JAEA-Technology 2019-016 DOI:10.11484/jaea-technology-2019-016



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)

Radiation Monitoring using Manned Helicopter around the Nuclear Power Station in the Fiscal Year 2018 (Contract Research)

普天間 章	眞田 幸尚	石﨑 梓	至 古宮 友	え和
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-	-彦 佐藤	義治
ト部 嘉 嶋	副田和真	森 愛理	廣内 淳	
平岡 大和	工藤 保			

Akira FUTEMMA, Yukihisa SANADA, Azusa ISHIZAKI, Tomokazu KOMIYA Takeyuki IWAI, Eisaku SEGUCHI, Yuki MATSUNAGA, Tomoki KAWABATA Masashi HAGINOYA, Shogo HIRAGA, Kazuhiko SATO, Yoshiharu SATO Yoshimi URABE, Kazumasa SHIMADA, Airi MORI, Jun HIROUCHI Hirokazu HIRAOKA 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

November 2019

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。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒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. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, 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, 2019

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)

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、石﨑 梓、古宮 友和、岩井 毅行^{*1}、瀬口 栄作^{*2}、
松永 祐樹^{*3}、河端 智樹^{*4}、萩野谷 仁^{*3}、平賀 祥吾^{*1}、佐藤 一彦^{*5}、佐藤 義治⁺¹、
卜部 嘉^{*1}、嶋田 和真⁺²、森 愛理^{*6}、廣内 淳⁺²、平岡 大和、工藤 保

(2019年8月26日 受理)

2011年3月11日に発生した東日本大震災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。 ここでは、2018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 てまとめた。過去の福島第一原子力発電所周辺におけるモニタリング結果から空間線量率等の 変化量を評価し、変化量に寄与する要因について考察した。また、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。さらに、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、過去の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。

本調査研究は、原子力規制庁が日本原子力研究開発機構との委託契約により実施した「平 成30年度原子力施設等防災対策等委託費およ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・核セキュリティ統括部
- +2 安全研究センター
- *1 株式会社 NESI
- *2 中日本航空株式会社
- *3 検査開発株式会社
- *4 朝日航洋株式会社
- *5 原子力エンジニアリング株式会社
- *6国際原子力機関へ出向中

i

JAEA-Technology 2019-016

Radiation Monitoring using Manned Helicopter around the Nuclear Power Station in the Fiscal Year 2018 (Contract Research)

Akira FUTEMMA, Yukihisa SANADA, Azusa ISHIZAKI, Tomokazu KOMIYA, Takeyuki IWAI^{*1}, Eisaku SEGUCHI^{*2}, Yuki MATSUNAGA^{*3}, Tomoki KAWABATA^{*4}, Masashi HAGINOYA^{*3}, Shogo HIRAGA^{*1}, Kazuhiko SATO^{*5}, Yoshiharu SATO⁺¹, Yoshimi URABE^{*1}, Kazumasa SHIMADA⁺², Airi MORI^{*6}, Jun HIROUCHI⁺², Hirokazu HIRAOKA 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 August 28, 2019)

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 using manned helicopter has been conducted around FDNPS. The results in the fiscal year 2018 were summarized in this report. Discrimination method of gamma rays from Rn-progenies was also utilized to evaluate their effect on aerial radiation monitoring.

In addition, analysis taken topographical effects into consideration was applied to previous results of airborne monitoring to improve the precision of conventional method.

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

This report summarized results that Japan Atomic Energy Agency carried out as commissioned business by "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 2018.

+1 Safety and Nuclear Security Administration Department

+2 Nuclear Safety Research Center

*1 NESI, Inc.

- *2 Nakanihon Air Service Co., Ltd.
- *3 Inspection Development Co., Ltd.
- *4 Aero Asahi Co., Ltd.
- *5 Nuclear Engineering Co., Ltd.

*6 On loan to International Atomic Energy Agency

目次

1.	はじめに	1
2.	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	9
	3.1. 航空機モニタリングシステム	9
	3.2. ヘリコプターの選定	11
	3.3. 線源試験	. 13
	3.4. RSI システムの保守	. 15
4.	データ取得および解析方法	18
	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	. 18
	4.2. データ取得方法	. 22
	4.3. 設定パラメータ妥当性確認のためのキャリブレーションフライト方法	. 24
	4.4. 解析のフロー	. 30
	4.5. 空間線量率への換算方法	. 31
	4.5.1. バックグラウンド減算 (自己汚染および宇宙線)	. 31
	4.5.2. 高度補正	. 33
	4.5.3. 空間線量率への換算	. 35
	4.5.4. 空間線量率への換算方法	. 42
	4.6. 放射性セシウムの沈着量への換算方法	. 42
	4.6.1. 天然核種の弁別と放射性セシウム起源の計数率の算出	. 42
	4.6.2. 空間線量率-放射能換算係数	. 44
	4.7. 減衰補正	. 45
	4.8. 検出下限值	. 46
	4.8.1. 空間線量率の検出下限値	. 47
	4.8.2. 放射性セシウムの沈着量の検出下限値	. 47
	4.9. 不確かさ	. 48
	4.10. マッピング	. 48
	4.11. 地上における測定値との比較	. 50
	4.12. 天然放射性核種由来の空間線量率マップの作成	. 52
5.	モニタリング結果	58
	5.1. 第13 次モニタリング	. 58
	5.2. 東日本第9次モニタリング	. 63
6.	モニタリング結果の考察	75
	6.1. 過去のモニタリング結果との比較	. 75
	6.2. 実効半減期の算出	. 80
	6.3. 土地利用による空間線量率の変化傾向の違い	. 82
7.	地形の起伏による影響と補正方法	86

7.1. 背景	86
7.2. 地形の起伏による測定への影響	86
7.3. 地形の起伏による影響の補正	89
8. ラドン弁別手法を適用した空間線量率マップの作成	94
8.1. ラドン子孫核種	
8.2. ラドン弁別手法の理論	95
8.3. パラメータ (GI および RI) の決定	99
8.4. GI の高度補正方法	101
8.5. 80 km 圏外データへの適用	103
8.6. 従来手法の評価	108
9. 成果のまとめと今後の課題	111
10. まとめ	113
謝辞	113
参考文献	114

Contents

1.	Introduction				
2.	History of airborne monitoring				
3.	3. Measurement system and helicopters				
	3.1. System of airborne radiation monitoring	9			
	3.2. Helicopters	11			
	3.3. Test using radiation source				
	3.4. Maintenance of RSI system	15			
4.	Data acquisition and analysis	18			
	4.1. Basic concept of conversion to dose rate at 1 m above the ground				
	4.2. Conditions of data acquisition	22			
	4.3. Calibration flights				
	4.4. Outline of analysis method	30			
	4.5. Conversion procedure of dose rate at 1 m above the ground				
	4.5.1. Background (self-contamination and cosmic ray)				
	4.5.2. Height correction				
	4.5.3. Conversion factor from count rate to dose rate				
	4.5.4. Conversion flow to dose rate	42			
	4.6. Conversion procedure of radiocesium deposition	42			
	4.6.1. The discriminstion of count rate by natural nuclide	42			
	4.6.2. Conversion factor from dose rate to radiocesium deposition	44			
	4.7. Decay correction	45			
	4.8. Detection limit	46			
	4.8.1. Detection limit of dose rate	47			
	4.8.2. Detection limit of radiocesium deposition	47			
	4.9. Uncertainty	48			
	4.10. Mapping	48			
	4.11. Comparison with ground measurement data	50			
	4.12. Map of dose rate of natural nuclide	52			
5.	Monitoring results	58			
	5.1. 13th monitoring at area of 80 km range from the FDNPS	58			
	5.2. 9th monitoring in the East Japan	63			
6.	Discussion	75			
	6.1. Comparison with the past monitoring results				
	6.2. Evaluation of effective half-life of dose rate	80			
	6.3. Difference in tendency to change of dose rate by the land use	82			
7.	Topographical effect and correction method				

	7.1.	Introduction	. 86
	7.2.	Topographical effect on measurement data	. 86
	7.3.	Results of topographical effect correction	. 89
8.	Discr	imination of Rn progenies	94
	8.1.	Rn progenies	. 94
	8.2.	Theory of discrimination of Rn progenies	. 95
	8.3.	Parameters (GI and RI)	. 99
	8.4.	Height correction of GI	101
	8.5.	Application for AMS data	103
	8.6.	Evaluation of the conventional teqnique	108
9.	Achie	evements and Future work	111
10.	Sumr	naries	113
Ac	knowl	edgements	113
Re	ferenc	es	114

Table list

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯
Table 2-2 航空機モニタリングに関わる技術開発の経緯
Table 3-1 使用したヘリコプターと RSI システムのリスト12
Table 3-2 ポイントソースによる機体の遮蔽状況の比較13
Table 4-1 キャリブレーションフライトの一覧25
Table 4-2 機体とシステムの組み合わせと自己汚染による計数率および CR-index
Table 4-3 使用したパラメータのまとめ
Table 4-4 2018 年度に取得した AF データー覧
Table 4-5 2018 年度に取得した CD データー覧 (Bell 412) 40
Table 4-6 2018 年度に取得した CD データー覧 (Bell 430) 40
Table 4-7 2018 年度に取得した CD データー覧 (S-76) 41
Table 4-8 BG-index 一覧
Table 4-9 RSI システムの検出下限値 48
Table 4-10 使用した減弱係数 (m ⁻¹) のまとめ 54
Table 6-1 二重指数関数近似から求めた実効半減期
Table 6-2 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (平成 21 年度版国土数値情報土地利
用細分メッシュデータに基づく)
Table 6-3 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (平成 26 年度版国土数値情報土地利
用細分メッシュデータに基づく)
Table 8-1 ラドン子孫核種の放出する γ線

Figure list

Fig.	2-1 航空機モニタリングの実績	7
Fig.	3-1 RSI システムのブロック図	10
Fig.	3-2 RSI システムの外観	10
Fig.	3-3 機底に燃料タンクのない機体一覧	.11
Fig.	3-4 線源試験イメージ	14
Fig.	3-5 RSI システムのエネルギー分解能および Gain の変動 (RSI 1)	16
Fig.	3-6 RSI システムのエネルギー分解能および Gain の変動 (RSI 2)	17
Fig.	4-1 対地高度と空間線量率の関係	19
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	20
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	20
Fig.	4-4 上空からの測定イメージ	21
Fig.	4-5 フライトイメージ	22
Fig.	4-6 予定したフライトの測線	23
Fig.	4-7 テストラインフライトのイメージ	26
Fig.	4-8 テストラインの場所	26
Fig.	4-9 テストポイントフライトのイメージ	27
Fig.	4-10 テストポイントの場所	28
Fig.	4-11 宇宙線フライトのイメージ	29
Fig.	4-12 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ	29
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場所	29
Fig.	4-14 解析のフロー	30
Fig.	4-15 RSI システムにおける地上で取得したγ線スペクトルと海上でのスペクトル例	32
Fig.	4-16 海抜高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例	32
Fig.	4-17 対地高度と計数率の関係例	34
Fig.	4-18 地上測定データ	37
Fig.	4-19 ヘリコプターの機種とオーバーラップフライトにおける計数率の関係	39
Fig.	4-20 放射性セシウムの計数率の算出イメージ	43
Fig.	4-21 BG-index の算出例	44
Fig.	4-22 重量緩衝深度と空間線量率-放射能換算係数の関係	45
Fig.	4-23 IDW に入力するパラメータとマップの関係	49
Fig.	4-24 地上の測線上における空間線量率測定結果との比較 (測線上の地点を選定)	51
Fig.	4-25 地上のランダムな位置における空間線量率測定結果との比較	51
Fig.	4-26 地上における in-situ Ge 測定結果との比較	52
Fig.	4-27 関数適合法を用いた ¹³⁴ Cs と ⁴⁰ K の弁別	54
Fig.	4-28 テストポイントの地上の空間線量率と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell 412)	55
Fig.	4-29 テストポイントの地上の空間線量率と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell 430)	55

Fig.	4-30 テストポイントの地上の空間線量率と空間線量率換算係数 (CD)の関係 (S-76)	56
Fig.	4-31 福島第一原子力発電所周辺の天然の空間線量率マップの作成例	56
Fig.	4-32 航空機モニタリングによる天然核種由来の空間線量率と in-situ Ge 半導体検出器で得ら	れ
	た天然核種由来の放射空間線量率の比較	57
Fig.	5-1 第 13 次モニタリングにおける空間線量率マップ	59
Fig.	5-2 第 13 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	60
Fig.	5-3 第13 次モニタリングにおける ¹³⁷ Cs 沈着量マップ	61
Fig.	5-4 第13 次モニタリングにおける ¹³⁴ Cs 沈着量マップ	62
Fig.	5-5 東日本第9次モニタリングにおける空間線量率マップ	64
Fig.	5-6 東日本第9次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	65
Fig.	5-7 東日本第9次モニタリングにおける ¹³⁷ Cs沈着量マップ	66
Fig.	5-8 東日本第9次モニタリングにおける ¹³⁴ Cs 沈着量マップ	67
Fig.	5-9 東日本第9次モニタリングと第13次モニタリングにおける空間線量率マップ	68
Fig.	5-10 東日本第9次モニタリングと第13次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	プ
		69
Fig.	5-11 東日本第9次モニタリングと第13次モニタリングにおける ¹³⁷ Cs沈着量マップ	70
Fig.	5-12 東日本第9次モニタリングと第13次モニタリングにおける ¹³⁴ Cs沈着量マップ	71
Fig.	5-13 東日本第9次モニタリングと第13次モニタリングにおける天然核種由来の空間線量率	
	マップ	72
Fig.	5-14 各測定年度における天然放射性核種による空間線量率マップの比較	73
Fig.	6-1 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	76
Fig.	6-2 発電所から 80km 圏内における第4次モニタリングおよび第13次モニタリングの空間線	量
	率算出結果の比較	78
Fig.	6-3 旧避難指示区域における第4次モニタリングおよび第13次モニタリングの空間線量率算	乱
	結果の比較	79
Fig.	6-4 旧避難指示区域における第4次モニタリングおよび第13次モニタリングの放射性セシウ	14
	沈着量算出結果の比較	79
Fig.	6-5 測定値の二重指数関数近似	81
Fig.	6-6 発電所から 80km 圏内における土地利用図	83
Fig.	6-7 森林部および市街地における地上1m高さの空間線量率の算出結果の比較	84
Fig.	7-1 無作為に抽出した評価点の位置	88
Fig.	7-2 数値標高マップから三角ポリゴンへの変換例	89
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	89
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	90
Fig.	7-5 第 10 次モニタリングの空間線量率マップの比較	91
Fig.	7-6 第10次モニタリング結果と地上測定値との比較	91
Fig.	7-7 第 11 次モニタリングの空間線量率マップの比較	92
Fig.	7-8 第 11 次モニタリング結果と地上測定値との比較	92

Fig.	7-9 第12 次モニタリングの空間線量率マップの比較 93
Fig.	7-10 第12次モニタリング結果と地上測定値との比較
Fig.	8-1 ウラン系列およびトリウム系列 95
Fig.	8-2 ラドン用航空機モニタリング機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上からの放射線のイメージ
Fig.	8-4 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係 99
Fig.	8-5 海上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係100
Fig.	8-6 計算体系のイメージ102
Fig.	8-7 計算体系のベンチマーク102
Fig.	8-8 シミュレーションによる測定高度と GI の関係102
Fig.	8-9 ラドン影響弁別手法適用後の東日本第9次モニタリングの空間線量率マップ104
Fig.	8-10 東日本第9次モニタリングの測定結果から計算した空気中のラドン子孫核種の Nal RSI
	システムで検出された計数率マップ105
Fig.	8-11 ラドン影響弁別後の地上測定データとの比較 (東日本第9次モニタリング)106
Fig.	8-12 従来手法とラドン弁別手法の比較109
Fig.	8-13 BG フライトから求めた NaI RSI システムのバックグラウンド計数と同日にフライトした
	データにラドン弁別手法を適用し求めたラドン子孫核種の計数率の平均値の比較110

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震に起因して、東京電力福島第一原子力発電所事故 (以下、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った。短時間で広域のモニタリングを実施する方法として、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マッピングは、1979 年に発生した米国スリーマイル島 (以 下、スリーマイル島) の事故や 1986 年に発生したチェルノブイリ原子力発電所事故を契機と し、環境中の地表に沈着した人工の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が所有されており、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、欧州ではチェルノブイリ原子力発電所事 故後、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、各国で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。旧日本原子力研究所は、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)の開発を行い、 基本的な航空機サーベイの方法を確立した^{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 数をシミュレーション計算から求める研究を行った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、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、今回のような広範囲の測 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。

福島原子力発電所事故直後、航空機モニタリングは DOE と文部科学省(以下、文科省)によ り開始された¹⁰⁾⁻¹²⁾。航空機モニタリングの手法については、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最適化を図ってきた。特に、地上高さ 1 mにおける空間線量率や放射性セシウムの沈着量等の地上値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 図ってきた。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や地上の線量に換算す るパラメータの設定には、試行錯誤を重ねてきた^{13),14)}。福島原子力発電所事故後には事故に より周辺環境中に放出され、地表面に沈着した放射性セシウムの環境影響を調査するために、 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行った。当時作成し た福島第一原子力発電所周辺における汚染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¹⁵⁾。さらに、高度な解析例として、鳥居他^{16),17)} 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¹³¹Iのピーク面積からモンテカルロ計算コードにより沈着量に換算する手 法を開発した。また、事故直後に実施されていた福島第一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¹³¹Iや放射性セシウムの降下量 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¹⁸⁾。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および得られる 情報量の多さを示している。

福島原子力発電所事故から約8年が経過しようとしており、放射性物質の環境中における移 行状況の解明のために、継続的な航空機モニタリングが望まれている。航空機モニタリング事 業は当初、文科省事業であったが、2013年度に原子力規制庁(以下、規制庁)に移管されて定 期的に実施されており、その結果は規制庁のホームページで随時公開されている¹⁹⁾。

本報告書では、2018 年度に行われた、福島県およびその近隣県における航空機モニタリン グの結果について報告する。また、通常のモニタリングの他に、空間線量率計算のさらなる高 精度化を目的とし、地形の起伏を考慮した場合に空間線量率計算結果に及ぼす影響について、 過去の航空機モニタリングデータを用いて、地上測定値を指標として定量的評価を行った。ま た、2017 年度に引き続き、大気中のラドン子孫核種からのγ線と地上の放射性核種からのγ線 との弁別手法を用いて空間線量率マップを作成した。

2. 航空機モニタリングの経緯

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 および Fig. 2-1 に示す。 航空機モニタリングは、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²⁰」に則り、2011年4月6日から DOE と文科省(測定: NUSTEC)に より「第1次モニタリング」として発電所から 80 km 圏内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」として発電所から80~100km 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、文科省が主体 として実施することになり原子力機構が加わって、発電所から80km 圏内のモニタリングを実 施した。さらに、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、発電所から80km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、文科省委託事業を拡大する 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、「警戒区域およ 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、モニタリングを継続した。空間線量率の比較的高い場所(0.2µSv/h以上) で発電所から80km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、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。80km圏内につい ては、2012年6月22日および10月31日から「第5次モニタリング」および「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、「警戒区域および避難指示区域 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)は、事業主体が規制庁に移管され、80 km 圏内について 2013 年 8 月 27 日および 2013 年 11 月 2 日から「第 7 次モニタリング」および「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(0.2µSv/h 以上)で 発電所から 80 km 圏内を除く地域を対象に「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)²¹)に詳しく報告されている。

2014 年度 (平成 26 年度) は、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 日より発電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を 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) ²²⁾に詳しく報告されている。

2015 年度(平成 27 年度)については、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 日から発電所から 80 km 圏内を除く前年度と 同地域を対象に「東日本第 6 次モニタリング」を実施した。さらに、バックグラウンド空間線 量率の把握を目的として(別事業)、九州電力川内原子力発電所周辺のモニタリングを実施した。 2015年度の結果については、眞田他 (2016)²³⁾ に詳しく報告されている。

2016年度(平成28年度)については、80km 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日から発電所から80km 圏内を除く前年度と 同地域を対象に「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および高浜発電所周辺ならびに 四国電力伊方発電所周辺の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 (2017)^{24), 25)}に詳しく報告されている。

2017年度(平成29年度)については、80 km 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日から発電所から80 km 圏内を除く前年度と 同地域を対象に「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 所ならびに九州電力玄海原子力発電所周辺の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(2018)^{26,27)}に詳しく報告されている。

2018 年度(平成 30 年度)については、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 日から発電所から 80 km 圏内を除く前年度と 同地域を対象に「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および中部電力浜岡原子 力発電所周辺のモニタリングを実施した。

このように、これまでの航空機モニタリングによって、日本全域の陸地からの放射線量分 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。

これらの継続的な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。また、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。開発したツールは、測定場所の直下に降ろした直線から 45° の角度に降ろした直線と地表の交点内に含まれる DEM データを抽出することができ、測定場 所の平均的な地表の高度を知ることができる。これにより、測定場所の地表面の勾配について 評価できるようになった。2013 年度には、発電所から 80 km 圏内の谷や山地形等の特徴的な 地形の上空から放射線の計測データを取得し、測定場所の地形と航空機モニタリングの精度に ついて基礎データを取得した。2014年度にはγ線スペクトルデータに関数フィッティング法を i適用することにより、¹³⁴Cs 起源の 1,365 keV と ⁴⁰K 起源の 1,461 keV のγ線を弁別する手法を 開発し、放出エネルギーの近い放射性核種が形成する複合ピークの弁別が可能となった。本手 法は原子力発電所事故直後の汚染分布評価に特に有用である。また、同一の場所において測定 高度の異なるデータと地上測定値と比較することにより、データの信頼性を評価した。2015 年度には、課題となっていた空気中のラドン子孫核種の影響を減算するため、専用の空気中ラ

ドン子孫核種減算用の検出器 (LaBr3:Ce シンチレーション検出器) を導入し、地表からの放射 線と空気中からの放射線で測定されるレスポンスの差を利用し、弁別測定する基礎的な手法を 開発した。開発した手法については、2016 年度に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、80 km 圏外のデータに適用した。また、2015 年度には、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²⁸⁾。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 年には、近年、精度が向上している最 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データと同時に位置デ ータを取得し、既存の GNSS の性能を比較評価するとともに、位置情報の精度が地上の空間線 量率への換算に与える影響について評価した。2017 年度には、Ishizaki et al. (2017)²⁹⁾ が開発 した地形の勾配を詳細に補正する手法を広いエリアの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 年度は 2017 年度にシステム化した地形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向上について定量的な評価を実施した。

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯

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	発電所から80km圏内	DOE: 60 ㎞圏内 NUSTEC: 60-80 ㎞圏内	DOE	2011/4/6~4/29	2011/5/6
第2次モニタリング	発電所から80-100 km圏内	NUSTEC	NUSTEC	2011/5/18~5/26	2011/6/16
第3次モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA, NUSTEC: 40 ㎞圏内 NUSTEC: 40-80 ㎞圏内	JAEA, NUSTEC	2011/5/31~7/2	2011/7/8
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)	2011/6/22~10/20	随時公表
第4次モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA, NUSTEC: 40 ㎞圏内 NUSTEC: 40-80 ㎞圏内	JAEA, NUSTEC	2011/10/22~11/5	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)	2012/1/30~5/31	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 (4.5次)	警戒区域及び計画的避難 区域	NUSTEC	JAEA, NUSTEC	2012/2/6~2/10	2012/2/24
東日本第2次モニタリング		JAEA (NUSTEC, OYO)	JAEA (NUSTEC, OYO)	2012/4/2~5/7	2012/9/28
第5次モニタリング	発電所から80km圏内	JCAC(OYO)	JCAC(NUSTEC)	2012/6/22~6/28	2012/9/28
第6次モニタリング	発電所から80km圏内	JCAC(OYO)	JCAC(NUSTEC)	2012/10/31~11/16	2013/3/1
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 µSv/h以上)	NUSTEC	JAEA	2012/10/31~12/28	2013/3/1
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)	2013/3/4~3/11	2013/5/13
第7次モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2013/8/27~9/28	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 µSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2013/9/3~11/4	2014/3/7
第8次モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2013/11/2~11/19	2014/3/7
第9次モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2014/9/1~9/20	2015/2/13
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)	2014/9/21~11/7	2015/2/13
第10次モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2015/9/12~9/30	2016/2/2
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)	2015/10/2~11/4	2016/2/2
H27_BGモニタリング	川内原子力発電所から80km圏内	JAEA	JAEA	2016/2/1~2/7	-
H28_BGモニタリング (1)	大飯・高浜発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2016/7/20~8/1	-
第11次モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2016/9/14~10/15	2017/2/13
東日本第7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)	2016/10/15~11/18	2017/2/13
H28_BGモニタリング (2)	伊方発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2016/11/29~12/11	
H29_BGモニタリング (1)	泊発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2017/7/24~8/2	-
H28_BGモニタリング (2)	柏崎刈羽原子力発電所から 80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2017/7/26~8/10 2017/9/30~10/1	-
第12次モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2017/9/9~9/25	2018/2/20
東日本第8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)	2017/9/29~11/16	2018/2/20
H29_BGモニタリング(3)	玄海原子力発電所から80㎞圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2017/11/28~12/5	-
H30_BGモニタリング (1)	島根原子力発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2018/7/20~7/27	-
第13次モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2018/9/6~10/16	2019/3/8
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)	2018/10/8~11/15	2019/3/8
H30_BGモニタリング (2)	浜岡原子力発電所から80㎞圏内 	JAEA (OYO)	JAEA	2018/11/27~12/9	

2018	1-3 4-6 7-9 10-12	第13次 第13次 (9/6-10/16)	浜岡BG(11/27~12/9) 魚根BG(7/20~7/27) 奥田本第9次 (10/8~11/15)
2017	1-3 4-6 7-9 10-12	◆ 第1275 (9,9-9,25)	油BG 本海BG (7/24~8/2) (11/28~ 12/5) 12/5) 和崎刈羽BG (7/26~8/10 (7/26~8/10 (7/26~8/10 (7/26~8/10 (7/26~2/10/11) 東日本第8次 (9/29~11/16)
2016	-3 4-6 7-9 10-12	∲ 第11次 (9/14−10/15)	(17/29~12/11) (11/29~12/11) (11/29~12/11) 高浜・大飯BG (1/20~8/1) 東日本第7次 (10/15~11/18)
2015	3 4-6 7-9 10-12 1	◆ 第10次 (9/12-9/30)	111時89 (2/1-2/1 (2/1-2/1/2) 東日本第6次 (10/2~11/4)
2014	1-3 4-6 7-9 10-12 1	(19) 第9次 (9/1-9/20)	東日本第5次 (9/21~11/7)
2013	1-3 4-6 7-9 10-12	第7次 (8/27-9/28) (8/27-9/28) (8/27-9/28) 第8次 (11/2-1) (11/2-1) (11/2-1) (11/2-1)	第3次 第1/4 12/28) (9/3~11/4)
2012	1-3 4-6 7-9 10-12	第5次 (6/22-6/28) (6/22-6/28) (1/5) (10/31-11/1 (10/31-11/1) (10/31-1) (10/31-1) (10/31-1) (10/31-1) (10/31-1	○ 10.31 (10.31)
2011	1-3 4-6 7-9 10-12	第1次 第1次 (4,6-4,29) 令令令 第3次 第4次 (5,31-7/2) (10,22-1 (10,22-1) 書成区] 書成区] 書成区]	(3/11) 第2次 第2次 (5/18-5/26) (5/18-5/26) (5/18-5/26) (5/18-6/26) (5/18-6/26) (6/22-10/20)
年	В		》 题 本 80



緯
猺
6
発
麗
術
ŧХ
ю.
<u>∽</u>
関
2
0
2
11
ц Ц
ちまた
μ Pu
紀
1 2 2
4
le
ab
E

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	地上への換算バ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確立した。
2012 (H24)	航空機モニタリング解析システムの開発	前年度開発した手法をルーチン的に開発できるシステムを構築した。
	DENIデータ抽出ツールの開発	航空機によ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、放射線の測定範囲内の地形の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がは他形の上空から放射線の計測データを取得し、DEMデータ抽出ツールを用いて測定結果に与える影響を評価した。
2014 (H26)	地中の天然起源の放射性核種 の弁別評価手法の確立	スペクトルビークの関数フィッティングにより、弁別できなかったいそら起源の1,365 keVと45K起源の1,461 keVを弁別する手法を開発した。地上の天然の放射性核種起源の空間線量率分布結評価可能となった。
	フライト高度による測定精度の 評価	フライトの高度を変化させてデータを取得し、地上測定値と比較することにより、データの信頼性格評価した。
2015 (H27)	空気中ラビン子孫核種滅算用 検出器の導入	空気中ラドン子孫核種の泉磐茗評価するためのLaBrg(Ce)検出器を導入し、データを取得して基礎的な手法を確立した。
	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、、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滅算シス テムの航空機モニタリング解析 システムへの組み込み	前年度導入した専用の検出器からのデータを利用した空気中ラビン子孫核種成算システムを構築し、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、80km圏外のデータに適用した。
	GPSの精度評価	近年、精度が向上している最新のGNSSを用いて航空機モニダリングデータと同時にデータを取得い、既存のGNSSの性能を比較評価するとともに、位置情報構度が地上の空間線量率への換算に与える影響について評価した。
2017 (H29)	地形補正手法の高度化	Ishiraki et al. (2017) ²⁶) が開発した地形の勾配格詳細に補正する手法を広い範囲の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)	地形補正手法による空間線量 率計算精度の向上評価	2017年度にシステム化した地形補正手法を過去の航空機モニダ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。

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 シンチレーション検出器を用いたスペクトル測定型の放射線検出器の情報と GPS (Global Positioning System, 全地球測位網) による位置情報をリンクしてデータ保存するシステ ムが用いられる。

今回のモニタリングで使用したシステム(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タイプであり、 Radiation Solutions Inc. (RSI, Canada) 製の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 (Detector) には、2"×4"×16"の NaI シンチレーション検出器 3 本を組み込んだ検出器のユニットを 2 台使用している (検出器容量 合計: 12.6 L)。検出器で計測した 1,024 ch (0~1023 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、RS701 と呼ばれる検出器上部に取り付けてあるデータ 収集装置に保存される。検出器 2 台のデータは RS501 という装置で統合される。RS501 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、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。福島およびその周辺県 で使用した RSIシステムは 2 セットあるため、以下それぞれ RSI 1 および 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 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 で取得された緯度およ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²⁶⁾。そのような事象が起きた際には、位置情報を高精度 GPS で取得された緯度および経度に置換する等の措置を行う。

- 9 -



Fig. 3-1 RSI システムのブロック図



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、機内に搭載するタイプであるため、機体 (ヘリコプター) を選ばないという メリットはあるが、ヘリコプターの機底に燃料タンクがある場合、燃料タンクの材料および燃 料による放射線の遮蔽を無視できず評価が難しくなる。そこで、その評価に伴う誤差の混入を 避けるため、RSI システムを使用できる機体は機底に燃料タンクのない機種に限定した。選定 した機体について、Fig. 3-3 に示す。また、2012 年以降使用した機体と RSI システムの組み合 わせを Table 3-1 に示す。2018 年度は、機体繰りの都合から、Bell 430、Bell 412 および S-76 を使用した。



Bell 430 ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



Bell 412 ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



AS 332 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機体一覧

Table 3-1 使用したヘリコプターと RSI システムのリスト

			システム搭載ヘリコプター							
牛度	モニタリング名	モニタリング期間	RSI-1		RSI-2		RSI-3		RSI-4	
2012	第5次航空機モニタリング	2012/6/22 ~ 6/28	Bell 430 (JA05TV)	NNK	AS 332 (JA9660)	NNK				
	第6次航空機モニタリング	2012/10/31 ~ 11/16	Bell 430 (JA6900)	AAC						
	東日本第3次モニタリング	2012/10/31 ~ 12/28	Bell 412 (JA6767)	NNK	Bell 430 (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)	2013/3/4 ~ 3/11	Bell 412 (JA6767)	NNK						
2013	第7次航空機エニタリング	2012/8/27 -: 0/28	Bell 430 (JA6900)	AAC	Bell 412 (JA6928)	AAC				
	第7次航空機モニタリンク	2013/0/27 ~ 9/20	Bell 412 (JA6767)	NNK	Bell 430 (JA05TV)	NNK				
		0010/0/0 11/4	Bell 430 (JA6900)	AAC	Bell 430 (JA05TV)	NNK				
	東日本第4次モニタリング	2013/9/3 ~ 11/4	Bell 412 (JA6767)	NNK						
	第8次航空機モニタリング	2013/11/2 ~ 11/19	Bell 430 (JA6900)	AAC	Bell 430 (JA05TV)	NNK				
2014	第9次航空機モニタリング	2014/9/1 ~9/20	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6928)	AAC				
	■日本第5次モニタリング	2014/9/21 ~ 11/7	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6767)	NNK				
	東日本第5次モニタリング	2014/9/21 ~ 11/7			Bell412 (JA6928)	AAC				
2015	第10次航空機モニタリング	2015/9/12 ~ 9/30	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6928)	AAC				
	東日本第6次モニタリング	2015/10/2 ~ 11/4	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6767)	NNK				
					Bell412 (JA6928)	AAC				
	川内原子力発電所BGモニタリング	2016/2/1 ~ 2/7					Bell412 (JA6928)	AAC		
	大飯・高浜発電所BGモニタリング	2016/7/20 ~ 8/1					Bell412 (JA9584)	AAC		
2016	第11次航空機モニタリング	2016/9/14 ~ 10/15	Bell430 (JA05TV)	NNK	S-76 (JA6901)	AAC				
		0010/10/15 11/10		A IN IIZ	Bell412 (JA6767)	NNK				
	東口平第7次モニメリンク	2010/10/15 ~ 11/16	Bell430 (JA051 V)	ININK	Bell412 (JA9616)	AAC				
	伊方発電所BGモニタリング	2016/11/29 ~ 12/11					Bell430 (JA05TV)	NNK		
2017	泊発電所BGモニタリング	2017/7/24 ~ 8/2					Bell412 (JA6767)	NNK		
	柏崎刈羽原子力発電所BGモニタリング	2017/7/26 ~ 8/10 2017/9/30 ~ 10/1							Bell430 (JA05TV)	NNK
	第12次航空機モニタリング	2017/9/9 ~ 9/25	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA9616)	AAC				
	東日本第8次モニタリング 2017/9/29 ~ 11/-	2017/9/29 ~ 11/16	Bell430 (1405T\/)	NNK	Bell412 (JA6767)	NNK				
		2017/9/29 ~ 11/16			Bell412 (JA9616) Bell412 (JA6928)	AAC AAC				
	玄海原子力発電所BGモニタリング	2017/11/28 ~ 12/5					S76(JA6655)	AAC		
2018	島根原子力発電所BGモニタリング	2018/7/20 ~ 7/27					Bell430 (JA6900)	AAC		
	第13次航空機モニタリング	2018/9/6 ~ 10/16	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell 430 (JA6900)	AAC				
	東日本第9次モニタリング	2018/10/8 ~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 ~ 12/9					Bell430 (JA05TV)	NNK		
									() 内け機材	* 容 绿 悉 是

() 內は機体豆球番号 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. 線源試験

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、機種によって遮蔽の程度 は異なると考えられる。ここでは、遮蔽効果を把握するためにポイントソース (¹³⁷Cs: 10 MBq) を用いて検出器で計数された計数率を比較した。比較結果を Table 3-2 に示す。線源は、検出 器からの距離を固定し (50 cm)、1 分間の計数率で比較した。RSI システムと線源位置の関係に ついて Fig. 3-4 に示す。

今回使用した機体では、Bell430 (JA05TV) における計数率を基準とした場合、S-76 (JA6655) では7%ほど、Bell 412 (JA6767)の計数率が16%ほど高かったが、これはS-76、Bell 412 およ びBell 430の各機種間の機体底部の構造の違いによるものと考えられる。また、同じBell 430 であってもJA05TV に対するJA6900 における計数率は6%程度低かった。このことから、同機 種であっても機体間で機体底部の構造がある程度異なると考えられる。機種間の線源試験と比 較して高低差があるものの概ね±15%程度に収まっており、機体内の検出器の配置位置は妥 当であると判断できる。このように機体の違いや機体が同一であっても、検出器を配置する位 置によって若干遮蔽状況は変わると考えられる。今後も今回のような線源試験を実施し、配置 位置を決めるのがよい。なお、この遮蔽状況の違いは、地上値への換算パラメータを設定する 際に機種ごとでキャリブレーションを実施するため、単独でパラメータとして扱う必要はない が、数値の解析の際の参考情報となる。

No.	System	ヘリコプター	運航会社	計数率 at 50 cm	No.1を1に 規格化
1	RSI 1	Bell 430 (JA05TV)	NNK	201,000	1.00
2	RSI 1	S-76 (JA6655)	AAC	216,000	1.07
3	RSI 2	Bell 430 (JA6900)	NNK	189,000	0.94
4	RSI 2	Bell 412 (JA6767)	AAC	233,000	1.16
				3.0.117.	

Table 3-2 ポイントソースによる機体の遮蔽状況の比較 (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



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 (RS701 および RS501) 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²⁰⁸Tl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した。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った。福島 県およびその周辺県で行ったモニタリング時におけるエネルギー分解能とアンプのゲインの推 移について Fig. 3-5 および Fig. 3-6 に示す。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。エネルギー分解能については、概ね 6%以下を推移していることが分 かる。また、アンプの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。これは、機器 の異常ではなく、光電子増倍管の温度特性を反映し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および Gain の変動 (RSI 1)



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

4. データ取得および解析方法

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を行った。線 源は、¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs 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を求めた。計算結果について Fig. 4-1 に示す。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 あることが分かる。一方、50 m 以下では、指数の関係から外れる。これは、50 m 以上では地 表面からの放射線が検出器に対し平行入射に近いため、線源からの距離をパラメータとした指 数関数の関係で放射線が減衰するのに対し、50 m 以下では線源への距離がより近くなるため 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、指数関数の関係から逸脱するこ とが示唆される。

このように、上空から地上を測定する際には、高度が高くなると地上の対象となる範囲が 広がる。上空における地上からの放射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を示す。計算は、光子・電子挙動シミュレーション用とし て実績のあるカスケードモンテカルロ計算コード EGS5³⁰⁾ (Electron Gamma Shower Version 5) を使用した。まず、EGS5により、RSIシステムの検出器をモデル化した¹³⁾。次に、地上に無 限平板状の半径 800 m×高さ1 mm の¹³⁷Cs 円柱線源を模擬した。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させ、検出器に入射する放射線の計数 率を計算した。さらに、同ジオメトリにおいて検出器に到達する放射線の起源となる線源の位 置を計算した。無限平板線源における任意の半径内の放射線が、検出器で計数される割合を Fig. 4-2 に示す。ここで、検出器と線源の距離は、50、100、300 および 500 m の場合を計算し た。航空機モニタリングの基準高度である 300 m から計測した場合、線源の概ね 300 m 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、100 m 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 で計数される割合を Fig. 4-3 に示す。線源からの距離は 100、300、500 m の場合で比較した。 高度 300 m の場合を見ると、100~200 m の位置が 30 %で最も割合が大きく、0~100 m および 200~300 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、イメ ージとしては、対地高度 300 m で測定されている地上の範囲は、対地高度と同じ 300m を半径 とする円内の放射線の平均値と考えて良い。一方、比較として計算した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 となる。この傾向は Fig. 4-1 で示した高度と上

空での計数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、高度と比較して測定範囲が広くなることを示している。飛行する対地高度が変化 することは、地上の測定範囲が変化することになり、上空から測定する不確かさを考慮すると 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、これらの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 データを再取得した。

以上のことから、航空機によるモニタリングは、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 に 航空機モニタリングの測定イメージを示す。



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、 縦軸は対数目盛)



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 (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 (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. データ取得方法

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た。予定したフライト測線につい て Fig. 4-6 に示す。以降、本報告で使用する背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダ ードパック (ESRI, Co. Ltd.)を使用した。

[フライト条件]

- 速度:160~185 km/h (=86~100 kn)
- 対地高度: 300 m (=1,000 ft)
- 測線間隔
 - ○80 km 圏内(発電所から3 km以内を除く)
 - 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 以上の地域
 - 1.8 km: その他の地域
 - ○80 km 圏外
 - 1.0 km: 0.2 µSv/h 以上の地域
 - 3.0 km: その他の地域
- フライトに要した期間
 - ○第13次:2018年9月6日~10月16日(のべ57フライト)
 - ○東日本第9次:2018年10月8日~11月15日(のべ87フライト)



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、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

4.3. 設定パラメータ妥当性確認のためのキャリブレーションフライト方法

上空で取得したデータを、地上1m高さにおける放射線量や地表面の放射性セシウムの沈着 量に換算するためのパラメータについては、2014 年度までのデータを基に数値を決定してい る。2018 年度は、決定したパラメータの妥当性を確認する目的で、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 (Table 4-1)。

テストラインフライトとは、高度を補正するための実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor: AF (m⁻¹))を求めるためのフライトである。本フライトは、線量や地形の変化が少ない 地点において約3kmのラインを設定し、その上空において高度を変化させながら(150、300、 450、600、750、900 および1,500 m) フライトを実施する。得られたデータは高度ごとに平均 化し、高度と計数率のグラフを作成し、指数近似の傾きによって、高度を補正する。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。テストライン付近において25 ポイントの地上測定を行った。

テストポイントフライトとは、空間線量率の勾配が小さい場所および地形の平坦な地点 (テ ストポイント)を選定し、そこから半径 1,000 m の範囲内における上空でホバリングすること で基準高度 (300 m) における地上の空間線量率換算係数 (Conversion factor of Dose-rate: CD (cps/[µSv/h]))を求めるためのフライトである。また、テストポイントでは人手により Nal シ ンチレーション式サーベイメータ (日立製作所製 TCS-172B)を用いて、半径 1,000 m の範囲内 で 60 ポイントを目安に地上 1 m 高さの空間線量率の測定を行った。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。

宇宙線フライトとは、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 い海上を約 300~2,400 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、海上であればどこで もいいので、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。

Rn 影響フライトとは、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、決めら れた場所の上空において対地高度約 450~900 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 フライトとは、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 に機体を保ち約 2 分のフライトを継続し、データを取得することにより機体お よび検出器のバックグラウンドデータを取得するものである。BG フライトは、Rn 影響フライ トとセットで1日1回実施する。Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージを Fig. 4-12 に示す。

天然核種フライトとは、天然核種のみが存在する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核種の影響を差し引く ためのスペクトルインデックスを算出するものである。本フライトは、過去に使用した実績の ない機体について1回実施することとしている。天然核種フライトの場所の例を Fig. 4-13 (左) に示す。

オーバーラップフライトとは、異なる機体やRSIシステムの組み合わせの相互評価のため、
同じ場所をフライトしデータを比較するものである。オーバーラップフライトの場所を Fig. 4-13 (中央および右) に示す。これらのフライトの中でオーバーラップフライトのみ、実際の 解析に使用するパラメータの取得が目的でなく、機器や機体間の相互評価に使用するものであ り、パラメータの妥当性を検証することを目的としている。

名称	目的	方法	頻度
テストラインフラ	空気減弱係数を算出	指定のテストライン上で	測線 5,000 km をフラ
イト		高度 (150、300、450、	イトするごとに1回
		600、750、900 および	実施
		1,500 m) を変化させてフ	
		ライト	
テストポイントフ	空間線量率換算係数	指定の地点上で、対地高	測線 5,000 km をフラ
ライト	を算出	度 300 m 高度で 3 分ホバ	イトするごとに1回
		リング	実施
宇宙線フライト	宇宙線の影響を調査	海上を海抜高度 300~	1週間1回を目安
		2,400 m まで上昇	
Rn影響フライト	ラドンの影響を調査	フライト前に拠点近くの	毎日
		測線上を対地高度 450~	
		900 m まで直線的に上昇	
BGフライト	機体のバックグラウ	対地高度 900 m を 2 分	毎日
	ンドを調査	(Rn影響フライト後に実	
		施)	
天然核種フライト	天然核種の影響を減	Csの影響のないと考え	過去に機体の使用実
	算するためのスペク	られる場所でフライト	績がなければ1回
	トルインデックスを		
	算出		
オーバーラップ	機体間のレスポンス	特定の場所をフライト	機体と RSI システム
フライト	補正		の組み合わせごとに1
			回

Table 4-1 キャリブレーションフライトの一覧



Test line: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



Test line 1 (岩手県奥州市)





Test line 4 (茨城県那珂市)

Test line 5 (栃木県大田原市)



(1/2)



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

(2/2)



Fig. 4-9 テストポイントフライトのイメージ



Test point 1 (岩手県奥州市)



Test point 4 (茨城県那珂市)





Test point 5 (栃木県大田原市)





Test point E (福島県浪江町)

Fig. 4-10 テストポイントの場所



Fig. 4-11 宇宙線フライトのイメージ



Fig. 4-12 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ





4.4. 解析のフロー

本測定法により計数される放射線は、主に以下の4種類に分けられる。

- ① 放射性セシウムからのγ線
- ② 天然の放射性核種からのγ線
- ③ 自己汚染
- (4) 宇宙線

放射性セシウムの影響を測定することが目的であるため、全計数率から②~④起源の計数率 は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、本章以降 の空間線量率とは、周辺線量当量率 (1 cm 線量当量率)を意味する。



Fig. 4-14 解析のフロー

4.5. 空間線量率への換算方法

上空での計数率から地上へ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:全計数率からバックグラウンド計数率(自己汚染および宇宙線 由来の計数率)を減算する。
- ② 高度補正:実際のフライト高度と基準高度とのずれを高度補正係数により補正する。
- ③ 空間線量率への換算: CD により地上空間線量率に換算する。
- 以下、上記項目の詳細について述べる。
- 4.5.1. バックグラウンド減算(自己汚染および宇宙線)

航空機モニタリングにおいて、自己汚染および宇宙線はバックグラウンドとなる。これらの減算方法について示す。自己汚染の減算については、BG フライトとして実施した地上からの放射線が届かないと考えられる対地高度約 900 m のフライト (もしくは海上でフライトした際のデータ)を用いる。地上で測定したスペクトルと海上で取得したスペクトルの例を Fig. 4-15 に示す。また、平均的な自己汚染の計数率を Table 4-2 に示す。

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。宇宙線起因の放射線は、RSIシステムが測定している全エネルギー範囲 (30~3,000 keV)で計数されるが、²⁰⁸TIが放出する 2,614 keV のγ線およびその散乱線の影響により、2,614 keV 以下の計数において、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. 4-16 に海抜高度と宇宙線の計数率の関係例を示す。この例は、沖縄と北海道での海上に おいて、50~2,000 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 以上の計数は最終チャンネ ル (1,023 ch) に積算される。このように、海抜高度と 2,800 keV 以上の γ 線の計数率は正の相 関にあり、計測する場所に影響されない。また、2,800 keV 以上の γ 線の計数率 (C_{>2,800 keV}) と 2,800 keV 以下の計数率 (C_{>2,800}) の比 (CR-index = C_{>2,800} / C_{>2,800 keV}) は高度に依存せず一定の 数値を示すことから、CR-index を機体と検出器の組み合わせごとに設定した。その後、実際 に測定したスペクトルの 2,800 keV 以上の γ 線の計数率から CR-index を用いて全エネルギーに 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 4-2 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。



Fig. 4-15 RSI システムにおける地上で取得した γ線スペクトルと海上でのスペクトル例



Fig. 4-16 海抜高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例 (a: 沖縄海域、 b: 北海道海域)

System	ヘリコプター	運航会社 ^自	己汚染計数率 (cps)	CR-index
	Bell 430 (JA05TV)	NNK	512	2.93
NOF1	S-76 (JA6655)	AAC	482	3.83
	Bell 412 (JA6767)	NNK	502	2.97
RSI-2	Bell 430 (JA05TV)	NNK	581	2.93
	Bell 430 (JA6900)	AAC	528	2.93

Table 4-2 機体とシステムの組み合わせと自己汚染による計数率および CR-index

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

4.5.2. 高度補正

測定点における対地高度の補正を行うために、テストラインであらかじめ取得したデータ を基に、実効的な AF を求めた。高度補正に必要な補正係数は、計算式 [1] を用いて算出でき る。

$$HF = \exp(AF \times (H_{sd} - H_a))$$
^[1]

ここで、

HF:高度補正係数 (Height correction Factor, (m^{-1})) AF:空気減弱係数 (Attenuation Factor, (m^{-1})) H_{sd} :基準高度 (300 m) H_a :対地高度 (GPS 高度-DEM-ジオイド高度)

対地高度の算出には、GPS で記録した楕円対地高度から、公開されている 10 m メッシュの 数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM)³¹⁾ およびジオイド高度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®上で指数 関数フィッティングを行い、近似曲線の傾きを AF とした。実際の AF の数値は、2014 年度に 採用した数値を使用した。使用した数値と標準偏差 (σ) について Table 4-3 に示す。

なお、2018年度においても、数値の妥当性およびRSIシステムの健全性を確認するために、 キャリブレーションデータを取得した。取得したデータについて、Table 4-4 に示す。今回評

^{*1}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からの高さ(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 30~40 m である。

価した AF の数値の平均値と採用した数値との差は、Table 4-3 で示した誤差範囲であり、採用した数値の妥当性を示していると考えられる。



(Bell 430 JA6900、2013/11/5 実施、Test line A)

Table 4-3 使用したパラメータのまとめ

(誤差は測定結果の標準偏差(σ))

			Bell412			E	3ell430			S-76	
	Value	S	SD(1σ)	Number of Data	Value	S	SD(1σ)	Number of Data	Value	SD(1σ)	Number of Data
AF (m ⁻¹)	-0.0072	±	0.00042	21	-0.0072	±	0.00040	35	-0.0072	± 0.00052	2
CD (cps/[µSv/h])	11000	±	2100	42	13000	±	2800	65	14300		

※SD:標準偏差

※S-76のCDに関しては、福島第11次におけるBell430とのオーバーラップフライトの結果を基に設定された。

Table 4-4 2018 年度に取得した AF データー覧

Croup	Monitoring No.	System	Helicopter		Operation	Location	Data	AF		
Group	wonitoning No.	(Device Serial)	Model	Body No.	company	LOCATION	Date	µ(m⁻¹)	R ²	
В	E9th	5043	Bell412	JA6767	NNK	TestLine4	2018/10/10	-0.00719	0.99985	
В	E9th	5043	Bell412	JA6767	NNK	TestLine5	2018/10/14	-0.00661	0.99955	

Average -0.00690 Average(to 2017) -0.00649

Group		System	Helicopter		Operation	Location	Data	AF		
Group	wonitoring No.	(Device Serial)	Model	Body No.	company	Location	Date	µ(m⁻¹)	R ²	
A	F13th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	Sukagawa	2018/9/6	-0.00682	0.99975	
А	F13th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	Sukagawa	2018/10/9	-0.00753	0.99807	
В	F13th	5043	Bell430	JA6900	AAC	Sukagawa	2018/9/6	-0.00711	0.99981	
В	F13th	5043	Bell430	JA6900	AAC	Sukagawa	2018/10/3	-0.00723	0.99999	
А	E9th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	Sukagawa	2018/10/18	-0.00703	0.99992	

Average -0.00714

Average(to 2017) -0.00709

Croup		System	Helic	opter	Operation	Location	Data	AF	-
Gloup	Worldoning No.	(Device Serial)	Model	Body No.	company	LUCATION	Dale	µ(m⁻¹)	R ²
Α	E9th	5045	S-76	JA6655	AAC	Sukagawa	2018/10/24	-0.00744	0.99905
А	E9th	5045	S-76	JA6655	AAC	TestLine1	2018/11/2	-0.00671	0.99655
A	E9th	5045	S-76	JA6655	AAC	TestLine1	2018/11/10	-0.00647	0.99917
A	E9th	5045	S-76	JA6655	AAC	TestLine5	2018/11/14	-0.00780	0.99829

Average -0.00710 Average(to 2016) -0.00722

※R²: 近似した指数関数曲線の決定係数
 ※NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

4.5.3. 空間線量率への換算

地表面から高さ 1 m における空間線量率に換算するための空間線量率換算係数 (Conversion Dose-rate: CD) は、テストポイントの地上における測定点の平均値とその上空 300 m を 3 分間 ホバリングして得られた計数率の平均値の比を取って求めた。地上測定値として実際には、3 分間のホバリングにおけるへりの緯度および経度の平均値を求め、その地点から半径 500 m の 円内における平均値を用いた。RSI システムは機体の中に搭載するため、ヘリコプターの機底 の遮蔽により CD は変化すると考えられることから、機体ごとに数値の設定が必要である。実 際の数値は、2014 年度に決定した数値を使用した。使用した数値と標準偏差 (σ) について Table 4-3 に示す。AF と同様に、2018 年度においても、数値の妥当性および RSI システムの健 全性を確認するために、キャリブレーションデータを取得した。取得したデータについて、 Table 4-5 ~ Table 4-7 に示す。また、地上のテストポイントにおける CD 算出のための空間線量 率測定結果について、Fig. 4-18 に示す。なお、ここでいう空間線量率はサーベイメータの読み 値を比較対象にしているため、天然核種による空間線量率が含まれる。

今回評価した CD の平均値と採用した数値との差は Table 4-3 で示した誤差範囲であり、採用した数値の妥当性を示していると考えられる。また、この数値の違いについてさらに妥当性を考察するため Fig. 4-13 (中央および右)に示した同じ測線において Bell 412、Bell 430 および S-76 によって対地高度 300 m でフライトを実施し、得られた計数率の比較を行った (オーバー ラップフライト)。当該フライトで得た測定値に対して実際にフライトした高度を基準高度 (300 m)に補正し計数率を比較した。比較結果を Fig. 4-19 に示す。この計数率の比は Table 4-3 に示した CD の比と一致することが望ましい。Table 4-3 に示した CD 比は例えば Bell 430/Bell 412 で約 1.18、Bell 430/S-76 で 0.91 である。この比が Fig. 4-19 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。2018 年度においては、CD 比と Fig. 4-19 に示した回帰直線の傾き は概ね等価であったため、補正を施す必要性は無かった。このように、オーバーラップフライ トの結果は現在設定されている CD の数値が妥当であるか、再設定すべきかを検討する判断材 料の一つとなると考えられる。





(1/2)







Fig. 4-19 ヘリコプターの機種とオーバーラップフライトにおける計数率の関係

Table 4-5 2018 年度に取得した CD データー覧 (Bell 412)

Heliconter	Monitoring			Operation	System			Grour	nd data (Nal s	urvey)		AMS data			AGL (ft)		CD
Model	No.	Date	Body No.	company	(Device Serial)	Detector	Location	Survey (uSv/b)	SD (2a)	RSD	Count rate	SD (2m)	RSD (%)	AGL_GEOID	SD (20:%)	RSD (%)	(cps/[µSv/h]
Bell	EastJapan	2018/10/10	JA6767	NNK	SN:5043	DPU1 SN:7183 DPU2 SN:7180 SN:7180 SN:7180 SN:7180 SN:1305 SN:1311	TestPoint4	0.07	0.024	37	1032	81	8	1038	15	1	7100
412	9th	2018/10/24	JA6767	NNK	SN:5043	DPU1 SN:7183 DPU2 SN:7180 DPU2 SN:7180 SN:7180 SN:7180 SN:7180	TestPoint3	0.05	0.015	29	1201	75	6	1083	18	2	10900
																A	0000

 Average
 9000

 Average(to 2017)
 11900

 ※NNK: 中日本航空株式会社、SD: 標準偏差、RSD: 相対標準偏差
 RSD: 相対標準偏差

Heliconter	Monitoring			Operation	System			Groun	id data (Nal s	urvey)	l	AMS data			AGL (ft)		CD
Model	No.	Date	Body No.	company	(Device	Detector	Location	Survey	SD	RSD	Count rate	SD	RSD	AGL_GEOID	SD	RSD	(cps/[µSv/h])
					Serial) SN:5045	DPU1 SN:1255 SN:1254 SN:1292 DPU2 SN:1346 SN:1292 SN:1327 SN:1346	TestPointD	(uSv/h) 0.30	(2ơ) 0.116	(%) 38	(cps) 4725	(2ơ) 594	(%)	(ft)	(2ơ: %) 62	6	13000
		2018/9/6	JA05TV	NNK	SN:5045	SN:1348 DPU1 SN:1255 SN:7179 SN:1254 SN:7179 SN:1254 DPU2 SN:1346 SN:7184 SN:1348	TestPointE	0.98	1.002	102	14918	2787	19	1015	67	7	14600
		2019/10/0	1405T) (NRIF	SN:5045	DPU1 SN:7179 DPU2 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184	TestPointD	0.31	0.141	45	4929	373	8	922	20	2	11100
	Fukushima	2018/10/9	JAUSTV	NINK	SN:5045	DPU1 SN:1255 SN:7179 SN:1254 SN:1292 DPU2 SN:1346 SN:7184 SN:1327 SN:7184 SN:1348	TestPointE	0.71	0.559	79	10172	899	9	949	11	1	11800
Bell	13th Iell 30 2018/9/	2018/9/6	146900	AAC	SN:5043	DPU1 SN:2536 SN:7183 SN:2539 DPU2 SN:1303 SN:7180 SN:1305 SN:7180 SN:1311	TestPointD	0.30	0.068	23	5615	321	6	1005	30	3	15500
430		2010/3/0	18/9/6 JA6900	JA6900 AAC	AAC SN:504	SN:5043	DPU1 SN:2536 SN:7183 SN:2539 SN:2559 DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311	TestPointD	1.41	0.964	68	19721	4059	21	1001	54	5
		2018/10/3	146000	440	SN:5043	DPU1 SN:2536 SN:7183 SN:2539 SN:2559 DPU2 SN:1303 SN:7180 SN:1305 SN:7180 SN:1311	TestPointE	0.30	0.115	38	4949	532	11	997	45	4	13200
		2010/10/3	340300		SN:5043	DPU1 SN:2536 SN:7183 SN:2539 SN:2559 DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311	TestPointE	0.96	0.928	96	12949	1638	13	965	43	5	11500
	EastJapan	2010/10/10	1405TD (NIKUZ	SN:5045	DPU1 SN:7179 DPU2 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184	TestPointD	0.31	0.119	39	4910	303	6	984	7	1	12500
	9th	2018/10/18	JAUDIV	NNK	SN:5045	DPU1 SN:7179 DPU2 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184	TestPointE	0.96	0.968	101	14431	3867	27	900	34	4	11200

Table 4-6 2018 年度に取得した CD データー覧 (Bell 430)

 Average
 12800

 Average(to 2017)
 12500

 ※NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社、SD: 標準偏差、RSD: 相对標準偏差
 RSD: 相对標準偏差

Table 4-7 2018 年度に取得した CD データー覧 (S-76)

Helioenter	Monitoring			Operation	System			Groun	nd data (Nal s	urvey)		AMS data			AGL (ft)		CD
Model	No	Date	Body No.	company	(Device	Detector	Location	Survey	SD	RSD	Count rate	SD	RSD	AGL_GEOID	SD	RSD	(cns/luSv/hl)
					Serial)			(uSv/h)	(2ơ)	(%)	(cps)	(2ơ)	(%)	(ft)	(2ơ: %)	(%)	(-11)
		2018/10/24	JA6655	AAC	SN:5045	DPU1 SN:7179 DPU2 DPU2 SN:1254 SN:1254 SN:1254 SN:1292 SN:1292 SN:1346 SN:1346 SN:1348	TestPointD	0.32	0.140	44	5491	1528	28	1067	71	7	16900
Sikorsky	EastJapan	2018/11/2	JA6655	AAC	SN:5045	DPU1 SN:1255 SN:7179 SN:1254 SN:1292 DPU2 SN:1346 SN:7184 SN:1327 SN:7184	TestPoint1	0.06	0.014	21	2211	146	7	910	62	7	18400
S-76	9th	2018/11/10	JA6655	AAC	SN:5045	DPU1 SN:7179 DPU2 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184 SN:7184	TestPoint1	0.07	0.015	23	1597	120	8	1020	27	3	14100
		2018/11/14	JA6655	AAC	SN:5045	DPU1 SN:1255 SN:7179 SN:1254 SN:1292 SN:1292 DPU2 SN:1346 SN:7184 SN:1327 SN:1348 SN:1348	TestPoint5	0.12	0.038	31	2140	346	16	1063	21	2	12400

Average 15500 Average(to 2016) 15350 ※AAC:朝日航洋株式会社、SD:標準偏差、RSD:相対標準偏差

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空間線量率に換算する方法について以下に示す。また、計算式を式 [2] に示す。

- ① 測定で得られた y 線スペクトルから以下の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 (C_{cos})
- ② 式 [2] で用いられる C_{net}を算出するために、C_{cos}に CR-index (I_{cos}) をかけて全エネルギーの宇宙線の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自己汚染による計数率 (BGself) とする。
- ④ Call から BGcos と BGself を差し引いた計数率を Cnet とし、CD および HF を用いて地表 1 m における空間線量率 D を算出する。

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

ここで、

HF:高度補正係数 CD:空間線量率換算係数 (cps[μ Sv/h]) $C_{net} = C_{all} - BG_{cos} - BG_{self}$ $BG_{cos} = C_{cos} \cdot I_{cos}$

4.6. 放射性セシウムの沈着量への換算方法

4.6.1. 天然核種の弁別と放射性セシウム起源の計数率の算出

天然核種の弁別方法は DOE が開発したいわゆる MMGC 法 (Man Made Gross Count) を参考 にした³⁾。本方法は天然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 射性セシウムが放出するγ線を含まない 1,400 から 2,800 keV の計数率と全計数率の比 (BGindex) が一定であることに着目するものである。機体と検出器の組み合わせごとに、あらかじ め放射性セシウムによる汚染がない地域をフライトして得られたデータを基に BG-index を設 定し、実際のフライトデータの 1,400 から 2,800 keV の計数率を基に全体の計数率から減算す 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. 4-20 に示 す。BG-index の算出例を Fig. 4-21 に示す。本データは、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、ヒストグラムで表示したものである。 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。今回の測定で使用した機体と検 出器の組み合わせで設定した BG-index について Table 4-8 に示す。

これらのパラメータを用いた放射性セシウムの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 1,400~2,800 keV の計数率 (CBG) を計算する。
- ② CBG に BG-index (IBG) を乗じて天然核種起源の計数率 (BGnat) を算出する。
- ③ Cnetから BGnatを差し引き、放射性セシウムのみの計数率 (Ccs)を求める。
- ④ C_{cs}に HF を乗じ、CD で除することで放射性セシウムのみの空間線量率 (D_{cs}) を算出する。
- ⑤ 式 [3] より、空間線量率を空間線量率-放射能換算係数 (CF ([μSv/h]/[kBq/m²]); 4.6.2. に て詳述する。) で除して放射性セシウムの沈着量 Rd を求める。

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

 $C_{CS} = C_{net} - BG_{nat}$ $BG_{nat} = C_{BG} \cdot I_{BG}$ $D_{CS} = \frac{C_{CS} \times HF}{CD}$



Fig. 4-20 放射性セシウムの計数率の算出イメージ



Fig. 4-21 BG-index の算出例

(関西地方において、1秒ごとに測定した y線スペクトルから BG-index を求めヒストグラムで表示、 全 16,000 データ: Bell 430)

System	ヘリコプター	運航会社	BG-index
	Bell 430 (JA05TV)	NNK	31
NOF1	S-76 (JA6655)	AAC	29
	Bell 412 (JA6767)	NNK	27
RSI-2	Bell 430 (JA05TV)	NNK	31
	Bell 430 (JA6900)	AAC	33
	NNK市日本航空	佐국승차 ^^^ 한	日航洋株式会社

T	able	4-8	BG-	ind	ex	一覧
---	------	-----	-----	-----	----	----

中日本航空株式会社、AAC: 朝日航沣株式会社

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、地上の放射性セシウムの沈着量に換算する場合に、文献 ^{32), 33)} 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、土壌への放射性セシウム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³²⁾。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 β = 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^{34),35)}から、発電所から80km圏内の土壌において、重量緩衝深度 (B) 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重量緩衝深度は、環境 中での放射性セシウムの動態観測が目的であるため、人間活動の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あえて 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. 4-22 に文献 ^{32), 33)} に示されている重量緩衝深度と CF の関係について示す。図では、対 数による近似曲線を記載したように、重量緩衝深度と CF は一次対数の関係にある。例えば、

 β = 1.0 (g/cm²) と β = 2.0 (g/cm²) にした際の放射性セシウムの沈着量と地上 1 m 高さでの空間 線量率の換算係数 ([µGy/h]/[kBq/m²]) は、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs 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セシウムに対する 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. 4-22 に示した β の設定値が及ぼす放射性セシウム沈着量換算係 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^{32), 33)}を適用した。



4.7. 減衰補正

発電所の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減衰しており、2011 年 8 月 13 日以降では、¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs が評価核種である。ここでは、空間線量率から放射能への ¹³⁷Cs 換算係数、¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 濃度比およ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 ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 比を用いて、地上 1 m 高さにおける空間線量率から地表における ¹³⁴Cs、¹³⁷Cs の放射性物質濃度に換算した。 ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 比は 2011 年 8 月に福島県で 50 ポイント以上の in-situ Ge による測定データを取得し、2011 年 8 月 13 日時点での ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs = 0.917 (B₀)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計算して換算した。評価時における ¹³⁷Cs および¹³⁴Cs の 濃度 C_{Cs137}、C_{Cs134} は航空機サーベイデータから求める全空間線量率から天然核種によるバックグラウンドの空間線量率を引いた空間線量率 E_{Cs137+134} (µSv/h) および評価時における

¹³⁴Cs/¹³⁷Cs比Bを用い、下記の式[4],[5]から算出する。

$$C_{Cs137} = A \cdot E_{Cs137+134}$$

$$C_{cs134} = B \cdot C_{Cs137}$$
[5]

ここで、評価時の空間線量率からの¹³⁷Cs濃度換算係数Aは、式[6]で表される。

$$A = \frac{\exp(-\lambda_{Cs137} \cdot \mathbf{t})}{CF_{Cs137} \cdot \exp(-\lambda_{Cs137} \cdot \mathbf{t}) + B_0 \cdot CF_{Cs134} \cdot \exp(-\lambda_{Cs134} \cdot \mathbf{t})}$$
[6]

ここで、t: 基準日 (2011/8/13) からの経過時間、λ_{Cs137}および λ_{Cs134}: 崩壊定数 (0.693/半減期) としている。

なお、放射性セシウムの物理的減衰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。

- 換算した放射性セシウム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、放射性セシウム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] および式 [8] に航空機 モニタリングにおける全線量への換算方法および放射性セシウムの沈着量の換算式について示 す。本式をもとに、検出下限値および信頼性について検討を行った。

$$D = (C_{all} - BG_{self} - BG_{cos}) \times \frac{1}{CD} \times \exp(AF \times (H_{sd} - H_m))$$
[7]

$$Rd_{134} = \left(C_{all} - BG_{nat} - BG_{cos} - BG_{self}\right) \times \frac{1}{CD} \times \exp\left(AF \times (H_{sd} - H_m)\right) \times \frac{1}{CF} \times R_{\frac{134}{134+137}} \times DC_{134}$$
[8]

ここで、

D: 全空間線量率 (µSv/h) C_{all}: 全計数率 (cps) BG_{self}: 機体の汚染 (cps) CD: 空間線量率換算係数 (cps/[µSv/h]) AF: 空気減弱係数 (m⁻¹) H_{sd}: 基準高度 (300 m) *H_m*: 測定高度(*m*)

 Rd_{134} : 放射性セシウムの沈着量 (Bq/m^2) (*¹³⁷ Cs の場合は 134 を 137 に読み替える。) BG_{nat} : 天然起源の計数率(cps) $C_{BG} \times I_{BG}(C_{BG}: 1400 - 2800 \text{ keV}$ の計数率; $I_{BG}: BG \text{ index})$ BG_{cos} : 宇宙線起源の計数率(cps) $C_{cos} \times I_{cos}$ (Ccos: > 2800 keVの計数率; Icos: CR index) CF: 空間線量率 - 放射能換算係数 ([μ Gy/h]/[Bq/m²])^{28), 29} R: 放射性セシウムに対する¹³⁴Cs (¹³⁷Cs) の割合 DC: 減衰補正係数 (= exp[$-\lambda\tau$]) (* τ : 経過時間)

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 $BG_{self} \ge BG_{cos}$ に影響を受ける。これま での測定結果を見ると、 BG_{cos} は概ね 200~500 cps の範囲に入ることが分かっている。また、 BG_{self} 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 cps 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 cps 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 (N_B)の標準偏差 (σ)を式 [9] に示した Currie の式³⁶⁾ に当てはめ、検出下限値 (N_D)を算出する。

$$N_D = 4.653\sigma_{N_B} + 2.706$$
 [9]

N_Bを 900 cps とすると、N_Dは 142 cps となる。これに、RSI システムの標準的な CD (12,800 cps/[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、0.011 µSv/h となる (Table 4-9)。

4.8.2. 放射性セシウムの沈着量の検出下限値

放射性セシウムの沈着量は、γ線スペクトルのデータからバックグラウンド(宇宙線、機体の自己汚染)を差し引き求めている。放射性セシウム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 (12,800 cps/[µSv/h])および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_{self} 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 cps とし計算を行った。この条件を、式 [9] に当てはめると、767 cps となる。これに、標準的な CD (12,800 cps/[µSv/h])を用いて空間線量率に換算する。さらに ¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs の比を第13次モニタリングの減衰補正日である 2018年10月16日における 0.097 と β = 1 における CF (¹³⁴Cs: 5.33×10⁻³ [µSv/h]/[kBq/m²], ¹³⁷Cs: 2.08×10⁻³ [µSv/h]/[kBq/m²])を用いて、放射性セシウム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、 放射性セシウムの沈着量の検出下限は、22 kBq/m²と評価できた (Table 4-9)。

	Limit of	detection
System	Dose rate at 1m above	Radioactivity of deposition
	the ground $(\mu Sv/h)$	radiocesium (kBq/m ²) *
RSI	0.011	22

Table 4-9 RSI システムの検出下限値

* Total BG count: 3,000 cps

Evaluated value at 16, Oct. 2018

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 4-3 に示したように、キャリブレーションのためのデータ取得には、測 定条件により20%程度の誤差が生じる。本測定の経験を重ねてきた現在では、その不確か さは小さくなってきている。
- ・ 高度補正係数の選択: CD と同様に、キャリブレーションのためのデータ取得の状況により係数の選択時の不確かさが生じる。
- ・ 測定高度の誤差:現在使用している GPS には衛星の位置等の状況により、高度情報において最大 30 m 程度の誤差が生じる。海抜高度の測定は GPS で実施しており、その誤差による不確かさが存在する。
- 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のマッピングについては、国際原子力機関 (IAEA) から標準的な方 法が示されている³⁷⁾。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 38)。

$$\widehat{z_0} = \frac{\sum_{i=1}^{s} d_{NT}(p_0, p_i)^{-\lambda} z_i}{\sum_{i=1}^{s} d_{NT}(p_0, p_i)^{-\lambda}}$$
[10]

本報告においては、 z_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λとsの設定によって結 果が異なってくるが、最良の値を決定するための基準が存在していない。λ が大きいほど、補 間地点近傍データの影響力が相対的に大きくなり、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、λ として 2.3、s として 180 を採用した。ちなみに、第3次航空機モニタリングの空間線量率の RMSE (Root Mean Squared Error: 二乗平均平方根誤差) は 0.208 であった。Fig. 4-23 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。Fig. 4-23の a) と 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前述した通り、対地高度約300m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300m円内における放射線量の平均値が測定される。 そこで、内挿においては測定対象のエリアを250mメッシュに区切り、実測データから内挿し コンターマップを作成した。



a) 乗数 2.3 対象地点数 180

b) 乗数 2 対象地点数 12 *第3次航空機モニタリングの測定結果を使用

Fig. 4-23 IDW に入力するパラメータとマップの関係

4.11. 地上における測定値との比較

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 かつヘリコプターの測線下の地点を選定し、地上1m高さでNaIサーベイメータ(日立製作所 製 TCS-172B)を用いて空間線量率を測定した。Fig. 4-24 に、航空機モニタリングによる換算 値と地上測定値との比較を示す。比較は散布図(左)および航空機の換算結果と地上の測定結 果の差の地上の測定結果に対する相対誤差のヒストグラム(右)で行った。散布図を見ると、 測定結果の95%(全346点中、329点)がファクター0.5~2.0の間に入り、概ね地上の測定値と 整合した。相対誤差のヒストグラムは0以上(航空機モニタリングの結果の方が高い)の領域に 分布の偏りが見られるものの、ピークは0付近に位置しており、その中央値は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結果として、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(Tl)シンチレーション式サーベイメータ (日立製作所製 TCS-172B) を用いた地上の空間線量率の測定結果および in-situ Ge 検出器 (Canberra 製 Falcon 5000) を用いた¹³⁷Cs の沈着量の測定結果³⁵⁾と比較した。なお、in-situ Ge 測定結果の解析にお ける緩衝深度 (β) として 3.52 g/cm² が設定されている。空間線量率の比較および in-situ Ge に よる放射性セシウムの沈着量の比較について、Fig. 4-25 および Fig. 4-26 にそれぞれ示す。い ずれの測定結果においても散布図を見ると正の相関関係にあり、ファクター0.5~2.0を指標と すると、空間線量率においては 91% (全 6523 点中 5908 点)、¹³⁷Cs 沈着量においては 57% (全 214 点中 123 点) が収まっており、概ね地上での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 いるものの、0以上(航空機モニタリングの結果の方が高い)に分布が偏っている。これは、除 染等により局所的に空間線量率の低くなった場所を航空機モニタリングの結果が追従できてい ないことが考えられる。in-situ Ge 検出器による¹³⁷Cs 沈着量測定結果との比較を見ると、空間 線量率に比べて相対誤差のばらつきが大きく、-0.5付近(航空機モニタリングの方が0.5倍程度 過小評価) にヒストグラムのピークがあり、2.0 以上 (航空機モニタリングの方が3倍以上過大 評価)にも10%以上の頻度が確認できる。¹³⁷Csの分布は空間線量率と異なり局所的なばらつき が大きいと考えられ、その状況が反映されていると考えられる。また、航空機のデータに関し て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)を一律に設定しており、その違いも影響していると考えられる。今後、このよ うに地上値との比較をしつつ、より最適な線量率-放射能換算係数の設定値について検討して いく必要がある。

なお、地上の測定結果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 1 m 高さにおける測定範囲は半 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. 4-24 地上の測線上における空間線量率測定結果との比較(測線上の地点を選定) 左: 散布図, 右: 相対誤差のヒストグラム



Fig. 4-25 地上のランダムな位置における空間線量率測定結果との比較 (地上値:原子力規制庁事業³⁵⁾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については 2014 年度に開発した^{22),39)}。 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セシウム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、放射性セシウムの影響の大きな地域においては、⁴⁰K の放出する 1,461 keV のエネルギーピークの領域に、¹³⁴Cs 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。今回、これらのピーク弁別に関数適合法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 Nal シンチレータでは前述のように一定以上の放射性セシウムの影響のある地域では⁴⁰K のエネルギーを弁別することは難しい。Fig. 4-27 に典型的な γ線スペクトルの例を示す。このような、干渉したスペクトルを弁別する手法として関数適合 法³²⁾が考えられる。本手法は、ピークを関数でフィッティングし、干渉している部分の推定 を行う手法である。実際には Fig. 4-27 のようにエネルギーピークを 2 つの Gauss 分布が干渉し ていると仮定した式 [11] を使用した。

$$S(i,j) = a + bE + c_i e^{-(E-E_i)^2/2\sigma_i^2} + c_j e^{-(E-E_j)^2/2\sigma_j^2}$$
[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)、σ²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¹³⁴Cs が 1,400 keV 以上のエネルギーへ与える寄与割合から、¹³⁴Cs 由来の 1,400 keV~ 2,800 keV に与える積算計数率 (Cs1400) を算出した。

次に、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、Cs₁₄₀₀を除外するために必要な計数を追加した。

$$D_{nr} = (C_{1400} - BG_{1400} - CS_{1400}) \times I_{BG} \times \frac{HF_{1400}}{CD}$$
[12]

ここで、C₁₄₀₀は1,400~2,800 keVの積算計数率 (cps)、BG₁₄₀₀は宇宙線生成物、Cs₁₄₀₀は RSI システムの自己汚染およびラドン壊変生成物由来の 1,400~2,800 keV の積算計数率 (cps)、I_{BG} は、放射性セシウムが沈着していない地域における全計数率と1,400~2,800 keVの積算計数率 の比率 (BG-index)、HF1400 は 1,400~2,800 keV の積算計数率の高度補正係数、CD は空間線量 率換算係数 (cps/[µSv/h]) である。これらの係数は、計数率が比較的小さいので検出限界値を低 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 (50m×21 s≒1,000) となる。HF₁₄₀₀につ いては、過去のパラメータフライトの結果から、1,400~2,800 keV に相当するチャンネルの積 算計数率のフライト高度による変化を算出し、対地高度と計数率の関係式の傾きから求めた。 本手法で使用した空気減弱係数および通常の航空機モニタリングで使用している、全エネルギ ー領域で算出した空気減弱係数を参考データとして Table 4-10 に示す。全エネルギー領域で求 めた空気減弱係数と比較して、本手法において対象としている核種の平均γ線エネルギーが比 較的大きいため、数値が小さくなっていることが分かる。CD については、各使用機体 (Bell 412、Bell 430 および S-76) において、2012 年度から 2018 年度までに求めた数値と地上 1 m 高 さにおける空間線量率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 4-3の数値を代表値として使用した。地上1m高さにおける空間線量率測定結果 と算出した CD の関係について Fig. 4-28~Fig. 4-30 に示す。

4.3 項に記載した通り、CD の算出には地上測定値として NaI(TI)シンチレーション式サーベ イメータにより計測された空間線量率 (μ Sv/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)サーベイメータは通常、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 (μ Gy/h) が用いられるため、単位換算が必要となる。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⁴⁰⁾ や自然放射線の実測から算出した例⁴¹⁾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] で求めた空間線量率 D_{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、天然核種由来の空間線量率 マップを作成した。

発電所周辺の放射性セシウムの寄与分を取り除いた天然放射線の分布と、取り除かれた放 射性セシウム由来の空間線量率マップを Fig. 4-31 に示す。Fig. 4-31 (左) に示した天然放射線由 来のマップには Fig. 4-31 (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セシウムの影響を減算できていると思われる。一方で、 定量的な評価を行うため、福島県の周辺で in-situ Ge 測定器を用いて測定した天然放射性核種 の放射線量率と航空機モニタリングで評価した天然核種由来の放射線量率を比較した結果を Fig. 4-32 に示す。散布図を見てみると、ばらつきはあるものの、ファクター0.5~2.0 に93% (全 374 点中 347 点) が収まった。相対誤差のヒストグラムにおける分布は0以上 (航空機モニタリ ングの結果の方が過大評価) の領域に偏りが見られるものの、0 付近をピークとした分布を示 した。以上から、2 つの Gauss 分布を仮定した関数適合法により、一定の精度で放射性セシウ ムを弁別できると考えられる。



Fig. 4-27 関数適合法を用いた¹³⁴Csと⁴⁰Kの弁別

Table 4-10 使用した減弱係数 (m ⁻¹) の	まと	め
(誤差は測定結果の標準偏差 (σ))	

Energy range	Bell412		Bell430		S-76	
	Value	Number	Value	Number	Value	Number
1,400 - 2,800keV	-0.0058 ± 0.00080	11	-0.0060 ± 0.00102	8	-0.0059	2
30 - 2,800keV	-0.0072 ± 0.00042	21	-0.0072 ± 0.00040	35	-0.0072	2



Fig. 4-28 テストポイントの地上の空間線量率と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell 412)



Fig. 4-29 テストポイントの地上の空間線量率と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell 430)



Fig. 4-30 テストポイントの地上の空間線量率と空間線量率換算係数 (CD)の関係 (S-76)



天然由来の空間線量率マップ

放射性セシウム由来の空間線量率マップ

Fig. 4-31 福島第一原子力発電所周辺の天然の空間線量率マップの作成例 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



Fig. 4-32 航空機モニタリングによる天然核種由来の空間線量率と in-situ Ge 半導体検出器で得られ た天然核種由来の放射空間線量率の比較

5. モニタリング結果

5.1. 第13次モニタリング

航空機モニタリングの測定結果を基に、地上1m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、放射性セシウムの沈着量(¹³⁷Cs および¹³⁴Cs の合 計量)の状況を示した「放射性セシウム沈着量マップ」をFig. 5-2に示す。¹³⁷Cs および¹³⁴Cs の 沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-3 および Fig. 5-4 に示す。放射性セシウム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、マップの作成にあたっては、第 13 次の航 空機モニタリングを実施した最終日である 2018 年 10 月 16 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⁴²⁾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の区分け を行った。

- ・0.1 µSv/h = 約 0.5 mSv/年 相当
- ・0.2 µSv/h = 約 1.0 mSv/年 相当
- •0.5 µSv/h = 約 2.5 mSv/年 相当
- ・1.0 µSv/h = 約 5.0 mSv/年 相当
- •1.9 µSv/h = 約 10 mSv/年 相当
- ・9.5 µSv/h = 約 50 mSv/年 相当
- ② 放射性セシウムの沈着量

玄米中の放射性セシウム濃度が 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セシウム濃度の上限値は、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 100 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 1000 kBq/m²の中間値
- ・300 kBq/m² = 1,000 kBq/m²の約半桁下(10^{-0.5})
- 100 kBq/m² = 1,000 kBq/m² × 1/10
- 60 $kBq/m^2 = 600 kBq/m^2 \times 1/10$
- 30 $kBq/m^2 = 300 kBq/m^2 \times 1/10$
- 10 $kBq/m^2 = 100 kBq/m^2 \times 1/10$



Fig. 5-1 第 13 次モニタリングにおける空間線量率マップ



Fig. 5-2 第 13 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)


Fig. 5-3 第 13 次モニタリングにおける ¹³⁷Cs 沈着量マップ



Fig. 5-4 第 13 次モニタリングにおける ¹³⁴Cs 沈着量マップ

5.2. 東日本第9次モニタリング

航空機モニタリングの測定結果を基に、地上1m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、放射性セシウムの沈着量 (¹³⁷Cs および ¹³⁴Cs の合 計量)の状況を示した「放射性セシウム沈着量マップ」を Fig. 5-6 に示す。¹³⁷Cs および ¹³⁴Cs の 沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-7 および Fig. 5-8 に示す。なお、マップの作成にあたっては、 東日本第 9 次の航空機モニタリングを実施した最終日である 2018 年 11 月 15 日現在の値に減 衰補正した。

また、第 13 次モニタリングとの整合性を確認するために、東日本第 9 次モニタリングを実施した最終日である 2018 年 11 月 15 日現在の値に減衰補正し内挿した、東日本第 9 次モニタリングと第 13 次モニタリングにおける「空間線量率マップ」および「放射性セシウム沈着量マップ」をそれぞれ、Fig. 5-9 および Fig. 5-10 に示す。¹³⁷Cs および¹³⁴Cs の沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-11 および Fig. 5-12 に示す。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と比較しても矛盾しない ³⁹⁾。天然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 年度以降のデータから、作成した天然核種由来の空間線量率マップ 比較を Fig. 5-14 に示す。



Fig. 5-5 東日本第9次モニタリングにおける空間線量率マップ (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



Fig. 5-6 東日本第9次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



Fig. 5-7 東日本第9次モニタリングにおける ¹³⁷Cs 沈着量マップ (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



Fig. 5-8 東日本第9次モニタリングにおける ¹³⁴Cs 沈着量マップ (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



Fig. 5-9 東日本第 9 次モニタリングと第 13 次モニタリングにおける空間線量率マップ (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



Fig. 5-10 東日本第9次モニタリングと第13次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



Fig. 5-11 東日本第9次モニタリングと第13次モニタリングにおける¹³⁷Cs沈着量マップ (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.)を使用)



Fig. 5-12 東日本第9次モニタリングと第13次モニタリングにおける¹³⁴Cs 沈着量マップ (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.)を使用)



Fig. 5-13 東日本第9次モニタリングと第13次モニタリングにおける天然核種由来の空間線量率 マップ





6. モニタリング結果の考察

6.1. 過去のモニタリング結果との比較

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. 6-1 に示す。こ のように、空間線量率の高い地域を表す暖色系の面積が小さくなっていることが分かる。この ような空間線量率の減少傾向を定量的に把握するための比較方法を検討した。時期の異なるモ ニタリングデータについて 250 m メッシュのデータに区切り、各メッシュの中心点の測定結果 の比を算出することで比較を行った。現状と同じ手法で実施した最も古いデータである第4次 モニタリングと今回の第13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. 6-2 に示す。なお、第4次モニタリング以前については自衛隊のヘリを使用し、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定量 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次を選 択した。Fig. 6-2 に示したように、回帰直線の傾きを全体の空間線量率の平均的な減少傾向と してみることができる。図中に、重量緩衝深度(B)を1(g/cm²)とし、放射性セシウムの半減期 から算出した理論的な減衰を表す直線を示す。このように、航空機モニタリングの測定結果は、 半減期による理論直線よりも大きく減少する傾向を示していることが分かる。一方で、80 km 圏内には地上1m高さにおける空間線量率が0.1 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い。放射性セシウムから放出される 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 ので、より平均的な減少率を評価できる方法として空間線量率の比をヒストグラムとして表示 することを検討した。

Fig. 6-1 に示した旧避難指示区域のみを抽出し、それぞれのメッシュにおける変化量の割合 (相対減少率)を算出し、ヒストグラムとして示した。例として、第 13 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それぞれ Fig. 6-3 に示す。また、第 13 次モニタリングと 第 4 次モニタリングの¹³⁷Cs の沈着量の比較をそれぞれ Fig. 6-4 に示す。空間線量率のヒスト グラムと比較して、¹³⁷Cs のヒストグラムはばらつきが大きい。これは、空間線量率が宇宙線 と自己汚染を差し引いて換算しているのに対し、¹³⁷Cs の沈着量はこれに加えて天然核種のバ ックグラウンドを差し引いているので計数誤差を含む数値が相対的に多くなることに起因する。 各地点における相対減少率の平均値を指標とすると空間線量率は第 4 次モニタリングの行われ た 2011 年 11 月から 76 %の減少、放射性セシウム沈着量は 40 %の減少と評価できる。



Fig. 6-1 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

(1/2)



Fig.6-1 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

(2/2)



Fig. 6-2 発電所から 80km 圏内における第4次モニタリングおよび第13次モニタリングの空間線量 率算出結果の比較



Fig. 6-3 旧避難指示区域における第4次モニタリングおよび第13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)

Fig. 6-4 旧避難指示区域における第4次モニタリングおよび第13次モニタリングの放射性セシウム 沈着量算出結果の比較

(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8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 グやチェルノブイリ原子力発電所事故のモニタリングから、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)⁴³⁾は有人へりおよ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、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標 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、福島第一原子力発電所を 中心とした半径約 80 kmの地域 10174 メッシュとなる。

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)⁴⁴⁾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 セシウム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80km全域のデータおよび除染等の人為的 な影響や高空間線量率エリアでの影響を考察するため、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、走行サーベイについては、式[13]に示した二重の指数関数近似を 行い、空間線量率の実効半減期を算出した。

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

ここで、Dは空間線量率 (µSv/h)、tshort は実効半減期の減衰が早い成分、tlong 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。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. 6-5 a) および b) に今までで得られた航空機モニタリング結果に二重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 圏内および避難指示区域と、事故から2年目までは減衰の早い成分による影 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。これらの指数関 数の傾きが実効半減期を意味し、各成分について Table 6-1 にまとめる。減衰の早い成分につ いては、80 km 圏内は 0.64 年 (95%信頼区間 0.46~0.81) および避難指示区域は 0.38 年 (95%信 頼区間 0.23~0.54) となった。地上での測定結果を解析した例を見ると、土地利用によって空 間線量率の減少速度が異なることが知られている⁴³⁾。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、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、80 km 圏内は 4.2 年 (95%信頼 区間 3.3~5.2) および避難指示区域は 3.6 年 (95%信頼区間 3.1~4.1) となった。避難指示区域の 方が減衰速度は若干速いものの、信頼区間を考えると同等と考えてよい。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。



Table 6-1 二重指数関数近似から求めた実効半減期

	減衰の早い成分				減衰の遅い成分			
_	半減期(年)	95%信頼区間		半減期(年)	95%信頼区間			
80 km圏内	0.64	0.46	\sim	0.81	4.2	3.3	\sim	5.2
避難指示区域	0.38	0.23	\sim	0.54	3.6	3.1	\sim	4.1

6.3. 土地利用による空間線量率の変化傾向の違い

発電所周辺における土地利用形態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」⁴⁵⁾を利用した。なお、当 該メッシュデータは2017年度(第12次モニタリング)までは平成21年度版を利用していたが、 2018年度(第13次モニタリング)からは2017年に配信が開始された平成26年度版を利用して いる。80 km 圏内の土地利用図について、Fig. 6-6 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および発電所周辺におい て大部分を占める森林部について、過去の80 km 圏内のモニタリングを比較し、空間線量率の 減少率を比較した。市街地部およ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. 6-6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. 6-6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、 同一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を算出し、 平均値と標準偏差を求めた。比較の例として、第4次モニタリングと第13次モニタリングに おける市街地部および森林部のメッシュごとの相対減少率の頻度をヒストグラムにして Fig. 6-7 に示す。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 用における空間線量率比を Table 6-2 および Table 6-3 に示す。なお、誤差として示したのは、 空間線量率比の標準偏差(σ=1)である。第13次モニタリングと第4次モニタリングの比を見 ると、平均値で市街地部が26%、森林部が28%であることが分かった。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 除染やアスファルト上の放射性物質が雨水等で洗い流された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、2~7%減少率が大 きいことがわかった。この結果から、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 傾向にあることが示唆される。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、80 km 圏内の土地利用の65%が森林部であることに起因すると考えられる。規制庁に よる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 35)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、放射性セシウムの物理的減 衰に近い形で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、地上の測定 結果と比較して航空機モニタリングの方が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. 6-6 発電所から 80km 圏内における土地利用図 (平成 26 年度 国土地理院土地利用調査データより)



Fig. 6-7 森林部および市街地における地上1m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13次モニタリングの相対減少率)

1			(b				難		
		12th/4th	SD(1	8.1	7.4	7.5	標準偏		
			(%)	+I	H	+I	, SD:		
			Ave. (%	27	29	28	:平均値		
			SD(1σ)	6.7	6.4	7	.∺Ave.		
		11th/4th	0,	+I	+I	+I			
			Ave. (%)	27	30	29			
			SD(1σ)	8.7	8.1	ø			
		0th/4t	(1	+I	+I	+I			
		٢	Ave. (%	34	37	37			
)(1ơ)	8.8	9.2	10			
		/4th	SI	+1	+	+1			
	te (%)	9th	. (%)	~	4	ი			
	ose ra		Ave	4	4	4			
	atio of de	8th/4th	SD(1σ)	9.7	9.2	10			
	Ŗ		(+I	+I	+I			
			Ave. (%	4	49	48			
		7th/4th	SD(1σ)	8.4	9.0	9.0			
			7th/4th	7th/4th	(+I	+I	+I	
			Ave. (%	50	54	53			
		6th/4th	SD(1σ)	8.8	8.5	9.0			
			(+I	+I	+I			
			Ave. (%	55	57	56			
		5th/4th	SD(1σ)	7	10	1			
			(+I	+I	+I			
			Ave. (%	70	77	72			
	Area Gross area (km²)			732	5,852	8,923			
				Urban area	Forest area	All areas			

Table 6-2 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (平成 21 年度版国土数値情報土地利用細分メッシュデータに基づく)

Table 6-3 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (平成 26 年度版国土数値情報土地利用細分メッシュデータに基づく)

Ratio of dose rate (%)	13th/4th	SD(1σ)	9.9	7.7	ø	標準偏差
		(+I	+I	+I	SD:
		Ave. (%	26	28	27	:平均值、
Gross area (km²)			791	5,771	8,923	жАvе.
Area			Urban area	Forest area	All areas	

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、山地および丘陵地は約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、このような山地およ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、 地上1m高さにおける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まで考慮した解析を行った。その解析結果を基に、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、過去の航 空機モニタリング測定データに適用した。その結果と地上測定結果を比較し、新しい手法による 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上 1 m 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。

$$\mathbf{C}\mathbf{D} = \boldsymbol{D}_{FLT} / \boldsymbol{C}_{FLT}$$
 [14]

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

$$CD_t = D_t / C_t$$
^[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、地上1m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] および式 [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 計数率の比として示すことができる。

$$\frac{CD_t}{CD} = \frac{C_{FLT}}{C_t}$$
[16]

そこで、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 第一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 G を計算した。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 とした。計算には粒子輸送コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)⁴⁶⁾ を用いた。PHITS による計算において、設定する線源形状は Fig. 7-2 のように設定した。まず、数値標高モデル (DEM)³¹⁾マップから、評価点直下から半径 800 m の領 域を選択し、標高を三次元ポリゴンモデルに変換する。三次元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から重みづけを行った。¹³⁷Cs 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。Fig. 7-3 の結果から、計数率比が 1 以下のものが多数を占めていることがわかる。計数率比は最小で 0.41、最大で 2.08 であった。つ まり、地形を平坦とみなした場合、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る。



Fig. 7-1 無作為に抽出した評価点の位置 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) 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



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

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} (300m) で飛行しながら測定した場合、4.1 項で触れたとお 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} (300m) 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。

$$D = C / \left\{ CD \cdot \frac{exp(-AF \cdot H_m')}{exp(-AF \cdot H_{std})} \cdot \frac{S_{FLT}}{S} \right\}$$
[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。

$$H_m' = H_m - (E_{mean} - E)$$
^[18]

以上の手法を用いて、第10次モニタリングから第12次モニタリングまでの解析を行い、地上 測定結果⁴⁷⁾との比較を行った。第10次、第11次および第12次モニタリングの空間線量率マッ プをそれぞれFig.7-5、Fig.7-7およびFig.7-9に示す。いずれの結果も、現行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が低くなる傾向が見られた。地上測定値との比較のため、 地上測定により得られた空間線量率(DGND)に対するDGNDと航空機モニタリングにより得られた 空間線量率(DARM)の差の比(相対誤差:(DARM - DGND)/DGND)の頻度分布を用いて評価した。第10 次、第11次および第12次モニタリングにおける相対誤差の頻度分布をFig.7-6、Fig.7-8および Fig.7-10に示す。第10次モニタリングにおける相対誤差の頻度分布をFig.7-6、Fig.7-8および Fig.7-10に示す。第10次モニタリングの場合、相対誤差の標準偏差を比較すると、現行手法では 0.64、地形の起伏を考慮した場合は0.56となった。同様に、第11次モニタリングの場合は0.55 から0.52となり、第12次モニタリングの場合は0.69から0.60となった。中央値は第10次モニ タリングの場合、0.43から0.10となり、第11次モニタリングの場合は0.44から0.09となり、第 12次モニタリングの場合では0.41から0.07となり、より地上測定値に近づいていることを示し た。ただし、地上測定点は各年で場所や測定点数が異なっていることに注意する必要があり、相 対誤差の頻度分布や中央値等の統計値を用いて各年度で単純に比較を行うことは望ましくないた め、異なる尺度を用いた比較方法について検討する必要があると考える。



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



Fig. 7-5 第 10 次モニタリングの空間線量率マップの比較 左:現行の解析手法を用いた場合、右:地形起伏を考慮した解析を行った場合 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.)を使用)



Fig. 7-6 第 10 次モニタリング結果と地上測定値との比較 左:現行の解析手法を用いた場合、右:地形起伏を考慮した解析を行った場合



Fig. 7-7 第 11 次モニタリングの空間線量率マップの比較 左:現行の解析手法を用いた場合、右:地形起伏を考慮した解析を行った場合 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.)を使用)



Fig. 7-8 第 11 次モニタリング結果と地上測定値との比較 左:現行の解析手法を用いた場合、右:地形起伏を考慮した解析を行った場合



Fig. 7-9 第 12 次モニタリングの空間線量率マップの比較 左:現行の解析手法を用いた場合、右:地形起伏を考慮した解析を行った場合 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.)を使用)



Fig. 7-10 第 12 次モニタリング結果と地上測定値との比較 左:現行の解析手法を用いた場合、右:地形起伏を考慮した解析を行った場合

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 (Rn) 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 および 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 付近においては、ラドン子孫核種濃度は測定されていないものの、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⁴⁸⁾。 これら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ため検出器との距離が近く、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⁴⁹。

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、放射性セシウムの放出するエネルギーに似ている ため、福島原子力発電所事故の影響を受けた地域近傍では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²³⁾。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²⁴⁾。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²⁶⁾。本手法の更なる高精度化に資するために、8.2 項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」と表記する。



Fig. 8-1 ウラン系列およびトリウム系列

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、地表面および地殻にも存在することか ら、γ線のエネルギーによって大気中のラドン子孫核種の影響と地上のラドン子孫核種の影響を 弁別することは難しい。また、¹³⁴Cs と²¹⁴Bi は放出するγ線エネルギーが似通っているため、福 島原子力発電所事故の影響を受けた地域では弁別はさらに困難である。航空機モニタリングにお けるラドン子孫核種の影響を弁別する方法として、航空機モニタリング用の検出器以外にラドン 子孫核種測定用の検出器を搭載し、その比較からラドン子孫核種の影響を弁別する方法が知られている³⁷⁾。

今回、ラドン子孫核種の影響を弁別する手法を検討するため、RSI 社製 LaBr₃シンチレータ (3" × 3")を用いた航空機モニタリング機器 (以下、LaBr RSI システム)を採用し、フライトデータの 取得および換算パラメータの算出を行った。LaBr RSI システムをヘリコプター内に搭載した状況 について Fig. 8-2 に示す。写真のように、地上からの放射線を遮蔽することを目的とし、通常用 いている Nal シンチレーション検出器 (以下、Nal RSI システム)の上方に配置した。

手法としては、空気中のラドン子孫核種からの放射線と地表面からの放射線の距離の差に着目 する。Fig. 8-3 にヘリコプター内の検出器と線源の位置関係のイメージについて示す。このよう に、大気中のラドン子孫核種と検出器の距離は地上の放射性核種からのγ線と比べて近いため、 空気中ラドン子孫核種由来のγ線はヘリコプター内の検出器で検出されやすいと考えられる。ま た、空気中ラドン子孫核種由来のγ線は検出器に等方向より放射されることから、LaBr RSI シス テムの下方に置いた NaI RSI システムの遮蔽としての影響は比較的小さい。一方、地上から LaBr RSI システムに到達するγ線は、下方からの照射となるため NaI RSI システムに比較的遮蔽されや すいと考えられる。すなわち、大気中のラドン子孫核種を計測した NaI RSI システムの計数率に 対する LaBr RSI システムの計数率の比 (LaBr RSI システム/NaI RSI システム) は地上の放射性核種 起源の計数率に対する比よりも大きくなると考えられる。

実際には、地上からの γ 線による影響のないと考えられる海上で取得したデータにおける NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比をラドンインデックス (RI) と定義 する。一方、ラドン子孫核種の影響が無視できるほど、地上における放射性核種からの γ 線によ る影響が大きなエリアで取得したデータにおける NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI シ ステムの計数率の比をグラウンドインデックス (GI) と定義する。これら 2 つの定数を利用してラ ドン子孫核種の影響を弁別する。本手法は NaI RSI システムにおける全計数率および LaBr RSI シ ステムにおける全計数率が式 [19] および式 [20] で表すことができるという仮定に基づいている。 また、先述した GI および RI は式 [21] および式 [22] で表される。式 [19] ~ [22] を NaI RSI シス テムにおける地上の放射性核種由来の計数率 ($C_{NaI,q}$) について解くと、式 [23] が導かれる。

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

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

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

$$RI = \frac{C_{NaI,a}}{C_{LaBr,a}}$$
[22]
$$C_{NaI,g} = \frac{GI(C_{NaI,all} - RI \cdot C_{LaBr,all})}{GI - RI}$$
[23]

ここで、

C_{Nal,all}: Nal RSI システムの 30~2800 keV における全計数率
 C_{Nal,g}: Nal RSI システムの 30~2800 keV における地上の放射性核種由来の計数率
 C_{Nal,a}: Nal RSI システムの 30~2800 keV における空中の放射性核種由来の計数率
 C_{LaBr,all}: LaBr RSI システムの 50~700 keV における全計数率
 C_{LaBr,g}: LaBr RSI システムの 50~700 keV における地上の放射性核種由来の計数率
 C_{LaBr,a}: LaBr RSI システムの 50~700 keV における地上の放射性核種由来の計数率
 *G*I: グラウンドインデックス: 地上で取得したデータにおける Nal RSI システムの
 計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比

RI: ラドンインデックス: 海上で取得したデータにおける Nal RSI システムの

計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比

である。



Fig. 8-2 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況

JAEA-Technology 2019-016



Fig. 8-3 空気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ

8.3. パラメータ (GI および 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。GI と RI については、ヘリコプターの遮蔽によって変化するため、東日本第9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。測定データは 40 秒ごとに取得した計 数率を積算した。積算したデータから宇宙線および自己汚染の寄与分を差し引き、GIの算出に使 用した。また、GPS データ (緯度、経度および飛行高度) については 40 秒間で取得したデータの 平均値を使用した。東日本第9次モニタリングで取得した地上高さ300m位置(実際のフライト の対地高度が 290~320 m のデータ) における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計 数率の関係を Fig. 8-4 に示す。なお、東日本第9次モニタリングでは、Bell 412 (JA6767)、Bell 430 (JA05TV) および S-76 (JA6655)を使用した。これらのデータにはラドン子孫核種の影響が含まれ ているが、完全にラドン子孫核種の影響のない環境でのデータ取得は困難であることから、GIの 数値は不確かさが比較的大きいと推察される。一方、RI については、海上の 300 m 位置 (実際の フライトの対地高度が150~450mのデータ)で取得したデータを抽出し、GIと同様にバックグラ ウンドの減算を行った。なお、Bell 430 (JA05TV) については東日本第9次モニタリングにおいて 海上をフライトした日が無かったため、第13次モニタリングにおいて海上をフライトした際に 取得したデータを用いた。各ヘリコプターにおける Nal RSI システムの計数率と LaBr RSI システ ムの計数率の関係を Fig. 8-5 に示す。本散布図の回帰直線の傾きを RIとする。



Fig. 8-4 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係 (1 次回帰直線の傾きを GI と定義)



Fig. 8-5 海上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係 (1 次回帰直線の傾きを 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ため、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。

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とし、ヘリコプター内の検出器の体系を簡易的に Fig. 8-6 のよう に模擬した。計算体系の妥当性については、正面およ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を計算した結果と、実際に有人のヘリコプターに検出器 (NaI RSI システム) を搭載した状態で、点線源 (¹³⁷Cs)を照射することによって求めた検出器のレスポンスの結果を比 較してベンチマークとした。Fig. 8-7 に示すように、検出器レスポンスの方向特性についての計 算結果と実測結果の比は概ね一致している。一部値が外れている部分は、計算体系に考慮されて いないへりの構造物等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。本体系に対し、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の測定高度との関係を計算した。なお、実際の計算では NaI RSI シ ステムと LaBr RSI システムを別で実施した。LaBr RSI システムの計算時には、下部の NaI RSI シ ステムを体系に加えた。線源の模擬体系は、以下の条件を設定した。土壌中の天然放射性核種濃 度は、全国的な地上における測定結果から平均値を採用した⁵⁰。

- ・空気 (1 km×1 km×1.3 km) と土壌 (深さ1m、 密度 ρ: 1.6 g cm⁻³)
- ・山等の地面の凹凸を再現せずに地面は平坦
- ・地面中の自然放射性核種 (U系列、Th系列、⁴⁰K) は一様分布
- ・地面中の人工放射性核種 (¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs) 表層から深さ方向に指数関数的な分布 (緩衝深度 $\beta = 3$ g/cm²)
- ・土壌中の放射性核種濃度⁴⁰K: 500 Bq/kg、U系列: 20 Bq/kg、Th系列: 10 Bq/kg、¹³⁴Cs: 50 kBq/m²、¹³⁷Cs: 200 kBq/m²

検出器と線源の距離(測定高度)と 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。この結果における回帰直線の傾きを採用し、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。

$$GI_{corr} = 0.0333 \times (H_a - H_{sd}) + GI$$
 [24]

ここで、*Gl_{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_{sd}* は基準高度 (300 m)、 *GI* は高度補正前の GI である。



Altitude above the ground (m)

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. 80 km 圏外データへの適用

ラドン弁別手法を今年度の測定結果に適用した。本手法は、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、地上の放射性核種からの γ 線による影 響が著しく大きな場所では計数誤差の影響により適用が難しく、そもそも放射性セシウムの影響 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ため、適用評価には発電所から80 km 以遠のデータ (東日本第9次モニタリング)のみを対象とした。本手法は GIの数値に依存する と考えられるため、Fig. 8-4 に示したヘリコプターごとの高度補正を行う前の GI の数値 (GI = ±0 と表記)を1および2減算した場合についても解析した(それぞれ GI=-1および GI=-2と表記)。 解析の結果は、地上における測定結果 297 点と比較し、その妥当性を検証した。なお、4 章で示 した従来の空間線量率換算手法においては、これまでの経験から Table 4-1 で示すように、測定日 ごとに BG フライトとして対地高度約 900 m に機体を保ち約 2 分のフライトを継続し、得られた データをバックグラウンドとして差し引いている。当該フライトで得られる計数率にはラドン子 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。本手法の検証には、BG フライトで取得したバックグラウンドを減算せずにラ ドン弁別手法を適用する。よって、Fig. 8-9 および Fig. 8-10 に示す「ラドン弁別なし」の空間線 量率マップは Fig. 5-5 で示したマップとは異なる。BG フライトから求めたバックグラウンド減算 によるラドン子孫核種の弁別効果については8.6項で評価する。

Fig. 8-9 にラドン弁別手法を適用した東日本第9次モニタリングの空間線量率マップを示す。比較としてラドン弁別手法を適用しない解析結果についても示している。傾向としては、GIの数値が大きいほど空間線量率は低くなる傾向があることが分かる。さらに、ラドン子孫核種の影響の高い地域について考察するために、ラドン弁別手法で減算した Nal RSI システムの計数率を抽出し、計数率マップを作成した。また、本マップは測定の時間が場所により異なるので、瞬間的に検出した空気中のラドン子孫核種の影響が時間的につぎはぎ状でマップとして表現されている。 Fig. 8-10 に東日本第9次モニタリングの測定結果から計算した空気中のラドン子孫核種由来の計数率のマップを示す。このように、ラドン子孫核種の検出されたエリアは、越後山脈から関東山地に向けての比較的標高の高いエリアであることが分かる。一方、標高の低い関東平野ではほとんど検出されていない。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、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。ラドン子孫核種が検出された標高の高いエリアは花崗岩が分布しているエリアと概ね重なるため⁵⁰、この結果は矛盾しない。

結果の妥当性を評価するために、地上値との比較を行った。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、適用後の方が回帰直線の傾きおよび決定係数が 1.00 に 近づき、地上測定データに近付く傾向にあることが分かる。一方で、ファクター 0.5~2 の範囲に 収まっているプロットの数に着目すると、ラドン弁別前では 96% (全 297 点中 284 点) であったの に対し、弁別後では GI = ±0 で 93% (全 297 点中 277 点)、GI = -1 および GI = -2 で共に 94% (全 297 点中 280 点)と、収まりが比較的悪くなっている。GI を小さく設定すると回帰直線の傾きは 1 に若 干近くなるものの、有意な差とは言い難い。この結果から、ラドン弁別手法を用いて算出される、 地上1m高さにおける空間線量率を保守的に評価する観点から、GIはある程度小さく設定することが望ましいと考えられる。本手法には、高度補正の手法やGIの数値決定方法に若干の不正確さが残っているため、今後もこのような解析経験を積み上げ、最適化を行っていく必要がある。



Fig. 8-9 ラドン影響弁別手法適用後の東日本第9次モニタリングの空間線量率マップ (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



Fig. 8-10 東日本第9次モニタリングの測定結果から計算した空気中のラドン子孫核種の Nal RSI システムで検出された計数率マップ

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.)を使用)



Fig. 8-11 ラドン影響弁別後の地上測定データとの比較 (東日本第9次モニタリング) (1/2)



Fig. 8-11 ラドン影響弁別後の地上測定データとの比較 (東日本第9次モニタリング) (2/2)

8.6. 従来手法の評価

前節で言及したように、Fig. 4-14 のフロー図に則った従来の手法においては測定日ごとに BG フライトとして対地高度約 900 m に機体を保ち約 2 分のフライトを継続し、得られたデータをバ ックグラウンドとして差し引いているため、ある程度のラドン子孫核種の影響を差し引くことが できていると思われる。従来手法によるラドン子孫核種弁別の効果と上記の新たなラドン弁別手 法の有効性を評価するために、Fig. 5-5 で示した従来手法の空間線量率マップと Fig. 8-4 に示した GI を用いてラドン弁別手法を適用して作成した空間線量率マップ (GI = ±0 と表記) を Fig. 8-12 に 示す。このように全体的な傾向は概ね一致しており、従来の手法であってもラドン子孫核種の影 響はある程度除去できていることが推察される。一方、詳細に見ると、会津地方 (福島県西部) や 群馬県北部等においては、従来手法の結果において空間線量率の高い場所が散見され、岩手県南 部および宮城県南部等ではラドン弁別手法を適用した場合に、空間線量率が局所的に高く算出さ れる場所があることが分かる。

これらの違いを定量的に理解するために、従来法で求めた測定日ごとのバックグラウンド計数 率と同日における新たなラドン弁別手法で求めた計数率の平均値の比較を Fig. 8-13 に示す。図に は比較のため、福島原子力発電所事故由来の放射性セシウムの存在しない島根原子力発電所、浜 岡原子力発電所のバックグラウンドを航空機モニタリングで求めたデータもプロットしている。 このように一定の正の相関関係にあるものの、ばらつきが大きいことが分かる。プロット自体は 福島原子力発電所事故由来の放射性セシウムの有無に関わらず概ね固まっており、従来手法でも ラドン子孫核種由来の計数率の減算はある程度できることが示唆される。しかしながら、従来手 法は大気中のラドン子孫核種濃度が1日を通して測定範囲で一定である場合のみ有効である。よ ってラドン子孫核種由来の計数率の減算手法に、より普遍性を持たせるためにラドン弁別手法の 精度を向上させていく必要があると考える。





BGフライトから求めたバックグラウンド計数率

Fig. 8-13 BG フライトから求めた NaI RSI システムのバックグラウンド計数と同日にフライトしたデータにラドン弁別手法を適用し求めたラドン子孫核種の計数率の平均値の比較

9. 成果のまとめと今後の課題

2018年度得られた成果をまとめ、今後の課題について示す。

・RSI システムの保守方法について

規制庁所有の RSI システムを導入してから 8 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。本 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、使用している検出器の結晶である NaI 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の で一概に言えないが、検出器は購入から 7 年が経過したものもあり特性の変化には注意が必要で ある。また NaI シンチレータ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、波高値および 分解能が変化する可能性もある。今後もモニタリングを継続していく上で、上記トラブルの予防 保全のために計画的に検出器を更新することが望ましい。

・空間線量率マップについて

様々なヘリコプターと RSI システムの組み合わせにより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あらかじめ定めた 1 つの 数値を用いた。結果として地上測定の結果ともよく整合し、今後も同様な方法で問題ないと考え る。しかしながら、キャリブレーションフライトは、確認・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。また、取得した測定データから空間線量率マップ等を作成す るまでの手順について整理し、マニュアルとして取りまとめることで、解析実施者の技能や経験 則に過度に依存しない体制を整えていく必要があると考える。

・地形の起伏を考慮した空間線量率の補正手法について

2017年度にシステム化を行った地形の起伏を考慮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、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なった。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ることが明らかとなった。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 手法では標準偏差が小さくなるとともに中央値が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。しかしながら、本報告において指標として用いた地上測定値は各年度で測定場所お よび点数が異なっていることに留意する必要があり、上記のような統計値を用いて単純な比較を 行うことはあまり望ましくないと考える。そのため、今後は異なる尺度を用いた比較方法につい て検討する、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抽出する等、さらに詳 細な分析を進めていきたい。

・ラドン子孫核種の弁別手法について

2017年度に続いて、80km圏外の航空機モニタリングデータ(第9次東日本モニタリング)にラ ドン弁別手法を適用した。地上の測定値と比較した結果から、当該手法が一定の精度を有するこ とが示された。一方で、測定日ごとに BG フライトを行って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。しかしながら、本手法により場所ごとに大気中のラドン子孫 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。今後も本 手法について従来手法と比較しつつ、データを蓄積し GI 等のパラメータを最適化していくこと が望ましい。

10. まとめ

2018 年度に予定された 80 km 圏内の航空機モニタリング1回および 80 km 圏外の航空機モニタ リング1回を確実に実施した。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8年目となった。事故当時、定まっていなかった測定・評価手法についてもある程度確立し、 RSI システムの定期的な保守およ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および放射性セシウム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で算出される空間線量率の高精度化に資するため、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なってきている。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。地形の起伏を考慮した計算手法を過去の航空機モニタリング結果に適用し、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、ラドン弁別手法のシステム化を行い、本年度における発電 所から 80 km 圏外の測定データに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 地上高さ1mにおける空間線量率とNaI(TI)シンチレータによる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、本手法が一定の精度を有することが示された。今後、現在 までに開発してきた応用的データ解析手法の一元化を検討していくことが望ましい。

謝辞

本調査研究は、「平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費および放射性物質測定調査委託 費 (80 km 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、応用地質(株)、エイ・ティ・エス(株)、(有) TK 海陸調査事務所、(株)水戸警備保障の 30 余名が、航空機に搭乗しての測定、地上での空間線量率測定、さらにデータ解析とそのマップ 化に取り組んだ。航空機の運航は中日本航空(株)、朝日航洋(株)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。

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, 67 p.
- 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), pp.391-398, 1990.
- (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, pp.8-14, 2009.
- 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(ATOMOZ), 54(3), pp.160-165, 2012.
- 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), pp.137-140, 2012.
- 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, pp.7-11, 2012.
- 13) 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.
- 14) 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. Nuc. Sci. Tech., 4, pp.76-80, 2014.
- 15) IAEA, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -(Second Report), 2011.
- 16) 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 (ATOMOZ), 55, pp.702-706, 2013.
- 17) 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, pp.92-200, 2013.
- 18) 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, pp.1059-1063, 2014.
- 19) 原子力規制庁, 航空機モニタリング結果, http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/191/list-1.html (2019

年3月1日閲覧).

20) 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,

http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5274/view.html (2019年3月1日閲覧).

- 21) 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.
- 22) 眞田幸尚, 森愛理, 石崎梓, 宗像雅広, 中山真一, 西澤幸康, 卜部嘉, 中西千佳, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 土田清文, 石橋聖, 吉田真美, 前島正道, 結城 洋一, 鳥居建男, 平成 26 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研 究), JAEA-Research 2015-006, 2015, 81p.
- 23) 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, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 宮本賢治, 岩井毅行, 松永祐樹, 豊田政幸, 飛田晋一朗, 工藤保, 中山真一, 平成 27 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング (受託研究), JAEA-Research 2016-016, 2016, 131p.
- 24) 眞田幸尚,森愛理,岩井毅行,瀬口栄作,松永祐樹,河端智樹,豊田政幸,飛田晋一朗,平賀祥吾,佐藤義治,卜部嘉,石崎梓,嶋田和真,廣内淳,工藤保,平成28年度原子力発電所周辺における航空 機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2017-034, 2017, 117p.
- 25) 眞田幸尚, 森愛理, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一朗, 平賀 祥吾, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 廣内淳, 工藤保, 平成 28 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング (受託研究), JAEA-Technology 2017-035, 2017, 69p.
- 26) 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.
- 27) 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.
- 28) 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), p.892, 2016.
- 29) 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, pp.82-89, 2017.
- 30) 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.
- 31) 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 (2019年3月1日閲覧).
- 32) 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.
- 33) ICRU, Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU report 53, 1994, 84p.

- 34) 日本原子力研究開発機構, 平成 29 年度原子力規制庁委託事業「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」成果報告書, 2018,
 - https://fukushima.jaea.go.jp/fukushima/try/entry10.html (2019年3月1日閲覧).
- 35) 私信.
- 36) 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.
- IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, 173p.
- 38) 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), pp.33-41, 2004.
- 39) 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, pp.62-71, 2014.
- 40) ICRP, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, 1996, 179p.
- 41) 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.
- 42) 環境省, 追加被ばく線量年間1ミリシーベルトの考え方, http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=18437&hou_id=14327 (2019年3月1日閲覧).
- 43) 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, pp.417-425, 2018.
- 44) 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), pp.63-80, 2017.
- 45) 国土地理院,国土数値情報土地利用細分メッシュデータ, http://nlftp.mlit.go.in/kgi/gml/dataligt/KgiTmplt L03 h.html (2010 年 3
 - http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html (2019年3月1日閲覧).
- 46) 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, 2017, pp.617-635.
- 47) 日本原子力研究開発機構, 放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト, https://emdb.jaea.go.jp/emdb/ (2019 年 3 月 1 日閲覧).
- 48) Oikawa S., Nobuyuki, K., Sanada, T., Ohashi, N., Uesugi, M., Sato, K., Abukawa, J. and Higuchi, H., A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan, J. Environ. Radioact., 65(2), pp.203-213, 2003.
- 49) 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, pp.83-94, 1998.
- 50) 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/(2019年3月1日閲覧).

_

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本単位			
本平里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光度	カンデラ	cd		

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単	位の例			
AI 立 是 SI 組 立 単位	SI 組立単位			
名称	記号			
面 積 平方メートル	m ²			
体 積 立方メートル	m ³			
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s			
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2			
波 数 毎メートル	m ⁻¹			
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³			
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²			
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg			
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²			
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m			
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸			
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³			
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²			
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1			
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1			
(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度				

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60 s			
時	h	1 h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(π/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad			
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1 t=10^3 kg$			

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表され						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J				
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ^{·27} kg				
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da				
天 文 単 位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m				

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な朋友け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T		
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹		
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」				

は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 尾	属さないその他の単位の例
	-	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	采	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$