JAEA-Technology 2022-027 DOI:10.11484/jaea-technology-2022-027



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)

Radiation Monitoring via Manned Helicopter around the Nuclear Power Station in the Fiscal Year 2021 (Contract Research)

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	ト部 嘉 コ	□藤 保	

Akira FUTEMMA, Yukihisa SANADA, Azusa NAGAKUBO, Yoshiharu KAWASAKI Takeyuki IWAI, Shogo HIRAGA, Masashi HAGINOYA, Yuki MATSUNAGA Yuichiro AKUTSU, Yoshimi URABE and Tamotsu KUDO

> 安全研究・防災支援部門 原子力緊急時支援・研修センター

Nuclear Emergency Assistance and Training Center Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

February 2023

Japan Atomic Energy Agency

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 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, 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 (<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en</u>).

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 Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

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)

日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 原子力緊急時支援・研修センター

普天間 章、眞田 幸尚、長久保 梓⁺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}、卜部 嘉^{*1}、工藤 保

(2022年10月28日受理)

2011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に起因した東京電力福島第一原 子力発電所事故によって、大量の放射性物質が周辺環境に飛散した。事故直後より、放射線の分 布を迅速かつ広範囲に測定する手法として、航空機等を用いた空からの測定方法が適用されてい る。日本原子力研究開発機構では、有人へリコプターを使用した航空機モニタリングを福島第一 原子力発電所周辺において継続的に実施してきた。本報告書では、令和3年度に実施した福島第 一原子力発電所周辺におけるモニタリング結果について取りまとめると共に、過去のモニタリン グ結果から空間線量率等の変化量を評価し、その変化要因について考察した。また、航空機モニ タリングによる空間線量率の計算精度向上に資するために、航空機モニタリングデータを用いて 地形の起伏を考慮に入れた解析を行った。地形の起伏を考慮に入れる前後での解析結果を比較し、 本手法による精度向上効果を評価した。さらに、空気中のラドン子孫核種の弁別手法を測定結果 に適用して、空気中のラドン子孫核種が航空機モニタリングに与える影響について評価した。

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3年 度原子力施設等防災対策等委託費及び放射性物質測定調査委託費(80km 圏内外における航空機 モニタリング)事業」の成果をと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

+1 安全研究センター

*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

JAEA-Technology 2022-027

Radiation Monitoring via Manned Helicopter around the Nuclear Power Station in the Fiscal Year 2021 (Contract Research)

Akira FUTEMMA, Yukihisa SANADA, Azusa NAGAKUBO⁺¹, Yoshiharu KAWASAKI^{*1}, Takeyuki IWAI^{*1}, Shogo HIRAGA^{*1}, Masashi HAGINOYA^{*2}, Yuki MATSUNAGA^{*2}, Yuichiro AKUTSU^{*3}, Yoshimi URABE^{*1} and Tamotsu KUDO

> Nuclear Emergency Assistance and Training Center Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness Japan Atomic Energy Agency Hitachinaka-shi, Ibaraki-ken

> > (Received October 28, 2022)

By the nuclear disaster of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS), Tokyo Electric Power Company (TEPCO), caused by the Great East Japan Earthquake and the following tsunami on March 11, 2011, a large amount of radioactive material was released from the FDNPS. After the nuclear disaster, airborne radiation monitoring via manned helicopter has been conducted around FDNPS. The results of the airborne radiation monitoring and the evaluation for temporal change of dose rate in the fiscal 2021 were summarized in this report. Analysis considering topographical effects was applied to the result of the airborne monitoring to improve the accuracy of the conventional method. In addition, technique for discriminating gamma rays from the ground and those from the airborne Rn-progenies was also utilized to evaluate their effect on airborne radiation monitoring.

Keywords: Aerial Radiation Monitoring, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Radiocesium

This report summarized results that Japan Atomic Energy Agency carried out as commissioned business on "the projects of the radiation monitoring using manned helicopter around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station" of the Nuclear Regulation Authority in the fiscal year 2021.

+1 Nuclear Safety Research Center

*1 NESI, Inc.

*2 Inspection Development Company Ltd.

*3 Nuclear Engineering Co., Ltd.

目次

1.	はじめに		1
2.	福島第一原	子力発電所事故に係る航空機モニタリングの経緯	3
3.	測定システ	ムとヘリコプター	.12
	3.1. 航空桥	幾モニタリングシステム	12
	3.2. ~빗:	コプターの選定	14
	3.3. 機体)	こよるγ線遮蔽効果	17
	3.4. RSI シ	/ステムの保守	19
4.	データ取得	及び解析方法	.22
	4.1. 上空~	での測定値の地上への換算に関する基本的な考え方	22
	4.2. 航空桥	幾モニタリングの方法	26
	4.2.1	1.データ取得方法	26
	4.2.2	2. ヘリコプターによるフライトの実績	28
	4.3. 換算/	ペラメータの設定及び妥当性確認のためのキャリブレーションフライト	30
	4.4. 解析の	カフロー	37
	4.5. 空間網	泉量率への換算方法	38
	4.5.1	I. バックグラウンド減算 (宇宙線及びその他)	38
	4.5.2	2. 対地高度補正	41
	4.5.3	3.空間線量率への換算	44
	4.5.4	↓ 空間線量率への換算方法	58
	4.6. 放射性	生Csの沈着量への換算方法	58
	4.6.1	L. 天然放射性核種の弁別と放射性 Cs 起源の計数率の算出	58
	4.6.2	2.空間線量率-放射能換算係数	60
	4.7. 減衰褚	甫正	62
	4.8. 検出 ⁻	下限值	62
	4.8.1	1.空間線量率の検出下限値	63
	4.8.2	2. 放射性 Cs の沈着量の検出下限値	64
	4.9. 不確才	かさ	64
	4.10. マッ	ピング	65
	4.11. 地上社	則定値との比較	66
	4.12. 天然加	放射性核種由来の空間線量率マップの作成	69
5.	航空機モニ	タリング結果	.75
	5.1. 第16	次モニタリング	75
	5.2. 東日ス	本第 12 次モニタリング	80
6.	航空機モニ	タリング結果の考察	.93
	6.1. 過去の	D航空機モニタリング結果との比較	93
	6.2. 実効=	半減期の算出1	04

	6.3.	土地利用区分による空間線量率の変化傾向の違い	. 107
7.	地形の	の起伏による影響と補正方法	115
	7.1.	背景	115
	7.2.	地形の起伏による測定への影響	115
	7.3.	地形の起伏による影響の補正	118
8.	ラド	ン弁別手法を適用した空間線量率マップの作成	122
	8.1.	ラドン子孫核種	. 122
	8.2.	ラドン弁別手法の理論	. 123
	8.3.	パラメータ (GI 及び RI) の決定	. 127
	8.4.	GIの高度補正方法	. 128
	8.5.	東日本第12次モニタリングのデータへの適用	. 130
	8.6.	バックグラウンド計数率の比較	. 136
9.	本年月	度の成果と今後の課題	140
10.	まとる	Ø	143
謝郡	辛		144
参	考文献		145

Contents

1.	Intro	luction	1
2.	Histo	ry of airborne monitoring after FDNPS accident	3
3.	Meas	urement system and helicopters	12
	3.1.	System of airborne radiation monitoring	12
	3.2.	Helicopters	14
	3.3.	Test using radiation source	17
	3.4.	Maintenance of RSI system	19
4.	Data	acquisition and analysis	22
	4.1.	Basic concept of conversion to dose rate at 1 m above the ground	22
	4.2.	Method of airborne radiation monitoring	26
		4.2.1. Data acquisition	26
		4.2.2. Operational results of the helicopters	28
	4.3.	Calibration flights	30
	4.4.	Outline of analysis method	37
	4.5.	Conversion procedure of dose rate at 1 m above the ground	38
		4.5.1. Background (Cosmic ray and the others)	38
		4.5.2. Height correction	41
		4.5.3. Conversion factor from count rate to dose rate	44
		4.5.4. Conversion flow to dose rate	58
	4.6.	Conversion procedure of radiocesium deposition	58
		4.6.1. The discrimination of count rate by natural nuclide	58
		4.6.2. Conversion factor from dose rate to radiocesium deposition	60
	4.7.	Decay correction	62
	4.8.	Detection limit	62
		4.8.1. Detection limit of dose rate	63
		4.8.2. Detection limit of radiocesium deposition	64
	4.9.	Uncertainty	64
	4.10	. Mapping	65
	4.11	. Comparison with ground measurement data	66
	4.12	. Map of dose rate of natural nuclide	69
5.	Moni	toring results	75
	5.1.	The 16th monitoring at area of 80 km range from the FDNPS	75
	5.2.	The 12th monitoring in the East Japan	80
6.	Discu	ission	93
	6.1.	Comparison with the past monitoring results	93
	6.2.	Evaluation of ecological half-life of dose rate	104

	6.3.	Difference in tendency change of dose rate resulted from the land use	107
7.	Тороз	graphical effect and correction method	115
	7.1.	Background	115
	7.2.	Topographical effect on measurement data	115
	7.3.	Results of topographical effect correction	118
8.	Discr	imination of Rn progenies	122
	8.1.	Rn progenies	122
	8.2.	Theory of discrimination of Rn progenies	123
	8.3.	Parameters (GI and RI)	127
	8.4.	Height correction of GI	128
	8.5.	Application for AMS data	130
	8.6.	Evaluation of the conventional technique	136
9.	Futur	e work	140
10.	Sumn	naries	143
Ac	knowle	edgments	144
Ret	ference	25	145

Table list

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯	7
Table 2-2 航空機モニタリングに関わる技術開発の経緯	11
Table 3-1 搭載した RSI システムとヘリコプターの組み合わせ	15
Table 3-2 Cs-137 線源によるヘリコプター機体の遮蔽効果の比較	17
Table 4-1 ヘリコプターごとのフライト距離及び速度とフライト回数	29
Table 4-2 キャリブレーションフライトの概略	32
Table 4-3 RSI システムとヘリコプターの組み合わせごとのバックグラウンド計数率及び CR-index	40
Table 4-4 使用した空気減弱係数 AF のまとめ	42
Table 4-5 2021 年度に取得した空気減弱係数 AF データー覧	43
Table 4-6 使用した空間線量率換算係数 CD のまとめ	45
Table 4-7 TCS-172B と TCS-1172 の地上測定値の比較結果	47
Table 4-8 2021 年度に取得した <i>CD</i> データ一覧 (Bell412 (JA6767))	48
Table 4-9 2021 年度に取得した CD データー覧 (Bell430 (JA05TV))	49
Table 4-10 2021 年度に取得した CD データ一覧 (Bell430 (JA02AX))	50
Table 4-11 BG-index 一覧	60
Table 4-12 RSI システムの検出下限値	64
Table 4-13 使用した空気減弱係数 (m ⁻¹) のまとめ	72
Table 6-1 福島原子力発電所から 80 km 圏内における空間線量率の面積割合の経年推移	98
Table 6-2 指数関数近似から求めた実効半減期	. 106
Table 6-3 森林部及び市街地部における空間線量率の相対減少率の比較(国土数値情報土地利用細分	分メ
ッシュデータ (平成 21 年度公開版)に基づく)	113
Table 6-4 森林部及び市街地部における空間線量率の相対減少率の比較(国土数値情報土地利用細分	テメ
ッシュデータ (平成 26 年度公開版)に基づく)	113
Table 6-5 森林部及び市街地部における空間線量率の相対減少率の比較(国土数値情報土地利用細分	分メ
ッシュデータ (平成 28 年度公開版)に基づく)	114
Table 8-1 ラドン子孫核種の放出する γ 線	. 123
Table 9-1 RSI システムの保守及び運用実績	. 142

Figure list

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績	9
Fig. 3-1 RSI システムのブロック図	13
Fig. 3-2 RSI システムの外観	13
Fig. 3-3 機底に燃料タンクのないヘリコプター機種一覧	14
Fig. 3-4 線源試験イメージ	18
Fig. 3-5 RSI システムのエネルギー分解能及び Gain の変動 (RSI 1)	20
Fig. 3-6 RSI システムのエネルギー分解能及び Gain の変動 (RSI 2)	21
Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係	23
Fig. 4-2 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の積算計数に対する線源位置の関係	24
Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の線源位置ごとの計数の割合	24
Fig. 4-4 上空からの測定イメージ	25
Fig. 4-5 フライトイメージ	26
Fig. 4-6 予定したフライトの測線	27
Fig. 4-7 テストラインフライトのイメージ	33
Fig. 4-8 テストラインの場所	33
Fig. 4-9 テストポイントフライトのイメージ	34
Fig. 4-10 テストポイントの場所	35
Fig. 4-11 宇宙線フライトのイメージ	36
Fig. 4-12 Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージ	36
Fig. 4-13 天然核種フライトの測線とオーバーラップフライトの測線	36
Fig. 4-14 解析のフロー	37
Fig. 4-15 海抜高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例	39
Fig. 4-16 BG フライトで取得した陸上と海上でのγ線スペクトル例	40
Fig. 4-17 対地高度と計数率の関係例	42
Fig. 4-18 TCS-172B と TCS-1172 を用いた地上測定値の比較試験の実施地点	46
Fig. 4-19 地上測定データ (TestPoint 1)	51
Fig. 4-20 地上測定データ (TestPoint 3)	52
Fig. 4-21 地上測定データ (TestPoint 4)	53
Fig. 4-22 地上測定データ (TestPoint 5)	54
Fig. 4-23 地上測定データ (TestPoint D)	55
Fig. 4-24 地上測定データ (TestPoint E)	56
Fig. 4-25 オーバーラップフライトにおけるヘリコプター機種または機体ごとの CR-index ・HF 補	i正計
数率の関係	57
Fig. 4-26 放射性 Cs に起因する計数率の算出イメージ	60
Fig. 4-27 <i>BG-index</i> の算出例	60
Fig. 4-28 重量緩衝深度 β と空間線量率-放射能換算係数 CF の関係	61

Fig. 4-29 IDW に入力するパラメータとマップの関係	66
Fig. 4-30 測線近傍における地上測定値と航空機モニタリングによる空間線量率の比較	68
Fig. 4-31 ランダムな位置における地上測定値と航空機モニタリングによる空間線量率の比較	68
Fig. 4-32 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と航空機モニタリングによる Cs-137 沈着量の比較	69
Fig. 4-33 関数適合法を用いた Cs-134 と K-40 の弁別	72
Fig. 4-34 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD)の関係 (Bell412)	72
Fig. 4-35 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD)の関係 (Bell430)	73
Fig. 4-36 福島原子力発電所周辺における天然放射性核種由来の空間線量率マップの作成例	73
Fig. 4-37 可搬型 Ge 検出器による測定で評価した天然放射性核種由来の空間線量率と航空機モニタ	タリ
ングで評価した天然放射性核種由来の空間線量率との比較	74
Fig. 5-1 第 16 次モニタリングにおける空間線量率マップ	76
Fig. 5-2 第 16 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ	77
Fig. 5-3 第 16 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ	78
Fig. 5-4 第 16 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ	79
Fig. 5-5 東日本第 12 次モニタリングにおける空間線量率マップ	81
Fig. 5-6 東日本第 12 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ	82
Fig. 5-7 東日本第 12 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ	83
Fig. 5-8 東日本第 12 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ	84
Fig. 5-9 第16次モニタリングと東日本第12次モニタリングにおける空間線量率マップ	85
Fig. 5-10 第 16 次モニタリングと東日本第 12 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ	86
Fig. 5-11 第16次モニタリングと東日本第12次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ	87
Fig. 5-12 第 16 次モニタリングと東日本第 12 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ	88
Fig. 5-13 第 16 次モニタリングと東日本第 12 次モニタリングにおける天然放射性核種由来の空間	線量
率マップ	89
Fig. 5-14 各測定年度における天然放射性核種由来の空間線量率マップの比較	90
Fig. 6-1 福島原子力発電所から 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較	95
Fig. 6-2 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較	99
Fig. 6-3 第4次モニタリング及び第16次モニタリングの空間線量率算出結果の比較	. 102
Fig. 6-4 旧避難指示区域における第4次モニタリング及び第16次モニタリングの空間線量率算出	結果
の比較	. 103
Fig. 6-5 旧避難指示区域における第4次モニタリング及び第16次モニタリングの Cs-137 沈着量算	出
結果の比較	. 103
Fig. 6-6 測定値の指数関数近似	. 105
Fig. 6-7 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平	成
21 年度公開版 国土地理院土地利用調査データより)	. 109
Fig. 6-8 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平	成
26年度公開版 国土地理院土地利用調査データより)	110
Fig. 6-9 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平	成

28年度公開版 国土地理院土地利用調査データより)	111
Fig. 6-10 森林部及び市街地における地表面から1mの高さの空間線量率の算出結果の比	較112
Fig. 7-1 無作為に抽出した評価点の位置	117
Fig. 7-2 数値標高マップから三角ポリゴンへの変換例	118
Fig. 7-3 平坦な地形と起伏のある地形における対地高度 300 m での計数率比の頻度分布.	118
Fig. 7-4 地形の起伏による影響を補正する場合に考慮すべき点	119
Fig. 7-5 第16 次モニタリングの空間線量率マップの比較	120
Fig. 7-6 第16 次モニタリング結果と地上測定値との相対誤差の比較	121
Fig. 8-1 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)	123
Fig. 8-2 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	126
Fig. 8-3 空気中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ	126
Fig. 8-4 陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr ₃ 検出器の計数率の関係	128
Fig. 8-5 海上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr ₃ 検出器の計数率の関係	128
Fig. 8-6 計算体系のイメージ	129
Fig. 8-7 計算体系のベンチマーク	129
Fig. 8-8 シミュレーションによる測定高度と GI の関係	130
Fig. 8-9 ラドン弁別手法適用前後の東日本第 12 次モニタリングの空間線量率マップ	
Fig. 8-10 東日本第12 次モニタリングの測定結果から計算した空気中ラドン子孫核種の言	計数率マップ
	133
Fig. 8-11 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率と地上測定値との比較(東日本第12次モ	ニタリング)
Fig. 8-12 従来手法とラドン弁別手法による空間線量率マップの比較	
Fig. 8-13 従来手法で用いたバックグラウンド計数率とラドン弁別手法で求めたバックグ	ラウンド計数
率の比較	

1. はじめに

短時間で広域のモニタリングを実施する方法の一つとして、有人のヘリコプターを用いた航空 機モニタリング (Aerial Radiation Monitoring) が挙げられる。航空機モニタリングによる放射線の 測定及びマッピングは、1979 年に発生したスリーマイル島原子力発電所事故や 1986 年に発生し たチョルノービリ原子力発電所事故を契機とし、環境中の地表面に沈着した人工放射性核種を迅 速に検出するための手法として、ウラン探査の技術をベースに開発されてきた¹⁾。現在、米国で はエネルギー省 (以下、DOE) を中心に多数の航空機モニタリングの機器を所有しており、核実 験場等の計測等で培った経験を基に緊急時における運用方法が整備されている^{2),3)}。また欧州で は、スコットランド大学連合環境放射能研究所 (Scottish Universities Environmental Research Centre: SUERC) を中心に、チョルノービリ原子力発電所事故後に各国運用されている航空機モニ タリングのシステムを一か所に集め比較測定を実施することにより、データフォーマットや解析 手法の標準化を行っている⁴⁾。

我が国でも航空機モニタリングは、1979年に起きたスリーマイル島原子力発電所事故以来、 旧日本原子力研究所(現国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構))を中心 に開発が進められてきた。1980年から5年間にわたって航空機γ線サーベイシステム(Aerial Radiological Survey and Assessment System: ARSAS)が開発され、基本的な航空機モニタリングの 方法が確立された^{5),6)}。また、原子力災害時における空気中の放射性プルームの評価を目的とし、 ガス状の放射性物質を航空機モニタリングで測定する際の換算係数がシミュレーション計算によ り求められた⁷⁾。その後、航空機モニタリングの技術は、公益財団法人原子力安全技術センター (以下、NUSTEC)に引き継がれ、原子力防災における放射線分布を早期に計測するツールとして 整備されてきた⁸⁾。しかしながら実態としては、東京電力福島第一原子力発電所(以下、福島原 子力発電所)事故当時、我が国において、航空機モニタリングは環境放射線モニタリング指針⁹⁾ で原子力防災時に実施するように位置づけられてはいたものの、広範囲の測定に対応できるデー タ取得方法やデータ解析方法について、ルーチンベースで整備されていたとは言い難かった。

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震に起因して、福島原子力発電所事故が発生し、周辺 環境に放射性物質が広く拡散したため、その影響を評価することが急務となり、航空機モニタリ ングが実施されることとなった。福島原子力発電所から半径 80 km 圏内において航空機モニタリ ングが DOE と文部科学省(以下、文科省)により 2011 年 4 月 6 日から開始され¹⁰⁾⁻¹²⁾、当該事業 は 2013 年度に原子力規制庁(以下、規制庁)に移管され、モニタリング結果は規制庁のホームペー ジで随時公開されている¹³⁾。

原子力機構をはじめとした航空機モニタリングの経験のある研究機関や企業などが集結し、 DOE の手法をベースに福島原子力発電所事故の状況や急峻な地形が多いという日本独特の環境 を加味して、航空機モニタリングの測定及び評価手法の最適化を図ってきた。これら蓄積した測 定及び解析技術を基に、我が国初の大規模な原子力災害における日本全域の航空機モニタリング を 2011 年から 2012 年にかけて行った¹²⁾。当時作成した福島原子力発電所周辺における空間線量 率マップや地表面における放射性セシウム (以下、放射性 Cs) の沈着量マップは、避難指示区域 設定の基礎資料となっている他、様々なメディアや研究に活用されている¹⁴⁾。また、事故直後 に実施されていた福島原子力発電所周辺の海上における航空機モニタリングデータを再解析し、 事故直後の海上における I-131 や放射性 Cs の降下量マップを再構築し、シミュレーションと比較 した例も報告されている¹⁵⁾。いずれの例も、福島原子力発電所事故後における航空機モニタリ ングによるデータ取得の有効性及び得られる情報量の多さを示している。

本報告書では、2021年度に行った福島原子力発電所から80km圏内外における航空機モニタリ ングの結果について報告する。2021年度における福島原子力発電所から80km圏内における航空 機モニタリングを「第16次モニタリング」、80km圏外における航空機モニタリングを「東日本 第12次モニタリング」と呼称する。また、航空機モニタリングによる空間線量率の評価のさら なる高度化を目的とし、地形の起伏を考慮した場合に空間線量率の計算結果に及ぼす影響につい て、第16次モニタリングのデータを用いて、地上測定値を指標として定量的評価を行った。ま た、東日本第12次モニタリングのデータを用いて、大気中のラドン子孫核種からのγ線と地表 面の放射性核種からのγ線とを弁別して、空間線量率マップを作成した。

2. 福島第一原子力発電所事故に係る航空機モニタリングの経緯

福島原子力発電所事故発生後に実施された航空機モニタリングの一連のスケジュールと実績に ついて Table 2-1 及び Fig. 2-1 に示す。本報告では、これら一連の福島原子力発電所周辺における 航空機モニタリングを「本事業」と総称する。本事業では、2011年3月25日に文科省によりプ レス発表された「文部科学省航空機モニタリング行動計画¹⁶」に則り、2011年4月6日から文科 省が主体となり DOE の協力を得て (測定: NUSTEC)、「第1次モニタリング」として福島原子力 発電所から 80 km 圏内におけるモニタリングを開始した。また、2011年5月18日から「第2次 モニタリング」として福島原子力発電所から 80 km~100 km 圏をモニタリングした。その後、 2011 年 5 月 31 日に開始された「第 3 次モニタリング」からは原子力機構が加わって、福島原子 力発電所から 80 km 圏内のモニタリングを実施した。さらに、福島原子力発電所から 100 km 圏 外にも放射性物質が拡散していることが予想されたため、2011年6月22日から福島周辺県の宮 城県、栃木県、茨城県を対象にモニタリングを実施した後、2011年8月2日から、文科省委託事 業である「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」として、原 子力機構が主体となり東日本全域の航空機モニタリング「東日本第1次モニタリング」を実施し た。その後、福島原子力発電所から 80 km 圏内のモニタリングを 2011 年 10 月 22 日から「第 4 次 モニタリング」として実施した。また、本事業を拡大する形で、2012年1月30日からは、北海 道から沖縄までの上記以外の地域における航空機モニタリング「西日本・北海道モニタリング」 を実施した。2012年2月6日からは、「警戒区域及び計画的避難区域における航空機モニタリン グ(第4.5次)」として実施した。

2012年度(平成24年度)は、それまでのデータに基づき、福島原子力発電所事故の影響が見られる地域に限定し、航空機モニタリングを継続した。空間線量率の比較的高い場所(0.2 µSv/h以上)で福島原子力発電所から80 km 圏内を除く地域を対象に、2012年4月2日から「東日本第2次モニタリング」を実施し、2012年10月31日から「東日本第3次モニタリング」を実施した。 80 km 圏内については、2012年6月22日及び10月31日から「第5次モニタリング」及び「第6次モニタリング」をそれぞれ実施した。さらに、2013年3月4日には「警戒区域及び避難指示区域における航空機モニタリング(第6.5次)」を実施した。

2013 年度 (平成 25 年度) には本事業の主体が文科省から規制庁に移管され、福島原子力発電所 から 80 km 圏内について 2013 年 8 月 27 日及び 2013 年 11 月 2 日から「第 7 次モニタリング」及 び「第 8 次モニタリング」をそれぞれ実施した。また、2013 年 9 月 3 日から空間線量率の比較的 高い場所 (0.2 µSv/h 以上) で福島原子力発電所から 80 km 圏外を対象に「東日本第 4 次モニタリン グ」を実施した。2013 年度の結果については、眞田他 (2014)¹⁷に詳しく報告されている。

2014 年度 (平成 26 年度) は、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2014 年 9 月 1 日から 「第 9 次モニタリング」を実施した。また、2014 年 9 月 21 日より福島原子力発電所から 80 km 圏外を対象に「東日本第 5 次モニタリング」を実施した。2014 年度の結果については、眞田他 (2015)¹⁸)に詳しく報告されている。

2015 年度 (平成 27 年度) については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2015 年 9 月 12 日から「第 10 次モニタリング」を実施した。また、2015 年 10 月 2 日から福島原子力発電所か ら 80 km 圏外を対象に「東日本第6次モニタリング」を実施した。さらに、バックグランド空間 線量率の把握を目的として、九州電力川内原子力発電所周辺の航空機モニタリングを実施した (別事業)。2015年度の結果については、眞田他 (2016)¹⁹⁾に詳しく報告されている。

2016 年度 (平成 28 年度) については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2016 年 9 月 14 日から「第 11 次モニタリング」を実施した。また、2016 年 10 月 15 日から福島原子力発電所 から 80 km 圏外を対象に「東日本第 7 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバッ クグラウンド空間線量率の把握を目的として、関西電力大飯発電所並びに高浜発電所周辺及び四 国電力伊方発電所周辺の航空機モニタリングを実施した。2016 年度の結果については、眞田他 (2018)^{20),21)}に詳しく報告されている。

2017年度(平成29年度)については、福島原子力発電所から80km 圏内について2017年9月9 日から「第12次モニタリング」を実施した。また、2017年9月29日から福島原子力発電所から 80km 圏外を対象に「東日本第8次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバック グラウンド空間線量率の把握を目的として、北海道電力泊発電所、東京電力柏崎刈羽原子力発電 所及び九州電力玄海原子力発電所周辺の航空機モニタリングを実施した。2017年度の結果につ いては普天間他(2019)^{22),23)}に詳しく報告されている。

2018 年度(平成 30 年度)については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2018 年9月6日から「第13 次モニタリング」を実施した。また、2018 年 10 月8日から福島原子力発電所から80 km 圏外を対象に「東日本第9次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、中国電力島根原子力発電所及び中部電力浜岡原子力発電所周辺の航空機モニタリングを実施した。2018 年度の結果については普天間他(2019)^{24),25)}に詳しく報告されている。

2019年度(令和元年度)については、福島原子力発電所から80km圏内について2019年8月29日から「第14次モニタリング」を実施した。また、2019年9月18日から福島原子力発電所から80km圏外を対象に「東日本第10次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、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北陸電力志賀原子力発電所周辺の航空機モニタリングを実施した。2019年度の結果については普天間他(2021)^{20,27}に詳しく報告されている。

2020年度(令和2年度)については、福島原子力発電所から80km圏内について2020年8月25日から「第15次モニタリング」を実施した。また、2020年9月22日から福島原子力発電所から80km圏外を対象に「東日本第11次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、関西電力美浜発電所並びに日本原子力発電敦賀発電所及び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周辺の航空機モニタリングを実施した。2020年度の結果については普天間他(2022)²⁸,(2021)²⁹に詳しく報告されている。

このように、これまでの航空機モニタリングによって、日本全域の陸域における放射線量分布 の全体像を示すとともに、福島原子力発電所事故の影響の大きい地域については継続的に測定す るなど、信頼できるデータを提供してきた。

また、これらの継続的な航空機モニタリングと並行して、関連する技術開発を実施してきた。

Table 2-2 に航空機モニタリングに関連する技術開発の経緯について示す。2011 年度は基本的な 航空機モニタリングの手法を確立し、2012 年度はその手法をルーチン的に利用できる解析シス テムを開発した。特に、地表面から 1 m の高さの空間線量率や地表面における放射性 Cs の沈着 量への換算パラメータについては、実際にデータを取得しつつ評価する必要があったため、得ら れた結果を基に考察し最適化を図った。また、バックグラウンドとなる天然の放射線との識別方 法に関するパラメータの設定には試行錯誤を重ねた^{30,31)}。さらに、航空機モニタリングの換算 手法は地表面が平面で空間線量率が一様であると仮定しているため、山や谷などの地形が複雑な 場所での精度が懸念されていたことから、地上の勾配を評価できるように 10 m メッシュの数値 標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) データの抽出ツールを開発した。本ツールにより、測 定場所の直下に降ろした直線から 45°に降ろした直線と地表の交点内に含まれる DEM データを 抽出し、測定場所の平均的な地表の高度を知ることができるようになり、測定場所の地形的勾配 を評価できるようになった。

2013年度には、福島原子力発電所から80km圏内の谷や山地形等の特徴的な地形の上空で航空 機モニタリングデータを取得し、地形が航空機モニタリングデータに及ぼす影響に関する知見を 取得した。さらに、高度な解析技術として、鳥居他^{32),33)}は DOE が事故直後に実施した航空機モ ニタリングデータのγ線スペクトルをコベル法により再解析し、得られた I-131 のピーク面積か らモンテカルロ計算コードにより地表面の沈着量に換算する手法を開発した。

2014 年度には、NaI(TI)シンチレーション式検出器 (以下、NaI(TI)検出器) で取得した γ 線スペ クトルデータに関数フィッティング法を適用することにより、Cs-134 起源の 1,365 keV と K-40 起 源の 1,461 keV の γ 線を弁別する手法を開発した。本手法は、放出エネルギーの近い人工放射性 核種と自然放射性核種が形成する複合ピークの弁別に資するものであり、原子力発電所事故直後 に人工放射性核種及び自然放射性核種の空間線量率を切り分けて評価するのに特に有用である。

2015年度には、空気中のラドン子孫核種に起因するγ線計数率をより適切に減算することを目 的として、空気中ラドン子孫核種から放出されるγ線を計測するための LaBr₃(Ce)シンチレーショ ン式検出器 (以下、LaBr₃検出器)を導入し、地表面から放出されるγ線と空気中ラドン子孫核種 から放出されるγ線とのレスポンス差を利用して両者を弁別する基礎的な手法を構築した。本手 法は 2016 年度に航空機モニタリングの解析システムに組み込むとともに、福島原子力発電所か ら 80 km 圏外の航空機モニタリングデータに適用した。また 2015 年度は、放射線計測とともに レーザー測量及び写真測量データを積雪の前後で取得し、積雪による放射線の減衰係数を評価し た²⁷⁾。この手法により、事故直後に積雪があり放射線が遮蔽された場合においても一定の精度 で航空機モニタリングが可能になった。

2016年度には、測位精度の向上がなされた当時最新の全球測位衛星システム(以下、GNSS)を 用いて航空機モニタリングを行い、既存のGNSSの性能と比較評価するとともに、測位精度が航 空機モニタリングによる空間線量率の計算値に与える影響を評価した。

2017 年度には、Ishizaki et al. (2017)³⁵⁾が開発した地形の起伏を考慮して空間線量率の計算値を 補正する手法を航空機モニタリングに適用できるようにシステム化した。

2018 年度には、地形の起伏を補正する手法を過去の航空機モニタリング結果に適用し、地上 測定値を指標として従来手法と比較することにより、空間線量率の計算精度向上について定量的 な評価を実施した。

2019 年度には、地形の起伏を補正する手法を既存の航空機モニタリング解析システムに組み 込むとともに福島原子力発電所から 80 km 圏内の航空機モニタリングデータに適用し、地上測定 値を指標として従来手法と比較することにより、空間線量率の計算精度向上を定量的に評価した。

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯

(1/2)

モニタリング名	測定場所	測定実施機関	解析実施機関	測定実施日	結果公表日
第1次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	DOE 60 km圏内 NUSTEC 60 km~80 km圏内	DOE	2011/04/06 ~04/29	2011/05/06
第2次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km~100 km圏内	NUSTEC	NUSTEC	2011/05/18 ~05/26	2011/06/16
第3次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA, NUSTEC 40 km圏内 NUSTEC 40 km~80 km圏内	JAEA NUSTEC	2011/05/31 ~07/02	2011/07/08
東日本第1次 モニタリング	青森〜福井までの東日本 (2次,3次実施部分除く)	JAEA NUSTEC OYO	JAEA NUSTEC OYO	2011/06/22 ~10/20	随時公表
第4次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA, NUSTEC 40 km圏内 NUSTEC 40 km~80 km圏内	JAEA NUSTEC	2011/10/22 ~11/05	2011/12/16
西日本、北海道 モニタリング	近畿~沖縄、北海道	JAEA NUSTEC OYO	JAEA NUSTEC OYO	2012/01/30 ~05/31	随時公表
警戒区域及び計画的避難 区域における航空機 モニタリング(第4.5次)	警戒区域及び 計画的避難区域	NUSTEC	JAEA NUSTEC	2012/02/06 ~02/10	2012/02/24
東日本第2次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 µSv/h以上)	JAEA NUSTEC OYO	JAEA NUSTEC OYO	2012/04/02 ~05/07	2012/09/28
第5次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JCAC OYO	JCAC NUSTEC	2012/06/22 ~06/28	2012/09/28
第6次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JCAC OYO	JCAC NUSTEC	2012/10/31 ~11/16	2013/03/01
東日本第3次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 uSv/h以上)	NUSTEC	JAEA	2012/10/31 ~12/28	2013/03/01
警戒区域及び避難指示区 域における航空機 モニタリング(6.5次)	警戒区域及び 避難指示区域	JCAC NUSTEC	JCAC NUSTEC	2013/03/04 ~03/11	2013/05/13
第7次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2013/08/27 ~09/28	2013/12/25
東日本第4次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 uSv/h以上)	JAEA OYO	JAEA OYO	2013/09/03 ~11/04	2014/03/07
第8次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2013/11/02 ~11/19	2014/03/07
第9次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA	JAEA OYO	2014/09/01 ~09/20	2015/02/13
東日本第5次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 µSv/h以上)	JAEA OYO	JAEA OYO	2014/9/21 ~11/07	2015/02/13
第10次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2015/09/12 ~09/30	2016/02/02
東日本第6次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 µSv/h以上)	JAEA OYO	JAEA OYO	2015/10/02 ~11/04	2016/02/02
H27_BGモニタリング	川内原子力発電所から 80 km圏内	JAEA	JAEA	2016/02/01 ~02/07	-

※DOE: 米国エネルギー省、NUSTEC: (公財) 原子力安全技術センター、JAEA: (国研)日本原子力研究開発機構 OYO: 応用地質 (株)、JCAC: (公財) 日本分析センター

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯

(2/2)

モニタリング名	測定場所	測定実施機関	解析実施機関	測定実施日	結果公表日
H28_BGモニタリング(1)	大飯・高浜発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2016/07/20 ~08/01	-
第11次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2016/09/14 ~10/15	2017/02/13
東日本第7次	線量率の比較的高い場所	JAEA	JAEA	2016/10/15	2017/02/13
ー <u>ーマリング</u> H28 BGモニタリング(2)	(0.2 µSV/N以上) 伊方発電所から80 km圏内	JAEA	JAEA	2016/11/29	_
		JAEA		<u>~12/11</u> 2017/07/24	
		OYO	VALA	~08/02	
H28_BGモニタリング(2)	柏崎刈羽原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	~08/10 2017/09/30 ~10/01	-
第12次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA	JAEA	2017/09/09 ~09/25	2018/02/20
東日本第8次	線量率の比較的高い場所	JAEA	JAEA	2017/09/29	2018/02/20
モニタリング	(0.2 μSv/h以上) 玄海原子力発電所から	OYO JAEA	0Y0	~11/16 2017/11/28	2010/02/20
H29_BGモーダリンク(3)	80 km 圈内	0Y0	JAEA	~12/05	-
H30_BGモニタリング(1)	島根原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2018/07/20 ~07/27	-
第13次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2018/09/06 ~10/16	2019/03/08
東日本第9次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 µSv/h以上)	JAEA OYO	JAEA OYO	2018/10/08 ~11/15	2019/03/08
H30_BGモニタリング(2)	浜岡原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2018/11/27 ~12/09	-
R1_BGモニタリング(1)	東通原子力発電所並びに 六ヶ所再処理工場から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2019/06/26 ~07/10	-
第14次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA		2019/08/29	2020/02/13
東日本第10次	線量率の比較的高い場所	JAEA	JAEA	2019/09/18	2020/02/13
ーーテリング R1_BGモニタリング(2)	(0.2 LSV/N以工) 志賀原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	~11/02 2019/11/21 ~11/29	-
R2_BGモニタリング(1)	美浜発電所並びに敦賀発電 所から80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2020/07/22 ~08/10	-
第15次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2020/08/25 ~10/02	2021/02/15
東日本第11次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 uSy/b以上)	JAEA	JAEA	2020/09/22 ~10/30	2021/02/15
R2_BGモニタリング(2)	近畿大学原子力研究所並び に京都大学複合原子力科学 研究所から80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2020/11/12 ~11/19	_
第16次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km 開内	JAEA		2021/08/31	2022/03/04
東日本第12次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 µSv/h以上)	JAEA SIC	JAEA	2021/09/26 ~10/25	2022/03/04
R3_BGモニタリング	大飯・高浜発電所から	JAEA	JAEA	2021/11/06	

^{23 Cー}///27 80 km圏内 OYO ~11/20 ※JAEA: (国研)日本原子力研究開発機構、OYO: 応用地質 (株)、SIC: (株)静環検査センター、JDRONE:(株)JDRONE





Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績 ^(2/2)

		I able 7-7 航空儀ヤータリンクに選びの伎が用先の辞辞
年度(和暦)	技術開発項目	開発成果
2011 (H23)	基本的な航空機モニタリング解 析手法の確立	航空機モニタリングで取得したデータを地表面から1 mの高さの空間線量率に換算するためのパラメータの最適化等、基本的な 航空機モニタリングの解析手法を構築した。
2012 (H24)	航空機モニタリング解析システ ムの開発	2011年度に開発した手法をルーチン的に利用できるシステムを構築した。
	DEMデータ抽出ツールの開発	航空機モニタリングにおける測定範囲の標高データを抽出できるツールを開発した。これにより、測定範囲内における地形勾配が 評価可能となった。
2013 (H25)	地形の影響調査	谷や山地形等の特徴的な地形の上空で航空機モニタリングデータを取得し、DEMデータ抽出ツールを用いて航空機モニタリング データに与える影響に関する知見を取得した。
	I-131の地表面における沈着量の評価手法の開発	福島原子力発電所事故直後に取得した航空機モニタリングデータのy線スペクトルをコベル法により再解析し、I-131のピーク面積 からモンテカルロ計算コードにより地表面の沈着量に換算する手法を開発した。
2014 (H26)	人工放射性核種と天然放射性 核種の弁別評価手法の開発	スペクトルデータに関数フィッティング法を適用することにより、Cs-134起源のy線(1,365 keV)とK-40起源のy線(1,461 keV)を弁別する手法を開発した。これにより、人工放射性核種および天然放射性核種の空間線量率を弁別して評価することが可能となった。
2015 (H27)	空気中ラドン子孫核種に起因す るy線を計測するための検出器 の導入	LaBr ₃ 検出器を導入してデータを取得し、航空機モニタリングデータから空気中ラドン子孫核種に起因する ₇ 線計数率をより適切に 減算するための基礎的な手法を構築した。
	積雪の影響評価手法の開発	放射線計測とともにレーザー測量および写真測量データを積雪の前後で取得し、積雪による放射線の減衰係数を評価した。
2016 (H28)	空気中ラドン子孫核種に起因す るy線を減算するシステムの組 み込み	空気中ラドン子孫核種に起因するγ線計数率の減算システムを構築し、航空機モニタリングの解析システムに組み込むとともに、 福島原子力発電所から80 km圏外の航空機モニタリングデータに適用した。
	GNSSの精度評価	測位精度の向上がなされた、当時最新のGNSSを用いて航空機モニタリングを行い、既存のGNSSの性能と比較評価するとともに、 測位精度が航空機モニタリングによる空間線量率の計算値に与える影響について評価した。
2017 (H29)	地形の起伏を考慮した補正手 法のシステム化	Ishizaki et al. (2017) ³³⁾ が開発した、地形の起伏を考慮して空間線量率の計算値を補正する手法を航空機モニタリングに適用で きるようにシステム化した。
2018 (H30)	地形の起伏を考慮した補正手 法による空間線量率計算精度 の向上評価	地形の起伏を考慮した補正手法を過去の航空機モニタリング結果に適用し、地上測定値を指標として従来手法と比較することに より、空間線量率の計算精度の向上について定量的な評価を実施した。
2019(R1)	地形の起伏を考慮した補正手法の航空機モニタリング解析システムへの組み込み	地形の起伏を考慮した補正手法をの航空機モニタリング解析システムに組み込むとともに、福島原子力発電所から80 km圏内の データに適用した。

Table 2-2 航空機モニタリングに関わる技術開発の経緯

3. 測定システムとヘリコプター

3.1. 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)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を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、福島原子力発電所事故当時に DOE により行われた航空機モニタリングで用いられ たシステムと同一であり、ヘリコプター機内に搭載するタイプである。RSI システムのブロック 図を Fig. 3-1 に示し、外観を Fig. 3-2 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 (RSX-3)を2 台使用している (検出部容量合計: 12.6 L)。なお、NaI(TI) 検出器の上部に設置してある LaBr₃検出器 (RSX-1) は空気中のラドン子孫核種に起因する γ線計 数率の弁別 (8 章に詳述する) に使用する。検出器で計測した 1,024 ch (0 ch~1023 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。各検出器のデータは 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エア (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、完全充電で約 5 時間の稼働 が可能である。本報告で使用した RSI システムは 2 セットあるため、以下ではそれぞれ RSI 1 及 び RSI 2 と区別する。

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 QZNAV) 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²²⁾。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. 3-2 RSI システムの外観

3.2. 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線の遮蔽効果を考慮する必要がある。そこで、γ線の測定値への誤差の混入を避けるため、ヘリコプターは機底に燃料タンクのないものに限定した。選定した機種について、Fig. 3-3 に示す。また、2012 年以降の航空機モニタリングで使用した機種(機体番号)とRSIシステムの組み合わせを Table 3-1 に示す。2021 年度は機体繰りの都合から、Bell412 (JA6767)、Bell430 (JA05TV)及び Bell430 (JA02AX)を使用した。なお、Bell430 (JA02AX)は航空機モニタリングにおいて初めて使用する機体である。



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. 3-3 機底に燃料タンクのないヘリコプター機種一覧

Table 3-1 搭載した RSI システムとヘリコプターの組み合わせ

(1/2)

左库	モニタリング名	モニタリング期間	搭載したRSIシステムとヘリコプター機種(機体番号)の組み合わせ				
千度			RSI 1	RSI 2	RSI 3	RSI 4	
2012	第5次モニタリング	2012/06/22~ 06/28	Bell430 (JA05TV) NNK	AS332 (JA9660) NNK			
	第6次モニタリング	2012/10/31~ 11/16	Bell430 (JA6900) AAC				
	東日本第3次モニタリング	2012/10/31~ 12/28	Bell412 (JA6767) NNK	Bell430 (JA05TV) NNK			
	警戒区域及び避難指示区域における 航空機モニタリング(第6.5次)	2013/03/04~ 03/11	Bell412 (JA6767) NNK				
2013	第7次モニタリング	2013/08/27~ 09/28	Bell430 (JA6900) AAC	Bell412 (JA6928) AAC			
			Bell412 NNK (JA6767)	Bell430 (JA05TV) NNK			
	東日本第4次モニタリング	2013/09/03~ 11/04	Bell430 (JA6900) Bell412	Bell430 (JA05TV) NNK			
			(JA6767) NNK				
	第8次モニタリング	2013/11/02~ 11/19	Bell430 (JA6900) AAC	Bell430 (JA05TV) NNK			
	第9次モニタリング	2014/09/01~ 09/20	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA6928) AAC			
2014	東日本第5次モニタリング	2014/09/21~ 11/07	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA6767) NNK Bell412 AAC			
		2015/09/12 ~	Bell430	(JA6928) Bell412			
	第10次モニタリング	09/30	(JA05TV) NNK	(JA6928) AAC			
2015	東日本第6次モニタリング	2015/10/02~ 11/04	Bell430 NNK (JA05TV)	Bell412 NNK (JA6767) Bell412 AAC			
	川内原子力発電所BGモニタリング	2016/02/01~ 02/07		(040720)	Bell412 (JA6928) AAC		
2016	大飯・高浜発電所BGモニタリング	2016/07/20~ 08/01			Bell412 (JA9584) AAC		
	第11次モニタリング	2016/09/14~ 10/15	Bell430 (JA05TV) NNK	S-76 (JA6901) AAC			
	東日本第7次モニタリング	2016/10/15~ 11/18	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA6767) NNK Bell412 (JA9616) AAC			
	伊方発電所BGモニタリング	2016/11/29~ 12/11			Bell430 (JA05TV) NNK		

()内は機体登録番号、NNK:中日本航空株式会社所有、AAC:朝日航洋株式会社所有

Table 3-1 搭載した RSI システムとヘリコプターの組み合わせ

(2/2)

左南	モニタリング名	モニタリング期間	搭載したRSIシステムとヘリコプター機種(機体番号)の組み合わせ							
平度			RSI 1		RSI 2		RSI 3		RSI 4	
2017	泊発電所BGモニタリング	2017/07/24~ 08/02					Bell412 (JA6767)	NNK		
	柏崎刈羽原子力発電所BG モニタリング	2017/07/26~ 08/10 2017/09/30~ 10/01							Bell430 (JA05TV)	NNK
	第12次モニタリング	2017/09/09~ 09/25	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA9616)	AAC				
	東日本第8次モニタリング	2017/09/29~ 11/16	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6767) Bell412 (JA9616) Bell412 (JA6928)	NNK AAC AAC				
	玄海原子力発電所BGモニタリング	2017/11/28~ 12/05					S−76 (JA6655)	AAC		
2018	島根原子力発電所BGモニタリング	2018/07/20~ 07/27					Bell430 (JA6900)	AAC		
	第13次モニタリング	2018/09/06~ 10/16	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell430 (JA6900)	AAC				
	東日本第9次モニタリング	2018/10/08~ 11/15	Bell430 (JA05TV) S-76 (JA6655)	NNK AAC	Bell412 (JA6767) Bell430 (JA05TV)	NNK NNK				
	浜岡原子力発電所BGモニタリング	2018/11/27~ 12/09					Bell430 (JA05TV)	NNK		
	東通・六ヶ所BGモニタリング	2019/06/26~ 07/10					Bell430 (JA6900)	AAC		
	第14次モニタリング	2019/08/29~ 09/18	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell 412 (JA9616)	AAC				
2019	東日本第10次モニタリング	2019/09/18~ 11/02	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA9616) Bell412 (JA6767)	AAC NNK				
	志賀原子力発電所BGモニタリング	2019/11/21~ 11/29					Bell430 (JA6900)	AAC		
2020	美浜・敦賀BGモニタリング	2020/07/22~ 08/10					Bell412 (JA9616)	AAC		
	第15次モニタリング	2020/08/25~ 10/02	Bell430 (JA05TV) Bell412 (JA6767)	NNK NNK	Bell412 (JA6928)	AAC				
	東日本第11次モニタリング	2020/09/22~ 10/30	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6928) Bell412 (JA6767)	AAC NNK				
	近大炉・京大炉BGモニタリング	2020/11/12~ 11/19					Bell412 (JA6928)	AAC		
2021	第16次モニタリング	2021/08/31~ 10/03	Bell430 (JA05TV) Bell412 (JA6767)	NNK	Bell430 (JA02AX)	AAC				
	東日本第12次モニタリング	2021/09/26~ 10/25	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell430 (JA02AX) Bell412 (JA6767)	AAC NNK				
	大飯・高浜BGモニタリング	2021/11/06~ 11/20					Bell412 (JA6928)	AAC		

()内は機体登録番号、NNK:中日本航空株式会社所有、AAC:朝日航洋株式会社所有

3.3. 機体によるγ線遮蔽効果

ヘリコプターは機底に燃料タンクのない機種を選定しているが、機種による機底の材質や構造の差異に付随し、γ線の遮蔽の程度は異なると考えられる。ここでは、γ線遮蔽効果を把握するために点線源(Cs-137:約9.7 MBq)を用いてRSIシステム検出器で測定した計数率を比較した。 地上における空間線量率等への換算パラメータを設定する際に、ヘリコプター機種ごとにキャリブレーションを実施する。そのため、この遮蔽効果の違いを単独でパラメータとして扱う必要はないが、使用するヘリコプターがγ線計数率にどのような影響を及ぼし、それがヘリコプター機種ごとに設定する換算パラメータにどのような差異を生むのかを把握するのに参考となる情報である。

ヘリコプター機体の遮蔽効果の比較結果を Table 3-2 に示す。点線源は検出器からの距離を 50 cm に固定し、計数率の測定時間平均値及び計数誤差(計数率の平方根)を比較した。RSI システム検 出器と線源位置の関係について Fig. 3-4 に示す。なお、計数率の中には Cs-137 の他に自然放射性 核種による寄与も含まれている。以下に比較結果の詳細を記す。

RSI 1を用いた場合の Bell430 (JA05TV) における計数率 (No.1 と表記) を基準として、RSI 1を 用いた場合の Bell412 (JA6767) における計数率 (No.2 と表記)、RSI 2を用いた場合の Bell430 (JA02AX) における計数率 (No.3 と表記) 及び RSI 2を用いた場合の Bell412 (JA6767) における計 数率 (No.4 と表記) をそれぞれ比較した。No.1 に対して、No.2 の計数率は約 24%、No.3 の計数率 は約 14%、No.4 の計数率は約 7%低かった。また、これらの計数率差に対して計数誤差は圧倒 的に小さいことから、No.1 と No.2 及び No.3 と No.4 で見られた差異には、Bell430 と Bell412 の 機体底部の構造の違いに起因する γ線遮蔽効果の差異が強く関与していると思われる。同じへリ コプター機種または機体を用いた場合における計数率 (No.1 と No.3 及び No.2 と No.4) に着目し た場合でも、機種が異なる場合ほど顕著ではないが、計数率に差異が見られたことから、RSI シ ステム検出器間で γ線の検出感度がある程度異なることが示唆される。さらに言えば、ヘリコプ ター機内における RSI 検出器の配置状況も γ線計数率の多寡に影響を及ぼすと考えられる。よっ て、今後も今回のような線源試験を実施し、使用する機種及び機体間の γ線計数率差をなるべく 小さくできるような配置を決定することが望ましい。

No.	System	ヘリコプター	運航会社	計数率(s ⁻¹)±計数誤差(s ⁻¹)	No.1を1に規格化
1	RSI 1	Bell430 (JA05TV)	NNK	$(4.2301 \pm 0.0065) \times 10^5$	1.00
2	RSI 1	Bell412 (JA6767)	NNK	$(3.2022 \pm 0.0057) \times 10^5$	0.76
3	RSI 2	Bell430 (JA02AX)	AAC	$(3.6447 \pm 0.0060) \times 10^5$	0.86
4	RSI 2	Bell412 (JA6767)	NNK	$(3.9133 \pm 0.0063) \times 10^5$	0.93

Table 3-2 Cs-137 線源によるヘリコプター機体の遮蔽効果の比較 (検出器から 50 cm 下方に線源を配置)

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

※計数率は有効数字5桁目で四捨五入し、有効数字4桁で表記した。

※計数率はCs-137線源の他に自然放射性核種による寄与も含んでいる。



Fig. 3-4 線源試験イメージ

3.4. 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 Tl-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は、同様にメーカーから 示されている推奨値である 0.8 を下回る場合に高圧電源の電圧の再調整を行う。第16次モニタリ ング及び東日本第 12 次モニタリングの実施期間における RSI システム検出器のエネルギー分解 能とアンプのゲインの推移について Fig. 3-5 及び Fig. 3-6 に示す。本図は、RSI システムに組み込 まれている計 6 本の検出器ごとに示している。エネルギー分解能はモニタリング期間を通じて 6 %未満であり、アンプのゲインが 0.8 を下回ることがなかったため、再調整を実施する必要性 は生じなかった。なお、ゲインは測定日を経るにつれて緩やかな上昇傾向にあるが、これは機器 の異常ではなく、測定日が夏から秋に移り変わり、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。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補正可能である。 また、実際には取得したデータを確認し、エネルギーピークの位置に変動がないことを確認して いる。



Fig. 3-5 RSI システムのエネルギー分解能及び Gain の変動 (RSI 1)



Fig. 3-6 RSI システムのエネルギー分解能及び Gain の変動 (RSI 2)

4. データ取得及び解析方法

4.1. 上空での測定値の地上への換算に関する基本的な考え方

上空から地上の放射線を測定する基本的な考え方は、以下のような仮定に基づいている。

- ・上空で測定されている計数値は、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 当する地上の放射線量の平均値とする。
- ・測定対象となる地表は平坦かつ放射線の分布は一様とする。

このような条件において上空で測定されている計数値を考察するため、γ線の遮蔽計算に広く 用いられている点減衰核積分コード QAD-CGGP2R を用いてシミュレーションが行われた¹⁷⁾。以 下に当該シミュレーションの概要とシミュレーションから得られた知見を概説する。

当該計算では、Cs-134 と Cs-137 が無限平板 (実際の計算では、無限相当とした半径 2,000 m× 高さ 1 mm)で均一に分布していると仮定し、対地高度と空間線量率の関係が求められた (Fig. 4-1)。 このように、対地高度 50 m 以上では、空間線量率と対地高度は指数の相関関係にある一方で、 対地高度 50 m 以下では指数の関係から外れることが明らかとなった。また、対地高度 50 m 以上 では地表面からの放射線が検出器軸 (地面と平行な方向)に対し垂直方向から入射する成分が支 配的であるため、線源からの距離に対して指数関数的にγ線が減衰するのに対し、対地高度 50 m 以下では線源からの距離が近くなるため、対地高度が低くなるにつれ影響を受ける線源の範囲が 広がり、検出器軸に対し垂直方向以外の斜め方向から入射する放射線が増えるため指数関数の関 係から逸脱することが示唆された。

このように、上空から地上を測定する際には、対地高度が高くなると地上の測定範囲が広がる。 上空における地上からのγ線の到達状況を定量的に理解するために、計算コードを用いてシミュ レーションを実施した例 ¹⁷⁾を示す。光子・電子挙動シミュレーションには、カスケードモンテ カルロ計算コード EGS5³⁶ (Electron Gamma Shower Version 5) が使用され、RSI システムの検出器 がモデル化³⁰⁾されるとともに、地上に無限平板状の半径800m×高さ1mmのCs-137円柱線源が 模擬された。当該シミュレーションでは、モデル化した検出器を線源円盤の中心軸上に配置し、 線源円盤と検出器の距離を変化(50m、100m、300m及び500m)させ、検出器に入射するγ線の 計数率及び同ジオメトリにおいて検出器に到達するγ線の起源となる線源の位置が計算された。 無限平板線源における任意の半径内の放射線が検出器で計数された割合を Fig. 4-2 に示す。本図 から、航空機モニタリングの基準高度である300mから計測した場合、線源の概ね300mの円内 の放射線の計数が 80%以上の割合を占めることが分かる。また、検出器の位置から同軸上の線 源位置を中心として、100mごとのドーナツ状の面積で分割し、その部分の放射線が検出器で計 数された割合を Fig. 4-3 に示す。線源からの距離は 100 m、300 m、500 m の場合で比較され、高 度 300 m の場合を見ると、100 m~200 m の位置が 30 %で最も割合が大きく、0 m~100 m 及び 200 m~300 m は 20 %程度であった。この割合の違いは計数効率を考慮すると大きくなく、対地 高度 300 m から測定されるのは、地上の半径 300m 円内における y 線計数率の平均値と考えられ る。一方、検出器と線源の距離が 50 m の場合は 80%を占める線源半径は 120 m、検出器と線源 の距離が 100 m の場合は線源半径が 200 m、500 m の場合は線源半径が 400 m であり、この傾向

は Fig. 4-1 で示された対地高度と上空での空間線量率の関係と矛盾せず、高度が低くなるにつれて高度と測定範囲の半径の関係が 1:1 から逸脱し、対地高度と比較して測定範囲が広くなることが示された。

以上の計算結果から、航空機モニタリングは飛行する対地高度 (300 m) と同じ半径 (300 m) の 円内の放射線を飛行方向に向かって移動しながら測定していると説明できる (Fig. 4-4)。飛行する 対地高度が変化すると地上の測定範囲が変化することになり、測定値の不確かさをなるべく低減 するためには対地高度は一定でフライトすることが望ましい。実際には、以上のような理論や測 定の不確かさを考慮し、対地高度 300 m を基準として対地高度が 500 m までのデータを使用し た。なお、この対地高度から逸脱した状態で測線フライトが 1 km 以上に及んだ場合には、再フ ライトによりデータを再取得することとした。



Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係

(半径 2,000 m×高さ1 mmの円柱線源で計算¹⁷⁾。図中の実線は指数関数による近似曲線である。)



Fig. 4-2 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の積算計数に対する線源位置の関係¹⁷⁾ (上空での検出器の計数率を100%に規格化し、線源半径由来の計数率の割合を積算)



Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の線源位置ごとの計数の割合¹⁷⁾ (上空での検出器の計数率を 100 %に規格化し、100 m ごとのドーナツ状部分由来の計数率の割 合)


Fig. 4-4 上空からの測定イメージ

4.2. 航空機モニタリングの方法

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と第16次モニタリング及び東日本第12次モニタリングで用いたへ リコプターごとのフライト実績について記述する。

4.2.1. データ取得方法

航空機モニタリングによるデータは、下記のようなフライト条件で取得した。なお、条件は、 気象条件や地形の高度勾配によって若干変化する。フライトイメージを Fig. 4-5 に示す。また、 測定データは、1 秒ごとに GPS の位置情報と検出器の γ線のスペクトルを記録し、下記の対地高 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大きく含まれるため、空間線量率等の 算出には用いないこととした。予定したフライト測線について Fig. 4-6 に示す。測線の方向は第 16 次モニタリングについては東西方向、東日本第 12 次モニタリングについては南北方向とした。 [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~500m(=1,750ft)
- 測線間隔

○第16次モニタリング(福島原子力発電所から半径3km以内及び海上を除く)

0.6 km: 避難指示区域 (2011年9月30日時点における避難指示区域:以下、旧避 難指示区域)

0.9 km: 0.2 µSv/h (約 1.0 mSv/年 相当、5.1 に詳述する。) 以上の地域

1.8 km: その他の地域

○東日本第12次モニタリング

1.0 km: 0.2 µSv/h 以上の地域

3.0 km または 6.0 km: その他の地域



Fig. 4-5 フライトイメージ



Fig. 4-6 予定したフライトの測線 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

4.2.2. ヘリコプターによるフライトの実績

3.2 節に記述した通り、第 16 次モニタリング及び東日本第 12 次モニタリングでは Bell412 (JA6767)、Bell430 (JA05TV)及び Bell430 (JA02AX)を使用した。第 16 次モニタリングでは、福 島原子力発電所を境界として測定エリアを南北に分割し、Bell412 (JA6767)とBell430 (JA05TV) で北側を測定し、Bell430 (JA02AX)で南側を測定した。また、東日本第 12 次モニタリングで も同様にして測定エリアを南北に分割し、Bell430 (JA05TV)で北側 (宮城県一帯)、中央部 (福 島県西部)及び南側の一部 (栃木県東部から茨城県北西部)を測定し、Bell412 (JA6767)及び Bell430 (JA02AX)で西側 (栃木県中央部から群馬県一帯)及び南側 (茨城県、千葉県北部、埼玉 県北部)を測定した。第 16 次モニタリング及び東日本第 12 次モニタリングに要した期間は以 下の通りである。

[フライトに要した期間]

○第16次モニタリング: 2021 年8月31日~10月3日(延べ50フライト)

○東日本第12次モニタリング:2021年9月26日~10月25日(延べ66フライト)

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、回数等をまとめた表を Table 4-1 に示す。測線上をフライトしたときに取得した GPS 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、前項で示した速度の範囲内であった。東日本第 12 次モニタ リングにおいて Bell412 (JA6767)の平均速度が比較的小さいのは、当該機体で起伏の激しい山 岳地帯を測定しており、その際に基準対地高度あるいは対地高度の許容範囲を遵守するために、 飛行速度を落とす必要があるためである。第 16 次モニタリングの期間中、9 月 7 日に Bell430 (JA05TV)のフロントガラスに破損が発見されたため、当該機体によるモニタリングを一時中 断し、Bell412 (JA6767) に交代して測定エリア北側のモニタリングを継続した。

Table 4-1 ヘリコプターごとのフライト距離及び速度とフライト回数

			実績		
モニタリング名	測線フライト距離	総飛行距離※		平均速度 (km/h)	
	(km)	(km)	Bell412 (JA6767)	Bell430 (JA05TV)	Bell430 (JA02AX)
第16次モニタリング	9,680	19,665	147	153	143
東日本第12次モニタリング	11,300	25,327	131	148	153
		※週線フライト	以外の、空輸やキャリ	ブーションフライト第に	よる飛行距離も含む。

10
len
9 11
10
40
3
100
Ini
011
1
15
20
III-
100
NO
4
11
-
htt
HF
-
1
~
1
1D
11.
D
1
>
11
TT
16.
1
5
5
ゴ
ブレ
ーノブレー
ーノブレー
トリブレー
ーノレノー
キャリブレー
- イレノブレー
- イビレキキウ
- クキャリブレ-
前やキャリブレー
職やキャリブレー
調やキャリブー
住職 や キャリブレー
空動 ウキャリブレー
、空動やキャリブレー
、 空動やキャリブレー
0、空輸やキャリブレ-
の、 空動 やキャリブレー
40、空動やキャリブレ-
やの、 空動 や キャリブレー
「外の、 空動や キャリブレー
以外の、 空輸や キャリブレー
以外の、 空輸や キャリブレー
ト以外の、 空輸や キャリブレー
ト以外の、空輸やキャリブレ-
イト以外の、空動やキャリブレー
ディト以外の、 空輸や キャリブレー
ライト以外の、空輸やキャリブレー
ライト以外の、 空輸 や キャリブリー
フライト以外の、空輸やキャリブレ-
ミフライト以外の、空輸やキャリブレ-
線フライト以外の、空輸やキャリブレ-
線フライト以外の、空輸やキャリブレ-
闫線フライト以外の、空輸やキャリブレ-

	ペ辺	フライト回数	G	00	66	
		フライト回数	36	67	15	
	Bell430 (JA02AX)	3ell430 (JA02AX) 测定終了		2021+37124 H	2021年10月8日	
		測定開始		ZU21+0731日	2021年9月26日	
		フライト回数	2×	2	31	
	el1430 (JA05TV)	測定終了	2021年9月7日	2021年10月3日	2021年10月25日	
	Be	測定開始	2021年8月31日	2021年9月24日	2021年9月28日	
	ell412 (JA6767)	フライト回数	18		20	
		測定終了	7071年0月71日	2021+3772+B	2021年10月25日	
	8	Bell 測定開始 2021年9月10日 2		50214841202	2021年10月8日	
	$T - h_1 \wedge h_2$	トーシング	第16七日一カニン・ゲ	第10ペトーション	東日本第12次モニタリング	

※機体のフロントガラスに破損が発見され、修理を行うために一時的にBell412 (JA6767)と交代した。

4.3. 換算パラメータの設定及び妥当性確認のためのキャリブレーションフライト

航空機モニタリングにより上空で取得したデータを、地表面から1mの高さの放射線量や地表 面の放射性 Csの沈着量に換算するためのパラメータについては、2014年度までに取得したキャ リブレーションフライトのデータを基に、ヘリコプター機種または機体ごとに数値を設定してい る。しかしながら、3.2節で記述したように、Bell430 (JA02AX)は航空機モニタリングで初めて 使用する機体であることから、2021年度に実施したキャリブレーションフライトのデータを基 に設定することとした。Bell412 (JA6767)及びBell430 (JA05TV)については、設定したパラメー タの妥当性を確認するためにキャリブレーションフライトを行った。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 4-2 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 線計数率の多寡を補正す 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、線量率や地形の変化が少ない地点において距離が約3kmのラインを設定し、その上空 において対地高度を変化 (150 m、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. 4-7 に示す。また、テストラインとして選定した場所について Fig. 4-8 に示す。

・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 ントから半径 1,000 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、テストポイントでは半径 1,000 m の範囲内で 60 地点を目 安に NaI(TI)検出器 (日立製作所製 TCS-1172)を用いて地表面から1 m の高さの空間線量率の測 定 (以下、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 (空間線量率換算係数; Conversion factor of Dose-rate: *CD* ([s⁻¹]/[µSv/h])) が求まる。Fig. 4-9 にテストポイントフライトのイメージを示す。また、テストポイントとして 選定した場所を Fig. 4-10 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 300 m~2,400 m 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 線フライトのイメージを Fig. 4-11 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、天候等を見ながら太平洋上の適当な位置で実施する。ただし、天候等 の問題で海上への移動が困難な状況下では、起伏の少ない陸地において当該フライトを実施す る。なお、陸地で実施した場合でも対地高度約 300 m から 2,400 m まで上昇するが、地上から の放射線の影響がほとんどないと考えられる対地高度約 900 m 以上で取得された γ 線計数率デ ータを原則として用いることになる。

・Rn 影響フライト及び BG フライト

Rn影響フライトは空気中に存在するラドン子孫核種の影響を考察するために、ある特定の場所 (例えば、測定拠点近くの測線上)の上空において対地高度約 450 m~900 m までを直線的に 上昇しデータを取得するものである。また、BGフライトは、地上からのγ線の影響がほとんど ないと考えられる、対地高度約 900 m を約 2 分間直線飛行することにより、ヘリコプター機体 のバックグラウンド計数率を取得するものである。両フライトは原則として、セットで 1 日 1 回実施する。Rn影響フライト及び BG フライトのイメージを Fig. 4-12 に示す。

・天然核種フライト

福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs による影響のないと考えられる場所において対地高 度約 300 m をフライトすることによりデータを取得し、γ線スペクトルから天然放射性核種の 影響を差し引き、地表面の放射性 Cs 沈着量を算出するためのスペクトルインデックスを算出 するものである。天然放射性核種による影響の減算方法については4.6.1に詳述する。本フライ トは、過去に使用した実績のない機体を用いる場合にのみ、1 回実施することとしている。前 述の通り、Bell430 (JA02AX) は航空機モニタリングにおいて使用実績がないため、当該機体を 用いて天然核種フライトを実施した。天然核種フライトの場所を Fig. 4-13 (左) に示す。 ・オーバーラップフライト

各ヘリコプター機種または機体に設定される換算パラメータの妥当性評価を行うために、 RSI システムとヘリコプター機種または機体の組み合わせの変更が生じる前後で、同一の場所 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。オーバーラップフライトの場所を Fig. 4-13 (中央及び右)に示す。

Table 4-2 キャリブレーションフライトの概略

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	所定のテストライン上 で対地高度を変化 (150 m、300 m、450 m、600 m、750 m、900 m 及び 1,500 m) させてフライ ト	測線 5,000 km をフラ イトするごとに 1 回 実施
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300mで3 分間ホバリング	測線 5,000 km をフラ イトするごとに 1 回 実施
宇宙線フライト	宇宙線の影響を調査	海上または陸上を 300 m~2,400 m まで上昇	1週間に1回を目安に 実施
Rn影響フライト	ラドンの影響を調査	ある特定の場所を対地 高度 450 m~900 m まで 直線的に上昇	毎日
BG フライト	ヘリコプター機体の バックグラウンド計 数率を調査	対地高度 900 m を約 2 分間直線飛行(Rn 影響 フライト後に実施)	毎日
天然核種フライト	 天然放射性核種の影響を減算し、放射性 Cs 沈着量を算出する ためのスペクトルインデックスを算出 	福島原子力発電所事故 由来の放射性 Csによる 影響のないと考えられ る場所でフライト	過去に機体の使用実 績がなければ1回
オーバーラップ フライト	換算パラメータの 妥当性確認	特定の場所をフライト	 ヘリコプター機種ま たは機体と RSI シス テムの組み合わせの 変更が生じる前後で 1回ずつ



テストライン:線量率、地形の変化が少ない場所

Fig. 4-7 テストラインフライトのイメージ



TestLine 1 (岩手県奥州市)

TestLine 3 (群馬県みどり市)



TestLine 4 (茨城県那珂市)

TestLine 5 (栃木県大田原市)

Fig. 4-8 テストラインの場所



(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。)



TestLine A (福島県須賀川市) Fig. 4-8 テストラインの場所 (2/2)

(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。)





TestPoint 1 (岩手県奥州市)



TestPoint 4 (茨城県那珂市)





TestPoint 5 (栃木県大田原市)





TestPoint E (福島県浪江町)

Fig. 4-10 テストポイントの場所

(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。)





海上または陸上

Fig. 4-12 Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージ



天然核種フライト測線 オーバーラップフライト測線 オーバーラップフライト測線
 (新潟県新潟市) (福島県本宮市) (栃木県那須塩原市)
 Fig. 4-13 天然核種フライトの測線とオーバーラップフライトの測線

(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. 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。

- ① 放射性 Cs からの γ線
- ② 天然放射性核種からのγ線
- ③ 宇宙線

④ その他 (空気中ラドン子孫核種、ヘリコプター機体のバックグラウンド計数率を含む。)

第16次モニタリング及び東日本第12次モニタリングでは、放射性 Cs 由来のγ線を測定するこ とが主目的であるため、全計数率から②~④起源の計数率はバックグラウンドとして減算する必 要がある。これらを考慮した解析のフローを Fig. 4-14 に示す。なお、本節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。



Fig. 4-14 解析のフロー

4.5. 空間線量率への換算方法

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へ換算する手順は、大まかに 以下の通りである。

- バックグラウンド減算:全計数率から、前項で挙げたバックグラウンド(天然放射性核種からのγ線、宇宙線及びその他(空気中ラドン子孫核種、ヘリコプター機体のバックグラウンド計数率を含む。))に起因する計数率を減算する。
- ② 対地高度補正:実際のフライト高度と基準高度とのずれにより生じる、γ線計数率の多寡 を高度補正係数により補正する。
- ③ 空間線量率への換算:①、②を経て得られた計数率を空間線量率換算係数 (CD) により地 表面から1mの高さの空間線量率に換算する。

以下に上記項目の詳細について述べる。なお、空気減弱係数 *AF* や *CD* といった換算パラメー タについては、測定対象とする γ 線エネルギーの多寡に顕著な影響を受けることなく、概ね一定 の値を示す (4.12.節に詳述する。) ことが知見として得られている。よって、放射性 Cs に起因す る γ 線及び天然放射性核種由来の γ 線に対する *AF* や *CD* は同一とみなせるものとした。また、 放射性 Cs の沈着量の算出方法については次節に記す。

4.5.1. バックグラウンド減算(宇宙線及びその他)

航空機モニタリングにおいて、天然放射性核種からの γ 線、宇宙線及びその他 (空気中ラドン 子孫核種、ヘリコプター機体のバックグラウンド計数率を含む。)に起因する γ 線計数率はバッ クグラウンドとなる。本項では、これらバックグランドの減算方法について示し、天然放射性核 種からの γ 線の減算方法は 4.6.1.項に詳述する。

これまでの経験から、海抜高度が上昇すると宇宙線起因の計数率が上昇することが分かってい る。宇宙線起因の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. 4-15 に海抜高度と宇宙線の計数率の関係例³⁰⁾ を示す。この例は、沖縄と北海道での海上において、50 m~2,000 m の海抜高度で取得したデー 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線の計数率をプ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線の計数率としたの7 kmの計数率をプ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7 km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。また、2,800 keV を超える γ線の計数率と 2,800 keV 以下の計数率の比(*CR-index*) は高度に依存せず一定の数値を 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起因の γ線の計数率を算出 し、全計数率から差し引いた。実測したデータを基に算出した *CR-index* について Table 4-3 に示 す。これらのパラメータを実際の解析に使用しバックグラウンドの減算を行った。具体的な減算 方法は 4.5.4.項に示す。 空気中ラドン子孫核種、ヘリコプター機体のバックグラウンド計数率の減算については、BG フライト(地上からの放射線が届かないと考えられる対地高度約900mをフライト)を実施して得ら れたγ線計数率を用いる。BGフライトによって陸地及び海上で取得したスペクトルの例をFig.4-16 に示す。このように、BG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バックグラウンドの減算に用いることが可能 である。また、BGフライトで取得したデータを基に算出した、バックグラウンド計数率の算術 平均値を Table 4-3 に併記した。標準的な解析手法では、BGフライトで取得したγ線計数率をそ の日に測定したエリア全体におけるバックグランド計数率の代表値として取り扱うが、BGフラ イトには空気中ラドン子孫核種に起因する計数率も含まれており、空気中のラドン濃度は日単位 や季節単位で変動することが知られている。よって標準的な解析手法によるバックグラウンドの 減算には、ある程度の不確かさが伴うことが推察される。空気中ラドン子孫核種による影響を測 定点ごとに除去してバックグラウンド計数率を評価し、減算する手法(ラドン弁別手法)につい ては8章に詳述する。





- 39 -

Table 4-3 RSI システムとヘリコプターの組み合わせごとのバックグラウンド計数率及び CRindex

RSI System	ヘリコプター機種(機体番号)	運航会社	CR-index	バックグラウンド 計数率(s ⁻¹)
	Bell430 (JA05TV)	NNK	2.93	477
RSI I	Bell412 (JA6767)	NNK	2.97	499
	Bell430 (JA02AX)	AAC	3.82	406
R31 Z	Bell412 (JA6767)	NNK	2.97	450

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社





4.5.2. 対地高度補正

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線計数率の多寡を補正す るために、テストラインで取得したデータを基に、実効的な空気減弱係数*AF*を求め、計算式[1] から対地高度補正係数 *HF* を算出した。

$$HF = \exp[AF \left(H_{std} - H_{a}\right)]$$
^[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_a:対地高度 (GPS 高度-DEM-ジオイド高度)

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)³⁷⁾及びジオイド高³⁷⁾を差し引いて求めた^{*1}。Fig. 4-17 に対地高度と 計数率の関係の例について示す。このように、Microsoft Excel[®]上で散布図としてプロットし、指 数関数近似して得られた傾きを AF とした。なお、Microsoft Excel[®]による指数関数近似は非線形 回帰でなく、指数関数の両辺を対数変換して線形回帰した結果であることに留意する必要がある。

実際に解析に使用した換算パラメータと標本標準偏差 (1o) について Table 4-4 に示す。本表に 示した数値は 2012 年から 2014 年 (第6次モニタリングから第9次モニタリング及び東日本第3次 モニタリングから東日本第5次モニタリング)で取得した数値の算術平均値とその標本標準偏差 であり、今までに実施してきた福島原子力発電所周辺の空間線量率の評価に一貫性を持たせる観 点から、これらの換算パラメータを固定して用いている(以下、固定パラメータ)。前述した通り、 Bell430 (JA02AX) は過去に航空機モニタリングにおいて使用実績のない機体であることから、 Bell430 に対する固定パラメータを用いずに、2021 年度に実施したキャリブレーションフライト における対地高度や計数率の一定性等を評価したうえで、最も信頼できると考えられる数値を1 つ選定し、換算パラメータとして用いることとした。そのため、Table 4-4 には Bell430 (JA02AX) の各パラメータに対する平均値や標本標準偏差は記載されていない。

固定パラメータを用いることと Bell430 (JA02AX) に設定する AF の妥当性及び RSI システムの 健全性を確認するために、2021 年度にテストラインフライトのデータを取得した。空気減弱係 数 AF のデーター覧を Table 4-5 に示す。今回取得した AF の平均値は Table 4-4 で示した固定パラ メータよりもやや小さくなる傾向にあった。とりわけ、Bell412 (JA6767) の 10 月 14 日に取得し た AF が小さくなったが、その決定係数が他のデータよりも劣っていることから、信頼性は比較

^{*&}lt;sup>1</sup>GPS で測定される高度は、世界測地系で使用され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。

的低いと思われる。このデータを除いた *AF* の数値のほとんどが、Table 4-4 に示した固定パラメー タとその標本標準偏差以内に収まっていた。また、Bell430 (JA02AX) の *AF* は同機種である Bell430 (JA05TV) の *AF* よりもやや小さい傾向にあるが、9月 12 日と9月 20 日に取得した *AF* は 固定パラメータとその1標本標準偏差以内に収まっていた。そこで、Bell430 (JA02AX) に対して はこれら 2 つの内、決定係数がより良好な9月 20 日に TestLine A (福島県須賀川市) で取得した *AF* である-0.00692 m⁻¹を採用した。

以上のことから、Bell412 (JA6767) 及び Bell430 (JA05TV) に対して固定パラメータの *AF* を用いること、Bell430 (JA02AX) で取得及び設定した *AF* は妥当であると考えられ、RSI システムの健全性も確認できた。



Fig. 4-17 対地高度と計数率の関係例 (Bell430 (JA6900)、2013 年 11 月 5 日、TestLine A にて実施)

Table 4-4 使用した空気減弱係数 AF のまとめ (表中の SD は各パラメータの標本標準偏差 (1σ) である。)

		Bell412 (JA676	7)		Bell430 (JA05T	V)	Bell430 (JA02AX)
	Value	SD(1σ)	Number of Data	Value	SD(1 σ)	Number of Data	Value
$AF(m^{-1})$	-0.00720	± 0.00042	21	-0.00720	± 0.00040	35	-0.00692

※SD:標本標準偏差

I Location Date Location Location <thlin< th=""> <thlin< th=""> Lin <</thlin<></thlin<>	lo. RSI Syster	h Helicopter (Body No.)	Operation Company NNK	Location Tootl inc. A	Date	Α μ(m ⁻¹) 000700	<i>Е</i> R ² 0.00005
Definit Condition Condition <thcondition< th=""> <thcondition< th=""> <thcondition< <="" td=""><td> -</td><td>Bell412 (JA6767)</td><td>NNK</td><td>TestLine A</td><td>2021/09/12</td><td>-0.00709</td><td>0.99905</td></thcondition<></thcondition<></thcondition<>	-	Bell412 (JA6767)	NNK	TestLine A	2021/09/12	-0.00709	0.99905
Average until 2020) -0.00647 stem Helicopter (Body No.) Operation Location Date AF 1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine A 2021/10/03 -0.00713 0.99993 1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine A 2021/10/10 -0.00636 0.99993 1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine A 2021/10/124 -0.00636 0.99993 1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 -0.00636 0.99955 1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 -0.00636 0.99955 1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 -0.00636 0.99955 1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 -0.00687 0.99955 2 Bell430 (JA02XX) Operation Location Date µ(m ⁻¹) R ⁻¹ 2 Bell430 (JA02XX) AGC TestLine A 2021/09/12 -0.00692	N	Bell412 (JA0/0/)	NNK	l estLine 3	Average(2021)	-0.00640	0.99/80
Image: Section Secting Section Secting Section Section Section Section Section Section					Average(until 2020)	-0.00647	
Vsterm Tenicopter (body No.) Company Locauon Locauon <thlocauon< t<="" td=""><td>40</td><td></td><td>Operation</td><td></td><td>-+</td><td>Y</td><td>F</td></thlocauon<>	40		Operation		-+	Y	F
I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine A 2021/10/10 -0.00713 0.99978 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine I 2021/10/10 -0.00636 0.99940 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine I 2021/10/18 -0.00636 0.99995 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine I 2021/10/24 -0.00685 0.99995 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 5 2021/10/24 -0.00685 0.99952 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 5 2021/10/24 -0.00685 0.99952 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 -0.00685 0.99952 Verage(until 2020) Operation Location Location Location AF verage(until 2020) Combany Company TestLine A 2021/09/12 -0.00681 0.99981 vstam Helicopter (Body No.) Operation Location Location Date $\mu(m^{-1})$ R	Aster	n neilcopter (Douy No.)	Company	Locadori	Date	u(m ⁻¹)	\mathbb{R}^2
I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 1 2021/10/10 -0.00698 0.999940 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 1 2021/10/18 -0.00636 0.99940 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 5 2021/10/24 -0.00685 0.99955 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 -0.00685 0.99955 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 -0.00685 0.99955 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 -0.00685 0.99955 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 0.00767 0.99957 vstem Helicopter (Body No.) Operation Location Location Date µ(m ⁻¹) R ² vstem Helicopter (Body No.) Company Location Location Date µ(m ⁻¹) R ² vstem Helicopter (Body No.) Company Location Location Date µ(m ⁻¹) R ² vstem Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/12 0.00692 0.999964 vstem Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/	SI 1	Bell430 (JA05TV)	NNK	TestLine A	2021/10/03	-0.00713	0.99978
I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 1 2021/10/18 -0.00636 0.99940 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 5 2021/10/24 -0.00702 0.99955 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 5 2021/10/24 -0.00685 0.99955 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 -0.00685 0.99955 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 -0.00687 0.99955 I1 Bell430 (JA02X) Operation Location Location Date $\mu(m^{-1})$ R^2 vstem Helicopter (Body No.) Operation Location Location Date $\mu(m^{-1})$ R^2 vstem Bell430 (JA02XX) AAC TestLine A 2021/09/12 0.00681 0.99980 I2 Bell430 (JA02XX) AAC TestLine A 2021/09/12 0.00682 0.99980 I2 Bell430 (JA02XX) AAC TestLine A 2021/09/20 0.00681 <td< td=""><td>SI 1</td><td>Bell430 (JA05TV)</td><td>NNK</td><td>TestLine A</td><td>2021/10/10</td><td>-0.00698</td><td>0.99993</td></td<>	SI 1	Bell430 (JA05TV)	NNK	TestLine A	2021/10/10	-0.00698	0.99993
I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 5 2021/10/24 -0.00702 0.99952 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 0.00685 0.99952 I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 0.00685 0.99952 Yetem Average(JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 0.00687 0.99952 Yetem Helicopter (Body No.) Operation Location Location Date $y(m^{-1})$ R^2 Yetem Helicopter (Body No.) Operation Location Location Date $y(m^{-1})$ R^2 Yetem Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/12 0.00681 0.99987 Yetem TestLine A 2021/09/12 0.00645 0.99954 Yetem AAC TestLine A 2021/09/12 0.00645 0.99954 Yetem AAC TestLine A 2021/09/12 0.00645 0.99954 Yetem Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/09/12 0.00645 0.99954 Yetem Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/09/12 0.00645 0.99954 Yetem AAC Te	RSI 1	Bell430 (JA05TV)	NNK	TestLine 1	2021/10/18	-0.00636	0.99940
I1 Bell430 (JA05TV) NNK TestLine 4 2021/10/24 -0.00685 0.99952 Average(2021) -0.00687 0.99952 Average(2021) -0.00687 0.99952 ystem Helicopter (Body No.) Operation Location Location Date AF ystem Helicopter (Body No.) Operation Location Location Date $\mu(m^{-1})$ R^2 i2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/12 0.00681 0.99987 i2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/12 0.00682 0.999890 i2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/20 0.00682 0.99954 i2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/20 0.00682 0.99954 i2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/20 0.00682 0.99954 i2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/20 0.00687 0.99954	I ISI	Bell430 (JA05TV)	NNK	TestLine 5	2021/10/24	-0.00702	0.99995
Average(2021) -0.00687 Average(2021) -0.00687 ystem Helicopter (Body No.) Operation Location Date M^{-1} R^{-} ystem Helicopter (Body No.) Operation Location Date M^{-1} R^{-} i1 2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/12 -0.00681 0.99987 i1 2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/20 0.00682 0.99954 i1 2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/28 -0.00645 0.99954 i1 2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00587 0.99954 i1 2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00645 0.99954 i1 2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00587 0.99954	I IS	Bell430 (JA05TV)	NNK	TestLine 4	2021/10/24	-0.00685	0.99952
Average(until 2020) -0.00727 ystem Helicopter (Body No.) Operation Location Date AF I2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/12 -0.00681 0.99987 I2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/12 -0.00681 0.99987 I2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/20 -0.00645 0.999964 I2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 4 2021/10/04 -0.00645 0.999964 I2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00645 0.999954 I2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00645 0.999954 I2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00657 0.999991					Average(2021)	-0.00687	
ystem Helicopter (Body No.) Operation Location Date Date <u>h(m⁻¹) A</u> 12 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/12 -0.00681 0.99987 12 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/20 -0.00692 0.99990 12 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/28 -0.00645 0.99954 12 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/10/04 -0.00645 0.99954 12 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00645 0.99891 12 Average(2021) -0.00651 0.99891					Average(until 2020)	-0.00727	
ystem Helicopter (Body No.) Company Location Date <u>μ(m⁻¹) R²</u> 12 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/12 -0.00681 0.99990 12 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/20 -0.00692 0.99990 12 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 4 2021/09/28 -0.00645 0.99954 12 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00645 0.99891 12 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00657 0.99891 12 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00657 0.99891 12 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00657 0.99891			Oneration			4	4
 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/12 -0.00681 0.99987 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/20 -0.00692 0.99990 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 4 2021/09/28 -0.00645 0.99954 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00645 0.99891 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00587 0.99891 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 X001/10/04 -0.00587 0.99891 	Syster	n Helicopter (Body No.)	Company	Location	Date	µ(m ⁻¹)	\mathbb{R}^{2}
i 2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine A 2021/09/20 -0.00692 0.99990 i 2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 4 2021/09/28 -0.00645 0.99954 i 2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00587 0.99891 Average(2021) -0.00651 -0.98891 ※NNK:中日本航空株式会社、AAC:朝日航洋株式会社	RSI 2	Bell430 (JA02AX)	AAC	TestLine A	2021/09/12	-0.00681	0.99987
if 2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 4 2021/09/28 -0.00645 0.99954 if 2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021/10/04 -0.00587 0.99891 Average(2021) -0.00651 ※NNK:中日本航空株式会社、AAC:朝日航洋株式会社	RSI 2	Bell430 (JA02AX)	AAC	TestLine A	2021/09/20	-0.00692	0.99990
if 2 Bell430 (JA02AX) AAC TestLine 3 2021 / 10 / 04 Average(2021) -0.00651 ※NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社	RSI 2	Bell430 (JA02AX)	AAC	TestLine 4	2021/09/28	-0.00645	0.99954
Average(2021)	RSI 2	Bell430 (JA02AX)	AAC	TestLine 3	2021/10/04	-0.00587	0.99891
					Average(2021) ※NNK: 中日本航空株式:	−0.00651 今社, AAC: 朝日	航洋株式会社

Table 4-5 2021 年度に取得した空気減弱係数 AF データー覧

Å

JAEA-Technology 2022-027

4.5.3. 空間線量率への換算

RSI システムはヘリコプターの中に搭載するため、ヘリコプターの機底の遮蔽効果に依存して、 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)は変化すると考 えられることから、機種または機体ごとに設定が必要である。現在、固定パラメータとして用い ている CD について Table 4-6 に示す。これらの CD を固定パラメータとして用いることと Bell430 (JA02AX) に設定する CD の妥当性及び RSI システムの健全性を確認するために、2021 年度にお けるテストポイントフライトデータを取得した。また、CD を算出するのに必要となる地上測定 値をテストポイントの中心地から半径 1,000 m の範囲において 60 地点で取得した。4.3 節で記述 した通り、本報告では地上測定に TCS-1172 を用いたが、その空間線量率は昨年度に日立製作所 製 TCS-172B で測定したものよりも全体的に低くなる傾向が見られた。そこで、地上測定値の差 異が NaI(TI)検出器の機種の違いに起因するものかを確かめるため、TCS-172B と TCS-1172 の地 上測定値の比較試験を実施した。当試験は空間線量率が比較的高いと思われる福島県浪江町内の 9地点 (Fig. 4-18) で実施した。なお、当試験で使用した TCS-172B 及び TCS-1172 の Cs-137 線源 を用いた校正記録については、1 cm線量当量率(校正ポイント 0.5 µSv/h)の指示誤差は±5%以内 であり異常や劣化等は見られなかった。各地点において両検出器を用いて地上測定値を5回記録 し、それぞれに付された校正定数を乗じた後の算術平均値を比較した。地上測定結果を Table 4-7 に示す。このように、同一地点であっても地上測定値に 10%前後の差異が見られ、TCS-1172の 方が地上測定値は低くなる傾向にあった。本報告では昨年度までの経緯を加味し、CD の算出や 航空機モニタリングによる空間線量率との比較に用いられる地上測定値に対する整合性を保つ観 点から、TCS-1172 による地上測定値を TCS-172B 相当の地上測定値に補正し使用することとし た。具体的には、Table 4-7 で示した地上測定値の比 (TCS-172B / TCS-1172) の算術平均値である 1.11をTCS-1172の地上測定値に乗じた。

CD 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。取得したデータを Table 4-8、Table 4-9 及び Table 4-10 に示す。また、テストポイントにおけ る地上測定値について、Fig. 4-19~Fig. 4-24 に示す。なお、地上測定値は NaI(TI)検出器の指示値 であり、天然放射性核種による寄与が含まれる。また前述の通り、これらの図表に示した地上測 定値は TCS-1172 による地上測定値に 1.11 を乗じて TCS-172B 相当の値に補正したものである。 取得した CDにはややばらつきがみられたものの、その平均値と固定パラメータとの差異は Table 4-6 で示した 1 標本標準偏差以内であった。また、Bell430 (JA02AX) の CD は同機種である Bell430 (JA05TV) と大きな差異は見られなかった。Bell430 (JA02AX) に対しては、テストポイントフラ イト中の対地高度が 300 m 付近で安定しており、 γ 線計数率における相対標本標準偏差 (RSD) が 最も小さいデータが信頼できるものとして、2021 年 10 月 4 日に TestPoint 3 (群馬県みどり市) で 取得した CD である 12,100 (s⁻¹/[μ Sv/h]) を設定した。

また、固定パラメータ及び Bell430 (JA02AX) に設定した *CD*の妥当性を検証するために、Fig. 4-13 (中央及び右) に示した測線において Bell412 (JA6767)、Bell430 (JA05TV) 及び Bell430 (JA02AX)

によって対地高度 300 m でオーバーラップフライトを同日中に実施し、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、オーバーラップフライトを実施した日における BG フライトで取得した計数率及び Table 4-3 に示した *CR-index* を適用してバックグラウンドを減算した後、Table 4-4 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. 4-25)。本図中に示した回帰直線式の傾きが各へリコプター機体同士の *CR-index*・*HF* 補正計数率の比であると解釈でき、この傾きが Table 4-6 に示した *CD* の比と一致することが望ましい。*CD* の比は例えば、Bell412 (JA6767) / Bell430 (JA05TV)で約 0.846、Bell412 (JA6767) / Bell430 (JA05TV)で約 0.930 である。この比が Fig. 4-25 に示した回帰直線の傾きと大きく異なる場合、いずれかの機体の *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。Fig. 4-25 に示した回帰直線の傾きと上記した *CD* の比は概ね等価であったため、補正を施す必要性は無いと判断された。このように、オーバーラップフライトの結果は解析に用いる *CD* の数値が妥当であるか、再設定を検討すべきかを判断するための材料の一つとなる。

以上のことから、Bell412 (JA6767) 及び Bell430 (JA05TV) に対して固定パラメータの CD を用 いること、Bell430 (JA02AX) で取得及び設定した CD は妥当であると考えられ、RSI システムの 健全性も確認できた。

		Bell412 (JA676	57)		Bell430 (JA05T	V)	Bell430 (JA02AX)	
	Value	SD(1 σ)	Number of Data	Value	SD(1σ)	Number of Data	Value	
<i>CD</i> ([s ⁻¹]/[µSv/h])	11,000	± 2,100	42	13,000	± 2,800 65		12,100	
							※SD:標本標準偏差	

Table 4-6 使用した空間線量率換算係数 CD のまとめ



Fig. 4-18 TCS-172B と TCS-1172 を用いた地上測定値の比較試験の実施地点 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

间心中下来口	地上測定	値(μSv/h)	地上測定値の比
则正地总备方	TCS-172B	TCS-1172	(TCS-172B/TCS-1172)
1	0.46	0.43	1.07
2	0.45	0.40	1.14
3	0.37	0.34	1.10
4	0.71	0.65	1.08
5	0.53	0.47	1.11
6	0.53	0.45	1.19
7	0.54	0.48	1.12
8	1.44	1.36	1.06
9	1.68	1.52	1.10
· · ·	· · · ·	比の平均値	1.11

Table 4-7 TCS-172B	と	TCS-1172	の地	上測定値	〔の比較結果
--------------------	---	-----------------	----	------	--------

	<i>CD</i> (s ⁻¹ /[µSv/h])	009'6	9,400	10,800	21) 9,900 20) 10,800 3対搏太控準偏差
Data	SD (2 σ)	11	8	17	verage(202 ge(until 202 偏羊 RSD·林
Flight	Altitude Above Ground Level (m)	325	318	327	Averag + SD·
	RSD (%)	٢	20	٢	帮它林式令*
AMS Data	SD (2 σ)	228	1,267	86	
	Count Rates (s ⁻¹)	3,076	6,245	1,204	*
Survey Data	SD (2 σ)	0.09	0.45	0.02	
Nal(TI) Ground	Dose Rate (µSv/h)	0.27	0.63	0.05	•
	Location	TestPoint D	TestPoint E	TestPoint 3	
	RSI System	RSI 1	RSI 1	RSI 2	
	Date		2021/09/12	2021/10/14	
	Operation Company		NNN		
	Helicopter (Body No.)		Bell412 (JA6767)		
	Monitoring No.	Fukushima	16th	EastJapan 12th	

Table 4-8 2021 年度に取得した CD データー覧 (Bell412 (JA6767))

Г	<u> </u>							ᆂ
	CD (s ⁻¹ /[µSv/h]	11,100	13,900	12,500	14,100	11,500	7,700	11,800 11,400 標本標準偏 ₃
-+- 	Data SD (2 σ)	16	28	11	16	14	13	verage(2021) e(until 2020) 冨差、RSD:相対
+d*:17	Altitude Above Ground Level (m)	271	267	298	340	291	308	A Averag 、SD: 標本標準(
	RSD (%)	13	15	œ	12	13	œ	航空株式会社
AMC Date	SD (2 0)	592	1,850	330	148	268	101	NNK: 中日本∮
	Count Rates (s ⁻¹)	4,519	12,070	4,144	1,272	1,996	1,257	* *
C Date	SD SD (2 σ)	60.0	0.47	0.10	0.01	0.03	0.02	
	Natr () Ground Dose Rate (μSv/h)	0.26	0.61	0.27	0.05	0.10	0.07	•
	Location	TestPoint D	TestPoint E	TestPoint D	TestPoint 1	TestPoint 5	TestPoint 4	
	RSI System	RSI 1	RSI 1	RSI 1	RSI 1	RSI 1	RSI 1	
	Date		2021/10/03	2021/10/10	2021/10/18	2021/10/24	2021/10/24	
	Operation Company			Ň	X Z Z			
	Helicopter (Body No.)				Bell430 (JAUSI V)			
	Monitoring No.	Fukushima	16th		EastJapan	12th		

Table 4-9 2021 年度に取得した CD データー覧 (Bell430 (JA05TV))

JAEA-Technology 2022-027

	<i>CD</i> (s ⁻¹ /[µSv/h])	10,800	15,600	12,500	12,300	8,700	12,100	12,000 標本標準偏差
Flight Data	SD (2 σ)	21	10	14	=	10	œ	verage(2021) 偏差、RSD:相対
	Altitude Above Ground Level (m)	305	286	329	270	302	300	▲ 、SD: 標本標準(
	RSD (%)	12	19	24	19	13	7	航洋株式会社
AMS Data	SD (2 σ)	459	2,860	886	2,372	151	101	※AAC:朝日/
	Count Rates (s ⁻¹)	3,775	14,695	3,721	12,456	1,170	1,441	
Survey Data	SD (2 σ)	0.11	0.59	0.10	0.64	0.02	0.01	
NaI(TI) Ground	Dose Rate (µSv/h)	0.27	0.78	0.27	0.74	0.07	0.06	
	Location	TestPoint D	TestPoint E	TestPoint D	TestPoint E	TestPoint 4	TestPoint 3	
	RSI System	RSI 2	RSI 2	RSI 2	RSI 2	RSI 2	RSI 2	
	Date 2021/09/12			2021/09/20		2021/09/28	2021/10/04	
	Operation Company		AAC			-		
	Helicopter (Body No.) Bell430 (JA02AX)							
	Monitoring No.	Fukushima 16th 12th 12th						

Table 4-10 2021 年度に取得した CD データー覧 (Bell430 (JA02AX))

- 50 -

JAEA-Technology 2022-027



Fig. 4-19 地上測定データ (TestPoint 1)
 (空間線量率 (μSv/h)、 天然放射性核種による寄与を含む。)
 (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. 4-20 地上測定データ (TestPoint 3)

 ⁽空間線量率 (μSv/h)、 天然放射性核種による寄与を含む。)
 (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. 4-21 地上測定データ (TestPoint 4)
 (空間線量率 (μSv/h)、 天然放射性核種による寄与を含む。)
 (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. 4-22 地上測定データ (TestPoint 5)
 (空間線量率 (μSv/h)、 天然放射性核種による寄与を含む。)
 (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 地上測定データ (TestPoint D)
 (空間線量率 (μSv/h)、 天然放射性核種による寄与を含む。)
 (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 地上測定データ (TestPoint E)
 (空間線量率 (μSv/h)、 天然放射性核種による寄与を含む。)
 (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. 4-25 オーバーラップフライトにおけるヘリコプター機種または機体ごとの *CR-index*・*HF* 補正計数率の関係

4.5.4.空間線量率への換算方法

ここまでに求めたパラメータを用いて上空で取得したγ線計数率を地表面から1mの高さの空間線量率Dに換算する計算式を式[2]に示す。

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

ここで、

D: 地表面から1mの高さの空間線量率(µSv/h)

 C_{net} : 正味の計数率(s⁻¹) (= $C_{\text{all}} - BG_{\cos} - BG_{\text{air}}$ (ただし、 $BG_{\cos} = C_{\cos} CR$ -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[2] で用いられる正味の計数率 Cnet を算出するために、

- 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 以上の計数率 (Ccos)
- ② C_{cos} に CR-index を乗じて全エネルギー領域に対する宇宙線に起因するバックグラウンド計 数率 (BG_{cos}) を計算する。
- ③ BG フライトで取得したデータを空気中ラドン子孫核種及びヘリコプター機体に起因する バックグラウンド計数率 (*BG*air) とする。
- ④ Call から BGcos と BGair を差し引き、正味の計数率を Cnet とする。

CD、HF及び Cnetを用いて式 [2] により地表面から1mの高さの空間線量率Dを算出する。

4.6. 放射性 Cs の沈着量への換算方法

4.6.1. 天然放射性核種の弁別と放射性 Cs 起源の計数率の算出

天然放射性核種の弁別方法は DOE が開発した MMGC 法 (Man Made Gross Count) を参考にした³⁾。本法は天然放射性核種のみを含む地域を測定して得られる γ 線スペクトルにおいて、放射性 Cs が放出する γ 線エネルギー範囲外である 1,400 keV~2,800 keV の計数率と全計数率との比 (*BG-index*) が一定であることに着目し、放射性 Cs 起源の計数率を算出するものである。具体的 には、まず、ヘリコプター機種または機体と RSI システムの組み合わせごとに、福島原子力発電 所事故由来の放射性 Cs による影響がない地域をフライトして得られたデータを基に *BG-index* を 算出する。次に、実際のフライトデータの 1,400 keV~2,800 keV の計数率に *BG-index* を乗じて天 然放射性核種起源の計数率を計算し、これを全計数率から減算することで放射性 Cs 起源の計数

率を推定する。最後に、放射性 Cs 起源の計数率に換算係数を適用して、放射性 Cs に起因する空 間線量率に換算したうえで地表面の放射性 Cs の沈着量に換算する。*BG-index* 算出に用いるスペク トルの ROI (Region of Interest) のイメージを Fig. 4-26 に示す。また、*BG-index* の算出例を Fig. 4-27 に示す。本図に示したデータは、2011 年度に関西地方において、1 秒ごとに測定した γ 線スペ クトルから *BG-index* を求め、その頻度を示したものである。このようにばらつきはあるものの、 正規分布に近い形を示す。第 16 次モニタリング及び東日本第 12 次モニタリングで使用したへ リコプター機種または機体と RSI システムの組み合わせごとに設定した *BG-index* について Table 4-11 に示す。前述の通り、Bell430 (JA02AX) については、航空機モニタリングにおいて過 去に使用実績のない機体であるため、Fig. 4-13 (左) に示した場所において天然核種フライトを実 施して得られた計数率を基に *BG-index* を算出して解析に用いた。

上記した放射性 Cs 起源の計数率及び地表面の放射性 Cs 沈着量の算出手順を以下に示す。また、計算式を式 [3] に示す。

① 測定で得られた y 線スペクトルから 1,400 keV~2,800 keV の計数率 (CBG) を計算する。

② *C*_{BG}に *BG-index* を乗じて天然放射性核種起源の計数率 (*BG*_{nat}) を算出する。

③ C_{net} (= C_{all} - BG_{cos} - BG_{air}) から BG_{nat}を差し引き、放射性 Cs のみの計数率 (C_{Cs}) を求める。

④ C_{Cs}に HF を乗じ、CD で除することで放射性 Cs に起因する空間線量率 (D_{Cs}) を算出する。

⑤式[3]より、D_{Cs}を空間線量率-放射能換算係数 (CF ([μSv/h]/[kBq/m²]); 4.6.2. にて詳述する。)で除して地表面の放射性 Cs の沈着量 Rd (kBq/m²)を求める。

$$Rd = \frac{D_{Cs}}{CF}$$
[3]

ここで、

$$D_{\rm Cs} = \frac{C_{\rm Cs} \times HF}{CD}$$

 $C_{\rm Cs} = C_{\rm net} - BG_{\rm nat}$

 $BG_{nat} = C_{BG} \times BG$ -index

である。なお、詳細は後述するが、*CF*の単位は本来 [μGy/h]/[kBq/m²] であり、[μSv/h/kBq/m²] に 換算するにあたり、Gy: Sv = 1:1.2 とした。



Fig. 4-27 BG-index の算出例

(関西地方において 1 秒ごとに測定した γ 線スペクトルから求めた *BG-index* と頻度の関係、全 16,000 データ: Bell 430 (JA05TV) で取得したデータの一例)

Table 4-11	BG-index —	覧
------------	------------	---

RSI System	Helicopter (Body No.)	Operation Company	BG-index
DOI 1	Bell430 (JA05TV)	NNK	31
RSI I	Bell412 (JA6767)	NNK	27
DCI 0	Bell430 (JA02AX)	AAC	31
R31 Z	Bell412 (JA6767)	NNK	27
	NNK: 中日本航	卞空株式会社、AAC:朝	日航洋株式会社

4.6.2. 空間線量率-放射能換算係数

航空機モニタリングでは、地上の放射性 Cs の沈着量に換算する場合に、文献 ^{38),39)}に示される 空間線量率-放射能換算係数 (Conversion Factor: *CF* ([μGy/h]/[kBq/m²]))を使用する。*CF*は、土 壌への放射性 Cs の浸透度を示す重量緩衝深度 (β) によって異なった値が設定されている ³⁸⁾。こ
れまで、航空機モニタリングにおいては、過去との比較を考慮し $\beta = 1.0$ (g/cm²) のときの *CF* を 継続的に使用している。一方、規制庁と原子力機構が行っている放射性物質分布状況等調査の結 果^{40),41)}から、福島原子力発電所から 80 km 圏内の土壌において、重量緩衝深度 (β) が年々変化し ていることが報告されている。ここで調査されている β は、環境中での放射性 Cs の動態観測が 目的であるため、人間活動による影響の少ない土壌を対象としている。一方、航空機モニタリン グの対象は森林のような人間活動が希少な場所から住宅地や農地のような人間活動がある程度活 発な場所まで多様な土地を含んでいる。さらに、その土地の利用の方法や程度は年々変わってゆ く。このような多面的な因子を考えると、 β を固定することは合理的ではないが、従来との比較 のために 1.0 とした場合について解析するとともに、 β に他の値を与えた場合に換算係数がどの 程度影響があるかを以下に示す。

Fig. 4-28 に文献^{38),39)}に示されている β と *CF* の関係について示す。本図では、対数による近似 曲線を記載したように、β と *CF* は対数関係にある。例えば、β = 1.0 (g/cm²) と β = 2.0 (g/cm²) に した際の放射性 Cs の沈着量と地表面から 1 m の高さの空間線量率の換算係数 ([μ Gy/h]/[kBq/m²]) には、Cs-134、Cs-137 ともに 16 %程度の差がある。このように、β の設定により放射性 Cs に対 する *CF* は変化するため、適切な β の設定を行って航空機モニタリングの測定データ解析に適用 することは今後の課題である。本報告における解析の基本的な方針としては、Fig. 4-28 に示した β の設定値が及ぼす放射性 Cs 沈着量換算係数への影響は参考情報に留め、過去との比較を考慮 して緩衝深度 β = 1.0 (g/cm²) の場合の換算係数 ^{38),39)}を適用した。



Fig. 4-28 重量緩衝深度 β と空間線量率-放射能換算係数 CF の関係 (文献 ^{38),39)}のデータを基に対数による近似曲線を表示)

4.7. 減衰補正

福島原子力発電所事故により放射性核種が放出されてから時間が経過し、半減期の短い核種は ほぼ検出されないレベルにまで減衰しており、2011年8月13日以降では、Cs-134とCs-137が評 価対象核種である。ここでは、空間線量率から放射能へのCs-137換算係数、Cs-134/Cs-137濃度 比及び測定時点の空間線量率を評価時点の空間線量率に補正する方法について記述する。空間線 量率から放射能への換算は、重量緩衝深度 β = 1.0 (g/cm²)の場合の CF を適用し、あらかじめ求 めておいた Cs-134/Cs-137濃度比を用いて、地表面から1mの高さの空間線量率から地表面にお ける Cs-134 及び Cs-137 の放射性物質濃度に換算した。Cs-134/Cs-137濃度比は 2011年8月に福 島県で 50ポイント以上の可搬型ゲルマニウム半導体検出器(以下、可搬型 Ge 検出器)による測 定データを取得し、2011年8月13日時点でのCs-134/Cs-137=0.917(Bo)を基本とした。その基 準日から航空機モニタリングのデータ取得完了日に減衰補正して換算した。データ取得完了日に おける Cs-137 の濃度(Ccs-137)及び Cs-134の濃度(Ccs-137)は航空機モニタリングデータから求ま る全空間線量率から、天然放射性核種によるバックグラウンドに起因する空間線量率を引いた空 間線量率(Ecs-137+Cs-134(µSv/h))及びデータ取得完了日における Cs-134/Cs-137濃度比(B)を用い、 下記の式[4]、[5]から算出する。

$$C_{\rm Cs-137} = A E_{\rm Cs-137+Cs-134}$$
[4]

$$C_{\rm Cs-134} = B C_{\rm Cs-137}$$
[5]

ここで、データ取得完了日における空間線量率から Cs-137 濃度に換算するための係数 (A) は、 式 [6] で表される。

$$A = \frac{\exp(-\lambda_{\text{Cs-137}} t)}{CF_{\text{Cs-137}} \exp(-\lambda_{\text{Cs-137}} t) + B_0 CF_{\text{Cs-134}} \exp(-\lambda_{\text{Cs-134}} t)}$$
[6]

ここで、*t* は基準日 (2011 年 8 月 13 日) からの経過時間、λ_{Cs-137} 及び λ_{Cs-134} は崩壊定数 (0.693 / 物 理的半減期) としている。

なお、放射性 Cs の物理的半減期を考慮した空間線量率は、以下のような手順に基づいて算出している。

① 換算した放射性 Cs 放射能を航空機モニタリングの取得完了日に合わせて減衰補正する。

② ①で得られた値を CF で除して、放射性 Cs 由来の空間線量率に換算する。

③ ②で得られた値にバックグラウンド空間線量率を加算し、全空間線量率とする。

4.8. 検出下限値

検出下限 (Limit of Detection) と信頼性について評価を行った。式 [7] 及び式 [8] に航空機モニタ

リングにおける全線量への換算方法及び放射性 Cs の沈着量の換算式について示す。本式をもと に、検出下限値及び信頼性について検討を行った。

$$D = \frac{(C_{\text{all}} - BG_{\text{air}} - BG_{\text{cos}}) \exp[AF(H_{\text{std}} - H_{\text{m}})]}{CD}$$
[7]

$$Rd_{134} = \frac{(C_{all} - BG_{nat} - BG_{cos} - BG_{air}) \exp[AF(H_{std} - H_m)] R_{\frac{134}{134 + 137}} DC_{134}}{CD \ CF}$$
[8]

ここで、式[7]については、

D: 全空間線量率 (µSv/h)

Call: 全計数率 (s⁻¹)

BGair: 空気中ラドン子孫核種びヘリコプター機体に起因する

バックグラウンド計数率(s⁻¹)

 BG_{cos} :宇宙線起源の計数率(s⁻¹) = C_{cos} CR-index (C_{cos} : > 2,800 keV の計数率)

CD:空間線量率換算係数 ([s⁻¹]/[µSv/h])

AF: 空気減弱係数 (m⁻¹)

H_{std}: 基準対地高度 (300 m)

H_m: 測定対地高度 (m)

であり、さらに式 [8] については、

Rd₁₃₄: 放射性 Cs の沈着量 (Bq/m²) (以下、Cs-137 の場合は 134 を 137 に読み替える。) BG_{nat}: 天然放射性核種起源の計数率(s⁻¹)

= C_{BG} BG-index(C_{BG} : 1,400 keV~2,800 keV の計数率)

CF:空間線量率-放射能換算係数([µGy/h]/[Bq/m²])^{38),39)}

R 134 : 全放射性 Cs 放射能に対する Cs-134 の放射能割合

DC134: 減衰補正係数

= exp(-λτ) (λ: Cs-134 の崩壊定数、τ: 2011 年 8 月 13 日からの経過時間) である。

4.8.1. 空間線量率の検出下限値

航空機モニタリングにより算出される空間線量率は $BG_{air} \ge BG_{cos}$ に影響を受ける。これまでの 測定結果^{17),18),19),20),22),24),26)を見ると、 BG_{cos} は概ね 200 s⁻¹~500 s⁻¹の範囲に入ることが分かってい る。また、 BG_{air} は海上の測定データから宇宙線成分を減算することにより算出した結果、約400 s⁻¹ であったことから、バックグラウンド計数率(N_B)を $N_B = BG_{self} + BG_{cos} = 900$ s⁻¹ として検出下限値 の評価を行った。}

一般的に、検出下限値を求める際には、バックグラウンド計数率 (NB)の標準偏差 (G)を式 [9]

に示した Currie の式⁴²)に当てはめ、検出下限値 (N_D) を算出する。

$$N_{\rm D} = 4.653\sigma_{N_{\rm B}} + 2.706$$
 [9]

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 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 0.011 µSv/h となる (Table 4-12)。

4.8.2. 放射性 Cs の沈着量の検出下限値

放射性 Cs の沈着量は、γ線スペクトルのデータからバックグラウンド (宇宙線、空気中ラドン 子孫核種及びヘリコプター機体に起因するバックグラウンド計数率)を差し引き求めている。放 射性 Cs の沈着量の検出下限を求める上で、実際の測定データから、差し引くバックグラウンド を考慮し、各々の計数誤差の 3σ を計算した。この数値を計数率の検出下限とし、RSI システム の標準的な CD (13,000 [s⁻¹]/[µSv/h])及び β = 1 (g/cm²)の場合の CF で空間線量率に換算する。実 際のバックグラウンドの計数率の数値は、空間線量率の場合に用いた BG_{air} と BG_{cos}以外に BG_{nat} が含まれる。ここでは、バックグラウンド計数率を標準的な 3,000 s⁻¹ とし計算を行った。この条 件を、式 [9] に当てはめると、767 s⁻¹ となる。これに、標準的な CD (13,000 [s⁻¹]/[µSv/h])を用い て空間線量率に換算する。さらに Cs-134 と Cs-137 の組成比を第 16 次モニタリングの減衰補正日 である 2021年10月3日における 0.038 とし、 β =1における CF (Cs-134 : 5.33×10⁻³ [µSv/h]/[kBq/m²], Cs-137 : 2.08×10⁻³ [µSv/h]/[kBq/m²])を用いて、放射性 Cs の沈着量の検出下限値を求めた。なお、 CF の単位を [(µGy/h)]/[kBq/m²] から[(µSv/h)/(kBq/m²)] に換算する際、Gy : Sv = 1 : 1.2 とした。こ の結果、放射性 Cs の沈着量の検出下限値は、約 27 kBq/m² と評価できた (Table 4-12)。

	Limit of detection						
RSI System	Dose rate at 1m above	Radioactivity of deposition					
	the ground (μ Sv/h)	radiocesium (kBq/m ²)*					
RSI 1, RSI 2	0.011	27					

Table 4-12 RSI システムの検出下限値

* Total BG count: 3,000 s⁻¹

Evaluated value on 3, Oct. 2021

4.9. 不確かさ

本手法において、航空機モニタリングにより算出される空間線量率における不確かさの要因としては、式[7]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: Table 4-4 に示したように、固定パラメータに対して、測定状況により 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 HF の選択: CD と同様に、テストラインフライトデータ測定得状況により 5%前後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30m程度の誤差が生じる。本誤差を低減する手法について検討できておらず、今後の課題である。
- ・ラドン子孫核種の影響:日本においては、特に冬場に大陸由来のラドンの影響が比較的大きいことが知られている。これまでの測定の中でもラドンの影響を示唆するデータが取得されており、その詳細については8章に述べる。

4.10. マッピング

空間線量率や放射性物質沈着量のマッピングは、国際原子力機関 (IAEA) から標準的な方法が 示されている⁴³)。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。本報告では、2011 年4月6日~29日にかけて実施された第1次航空機モニタリングの解析を担当した DOE が用い た IDW を踏襲し、それ以後の解析を行った。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、ある補間点におけ る推定値は以下の式 [10] で表される⁴⁴)。

$$\widehat{z_{0}} = \frac{\sum_{i=1}^{s} d_{\mathrm{NT}}(p_{0}, p_{i})^{-\lambda} z_{i}}{\sum_{i=1}^{s} d_{\mathrm{NT}}(p_{0}, p_{i})^{-\lambda}}$$
[10]

本報告においては、 c_0 を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)を補 間地点 p_0 からサンプル点 p_i までの水平距離、 z_i を各サンプル点が持つ実測値、補間地点から近傍 s点をサンプル点とした。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 $\lambda \ge s$ 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り、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、 $\lambda \ge 1.5$ 、CROOT Mean Squared Error: 二乗 平均平方根誤差)は0.208であった。Fig. 4-29にパラメータ設定の異なる場合の空間線量率マップ を示す。λを2.3、sを400としたFig. 4-29 a)とλを2.0、sを12としたFig. 4-29 b)を比べると、 両者とも概ねの分布傾向は一緒であるが、線量のレンジの境界をみると a)の方がなめらかにな っていることが分かる。

航空機モニタリングにおいては Fig. 4-4 に示した通り、対地高度約 300 m から測定を実施する が、ヘリコプター直下の地上を中心とする半径 300 m 円内における放射線量の平均値が測定され 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) をベースとしつつ、上記 の測定範囲を考慮して 250 m にメッシュサイズを決定した。



a) $\lambda = 2.3, s = 180$

b) λ = 2.0, s = 12*第3次航空機モニタリングの測定結果を使用

Fig. 4-29 IDW に入力するパラメータとマップの関係 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

4.11. 地上測定値との比較

航空機モニタリングの妥当性を検証するために、測定対象区域から地形的に平坦な場所でかつ 航空機モニタリング測線近傍の地点を選定し、地上測定を行った。なお、測線と地上測定地点間 の水平距離は概ね 50m以内である。また、4.5.3 項で示した通り、TCS-1172による地上測定値に 1.11 を乗じて TCS-172B 相当の地上測定値に補正して、航空機モニタリングとの比較に用いた。 Fig. 4-30 に航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値との比較を示す。比較は散布図 (左)及び相対誤差(航空機モニタリングによる空間線量率 – 地上測定値)/地上測定値)のヒスト グラム(右)で行った。ここで、相対誤差が0であれば航空機モニタリングによる空間線量率と地 上測定値が一致し、正であれば航空機モニタリングによる空間線量率の方が大きく、負(ただし、 -1.0 が最低値である。)であれば航空機モニタリングによる空間線量率の方が小さく評価された ことを意味する。散布図を見ると、96%(全350点中 335点)のプロットがファクター2に収まり、 地上測定値と非常に良く整合した。相対誤差のヒストグラムは0以上の領域にやや広く頻度分布 が見られるものの、ピークは0付近に位置しており、平均値及び中央値は0に近い値を示した。 以上のことから両者はよく一致していると考えられる。

また、他の信頼のできる地上測定値として、同時期に実施された規制庁と原子力機構が行って いる、福島県内における NaI(TI)検出器 (日立製作所製 TCS-172B) を用いた地上測定値及び可搬型 Ge 検出器 (Canberra 製 Falcon 5000) を用いた Cs-137 の沈着量の測定値⁴¹⁾を用いて、Fig. 4-30 と同 様にして航空機モニタリングによる計算結果と比較した。なお、可搬型 Ge 検出器による測定値 から地表面の放射性 Cs 沈着量に換算する際に用いる重量緩衝深度 (β) として 4.11 (g/cm²) が設定 されている⁴¹⁾。空間線量率の比較及び放射性Csの沈着量の比較について、Fig. 4-31 及びFig. 4-32 にそれぞれ示す。散布図においてファクター2を指標とすると、空間線量率においては 90 % (全 5,005 点中 4,513 点)、Cs-137 沈着量においては 57 % (全 187 点中 99 点) が収まっており、航空機 モニタリングによる計算値は概ね地上測定値を再現できていると思われる。一方、相対誤差のヒ ストグラムを詳細に見ると、空間線量率については、ピークは0付近に位置しているように見え るが、-1.0から 0.0までの累積頻度は 34%であり、0以上の領域に頻度分布がやや偏っていると 言える。また平均値は 0.279、中央値は 0.147 であることから、正規分布からはやや逸脱した分 布であることが伺われ、航空機モニタリングによる空間線量率の方が15%から30%程度は大き くなる傾向にあった。航空機モニタリングでは、除染等により生じた局所的な空間線量率の低下 を反映できていないことが考えられる。また、Cs-137 沈着量については相対誤差が広く分布し ており、2.0を上回る領域(航空機モニタリングの方が3倍以上過大評価)に15%程度の特に大き な頻度が確認できる。加えて、平均値は 0.857 であるのに対し中央値が-0.089 であり、航空機モ ニタリングによる Cs-137 沈着量の計算値の方が明らかに大きく偏ることが示された。航空機モ ニタリングでは比較的広範囲を測定対象とすることに加え、全計数率に換算係数等を適用するこ とで Cs-137 の沈着量を大まかに計算することから、その計算値には種々の不確かさが伴う。一 方、可搬型 Ge 検出器は局所域を測定対象とし、エネルギー分解能に非常に優れ、詳細なスペク トル解析が可能である点で航空機モニタリングとは異なる。また、航空機モニタリングでは、前 述の通り森林域や道路の多い都市域の重量緩衝深度の推定が難しいため、測定範囲全域で β=1 (g/cm²)を一律に適用しており、その違いも影響していると考えられる。よって現状では、地上 測定による Cs-137 の沈着量を航空機モニタリングで再現するには困難な点があると思われる。 今後、地上測定値との比較をしつつ、土地利用区分に応じて、より適切なβの設定値について検 討するなどし、Cs-137 沈着量の計算精度の向上に取り組む必要がある。

なお、地上測定値との比較については、以下のような要因を考慮しなくてはならない。

- ① 測定の範囲の違い:空中からの測定値は、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上の放射線の平均値となる。実際には、測定される範囲は地上の半径 300 m円内における放射線量の平均値となる。一方、地上測定による測定範囲は半径 30 m程度の円の放射線量の平均値となる。よって、地上の放射線分布が一様の場所では整合しやすいが、地上の空間線量率の分布が均一でない場所では、測定結果が整合しにくいと考えられる。
- ② 周辺からの影響:地上の測定場所の近傍に大きな建物や森林等がある場合には、建物や樹木に沈着している放射性物質が地上測定に影響する可能性がある。また、上空で測定する場合においては、建物や森林等が地表面からの放射線を遮蔽するため、単純に比較できない場所

がある。なお、本章において、比較用に取得した地上測定値は比較的地形が平坦な場所が多 く、条件がよい場所を選定している。



Fig. 4-30 測線近傍における地上測定値と航空機モニタリングによる空間線量率の比較 (左:散布図、右:相対誤差のヒストグラム)



Fig. 4-31 ランダムな位置における地上測定値と航空機モニタリングによる空間線量率の比較 (地上測定値は原子力規制庁事業⁴¹⁾による。左:散布図、右:相対誤差のヒストグラム)



Fig. 4-32 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と航空機モニタリングによる Cs-137 沈着量の比較 (地上測定値は原子力規制庁事業⁴¹⁾による。左:散布図、右:相対誤差のヒストグラム)

4.12. 天然放射性核種由来の空間線量率マップの作成

天然放射性核種由来の空間線量率マップの作成手法は 2014 年度に開発した^{18),45)}。航空機モニ タリングで使用している RSI システムはγ線のエネルギーを計測しているため、天然の放射線由 来の空間線量率を放射性 Cs による空間線量率と弁別して計測が可能である。しかしながら、こ れまで、放射性 Cs の影響の大きな地域においては、K-40の放出する 1,461 keV のエネルギーピー クの領域に、Cs-134 の放出する 1,365 keV (放出率 3.0 %) が干渉するため、正確な評価が難しか った。これらのピーク弁別に関数適合法³⁸⁾を適用することによって、天然の放射線由来の空間 線量率マップを作成した。

航空機モニタリングで使用している NaI(Tl)検出器では前述のように、放射性 Cs の影響が一定 以上ある地域において K-40 の計数率を弁別することは難しい。Fig. 4-33 に典型的な γ 線スペク トルの例を示す。このような、お互いが干渉したスペクトルを弁別する手法として関数適合法⁴⁰ が考えられる。本手法は、2 つのピークをガウス関数でそれぞれフィッティングし、干渉してい る部分の切り分けを行う。Fig. 4-33 のようにエネルギーピークを 2 つのガウス分布が干渉してい ると仮定した式 [11] を使用した。

$$S(i,j) = a + bE + c_i \exp\left[\frac{-(E-E_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] + c_j \exp\left[\frac{-(E-E_j)^2}{2\sigma_j^2}\right]$$
[11]

ここで、S(i,j)は計数率、Eは γ 線エネルギー (keV)、 E_i はピークエネルギー (keV)、 σ^2 はピークの分散 (keV)、a+bEはベースライン、cは正味のピーク計数率、i,jは複合ピークのそれぞれの核種である。ピークの平均エネルギーや分散はフライト中に変わらないと仮定し、予め平均デー

タから決定した。ここから、一般逆行列を用いて 1 秒ごとに *a、b、c_i、c_jを*求め、1,365 keV の Cs-134 が 1,400 keV 以上のエネルギーへ与える寄与割合から、Cs-134 由来の 1,400 keV~2,800 keV に与える積算計数率 (*Cs*1400) を算出した。

次に、地表面から1mの高さの空間線量率 (*D*_{nr}) への換算に使用した評価式を式 [12] に示す。 従来の航空機モニタリング手法で使用している換算式に、*Cs*₁₄₀₀ を除外するために必要な計数を 追加した。

$$D_{\rm nr} = \frac{(C_{1400} - BG_{1400} - Cs_{1400}) BG - index HF_{1400}}{CD}$$
[12]

ここで、C1400 は 1,400 keV~2,800 keV の積算計数率 (s⁻¹)、BG1400 は宇宙線由来の 1,400 keV~ 2,800 keV の積算計数率 (s⁻¹)、Cs1400 はラドン壊変生成物由来及びヘリコプター機体に起因する 1,400 keV~2,800 keV の積算計数率 (s⁻¹)、BG-index は、福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs が 沈着していない地域における全計数率と 1,400 keV~2,800 keV の積算計数率の比率、HF1400 は 1,400 keV~2,800 keV の積算計数率に対する高度補正係数、CD は空間線量率換算係数 ([s⁻¹]/[µSv/h]) である。1,400 keV~2,800 keV の計数率が比較的小さいため、これらの係数を算出 する際には検出限界値を低くするために、積算計数率に対し21点(21秒)の移動平均を使用した。 ヘリコプターの平均移動速度を約 50 m/s とすると、平均した測定エリアは 1 km (50 m/s × 21 s ≒ 1,000 m) となる。1,400 keV~2,800 keV に対する空気減弱係数は、固定パラメータと同様に、 2014 年 (第9次モニタリング及び東日本第5次モニタリング)におけるテストラインフライトの 結果から、4.5.2項で示した方法で求め、それらの算術平均値を用いた。なお、Bell430 (JA02AX) については、過去の航空機モニタリングにおいて使用実績のない機体であるため、2021年度に 実施したテストラインフライトのデータを基に、1,400 keV~2,800 keV に対する空気減弱係数を算 出し、それらの算術平均値を用いた。1,400 keV~2,800 keV に対する空気減弱係数を Table 4-13 に 示す。本表には、通常の航空機モニタリングで使用している全エネルギー領域 (30 keV~2,800 keV) で算出した空気減弱係数を参考データとして併記した。本手法において対象としているγ線エネ ルギー領域の平均値は、全エネルギー領域を対象とした場合よりも大きいため、空気により減弱 される度合いが比較的小さくなる。従って、1,400 keV~2,800 keV に対する空気減弱係数が比較 的小さくなっていることが分かる。CD については、各使用ヘリ機種 (Bell412、Bell430) におい て、2012 年度から 2021 年度まで算出した CD と地上測定値との関係を調べたところ、空間線量 率依存性が特に認められなかったことから、Table 4-6 に示した数値を使用した。地上測定値と算 出した CD の関係について Fig. 4-34 及び Fig. 4-35 に示す。

4.3 節に記載した通り、*CD*の算出には地上測定値として NaI(TI)検出器による地上測定値 (μSv/h)を用いている。空間放射線量の測定単位にSvを用いている NaI(TI)検出器は通常、1 cm線 量当量(周辺線量当量)で校正されているため、航空機モニタリングで算出される空間線量率は 必然的に1 cm線量当量率(周辺線量当量率)を意味することになる。しかしながら、本項で作成 する空間線量率マップは環境放射線に起因する空間放射線量を表現したものであり、このような マップでは通常、放射線量率の単位として空気吸収線量率(μGy/h)が用いられるため、単位の換 算が必要となる。空気吸収線量 (または自由空気中空気カーマ) から 1 cm 線量当量 (周辺線量当 量) への換算手法についてはモンテカルロ法を用いた計算による評価例 ⁴⁷⁾や自然放射線の実測か ら算出した例 ⁴⁸⁾がある。自然環境中における γ 線の実効的エネルギーが 0.5 MeV 付近であると仮 定した場合、いずれの例においても空気吸収線量 (Gy): 1 cm 線量当量 (Sv) は概ね 1:1.2 と評価 されている。以上のことから、式 [12] で求めた地表面から 1 m の高さの空間線量率 $D_{\rm nr}$ (μ Sv/h) を 1.2 で除することにより、航空機モニタリングによる空間線量率 (μ Sv/h) を空気吸収線量率 (μ Gy/h) に変換して、天然放射性核種由来の空間線量率マップを作成した。

福島原子力発電所周辺における、放射性 Cs の寄与分を取り除いた天然放射性核種由来の空間 線量率マップと、取り除かれた放射性 Cs 由来の空間線量率マップを Fig. 4-36 に示す。Fig. 4-36 (左)に示した天然放射性核種由来の空間線量率マップには Fig. 4-36(右)に示したマップのような 発電所から北西方向への分布が見られない。このことから、本手法により放射性 Cs の影響を弁 別できていると思われる。一方で、定量的な評価を行うため、福島県内において可搬型 Ge 検出 器による測定で評価した天然放射性核種由来の放射線量率 41)と航空機モニタリングで評価した 天然放射性核種由来の空気吸収線量率を比較した結果を Fig. 4-37 に示す。可搬型 Ge 検出器によ る測定では天然放射性核種として、K-40 (1,461 keV)、ウラン系列では Pb-214 (352 keV) 及び Bi-214 (1,765 keV)、トリウム系列では TI-208 (583 keV) 及び Ac-228 (911 keV) を評価対象としてお り、Fig. 4-37 にプロットされているのは上記核種に由来する空気吸収線量率(空気カーマ率)の合 計値である。散布図 (Fig. 4-37 (左))を見てみると、0.05 µSv/hから 0.10 µSv/hの領域でややばら つきは大きいものの、ファクター2に97%(全348点中336点)が収まった。相対誤差のヒストグ ラム (Fig. 4-37 (右)) については 0.0 以上 (航空機モニタリングの方が過大評価) の領域でやや広範 囲に分布が見られるものの、平均値及び中央値は0付近となり、可搬型 Ge 検出器による測定で 評価した空間線量率とよく一致していると言える。以上のことから、2 つの Gauss 分布を仮定し た関数適合法により、精度よく全計数率から放射性 Cs による計数率を弁別し、天然放射性核種 由来の放射線量率を推定できると考えられる。



Fig. 4-33 関数適合法を用いた Cs-134 と K-40 の弁別



Energy range	Bell412 (JA6767)		Bell430 (JA05TV)		Bell430 (JA02AX)	
	Value \pm SD(1 σ)	Number	Value \pm SD(1 σ)	Number	Value \pm SD(1 σ)	Number
1,400 keV - 2,800 keV	-0.00580 ± 0.00080	11	-0.00600 ± 0.00102	8	-0.00550 ± 0.00072	4
30 keV - 2,800 keV	-0.00720 ± 0.00042	21	-0.00720 ± 0.00040	35	-0.00692	-
						100 144 1 44

[※]SD: 標本標準偏差



Fig. 4-34 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell412) (本図中のσは CD に対する標本標準偏差である。)



Fig. 4-35 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell430)(本図中のσは CD に対する標本標準偏差である。)



天然放射性核種由来の空間線量率マップ 放射性 Cs 由来の空間線量率マップ Fig. 4-36 福島原子力発電所周辺における天然放射性核種由来の空間線量率マップの作成例 (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. 4-37 可搬型 Ge 検出器による測定で評価した天然放射性核種由来の空間線量率と航空機モニ タリングで評価した天然放射性核種由来の空間線量率との比較

5. 航空機モニタリング結果

5.1. 第16次モニタリング

航空機モニタリングの測定結果を基に、地表面から1mの高さの空間線量率の分布状況を示した「空間線量率マップ」をFig.5-1に示す。また、放射性Csの沈着量(Cs-137及びCs-134の合計量)の状況を示した「放射性Cs沈着量マップ」をFig.5-2に示す。またCs-137及びCs-134の沈着量マップをFig.5-3及びFig.5-4にそれぞれ示す。放射性Csの沈着量マップについては前述したように、β=1(g/cm²)としたときの換算係数を使用したため、誤差を多分に含む可能性があることに留意する必要がある。なお、空間線量率及び放射性Csの沈着量は、第16次の航空機モニタリングを実施した最終日である2021年10月3日現在の値に減衰補正した。なお、空間線量率マップの色合いについては、以下の考え方で分けている。なお、これらのマップ中で白色の箇所は評価対象範囲外である。

天然放射性核種を含む空間線量率

環境省が示した追加被ばく線量の考え方⁴⁹⁾を参考に、除染基準である空間線量率0.23 µSv/hが1.0 mSv/年に相当するとし、以下のように空間線量率マップの色合いを区分した。

- 19.0 µSv/h =約 100 mSv/年 相当
- ・ 9.5 µSv/h =約 50 mSv/年 相当
- ・ 1.9 µSv/h =約 10 mSv/年 相当
- 1.0 µSv/h =約 5.0 mSv/年 相当
- 0.5 µSv/h =約 2.5 mSv/年 相当
- 0.2 µSv/h =約 1.0 mSv/年 相当
- 0.1 µSv/h =約 0.5 mSv/年 相当

② 放射性 Cs の沈着量

玄米中の放射性 Cs 濃度が 2011 年当時の食品衛生法上の暫定規制値 (500 Bq/kg) となる土 壌中の放射性 Cs 濃度の上限値は、5,000 Bq/kg である。この濃度の放射能が 5 cm までに沈 着している水田の土壌を面積 10,000 cm²、深さ 15 cm まで採取し、撹拌した場合の濃度を 計算すると、約 1,000 kBq/m²となる。この時、深さ 15 cm までの土壌の体積は密度 1.3 kg/L とした (150 L/m² × 1.3 kg/L × 5,000 Bq/kg = 975,000 Bq/m² ≒ 1,000 kBq/m²)。

- ・ 3,000 kBq/m² = 1,000 kBq/m² の 3 倍
- ・ 1,000 kBq/m² = 基準
- ・ 600 kBq/m² = 300 kBq/m²~1000 kBq/m²の中間値
- ・ 300 kBq/m² = 1,000 kBq/m²の約半桁下 (10^{-0.5})
- $100 \text{ kBq/m}^2 = 1,000 \text{ kBq/m}^2 \times 1/10$
- $60 \text{ kBq/m}^2 = 600 \text{ kBq/m}^2 \times 1/10$
- $\bullet \ \ 30 \ kBq/m^2 \ \ = 300 \ kBq/m^2 \times \ 1/10$
- $10 \text{ kBq/m}^2 = 100 \text{ kBq/m}^2 \times 1/10$



Fig. 5-1 第 16 次モニタリング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。)



Fig. 5-2 第 16 次モニタリングにおける放射性 Cs 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。)



Fig. 5-3 第 16 次モニタリングにおける Cs-137 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。)



Fig. 5-4 第 16 次モニタリングにおける Cs-134 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。)

5.2. 東日本第12次モニタリング

航空機モニタリングの測定結果を基に、地表面から1mの高さの空間線量率の分布状況を示した「空間線量率マップ」をFig.5-5に示す。また、放射性Csの沈着量(Cs-137及びCs-134の合計量)の状況を示した「放射性Cs沈着量マップ」をFig.5-6に示す。また、Cs-137及びCs-134の沈着量マップをFig.5-7及びFig.5-8にそれぞれ示す。空間線量率及び放射性Csの沈着量は、東日本第12次の航空機モニタリングを実施した最終日である2021年10月25日現在の値に減衰補正した。ここで、10月25日に群馬県と新潟県の県境付近に位置する至仏山から谷川岳の一部に積雪が確認されたため、当該箇所にマスキングを施して評価対象外とした。マスキングデータの作成にあたり、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構から提供されているSGLIMODISデータ⁵⁰⁾の内、積雪が確認された箇所周辺の積雪状況が最も良好に撮影できている、10月30日に配信されたデータを使用した。

また、第16次モニタリングとの整合性を確認するために、第16次モニタリング及び東日本第 12次モニタリングで取得した全データを統合し、2021年10月25日現在の値に減衰補正しマッ ピングした。第16次モニタリング及び東日本第12次モニタリングを統合した「空間線量率マッ プ」及び「放射性 Cs 沈着量マップ」をFig. 5-9及びFig. 5-10にそれぞれ示す。また、Cs-137及 び Cs-134の沈着量マップをFig. 5-11及びFig. 5-12にそれぞれ示す。境界部分のマップの整合性 も違和感がなく、よく一致していることが分かる。

天然放射性核種由来の空間線量率マップを Fig. 5-13 に示す。空間線量率の分布をみると新潟県 と福島県の県境に天然の放射線量が高い場所が存在する。ここは、帝釈山地という花崗岩の分布 地帯として知られた場所であり、過去に日本全国の空間線量率を計測した結果⁴⁵⁾でも、この近 辺の空間線量率は比較的高いことが見出されている。天然放射性核種由来の空間線量率は、地す べり等の大きな地形の変化がなければ測定年度ごとに変化しないと考えられ、過去のデータと比 較して同様な結果が得られていることを確認することは解析結果の妥当性を表すものと考えられ る。そこで、天然放射性核種起源の空間線量率解析手法が確立した 2014 年から 2020 年までに作 成した天然放射性核種由来の空間線量率マップを Fig. 5-14 に示す。このように、各年度で天然放 射性核種由来の空間線量率マップが顕著に異なることはなく、本手法により全計数率から放射性 Cs に起因する計数率が適切に除外できていることが示唆される。



Fig. 5-5 東日本第 12 次モニタリング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。



Fig. 5-6 東日本第 12 次モニタリングにおける放射性 Cs 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。)



Fig. 5-7 東日本第 12 次モニタリングにおける Cs-137 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。)



Fig. 5-8 東日本第 12 次モニタリングにおける Cs-134 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。)



Fig. 5-9 第 16 次モニタリングと東日本第 12 次モニタリング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。)



Fig. 5-10 第 16 次モニタリングと東日本第 12 次モニタリングにおける放射性 Cs 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。)



Fig. 5-11 第 16 次モニタリングと東日本第 12 次モニタリングにおける Cs-137 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。)



Fig. 5-12 第 16 次モニタリングと東日本第 12 次モニタリングにおける Cs-134 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。)



Fig. 5-13 第 16 次モニタリングと東日本第 12 次モニタリングにおける天然放射性核種由来の空間 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。)







6. 航空機モニタリング結果の考察

6.1. 過去の航空機モニタリング結果との比較

これまでの福島原子力発電所から 80 km 圏内における航空機モニタリングの結果について Fig. 6-1 に示す。このように、空間線量率が比較的高いことを意味する暖色系の面積が小さくなっている ことが分かる。なお。第4次モニタリング以前については自衛隊のヘリコプターを使用し、簡易 的なパラメータを適用していたため、比較対象として用いるのは望ましくない。そこで過去の結 果との比較対象として、使用パラメータの算出方法やデータ解析手法が初めて定型化した第4次 以降を選択した。5.1節に記述した空間線量率マップの色合い区分ごとのメッシュの面積(合計約 8,923 km²)から、各区分の面積割合を算出して Table 6-1 にまとめた。本表からも空間線量率が経 年により減少していることが分かる。19.0 μSv/h を超える地域は第10次モニタリングで見られな くなり、第16次モニタリングでは全てのメッシュで19.0 µSv/h 未満となった。0.2 µSv/h 以下の 領域では天然放射性核種による影響が相対的に強く、測定値のばらつきにより必ずしも経年に従 って減少しない場合がある。年間被ばく線量が 1.0 mSv に相当する、0.2 μSv/h を上回るメッシュ の面積割合は第4次モニタリング時点で95.5%であったが、第16次モニタリング時点では26.7% まで減少した。なお、第 16 次モニタリングにおいて 0.2 μSv/h を上回ったメッシュには、宮城県 では白石市の南端及び丸森町の南端、福島県では福島市、郡山市、いわき市の北端、白河市、須 賀川市、相馬市、二本松市、田村市、南相馬市、伊達市、本宮市、桑折町、国見町、川俣町、大 玉村、天栄村、猪苗代町、西郷村、泉崎村、棚倉町、塙町、三春町、広野町、楢葉町、富岡町、 川内村、大熊町、双葉町、浪江町、葛尾村及び飯舘村、茨城県では北茨城市の北端部が含まれる。

次に、これまでの旧避難指示区域における航空機モニタリングの結果について Fig. 6-2 に示す。 旧避難指示区域における空間線量率の減少傾向を定量的に把握するため、各モニタリングにおけ る空間線量率マップのメッシュ中心点の比を算出することで比較を行った。ここでも、上述した 理由で第4次モニタリング以降の結果を比較対象とした。第4次モニタリングと第16次モニタ リングの全領域における比較結果を散布図として Fig. 6-3 に示す。本図に示した回帰直線の傾き を空間線量率の全体平均的な減少傾向として捉えることができる。また、本図中には重量緩衝深 度(β)を1(g/cm²)とした場合における、放射性Csの物理的半減期から算出した理論的な減衰を 表す破線を示す。このように航空機モニタリングの測定結果は、物理的半減期に基づく理論値よ りも大きく減少する傾向を示す。一方で、福島原子力発電所から80km圏内では地表面から1m の高さの空間線量率が 0.2 µSv/h 以下の、天然放射性核種による影響が相対的に大きい場所が多 くなってきている。放射性Csから放出されるγ線に起因する空間線量率の減少傾向を見るには、 天然放射性核種による影響を無視できるような空間線量率が比較的高い場所を選定するのがよい。 また、最小二乗法による近似は数値の大きな結果に影響を受けやすいため、より適切に減少率を 評価できる方法として、空間線量率の相対減少率をヒストグラムとして表示した。Fig. 6-2 に示 した空間線量率マップの各メッシュにおける相対減少率((第16次モニタリングの結果-第4次 モニタリングの結果) / (第4次モニタリングの結果)) を算出し、ヒストグラムとして示した。第 16次モニタリングと第4次モニタリングの空間線量率の比較を Fig. 6-4に、第16次モニタリング

と第4次モニタリングの Cs-137 の沈着量の比較を Fig. 6-5 にそれぞれ示す。空間線量率の散布図 及びヒストグラムと比較して、Cs-137の沈着量の散布図及びヒストグラムの分布はばらつきが 大きい。特に、Fig. 6-5(左)において、第4次モニタリングにおける Cs-137の沈着量が 100 kBq/m² であった領域の前後で、第16次モニタリングにおける Cs-137の沈着量が急激に減少するような 傾向が見られた。これは、空間線量率は全計数率から宇宙線、空気中ラドン子孫核種及びヘリコ プター機体に起因するバックグラウンド計数率を差し引いてから換算しているのに対し、Cs-137 の沈着量はこれらに加えて天然放射性核種由来のバックグラウンド計数率を差し引いてから換算 しているため、計数誤差が相対的に大きくなることが一因として考えられるが、計数誤差のばら つきだけで本事象を説明するには困難な点がある。100 kBq/m² 以下のような Cs-137 の沈着量が 比較的小さな領域については、航空機モニタリングで Cs-137 の沈着量を正確に評価するのは困 難であることが示唆される。しかしながら、両者のヒストグラムとも平均値と中央値がほとんど 同値であり、正規分布に近いといえる。各ヒストグラムの相対減少率の平均値を指標とすると、 第4次モニタリングが行われた2011年11月から、空間線量率については相対減少率が約80%と 評価された。一方、Cs-137 の沈着量については相対減少率が約 50 %と評価されたが、航空機モ ニタリングにおいては、福島原子力発電所事故からの経過日数に伴うβの変化と土地利用区分に よるβの違いを考慮せずに 1.0 (g/cm²) として一律に固定しているため、本項で示した相対減少率 には、ある程度の不確かさが伴うことに留意する必要がある。





(1/3)





Fig. 6-1 福島原子力発電所から 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較

(2/3)






 Fig. 6-1 福島原子力発電所から 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較 (3/3)

 (1)

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

				面積割	合 (%)			
空間線量率 (µSv/h)	第4次モニタリング 事故後約7ヶ月	第5次モニタリング 事故後約1年3ヶ月	第6次モニタリング 事故後約1年8ヶ月	第7次モニタリング 事故後約2年6ヶ月	第8次モニタリング 事故後約2年8ヶ月	第9次モニタリング 事故後約3年6ヶ月	第10次モニタリング 事故後約4年6ヶ月	第11次モニタリング 事故後約5年7ヶ月
19.0 <	1.0	0.6	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0
9.5 - 19.0	1.7	1.4	1.1	0.8	0.9	0.7	0.5	0.3
3.8 - 9.5	4.0	3.4	2.7	2.3	2.3	2.0	1.7	1.3
1.9 -3.8	5.9	4.0	3.6	3.6	3.6	3.0	2.1	1.6
1.0 - 1.9	16.2	8.9	5.8	5.1	4.5	4.0	3.9	3.2
0.5 - 1.0	22.2	20.5	18.7	17.4	12.7	11.3	7.8	6.4
0.2 – 0.5	44.5	42.4	33.4	34.0	33.1	32.0	30.0	25.7
0.1 – 0.2	4.4	18.0	31.8	33.0	37.4	40.4	42.7	34.6
≦ 0.1	0.0	0.9	2.8	3.8	5.3	6.5	11.3	27.0
合計	100	100	100	100	100	100	100	100
0.2を上回る割合	95.5	81.1	65.5	63.3	57.3	53.1	45.9	38.4

.MA
2011
题
₩.
11
211
筂
R.
2
₹
ᢪ
臒
ί Π .
Ē
6
1XI
দ্য
重
Ē
<u>**</u>
間
טע
ы
N
-
2
£2
11
2
Ł
जिस्त
覂
E
_ ⊾
ķ
30 k
80 k
5 80 k
א 80 k
122 5 80 k
ザから 80 k
፤ 所から 80 k
電 所から 80 k
発電所から 80 k
J発電所から 80 k
·力発電所から 80 k
子力発電所から 80 k
〒子力発電所から 80 k
原子力発電所から 80 k
島原子力発電所から 80 k
畐島原子力発電所から 80 k
福島原子力発電所から 80 k
1 福島原子力発電所から 80 k
5-1 福島原子力発電所から 80 k
♡ 6-1 福島原子力発電所から 80 k
ile 6-1 福島原子力発電所から 80 k
able 6-1 福島原子力発電所から 80 k
Table 6-1 福島原子力発電所から 80 k

											※面積の合計値は約8,923 km ² である。	
	第16次モニタリング 事故後約10年6ヶ月	0.0	0.0	0.8	1.4	1.9	4.5	18.1	32.5	40.8	100	26.8
	第15次モニタリング 事故後約9年6ヶ月	0.0	0.1	0.8	1.5	2.1	4.7	21.2	38.3	31.4	100	30.3
面積割合 (%)	第14次モニタリング 事故後約8年6ヶ月	0.0	0.1	1.0	1.6	2.2	5.0	22.3	35.4	32.4	100	32.2
	第13次モニタリング 事故後約7年7ヶ月	0.0	0.1	1.1	1.6	2.6	5.0	23.3	36.7	29.5	100	33.7
	第12次モニタリング 事故後約6年6ヶ月	0.0	0.2	1.2	1.7	3.0	5.6	24.5	34.9	28.9	100	36.2
	率 (µSv/h)	19.0 <	9.5 - 19.0	3.8 - 9.5	1.9 -3.8	1.0 - 1.9	0.5 - 1.0	0.2 - 0.5	0.1 - 0.2	≦ 0.1	햐計	回る割合
	空間線量										QΠ	0.2を上





(1/3)

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



(2/3)

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



*本マップには天然核 種による空間線量率 が含まれている。

※実線で囲われた白色の領域は積雪等のあった箇所である。
※青色実線の外側は評価対象領域外である。

Fig.6-2 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(3/3)

(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. 6-3 第4次モニタリング及び第16次モニタリングの空間線量率算出結果の比較



Fig. 6-4 旧避難指示区域における第4次モニタリング及び第16次モニタリングの空間線量率算出 結果の比較



(左:散布図、右:相対減少率のヒストグラム)



⁽左:散布図、右:相対減少率のヒストグラム)

6.2. 実効半減期の算出

福島原子力発電所事故から約 11 年経過し、事故直後から実施してきた本事業の測定データは ビッグデータとして蓄積されてきている。環境中における放射性物質量の変化は、核実験場での 継続的なモニタリングやチョルノービリ原子力発電所事故のモニタリング結果から、多重の指数 関数で近似できることが知られている。Sanada et al., (2018)⁵¹⁾は有人へり及び無人へりで取得し たデータを利用して、空間線量率の実効半減期の算出を行っている。ここでは、これまでの測定 データの変化傾向を定量的に把握するため、測定データの指数関数近似について検討した。その 結果として求められる実効半減期は、空間線量率の遡及的な評価及び測定データの信頼性の推定 や将来の空間線量率の推定に重要なパラメータとなる。

2011 年から得られている航空機モニタリングの測定データを政府の定めた統計に用いる基準 地域メッシュ (1 km × 1 km) 毎に平均化した。対象メッシュ数は、福島原子力発電所を中心とし た半径約 80 kmの地域の 10,174 メッシュとなるが、解析に使用したデータはその内、河口域や湖 などの水域が含まれるメッシュを除いた 8,930 メッシュである。

空間線量率は天然放射性核種によるバックグラウンド空間線量率に比較的近い数値を示す場所 が多くなってきている。変化傾向を正確に定量化する場合、天然放射性核種による空間線量率を 減算する必要がある。安藤他 (2017)⁵²⁾は、当該事業における KURAMA-II による走行サーベイ結 果をもとに、東日本の市町村別のバックグラウンド空間線量率を推定している。ここでは、当該 研究成果におけるバックグラウンド空間線量率データを採用し、市町村ごとに放射性 Cs 由来の 空間線量率を算出した。

指数関数近似に用いたデータは、それぞれの測定手法毎に、調査期間すべてにおいてデータが そろっているメッシュのみ抽出した。本解析は福島原子力発電所から半径 80 km 圏内全域のデー タ及び除染等の人為的な影響や高空間線量率エリアでの影響を考察するため、旧避難指示区域の データを対象とした。抽出したデータについて、式 [13] に示した 2 つの指数項からなる指数関 数による近似を行い、空間線量率の実効半減期を算出した。

$$D = a \exp\left(-\frac{0.693}{t_{\text{short}}}t\right) + b \exp\left(-\frac{0.693}{t_{\text{long}}}t\right) + C$$
[13]

ここで、D は空間線量率 (µSv/h)、t_{short} は実効半減期の減衰が速い成分、t_{long} は実効半減期の減 衰が遅い成分、t は事故からの経過時間 (年)を表す。なお、ここで切片である a+b は事故直後の 空間線量率となる。C は定数であり、0 を初期値として反復計算を行い、t_{short} 等のパラメータの 近似解が通常取り得る信頼区間内で収束せず、その標本標準偏差が近似解の 2 倍以上になった場 合には別途、初期値を与えて再計算して求めた。近似曲線については最小二乗法により 95 %の 信頼区間を計算するとともに、実効半減期についても 95 %の信頼区間を計算した。

Fig. 6-6 a) 及び b) に 80 km 圏内全域及び旧避難指示区域における航空機モニタリング結果に指数関数近似を適用した結果を示す。本図におけるプロットは、航空機モニタリングにより算出された空間線量率の算術平均値であり、それらのプロットに対して縦軸方向に各メッシュにおける

空間線量率値を表した。80 km 圏内及び旧避難指示区域と、事故から2年目までは減衰の速い成 分による影響が顕著であり、2年目以降は減衰の遅い成分が支配的であることが分かる。指数関 数近似の結果を基にして、実効半減期に関する各成分について Table 6-2 にまとめた。減衰の速い 成分については、有効数字2桁で表記すると、80 km 圏内では約0.52年(95%信頼区間0.25年 ~0.78年)、旧避難指示区域では約0.61年(95%信頼区間は0.44年~0.79年)となった。80 km 圏 内における空間線量率の減少傾向について調査した例⁵¹⁾を見ると、土地利用区分によって空間線 量率の減少速度が異なることが示唆されている。旧避難指示区域の実効半減期が80 km 圏内のも のと比べて小さい(減衰速度が速い)ことは、次節に記載するような、それぞれの区域の土地利用 区分の違いが反映されているものと考えられる。減衰の遅い成分については、有効数字1桁で表 記すると、80 km 圏内では2.3年(95%信頼区間は1.3年~3.2年)、旧避難指示区域では4.8年 (95%信頼区間は4.0年~5.6年)となった。今後とも、本手法を用いて空間線量率の実効半減期を 評価していくことが望ましい。



Fig. 6-6 測定値の指数関数近似

	j	速い成分	j	遅い成分
	半減期(年)	95 %信頼区間(年)	半減期(年)	95 %信頼区間(年)
80 km圈内	0.52	0.25~0.78	2.3	1.3~3.2
旧避難指示区域	0.61	0.44~0.79	4.8	4.0~5.6

Table 6-2 指数関数近似から求めた実効半減期

6.3. 土地利用区分による空間線量率の変化傾向の違い

福島原子力発電所周辺における土地利用区分による空間線量率の減少率の違いを考察するため、 国土地理院が提供している「国土数値情報土地利用細分メッシュデータ」⁵³⁾(以下、土地利用メッ シュデータ)を利用した。なお、適用する土地利用メッシュデータは、第4次モニタリング(2011年) から第8次モニタリング(2013年)に対しては平成21年度公開版、第9次モニタリング(2014年) から第10次モニタリング(2015年)に対しては平成26年度公開版、第11次モニタリング(2016年) 以降に対しては平成28年度公開版(2022年3月現在の最新版)とした。福島原子力発電所から80km 圏内の土地利用メッシュデータについて、Fig. 6-7 (平成21年度公開版)、Fig. 6-8 (平成26年度公 開版)及びFig. 6-9 (平成28年度公開版)に示す。これらの土地利用区分の内、人為的活動等によ り空間線量率に最も違いが現れると考えられる市街地部及び福島原子力発電所周辺において大部 分を占める森林部について、過去の80km圏内のモニタリング結果を比較し、空間線量率の減少 率を比較した。市街地部及び森林部の定義は以下の通りである。

・森林部:多年生植物の密生している地域とする。Fig. 6-7~Fig. 6-9の凡例中、森林を指す。

・市街地部:住宅地、市街地等で建物が密集しているところ、鉄道、操車場、道路などで、面的 にとらえられるもの、運動競技場、空港、競馬場、野球場、学校港湾地区、人工造成地の空地 等とする。Fig. 6-7~Fig. 6-9の凡例中、建物用地、道路、鉄道、その他用地を指す。

空間線量率の比較は、6.1項に示したように、測定範囲を250m×250mメッシュに区切り、同 ーメッシュ上における第4次モニタリングを基準とした空間線量率の相対減少率(例えば、(第16 次モニタリングの結果-第4次モニタリングの結果)/(第4次モニタリングの結果))を算出した。 なお、第4次モニタリングに適用した土地利用メッシュデータ (平成21年度公開版)とは異なる 土地利用メッシュデータを適用した第8次モニタリング以降を比較対象とする場合には、土地利 用区分が平成 21 年度から不変のデータのみを抽出し、空間線量率比及びその平均値と標本標準 偏差の計算に用いた。比較の例として、第4次モニタリングと第16次モニタリングにおける森 林部及び市街地のメッシュごとの相対減少率の比較結果を Fig. 6-10 に示す。また第4次モニタリ ングを基準とした、第5次モニタリング以降それぞれの各土地利用区分における空間線量率の相 対減少率を Table 6-3、Table 6-4 及び Table 6-5 に示す。なお、誤差として示したのは、相対減少 率の標本標準偏差 (1o) である。第4次モニタリングに対する第16次モニタリングの相対減少率 は、平均値で市街地部が約78%、森林部で約76%であった。すなわち平均値で2%程度、市街 地部の方が森林部より相対減少率が大きい。これは、市街地において行われている除染やウェザ リング効果によるものと考えられる。また、過去のモニタリングの結果においても、森林部より も市街地の方が2%~5%相対減少率が大きく、森林部よりも市街地の方が空間線量率の減少幅 が大きい傾向にあることが分かる。しかしながら、それぞれの標本標準偏差の値を考慮すると、 森林部と市街地の相対減少率に顕著な差異があるとは言い難い。また、全エリアの減少率と森林 部の状況は概ね同様であった。これは、福島原子力発電所から80km圏内の土地利用区分の65% が森林であることに起因すると考えられる。規制庁による福島原子力発電所近傍の車両モニタリ ングや人手による空間線量率測定結果から解析した結果 41)をみると、森林部においてはそれ以 外と比較して減衰傾向が小さく、放射性 Cs のほぼ物理的半減期に従って減衰していることが示 されており、本データも矛盾しない。ただし、地上測定値と比較して航空機モニタリングの方が 相対減衰率の差が小さいのは、航空機モニタリングによる空間線量率の位置分解能と地上測定の 位置分解能の差に起因すると考えられる。



Fig. 6-7 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ ⁵³⁾より)



Fig. 6-8 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ ⁵³⁾より)



Fig. 6-9 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ ⁵³⁾より)



Fig. 6-10 森林部及び市街地における地表面から1mの高さの空間線量率の算出結果の比較 (第4次モニタリングに対する第16次モニタリングの相対減少率)

					Rel	ative 1	eduction	rate of d	ose ra	ite			
Area	Gross area ⁻ (km²)	(5th	-4th)/	'4th	(6th-	-4th)/	4th	(7th-	-4th)/	'4th	(8th	-4th),	′4th
		Ave.		SD(1 σ)	Ave.		SD(1 σ)	Ave.		SD(1 σ)	Ave.		SD(1 σ)
Urban area	732	-0.31	+1	0.11	-0.47	+I	0.09	-0.50	+1	0.08	-0.56	+1	0.10
Forest area	5,852	-0.28	+I	0.10	-0.45	+I	0.08	-0.46	+I	0.09	-0.51	+1	0.09
All areas	8,923	-0.29	+1	0.11	-0.45	+1	0.08	-0.47	+1	0.09	-0.52	+1	0.10
										X Ave.: ^Σ	F均值、SI	D:槽:	卞準偏差

(国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版)29/に基づく) Table 6-4 森林部及び市街地部における空間線量率の相対減少率の比較

※Ave.:平均值、SD:標本標準偏差

0.08

+I

-0.62 -0.63

+ 0.09

-0.56

8,923

All areas

0.09

+I

0.09

+1

-0.56

5,771

Forest area

SD(1 σ)

Ave.

SD(1 σ)

Ave.

(10th-4th)/4th

(9th-4th)/4th

Gross area (km²)

Area

Relative reduction rate of dose rate

0.09

+I

-0.66

0.09

+I

-0.59

791

Urban area

JAEA	-Technolog	gy 2022-02	27

Relative reduction rate of dose rate	h)/4th SD(1 σ) : 0.08 : 0.07	(16th-4t Ave. -0.78 ± -0.76 ± -0.77 ±		h)/4th SD(1 : 0.10 : 0.08 : 0.08	+ - + + + + + +	(15 Ave. -0.76 -0.74 -0.75	4th D(1 σ) 0.08 0.08 0.08	+ + + + + +	(14th- (14th- –0.76 –0.74 –0.74	/4th SD(1 σ) 0.10 0.08 0.08	4th)	(13th Ave. -0.74 -0.72 -0.73	/4th SD(1σ) 0.08 0.07 0.08	+ + + + +	(12th Ave. -0.73 -0.71 -0.72	/4th SD(1 σ) 0.07 0.06 0.07	+ + + + +	(11th Ave. -0.73 -0.70 -0.70	·	Gross area (km ²) 836 5,843 8,923
$ (12 \text{th} -4 \text{th})/4 \text{th} (13 \text{th} -4 \text{th})/4 \text{th} (14 \text{th} -4 \text{th})/4 \text{th} (15 \text{th} -4 \text{th})/4 \text{th}) Ave. SD(1 \sigma) Ave. SD(1 \sigma) Ave. SD(1 \sigma) Ave. SD(1 \sigma) -0.73 \pm 0.08 -0.74 \pm 0.10 -0.76 \pm 0.08 -0.76 \pm 0.10 \\ -0.71 \pm 0.07 -0.74 \pm 0.08 -0.74 \pm 0.08 \\ -0.74 \pm 0.08 -0.74 \pm 0.008 \\ -0.74 \pm 0.08 -0.74 \pm 0.008 \\ -0.$			~ ~	0.08	-1 +1	-0.75	0.08	-1 +1	-0.74	0.08	-1 +1	-0.73	0.08	·I +I	-0.72		0.07	→ 0.00 ± 0.07	-0.70 ± 0.07	0.01 ± 0.00 ± 0.01 8,923 -0.70 ± 0.07
	+1	-0.76	۱ ~	: 0.08	+1	-0.74	0.08	+I	-0.74	0.08	+I	-0.72	0.07	+1	-0.71	0.06		+1	-0.70 ±	5,843 −0.70 ±
(12 th - 4 th)/4 th (13 th - 4 th)/4 th (14 th - 4 th)/4 th (15 th - 4 th)/4 th (16 th)/4 th (16 th - 4 th)/4 th (16 th - 4 th)/4 th (16 th - 4	: 0.08	-0.78 ±		: 0.10	+1	-0.76	0.08	+1	-0.76	0.10	+1	-0.74	0.08	+I	-0.73	0.07		+1	-0.73 ±	836 -0.73 ±
(12th-4th)/4th (13th-4th)/4th (14th-4th)/4th (15th-4th)/4th (15th-4th)/4th (16th-4th)/4th	SD(1 σ)	Ave.	σ)	SD(1		Ave.	D(1 J)	S	Ave.	SD(1 σ)	•,	Ave.	SD(1 σ)		Ave.	SD(1 σ)	0,1	0)	Ave. S	Ave. S
	h)/4th	(16th-4t		h)/4th	th-4t	(15	4th	-4th)/	(14th-	/4th	-4th)	(13th	/4th	-4th)	(12th	ţ	4	-4th)/4	(11th-4th)/4	Gross area (11th-4th)/4 (km ²)

Table 6-5 森林部及び市街地部における空間線量率の相対減少率の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(平成 28 年度公開版)23)に基づく)

7. 地形の起伏による影響と補正方法

7.1. 背景

日本の国土に対して、山地及び丘陵地は約7割を占めている。我が国における原子力発電所の 立地周辺地域にも、このような山地及び丘陵地が多く存在する。航空機モニタリングにおいては、 測定されるγ線計数率に対して高度補正係数や空間線量率換算係数による補正を施して、地表面 から1mの高さの空間線量率の計算を行っている。これは測定対象となる地表面が平坦であると 仮定した単純な補正方法であり、このような仮定に基づいて計算を行った場合、実際に地上で測 定される空間線量率と航空機モニタリングにより算出される空間線量率とに乖離が生じる可能性 がある。実際にどの程度の差異が生じるのかについて定量的な評価を行うために、モンテカルロ シミュレーションによって地形の起伏を考慮した解析が行われた²⁴⁾。当該解析結果を基に、起伏 のある地形上で測定された計数率をより正確に空間線量率に換算する方法を検討し、第16次モ ニタリングのデータに適用した。その結果と地上測定結果を比較し、地形の起伏を考慮した解析 手法による空間線量率計算値の精度向上効果を評価した。

7.2. 地形の起伏による測定への影響

航空機モニタリングにおいて測定された γ 線計数率は式 [2] で示したとおり、空間線量率換算 係数 (CD) で除することによって空間線量率へ変換される。CD は平坦な地形上における地表面か ら 1 m の高さの空間線量率 D_{FLT} とその上空 300 m において測定された γ 線計数率 C_{FLT} との比で定 義されている。平坦な地形上では、この比は一定とみなせるが、起伏のある地形の場合、この比 率が地形の起伏度に応じて変化する。平坦な地形上における空間線量率換算係数 CD は、以下の ように示される。

$$CD = D_{\rm FLT} / C_{\rm FLT}$$
[14]

一方、起伏のある地形上の空間線量率換算係数 CDtは、以下のように示される 24)。

$$CD_{t} = D_{t}/C_{t}$$
[15]

ここで、 $D_t \ge C_t$ はそれぞれ、起伏のある地形上における、地表面から1mの高さの空間線量率と その上空 300 mにおいて測定される γ 線計数率である。表面汚染密度が均一な場合、 $D_{FLT} \ge D_t$ は 同程度とみなせるため、式 [14] 及び式 [15] から、地形の起伏の有無による *CD* の変化は以下の ように計数率の比として表せる ²⁴。

$$\frac{CD_{t}}{CD} = \frac{C_{FLT}}{C_{t}}$$
[16]

地形の起伏により、式 [16] に示した比がどの程度変化するかを評価するため、福島原子力発 電所を中心とする半径 80 km 圏内において、Fig. 7-1 に示すように、無作為に 480 点の評価点を設 定し、各評価点における C_tが計算された²⁴⁾。当該計算についての概略を以下に示す。

評価点の高度は、航空機モニタリングにおける基準高度である対地高度 300 m であり、計算に は粒子輸送コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)⁵⁴⁾が用いられた。PHITS によ る計算において、設定する線源形状は Fig. 7-2 のように設定された。まず、数値標高モデル (DEM)³⁷⁾を基に、評価点直下から半径 800 m の領域が三角ポリゴンモデルに変換された。三角ポ リゴンそれぞれを個々の平面線源とみなし、各三角形線源の強度は三角形面積を重みとした加重 平均値として設定された。Cs-137 について、以上に示した計算から得られた計数率比の頻度分布 を Fig. 7-3 に示す ²⁴⁾。Fig. 7-3 から、計数率比の平均値は 0.9 となり、地形を平坦とみなした場合 に空間線量率が高く評価される傾向にあることが示唆された。



Fig. 7-1 無作為に抽出した評価点の位置²⁴⁾ (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. 7-2 数値標高マップから三角ポリゴンへの変換例²⁴⁾



Fig. 7-3 平坦な地形と起伏のある地形における対地高度 300 m での計数率比の頻度分布²⁴⁾

7.3. 地形の起伏による影響の補正

平坦な地形に対して、基準高度 H_{std} (300 m) で飛行しながら測定した場合、4.1 節で触れたとおり、測定点直下の概ね半径 300 m の範囲内における γ線計数率を測定していることになる。つまり、RSI システムから直線距離で約 425 m の範囲内で見込める領域 (S_{FLT}) から飛来する γ線が測定できていることになる。

一方、地形の起伏がある場合、基準高度 H_{std} (300 m) において測定している場合でも、Fig. 7-4 に示すように、周囲の標高の違いにより、測定範囲内の平均標高 (*E*mean) は変化する。例えば、平 均標高が測定点直下標高 (*E*) よりも高い場合、線源と RSI システムの平均距離はより近くなる。 さらに、RSI システムから直線距離 425 m で見込める面積 (*S*) が大きくなるとともに、起伏によっ て線源表面積が増加し、γ線計数率 (*C*) も大きくなる。以上のことから以下の式 [17] を用いて平 坦な地形における *CD* に対して、地形の起伏を考慮に入れた補正を適用して、空間線量率 *D* の計 算値に及ぼす影響を解析することを検討した。本報告では、地形の起伏を考慮に入れた補正計算 方法を「地形補正手法」と呼称する。

$$D = \frac{C}{CD \frac{\exp(-AF H_{m'})}{\exp(-AF H_{std})} \frac{S_{FLT}}{S}}$$
[17]

ここで、Hmは測定時の対地高度Hmから以下のように求められる。

$$H_{\mathbf{m}'} = H_{\mathbf{m}} - (E_{\mathrm{mean}} - E)$$
[18]

地形補正手法を用いて、第 16 次モニタリングの解析を行い、規制庁と原子力機構が行っている、福島県内における NaI(TI)検出器 (日立製作所製 TCS-172B)を用いた地上測定値⁴¹⁾との比較を行った。なお、本比較には福島原子力発電所から半径 80 km 圏内に位置する地上測定値のみ(4,841 点)を用いた。本手法を適用する前後の第 16 次モニタリングの空間線量率マップ比較結果をFig. 7-5 に示す。従来の解析方法を用いた場合と比較して、全体的に空間線量率マップ比較結果をFig. 7-5 に示す。従来の解析方法を用いた場合と比較して、全体的に空間線量率(D_{GND})に対する D_{GND} と航空機モニタリングにより得られた空間線量率(D_{ARM})の差の比(相対誤差:($D_{ARM} - D_{GND}$)/ D_{GND})の頻度分布を用いた。本手法を適用する前後の第 16 次モニタリングにおける相対誤差の頻度分布を Fig. 7-6 に示す。従来手法に比べて地形補正手法を適用した後では 0 付近に頻度分布が多くなり、理想的な分布に近づいたと言える。標本標準偏差については従来手法では0.57 であったのに対し、地形補正手法では0.54 となった。同様に、平均値については0.29 から0.17 に、中央値については0.15 から0.04 となり、地上測定値の再現性がよくなったと言える。今後、本解析手法の更なる改良を目指し、式[17]で示した CDの補正方法について、特にS及びSFLTのより適切な設定方法に着目した検討及び計算速度の高速化に資する改良を加える予定である。



Fig. 7-4 地形の起伏による影響を補正する場合に考慮すべき点





8. ラドン弁別手法を適用した空間線量率マップの作成

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、気体であるラドンが存在し、ラドンの一部は大気中に散逸する。Fig. 8-1 に主な天然の放射性壊変系列であるウラン系列とトリウム系列について示す。大気中に散逸したラドンは、Po、Pb 及び 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よる測定高度である対地 300 m 付近において、ラドン子孫核種濃度が測定された例が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程度となっている⁵⁵⁾。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⁵⁶⁾。

ラドン子孫核種の放出するγ線は、地殻にも同じ核種が存在するので、地上からの放射線との γ線スペクトル上で弁別が困難である。また、放射性 Cs の放出するエネルギーに似ているため、 現在用いている航空機モニタリングシステムの NaI(TI)検出器では、福島原子力発電所事故の影 響を受けた地域近傍において、なおさら弁別が困難となる。Table 8-1 にラドン子孫核種の放出す るγ線エネルギーについて示す。これらのラドン子孫核種の影響を除去し、航空機モニタリング による空間線量率への換算を高精度化する検討を 2015 年度に実施した¹⁹⁾。2016 年度は、開発した 手法を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組み込んだ²⁰⁾。 2017 年度は本手法を測定結果に適用し、その妥当性を検証した²²⁾。本手法の更なる高度化に資 するために、8.2 節にて詳述するパラメータ等のデータ蓄積を行う必要があると考え、本年度も ラドン子孫核種による影響を除去した空間線量率マップの作成を行い、その妥当性を検証した。 以下、大気中の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. 8-1 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)

Nuclide	Series	Gamma energy (keV)	Blanching 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 8-1 ラドン子孫核種の放出する γ線

8.2. ラドン弁別手法の理論

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 ネルギー領域が広範である。よって、航空機モニタリングで取得される全計数率から、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、空気中の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の例 が示されている⁴³)。原子力機構では当該手法を参考にして、空気中のラドン子孫核種に起因す るγ線を測定する検出器に LaBr₃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。本節では、ラドン弁別手法の概略を示す。

LaBr₃検出器をヘリコプター内に搭載した状況を Fig. 8-2 に示す。本図のように、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のγ線のみを測定できる ようにするために、LaBr3 検出器は NaI(TI)検出器の上方に配置する。ラドン弁別手法では、空気 中のラドン子孫核種及び地表面の放射性核種とヘリコプター機内に搭載した NaI(TI)検出器及び LaBr₃検出器との位置関係によって生じるであろう、両検出器間の計数率の差異に着目する。Fig. 8-3 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。このように、地表面 の γ 線放出核種は常にヘリコプターの下方に存在するのに対し、大気中のラドン子孫核種はヘリ コプターの周囲に存在する。つまり、地表面の放射性核種から放出されるγ線はヘリコプター下 方から飛来することから、NaI(TI)検出器に遮へいされて LaBr3 検出器では比較的計数されにくい。 一方で、空気中のラドン子孫核種由来のy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 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。以 上のことから、地表面の放射性核種由来のγ線に着目した場合における LaBr₃検出器の計数率に 対する NaI(TI)検出器の計数率の比 (NaI(TI)検出器計数率 / LaBr3 検出器計数率) は、空気中のラド ン子孫核種由来のγ線に着目した場合における NaI(Tl)検出器計数率 / LaBr,検出器計数率よりも 大きくなると推察される。このような、NaI(TI)検出器と LaBr₃検出器におけるγ線計数率に見ら れるであろう差異を利用し、全計数率から空気中ラドン子孫核種由来のγ線計数率を弁別するた めの換算パラメータを設定する。以下のように2つの換算パラメータを定義し、ラドン弁別手法 のコンセプトを数式化した。

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検出器の計数率 ($C_{LaBr,g}$) に対する NaI(Tl)検出器の計数率 ($C_{Nal,g}$) の比 ($C_{Nal,g} / C_{LaBr,g}$) をグ ラウンドインデックス (以下、GI) と定義する。一方、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検出器の計数率 ($C_{LaBr,a}$) に対 する NaI(Tl)検出器の計数率 ($C_{Nal,a}$) の比 ($C_{Nal,a} / C_{LaBr,a}$) をラドンインデックス (以下、RI) と定義 する。これら 2 つのパラメータを利用して全計数率からラドン子孫核種由来の γ 線計数率を弁別 する。本手法は NaI(Tl)検出器における全計数率及び LaBr₃検出器における全計数率が式 [19] 及 び式 [20] で表すことができるという仮定に基づいている。また、GI及びRIは式 [21] 及び式 [22] で表される。式 [19]~[22] を $C_{Nal,g}$ について解くと、式 [23] が導かれる。

$$\boldsymbol{C}_{\text{NaI,all}} = \boldsymbol{C}_{\text{NaI,g}} + \boldsymbol{C}_{\text{NaI,a}}$$
[19]

$$C_{\text{LaBr,all}} = C_{\text{LaBr,g}} + C_{\text{LaBr,a}}$$
[20]

$$GI = \frac{C_{\text{NaI},g}}{C_{\text{LaBr},g}}$$
[21]

$$RI = \frac{C_{\text{Nal,a}}}{C_{\text{LaBr,a}}}$$
[22]

$$C_{\text{Nal,g}} = \frac{GI(C_{\text{Nal,all}} - RI \cdot C_{\text{LaBr,all}})}{GI - RI}$$
[23]

ここで、

C_{NaLall}: NaI(Tl)検出器における全計数率 (30 keV~2800 keV) (s⁻¹)

CNalg: NaI(TI)検出器における全計数率の内、陸地の放射性核種から放出される

γ線計数率(s⁻¹)

C_{Nal,a}: Nal(Tl)検出器における全計数率の内、空気中のラドン子孫核種から放出される γ線計数率(s⁻¹)

CLaBrall: LaBr₃検出器における全計数率 (50 keV~700 keV) (s⁻¹)

CLaBr,g: LaBr₃検出器における全計数率の内、陸地の放射性核種から放出される

γ線計数率(s⁻¹)

CLaBra: LaBra検出器における全計数率の内、空気中のラドン子孫核種から放出される

γ線計数率(s⁻¹)

GI:陸地で取得したデータにおけるLaBr₃検出器の計数率に対する NaI(TI)検出器の計数率の比

RI:海上で取得したデータにおけるLaBr₃検出器の計数率に対する NaI(Tl)検出器の計数率の比である。

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 8.3 節に詳述する。



Fig. 8-2 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. 8-3 空気中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ

8.3. パラメータ (GI 及び RI) の決定

式 [23] に記載したように、ラドン弁別法の信頼性は GI と RI の設定精度に依存する。ヘリコプ ターの遮蔽による 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、東日本第 12 次モニタリングで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。なお、東日本第 12 次モニタリングで使用したヘリコプターは Bell412 (JA6767)、Bell430 (JA05TV) 及び Bell430 (JA02AX) である。

計数率の変動による影響をなるべく低減するために、東日本第 12 次モニタリングにおいて取 得した計数率データ及び 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 GI の算出に用いた。このとき、対地高度が 300 m 前後 (実際のフライト対地高度が 290 m~320 m のデータ) のデータのみを対象とした。NaI(TI)検出器の計数率と LaBr₃ 検出器の計数率の関係を Fig. 8-4 に示す。本散布図に示された単回帰直線の傾きを GI とした。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り、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。

RI については、東日本第12次モニタリングにおいて海上でフライトしたデータがほとんどな く、RIの算出に適したデータが得られなかったため、第 16 次モニタリングのデータを用いるこ ととした。第16次モニタリングにおいて取得したデータをGIの場合と同様にして40秒平均及 びバックグラウンドの減算を行ったうえで RI の算出に用いた。このとき、海抜高度が 300 m ± 150m(実際のフライト海抜高度が150m~450m)で取得したデータを対象として、NaI(TI)検出器 及び LaBr3 検出器の計数率の平均値を算出し、それぞれの検出器における計数率が平均値 ±2標 本標準偏差以内に収まるデータのみを抽出し使用した。これは過去に実施したラドン弁別手法の 評価²⁹⁾において、海抜高度が上記した範囲内であることのみを制約条件にすると、RIの数値に 悪影響を及ぼすようなデータが残留する場合があるという知見に基づいた、計数率に関する制約 条件を付加して RI の算出に適したデータを簡易的にスクリーニングするための工程である。 NaI(TI)検出器の計数率と LaBr₃検出器の計数率の関係を Fig. 8-5 に示す。本散布図に示された単 回帰直線の傾きを RI とした。RI については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、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し、プロットがややばらつくと思われる。RI を適切に設定するために、 現行の手法とは異なるデータスクリーニング方法や外れ値による影響を緩和するためにロバスト 回帰分析を適用すること等について今後検討する必要がある。



Fig. 8-5 海上における NaI(TI)検出器の計数率と LaBr₃検出器の計数率の関係 (単回帰直線の傾きを RI と定義)

8.4. GIの高度補正方法

GI については、2015 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ている。しかしながら、実測のデータ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²⁰⁾。以下では、その検討内容について簡単に記述する。

当該シミュレーションに用いた計算コードは、モンテカルロ計算コードの一種である電磁カス ケードモンテカルロコード EGS5³⁰であり、ヘリコプター内の検出器の体系が簡易的に Fig. 8-6 の ように模擬された。計算体系の妥当性については、正面及び横の周辺からの点線源を模擬した場 合の検出器のレスポンス計算値と、実際に有人のヘリコプターに NaI(TI)検出器を搭載した状態 で、点線源 (Cs-137)を照射することによって求めた検出器のレスポンス計算値の比較結果がベン チマークとなった (Fig. 8-7)。一部値が外れている部分は、計算体系で考慮していない局所的な構 造物が影響していると考えられるが、全体として構築した体系は検出器のレスポンスを再現する のに十分な精度を有すると思われる。当該計算体系に対し、地上の無限平板線源を模擬し、距離 を変化させることにより GI と測定高度 (300 m、450 m 及び 600 m) との関係が計算により評価さ れた。線源の模擬体系には、以下の条件が設定された。なお、土壌中の天然放射性核種濃度は全 国の地上測定結果の平均値 57)が採用された。

- ・空気 (1 km×1 km×1.3 km) と土壌 (深さ1m、 密度 p: 1.6 g/cm³)
- ・山等の地表面の凹凸を再現せずに地面は平坦である。
- ・地面中の自然放射性核種(U系列、Th系列、K-40)は水平方向及び深さ方向に一様分布する。
- ・地面中の人工放射性核種 (Cs-134、Cs-137) は表層から深さ方向に指数関数的な分布 (重量緩衝 深度 β=3 g/cm²)をする。
- ・土壌中の天然放射性核種濃度はそれぞれ、K-40:500 Bq/kg、U系列:20 Bq/kg、Th系列:10 Bq/kg、Cs-134:50 kBq/m²、Cs-137:200 kBq/m²である。

検出器と線源の距離(測定高度)に対する GIの計算結果を Fig. 8-8 に示す。このように測定高度と GI は正の相関関係にあることが見出された。

本報告において、Fig. 8-8 に示した回帰直線の傾きを (0.0333) を GIの高度補正係数として採用 し、式 [24] に基づいて各測定高度で取得したデータに対して高度補正を施した GIを用いた。

$$GI_{\rm corr} = 0.0333 \times (H_{\rm a} - H_{\rm std}) + GI$$
^[24]

ここで、*GI*_{corr}は高度補正後の *GI*、*H*_aは測定時における対地高度 (m)、*H*_{std}は基準高度 (300 m)、 *GI* は高度補正前の *GI* である。





Fig. 8-8 シミュレーションによる測定高度と GIの関係

8.5. 東日本第12次モニタリングのデータへの適用

ラドン弁別手法は、大気中のラドン子孫核種の計数率と地上からの計数率が拮抗している場所 に効果的であり、放射性 Cs の影響が大きな地域では大気中のラドン子孫核種の影響は無視でき る。よって、本手法は放射性 Cs の影響が大きい福島原子力発電所から 80 km 圏内を測定する第 16 次モニタリングには適用せず、東日本第 12 次モニタリングのみに適用した。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、空間線量率の計算 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。このことが普遍的に成立するかを検 証するために、Fig. 8-4 に示したヘリコプター機体ごとの 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、Bell412 (JA6767) では 28.5、Bell430 (JA05TV) では 27.4、Bell430 (JA02AX) では 27.9 を GI の基準値とし、それぞれの GI を 27.5 及び 26.5、26.4 及び 25.4、そして 26.9 及び 25.9 とした場合についても解析し、それぞれの場合で空間 線量率マップを作成した。また、空間線量率の計算値を地上測定値 300 点と比較し、その妥当性 を検証した。

Fig. 8-9 にラドン弁別手法を適用した東日本第 12 次モニタリングの空間線量率マップを示す。 本図にはラドン弁別手法を適用しない解析結果 (「ラドン弁別なし」と表記) についても比較と して示した。ラドン弁別なしのマップはバックグラウンド計数率として BG フライトで得られた 計数率を減算していないため、Fig. 5-5 で示した従来手法における空間線量率マップとは異なる。 ラドン弁別なしのマップと比べて、ラドン弁別手法を適用したマップでは空間線量率が比較的高 いことを示す色の面積が減少していることから、本手法によりバックグラウンド計数率が減算で きていることが分かる。また、空間線量率の計算値は *GI* を基準値から減じるほど全体的に大き くなる傾向にある。なお、4 章で示した従来の空間線量率の換算手法においては、BG フライト により得られた計数率をバックグラウンドとして減算しており、その中にはラドン子孫核種由来 の計数率も含まれていると考えられ、ある程度ラドン子孫核種の影響が差し引かれていると思わ れる。BG フライトで取得したデータを用いた場合とラドン弁別手法を用いた場合とで、全計数 率から減算されるバックグラウンド計数率の値がどのように異なるかについては次節で比較する。

ここで、ラドン子孫核種の影響の大きい地域について考察するために、空気中のラドン子孫核 種由来の計数率のマップを作成した (Fig. 8-10)。本マップは、東日本第 12 次モニタリングにおけ るラドン弁別手法の過程で計算した、NaI(TI)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。Nal(Tl)検出器における空気中ラドン子孫核種由来の計数率は、 式 [23] で求めた C_{Nal,g}を式 [19] に代入して C_{Nal,a}を計算し求めた。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。ラドン子孫核種由来の計数率が高く 算出されたのは、越後山脈から関東山地に渡る比較的標高の高い場所であった。一方、標高の低 い関東平野ではほとんど計数されなかったが、同様に標高の低い仙台平野周辺では計数率がやや 高く算出された。ここで、ラドン弁別手法において各ヘリコプターに対して適用した GI (基準 値) 及び RI を改めて見てみると、Bell412 (JA6767) では 28.5 及び 19.8、Bell430 (JA05TV) で 27.4 及び 15.9、Bell430 (JA02AX) で 27.9 及び 23.0 である。いずれのヘリコプター機体でも GI は概ね 28 前後で一貫しているのに対し、RI は概ね 20 前後ではあるがヘリコプター機体によってやや異 なる場合があり、本報告では Bell430 (JA05TV) が 20 をやや大きく下回った。式 [23] より、大ま かには C_{Nal,g} と GI とは負の相関、RI とは正の相関にそれぞれあり、従って RI が小さくなると C_{Nal,g}も小さくなり、このとき式 [19] に代入して得られる C_{Nal,a}は相対的に大きくなる。このこと から、Bell430 (JA05TV) が測定した仙台平野周辺を含む、東日本第 12 次モニタリングの測定エ リア北部一帯では、空気中のラドン子孫核種由来の計数率がやや大きく算出されたと推察される。 また、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⁵⁸⁾。一方、東日本 第12次モニタリングの測定時期は9月26日~10月25日であったことから、大陸からの大気輸 送による影響は小さいと考えられ、また後者由来のものは濃度の時間変化は小さいと考えられる。 さらに、本結果はラドン子孫核種に起因する計数率が比較的高く算出された標高の高いエリアで は花崗岩が分布していること 59)と矛盾しない。

ラドン弁別手法で作成した空間線量率マップの妥当性を評価するために、地上測定値 300 点と の比較を行った。比較結果を Fig. 8-11 に示す。ラドン弁別手法適用前後の結果を比較すると、散 布図においては適用後の方が回帰直線の傾きは 1.00 に近づく傾向にあり、GI を減じるほどに傾 きが大きくなった。これは Fig. 8-9 で見られた通り、GI を減じることで航空機モニタリングによ る空間線量率の計算値が上昇することに起因する。また、ファクター2 に収まるプロットの数に 着目すると、ラドン弁別手法適用前では 97 % (全 300 点中 292 点) であったのに対し、適用後で は GI を基準値とした場合で 96 % (全 300 点中 289 点)、GI を基準値から 1 減じた場合で 97 % (全 300 点中 291 点)、GI を 2 減じた場合で 97 % (全 300 点中 291 点) と比較的少なくなるものの、そ の差は僅かである。相対誤差のヒストグラムについては、ラドン弁別手法適用前よりも適用後の 方が平均値及び中央値が 0 に近づき、ラドン弁別手法により地上測定値の再現性がある程度良く なったと言える。本報告においては、GI を基準値とした場合の方が、GI を基準値から減じた場 合よりも相対誤差の平均値及び中央値が 0 に最も近く、今までの経験則とは異なる結果が得られ た。本手法には GI や RI の決定方法や GI の高度補正方法に不正確さが残っているため、今後も 知見を蓄積し、最適化を行っていく必要がある。



Fig. 8-9 ラドン弁別手法適用前後の東日本第 12 次モニタリング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. 8-10 東日本第 12 次モニタリングの測定結果から計算した空気中ラドン子孫核種の計数率マップ

(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. 8-11 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率と地上測定値との比較 (東日本第12次モニタリング)

(1/2)



Fig. 8-11 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率と地上測定値との比較 (東日本第12次モニタリング)

(2/2)

8.6. バックグラウンド計数率の比較

Fig. 4-14のフロー図に則った標準的な解析手法(以下、従来手法)においては、BGフライトと して対地高度約900mに機体を保ち約2分のフライトを継続して得られたデータをバックグラウ ンド計数率として減算しており、ある程度ラドン子孫核種由来の計数率を差し引くことができて いると思われる。従来手法またはラドン弁別手法によるバックグラウンド計数率を用いた場合で、 空間線量率マップにどのような差異が見られるかを比較した(Fig. 8-12)。なお、本図に示した従 来手法による空間線量率マップはFig. 5-5、ラドン弁別手法による空間線量率マップはFig. 8-9 (右上、GIを基準値とした場合)とそれぞれ同一である。このように全体的な空間線量率分布の 傾向は概ね一致しており、従来手法であってもラドン子孫核種の計数率はある程度除去できてい ることが推察される。詳細に見ると、福島県西部の会津地方、栃木県北部、群馬県北部等におい ては、従来手法よりもラドン弁別手法を適用した方が空間線量率の比較的高い場所が散見された。

ここで、従来手法で用いた測定日ごとのバックグラウンド計数率と各ヘリコプターにおける GIを基準値とした場合のラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率の比較を Fig. 8-13 に 示す。いずれも、従来手法における BG フライトを実施した時刻及び場所で取得した計数率デー タを基に算出したものである。本図には比較のため、福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs が 存在しないと考えられる関西電力大飯発電所並びに高浜発電所周辺で、2021 年度に実施した航 空機モニタリング (大飯・高浜 BG と表記) において従来手法に用いたバックグラウンド計数率と ラドン弁別手法で求めたバックグランド計数率もプロットした。全体的にプロットにはばらつき が見られ、従来手法で用いたバックグラウンド計数率よりもラドン弁別手法で求めたバックグラ ウンド計数率の方が、Bell412 (JA6767) 及び Bell430 (JA02AX) については、全体平均としてそれ ぞれ 1.1 倍及び 1.4 倍程度高くなった。一方で、Bell430 (JA05TV) についてはラドン弁別手法で求 めたバックグラウンド計数率の方が 0.8 倍程度低くなった。また、大飯・高浜 BG で使用した Bell412(JA6928)については、ラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率の方が 1.2 倍程度 高くなった。以上のことから、東日本第 12 次モニタリングにおいて Bell412 (JA6767) 及び Bell430 (JA02AX) が測定を行った南部エリア(茨城県、千葉県北部、埼玉県北部) 及び西部エリア (栃木県中央部から群馬県一帯)では、ラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率は従来手 法のものよりもやや大きくなり、従って空間線量率はやや低くなることが推察される。それとは 対照的に、Bell430 (JA05TV) が測定を行った北部エリア (宮城県一帯)、中央エリア (福島県西部)、 南部の一部 (栃木県東部から茨城県北西部) ではラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数 率は従来手法よりも小さく、空間線量率はやや高くなったと推察される。しかしながら、空間線 量率マップの色合いが顕著に異なる程の差異に繋がるわけではない。また、東日本第 12 次モニ タリングと大飯・高浜 BG の間に、ラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率と従来手法 で用いたバックグラウンド計数率の関係性に顕著な違いが認められなかったことから、放射性 Cs の影響がある程度存在するような環境下においても、ラドン弁別手法によって従来手法とほ とんど同等の精度でバックグラウンド計数率の推定が可能であることが示唆される。

従来手法では BG フライトにより得られた計数率を、その日の測定エリア全体におけるバック グラウンド計数率の代表値として扱うことから、特に、測定エリア近傍における地設から放出さ れる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、空気中のラドン子孫核種(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点に強みがあり、放射性 Cs に起因する空間線量率マップの精度向上に資するものである。以上のことから、ラドン弁別 手法の更なる高度化に係る検討を重ねていく必要がある。





Fig. 8-13 従来手法で用いたバックグラウンド計数率とラドン弁別手法で求めたバックグラウンド 計数率の比較

9. 本年度の成果と今後の課題

2021年度に得られた成果をまとめ、今後の課題について示す。

・RSI システム及び高精度 GPS システムの保守方法について

RSI システムを導入してから 11 年目となり、軽微な異常が何件か発生している。例えば、GPS のエラーによるデータの未取得や RSI システムのバグ等である。RSI システムの保守・運用につ いても、時間が経つにつれて必要性が増すため、メーカーを含めた保守体制作りが必要と考える。 また、検出器に使用されている NaI(TI)結晶は吸湿性を有し、空気中で潮解することが知られて いる。潮解による検出効率の低下時期については空気との接触状況にもよるため一概に言えない が、検出器は購入から 11 年が経過したものもあり、現在は運用を停止しているものの、このよ うな古い検出器の特性の変化を注視したうえで更新のタイミングを計画していく必要がある。ま た NaI(TI)結晶を被覆している金属性のケース内側に塗布されている酸化マグネシウム等の反射 体に、機械的な振動等が原因で局部的な片寄りが生じる場合があり、波高値及び分解能が変化す る可能性もある。さらに、現在用いているデータ収集装置 (RS-701) の後継品 (RS-705) が RSI か ら発売されており、将来的に RS-701 に対するサポートが終了する懸念があることから、後継品 の導入の検討が必要である。今後も航空機モニタリングを継続していく上で、RSI の最新情報を 入手するよう努めるとともに、トラブルの予防保全のために計画的に航空機モニタリングシステ ムを更新することが望ましい。高精度 GPS システムについては、GNSS 受信機の性能が向上して きており、複数衛星からの信号受信を行うことが可能である。また、複数の周波数帯の信号を受 信することで電離層遅延の解消が可能であり、測位誤差の改善も成されてきている。今後も GNSS 受信機に関する最新の知見を入手するよう努め、高精度 GPS システムの更新も随時検討す ることが望ましい。さらに、RSI システムの GPS 測位データでなく、高精度 GPS システムの測 位データをメインに使用して空間線量率マッピング等を実施することも検討する必要がある。参 考として、RSI システムの運用を開始した 2011 年度から 2021 年度までの RSI システムの保守・ 運用実績を Table 9-1 に示す。

・空間線量率マップや放射性 Cs 沈着量マップについて

様々なヘリコプターと RSI システムの組み合わせごとの解析パラメータの蓄積が行われ、信頼 性の高い数値の選択が可能になってきたと判断し、各解析パラメータに固定パラメータを用いた。 一方、航空機モニタリングで初めて使用することとなった Bell430 (JA02AX) には固定パラメータ ではなく、2021 年度に実施したキャリブレーションフライトのデータを基にパラメータを設定 した。結果として、空間線量率マップは地上測定値ともよく整合し、今後も同様な方法で問題な いと考える。キャリブレーションフライトは、確認及び参考データの位置付けとしつつ、今後と も実施してデータを蓄積し、現行の解析パラメータを過信することなく、再設定を行うべきかを 適宜検討することが望ましい。他方で、Cs-137 の沈着量マップについては可搬型 Ge 検出器によ る地上測定値を再現するのが困難な場合があることが認められた。これには、航空機モニタリン グにおいて、測定範囲全域で重量緩衝深度 β = 1 (g/cm²) を一律に適用していることが原因の一つ と考えられることから、土地利用区分に応じて、より適切な β の設定値について検討するなどし、 Cs-137 沈着量の計算精度の向上に取り組む必要がある。また、Cs-134 と K-40 のピークを弁別し て作成した天然放射性核種由来の放射線量率マップは、可搬型 Ge 検出器による測定で評価した 天然放射性核種由来の放射線量率とよく一致した。このことから、上記の二つの放射性核種の複 合ピークを仮定した関数適合法によって、Cs-134 が有意に存在するような地域においても、天 然放射性核種の影響の度合いを推定できることが示された。

・地形の起伏を考慮した空間線量率の補正手法について

航空機モニタリング解析システムに組み込んだ、地形の起伏を考慮する解析手法を 2021 年度 の航空機モニタリング結果に適用し、地上測定値を指標として、地形を平坦と仮定している従来 手法と比較を行うことで、空間線量率の計算精度向上効果について定量的評価を行った。地形の 起伏を考慮した場合、空間線量率は従来手法に比べ全体的に低く評価される傾向にあった。空間 線量率の計算結果について地上測定値との相対誤差ヒストグラムに着目した場合、従来手法に比 べて本手法では平均値及び中央値が0に近づく等、理想的な頻度分布に近づくことが分かった。 今後は空間線量率が特に小さく評価される傾向にある地形の特徴を明らかにし、本手法に組み込 まれている空間線量率の補正式のブラッシュアップに繋げる等、詳細な分析を進めていきたい。 ・空気中ラドン子孫核種の弁別手法について

第 12 次東日本モニタリングのデータにラドン弁別手法を適用した。地上測定値と比較した結 果から、当該手法は BG フライトを行ってバックグラウンドを減算する従来手法についても精度 的に劣るものでないことが分かった。ラドン弁別手法では、測定地点ごとに大気中ラドン子孫核 種の影響が除去できることから、本手法の高度化を継続していくメリットは大きい。今後も従来 手法と比較しつつデータを蓄積し、本手法に使用する GI やRI 等のパラメータを最適化するため のデータスクリーニング方法について検討していくことが望ましい。

システム	構成機器	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
RSI 1	NaI検出器 RSX-3(1)	購入 運用開始							更新	運用開始			運用継続
	NaI検出器 RSX-3(2)	購入 運用開始								更新	運用開始		運用継続
	LaBr₃検出器 RSX−1					購入 運用開始							運用継続
	RS-501	購入 運用開始										更新	運用開始 予定
	RS-701	購入 運用開始											運用継続
	PDU	購入 運用開始										更新	運用開始 予定
	バッテリー	購入 運用開始					修理 2台				修理 1台	修理 1台	運用継続
	PC/RadAssist	購入 運用開始										更新	運用開始 予定
	サブモニタ	購入 運用開始											運用継続
RSI 2	NaI検出器 RSX-3(1)	購入 運用開始						更新	運用開始				運用継続
	NaI検出器 RSX-3(2)	購入 運用開始									更新	運用開始	運用継続 予定
	LaBr₃検出器 RSX−1					購入 運用開始							運用継続
	RS-501	購入 運用開始										更新	運用開始 予定
	RS-701	購入 運用開始											運用継続
	PDU	購入 運用開始										更新	運用開始 予定
	バッテリー	購入 運用開始					修理 2台				修理 1台	修理 1台	運用継続
	PC/RadAssist	購入 運用開始										更新	運用開始
	サブモニタ	購入 運用開始											運用継続
高精度 GPS	GPSアンテナ						購入 運用開始					更新	運用開始 予定
	受信機						購入 運用開始					更新	運用開始 予定
	気圧高度計						購入 運用開始					更新	運用開始 予定
	タブレットPC						購入 運用開始					更新	運用開始 予定

Table 9-1 RSI システムの保守及び運用実績

10. まとめ

2021年度に予定された、福島原子力発電所から半径 80km 圏内の航空機モニタリング1回及び 80km 圏外の航空機モニタリング1回を実施した。福島原子力発電所事故から航空機モニタリン グが日本で実施されて11年目となった。福島原子力発電所事故当時には定まっていなかった航 空機モニタリングの測定及びデータ解析手法が円熟してきており、RSIシステムの定期的な保守 及び軽微なトラブルへの対応経験並びに測定データ解析手法のノウハウが蓄積されてきている。 今回のモニタリング結果を過去の結果と比較し、福島原子力発電所事故の影響があったエリアの 空間線量率及び放射性 Csの地表面沈着量の全体的な減少傾向を把握することができた。

また、従来の測定データ解析手法の高度化に資するため、従来手法をベースとした応用的デー タ解析手法の開発を行ってきている。それら応用的手法の有効性を評価するため、応用的手法を 適用して得られた空間線量率マップと従来手法によるものとの比較を実施した。地形の起伏を考 慮に入れた計算手法を第16次モニタリングのデータに適用し、空間線量率マップの作成を行っ た。地形を平坦と仮定する従来手法によるものと比較したところ、地形の起伏を考慮に入れた場 合、全体的に空間線量率が低く算出されることが明らかとなった。地上測定値を指標として、そ れぞれの手法の計算精度について評価したところ、地形の起伏を考慮に入れた計算手法の方がよ り地上測定値に近づいたことから、当該手法が空間線量率の計算精度向上をもたらすことが示さ れた。また、東日本第12次モニタリングのデータにラドン弁別手法を適用して空間線量率マッ プを作成した。本手法により算出した地表面から1mの高さの空間線量率と地上測定値とを比較 したところ、従来手法により算出した空間線量率と地上測定値を比較した場合よりも、僅かなが らではあるが相関関係の改善が見られたことから、本手法が従来手法と同等以上の精度を有する ことが示された。開発してきた応用的データ解析手法の一元化を実施するとともに、解析手順や 注意すべき点、プログラムで自動化が困難であり解析者判断が求められる事項とその判断基準等 をマニュアルとして取りまとめていくことが望ましい。また、現在の航空機モニタリング解析プ ログラムが動作している Python 2 のサポート期限が 2020 年に終了したため、Python 3 への移行 が急務であり、プログラムの書き換えと動作検証を目下進めているところである。

謝辞

本調査研究は、「令和 3 年度原子力施設等防災対策等委託費及び放射性物質測定調査委託費 (80km 圏内外における航空機モニタリング)事業」による知見をと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、株式会社 JDRONE の 30 余名が、ヘリコプターに搭乗して 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。航空機の運 航は中日本航空株式会社、朝日航洋株式会社が行った。ここに本モニタリングに参加された皆様 に謹んで謝意を表します。また、本報告書にて、積雪分布箇所を調査するために使用したデータ (SGLI MODIS)は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)より提供を頂いた。ここに深く感謝の意を表 します。

参考文献

- 1) 飯田義正, 伊藤洋昭, 笹尾英嗣, 鶴田忠彦, 永島礼二, 三谷稔, 小林孝男, 海外ウラン資源探査-探 査技術取りまとめ-, JNC TN7410 2001-007, 2001, 330p.
- 2) Barasch G. E. and Richard H. B., Aerial radiological measuring surveys of the nuclear fuel services plant, west valley, New York, 1968 and 1969, AEC Report No. ARMS-68.6.9, 1972, 39p.
- Hendricks, T. J. and Riedhauser, S. R., An aerial radiological survey of the Nevada test site., DOE/NV/11718-324, 1999, 67p.
- Sanderson D.C.W., Cresswell A.J., Lang J.J. eds. An International Comparison of Airborne and Ground Based Gamma Ray Spectrometry. Results of the ECCOMAGS 2002 Exercise held 24th May to 4th June 2002, Dumfries and Galloway, Scotland. University of Glasgow, Glasgow. ISBN 0 85261 783 6., 2003, 387p.
- 5) 長岡鋭, 森内茂, 航空機 y 線サーベイシステム ARSAS, 保健物理, 25 (4), 1990, pp.391-398.
- 6) 森内茂,長岡鋭,坂本隆一,堤正博,斎藤公明,天野光,松永武,柳瀬信之,笠井篤,緊急時におけ る航空機サーベイ法確立とシステム実用化に関する検討, JAERI-M 89-017, 1989, 82p.
- 7) Saito, K. and Moriuchi, S., Conversion factors for estimating release rate of gaseous radioactivity by an aerial survey, JAERI-M 88-016, 1988, 84p.
- 8) 大西亮一, 無人ヘリコプターを活用した空中放射線測定システムについて, 航空と宇宙, 671, 2009, pp.8-14.
- 9) 原子力安全委員会,環境放射線モニタリング指針,2008.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 眞田幸尚, 日本全域における航空機モニタリング, FB news, 432, 2012, pp.7-11.
- 13) 原子力規制庁, 航空機モニタリング結果, https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/191/list-1.html (2022 年3月1日閲覧).
- 14) IAEA, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -(Second Report), 2011.
- 15) Inomata, Y., Aoyama, M., Hirose, K., Sanada, Y., Torii, T., Tsubono, T., Tsumune, D. and Yamada, M., Distribution of radionuclides in surface seawater obtained by an aerial radiological survey, J. Nucl. Sci. Tech., 51(9), 2014, pp.1059-1063.
- 16) 原子力規制庁, 文部科学省航空機モニタリング行動計画, 2011,
 https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5274/view.html (2022年3月1日閲覧).
- 17) 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, 髙村善英, 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.
- 18) 眞田幸尚, 森愛理, 石﨑梓, 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 年度福島原子力第一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.

- 19) 眞田幸尚, 宗像雅広, 森愛理, 石崎梓, 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, 髙村善英, 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.
- 20) 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,石﨑梓,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, 2018, 117p.
- 21) 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, 石﨑梓, 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.
- 22) 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.
- 23) 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, 石﨑梓, 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.
- 24) 普天間章, 眞田幸尚, 石﨑梓, 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.
- 25) 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, 石﨑梓, 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.
- 26) 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, 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.
- 27) 普天間章, 眞田幸尚, 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, 石崎 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.
- 28) 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, 嶋田和真, 外間智規, 平岡大和, ト部嘉, 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.
- 29) 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, ト部嘉, 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.

- 30) 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.
- 31) Sanada, Y., Sugita, T., Nishizawa, Y., Kondo, A., and Torii, T., The aerial radiation monitoring in Japan after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, Prog. Nucl. Sci. Tech., 4, pp.76-80, 2014.
- 32) 鳥居建男, 事故後初期の航空機モニタリングから得られたヨウ素 131 沈着量の分布,日本原子 力学会誌 (ATOMOΣ), 55(12), 2013, pp.702-706.
- 33) Torii, T., Sugita, T., Okada, C. E., Reed, M. S. and Blumenthal, D. J., Enhanced Analysis Methods to Derive the Spatial Distribution of ¹³¹I deposition on the Ground by Airborne Surveys at an Early Stage after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Health. Phys., 105(2), 2013, pp.192-200.
- 34) Ishizaki, A., Sanada, Y., Mori, A., Imura, M., Ishida, M. and Munakata, M., Investigation of snow cover effects and attenuation correction of gamma ray in aerial radiation monitoring, Remote Sens., 8(11), 2016, p.892.
- 35) Ishizaki, A., Sanada, Y., Ishida, M. and Munakata, M., Application of topographical source model for air dose rates conversions in aerial radiation monitoring., J. Environ. Radioact., 180, 2017, pp.82-89.
- 36) 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, 441p.
- 37) 国土地理院,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 (2022年3月1日閲覧).
- 38) 原子力規制委員会、ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法、放射能測定法シリーズ 33,2017.
- 39) ICRU, Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU report 53, 1994, 84p.
- 40) 原子力規制委員会, 令和 2 年度放射性物質測定調査委託費(東京電力株式会社福島第一原子力 発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業, 成果報告書, 2021, https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/579/list-1.html (2022 年 3 月 1 日閲覧).
- 41) 私信.
- 42) G. F. KNOLL, 神野郁夫, 木村逸郎, 阪井英次 (訳), 放射線計測ハンドブック (第4版), 日刊工業 新聞社, 2013, 70p.
- 43) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, 173p.
- 44) 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.
- 45) Nishizawa, Y., Sugita, T., Sanada, Y. and Torii, T., Analytical method for distribution of natural radionuclides after the FDNPP accident by aerial monitoring, Proceedings of the Twenty-First EGS Users' Meeting in Japan, KEK Tsukuba, 2014, pp.62-71.
- 46) 原子力規制委員会, 緊急時におけるゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトル解析法,

放射能測定法シリーズ 29,2018.

- ICRP, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, 1996, 179p.
- 48) 森内茂, 堤正博, 斎藤公明, 自然放射線における空気吸収線量から実効線量当量への換算係数の評価, 保健物理, 25(2), 1990, pp.121-128.
- 49) 環境省, 追加被ばく線量年間1ミリシーベルトの考え方, https://www.env.go.jp/press/files/jp/18437.pdf (2023年1月30日閲覧).
- 50) 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター, JASMES, https://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/index catalog j.html (2022年3月1日閲覧).
- Sanada, Y., Urabe, Y., Sasaki, M., Ochi, K., Torii, T., Evaluation of ecological half-life of dose rate based on airborne radiation monitoring following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, J. Environ. Radioact., 192, 2018, pp.417-425.
- 52) 安藤真樹, 松田規宏, 斎藤公明, KURAMA-II を用いた走行サーベイ測定による東日本での天然 放射性核種の空間線量率評価, 日本原子力学会和文論文誌, 16(2), 2017, pp.63-80.
- 53) 国土地理院,国土数値情報土地利用細分メッシュデータ, https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html (2022年3月1日閲覧).
- 54) Iwamoto, Y., Sato, T., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Matsuda, N., Hosoyamada, R. and Niita, K., Benchmark study of the recent version of the PHITS code, J. Nucl. Sci. Technol., 54(5), 2017, pp.617-635.
- 55) Oikawa, S., Nakano, N., 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.
- 56) 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.
- 57) 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/(2022年3月1日閲覧).
- 58) 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, Jpn. J. Health Phys., 53(4), 2018, pp.219-229.
- 59) 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 2015 年 5 月 29 日版, https://gbank.gsj.jp/seamless/ (2022 年 3 月 1 日閲覧).