ポートから 不可         複数の機体 不可         不可         本可         本可         本可         本可         本可         本         25         放射線測定システムへのデータ送受信の可否         不可         不可         不可         不可         不         26         長距離通信(セルラー通信等)搭載の可否         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         面         1         本         本         本         本         本         本         元         不         元         不         元         不         元         不         元         不         元         不         元         不         元         不         元         不         元         不         1         不         1         不         1         不         1         7         1         1         7         1         1         1         7         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1 <th1< th="">         1         <th1< t<="" td=""><td>23</td><td>機体から放射線検出器等への電源供給の可否</td><td>피</td><td>न्</td><td>피</td><td>미</td><td>不可</td><td>ιu</td></th1<></th1<>	23	機体から放射線検出器等への電源供給の可否	피	न्	피	미	不可	ιu
25         機体の通信機能を利用した         の約電         の約電         の約電         の約電         の約電         の約           25         放射線測定システムへのデータ送受信の可否         不可         不         26         長距離通信(セルラー通信等)搭載の可否         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         可         1          1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1         1	24	機体から放射線検出器等への電源供給の仕様	複数の機体ポートから	複数の機体ポートから	複数の機体ポートから	複数の機体ポートから	不可	複数の機体
25         機体の通信機能を利用した         不可         不可         不可         不可         不可         不可         不可         不可         不可         不         26         長距離通信(セルラー通信等)搭載の可否         可         可         可         可         可         可         下			の給電	の給電	の給電	の給電		% の
放射線測定システムへのデータ送受信の可否         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・         ・	25	機体の通信機能を利用した	不可	不可	不可	不可	不可	К
26 長距離通信(セルラー通信等)搭載の可否 可 可 可 可 可 可 可 可	2	放射線測定システムへのデータ送受信の可否	r		r	r	-	-
	26	長距離通信(セルラー通信等)搭載の可否	च	п	п	च	च	[π.

Table 7-1 調査対象とした無人航空機及び調査項目ごとの調査結果

(2/2)

				<u> </u>																											í.
	FIXAR 025	FIXAR025	ラトビア	垂直離着陸機	バッテリー	10	ę	不可	Ъ	23	210	$100^{**}$	下可	미	미	下可	च	基地局ソフトウェア上	での確認	미	3000	不可	不可	機体内部の構造	下可	下可	不可	王正	۲ <u>سر</u> ار	Ъ	
	X	PenguinC VTOL	ラトビア	垂直離着陸機	ガンリン	4.5	2	不可	미	33	720	180**	不可	Ъ	미	下可	Ē	基地局ソフトウェア上	るの確認	Ъ	15000	Ъ	Ъ	機体内部の構造	Ъ	쾨	機体ポートからの給電	Ē	Ē	Ъ	
機体	a de la constante de la consta	Penguin C	ラトビア	固定翼機	ガソリン	Q	2	不可	미	22	1320	100	不可	미	미	下可	미	基地局ソフトウェア上	での確認	쾨	15000	म	미	機体内部の構造	미	쾨	機体ポートからの給電	ы	2	Ъ	
		FAZER G2	日本	回転翼機	ガンリン	33	2	미	미	20	100	100**	미	미	미	下可	미	基地局ソフトウェア上	での確認	미	8000	Ъ	म	機体下部の構造	Ъ	Ъ	機体ポートからの給電	티	ĩ	Ъ	
		ATLAS PRO	ラトビア	回転翼機	バッテリー	0.315	1	쾨	쾨	15.5	32	10	쾨	Ъ	쾨	미	피	基地局ソフトウェア上	での確認	쾨	600	可	不可	機体上部の構造	不可	不可	不可	포피	[]	不可	多絲繰
項目	百中	機種	製造国	機体の種類	動力	ペイロード(kg)	最低運用人数	手動飛行の可否	自動飛行の可否	巡航・最大飛行速度 (m/s)	航続可能時間(最大)(分)	航続可能距離(通信距離) (km)	ホバリングの可否	雨天時のフライトの可否	カメラでの映像確認の可否	衝突防止の可否	機体ログのリアルタイム取得の可否		该子コンジンンマンユスサントシュ	無線通信断絶時の自動帰還	概算価格(機体一式)(万円)	量産性	放射線検出器の搭載の可否	放射線検出器を搭載するために必要な情報	カメラと放射線検出器の同時搭載の可否	幾体から放射線検出器等への電源供給の可否	幾体から放射線検出器等への電源供給の仕様	機体の通信機能を利用した	牧射線測定システムへのデータ送受信の可否	長距離通信(セルラー通信等)搭載の可否	本仕様、※※: 衛星を使用した場合、※※※: 6
海小		0		2	m	4	ъ	9	2	∞	6	10	11	12	13	14	15	15	D T	17	18	19	20	21	22	23	24	<u></u> 2	2	26	Ш ::



Fig. 7-1 無人航空機の調査結果

(1/2)



Fig. 7-1 無人航空機の調査結果

(2/2)

ヒアリング項目	PF2	M300
機体から放射線検出 器等への電源供給の 可否とその仕様	下 部 ボ ッ ク ス 内 に て 12V/5/3.3V 合計 2 A の出力が利用可能 JST-GH コネクタ 2 ピン (コネクタ仕様 1 A)	<ul> <li>PSDK ポート 3 ヶ所 (上部左側、 下部両側): 13.6 Vまたは 17.0 V,</li> <li>4A, USB タイプ C 形状コネクタ</li> <li>OSDK ポート 1 ヶ所 (上部右 側): 24.0 V,4 A,USB タイプ C 形</li> <li>状コネクタ</li> </ul>
機体の通信機能を 利用した放射線測定 システムへのデータ 送受信の可否	不可	標準機能では不可
機体ログのリアル タイム取得の可否と その仕様	再利用可能な形かつリアル タイムは不可 事後に受信データのログを 取得可	標準仕様では非対応 飛行後のログ抽出は可
カメラと放射線検出 器の同時搭載の可否	<ul> <li>FPV*カメラ:機首方向に固定</li> <li>検出器:FPVカメラプレー</li> <li>ト直下に固定</li> <li>上記の場合は可</li> </ul>	FPV カメラ:機首方向に固定(標 準搭載) 検出器:機体下部に固定 上記の場合は可
長距離通信機器 (セルラー通信等) 搭載の可否	標準機体では不可	純正セルラー通信モジュールは 日本国内で非対応

Table 7-2 PF2 及び M300 に関する詳細なヒアリング結果

※: First Person View:機体に搭載されたカメラからの一人称視点の視界のこと。

7.1.2. 無人航空機を飛行させるための手続きの調査

ドローン等の無人航空機を飛行する場合の法律、制度、飛行させるための免許等の手続き について調査した。無人航空機の飛行を実施するための流れは、概ね次の通りである。

(1)機体登録の申請

(2)機体認証・技能証明の取得

(3) 飛行許可・承認の申請

(4) 飛行計画の通報

(5) 飛行日誌の記載

各項目について、以下に詳述する。

(1) 機体登録の申請

新規に購入した無人航空機の重量が 100 g 以上の場合、登録が必要となる ⁵⁶)。緊急時モ ニタリングには放射線検出器の搭載が必須であり、必然的に機体重量は 100 g を超えるこ とから登録申請手続が必要になる。2024 年 (令和 6 年) 3 月現在では、登録申請には登録情 報を電波にて周囲に発信するリモート ID 機能の装備が義務付けられており、機体に内蔵 されていない機種については外付けリモート ID 発信機を装備する必要がある。以下にそ の登録手順を説明する。

- (1)-1 ドローン情報基盤システム Drone/UAS Information Platform System (以下、DIPS) 2.0
   にアカウントを作成する。
- (1)-2 DIPS 上から登録する無人航空機の諸情報を入力する。
- (1)-3登録費用を支払う。
- (1)-4 DIPS アカウント上に認可された機体記号が発給される。
- (1)-5機体記号を機体表面に表記する。
- (1)-6 リモート ID 機能に発給された機体記号を紐付けする。
- (2) 機体認証・技能証明の取得

緊急時に、立ち入り管理が現実的でない都市部の人口集中地区がモニタリング対象となる事態がありうる。2024年(令和6年)3月現在の航空法においては、有人地帯での目視外飛行となるカテゴリーIII・レベル4飛行を実施する場合に限り、第一種機体(型式)認証及び一等操縦技能証明の取得が必要となる⁵⁶⁾。しかし、同年3月時点で、日本国内で第一種認証機体はASCL社のPF2-CAT3に限定されている⁵⁷⁾。この機体はペイロードが1.0 kgであり、今回搭載する放射線検出器(2 kg)を下回るため、現状第一種認証機体を用いた緊急時モニタリングの対応は困難である。なお、住民が避難したことで無人となった地帯等での飛行であれば、カテゴリーII・レベル3飛行となるため、未認証機体及び技能証明のない操縦者でも運用に支障はない。

(3) 飛行許可・承認の申請

2024年(令和6年)3月現在の航空法において、以下4種類の飛行空域及び6種類の飛行 方法については特定飛行と定義され、国土交通大臣による飛行の許可及び承認が必要となる⁵⁶⁾。

- (3)-1 飛行する空域
- ・空港等の周辺
- ・対地高度150m以上の上空
- ・人口集中地区の上空
- ·緊急用務空域

(3)-2 飛行の方法

・夜間での飛行

- ・目視外での飛行
- ・人又は物件と距離を確保できない飛行
- ・催し場所上空での飛行
- ・危険物の輸送
- ・物件の投下

上記の内、人口集中地区の上空、夜間での飛行、目視外での飛行及び人または物件と距離を確保できない飛行については、包括申請として事前に年間の許可・承認を得ておくことが可能である (カテゴリーIII・レベル4飛行を除く)。この場合でも、個別飛行ごとの申請に準じた安全対策 (飛行エリアの立ち入り管理や補助者の配置等)が都度行われていることが前提となる。また、これら4項目以外の特定飛行については、包括申請ができず、飛行範囲及び時間を明示した上で飛行ごとの個別申請が必要となる。

(4) 飛行計画の通報

ドローンの特定飛行を行う場合には、事前に飛行範囲と時間を DIPS 上で通報すること が義務付けられている。(3)での飛行申請とは別個の物であり、申請に対する許可・承認を 得ただけでは飛行計画の通報とは見做されないことに注意が必要である ⁵⁶⁾。また、特定飛 行に該当しない飛行に関しても、飛行前に通報を行うことが推奨される。

(5) 飛行日誌の記載

ドローンの特定飛行を行う前後には、航空局によって定められた飛行日誌の作成が義務 付けられている⁵⁶⁾。飛行日誌は飛行記録、日常点検記録及び点検整備記録から成る。飛行 記録は飛行した日時や場所、操縦者等を記録した物であり、主として飛行時間管理のため の記録である。日常点検記録は飛行直前及び直後の機体点検の内容を記録するものであり、 航空局の参考要領ないし製造者の取扱説明書等に準じた項目の点検を実施し記録する。点 検整備記録は上記に加えて改造及び整備の内容(部品を交換した場合にあっては、当該交 換部品名を含む)を記載することが求められており、改造及び整備を実施した場合又は概 ね20飛行時間ごとに作成することが定められている。なお、特定飛行に該当しない飛行に 関しても飛行日誌の作成は推奨される。

7.2. 機体の展開性能の確認

緊急時モニタリングを迅速に実施するために、ドローン機体の展開と検出器の搭載時間を 把握する必要がある。機体展開及び検出器の搭載時間を計測した (Table 7-3)。PF2 の長所は、 標準ケースで検出器を搭載したまま輸送可能であり、飛行までに必要な時間から放射線検出器 の搭載時間を除くことができる点である。PF2 の短所としては、機体の折り畳みができないた め、輸送車両の大半のスペースを占有してしまう点が挙げられる (Fig. 7-2)。一方、M300 の長 所は、機体を折り畳むことが可能で、輸送車両のスペースをあまり占有しない点が挙げられる (Fig. 7-3)。M300 の短所としては、標準ケースから展開後、放射線検出器の搭載作業が必要な 点が挙げられる。しかしながら、M300 の展開及び放射線検出器の搭載作業に掛かる合計時間 はPF2 の飛行準備完了までの所要時間と大差なく、機体を折り畳まずに車両に搭載するのであ れば、機体展開から離陸までの時間はPF2 よりも短い。

上記の展開性能の確認の結果、両機体の構造に大きな違いがあった。PF2 が採用するバラン ス充電コネクタ付きのフライトバッテリーは、一般的なドローンと同様に、ラジコンホビー用 途として想定されている。そのため耐久性にやや劣っており、機体を取り扱う際に破損しない よう注意が必要であった。一方、M300 のバッテリーはカートリッジ化されており、機体及び 充電器との接続が簡便で、電圧や温度も自己管理するスマートバッテリーを採用している。 PF2 に比べ M300 の方が現場での運用面で勝ることが、操縦者及び補助者の官能調査で分かっ た。また、自動飛行試験に先立って、両機体に放射線検出器の搭載が可能であることも確認し た (Fig. 7-4 及び Fig. 7-5)。自動飛行試験では、Fig. 5-2 (d) に示したプラスチックシンチレータ と BGO から構成される放射線検出器 (以下、ホスウィッチ型検出器)を搭載した。全ての必要 機材を展開し、ホスウィッチ型検出器を搭載して離陸可能な状態になった両機体の外観は Fig. 7-6 及び Fig. 7-7 に示す通りである。

実施項目	PF2	M300
機体展開時間	約10分+検出器立上10分	約3分+検出器立上10分
検出器搭載時間	約13分	約8分

Table 7-3 輸送後の機体展開及び検出器搭載に要した時間



Fig. 7-2 PF2 の輸送コンテナ収納状況



Fig. 7-3 M300 の標準ケース収納状況 (左:メイン収納部、右:上蓋収納部)



Fig. 7-4 PF2 へのホスウィッチ型検出器の搭載状況 (図中で黒い丸で囲んだ部分がホスウィッチ型検出器である。)



Fig. 7-5 M300 へのホスウィッチ型検出器の搭載状況 (図中で黒い丸で囲んだ部分がホスウィッチ型検出器である。)



Fig. 7-6 展開後の写真 (PF2)



Fig. 7-7 展開後の写真 (M300)
## 7.3. 飛行試験の事前準備

7.3.1. 飛行試験の概要と目的

本飛行試験は、緊急時の放射線モニタリングに向けた、ドローンの基礎性能、操作性及び 計測精度の評価を行うことを目的としている。手動飛行試験と自動飛行試験の二つを軸に試験 を実施し、機体の性能評価を行った。手動飛行試験では、安定した水平飛行や旋回操作、昇降 動作の他、構造物回避のための複合的な飛行操作を試み、各操作が意図通りに実行可能かを確 認した。また、安定した通信性能や障害物検知による自動減速・停止といった衝突防止機能の 作動も検証した。一方で自動飛行試験では、事前に策定した飛行プラン (対地高度、測線間隔、 速度など)に従ってドローンが正確な自動飛行を行い、緊急時に迅速かつ確実なモニタリング が実施可能かを確認した。

7.3.2. 事前準備

飛行試験の項目として、ドローンが緊急時の放射線モニタリングで安定した飛行操作とデ ータ取得が可能かを検証するための項目を設定し、以下の準備を行った。なお、これらの試験 には福島 RTF を利用した。試験内容及び福島 RTF の利用状況を考慮して、使用エリアは「瓦 礫・土砂崩落フィールド」(Fig. 7-8)を基本とし、機体の衝突防止機能試験については屋内試 験場 (Fig. 7-9)も利用した。なお、福島 RTF 一帯はドローン等の無人航空機の飛行の許可が必 要となる空域ではなく、当該施設内での昼間・目視内飛行であるため、飛行承認の取得は不要 であった。試験実施前には、瓦礫・土砂崩落フィールドの下見及びリスクアセスメントを行い、 安全に飛行試験を実施可能であることを確認し、リスクアセスメントの内容をワークシートに まとめた。

今回の試験に向けて選定した2機種 (PF2及びM300)の内、PF2については飛行試験に先立ち、基本的な操作方法の訓練を福島県南相馬市の真野交流センター (Fig. 7-10)で実施した。なお、同センターも福島RTFと同様に飛行承認の必要がない飛行エリアである。PF2の操作訓練の内容はTable 7-4 に示す。



Fig. 7-8 飛行性能試験に使用した場所 (福島 RTF 瓦礫・土砂崩落フィールド) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan)を使用。)



 Fig. 7-9 衝突防止機能試験に使用した場所 (福島 RTF 屋内試験場)

 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 7-10 PF2 の取り扱い慣熟のための訓練に使用した場所 (真野交流センター) (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

Table 7-4 PF2 の操作訓練の内容

日付	操作訓練の内容	
2023/12/11 (月)	実機を使用しての取り扱い確認、手動・自動操縦での訓練飛行	
2023/12/12 (火)	強風により実機飛行は中止、自動飛行プラン作成等の演習	

7.4. 手動飛行試験の実施

7.4.1. 飛行試験の内容及び評価結果

福島 RTF 内の瓦礫・土砂フィールドにおいて PF2 及び M300 の基礎飛行性能の評価試験 (衝 突防止機能を除く)を行った。衝突防止機能の試験は、同施設内の屋内試験場にて実施した。 試験の内容は Table 7-5 に示す。以下、両機体の飛行性能及び衝突防止機能の評価結果につい て述べる。

Table 7-5 飛行試験の内容

日付	実施内容
2023/12/13(水)	強風により飛行は中止、PF2の展開性能試験等を実施
2023/12/14(木)	PF2及び M300の自動・測定飛行及び地上測定を実施
2023/12/15(金)	強風により飛行は中止、M300の展開性能試験等を実施
2023/12/18(月)	M300の手動飛行を実施
2023/12/20(水)	PF2の手動飛行を実施
2024/02/14(水)	PF2-AE にて衝突防止機能の試験を実施

(1) 手動での基本水平飛行

手動飛行でドローンによる放射線モニタリングを行う際の基本動作では、対地高度を一定 とし機体を水平及び斜め方向に飛行させる(これを「基本水平飛行」という。)。基本水平飛 行において、離陸後対地高度を 3.0 m に保ちエレベーター及びエルロンの操作により水平移動 する性能を試験した。始めに、前後左右の移動 (Fig. 7-11) 及び斜め移動を実施した (Fig. 7-12)。 飛行ログから抽出した PF 及び M300 の基本水平飛行中の対地高度変化を Fig. 7-13 及び Fig. 7-14にそれぞれ示す。両機体とも水平移動中に高度を一定に保ち、急激な高度の変化はなかっ た。Table 7-6 に示す水平移動中の位置精度については、同表に記載した M300 の仕様で保証さ れたホバリング位置精度内に収まることを確認した。なお、M300のメーカーである DJI 社の 公称値は、GPS を有効にして、ビジョンポジショニングシステム*³を無効にした場合の値であ る。前後左右移動した場合に比べ、斜め移動した方が対地高度の標準偏差が大きくなった。ド ローンを送信機で操作する際には、スティック・モードが2種類あり、国産のドローンではス ティック・モード1での操縦が主流である。スティック・モード1での操縦では、操縦機の左 と右の2本のスティックを同時操作して斜め移動を実現するため、僅かな入力のズレが対地高 度方向の操舵指示として現れた可能性がある。しかし、実用上問題のない誤差範囲であり、熟 練した操縦者の官能評価結果として、PF2、M300ともに送信機の操舵量と機体の移動量は概 ね意図した通りの動作であった。

^{*&}lt;sup>3</sup> 赤外線センターと画像カメラを使い、GPS 測位データが利用できない状況下でも DJI 社の機体の水平・垂直位置を維持する機能。





Fig. 7-13 PF2 の水平飛行中の経過時間に対する対地高度の変化



Fig. 7-14 M300の水平飛行中の経過時間に対する対地高度の変化

飛行項目	平均值 ± 標準偏差		
機体	PF2	M300	
水平飛行 (前後左右移動) (m)	$3.20\pm0.015$	$2.99\pm0.013$	
水平飛行 (斜め移動) (m)	$3.16\pm0.031$	$3.01\pm0.042$	
水平飛行精度のメーカー公称値	制测试 105	急测法 15	
(ホバリング時)(m)	計例但 ± 0.5	司 (則)但 ± 1.3	

Table 7-6 基本水平飛行中の対地高度変化

(2) 手動での基本旋回飛行

手動飛行でドローンによる放射線モニタリングを行う際に、異なる方向へ機体の進行方向 を変更したうえで、高度を一定で飛行させる飛行方法がある(これを「基本旋回飛行」という。 Fig. 7-15 参照)。基本旋回飛行においては、離陸後対地高度を3.0 mに保ち、ラダー操作により その場で機首方位を変化させる性能について試験した。飛行ログから抽出した基本旋回飛行中 の高度変化と測定地点からの距離を Fig. 7-16 及び Fig. 7-17 に示す。両機体とも基本旋回飛行 中に高度と水平位置を一定に保てており、急激な変化がないことが分かる。Table 7-7 に示す 基本旋回飛行中の高度の精度は、仕様上保証されたホバリング位置精度内に収まることが確認 できた。これは無風状態でホバリングしたときに対する精度であるため、飛行方法により当該 基準を超える可能性もあるが、水平方向の精度についても、Table 7-8 に示すように仕様上保 証されたホバリング位置精度内に収まった。熟練した操縦者の官能評価結果として、PF2、 M300 共に送信機の操舵量と機体の移動量は概ね意図した通りの動作であった。



Fig. 7-15 基本旋回飛行のイメージ



Fig. 7-16 PF2 の基本旋回飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの 距離の変化



Fig. 7-17 M300の基本旋回飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの 距離の変化

飛行項目	平均值 ± 標準偏差		
機体	PF2	M300	
基本旋回飛行 (m)	$2.99\pm0.065$	$2.98\pm0.027$	
ホバリング精度のメーカー 公称値 (m)	計測值±0.5	計測值 ± 1.5	

Table 7-7 基本旋回飛行中の対地高度変化

Table 7-8 基本旋回飛行中の水平変化

飛行項目	平均值 ± 標準偏差		
機体	PF2	M300	
基本旋回飛行 (m)	$0.242\pm0.152$	$0.195\pm0.109$	
ホバリング精度のメーカー 公称値 (m)	計測值 ± 0.5	計測値 ± 0.5	

(3) 手動での基本昇降飛行

ドローンで空気減弱係数を取得するためには、ある地点でホバリングさせる必要がある(これを「基本昇降飛行」という。)。基本昇降飛行においては、離陸後高度3.0 mからスロットル 操作によりその場で高度を10.0 mまで変化させる性能を試験した(Fig. 7-18)。飛行ログから抽 出した PF2 及び M300 の昇降飛行中の高度変化と測定地点からの距離を Fig. 7-19 及び Fig. 7-20 にそれぞれ示す。両機体とも昇降飛行中に水平位置を一定に保ち、急激な変化がないことが分 かる。Table 7-9 に示した昇降飛行中の水平位置の精度は、両機体ともメーカー公称値の範囲 に収まった。送信機スティック・モード1での操縦では高度と左右移動が同じスティック操作 に割り振られている。M300 の方が PF2 に比べて標準偏差が大きくなったのは、送信機スティ ック・モード1で操縦した際に、僅かな入力のズレが左右方向の操舵指示として現れた可能性 がある。しかし、実用上問題のない誤差範囲の偏差であり、操縦者の官能評価結果として、 PF2、M300 共に送信機の操舵量と機体の移動量は概ね意図した通りの動作であった。



Fig. 7-18 基本昇降飛行のイメージ



Fig. 7-19 PF2 の基本昇降飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの 距離の変化



Fig. 7-20 M300の基本昇降飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの 距離の変化

飛行項目	平均值 ± 標準偏差		
機体	PF2	M300	
旋回飛行 (m)	$0.0953 \pm 0.0620$	$0.349\pm0.180$	
ホバリング精度のメーカー 公称値 (m)	計測值 ± 0.5	計測值 ± 0.5	

Table 7-9 基本昇降飛行中の水平変化

(4) 手動での組み合わせ飛行1(8の字)

手動飛行でドローンによる放射線モニタリングを行う際に、構造物を避けて飛行するため に、対地高度を一定に保ちつつ機体を8の字に旋回させる場合もある(以下これを「組み合わ せ飛行1(8の字)」という。)。組み合わせ飛行1(8の字)においては、離陸後高度を3.0 mに 保ちエレベーター、エルロン及びラダーの操作により水平移動する性能を試験した(Fig. 7-21)。 飛行ログから抽出した PF2及び M300の組み合わせ飛行1(8の字)中の高度変化を Fig. 7-22及 び Fig. 7-23に示す。両機体とも組み合わせ飛行1(8の字)中に高度を一定に保ち、急激な高度 の変化がないことが分かる。Table 7-10に示す組み合わせ飛行1(8の字)中の高度の位置精度 は、両機体ともM300が仕様上保証されたホバリング位置精度内に収まった。PF2の方がM300 に比べて標準偏差は大きくなったが、8の字飛行は全ての舵を連続的に使用する高度な飛行で あり、今回の結果が機体ごとの性能差によるものとまではいえず、両者の高度変化は誤差の範 囲内で同程度と考えられる。熟練した操縦者の官能評価結果としては、PF2、M300 共に送信 機の操舵量と機体の移動量は概ね意図した通りの動作であった。



Fig. 7-21 組み合わせ飛行1(8の字)のイメージ



Fig. 7-22 PF2 の組み合わせ飛行1(8の字)中の経過時間に対する対地高度の変化



Fig. 7-23 M300 の組み合わせ飛行1(8の字)中の経過時間に対する対地高度の変化

飛行項目	平均值 ± 標準偏差		
機体	PF2	M300	
旋回飛行 (m)	$3.14\pm0.172$	$3.02\pm0.0456$	
ホバリング精度のメーカー 公称値 (m)	計測值 ± 0.5	計測值 ± 1.5	

Table 7-10 組み合わせ飛行 1 (8 の字) 中の高度変化

## (5) 手動での組み合わせ飛行2

手動飛行でドローンによる放射線モニタリングを行う際に、構造物などを避けて飛行する ために、対地高度を変化させて飛行する場合もある(以下これを「組み合わせ飛行 2」とい う。)。組み合わせ飛行2においては、構造物を避けると想定し離陸後高度を3.0 mから10.0 m まで水平移動を伴いながら変移させ、エレベーター、エルロン及びスロットルの操作により水 平・昇降移動する性能を試験した(Fig. 7-24~Fig. 7-26)。Table 7-11に示した組み合わせ飛行2 中の左右方向の位置精度から、PF2に対して M300の標準偏差が大きかった。飛行ログから抽 出した組み合わせ飛行2中の PF2及び M300の飛行軌跡を Fig. 7-27及び Fig. 7-28 にそれぞれ 示す。PF2 は直線的に飛行できているが、M300 は曲線で飛行している。これは、機体の性能 ではなく、操縦者が飛行中に方向転換する操作をしてしまったためと推察される。

操縦者の官能評価結果として、PF2 については水平方向と上下方向の操舵量を同量として操 舵したところ、概ね意図した機体移動量であった。M300 については水平方向と上下方向の操 舵量を同量として操舵したところ、上下方向の機体移動量が若干少なかった。具体的には、水 平方向の始点から中間地点(始点から 10.0 m) への移動において、始点高度 3.0 m から中間地点 高度 10.0 m を目標に上昇を目指すところ、同目標高度に達する前に水平方向の中間地点に達 した。同様に、水平方向の中間地点(始点から 10.0 m)から終点(始点から 20.0 m)への移動に おいて、中間地点高度 10.0 m から終点高度 3.0 m を目標に下降を目指すところ、同目標高度に 達する前に水平方向の終点に達した。これは、M300 標準のスロットル・スティック・エクス ポネンシャル設定*4が PF2 と異なる設定であるためと考えられる。高度保持制御が一般的なド ローンにおいて、上昇及び降下を細かく操作することは考え難く、むしろ意図しない高度変化 を招く恐れがあることから、このような設定がなされているものと考えられる。これらの設定 は、操縦意図に応じて任意に変更することが可能である。

^{*4} スティック中央位置付近での操作感度を意図的に鈍くすることにより、必要以上に敏感な操作が舵に反映されることを防ぐ機能。



Fig. 7-25 PF2 の組み合わせ飛行 2 中の経過時間に対する対地高度の変化



Fig. 7-26 M300の組み合わせ飛行2中の経過時間に対する対地高度の変化

飛行項目	平均值 ± 標準偏差		
機体	PF2	M300	
組み合わせ飛行 2 (m)	$0.116\pm0.008$	$0.569\pm0.570$	

Table 7-11 組み合わせ飛行 2 中の水平変化



Fig. 7-27 PF2 の組み合わせ飛行 2 のイメージ

(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 7-28 M300 の組み合わせ飛行 2 のイメージ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ( (c) Esri Japan) を使用。)

(6) 通信性能の確認

ドローンを飛行させる際に基地局と機体の通信は、自動と手動飛行問わず、安定な飛行を 実現する上で注視すべき項目である。PF2 においては機体と基地局 PC との通信に瞬間的な断 絶が起こり、PC 側で収集する飛行ログが間欠する事象が見られた。PF2 側の操縦装置が手動 制御と自動制御、機体情報監視で独立しており、機体情報監視を担う基地局 PC 側の通信信頼 性が低いことに起因すると考えられる(Fig. 7-29)。一方、M300の試験飛行中は、機体と送信機 との通信が途切れる等して飛行操縦に影響が出る事態は起こらなかった。



Fig. 7-29 操縦位置と通信の構成 (左: PF2、右: M300)

(7) 衝突防止機能の確認

自動または手動飛行を問わず、ドローンの障害物への衝突防止機能は、安定な飛行を実現 する上で注視すべき項目である。衝突防止機能とは、ドローンが障害物を検知して安全に飛行 するために、赤外線や LiDAR (光検知と測距) センサー等を使用して、周囲の距離をリアルタ イムで計測し、設定距離に障害物がある場合には警告を発したり、機体を自動的に減速または 停止させたりする機能である。この機能により、ドローンは障害物との衝突リスクを低減し、 安定した飛行を実現することが可能になる。

屋内試験場にて壁面から 5.0 m、10.0 m 及び 15.0 m に基準点を設定し、機体の衝突防止機能 の設定距離に対して、正しく機体が反応するかの試験を実施した。試験項目について、送信機 の表示等により障害物の検知警告が発せられることを確認した。PF2 については、警告と制動 の指標となる赤外線センサーの測距距離が送信機の画面に表示されることを確認した。GNSS 電波が受信できない環境下であっても、任意の距離設定において、警告と制動のステータスが 画面上で随時変化し、衝突防止機能の正常動作が確認された。M300 については、GNSS 電波 が受信できない環境下であっても、自動制動を含む衝突防止機能が完全に作動し、衝突防止機 能の発動が確認された。M300 は検知した障害物との距離を表示しない仕様であるため、警告 と制動の発動地点で、機体装備の赤外線レーザー測距計にて壁面との距離を計測し記録した。 衝突防止機能の試験結果を Table 7-12 にまとめた。また、本結果を散布図として示す(Fig. 7-30)。PF2 の方が M300 に比べて、設定した距離に近い位置で警報が鳴動した。PF2 の機体上 部に搭載された1つのセンサーは、LiDAR を用いており360°方向の距離を計測している。一 方、M300 は 4 つのビジョンセンサーと赤外線検知システムによって、特定方向の距離を計測 している。これら搭載したセンサーの性能と方向特性の違いが、警報距離に影響を与えたと考 えられる。これらの試験結果から、予め飛行計画の立案が必要な自動飛行においては、これら の警報及び制動距離を考慮したうえで、予定エリア内の構造物に反応しないようにルートを策 定する必要がある。また、緊急時に事前の飛行計画立案が難しいエリアで手動飛行によりモニ タリングをする場合でも、これらの衝突防止機能により安定した機体の制御が可能である。

Table 7-12	衝突防止機能の確認結果
------------	-------------

	飛行	藝告	制動			
( ( ( ( ( ( ( ) ( ) ( ( ) ( ()) ( ()) ( ()) ( ()) ( ()) ( ()) ( ()) ( ()) ( ()) ( ()) ( ()) ()) ( ()) ()) ( ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ()) ())())	高度	距離	距離	PF2 の結果	M300の結果	備考
力回	(m)	(m)	(m)			
前方	3.0	15.0	10.0	未実施	15.0 m で警告 11.7 m で制動	<ul><li>PF2は未実施</li><li>(10 m が機体の制動距離</li><li>の性能限界のため)</li></ul>
前方	3.0	12.5	10.0	未実施	14.0 m で警告 12.5 m で制動	PF2 は未実施 (10 m が機体の制動距離 の性能限界のため)
前方	3.0	10.0	10.0	未実施	12.4 m で警告 12.4 m で制動	
前方	3.0	10.0	7.5	未実施	12.0 m で警告 9.5 m で制動	
前方	3.0	10.0	5.0	9.9 m で警告 制動未実施	11.6 m で警告 7.3 m で制動	
前方	3.0	7.5	5.0	7.4 m で警告 制動未実施	9.2 m で警告 7.1 m で制動	
前方	3.0	5.0	5.0	警告反応飛越え 4.9 m で制動	7.1 m で警告 7.1 m で制動	
前方	8.0	5.0	5.0	警告反応飛越え 4.9 m で制動	6.6 m で警告 5.7 m で制動	
右方	3.0	10.0	5.0	9.9 m で警告 制動未実施	11.5 m で警告 制動未実施	
右方	3.0	7.5	5.0	7.5 m で警告 制動未実施	9.0 m で警告 制動未実施	
右方	3.0	5.0	5.0	警告反応飛越え 5.0 m で制動	6.9 m で警告 6.9 m で制動	



Fig. 7-30 衝突防止機能試験の結果

7.5. 自動飛行試験の実施

7.5.1. 試験内容

福島 RTF 内の瓦礫・土砂フィールドにおいて、PF2 と M300 を用いた自動飛行試験を実施した。基礎飛行性能の評価に加え、電波遮断に基地局への自動帰還か確実に行われるかどうかを確認するためのフェイルセーフ機能(自動帰還機能)の試験を行った。また、緊急時モニタリング時に取得する放射線計数率を、地表面から1mの高さの空間線量率に換算するためのパラメータを取得するため、福島 RTF 内にてキャリブレーションフライトを実施した。自動帰還機能の確認及びキャリブレーション結果について以下に述べる。

7.5.2. 自動帰還の機能の確認

ドローンの自動飛行により放射線モニタリングを行う際、予期せぬ電波遮断等の不測の事 態に対応するために、基地局への自動帰還機能が必要となる。自動飛行試験の実施にあたり、 安全を確保した状態で意図的に送信機の電源を切断し、フェイルセーフ機能である RTH*5が正 常に作動するかを検証した。PF2 は通常、電波途絶後も自動航行を継続する設定だが、今回の 試験ではメーカーにより特別に RTH 設定が施された。一方、M300 は電波遮断時の対応をとし て、「ホバリング」「着陸」「Return To Home (基地局帰還)」のいずれかをユーザー側で設定 できる。Fig. 7-31 及び Fig. 7-32 に示すように、PF2 及び M300 の両機体について送信機画面上 で RTH が発動し、設定通りに自動帰還が確認された。また、機体メーカーの非純正ペイロー

^{*5} Return to Homeの略。事前に設定を行うことで、電波途絶等の緊急時に機体が離着陸地点まで自動で帰還する機能。

ドである放射線検出器の搭載による飛行への影響は、両機種ともに重量増による順当なバッテ リー消費の増加程度であり、空力等の飛行特性への有意な影響は見られなかった。



## Fig. 7-31 電波途絶時の PF2 の送信機上のコマンド画面

(電波遮断時、白い丸で示した「飛行計画転送」が行われ、予定飛行を中止し基地局への帰還 命令が自動転送されている。)

### JAEA-Technology 2024-022

く 下方センサーがブロックされてい	<b>※</b> フライトコントローラー設定	×
A 5	④ 距離制限	•
42	センサーの状態	>
	信号ロストアクション	ホバリング
		着陸 eturn To Home
		ッドなして設固方向
信号口)	ストアクション	ホバリング へ
重心自動	動キャリブレーション	着陸
より重い を確保す は機体の	ヽペイロードが機体に取り付けられると、 ⁻るにはキャリプレーションが必要となり りホバリング時に始まります。	重在 Return To Home
釣り合い	い旋回	

Fig. 7-32 電波途絶時の M300 の送信機上のコマンド画面

(拡大図にて「信号ロストアクション」として「Return To Home」を選択することが可能であることを示している。)

7.5.3. 緊急時モニタリングを想定した自動飛行試験

(1)キャリブレーションフライト

上空で得られる計数率データを地表面から1mの高さに換算し、空間線量率を算出するため に必要なパラメータの取得を目的として、福島 RTF内のキャリブレーションポイントで M300 によるキャリブレーションフライトを実施した。M300 には検出器としてホスウィッチ型検出 器を搭載し空気減弱係数 *AF* (m⁻¹) と空間線量率換算係数 *CD* ([s⁻¹]/[µSv/h]) の算出を行った。 キャリブレーションフライトは、以下の条件でホバリングさせて実施した。

対地高度: 20m、30m、40m、60m、80m、100m、120m及び140m

測定時間:各高度で30秒

また、空間線量率換算係数 CD の算出のため、キャリブレーションポイントにおいて、 KURAMA-II⁵⁸⁾による歩行モニタリングを以下の条件で実施し、地表面から1 m の高さの空間 線量率 (μSv/h)を測定した。

• 測定範囲:キャリブレーションポイントを中心とした半径 50 m 円内

• 測定ポイント:25 点

空間線量率換算係数の算出に用いる歩行モニタリングの代表値を求める方法は以下の通り とした。

・キャリブレーションポイントを中心とした半径 50 m 円内に収まる測定データを集計する。

- •基準地域メッシュ (1 km 区画) をベースに、20 m 区画となるよう独自に分割したメッシュ ごとに測定データの平均値を算出する。
- •各メッシュ内の歩行モニタリング値を平均化する。

以上のデータを用いて、空気減弱係数 AF 及び空間線量率換算係数 CD を算出した。以下に、 算出方法の具体的な方法を示す。

歩行モニタリングの結果を Fig. 7-33 に示す。空間線量率が 0.1 μSv/h 以下の場所が多く、空 間線量率の分布は概ね均一であった。歩行モニタリングの代表値として 0.058 μSv/h と求めら れた。キャリブレーションフライトで得られた対地高度と計数率の関係は Fig. 7-34 のように なった。本図に示した実線は Microsoft Excel[®]の指数近似機能に基づく近似曲線である。対地 高度の増加に伴い計数率は指数関数的に減衰したが、対地高度 40 m においてのみ高い計数率 を示しており(赤丸点)、換算パラメータに影響を及ぼす外れ値として除外した。得られた近似 曲線の傾き (-0.00675) を空気減弱係数 *AF* とし、さらに、この近似曲線を用いて地表面から 1 m の高さにおける計数率を算出したところ、約 20 (s⁻¹) となった。これを歩行モニタリングの 代表値 0.058 μSv/h で除して空間線量率換算係数 *CD* を 340 とした。これらのパラメータを Table 7-13 にまとめた。



Fig. 7-33 歩行モニタリングによる空間線量率の測定結果



Fig. 7-34 キャリブレーションフライトで得られた対地高度と計数率の関係 (対地高度 40 m のデータ(赤丸点)は指数近似の対象から除外した。)

# Table 7-13 ドローンを用いたキャリブレーションフライトによる空気減弱係数 *AF* と空間線量 率換算係数 *CD*

空気減弱係数 AF (m ⁻¹ )	-0.00675
空間線量率換算係数 CD ([s ⁻¹ ]/[μSv/h])	340

(2) 自動飛行試験による空間線量率の測定

緊急時モニタリングを想定した自動飛行試験を実施した。当試験では Table 7-14 に示すよう に、飛行速度や対地高度をパラメータとした試験項目を設定した。具体的には、飛行速度とし て 2.0 m/s、4.0 m/s、8.0 m/sの異なる条件を用い、対地高度についても 20 m、40 m、80 mの 変化を設けた。これらパラメータの変化が空間線量率に及ぼす影響についても併せて検証した。 飛行速度や高度の変化が計測結果に与える影響を確認することで、緊急時モニタリング時の飛 行パラメータ設定の最適化を図ることを目的としている。また、自動飛行試験で取得した計数 率から地表面から1 m の高さの空間線量率を算出するにあたって、下記のようにデータを取り 扱った。

•位置情報について

解析に用いた緯度、経度、対地高度は、ドローンに搭載された GPS の測位データを用いた。 ただし、PF2 については、7.4 項(6)に記載した要因によって、測定中に地上基地局へのデー タ送信が途切れることが多く、Fig. 7-35 のように GPS 測位データの欠損が見られたため、放 射線検出器に組み込まれている GPS 測位データを用いた。

• 全計数率について

自動飛行試験を実施した地点は空間線量率が比較的低く、天然放射性核種の K-40 が支配的 であり、福島原子力発電所事故由来の放射性セシウムの影響があまり見られない。ドローンに 搭載したホスウィッチ型検出器では Fig. 7-36 のように特定の範囲を抽出せず、全チャネルの 計数率の積算値を全計数率として用いた。

•地表面から1mの高さの空間線量率の算出

全計数率を地表面から1mの高さの空間線量率に換算する方法は式[3]に従った。ただし、 正味の計数率にはバックグラウンドを考慮せず全計数率を用いており、基準対地高度は 20m とした。

PF2 及び M300 で実施した飛行試験の項目ごとに、空間線量率の算出結果を Fig. 7-37 及び Fig. 7-38 にそれぞれ示す。各結果より、空間線量率は概ね 0.05 μSv/h から 0.10 μSv/h と算出され、飛行高度、移動速度や使用機種によって空間線量率の顕著な差異は現れなかった。

開始時高度 (m)	飛行速度 (m/s)	対地高度変化	備考
20	2.0	開始から一定	
20	4.0	開始から一定	
20	8.0	開始から一定	
20	4.0	地形追随	
40	4.0	開始から一定	
80	4.0	開始から一定	PF2 は荒天のため 未実施

Table 7-14 自動飛行試験の項目



Fig. 7-35 PF2 の自動飛行試験において GPS 測位データが途切れた例



Fig. 7-36 ホスウィッチ型検出器で取得されるγ線スペクトルの例



Fig. 7-37 PF2 による空間線量率の算出結果

(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 7-38 M300 による空間線量率の算出結果(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ( (c) Esri Japan) を使用。)

(3)空間線量率分布の比較

(2) で算出した空間線量率を測定範囲で内挿補間し、空間線量率の分布マップを作成した際に、自動飛行試験の項目間で差異が生じるかについて調査した。

ArcGIS Pro (Environmental Systems Research Institute, Inc.) に備えられている機能を用いてク リギングによる内挿補間を実行した。クリギングの入力パラメータは複数あり、Table 7-15 の ように設定した。クリギングによる計算処理の範囲は、ドローンの飛行プログラムで設定した 測定範囲を包含するように設定した。また、クリギングによる内挿値の誤差を低減するために、 測定データが近接する場合は一方を除外し、測定データが空間的に重ならないように処理を施 した上でクリギングを実行した。クリギング実行後に生成された空間線量率マップデータから セル値を抽出し、全セル値を算術平均して各自動飛行試験の項目の平均空間線量率とした。

自動飛行試験の各項目について空間線量率分布の平均値を比較した結果をFig.7-39に示す。 各自動飛行試験の項目間で空間線量率の平均値に顕著な差異が見られない(概ね 0.01 µSv/h 以 下)ことから、飛行高度や移動速度の差異や PF2 と M300の機体性能による違いが空間線量率 の評価に大きな影響を及ぼすことはないことが推察される。ただし、7.4 節の各飛行パターン 試験の結果で示されたように、同じ飛行パターンであっても機体の水平及び鉛直方向の位置情 報のばらつきが見られた。これらのばらつきが空間線量率の算出結果にどの程度影響を与える のかについては、定量的な評価に至っていないことに留意する必要がある。

設定」	設定値	
セミバリオグラム プロパティ	クリギング手法	Ordinary
	セミバリオグラムモデル	Spherical
同 詳細パラメータ	Lag size	5
出力セルサ	5	
検索領	可変	
松声な田の乳字	ポイント数	36
<b>按</b> 希範囲の成定	最大距離	(設定なし)
小影应	WGS1984_UTM	
汉永座	_Zone_54N	

Table 7-15 クリギングの入力パラメータ



Fig. 7-39 自動飛行試験の各項目についての空間線量率平均値の比較結果

8. まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理

本調査で得られた成果を以下にまとめる。

・航空機モニタリング結果について

川内周辺の3km~80km圏内のバックグラウンド空間線量率マップ及び天然放射性核種(K-40、U系列及びTh系列)の濃度マップを作成し、地上測定値や他機関のデータと比較してその 妥当性を検証した。標準的解析手法とラドン弁別手法の両方を用いた結果、バックグラウンド 空間線量率値と地上測定値との RMSE は 0.02 µSv/h 程度であり、妥当な精度が確認された。ま た、高精度 GPS システムを使用することで、より正確な空間線量率マップの作成が可能であ ることが分かり、今後の解析での使用を基本方針としたい。

ラドン弁別手法の適用により、測定期間や解析時間の短縮が期待できるが、信頼性向上の ためには換算パラメータの算出方法の改良が課題である。天然放射性核種の濃度マップは他機 関のデータと概ね一致していたが、U系列濃度が過大評価される傾向が見られ、パラメータ設 定の再検討が必要である。

・航空機モニタリングの期間と出来事について

モニタリングは令和5年(2023年)7月25日~7月28日と同年11月12日~11月15日の2 回に分けて実施し、計15回のフライトを実施した。畜産施設への騒音影響を最小限に抑える ため、飛行経路を工夫した。また、川内測定エリアには霧島山や桜島等の「常時観測火山」が あり、気象庁が24時間体制で火山活動を観測及び監視を行っている⁵⁹⁾。これら火山の活動状 況に応じて、噴火警戒レベルが都度、発表されている⁶⁰⁾。このような火山活動などの地域特 有の要因を考慮した柔軟な航空機モニタリング計画の立案が重要であることを確認した。

・航空機モニタリングエリアの管制空域、空港等の特徴及び気候、地形等に関する特徴について

Fig. 8-1 に川内測定エリアにおける管制空域に係る情報を円及び多角形の枠で示す。本報告 では、資機材等の搬出入等の手続きに煩雑さが少なく、現地測定作業員の待機場所が使用でき ること等、利便性が高いことから、株式会社ノエビアアビエーション鹿児島空港事務所 (A1) を拠点として使用した。当事務所は川内測定エリアの概ね中央部に位置しており、また、川内 原子力発電所 (P1) から直線距離で約 50 km とある程度離れており、緊急時の航空機モニタリ ングを想定する上でも優位な施設である。この他、川内測定エリアの拠点候補として熊本空港 (A3) があるが、川内測定エリアの測線から遠く、効率的に航空機モニタリングを行う観点か ら不便である。川内測定エリア内外には海上自衛隊鹿屋航空基地 (A2)、自衛隊訓練/試験空域 (B1、B2) 及び民間訓練/試験空域 (C1~C9) といった、不定期で飛行訓練が実施される管制空 域が複雑に入り組んでいるため、事前のフライト計画と管制機関との連携が重要であることが 分かった。

川内測定エリアにおける気象の特徴について、気象庁のホームページ⁶¹を参考に以下に記 述する。川内測定エリアの大部分は温帯または亜熱帯であり、降水量は3月から9月に多いが、 特に梅雨の時期となる6月から7月にかけては顕著に多く、年間降水量の3割を占める。逆に、 冬季の降水量は極端に少なくなり、夏季の5分の1程度である。冬季では、冬型の気圧配置が 強くなり、季節風による寒気が入るようになると、東シナ海側では曇雨天の日が多くなり、太 平洋側では晴天の日が多くなる。川内測定エリアにおける通年の気象情報を総合すると、梅雨 明け以降 (8月)から、冬季 (12月頃)の間が航空機モニタリングに適している。本報告では、 梅雨が明けた前期の測定期間中 (7月下旬)、昼頃から局地的豪雨があり、モニタリングが午前 中にしか実施できない日があった。川内測定エリアでは特に、夏季は天候が急変することに留 意しておく必要がある。

川内測定エリアの地形については、北部を除いて平坦な地形がほとんどである。本報告の 前期の測定で用いた Bell 430 のように航続時間が長く、振動の少ない安定飛行が可能な機種を 航空機モニタリングに用いることが理想である。

・RSI システムの保守点検方法について

RSI システムの月例保守点検を定型化して実施し、特にシステムの異常等がないことを確認した。

・原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリング及び無人機の訓練フライトについて 令和5年度原子力総合防災訓練において、緊急時航空機モニタリングと無人機の訓練フライトを実施した。UH-60への航空モニタリングシステム搭載やリアルタイムデータ通信が有効に 機能し、データ解析から結果の共有まで約25分を要した。データ選別作業の効率化が今後の 課題である。無人機によるリアルタイムな空間線量率換算とマッピングが可能であることを確 認したが、悪天候下での使用に向けた防水対策が必要である。なお、ドローンについては、地 表面から1mの高さの空間線量率への換算機能を有していないため、当該機能の開発を行う必 要がある。今後も同様の訓練を重ね、より多くの課題を抽出し、緊急時における無人機モニタ リングの対応体制の充実化と実効性の向上に取り組む予定である。

・無人航空機用放射線モニタリングシステムの開発について

緊急時モニタリング用の無人航空機搭載用の放射線測定システムを開発し、動作試験を行った。検出器の方向特性や計数率の弁別の能力を確認し、今後は環境でのフライト試験を通じ て信頼性向上を図る必要がある。

・緊急時モニタリングで活用できる無人航空機の調査について

緊急時モニタリングに活用可能な無人航空機、特にドローンについて調査し、11 機種の中 からペイロードや検出器の搭載の可否を考慮して2機種を選定した。両機体で基本的な飛行性 能試験と放射線検出器を搭載したフライトを行い、緊急時モニタリングへの適用可能性が高い ことを確認した。ただし、モニタリング中の通信途絶等の課題があり、今後の検討が必要であ る。



# Fig. 8-1 川内周辺における管制空域に係る情報

A:空港及び航空基地、B:自衛隊訓練/試験空域、C:民間訓練/試験空域 P:原子力関連施設

(背景地図は、区分航空図 九州 ((公社)日本航空機操縦士協会)を使用。)

### 謝辞

本調査研究は、規制庁からの受託事業「令和5年度原子力施設等防災対策等委託費(航空機 モニタリング運用技術の確立等)事業」の成果を取りまとめたものである。原子力機構、株式 会社静環検査センターの20余名が、航空機に搭乗しての測定、地上での空間線量率測定、さ らにデータ解析とそのマップ化に取り組んだ。ヘリコプターの運航は、朝日航洋株式会社が行 った。令和5年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングの実施にあたり、航 空自衛隊新潟分屯基地救難隊の皆様にご協力を頂いた。同訓練において、無人機訓練フライト 及び緊急時モニタリングで活用できる無人航空機の調査の一環として実施した、ドローンの各 種飛行試験には株式会社 JDRONE から多大な協力を頂いた。ここに本事業に関与された皆様 に謹んで謝意を表します。

#### 参考文献

- 鳥居建男,眞田幸尚,杉田武志,田中圭,航空機モニタリングによる東日本全域の空間線量率 と放射性物質の沈着量調査,日本原子力学会誌(ATOMOΣ), 54(3), 2012, pp.160-165.
- 2) 眞田幸尚,近藤敦也,杉田武志,鳥居建男,航空機モニタリングによる放射性セシウムの汚染 分布,放射線,38(3),2012, pp.137-140.
- 3) 眞田幸尚,日本全域における航空機モニタリング,FBNews, (432), 2012, pp.7-11.
- 4) 鳥居建男,眞田幸尚,杉田武志,近藤敦哉,志風義明,高橋昌樹,石田睦司,西澤幸康,卜部嘉, 広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査, JAEA-Technology 2012-036, 2012, 182p.
- 5) 眞田幸尚, 西澤幸康, 卜部嘉, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊 村光生, 土田清文, 石橋聖, 前島正道, 結城洋一, 鳥居建男, 平成 25 年度福島第一原子力発電 所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2014-012, 2014, 110p.
- 6) 眞田幸尚, 森愛理, 石崎 梓, 宗像雅広, 中山真一, 西澤幸康, 卜部嘉, 中西千佳, 山田勉, 石田睦 司, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 土田清文, 石橋聖, 吉田真美, 前島正 道, 結城洋一, 鳥居建男, 平成 26 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリ ング(受託研究), JAEA-Research 2015-006, 2015, 81p.
- 7) 眞田幸尚,宗像雅広,森愛理,石﨑梓,嶋田和真廣内淳,西澤幸康,卜部嘉,中西千佳,山田勉, 石田睦司,佐藤義治,佐々木美雪,平山弘克,高村善英,西原克哉,伊村光生,宮本賢治,岩井 毅行,松永祐樹,豊田政幸,飛田晋一朗,工藤保,中山真一,平成27年度原子力発電所周辺に おける航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2016-016, 2016, 131p.
- 8) 眞田幸尚,森愛理,岩井毅行,瀬口栄作,松永祐樹,河端智樹,豊田政幸,飛田晋一朗,平賀祥 吾,佐藤義治,卜部嘉,石崎梓,嶋田和真,廣内淳,工藤保,平成28年度原子力発電所周辺にお ける航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2017-034, 2017, 117p.
- 9) 眞田幸尚,森愛理,岩井毅行,瀬口栄作,松永祐樹,河端智樹,豊田政幸,飛田晋一朗,平賀祥 吾,佐藤義治,卜部嘉,石崎梓,嶋田和真,廣内淳,工藤保,平成28年度緊急時対応技術適用の ためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2017-035, 2018, 69p.
- 10) 普天間章, 眞田幸尚, 石﨑梓, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一 朗, 平賀 祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 工藤保, 平成 29 年度 原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2018-015, 2019, 120p.
- 11) 普天間章, 眞田幸尚, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一朗, 平賀 祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 工藤保, 平成 29 年度 緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2018-016, 2019, 98p.
- 12) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 古宮友和, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 萩野谷仁, 平賀 祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成 30
年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-016, 2019, 116p.

- 13) 普天間章, 眞田幸尚, 古宮友和, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 萩野谷仁, 平賀祥 吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成 30 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-017, 2019, 95p.
- 14) 普天間章, 眞田幸尚, 石﨑梓, 川﨑義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 廣内淳, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和元年度原子力発電所周辺における航空機モ ニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-018, 2021, 121p.
- 15) 普天間章, 眞田幸尚, 川﨑義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 石﨑梓, 廣内淳, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和元年度緊急時対応技術適用のためのバック グラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-019, 2021, 128p.
- 16) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 嶋田和真, 外間智規, 平岡大和, 卜部嘉, 外川織彦, 安藤真樹, 工藤保, 令和2年度原子 力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2021-029, 2022, 132p.
- 17) 普天間章, 眞田幸尚, 佐々木美雪, 川﨑義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永 祐樹, 菊池陽, 卜部嘉, 工藤保, 令和2年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航 空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2021-020, 2021, 138p.
- 18) 普天間章, 眞田幸尚, 長久保梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 圷雄一郎, 卜部嘉, 工藤保, 令和3年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2022-027, 2023, 148p.
- 19) 普天間章, 眞田幸尚, 佐々木美雪, 川﨑義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 圷雄 一郎, 外間智規, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和3年度緊急時対応技術適用のためのバック グラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2022-028, 2023, 127p.
- 20) 普天間章, 眞田幸尚, 長久保梓, 川﨑義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 圷雄一郎, 新井仁規, 扇柳仁, 卜部嘉, 工藤保, 令和4年度原子力発電所周辺における航空機モニタ リング(受託研究), JAEA-Technology 2023-027, 2024, 146p.
- 21) 普天間章, 眞田幸尚, 佐々木美雪, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 圷雄 一郎, 新井仁規, 外間智規, 平岡大和, ト部嘉, 工藤保, 令和4年度緊急時対応技術適用のため のバックグラウンド航空機モニタリング及び無人航空機による放射線モニタリングに係る 技術開発(受託研究), JAEA-Technology 2023-026, 2024, 161p.
- 22) 原子力防災会議幹事会,原子力災害対策マニュアル,平成24年10月19日制定(令和4年9月2日一部改訂).
- 23) 原子力規制委員会, 原子力災害対策指針, 平成 24 年 10 月 31 日制定 (令和 4 年 7 月 6 日一部 改正).
- 24) 眞田幸尚, 西澤幸康, 山田勉, 池田和隆, 松井雅士, 土田清文, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 石田睦司, 卜部嘉, 志風義明, 杉田武志, 近藤敦哉, 鳥居建男, 原子力発

電所事故後の無人へリコプターを用いた放射線測定, JAEA-Research 2013-049, 2014, 129p.

- 25) Sanada, Y., and Torii, T., Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter, J. Environ. Radioact., 139, 2015, pp.294-299.
- 26) Sanada, Y., Kondo, A., Sugita, T., Nishizawa, Y., Yuki, Y., Ikeda, K., Shoji, Y., Torii, T., Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi nuclear power plant, Expl. Geophys., 45(1), 2014, pp.3-7.
- 27) 佐藤昌之,村岡浩治,穂積弘毅,眞田幸尚,山田勉,鳥居建男, Multiple Model Approach によ る構造化ロバスト制御器設計法を適用した放射線モニタリング無人固定翼機の飛行制御則 設計-福島県浪江町における放射線モニタリング飛行-,計測自動制御学会論文集,51(4), 2015, pp.215-225.
- UARMS 開発チーム, 無人航空機による放射線モニタリングシステムの開発, Isotope News, (727), 2014, pp.30-34.
- 29) 眞田幸尚,鳥居建男,村岡浩次,福島原子力発電所事故後における無人機を用いた放射線モニタリング-UARMSの開発状況-,第53回飛行機シンポジウム講演論文集,2015,2A05.
- 30) 原子力規制庁監視情報課, 緊急時モニタリングについて (原子力災害対策指針補足参考資料), 平成 26 年 1 月 29 日制定 (令和 4 年 7 月 6 日一部改訂).
- 31) 国土地理院,基盤地図情報ダウンロードサービス, https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php (2024年3月1日閲覧).
- 32) Currie, L. A., Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry., Anal. Chem, 40(3), 1968, pp.586-593.
- 33) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, pp.81-101.
- 34) 塩出志乃, 逆距離加重法によるネットワーク空間上での点補間に関する研究, Theory and Applications of GIS, 13(1), 2004, pp.33-41.
- 35) Oikawa, S., Nobuyuki, K., Sanada, T., Ohashi, N., Uesugi, M., Sato, K., Abukawa, J. and Higuchi,
  H., A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan. J. Environ. Radioact., 65(2),
  2003, pp.203-213.
- 36) 西川嗣雄, ラドン族(2) –自然放射線環境, 福井大学地域環境研究教育センター研究紀要「日本海地域の自然と環境」, 5, 1998, pp.83-94.
- 37) Hirayama, H., Namito, Y., Bielajew, A. F., Wilderman, S. J., Nelson, W. R., The EGS5 Code System, SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8, 2005, pp.20-132.
- 38) 日本地質学会,日本の自然放射線量,
   http://www.geosociety.jp/uploads/fckeditor/hazard/2011/daishinsai/20110412imai/Radiation m2.gif (2024年3月1日閲覧).
- 39) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2, https://gbank.gsj.jp/seamless/ (2024 年 3 月 1 日閲覧).
- 40) 原子力百科事典 ATOMICA, 天然の放射性核種,

https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat detail 09-01-01-02.html (2024年3月1日閲覧).

- 41) 産業技術総合研究所地質調査総合センター,海と陸の地球化学図, https://gbank.gsj.jp/geochemmap/(2024年3月1日閲覧).
- 42) Beck, H. L., DeCampo, J. and Gogolak, C., In situ Ge(Li) and NaI(T1) gamma-ray spectrometry, USAEC Report HASL-258, New York, N.Y.10014, 1972.
- 43) 永島弘文, 大舘孝幸, 荒井太紀雄, 最小距離 2 乗法による回帰直線の求め方, 体外循環技術, 12(1), 1986, pp.51-54.
- 44) 吉岡勝廣, 飯田孝夫, 大気中ラドン濃度の周期性変動の主要な影響因子 海洋と陸地の違い -, 保健物理, 42(1), 2007, pp.53-62.
- 45) 藤波直人, 渡辺哲也, 前田高志, 荒木智徳, 山川和彦, 日本の気候区別空間線量率の年間最大 値の月別出現頻度, RADIOISOTOPES, 54, 2005, pp.569-573.
- 46) 永井英志,山澤弘実,森泉純,平尾茂一,冬季日本海側における高空間線量率事象の解析,保 健物理,53(4),2018, pp.219-229.
- 47)内閣府,令和5年度原子力総合防災訓練 訓練実施要領, https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/kunren/pdf/07_r5jissi.pdf (2024年3月1日閲覧).
- 48) 国土地理院, 地理院地図 Vector, https://maps.gsi.go.jp/vector/ (2024 年 3 月 1 日閲覧).
- 49) 国土地理院, 地理院タイル一覧, https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html (2024 年 3 月 1 日閲覧).
- 50) UAV Factory Ltd., Penguin C Operator's Handbook V1.13, 2020.
- 51) DJI 社ホームページ, https://www.dji.com/jp (2024 年 3 月 5 日閲覧).
- 52) Parrot 社ホームページ, https://www.parrot.com/en (2024 年 3 月 5 日閲覧).
- 53) 3DRobotics 社ホームページ, https://www.3dr.com (2024年3月5日閲覧).
- 54) DRONE, ドローンの市場シェアの紹介, https://www.drone.jp/news/2021030811351043980.html (2024 年 3 月 6 日閲覧).
- 55) 首相官邸,政府機関等における無人航空機の調達等に関する方針について, https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/pdf/siryou15.pdf (2024 年 3 月 6 日閲覧).
- 56) 国土交通省, 無人航空機登録ポータルサイト, https://www.mlit.go.jp/koku/drone/ (2024 年 3 月 6 日閲覧).
- 57) ACSL社プレスリリース, https://www.acsl.co.jp/news-release/press-release/2798/(2024年3月6日閲覧).
- 58) Tanigaki, M., Okumura, R., Takamiya, K., Sato, N., Yoshino, H., Yhinaga, H., Kobayashi, Y., Uebara, A., Yamana, H., Development of KURAMA-II and its operation in Fukushima, Nucl., Instrum., Methods Phys. Res. A, 781, 2015, pp.57-64.
- 59) 気象庁ホームページ, 地震・津波と火山の監視 火山の監視, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/intro/gyomu/index92.html (2024 年 3 月 1 日閲覧).
- 60) 気象庁ホームページ, 噴火警報・予報, https://www.data.jma.go.jp/multi/volcano/index.html?lang=jp (2024年3月1日閲覧).

61) 気象庁 鹿児島地方気象台ホームページ,九州南部の平年の天候, https://www.data.jma.go.jp/kagoshima/obs/tenkou/TenkouKaisetsuHeinenGaisetsu_S-Kyushu.html (2024年3月1日閲覧).