



令和6年度東京電力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
及び無人航空機による放射線モニタリングに係る技術開発
(受託研究)

Aerial Monitoring around TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station
and Development of Radiation Monitoring Technology for Unmanned Vehicle
in Fiscal Year 2024
(Contract Research)

普天間 章 越智 康太郎 佐々木 美雪 中間 茂雄
川崎 義晴 岩井 毅行 平賀 祥吾 萩野谷 仁
松永 祐樹 山田 勉 中曾根 孝政 伊藤 恒輝
眞田 幸尚 長久保 梓 工藤 保

Akira FUTEMMA, Kotaro OCHI, Miyuki SASAKI, Shigeo NAKAMA
Yoshiharu KAWASAKI, Takeyuki IWAI, Shogo HIRAGA, Masashi HAGINOYA
Yuki MATSUNAGA, Tsutomu YAMADA, Takamasa NAKASONE, Koki ITO
Yukihisa SANADA, Azusa NAGAKUBO and Tamotsu KUDO

原子力安全・防災研究所
原子力緊急時支援・研修センター

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

March 2026

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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

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

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

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

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

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

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

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

令和 6 年度東京電力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及び
無人航空機による放射線モニタリングに係る技術開発
(受託研究)

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

普天間 章、越智 康太郎⁺¹、佐々木 美雪⁺¹、中間 茂雄⁺¹、川崎 義晴^{*1}、岩井 毅行^{*1}、
平賀 祥吾^{*1}、萩野谷 仁^{*2}、松永 祐樹^{*2}、山田 勉^{*3}、中曾根 孝政^{*3}、伊藤 恒輝^{*4}、
眞田 幸尚⁺¹、長久保 梓⁺²、工藤 保

(2025 年 11 月 25 日受理)

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波に起因する東京電力福島第一原子力発電所事故直後から、放射線の分布を迅速かつ広範囲に測定する航空機を用いた空からの測定方法が採用されている。日本原子力研究開発機構は原子力規制庁からの受託事業として、令和 6 年度に東京電力福島第一原子力発電所周辺の航空機モニタリングを実施した。実施内容は、以下の通りである。過去のモニタリング結果との比較から空間線量率等の変化量を評価し、その変化要因について考察した。航空機モニタリングによる空間線量率の換算精度向上のために、地形の起伏を考慮に入れた解析を行った。地形の起伏を考慮する前後の解析結果を比較し、本手法による換算精度向上の効果を評価した。有人ヘリコプターについては、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、ラドン子孫核種が航空機モニタリングに与える影響を評価した。より効率的に広範囲な航空機モニタリングを展開するため、無人航空機によるモニタリングの技術開発を進めた。

本調査研究は、日本原子力研究開発機構が原子力規制庁との委託契約により実施した「令和 6 年度原子力施設等防災対策等委託費及び放射性物質測定調査委託費 (80 km 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 福島廃炉安全工学研究所

+2 安全研究センター

*1 株式会社 NESI

*2 検査開発株式会社

*3 日本放射線エンジニアリング株式会社

*4 株式会社 JDRONE

Aerial Monitoring around TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and
Development of Radiation Monitoring Technology for Unmanned Vehicle in Fiscal Year 2024
(Contract Research)

Akira FUTEMMA, Kotaro OCHI⁺¹, Miyuki SASAKI⁺¹, Shigeo NAKAMA⁺¹, Yoshiharu KAWASAKI^{*1},
Takeyuki IWAI^{*1}, Shogo HIRAGA^{*1}, Masashi HAGINOYA^{*2}, Yuki MATSUNAGA^{*2},
Tsutomu YAMADA^{*3}, Takamasa NAKASONE^{*3}, Koki ITO^{*4}, Yukihisa SANADA⁺¹,
Azusa NAGAKUBO⁺² and Tamotsu KUDO

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

(Received November 25, 2025)

Aerial Radiation Monitoring (ARM) has been used to quickly and widely measure radiation distribution caused by the TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS) accident resulted from the tsunami accompanying the Pacific coast of Tohoku Earthquake on March 11, 2011. Since the accident, As a commissioned project of the Nuclear Regulation Authority, the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has continuously conducted ARM around FDNPS. This report summarizes the results of the 2024 monitoring activities, evaluates temporal changes in ambient dose rates, and identifies factors contributing to these changes. A terrain-corrected analysis was applied to improve dose rates conversion accuracy, and results with and without this correction were compared. A radon-progeny discrimination method was also used to assess its impact on manned-helicopter measurements. Furthermore, development of unmanned airplane monitoring technologies was advanced to enhance the efficiency of wide-area surveys.

Keywords: Aerial Radiation Monitoring, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Unmanned Airplane

This report summarizes results that JAEA carried out as a commissioned project on "the projects of the radiation monitoring using manned helicopter around the FDNPS" of the Nuclear Regulation Authority in fiscal year 2024.

+1 Fukushima Research and Engineering Institute

+2 Nuclear Safety Research Center

*1 NESI Inc.

*2 Inspection Development Company Ltd.

*3 Japan Radiation Engineering Co. Ltd.

*4 JDRONE Co. Ltd.

目次

1. はじめに	1
2. 東電福島原子力発電所事故に係る航空機モニタリングの経緯	3
3. 測定システムとヘリコプター	12
3.1. 測定システム	12
3.1.1. 有人ヘリコプター	12
3.1.2. 無人ヘリコプター	14
3.2. ヘリコプターの選定	16
3.2.1. 有人ヘリコプター	16
3.2.2. 無人ヘリコプター	17
3.3. 有人ヘリコプター機体による γ 線遮へい効果	18
3.4. 測定システムの保守	20
3.4.1. RSI システムの保守	20
3.4.2. 無人ヘリモニタリングシステムの保守	22
4. データ取得及び解析方法	23
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	23
4.2. 有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングの方法	27
4.3. 換算パラメータの設定及び妥当性確認のためのキャリブレーションフライト	31
4.3.1. 有人ヘリコプター	31
4.3.2. 無人ヘリコプター	43
4.4. 解析のフロー	44
4.5. 空間線量率への換算方法	45
4.5.1. バックグラウンド減算 (宇宙線及びその他)	46
4.5.2. 対地高度補正	50
4.5.3. 空間線量率への換算	55
4.6. 放射性 Cs の沈着量への換算方法	66
4.6.1. 天然放射性核種の弁別と放射性 Cs 起源の計数率及び沈着量の算出	66
4.6.2. 空間線量率－放射能換算係数	68
4.7. 減衰補正	70
4.8. 検出限界値	71
4.8.1. 空間線量率の検出限界値	72
4.8.2. 放射性 Cs の沈着量の検出限界値	72
4.9. 不確かさ	74
4.10. 補間方法	75
4.11. 地上測定値との比較	77
4.12. 有人ヘリモニタリングにおける天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの作成	84

5. 有人ヘリ及び無人ヘリモニタリング結果	89
5.1. ヘリコプターによるフライトの実績	89
5.1.1. 有人ヘリコプター	89
5.1.2. 無人ヘリコプター	92
5.2. 東日本第 15 次モニタリング	94
5.3. 第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人 ヘリモニタリング	99
6. 有人ヘリ及び無人ヘリモニタリング結果の考察	114
6.1. 過去の有人ヘリモニタリング結果との比較	114
6.2. 実効半減期の算出	130
6.3. 土地利用区分による空間線量率の変化傾向の違い	133
7. 地形の起伏による影響と補正方法の評価	144
7.1. 背景	144
7.2. 地形の起伏による影響の補正	144
8. ラドン弁別手法を適用した空間線量率マップの作成	152
8.1. ラドン子孫核種	152
8.2. ラドン弁別手法の概略	154
8.3. パラメータ (<i>RI</i> 及び <i>GI</i>) の決定	156
8.4. <i>GI</i> の高度補正方法	159
8.5. 東日本第 15 次モニタリングのデータへの適用	160
8.6. バックグラウンド計数率の比較	170
9. 無人飛行機を用いたフライト試験	172
9.1. 背景	172
9.1.1. 原子力災害時に運用する無人航空機の必要性能及び試験機の選定	175
9.1.2. 選定した機種のパフォーマンス	177
9.2. フライト試験概要及び結果	182
9.2.1. フライト試験概要	182
9.2.2. 機体の基本性能及び信頼性の確認及びその評価結果	185
9.2.3. 夜間フライトに必要な機能及び運用体制の確認評価結果	206
9.2.4. 放射線測定システムの運用試験	208
9.2.5. キャリブレーションフライトの試験	213
9.3. 機体の性能条件の評価結果	232
10. 今年度の成果と今後の課題	242
11. まとめ	247
謝辞	248
参考文献	249

Contents

1. Introduction.....	1
2. History of ARM after the FDNPS accident	3
3. Measurement system and helicopters.....	12
3.1. Measurement system.....	12
3.1.1. Manned helicopters	12
3.1.2. Unmanned helicopters	14
3.2. Helicopters.....	16
3.2.1. Manned helicopters	16
3.2.2. Unmanned helicopters	17
3.3. Gamma shielding effect of manned helicopter body	18
3.4. Maintenance of measurement systems.....	20
3.4.1. Maintenance of RSI system.....	20
3.4.2. Maintenance of unmanned helicopter measurement system	22
4. Data acquisition and analysis method	23
4.1. Basic concept of converting aerial measurements to ground levels.....	23
4.2. Methods of ARM.....	27
4.3. Calibration flights	31
4.3.1. Manned helicopters	31
4.3.2. Unmanned helicopters.....	43
4.4. Analysis flow	44
4.5. Conversion methods to dose rate	45
4.5.1. Background subtraction (Cosmic rays and others).....	46
4.5.2. Altitude correction.....	50
4.5.3. Conversion to dose rate	55
4.6. Conversion methods to radioactive Cs deposition	66
4.6.1. Discrimination of natural radionuclides and calculation of Cs counts and deposition .	66
4.6.2. Conversion coefficients for dose rate	68
4.7. Decay correction	70
4.8. Detection limits.....	71
4.8.1. Detection limits for dose rate	72
4.8.2. Detection limits for radioactive Cs deposition	72
4.9. Uncertainty.....	74
4.10. Interpolation.....	75
4.11. Comparison with ground measurements	77
4.12. Maps of dose rate of natural nuclides using manned helicopters	84

5. Results of ARM	89
5.1. Flight achievements by helicopters.....	89
5.1.1. Manned helicopters	89
5.1.2. Unmanned helicopters	92
5.2. 15th manned helicopter monitoring in Eastern Japan	94
5.3. 19th manned helicopter monitoring, 2nd unmanned helicopter monitoring in Hamadori, 16th unmanned helicopter monitoring within 5 km zone.....	99
6. Discussion of ARM results	114
6.1. Comparison with past results	114
6.2. Calculation of ecological half-life.....	130
6.3. Different trends in dose rate by land use categories.....	133
7. Evaluation of influence of terrain undulation and correction methods	144
7.1. Background.....	144
7.2. Correction of terrain undulation effects	144
8. Radon discrimination method	152
8.1. Radon progeny	152
8.2. Theory of the radon discrimination method.....	154
8.3. Determination of parameters (<i>RI</i> and <i>GI</i>)	156
8.4. Altitude correction method for <i>GI</i>	159
8.5. Application to 15th monitoring in Eastern Japan.....	160
8.6. Comparison of background count rates.....	170
9. Flight tests using an unmanned airplane	172
9.1. Background.....	172
9.1.1. Required performance of UAVs for nuclear disaster operations	175
9.1.2. Performance of selected models.....	177
9.2. Overview and results of flight test	182
9.2.1. Overview of flight tests	182
9.2.2. Confirmation and evaluation of basic performance and reliability	185
9.2.3. Evaluation of functions and operational system required for night flights	206
9.2.4. Operational test of radiation measurement system	208
9.2.5. Evaluation of radiation measurement system.....	213
9.3. Evaluation of the performance conditions of unmanned airplanes	232
10. Achievements of this year and future challenges.....	242
11. Summary.....	247
Acknowledgements	248
References	249

Table list

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯.....	6
Table 2-2 航空機モニタリングに関わる技術開発の経緯.....	11
Table 3-1 Cs-137 線源によるヘリコプター機体の遮へい効果の比較.....	19
Table 4-1 有人ヘリに係るキャリブレーションフライトの概略.....	34
Table 4-2 テストラインの端点の緯度及び経度.....	38
Table 4-3 テストポイントの中心点の緯度及び経度.....	41
Table 4-4 RSI システムと有人ヘリの組み合わせごとのバックグラウンド計数率及び <i>CR-Index</i>	48
Table 4-5 有人ヘリモニタリングで使用した空気減弱係数 <i>AF</i> のまとめ.....	53
Table 4-6 2024 年度に評価した有人ヘリモニタリングの空気減弱係数 <i>AF</i> データ一覧.....	54
Table 4-7 使用した空間線量率換算係数 <i>CD</i> のまとめ.....	57
Table 4-8 2024 年度に取得した <i>CD</i> データ一覧 (Bell412(JA6928)).....	57
Table 4-9 2024 年度に取得した <i>CD</i> データ一覧 (Bell430(JA05TV)).....	57
Table 4-10 2024 年度に取得した <i>CD</i> データ一覧 (S-76(JA6901)).....	58
Table 4-11 <i>BG-Index</i> 一覧.....	68
Table 4-12 RSI システムの検出限界値.....	73
Table 4-13 使用した空気減弱係数 <i>AF</i> (m^{-1}) のまとめ.....	86
Table 5-1 東日本第 15 次モニタリング及び第 19 次モニタリングにおけるフライト実績.....	91
Table 5-2 浜通り第 2 次無人ヘリモニタリングにおけるフライト実績.....	92
Table 6-1 80 km 圏内における空間線量率の面積割合の経年推移 (表形式).....	120
Table 6-2 指数関数近似から求めた実効半減期.....	132
Table 6-3 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較 (国土数値情報土地利用 細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版)に基づく).....	141
Table 6-4 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較 (国土数値情報土地利用 細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版)に基づく).....	141
Table 6-5 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較 (国土数値情報土地利用 細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版)に基づく).....	142
Table 6-6 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較 (国土数値情報土地利用 細分メッシュデータ (令和 3 年度公開版)に基づく).....	142
Table 6-7 森林部及び市街地部における空間線量率のモニタリング種別ごとの相対変化率の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (令和 3 年度公開版)に基づく).....	143
Table 8-1 ラドン子孫核種の放出する γ 線.....	153
Table 9-1 Penguin C のカタログスペック.....	180
Table 9-2 Edge Autonomy における MTBF 計算時の事故分類.....	181
Table 9-3 試験日及び試験内容一覧.....	183

Table 9-4 各フライト試験の詳細情報	184
Table 9-5 フライト No.2024-01 の作業情報詳細	186
Table 9-6 フライト No.2024-02 の作業情報詳細	188
Table 9-7 フライト No.2024-03 の作業情報詳細	190
Table 9-8 フライト No.2024-04 の作業情報詳細	192
Table 9-9 フライト No.2024-05 の作業情報詳細	194
Table 9-10 フライト No.2024-06 の作業情報詳細	196
Table 9-11 フライト No.2024-07 の作業情報詳細	198
Table 9-12 フライト No.2024-08 の作業情報詳細	200
Table 9-13 フライト No.2024-09 の作業情報詳細	202
Table 9-14 フライト No.2024-10 の作業情報詳細	204
Table 9-15 10回のフライト試験で修理交換した部品一覧.....	206
Table 9-16 無人航空機測定試験で得られた空気減弱係数 AF と空間線量率換算係数 CD	217
Table 9-17 無線モデム pMDDL2450 の仕様.....	239
Table 9-18 ドローン等での使用が想定される主な無線通信システム.....	240
Table 10-1 RSI システムの保守及び運用実績	246

Figure list

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績.....	8
Fig. 3-1 RSI システムのブロック図.....	13
Fig. 3-2 RSI システムの外観	13
Fig. 3-3 無人ヘリモニタリングシステムの検出器の構成.....	14
Fig. 3-4 無人ヘリモニタリングシステムのブロック図.....	15
Fig. 3-5 機底に燃料タンクのないヘリコプター機種一覧.....	16
Fig. 3-6 無人ヘリモニタリングシステムを搭載した FAZER R G2 及び基地局における操作の様子	17
Fig. 3-7 線源試験での位置関係イメージ.....	19
Fig. 3-8 RSI システムのエネルギー分解能及びゲインの変動.....	21
Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係.....	24
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	25
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	25
Fig. 4-4 航空機モニタリングによる上空からの測定イメージ	26
Fig. 4-5 航空機モニタリングのフライトイメージ.....	28
Fig. 4-6 80 km 圏内外における航空機モニタリング測線配置の全体図	29
Fig. 4-7 無人ヘリモニタリング領域の拡大図.....	30
Fig. 4-8 宇宙線フライトのイメージ.....	35
Fig. 4-9 Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージ	35
Fig. 4-10 テストラインフライトのイメージ.....	35
Fig. 4-11 テストラインフライトの場所.....	36
Fig. 4-12 テストポイントフライトのイメージ.....	39
Fig. 4-13 テストポイントフライトの場所.....	40
Fig. 4-14 天然核種フライトの測線とオーバーラップフライトの測線	42
Fig. 4-15 解析のフロー	44
Fig. 4-16 RSI システムによる海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例.....	47
Fig. 4-17 RSI システムにより BG フライトで取得した陸上と海上での γ 線スペクトル例	48
Fig. 4-18 無人ヘリモニタリングシステムにおける LaBr ₃ (Ce)検出器の自己汚染による γ 線スペク トル例 (海上飛行において取得したデータ)	49
Fig. 4-19 対地高度と計数率の関係例.....	52
Fig. 4-20 地上測定データ (TestPoint 1).....	59
Fig. 4-21 地上測定データ (TestPoint 3).....	60
Fig. 4-22 地上測定データ (TestPoint 4).....	61
Fig. 4-23 地上測定データ (TestPoint 5).....	62

Fig. 4-24 地上測定データ (TestPoint D)	63
Fig. 4-25 地上測定データ (TestPoint E)	64
Fig. 4-26 オーバーラップフライトにおけるヘリコプター機種または機体ごとの <i>CR-Index</i> ・ <i>HF</i> 補正計数率の関係	65
Fig. 4-27 放射性 Cs に起因する計数率の算出イメージ	67
Fig. 4-28 <i>BG-Index</i> の算出例	68
Fig. 4-29 重量緩衝深度 β と空間線量率－放射能換算係数 <i>CF</i> の関係	69
Fig. 4-30 IDW に入力するパラメータとマップの関係	76
Fig. 4-31 測線近傍における地上測定値と有人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較	80
Fig. 4-32 ランダムな位置における地上測定値と有人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較	80
Fig. 4-33 ランダムな位置における地上測定値と浜通り第 2 次無人ヘリモニタリングによる空間 線量率の比較	81
Fig. 4-34 ランダムな位置における地上測定値と第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングによる 空間線量率の比較	81
Fig. 4-35 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と有人ヘリモニタリングによる Cs-137 沈着量の比 較	82
Fig. 4-36 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と浜通り第 2 次無人モニタリングによる Cs-137 沈 着量の比較	82
Fig. 4-37 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と第 16 回 5 km 圏内無人モニタリングによる Cs- 137 沈着量の比較	83
Fig. 4-38 関数適合法を用いた Cs-134 と K-40 の弁別の例	85
Fig. 4-39 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (<i>CD</i>) の関係 (Bell412)	87
Fig. 4-40 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (<i>CD</i>) の関係 (Bell430)	87
Fig. 4-41 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (<i>CD</i>) の関係 (S-76)	87
Fig. 4-42 東電福島原子力発電所周辺における天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの作 成例	88
Fig. 4-43 可搬型 Ge 検出器による測定で評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率と有人 ヘリモニタリングで評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率との比較	88
Fig. 5-1 住民周知用のチラシのサンプル (檜葉町の例)	93
Fig. 5-2 東日本第 15 次モニタリングにおける空間線量率マップ	95
Fig. 5-3 東日本第 15 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ	96
Fig. 5-4 東日本第 15 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ	97
Fig. 5-5 東日本第 15 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ	98
Fig. 5-6 第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人 ヘリモニタリングにおける空間線量率マップ	100

Fig. 5-7 第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ	101
Fig. 5-8 第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ	102
Fig. 5-9 第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ	103
Fig. 5-10 東日本第 15 次モニタリングと第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける空間線量率マップ	104
Fig. 5-11 東日本第 15 次モニタリングと第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	105
Fig. 5-12 東日本第 15 次モニタリングと第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ	106
Fig. 5-13 東日本第 15 次モニタリングと第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ	107
Fig. 5-14 東日本第 15 次モニタリング及び第 19 次モニタリングにおける天然放射性核種由来の空間放射線量率マップ	108
Fig. 5-15 各測定年度における天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの比較	109
Fig. 6-1 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較	117
Fig. 6-2 80 km 圏内における空間線量率の面積割合の経年推移 (円グラフ形式).....	122
Fig. 6-3 第 4 次モニタリング及び 2024 年度の 80 km 圏内における有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングによる空間線量率算出結果の比較	124
Fig. 6-4 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	125
Fig. 6-5 旧避難指示区域における第 4 次モニタリングと第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの空間線量率算出結果の比較	128
Fig. 6-6 旧避難指示区域における第 4 次モニタリングと第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの Cs-137 沈着量算出結果の比較.....	129
Fig. 6-7 測定値の指数関数近似.....	132
Fig. 6-8 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版 国土地理院土地利用調査データより).....	135
Fig. 6-9 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版 国土地理院土地利用調査データより).....	136
Fig. 6-10 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版 国土地理院土地利用調査データより).....	137

Fig. 6-11 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (令和 3 年度公開版 国土地理院土地利用調査データより).....	138
Fig. 6-12 森林部及び市街地部における地表面から 1 m の高さの空間線量率の第 4 次モニタリングに対する第 19 次モニタリングの相対変化率の比較	139
Fig. 6-13 森林部及び市街地部における地表面から 1 m の高さの空間線量率の第 4 次モニタリングに対する浜通り第 2 次無人ヘリモニタリングの相対変化率の比較.....	139
Fig. 6-14 森林部及び市街地部における地表面から 1 m の高さの空間線量率の第 4 次モニタリングに対する第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの相対変化率の比較.....	140
Fig. 7-1 地形の起伏による影響を補正する場合に考慮すべき点	147
Fig. 7-2 80 km 圏内における第 19 次モニタリング、第 2 次浜通り無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングによる空間線量率マップの比較.....	148
Fig. 7-3 第 19 次モニタリング結果と地上測定値との比較	149
Fig. 7-4 浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング結果と地上測定値との比較	150
Fig. 7-5 第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリング結果と地上測定値との比較	151
Fig. 8-1 ウラン系列及びトリウム系列.....	153
Fig. 8-2 空気中ラドン子孫核種測定用の検出器と有人ヘリへの搭載状況	155
Fig. 8-3 空気中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ	155
Fig. 8-4 海上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr ₃ (Ce)検出器の計数率の関係	158
Fig. 8-5 陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr ₃ (Ce)検出器の計数率の関係	158
Fig. 8-6 ラドン弁別手法適用前後の東日本第 15 次モニタリングの空間線量率マップ	163
Fig. 8-7 東日本第 15 次モニタリングの測定結果から計算した空気中ラドン子孫核種の計数率マップ	165
Fig. 8-8 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率と地上測定値との比較 (重み付き直交距離回帰による <i>RI</i> 及び <i>GI</i> を用いた場合).....	167
Fig. 8-9 ラドン弁別手法適用後の空間線量率と地上測定値との比較 (最小二乗法による <i>RI</i> 及び <i>GI</i> を用いた場合).....	169
Fig. 8-10 BG フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子孫核種由来の計数率の比較.....	171
Fig. 9-1 既存システムと緊急時に備えて構築すべき無人航空機システムの比較イメージ	174
Fig. 9-2 原子力発電所事故を例にした既存の無人航空機による対応シミュレーション	175
Fig. 9-3 国内外の無人航空機の例.....	177
Fig. 9-4 Penguin C 外観写真.....	179
Fig. 9-5 フライト試験の工程.....	185
Fig. 9-6 フライト No.2024-01 の飛行軌跡.....	187
Fig. 9-7 フライト No.2024-02 の飛行軌跡.....	189
Fig. 9-8 フライト No.2024-03 の飛行軌跡.....	191

Fig. 9-9 フライト No.2024-04 の飛行軌跡.....	193
Fig. 9-10 フライト No.2024-05 の飛行軌跡.....	195
Fig. 9-11 フライト No.2024-06 の飛行軌跡.....	197
Fig. 9-12 フライト No.2024-07 の飛行軌跡.....	199
Fig. 9-13 フライト No.2024-08 の飛行軌跡.....	201
Fig. 9-14 フライト No.2024-09 の飛行軌跡.....	203
Fig. 9-15 フライト No.2024-10 の飛行軌跡.....	205
Fig. 9-16 LED ライトを装着した状態の試験の様子	208
Fig. 9-17 日中に撮影したフライト時の赤外線カメラ画像	208
Fig. 9-18 システム運用試験でを使用した放射線測定システム	211
Fig. 9-19 システム A 外観図.....	212
Fig. 9-20 システム B 外観及び画面表示例	212
Fig. 9-21 システム C 画面例	213
Fig. 9-22 キャリブレーションフライトで得られた対地高度と計数率の関係	217
Fig. 9-23 歩行サーベイによる地上 1 m 空間線量率測定結果 (2024 年 6 月 14 日実施)	218
Fig. 9-24 歩行サーベイによる地上 1 m 空間線量率測定結果 (2024 年 9 月 11 日実施)	219
Fig. 9-25 歩行サーベイによる地上 1 m 空間線量率測定結果 (2024 年 12 月 3 日実施)	220
Fig. 9-26 無人航空機の環境用検出器によるキャリブレーションフライトを基に評価した地表面 から 1 m の高さの空間線量率マッピング結果 (2024 年 6 月 13 日測定)	221
Fig. 9-27 無人航空機の緊急時用検出器によるキャリブレーションフライトを基に評価した地表 面から 1 m の高さの空間線量率マッピング結果 (2024 年 6 月 14 日測定)	222
Fig. 9-28 無人航空機の環境用検出器による広域フライト (高度 250 m) を基に評価した地表面か ら 1 m の高さの空間線量率マッピング結果 (2024 年 7 月 9 日測定)	223
Fig. 9-29 無人航空機の環境用検出器による広域フライト (高度 200 m) を基に評価した地表面か ら 1 m の高さの空間線量率マッピング結果 (2024 年 7 月 10 日測定)	224
Fig. 9-30 無人航空機の緊急時用検出器による広域フライト (高度 200 m) を基に評価した地表面 から 1 m の高さの測定による空間線量率マッピング結果 (2024 年 7 月 11 日測定).....	225
Fig. 9-31 無人航空機の緊急時用検出器による広域フライト (高度 250 m) を基に評価した地表面 から 1 m の高さの測定による空間線量率マッピング結果 (2024 年 7 月 12 日測定).....	226
Fig. 9-32 無人航空機の緊急時用検出器によるキャリブレーションフライトを基に評価した地表 面から 1 m の高さの測定による空間線量率マッピング結果 (2024 年 9 月 11 日測定).....	227
Fig. 9-33 無人航空機の環境用検出器による広域フライト (高度 200m) を基に評価した地表面か ら 1 m の高さの空間線量率マッピング結果 (2024 年 12 月 2 日測定)	228
Fig. 9-34 空間線量率の箱ひげ図.....	229
Fig. 9-35 地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値の比較結果 (環境用検出器)	230

Fig. 9-34 空間線量率の箱ひげ図.....	229
Fig. 9-35 地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値の比較結果 (環境用検出器)	230
Fig. 9-36 地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値の比較結果 (緊急時用検出器)	230
Fig. 9-37 地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値同士の比較結果	231
Fig. 9-38 Penguin C の空虚重量	233
Fig. 9-39 カタパルトに対する打ち上げ時の風向	233
Fig. 9-40 地球の丸みによる影響.....	236
Fig. 9-41 直線通信距離とフレネルゾーン	236
Fig. 9-42 フレネルゾーンと地球の丸みの影響.....	237
Fig. 9-43 フレネルゾーンに障害物がない場合の高さ相関.....	237
Fig. 9-44 フレネルゾーンに 20%の障害物がある場合の相関	237

1. はじめに

短時間で広域のモニタリングを実施する方法の一つとして、有人ヘリコプターを用いた航空機モニタリング (Aerial Radiation Monitoring: ARM) が挙げられる。航空機モニタリングによる放射線の測定及びマッピングは、1979年に発生したスリーマイル島原子力発電所事故や1986年に発生したチョルノービリ原子力発電所事故を契機とし、環境中の地表面に沈着した人工放射性核種を迅速に検出するための手法として、ウラン探査の技術をベースに開発されてきた¹⁾。現在、米国ではエネルギー省 (以下、DOE) を中心に多数の航空機モニタリングの機器を所有しており、核実験場等の計測等で培った経験を基に緊急時における運用方法が整備されている^{2),3)}。また欧州では、スコットランド大学連合環境放射能研究所 (Scottish Universities Environmental Research Centre: SUERC) を中心に、チョルノービリ原子力発電所事故後に各国運用されている航空機モニタリングのシステムを一箇所に集め比較測定を実施することにより、データフォーマットや解析手法の標準化を行っている⁴⁾。

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

2011年 (平成23年) 3月11日の東北地方太平洋沖地震に起因して、東電福島原子力発電所事故が発生し、周辺環境に放射性物質が広く拡散したため、その影響を評価することが急務となり、航空機モニタリングが導入されるに至った。東電福島原子力発電所から半径80 km 圏内 (以下、80 km 圏内) における航空機モニタリングは、DOE 及び NUSTEC と文部科学省 (以下、文科省) により 2011年 (平成23年) 4月6日から開始され^{10),11)}、同年5月31日からは原子力機構も本航空機モニタリングに参画した。これ以降、2012年 (平成24年) にかけて我が国初となる日本全国規模の航空機モニタリングが実施された¹²⁾。当時作成された東電福島原子力発電所周辺における空間線量率マップや地表面における放射性セシウム (以下、放射性Cs) の沈着量マップは、避難指示区域設定の基礎資料となった他、様々なメディアや研究に活用された¹³⁾。また、事故直後に実施された東電福島原子力発電所周辺

の海上における航空機モニタリングデータを再解析し、事故直後の海上における I-131 や放射性 Cs の降下量マップを再構築し、シミュレーションと比較した例も報告されている¹⁴⁾。これらの例は、東電福島原子力発電所事故後における航空機モニタリングが有する高いデータ収集能力と、提供される情報の有用性を示すものである。2013年度(平成25年度)以降は原子力機構が実施主体を担うこととなり、当該事業は同年度に原子力規制庁(以下、規制庁)に移管され、モニタリング結果は規制庁のホームページで公開されている¹⁵⁾。この事故対応を契機として、航空機モニタリングが平常時、緊急時を問わず継続的に実施可能となるよう、データ取得手法や解析手順の標準化、体系化が急速に進められた。これにより、広域を対象とした航空機モニタリングがルーチンベースで実施できる体制が構築された。また、原子力機構をはじめ、航空機モニタリングの経験を有する研究機関や企業が連携し、DOEの手法を基盤としつつ、東電福島原子力発電所事故の状況や急峻な地形が多いという日本固有の環境を踏まえ、測定及び評価手法の改善が進められた。

本報告書は、規制庁からの受託事業として実施した2024年度(令和6年度)の航空機モニタリングについて、東電福島原子力発電所から半径80 km圏内外(以下、80 km圏内外)の結果を取りまとめたものである。80 km圏内については有人ヘリコプター(以下、有人ヘリ)を主軸とし、東電福島原子力発電所の近傍ではより詳細な測定データを得るため、無人ヘリコプター(以下、無人ヘリ)を用いてモニタリングを行った。80 km圏外については有人ヘリのみでモニタリングを行った。2024年度(令和6年度)における80 km圏内における航空機モニタリングの内、有人ヘリによるモニタリングを「第19次モニタリング」、福島県浜通り地域における無人ヘリによるモニタリングを「浜通り第2次無人ヘリモニタリング」、80 km圏外における有人ヘリモニタリングを「東日本第15次モニタリング」と呼称する。また、有人ヘリモニタリングによる空間線量率の評価の更なる高度化を目的とし、地形の起伏を考慮して空間線量率の補正を行う解析手法を、これら80 km圏内の測定データに適用し、得られた換算結果を地上測定値と比較することで空間線量率の換算精度の向上効果について定量的評価を行った。その際、「令和6年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策等委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業」¹⁶⁾の一環として行われた東電福島原子力発電所から5 km圏内における無人ヘリによるモニタリング「第16回5 km圏内無人ヘリモニタリング」のデータも80 km圏内の測定データとして活用した。さらに、80 km圏外の測定データ(東日本第15次モニタリング)について、大気中のラドン子孫核種に起因する γ 線を弁別除去し、地表面の放射性核種に起因する γ 線による空間線量率マップを作成した。加えて、国内の原子力発電所周辺のモニタリングに適用することを見据え、無人航空機を用いたフライト試験及び無人航空機用の放射線測定システムの測定精度評価を福島ロボットテストフィールドで実施した。当試験を通じて、無人航空機によるモニタリングにおける課題を抽出した。

2. 東電福島原子力発電所事故に係る航空機モニタリングの経緯

東電福島原子力発電所事故発生後に実施された航空機モニタリングの一連のスケジュールと実績について Table 2-1 及び Fig. 2-1 に示す。本報告では、これら一連の東電福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングを「80 km 圏内外の航空機モニタリング事業」と総称する。80 km 圏内外の航空機モニタリング事業では、2011年(平成23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¹⁷⁾」に則り、同年4月6日から文科省が主体となり DOE の協力を得て(測定: NUSTEC)、「第1次モニタリング」として80 km 圏内における有人ヘリモニタリングを開始した。また、同年5月18日から「第2次モニタリング」として東電福島原子力発電所から80 km~100 km 圏を有人ヘリによりモニタリングした。その後、同年5月31日に開始された「第3次モニタリング」からは原子力機構が加わって、80 km 圏内の有人ヘリモニタリングを実施した。さらに、東電福島原子力発電所から100 km 圏外にも放射性物質が拡散していることが予想されたため、同年6月22日から福島周辺県の宮城県、栃木県、茨城県を対象に有人ヘリによるモニタリングを実施した。その後、原子力機構が主体となり、同年8月2日から文科省委託事業「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¹⁸⁾」として東日本全域の有人ヘリモニタリング「東日本第1次モニタリング」を、同年10月22日から80 km 圏内の有人ヘリモニタリング「第4次モニタリング」をそれぞれ実施した。また、80 km 圏内外の航空機モニタリング事業の測定範囲を拡大させ、2012年(平成24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有人ヘリモニタリング「西日本・北海道モニタリング」を実施した。同年2月6日からは、「警戒区域及び計画的避難区域における有人ヘリモニタリング(第4.5次)」として実施した。

2012年度(平成24年度)は、80 km 圏内については、同年6月22日及び10月31日から「第5次モニタリング」及び「第6次モニタリング」をそれぞれ実施した。さらに、2013年(平成25年)3月4日には「警戒区域及び避難指示区域における航空機モニタリング(第6.5次)」を実施した。また、それまでのデータに基づき、東電福島原子力発電所事故の影響が見られる地域に限定し、有人ヘリモニタリングを継続した。0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 以上となるような空間線量率の比較的高い場所で80 km 圏内を除く地域を対象に、2012年(平成24年)4月2日から「東日本第2次モニタリング」を、同年10月31日から「東日本第3次モニタリング」をそれぞれ実施した。

2013年度(平成25年度)には80 km 圏内外の航空機モニタリング事業の主体が文科省から規制庁に移管され、有人ヘリモニタリングが継続された。80 km 圏内について2013年(平成25年)8月27日及び11月2日から「第7次モニタリング」及び「第8次モニタリング」をそれぞれ実施した。また、同年9月3日から空間線量率の比較的高い場所(0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 以上)で80 km 圏外を対象に「東日本第4次モニタリング」を実施した。同年度の結果については、眞田他(2014)¹⁹⁾に詳しく報告されている。

2014年度(平成26年度)以降2022年度(令和4年度)までは、Table 2-1に示したように80 km圏内と80 km圏外を対象に有人ヘリモニタリングを継続実施した²⁰⁾⁻²⁹⁾。

2023年度(令和5年度)には、規制庁により航空機モニタリングの測定エリアの再編が行われた。有人ヘリによる測定範囲の一部が、別事業として実施されている無人「5 km圏内無人ヘリモニタリング」の測定範囲と一部重複していたため、この重複領域を無人ヘリ側に集約し、有人ヘリの測定対象から除外する方針が採られた。ここで従来と同等範囲の線量率マップを作成するため、5 km圏内無人ヘリモニタリングで取得されたデータを取り入れ、有人ヘリモニタリング結果と統合して解析する必要が生じた。この方針の下、同年度における80 km圏内では、有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングデータを統合して空間線量率マップ及び放射性Cs沈着量マップを作成した。有人ヘリモニタリングについては、2023年(令和5年)9月7日から「第18次モニタリング」を実施した。無人ヘリモニタリングについては、東電福島原子力発電所の比較的近傍にて、同年11月13日から「浜通り第1次無人ヘリモニタリング」を実施した。また、同年6月21日から「第15回5 km圏内無人ヘリモニタリング」が実施され、これは「令和5年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策等委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業」³⁰⁾の一環として行われたものである。また、同年9月20日から80 km圏外を対象に「東日本第14次モニタリング」を実施した。

このように、これまでの有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングによって、日本全域の陸域における放射線量分布の全体像を示すとともに、東電福島原子力発電所事故の影響の大きい地域については継続的に測定するなど、信頼できるデータを提供してきた。また、これらの継続的な有人ヘリ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に有人ヘリモニタリングに関連する技術開発の経緯について示す。無人ヘリモニタリングに関する技術的な詳細は本報告の対象外であり、本書ではその有効利用の範囲にとどめる。無人ヘリの具体的な技術開発や運用に関する内容は参考文献³¹⁾⁻³³⁾を参照されたい。

以下では、80 km圏内外における航空機モニタリング及び人工放射性核種と天然放射性核種の寄与弁別に関連する主要な技術開発の経緯について概説する。各年度の詳細な成果はTable 2-2に整理した。

2011年度(平成23年度)から2012年度(平成24年度)には福島第一原子力発電所事故への対応として、有人ヘリモニタリングの基本手法を確立し¹⁰⁾、空間線量率及び放射性セシウム沈着量への換算に必要な解析システムを整備した¹¹⁾。2013年度(平成25年度)から2015年度(平成27年度)には、地形の影響評価¹⁹⁾、I-131の地表面沈着量の評価手法の開発^{34),35)}、人工放射性核種と天然放射性核種との弁別技術²⁰⁾、ラドン子孫核種の寄与低減手法²¹⁾など、換算精度向上に向けた解析技術の高度化が進められた。2016年度(平成28年度)から2019年度(令和元年度)には、GNSSによる測位精度改善²²⁾、地形補正手法の本格導入と既存解析システムへの実装^{23),38)}、過去データへの適用と地上測定値との比較検証を通じ、空間線量率換算の精度向上が体系的に評価された^{24),25)}。2020年度(令和2年度)以降

は、解析基盤の更新 (ArcGIS Pro、Python3 への移行)²⁸⁾や無人ヘリモニタリングとのデータ統合手法の整備²⁹⁾など、測定効率化と実運用を念頭に置いたシステム更新が進められた。

本報告書で対象とする令和 6 年度 (2024 年度) の航空機モニタリングでは、これらの技術的蓄積を基盤として、80 km 圏内外の空間線量率及び天然放射性核種濃度の評価を実施した。

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯

(1/2)

モニタリング名	測定場所	測定実施機関	解析実施機関	測定実施日	結果公表日
第1次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	DOE 60 km圏内 NUSTEC 60 km～80 km圏内	DOE	2011/04/06 ～04/29	2011/05/08
第2次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km～100 km圏内	NUSTEC	NUSTEC	2011/05/18 ～05/28	2011/06/16
第3次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA, NUSTEC 40 km圏内 NUSTEC 40 km～80 km圏内	JAEA NUSTEC	2011/05/31 ～07/02	2011/07/08
東日本第1次 モニタリング	青森～福井までの東日本 (2次, 3次実施部分除く)	JAEA NUSTEC OYO	JAEA NUSTEC OYO	2011/06/22 ～10/20	随時公表
第4次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA, NUSTEC 40 km圏内 NUSTEC 40 km～80 km圏内	JAEA NUSTEC	2011/10/22 ～11/05	2011/12/16
西日本・北海道 モニタリング	近畿～沖縄、北海道	JAEA NUSTEC OYO	JAEA NUSTEC OYO	2012/01/30 ～05/31	随時公表
警戒区域及び計画的避難 区域における航空機 モニタリング (第4.5次)	警戒区域及び 計画的避難区域	NUSTEC	JAEA NUSTEC	2012/02/06 ～02/10	2012/02/24
東日本第2次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA NUSTEC OYO	JAEA NUSTEC OYO	2012/04/02 ～05/07	2012/09/28
第5次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JCAC OYO	JCAC NUSTEC	2012/06/22 ～06/28	2012/09/28
第6次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JCAC OYO	JCAC NUSTEC	2012/10/31 ～11/16	2013/03/01
東日本第3次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	NUSTEC	JAEA	2012/10/31 ～12/28	2013/03/01
警戒区域及び避難指示区 域における航空機 モニタリング (6.5次)	警戒区域及び 避難指示区域	JCAC NUSTEC	JCAC NUSTEC	2013/03/04 ～03/11	2013/05/13
第7次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2013/08/27 ～09/28	2013/12/25
東日本第4次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA OYO	JAEA OYO	2013/09/03 ～11/04	2014/03/07
第8次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2013/11/02 ～11/19	2014/03/07
第9次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2014/09/01 ～09/20	2015/02/13
東日本第5次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA OYO	JAEA OYO	2014/9/21 ～11/07	2015/02/13
第10次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2015/09/12 ～09/30	2016/02/02
東日本第6次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA OYO	JAEA OYO	2015/10/02 ～11/04	2016/02/02
H27_BGモニタリング	川内原子力発電所から 80 km圏内	JAEA	JAEA	2016/02/01 ～02/07	-
H28_BGモニタリング(1)	大飯発電所及び高浜発電所 から80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2016/07/20 ～08/01	-
第11次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2016/09/14 ～10/15	2017/02/13
東日本第7次 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	2017/02/13
H28_BGモニタリング(2)	伊方発電所から80 km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80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2017/07/24 ～08/02	-
H29_BGモニタリング(2)	柏崎刈羽原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2017/07/26 ～08/10 2017/09/30 ～10/01	-
第12次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2017/09/09 ～09/25	2018/02/20
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	2017/09/29 ～11/16	2018/02/20
H29_BGモニタリング(3)	玄海原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2017/11/28 ～12/05	-

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

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯
(2/2)

モニタリング名	測定場所	測定実施機関	解析実施機関	測定実施日	結果公表日
H30_BGモニタリング(1)	島根原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2018/07/20 ~07/27	-
第13次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2018/09/06 ~10/16	2019/03/08
東日本第9次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA OYO	JAEA OYO	2018/10/08 ~11/15	2019/03/08
H30_BGモニタリング(2)	浜岡原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2018/11/27 ~12/09	-
R1_BGモニタリング(1)	東通原子力発電所及び六ヶ所再 処理工場から80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2019/06/26 ~07/10	-
第14次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2019/08/29 ~09/18	2020/02/13
東日本第10次 モニタリング	東日本第9次モニタリングにおい て0.2 μSv/h以上であった地域	JAEA OYO	JAEA OYO	2019/09/18 ~11/02	2020/02/13
R1_BGモニタリング(2)	志賀原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2019/11/21 ~11/29	-
R2_BGモニタリング(1)	美浜発電所及び敦賀発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2020/07/22 ~08/10	-
第15次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2020/08/25 ~10/02	2021/02/15
東日本第11次 モニタリング	東日本第9次モニタリングにおい て0.2 μSv/h以上であった地域	JAEA OYO	JAEA OYO	2020/09/22 ~10/30	2021/02/15
R2_BGモニタリング(2)	近畿大学原子力研究所及び 京都大学複合原子力科学研究所 から80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2020/11/12 ~11/19	-
第16次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA JDRONE	2021/08/31 ~10/03	2022/03/04
東日本第12次 モニタリング	東日本第9次モニタリングにおい て0.2 μSv/h以上であった地域	JAEA SIC	JAEA JDRONE	2021/09/26 ~10/25	2022/03/04
R3_BGモニタリング	大飯・高浜発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2021/11/06 ~11/20	-
R4_BGモニタリング(1)	美浜発電所及び敦賀発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2022/07/26 ~07/31	-
第17次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA JDRONE	2022/09/01 ~09/30	2023/03/10
東日本第13次 モニタリング	東日本第9次モニタリングにおい て0.2 μSv/h以上であった地域	JAEA SIC	JAEA JDRONE	2022/09/13 ~10/21	2023/03/10
R4_BGモニタリング(2)	伊方発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2022/11/11 ~11/21	-
R5_BGモニタリング(前期)	川内原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2023/07/25 ~07/28	-
第18次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA JDRONE	2023/09/07 ~09/29	2024/02/22
浜通り第1次 無人ヘリモニタリング	福島県浜通り地域	JAEA JDRONE	JAEA JDRONE	2023/11/13 ~11/27	2024/02/22
第15回5 km圏内 無人ヘリモニタリング*	東電福島原子力発電所から 5 km圏内	JAEA JDRONE	JAEA JDRONE	2023/6/21~ 10/22	2024/02/22
東日本第14次 モニタリング	東日本第9次モニタリングにおい て0.2 μSv/h以上であった地域	JAEA SIC	JAEA JDRONE	2023/09/20 ~10/18	2024/02/22
R5_BGモニタリング(後期)	川内原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2023/11/12 ~11/15	-
R6_BGモニタリング(前期)	島根原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2024/06/13 ~06/17	-
東日本第15次モニタリング	東日本第9次モニタリングにおい て0.2 μSv/h以上であった地域	JAEA SIC	JAEA	2024/07/10 ~07/31 2024/09/11 ~10/14	2025/02/28
R6_BGモニタリング(後期)	島根原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2024/08/23 ~09/05	-
第19次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA JDRONE	2024/10/15 ~11/19	2025/02/28
浜通り第2次 無人ヘリモニタリング	福島県浜通り地域	JAEA JDRONE	JAEA JDRONE	2024/11/18 ~12/19	2025/02/28
第16回5 km圏内 無人ヘリモニタリング*	東電福島原子力発電所から 5 km圏内	JAEA JDRONE	JAEA JDRONE	2024/05/10 ~10/02	2025/02/28

※JAEA: (国研)日本原子力研究開発機構、OYO: 応用地質(株)、SIC:(株)静環検査センター、JDRONE:(株)JDRONE

*:「放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業」にて実施された。各年度の同事業における表記に準じた名称としている。

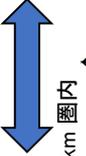
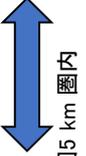
年 月	2011			2012			2013			2014			2015			
	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12
80 km 圏内		第1次モニタリング (04/06~04/29)	第3次モニタリング (05/31~07/02)	第4次モニタリング (10/22~11/05)	第5次モニタリング (06/22~06/28)	第6次モニタリング (10/31~11/16)	第7次モニタリング (08/27~09/28)	第8次モニタリング (11/02~11/19)	第9次モニタリング (09/01~09/20)	第10次モニタリング (09/12~9/30)						
				警戒区域及び計画的 避難準備区域 (4.5次) (02/06~02/10)				警戒区域及び計画的 避難準備区域 (6.5次) (03/04~03/11)								
東電福島原子力発電所事故 (03/11)																
80 km 圏外		第2次モニタリング 80 km~100 km圏内 (05/18~05/26)	東日本第1次モニタリング 青森~福井・岐阜・愛知 (06/22~10/20)		西日本・北海道モニタリング 京都・滋賀~沖縄 (01/30~05/31)	東日本第3次モニタリング (10/31~12/28)			東日本第5次モニタリング (09/21~11/07)							
								東日本第4次モニタリング (09/03~11/04)								

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績
(1/3)

年 月	2016			2017			2018			2019			2020									
	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12						
80 km 圏内				 第11次モニタリング (09/14~10/15)				 第12次モニタリング (09/09~09/25)				 第13次モニタリング (09/06~10/16)				 第14次モニタリング (08/29~09/18)		 第15次モニタリング (08/25~10/02)				
80 km 圏外	川内BG (02/01~02/07) 	伊方BG (11/29~12/11) 	高浜・大飯BG (07/20~08/01) 	東日本第7次モニタリング (10/15~11/18)	油BG (07/24~08/02) 	柏崎刈羽BG (07/26~08/10) および 09/30~10/01 	東日本第8次モニタリング (09/29~11/16) 	玄海BG (11/28~12/05) 	川内BG (02/01~02/07) 	伊方BG (11/29~12/11) 	高浜・大飯BG (07/20~08/01) 	東日本第7次モニタリング (10/15~11/18)	油BG (07/24~08/02) 	柏崎刈羽BG (07/26~08/10) および 09/30~10/01 	東日本第8次モニタリング (09/29~11/16) 	玄海BG (11/28~12/05) 	志賀BG(11/21~11/29) 	東通・六ヶ所BG (06/26~07/10) 	東日本第10次モニタリング (09/18~11/02) 	近大炉・京大炉BG (11/12~11/19) 	美浜・敦賀BG (07/22~08/10) 	東日本第11次モニタリング (09/22~10/30) 

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績

(2/3)

年 月	2021			2022			2023			2024		
	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12
80 km 圏内		第16次モニタリング (08/31~10/03) 			第17次モニタリング (09/01~09/30) 		第15回5 km 圏内 無人ヘリモニタリング* (06/21~10/22) 	第18次モニタリング (09/07~09/29) 	第16回5 km 圏内 無人ヘリモニタリング* (05/10~10/02) 	第19次モニタリング (10/15~11/19) 		
80 km 圏外		大飯・高浜BG (11/06~11/20) 			伊方BG (11/11~11/21) 	美浜・敦賀BG (07/26~07/31) 	川内BG(後期) (11/12~11/15) 	川内BG(前期) (07/25~07/28) 	鳥根BG(前期) (06/13~06/17) 	鳥根BG(後期) (08/23~09/05) 		東日本第15次モニタリング (07/10~07/31)及びび(09/11~10/14) 

*: 「放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業」にて実施された。各年度における同事業の表記に準じた名称としている。

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績
(3/3)

Table 2-2 航空機モニタリングに関わる技術開発の経緯

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 ¹⁰⁾	航空機モニタリングで取得したデータを地表面から1 mの高さの空間線量率に換算するためのパラメータの最適化等、基本的な航空機モニタリングの解析手法を構築した。
2012 (H24)	航空機モニタリング解析システムの開発 ¹¹⁾	2011年度に開発した手法をルーチ的に利用できるシステムを構築した。
2013 (H25)	DEMデータ抽出ツールの開発 ¹⁸⁾	航空機モニタリングにおける測定範囲の標高データを抽出できるツールを開発した。これにより、測定範囲内における地形勾配が評価可能となった。
	地形の影響調査 ¹⁹⁾	谷や山地形等の特徴的な地形の上空で航空機モニタリングデータを取得し、DEMデータ抽出ツールを用いて航空機モニタリングデータに与える影響に関する知見を取得した。
2014 (H26)	I-131の地表面における沈着量の評価手法の開発 ^{34), 35)}	東電福島原子力発電所事故直後に取得した航空機モニタリングデータのγ線スペクトルをコベル法により再解析し、I-131のピーク面積からモンテカルロ計算コードにより地表面の沈着量に換算する手法を開発した。
2014 (H26)	人工放射性核種と天然放射性核種の弁別評価手法の開発 ⁴⁰⁾	スペクトルデータに閾値フィッティング法を適用することにより、Cs-134起源のγ線 (1.365 keV) とK-40起源のγ線 (1.461 keV) を弁別する手法を開発した。これにより、人工放射性核種および天然放射性核種の空間線量率を弁別して評価することが可能となった。
2015 (H27)	空気中ラドン子孫核種に起因するγ線を計測するための検出器の導入 ⁴¹⁾	LaBr ₃ (Ce)検出器を導入してデータを取得し、航空機モニタリングデータから空気中ラドン子孫核種に起因するγ線計数率をより適切に減算するための基礎的な手法を構築した。
2016 (H28)	積雪の影響評価手法の開発 ²¹⁾	放射線計測とともにレーザー測量及び写真測量データを積雪の前で取得し、積雪による放射線の減衰係数を評価した。
2016 (H28)	空気中ラドン子孫核種に起因するγ線を減算するシステムの組み込み ⁴²⁾	空気中ラドン子孫核種に起因するγ線計数率の減算システムを構築し、航空機モニタリングの解析システムに組み込むとともに、東電福島原子力発電所から80 km圏外の航空機モニタリングデータに適用した。
2017 (H29)	GNSSの精度評価 ²²⁾	測位精度の向上がなされた、当時最新のGNSSを用いて航空機モニタリングを行い、既存のGNSSの性能と比較評価するとともに、測位精度が航空機モニタリングによる空間線量率の計算値に与える影響について評価した。
2017 (H29)	地形の起伏を考慮した補正手法のシステム化 ²³⁾	Ishizaki et al. (2017) ³⁷⁾ が開発した、地形の起伏を考慮して空間線量率の換算値を補正する手法を航空機モニタリングに適用できるようにシステム化した。
2018 (H30)	地形の起伏を考慮した補正手法による空間線量率計算精度の向上評価 ²⁴⁾	地形の起伏を考慮した補正手法を過去の航空機モニタリング結果に適用し、地上測定値を指標として従来手法と比較することにより、空間線量率の計算精度の向上について定量的な評価を実施した。
2019 (R1)	地形の起伏を考慮した補正手法の航空機モニタリング解析システムへの組み込み ²⁵⁾	地形の起伏を考慮した補正手法を航空機モニタリング解析システムに組み込むとともに、東電福島原子力発電所から80 km圏内のデータに適用した。
2022 (R4)	航空機モニタリング解析システムの更新 ²⁶⁾	ArcGIS Desktop及びPython2系で動作していた航空機モニタリング解析システムをArcGIS Pro及びPython3系で動作するように更新した。
2023 (R5)	有人ヘリコプターと無人ヘリコプターの測定データを統合し、マップビニングする手法の構築 ³⁰⁾	有人ヘリコプターと無人ヘリコプターを併用して東電福島原子力発電所から80 km圏内の航空機モニタリングを実施するようになったことに伴い、両者のデータを統合した上で空間線量率マップビニングを行う手法を構築した。

3. 測定システムとヘリコプター

3.1. 測定システム

3.1.1. 有人ヘリコプター

有人ヘリモニタリングには、大型の NaI(Tl)検出器を用いたスペクトル測定型の放射線検出器の情報と GPS (Global Positioning System, 全地球測位網) による位置情報をリンクしてデータを保存するシステムが用いられている。

2024年度(令和6年度)のモニタリングで使用した Radiation Solutions Inc. (RSI, Canada) 製のシステム(以下、RSIシステム)は、東電福島原子力発電所事故当時に DOE により行われた航空機モニタリングで用いられたシステムと同一であり、ヘリコプター機内に搭載するタイプである。RSIシステムのブロック図を Fig. 3-1 に示し、外観を Fig. 3-2 に示す。検出部には、2"×4"×16"の NaI(Tl)検出器3本を組み込んだ検出器のユニット(RSX-3)を2台使用している(検出部容量合計: 12.6 L)。なお、NaI(Tl)検出器の上部に設置してある LaBr₃(Ce) 検出器(RSX-1)は空気中のラドン子孫核種に起因する γ 線計数率の弁別(8章に詳述する)に使用する。検出器で計測した 1,024 ch (0 ch~1,023 ch) の γ 線のスペクトルは1秒ごとに同期する GPS による位置及び高度情報とともに、RS-701 と呼ばれる NaI(Tl)検出器上部に取り付けてあるデータ収集装置に保存される。検出器2台のデータは RS-501 という装置で統合される。RS-501 は PC と接続でき、PC にインストールされている専用のソフトウェア(RadAssist) を使用することによって GPS による位置及び高度情報や γ 線の計数率情報をリアルタイムに確認できる。また、RSI システム全体は外付けのバッテリーで駆動し、完全充電で約5時間の稼働が可能である。

また、RSIシステムの GPS 受信機とは独立して高精度 GPS システムも機内に搭載している。当該システムでは高精度 GPS 受信機(CORE 社製 QZNEO) が用いられており、RSI システムの GPS 受信機と比較して利用可能な信号が多い。具体的には、準天頂衛星システム(通称: みちびき)からの情報を利用できるほか、L1-SAIF と呼ばれる補強信号を受信することにより、精度の高い位置情報の測定を行うことができる。測定された γ 線計数率とその位置情報との紐付けは基本的に RSI システムの GPS で取得された緯度及び経度を基に行うが、RSI システムの GPS が異常値を示す例が確認されている²³⁾。そのような事象が起きた際には、位置情報を高精度 GPS で取得された緯度、経度及び高度に置換する。

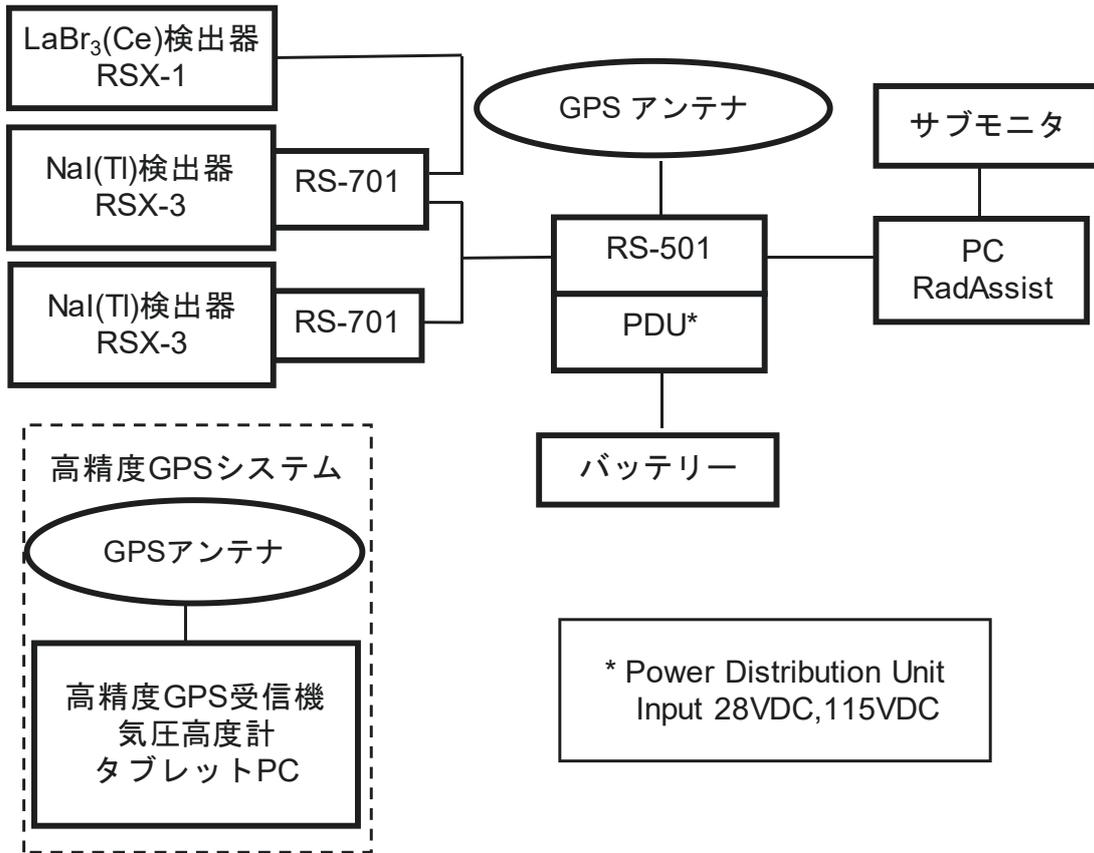


Fig. 3-1 RSI システムのブロック図

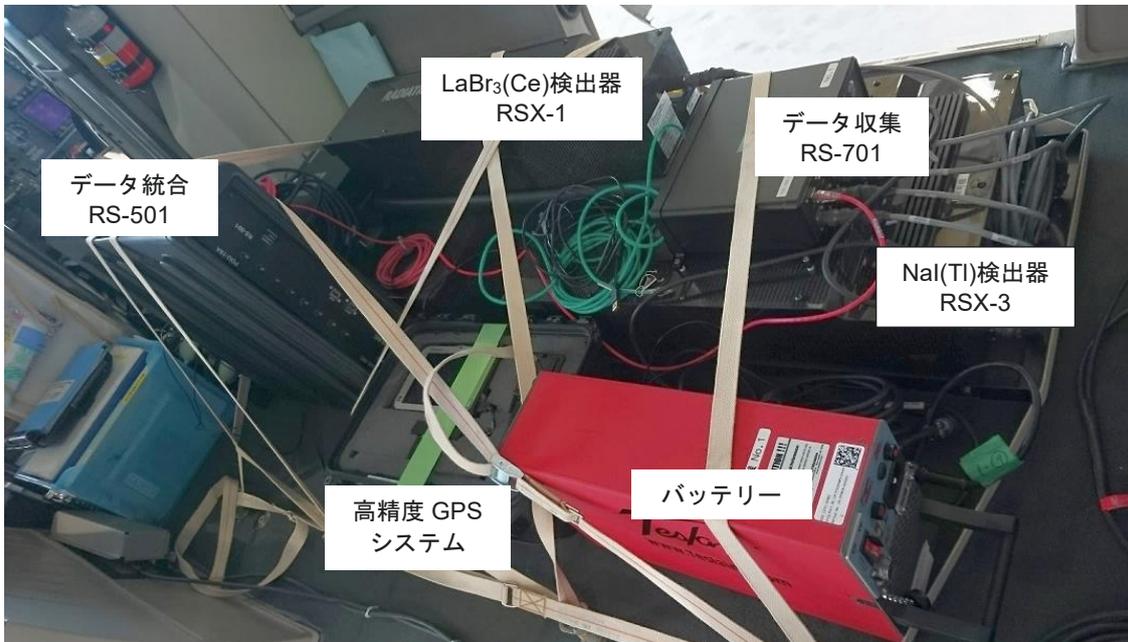


Fig. 3-2 RSI システムの外観

3.1.2.無人ヘリコプター

無人ヘリモニタリングシステムの検出器の構成及び本システムのブロック図をそれぞれ Fig. 3-3 及び Fig. 3-4 に示す。本システムは、 γ 線測定を行う放射線検出器、データの処理を行うデータ処理装置、フライト中の測定情報を確認できる地上基地局で構成される。放射線検出器には $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器 (結晶サイズ: $2.0''\phi \times 2.0''\text{H}$) を 3 本 (検出部容量合計: 0.31 L) 使用している。放射線検出器は 1 秒ごとに各結晶の γ 線スペクトル(1,000 ch) を取得可能であり、測定データは GPS 測位で得られた時間情報及び位置情報と紐づけられ保存される。データ処理装置は、放射線検出器で得られたデータ、無人ヘリ機体から得られた GPS 情報、また気圧温湿度計の情報等を GPS 時刻と紐づけて保存し、LTE (Long Term Evolution) 通信を用いて Web サーバ及び地上基地局にデータを伝送する。地上基地局では、測定で得られた各種情報をリアルタイムで確認することができ、記録の開始/停止、電源の ON/OFF 等の操作を遠隔で行うことができる。本システムは無人ヘリのバッテリーからの給電で駆動する。位置情報は、無人ヘリ機体、放射線検出器、データ処理装置、各種装置で取得可能だが、測定データの解析には最も測位精度が高い、無人ヘリ機体で得られた GPS 位置情報 (NovAtel, Receiver:OEM719, Antenna: ANT-26C1GA-TBW-N) を採用した。

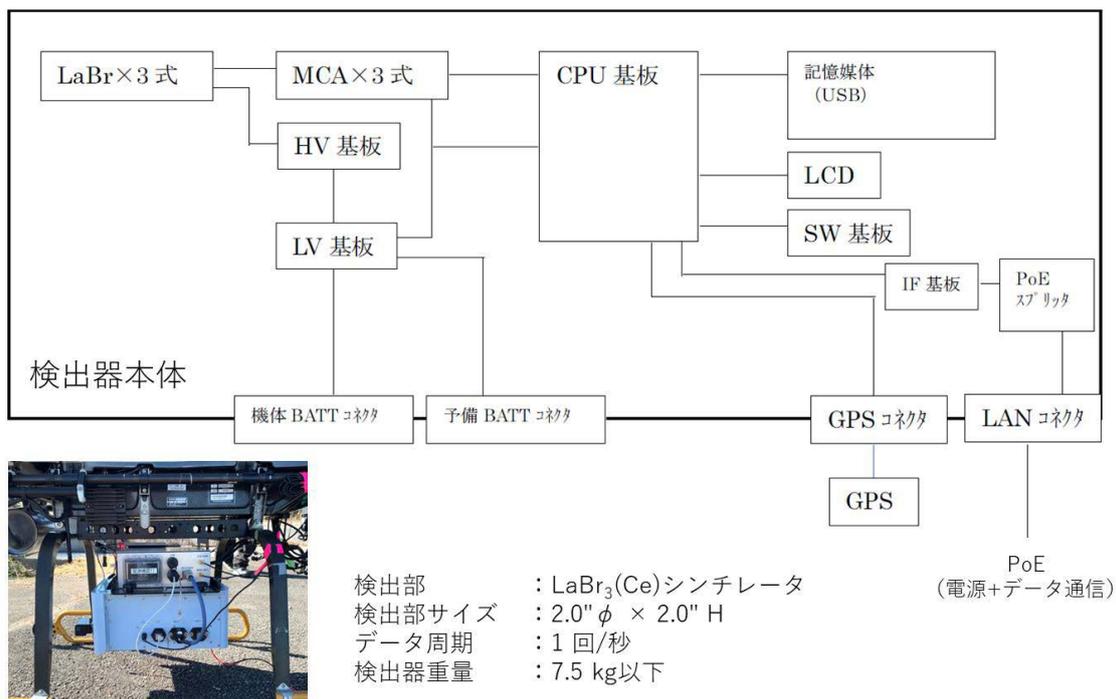


Fig. 3-3 無人ヘリモニタリングシステムの検出器の構成

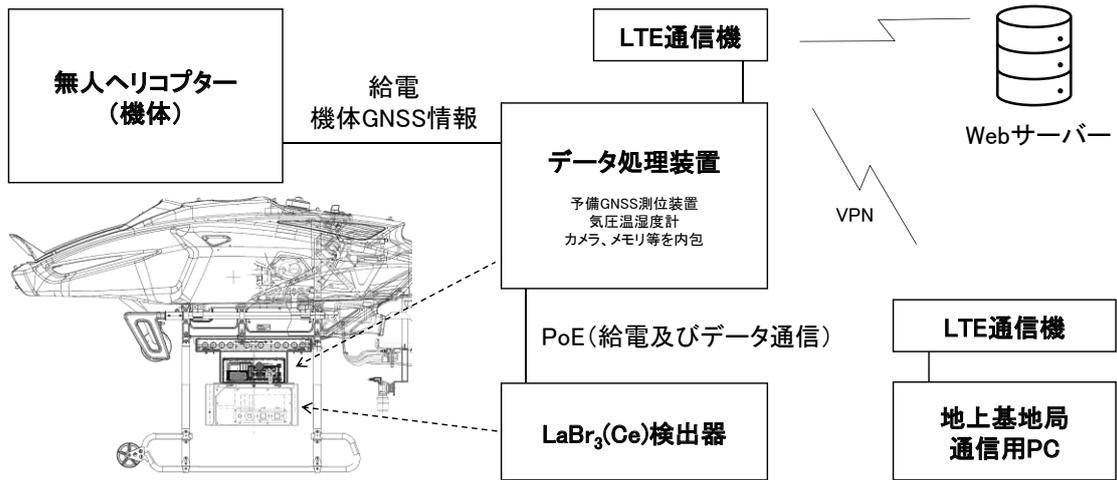


Fig. 3-4 無人ヘリモニタリングシステムのブロック図

3.2. ヘリコプターの選定

3.2.1. 有人ヘリコプター

RSI システムは有人ヘリコプター機内に搭載するタイプであるため、ヘリコプターの機底に燃料タンクがある場合、燃料タンクの材料及び燃料による γ 線の遮へい効果を考慮する必要がある。そこで、 γ 線の測定値の誤差を低減するため、ヘリコプターは機底に燃料タンクのないものに限定した。航空機モニタリングに使用できる機底に燃料タンクのない機種例を Fig. 3-5 に示す。2024 年度 (令和 6 年度) は機体繰りの都合から、Bell412 (JA6928)、Bell430 (JA05TV) 及び S-76 (JA6901) を使用した (括弧内は各機種の機体番号)。



Bell430
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



Bell412
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



AS332
アエロスパシアル社製



S-76
シコルスキー・エアクラフト社製

Fig. 3-5 機底に燃料タンクのないヘリコプター機種一覧

3.2.2.無人ヘリコプター

浜通り第2次無人ヘリモニタリングでは、3.1.2項に示した無人ヘリモニタリングシステムを搭載したヤマハ発動機(株)自動航行型無人ヘリ FAZER R G2 を使用した (Fig. 3-6)。フライト中の機体操作は、衛星通信 (AVIATOR, UAV 200) を用いて行った。これまで原子力機構では、同機体を用いて、除染前後のモニタリング³¹⁾、東電福島原子力発電所周辺のモニタリング³²⁾及び河川敷のモニタリング³³⁾等、国内における放射線測定の実績が多数ある。いずれにおいても墜落事故等は発生しておらず、信頼性の高い機体である。

第16回5km圏内無人ヘリモニタリングについても、同一のシステム及び機体を使用した¹⁶⁾。ただし、第16回5km圏内無人ヘリモニタリングは、地上波通信で機体操作を行っており、搭載しているGPS機器が異なる (NovAtel 2G15A-XTB-1, Differential GPS)。



Fig. 3-6 無人ヘリモニタリングシステムを搭載した FAZER R G2 及び基地局における操作の様子

3.3. 有人ヘリコプター機体による γ 線遮へい効果

有人ヘリは機底に燃料タンクのない機種を選定しているが、機種による機底の材質や構造の差異により、 γ 線の遮へいの程度は異なると考えられる。本節では、 γ 線遮へい効果を把握するために点線源 (Cs-137：約 9.1 MBq) を用いて RSI システム検出器で測定した計数率を比較した。地上における空間線量率等への換算パラメータを設定する際に、有人ヘリ機種ごとにキャリブレーション (校正) を実施するため、この遮へい効果の違いを単独でパラメータとして扱う必要はないが、使用する有人ヘリが γ 線計数率にどのような影響を及ぼし、それが有人ヘリ機種ごとに設定する換算パラメータにどのような差異を生むのかを把握するのに参考となる情報である。

γ 線遮へい効果の評価では、点線源と検出器の距離を 50 cm に固定し、計数率の測定時間平均値及び計数誤差 (計数の平方根) を機種ごとに測定し比較した。ただし、Bell430 (JA05TV) については機体の構造と Cs-137 線源の高さ位置を固定するのに用いた治具の関係上、点線源と RSI システム検出器の距離を 50 cm まで近づけることができなかったため、点線源と検出器の距離を 90 cm としたときの計数率を比較に用いた。RSI システム検出器と線源の位置関係について Fig. 3-7 に示す。

有人ヘリ機体の機種による遮へい効果の比較結果を Table 3-1 に示す。以下に比較結果の詳細を記す。Bell412 (JA6928) における計数率 (No.1 と表記) を基準として、S-76 (JA6901) における計数率 (No.2 と表記) 及び Bell430 (JA05TV) における計数率 (No.3 と表記) をそれぞれ比較した。No.1 に対して、No.2 の計数率は約 43% 高く、No.3 の計数率は約 5% 低かった。No.3 は Cs-137 線源と RSI システム検出器の距離が 50 cm でなく 90 cm であるため、計数率がやや低くなったと考えられる。これらの計数率差に対して計数誤差は圧倒的に小さいことから、それぞれで見られた差異には、各ヘリコプターの機体底部の構造の違いに起因する γ 線遮へい効果の差異が強く関与していると考えられる。また、過去の線源試験の実施結果²⁸⁾から、同じヘリコプター機種及び RSI システム検出器を用いた場合でも計数率にある程度の差異が見られたことから、ヘリコプター機内における RSI システム検出器の配置状況も γ 線計数率の多少に影響を及ぼすと考えられる。

RSI システムの配置については、これまでの線源試験で得られた知見を基に各機体間の計数誤差が少なくなるよう最適化が進められてきている。この最適化により、機体間での測定誤差の低減が可能となる。今後も引き続き線源試験を重ねることで、RSI システムの配置をさらに改良し、機体間の γ 線計数率のばらつきを抑えることが期待できる。

**Table 3-1 Cs-137 線源によるヘリコプター機体の遮へい効果の比較
(検出器から 50 cm または 90 cm 下方に線源を配置)**

No.	Date	System	ヘリコプター (機体番号) (運航会社)	Cs-137線源と検出器 の距離(cm)	計数率(s ⁻¹)±計数誤差(s ⁻¹)	No.1を1に規格化
1	2024/07/17	RSI 1	Bell412 (JA6928) (AAC)	50	(3.430±0.006) × 10 ⁵	1.00
2	2024/09/10	RSI 1	S-76 (JA6901) (AAC)	50	(4.917±0.007) × 10 ⁵	1.43
3	2024/09/23	RSI 1	Bell430 (JA05TV) (NNK)	90	(3.254±0.006) × 10 ⁵	0.95

AAC: 朝日航洋株式会社、NNK: 中日本航空株式会社
 ※計数率は小数点以下5桁目で四捨五入し、小数点以下4桁で表記した。
 ※計数率は自然放射性核種による寄与を差し引いたものである。

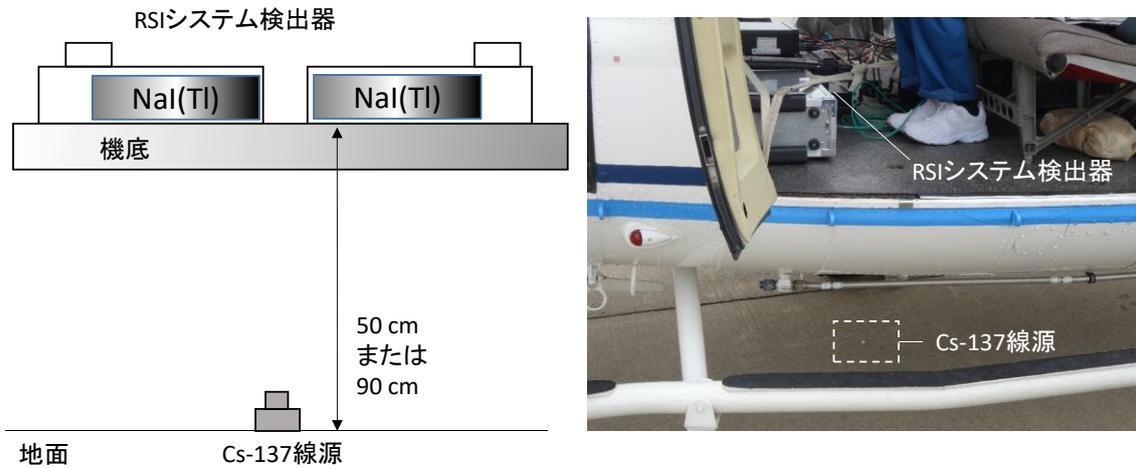


Fig. 3-7 線源試験での位置関係イメージ

3.4. 測定システムの保守

3.4.1.RSIシステムの保守

有人ヘリモニタリングシステムで用いている RSI システムの健全性をチェックするため、RSI システムに組み込まれているプログラムにより、フライト前に 1 日 1 回、以下の事項を確認した。

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

2,614 keV のピークに対するエネルギー分解能については、メーカーから 6%以下という保守の推奨値が示されている。日常の点検で数値を確認し、この推奨値を超えた場合には高圧電源の電圧を変更するなど再調整を実施する。また、アンプのゲインについては、同様にメーカーから示されている推奨値である 0.8 を下回る場合に高圧電源の電圧の再調整を行う。

第 19 次モニタリング及び東日本第 15 次モニタリングの実施期間における RSI システム検出器のエネルギー分解能とアンプのゲインの推移について Fig. 3-8 に示す。なお、Fig. 3-8 の 8 月初旬から 9 月初旬の間に見られる空白は、別事業で実施した島根バックグラウンド航空機モニタリングへの対応のため、当該期間中は東電福島原子力発電所周辺のモニタリングを中断したために生じたものである。本図は、RSI システムに組み込まれている計 6 本の検出器ごとに示している。エネルギー分解能はモニタリング期間を通じて 6%未満であり、アンプのゲインが 0.8 を下回ることがなかったため、再調整を実施する必要性は生じなかった。なお、ゲインは測定日を経るにつれて緩やかな上昇傾向にあるが、これは機器の異常ではなく、測定日が夏期から秋期に移り変わり周囲の気温が低下するにつれて RSI システム自体の温度上昇が鈍くなることで、光電子増倍管に使用される電子素子のインピーダンスが減少しゲインが上昇する温度特性によるものと考えられる。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。これは、上記の自動ゲイン補正機能により、ゲインの季節変動が適切に補正され、ピーク位置が一定に保たれているためである。

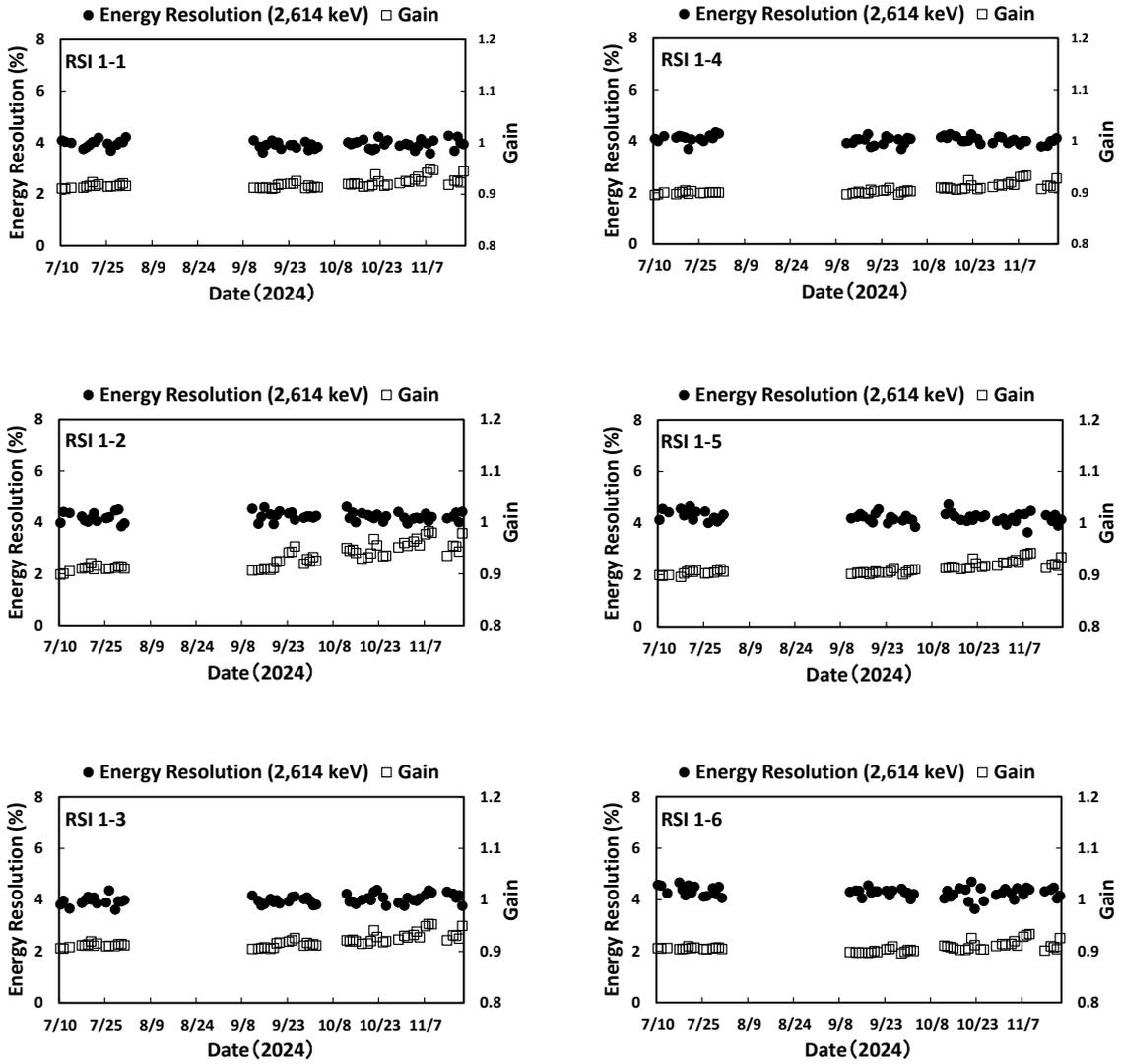


Fig. 3-8 RSI システムのエネルギー分解能及びゲインの変動

3.4.2.無人ヘリモニタリングシステムの保守

無人ヘリモニタリングシステムの健全性をチェックするため、浜通り第2次無人ヘリモニタリングの期間中、1日1回、以下の点検や動作確認等を行った。

- ・外観点検：目視により検出器に傷、凹み及び汚れがないこと、触診によりネジに緩みがないこと、ケーブル及びコネクタの接続状態に異常がないことを確認した。
- ・基本動作確認：測定データがメモリに正常な状態で保存されること、GPS 測位情報に明らかな異常がないこと、データがダウンリンクされ、基地局のディスプレイに表示されることを確認した。
- ・検出器の特性確認：Cs-137 光電ピークエネルギー (662 keV) の位置に変動がないことを確認した (解析システムにより取得したスペクトルを確認)。
また、定期保守の一環で1年に1回以下の事項を確認した。
- ・検出器の特性確認：試験用標準線源 (Cs-137) を基に、正味の計数率とエネルギー分解能を2023年度 (令和5年度) の結果と比較評価し、顕著な変化がないことを確認した。

4. データ取得及び解析方法

本報告書における「空間線量率」は、周辺線量当量率を評価指標とした値を指すものとする。以下では便宜上、周辺線量当量率を「空間線量率」と記載する。

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 線の遮へい計算に広く用いられている点減衰核積分コード QAD-CGGP2R を用いてシミュレーションが行われた¹⁸⁾。以下に当該シミュレーションの概要とシミュレーションから得られた知見を概説する。

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

このように、上空から地上を測定する際には、対地高度が高くなると地上の測定範囲が広がる。上空における地上からの γ 線の到達状況を定量的に理解するために、計算コードを用いてシミュレーションを実施した例¹⁸⁾を示す。光子・電子挙動シミュレーションには、カスケードモンテカルロ計算コード EGS5³⁸⁾ (Electron Gamma Shower Version 5) が使用され、RSI システムの検出器がモデル化¹⁸⁾されるとともに、地上に無限平板状の半径 800 m × 高さ 1 mm の Cs-137 円盤線源が模擬された。当該シミュレーションでは、モデル化した検出器を線源円盤の中心軸上に配置し、線源円盤と検出器の距離を変化 (50 m、100 m、300 m 及び 500 m) させ、検出器に入射する γ 線の計数率及び同ジオメトリにおいて検出器に到達する γ 線の起源となる線源の位置が計算された。無限平板線源における任意の半径内の放射線が検出器で計数された割合を Fig. 4-2 に示す。本図から、有人ヘリモニタリングの基準高度である 300 m から計測した場合、線源の概ね半径 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た割合を Fig. 4-3 に示す。線源からの距離は 100 m、300 m、500 m の場合で比較され、高度 300 m の場合を見ると、100 m~200 m の位置が 30% で最も割合が大きく、0 m~100 m 及び 200 m~300 m は 20% 程度であった。この割合の違いは計数効率を考慮すると小さくなく、対地高度 300 m から測定されるのは、地上の半径 300 m 円内における γ 線計数率の平均値と考えられる。一方、検出器と線源の距離が 50 m の場合は 80% を占める線源半径は 120 m、同距離が 100 m の場合は線源半径が 200 m、同距離が 500 m の場合は線源半径が 400 m であり、この傾向は Fig. 4-1 で示された対地高度と上空での空間線量率の関係と矛盾せず、高度が低くなるにつれて高度と測定範囲の半径の関係が 1 : 1 から逸脱し、対地高度と比較して測定範囲が広くなること示された。無人ヘリモニタリングでも同様に、基準高度である 80 m から計測した場合、線源の概ね半径 80 m の円内の放射線の計数が大部分を占めることが分かっている³¹⁾。

以上の計算結果から、例えば、航空機モニタリングは飛行する対地高度と同じ半径の円内の放射線を飛行方向に向かって移動しながら測定していると説明できる (Fig. 4-4)。飛行する対地高度が変化すると地上の測定範囲が変化することになり、測定値の不確かさをなるべく低減するためには対地高度は一定でフライトすることが理想的である。実際には、以上のような理論や測定の不確かさを考慮し、有人ヘリモニタリングについては、対地高度 300 m を基準として対地高度が 500 m までのデータを使用した。なお、この対地高度から逸脱した状態で測線フライトが 1 km 以上に及んだ場合には、再フライトによりデータを再取得することとした。無人ヘリモニタリングについては、対地高度 80 m を基準として対地高度が 150 m までのデータを使用した。

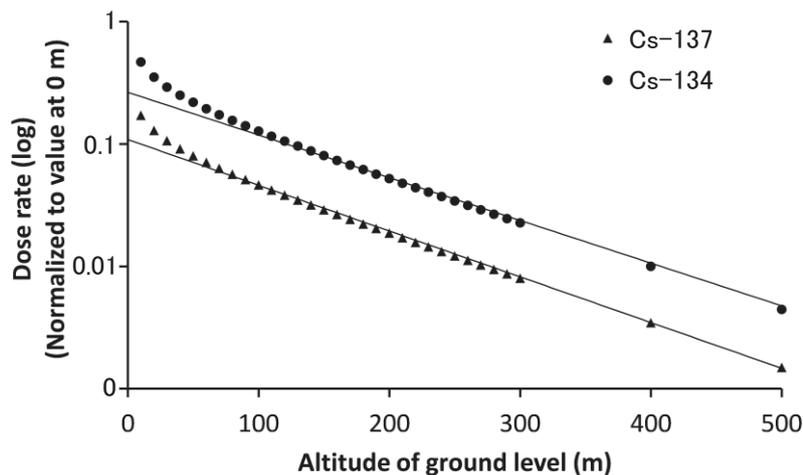


Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係¹⁸⁾

(半径 2,000 m × 高さ 1 mm の円柱線源で計算¹⁸⁾。図中の実線は指数関数による近似曲線である。)

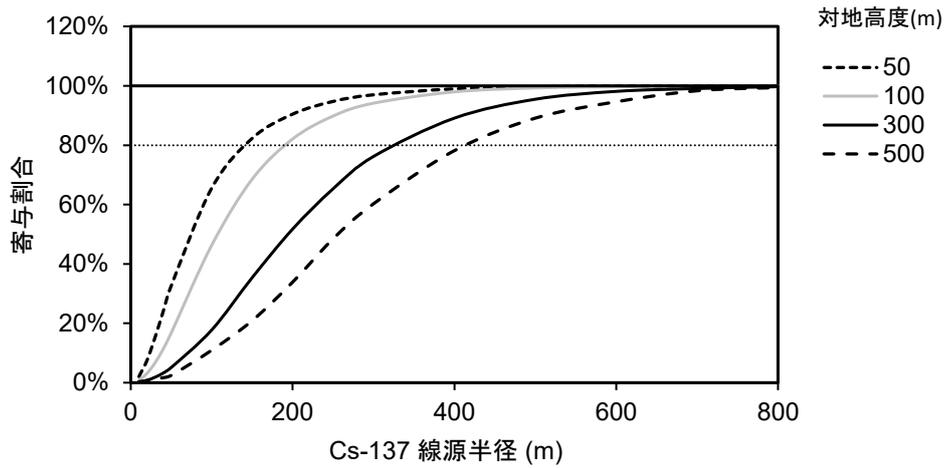


Fig. 4-2 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の積算計数に対する線源位置の関係¹⁸⁾

(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)

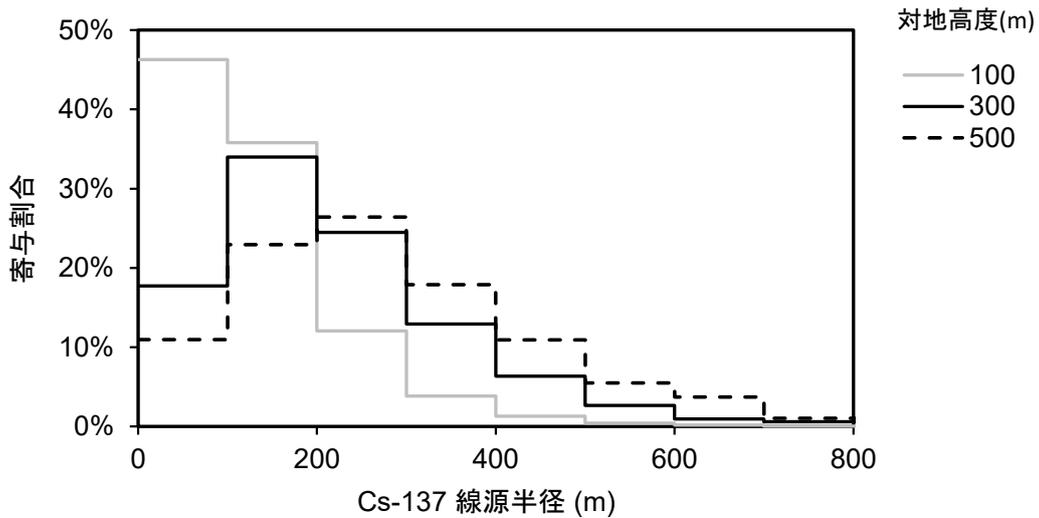


Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の線源位置ごとの計数の割合¹⁸⁾
(上空での検出器の計数率を100%に規格化し、100 m ごとのドーナツ状部分由来の計数率の割合)

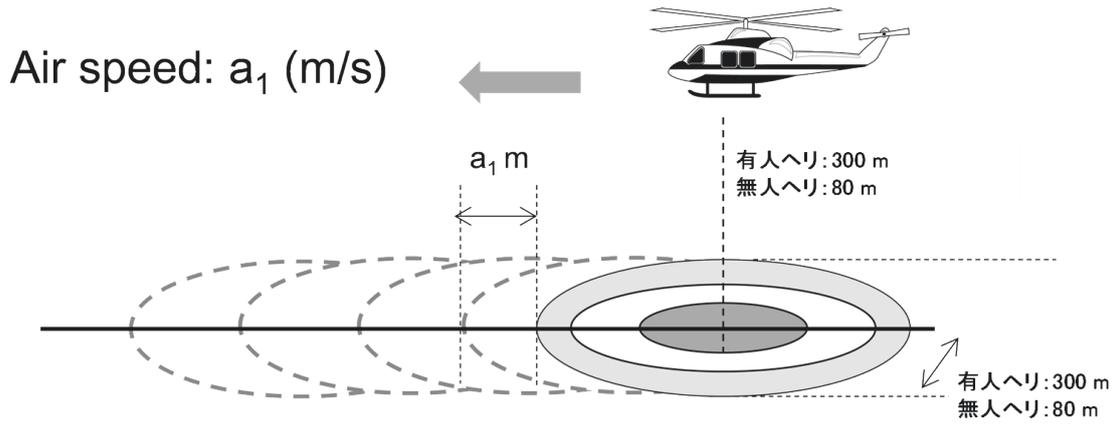


Fig. 4-4 航空機モニタリングによる上空からの測定イメージ

4.2. 有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングの方法

航空機モニタリングでは、測定対象となるエリアにおいて予め設定した飛行経路（以下、測線）の上空をフライトし、 γ 線計数率と位置情報のデータを取得する。フライトイメージを Fig. 4-5 に示す。以下に有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングによるデータ取得方法の詳細について記述する。

有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングによるデータは、下記のようなフライト条件で取得した。なお、条件は、気象条件や地形の高度勾配によって若干変化する。

[フライト条件]

➤ 有人ヘリモニタリング

- 速度：160 km/h を基準とし、130 km/h～180 km/h の範囲
- 基準対地高度：300 m (= 1,000 ft)
- 対地高度の許容範囲：0 m～約 500 m (= 1,750 ft)
- 測線間隔
 - 第 19 次モニタリング (東電福島原子力発電所から半径 5 km 以内及び海上を除く)
 - 0.9 km：2018 年 (平成 30 年) 11 月 15 日時点で 0.2 μ Sv/h (約 1.0 mSv/年相当、5.2 節に詳述する。) 以上であった地域
 - 1.8 km：その他の地域
 - 東日本第 15 次モニタリング
 - 3.0 km：2018 年 (平成 30 年) 11 月 15 日時点で 0.2 μ Sv/h 以上であった地域
 - 6.0 km：その他の地域

➤ 無人ヘリモニタリング

- 速度：8 m/s (= 28.8 km/h) を基準とし、25 km/h～40 km/h の範囲
- 基準対地高度：80 m (= 260 ft)
- 対地高度の許容範囲：0 m～約 150 m (= 490 ft)
- 測線間隔
 - 浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング
 - 0.6 km：全域
 - 第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリング¹⁶⁾
 - 0.08 km：全域

Fig. 4-6 には、有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングの測線配置を 80 km 圏内外の全体図として示す。Fig. 4-7 には、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリ

リモネタリング領域の拡大図を示す。本図は無人ヘリの測線形状を詳細に確認できるようにしたものであるが、比較の観点から、同領域における有人ヘリの測線も併せて表示している。測線の方向は有人ヘリ第 19 次モニタリングについては東西方向、東日本第 15 次モニタリングについては南北方向、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングについては測定エリアを網羅するようなくし形とした。

測定データは1秒ごとに、有人ヘリモニタリングではGPSの位置情報とNaI(Tl)検出器の γ 線のスペクトル、無人ヘリモニタリングではGPSの位置情報とLaBr₃(Ce)検出器の γ 線のスペクトルをそれぞれ記録し、上記の対地高度の許容範囲から逸脱した測定データは不確かさが比較的大きく含まれるため、空間線量率等の算出には用いないこととした。

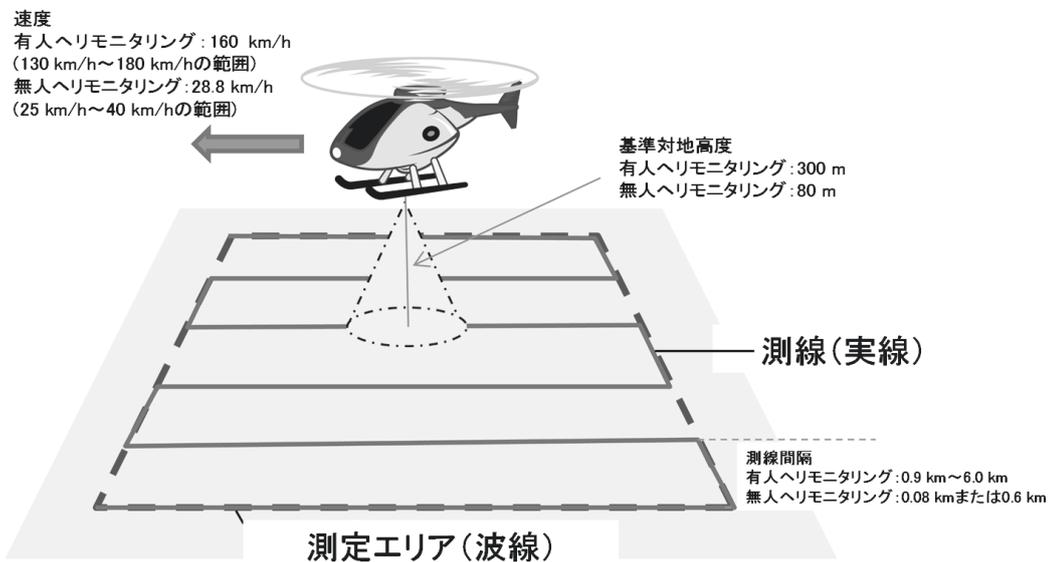


Fig. 4-5 航空機モニタリングのフライトイメージ

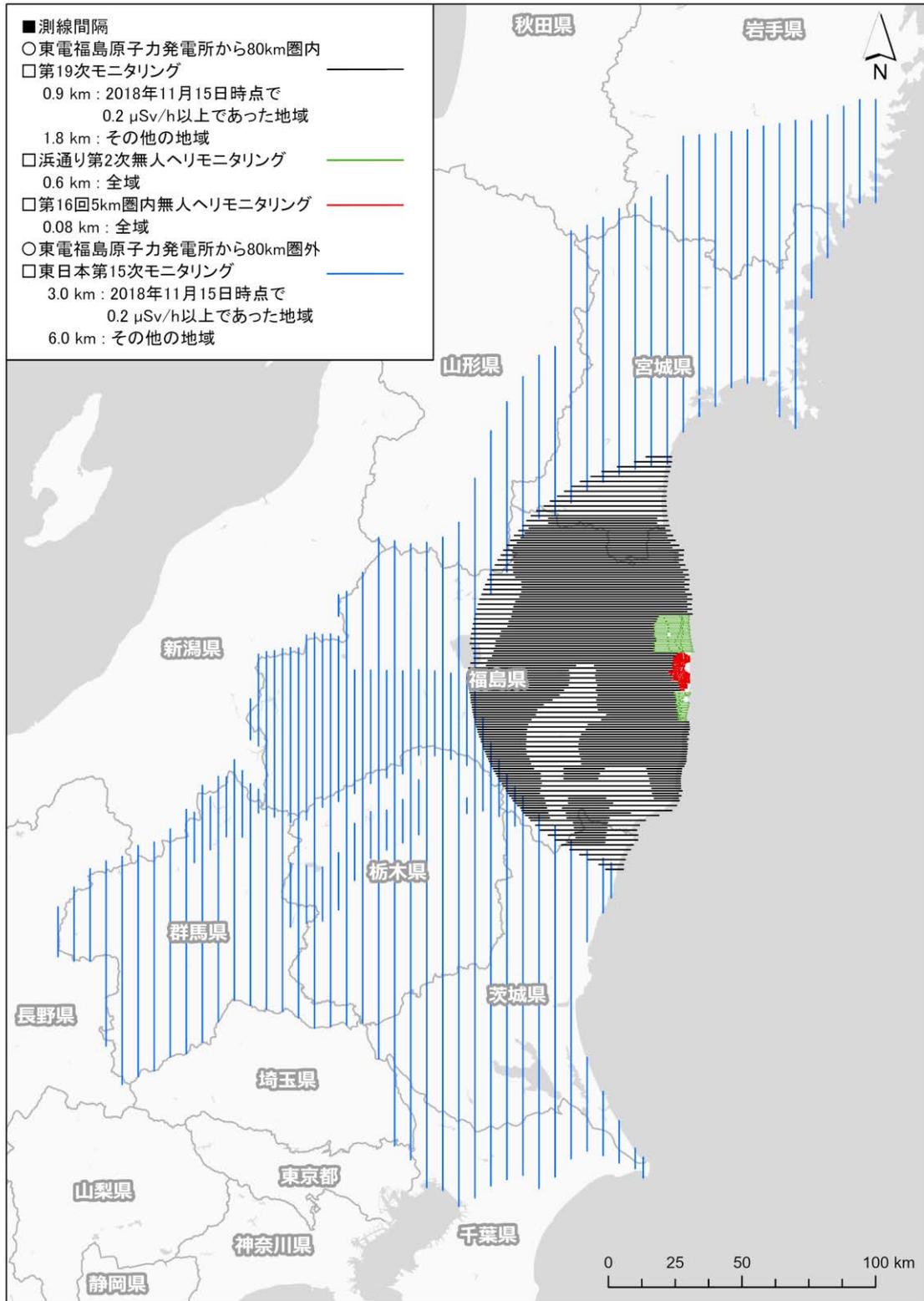


Fig. 4-6 80 km 圏内外における航空機モニタリング測線配置の全体図
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

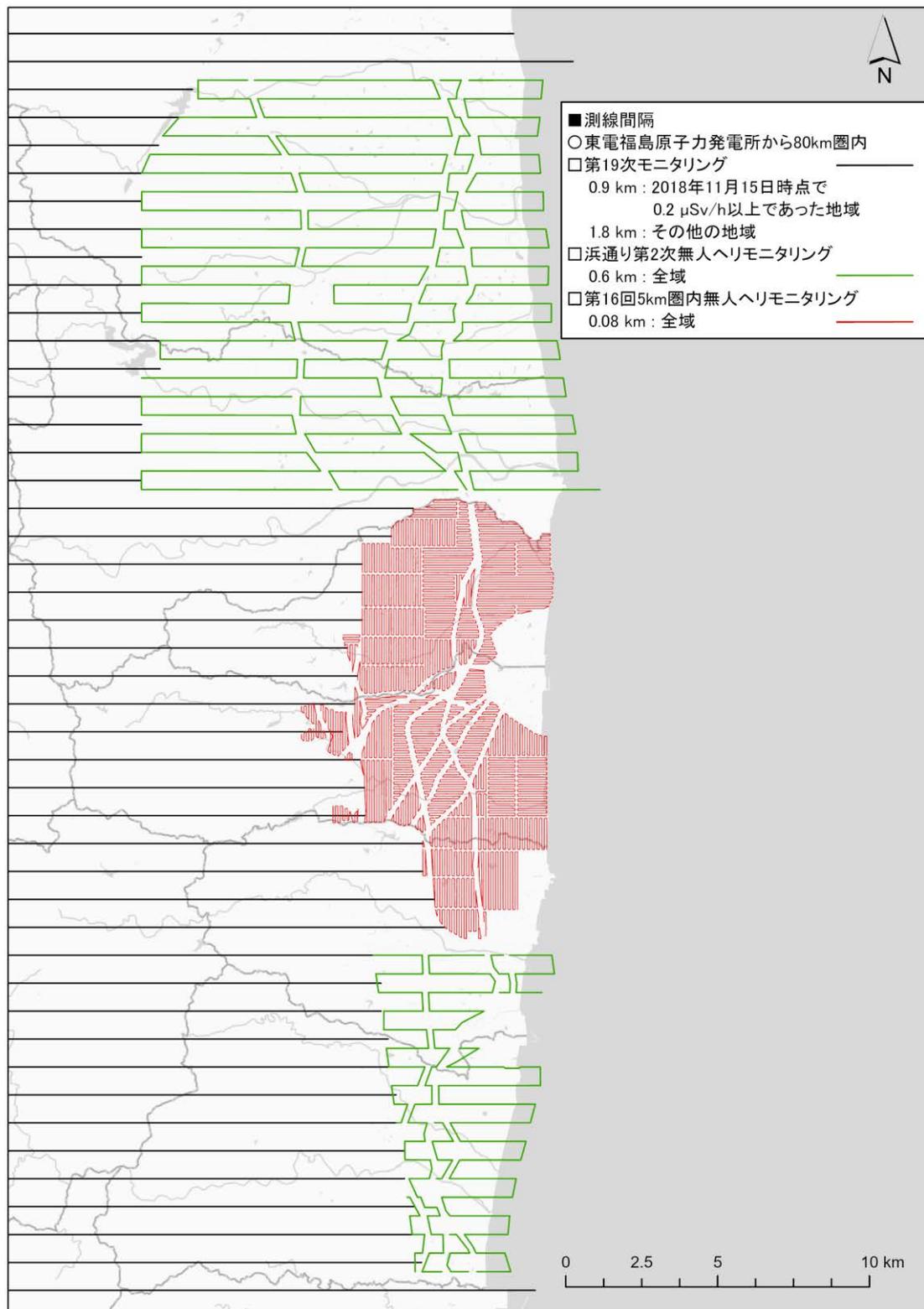


Fig. 4-7 無人ヘリモニタリング領域の拡大図

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

4.3.1. 有人ヘリコプター

有人ヘリモニタリングにより上空で取得した γ 線計数率を、地表面から1 mの高さの空間線量率や地表面の放射性Csの沈着量に換算するためのパラメータは、ヘリコプター機種または機体ごとに数値を設定している。Bell412、Bell430及びS-76については2014年度(平成26年度)までに取得したキャリブレーションフライトのデータを基に設定されている。2024年度(令和6年度)はこれらの有人ヘリ機種に設定しているパラメータの妥当性を確認するためにキャリブレーションフライトを行った。キャリブレーションフライトの種類と目的について以下に示す。また、Table 4-1に各キャリブレーションフライトの概略をまとめた。

・ 宇宙線フライト

全計数率から宇宙線の影響を差し引くための宇宙線寄与係数(*CR-Index*)を求めるため、地上からの γ 線の影響が極めて少ないと考えられる海上を約300 m~2,400 mまで上昇し、宇宙線に起因する γ 線計数率データを取得するものである。宇宙線フライトのイメージをFig. 4-8に示す。フライト場所は、陸地から十分に離れた海上であれば場所は問わないため、天候等を見ながら太平洋上の適当な位置で実施する。ただし、天候等の問題で海上への移動が困難な状況下では、起伏の少ない陸地において当該フライトを実施する。なお、陸地で実施した場合でも対地高度約300 mから2,400 mまで上昇するが、地上からの放射線の影響がほとんどないと考えられる対地高度約900 m以上で取得された γ 線計数率データを原則として用いることになる。

・ Rn 影響フライト及びBGフライト

Rn 影響フライトは空気中に存在するラドン子孫核種の影響を評価するために、ある特定の場所(例えば、測定拠点近くの測線上)の上空において対地高度約450 m~900 mまでを直線的に上昇しデータを取得するものである。また、BGフライト(バックグラウンドフライト)は、地上からの γ 線の影響がほとんどないと考えられる、対地高度約900 mを約2分間直線飛行することにより、ヘリコプター機体のバックグラウンド計数率を取得するものである。両フライトは原則として、セットで1日1回実施する。Rn 影響フライト及びBGフライトのイメージをFig. 4-9に示す。なお、BGフライトでは、宇宙線フライトで求めた*CR-Index*により宇宙線寄与を補正したうえで、機体に由来するバックグラウンド計数率を評価する。

- テストラインフライト

実際のフライト対地高度と基準対地高度とのずれによって生じる γ 線計数率の多少を補正するための実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor: AF (m^{-1})) を求めるフライトである。本フライトは、線量率や地形の変化が少ない地点において距離が約 3 km のラインを設定し、その上空において対地高度を変化 (150 m、300 m、450 m、600 m、750 m、900 m 及び 1,500 m) させてフライトを実施する。上記の各対地高度でフライトした際の対地高度の平均値と γ 線計数率の平均値をプロットし、それらプロットに対する指数近似曲線の傾きを AF とする。テストラインフライトのイメージを Fig. 4-10 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. 4-11 に示す。本図で示したテストラインの内、東日本第 15 次モニタリングでは、TestLine 1、TestLine 3、TestLine 4 及び TestLine 5 を使用し、第 19 次モニタリングでは TestLine A を使用した。使用したテストラインの端点の緯度及び経度については、Table 4-2 に一覧として整理した。

- テストポイントフライト

空間線量率の勾配が小さく、かつ地形の平坦な地点 (以下、テストポイント) を選定し、テストポイントから半径 1,000 m の範囲内において、対地高度 300 m を維持して 3 分間ホバリングして γ 線計数率を取得するものである。また、テストポイントの中心点から半径 1,000 m の範囲内で 60 地点を目安に NaI(Tl)検出器 (日立製作所製 TCS-172B) を用いて地表面から 1 m の高さの空間線量率の測定 (以下、地上測定) を行う。なお、地上測定は、NaI(Tl)検出器の時定数を 10 秒とし、各測定地点にて地面に対して水平方向にプローブを 30 秒間保持してから開始した。およそ 5 秒間隔でサーベイメータに表示されるデジタル値を 5 回記録し、その平均値に校正乗数を乗じた値を小数点以下 3 桁目で四捨五入して小数点以下 2 桁とし、その地点における地上測定値として取り扱った。本フライトとテストポイントにおける地上測定値を相互比較することにより、基準対地高度 (300 m) における γ 線計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するための係数 (空間線量率換算係数 ; Conversion factor of Dose-rate: CD ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$)) が求まる。Fig. 4-12 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. 4-13 に示す。本図で示したテストポイントの内、東日本第 15 次モニタリングでは、TestPoint 1、TestPoint 3、TestPoint 4 及び TestPoint 5 を使用し、第 19 次モニタリングでは TestPoint D 及び TestPoint E を使用した。使用したテストポイントの中心点の緯度及び経度については、Table 4-3 に一覧として整理した。

- オーバーラップフライト

各ヘリコプター機種または機体に設定される換算パラメータの妥当性評価を行うために、RSI システムとヘリコプター機種または機体の組み合わせの変更が生じる前後で、同一の場所をフライトして取得した γ 線計数率データを比較するものである。本フライ

トは、他のキャリブレーションとは異なり、換算パラメータの取得が目的でなく、実際に解析に用いる換算パラメータの妥当性を検証することを目的としている。オーバーラップフライトの場所を Fig. 4-14 (中央及び右) に示す。

- 天然核種フライト

東電福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs による影響のないと考えられる場所において、対地高度約 300 m をフライトし、天然放射性核種に由来する γ 線スペクトルを取得するものである。このスペクトルを基に、地表面の放射性 Cs 沈着量を算出する際に用いるスペクトルインデックスを作成する。天然放射性核種による影響の減算方法については 4.6.1 項に詳述する。本フライトは、過去に使用した実績のない機体を用いる場合にのみ、1 回実施することとしている。なお、2024 年度 (令和 6 年度) に使用した有人ヘリ機体は、いずれも過去に使用実績があるため、本フライトは実施しなかった。天然核種フライトの場所を Fig. 4-14 (左) に示す。

Table 4-1 有人ヘリに係るキャリブレーションフライトの概略

名称	目的	方法	頻度
宇宙線 フライト (4.5.1 項参照)	宇宙線の影響を 調査	海上または陸上を 300 m～2,400 m まで上昇	有人ヘリ機体ごとに 1 回以上 ただし、1 週間を超 えないうちに 1 回
Rn 影響 フライト (4.5.1 項参照)	ラドンの影響を 調査	ある特定の場所を対 地高度 450 m～900 m まで直線的に上昇	毎日
BG フライト (4.5.1 項参照)	ヘリコプター機体 のバックグラウン ド計数率を調査	対地高度 900 m を約 2 分間直線飛行(Rn 影響 フライト後に実施)	毎日
テストライン フライト (4.5.2 項参照)	空気減弱係数を 算出	所定のテストライン 上で対地高度を変化 (150 m、300 m、450 m、600 m、750 m、 900 m 及び 1,500 m) さ せてフライト	TestLine A: 2 回以上 上記以外は 1 地点に つき 1 回以上
テストポイント フライト (4.5.3 項参照)	空間線量率換算 係数を算出	テストポイント範囲 内で、対地高度 300 m で 3 分間ホバリング	TestPoint D、E: 2 回 以上 上記以外は 1 地点に つき 1 回以上
オーバーラップ フライト (4.5.3 項参照)	換算パラメータの 妥当性確認	特定の場所を フライト	有人ヘリ機種または 機体と RSI システム の組み合わせの変更 が生じる前後で 1 回 ずつ
天然核種 フライト (4.6.1 項参照)	天然放射性核種の 影響を減算し、放 射性 Cs 沈着量を算 出するためのスペ クトルインデック スを算出	東電福島原子力発電 所事故由来の放射性 Cs による影響のない と考えられる場所で フライト	過去に有人ヘリ機体 の使用実績がなけれ ば 1 回

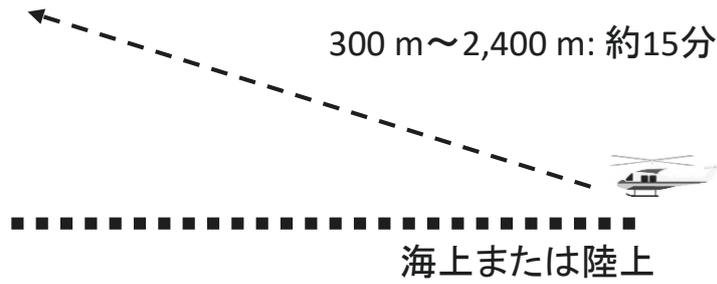


Fig. 4-8 宇宙線フライトのイメージ

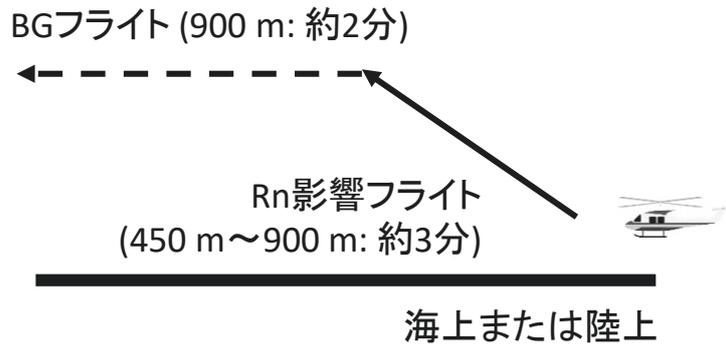
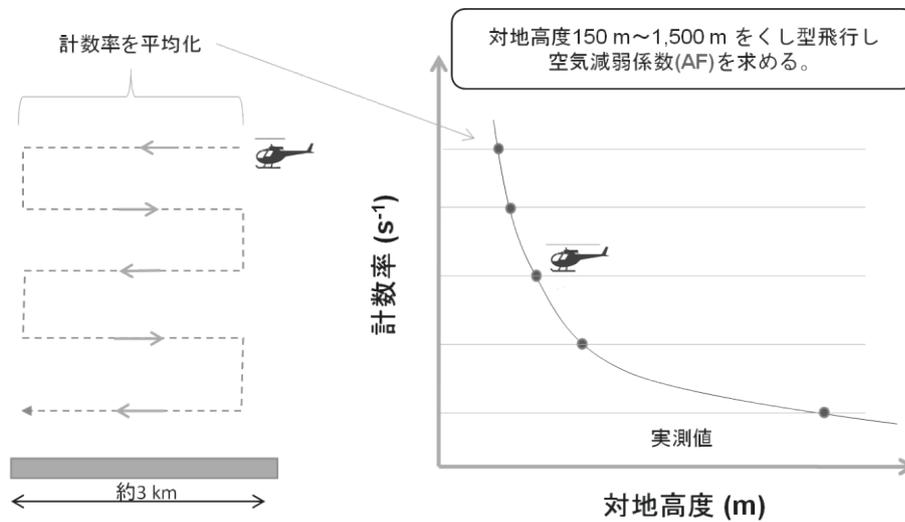


Fig. 4-9 Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージ



テストライン: 線量率、地形の変化が少ない場所

Fig. 4-10 テストラインフライトのイメージ



TestLine 1 (岩手県奥州市)



TestLine 3 (群馬県みどり市)

Fig. 4-11 テストラインフライトの場所

(1/3)

(背景地図は、Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community に端点 A 及び端点 B を追加して使用した。)



TestLine 4 (茨城県那珂市)



TestLine 5 (栃木県大田原市)

Fig. 4-11 テストラインフライトの場所

(2/3)

(背景地図は、Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community に端点 A 及び端点 B を追加して使用した。)



TestLine A (福島県須賀川市)

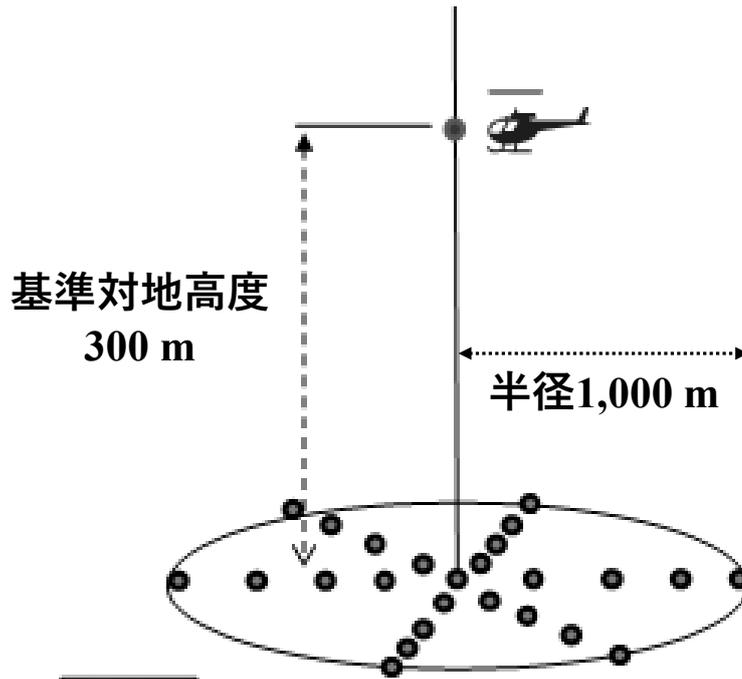
Fig. 4-11 テストラインフライトの場所

(3/3)

(背景地図は、Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community に端点 A 及び端点 B を追加して使用した。)

Table 4-2 テストラインの端点の緯度及び経度

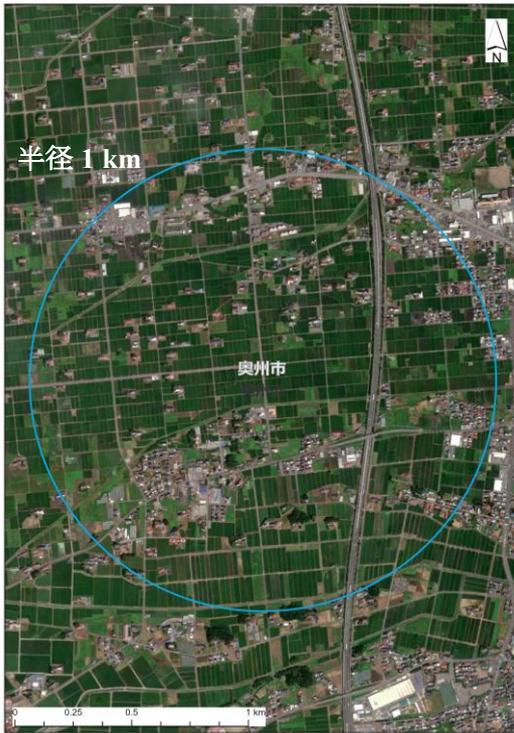
テストライン名称	端点 A (緯度)	端点 A (経度)	端点 B (緯度)	端点 B (経度)
TestLine 1	39.135950	141.098730	39.138570	141.134960
TestLine 3	36.379180	139.279270	36.351280	139.280610
TestLine 4	36.458596	140.489339	36.438524	140.465939
TestLine 5	36.920894	140.029854	36.900688	140.052233
TestLine A	37.288599	140.222282	37.282338	140.253937



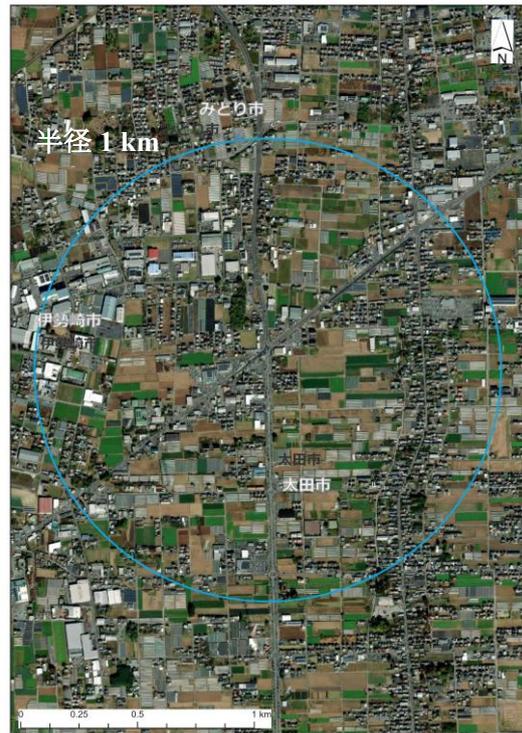
60地点を目安に地表面から1 mの高さの空間線量率($\mu\text{Sv/h}$)を測定する。

地上測定値($\mu\text{Sv/h}$)と基準対地高度(300 m)の γ 線計数率(s^{-1})の相互比較から空間線量率換算係数 CD を求める。

Fig. 4-12 テストポイントフライトのイメージ



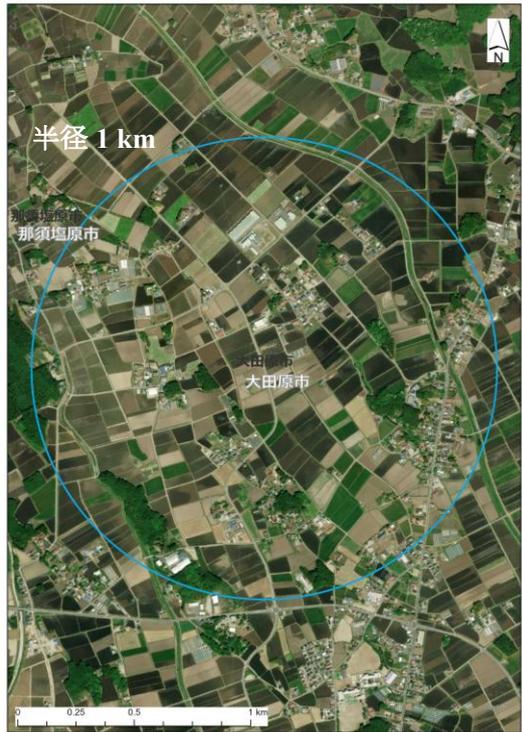
TestPoint 1 (岩手県奥州市)



TestPoint 3 (群馬県みどり市)



TestPoint 4 (茨城県那珂市)



TestPoint 5 (栃木県大田原市)

Fig. 4-13 テストポイントフライトの場所

(1/2)

(背景地図は、Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community を使用。)

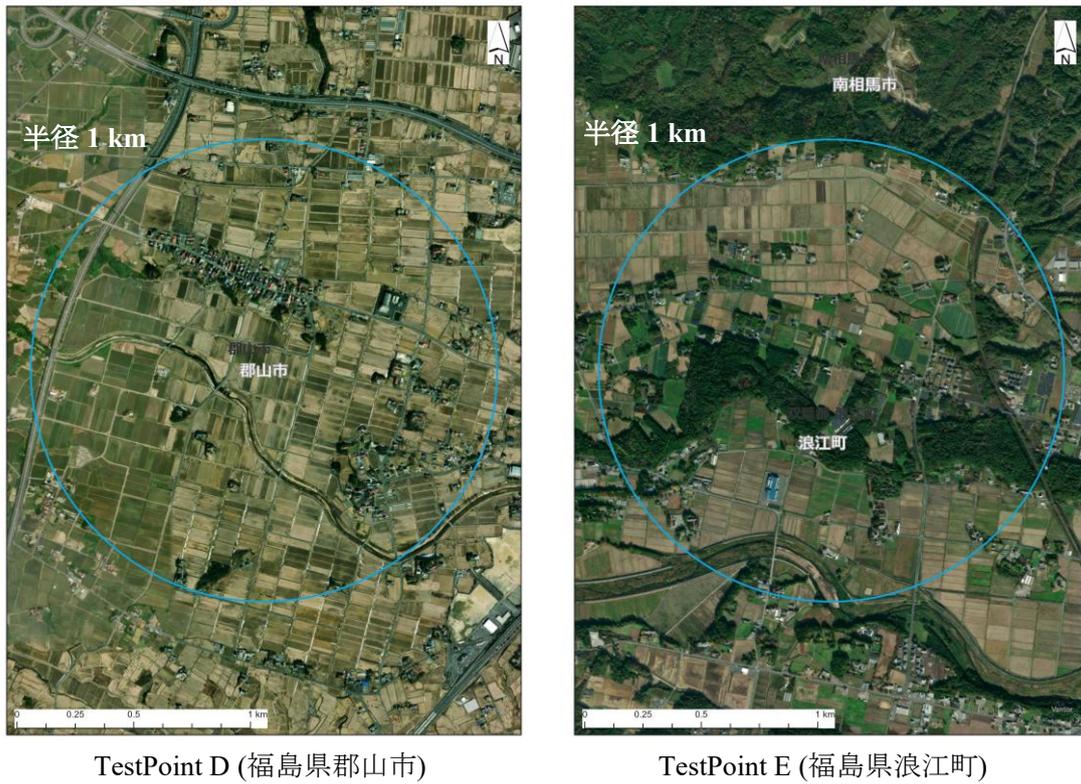


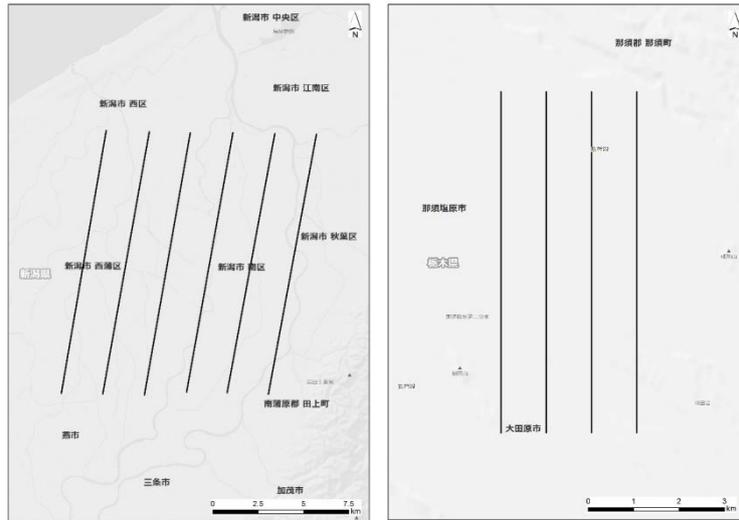
Fig. 4-13 テストポイントフライトの場所

(2/2)

(背景地図は、Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community を使用。)

Table 4-3 テストポイントの中心点の緯度及び経度

テストポイント名称	中心点座標 (緯度)	中心点座標 (経度)
TestPoint 1	39.136736	141.114409
TestPoint 3	36.365573	139.279929
TestPoint 4	36.449719	140.478829
TestPoint 5	36.907210	140.043439
TestPoint D	37.451738	140.364160
TestPoint E	37.509828	140.967051



天然核種フライト測線
(新潟県新潟市)

オーバーラップフライト測線
(栃木県那須塩原市)

Fig. 4-14 天然核種フライトの測線とオーバーラップフライトの測線
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

4.3.2. 無人ヘリコプター

無人ヘリモニタリングにより上空で取得した γ 線計数率を地表面から1 mの高さの空間線量率や地表面の放射性Csの沈着量に換算するためのパラメータについては、第16回5 km圏内無人ヘリモニタリング¹⁶⁾において取得したキャリブレーションフライトのデータを基に決定する方針とした。しかしながら、東電福島原子力発電所から5 km圏内と浜通り第2次無人ヘリモニタリングの測定対象エリアとでは空間線量率が大きく異なるため、換算パラメータを流用するのは適切でない可能性がある。そこで、換算パラメータの設定値の妥当性を検証するために、浜通り第2次無人ヘリモニタリングのエリア内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は、空間線量率の勾配が小さく、かつ地形の平坦な半径100 mの区域内(以下、テストサイト)で実施した。ただし、無人ヘリモニタリングでは宇宙線に起因する2,800 keV以上の γ 線はほとんど計数されないため、宇宙線による影響は無視できるものと見なし、宇宙線フライトはキャリブレーションフライトから除外した。なお、近年では除染等の影響で空間線量率の分布が一様な場所が少なくなったことにより、テストサイトの選定に難航しており、テストサイトの選定条件の見直しを検討することが必要である。無人ヘリモニタリングにおけるキャリブレーションフライトの詳細を以下に示す。

- テストサイト段階ホバリング

有人ヘリモニタリングと同様の目的で空気減弱係数 AF を取得するために実施する。テストサイト上空において対地高度 20 m、30 m、40 m、60 m、80 m、100 m、120 m、150 m でそれぞれ 120 秒以上ホバリングし、ガンマ線を計数する。各対地高度でホバリングした際の対地高度の平均値と γ 線計数率の平均値をプロットし、それらプロットに対する指数近似曲線の傾きを AF (m^{-1}) とする。

- テストサイト定点ホバリング

有人ヘリモニタリングと同様の目的で空間線量率換算係数 CD を取得するために実施する。テストサイト内で予め歩行型放射線量自動計測システム³⁹⁾(以下、KURAMA-II)を用いて、地表面から1 mの高さの空間線量率を取得し、ホバリング地点の中心座標から半径80 m内の空間線量率の平均値を算出した。対地高度1 mの推定計数率を空間線量率の平均値で除することで CD ($[\text{s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$) を算出する。

4.4. 解析のフロー

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

- ① 放射性 Cs からの γ 線
- ② 天然放射性核種からの γ 線
- ③ 宇宙線
- ④ その他 (有人ヘリモニタリングの場合は空气中ラドン子孫核種、ヘリコプター機体のバックグラウンド計数率、無人ヘリモニタリングの場合は $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の自己汚染に起因するバックグラウンド計数率を含む。)

本受託研究では、放射性 Cs 由来の γ 線を測定することが主目的であるため、測線フライトで測定される全計数率 (①~④の合計) から②~④起源の計数率を減算する必要がある。ただし、4.3.2 項で記載した通り、無人ヘリモニタリングでは③は無視できる。これらを考慮した解析のフローを Fig. 4-15 に示す。本報告では、本フロー図に則った解析方法を「標準的解析手法」と呼称する。この標準的解析手法により、放射性 Cs に起因する地表面から 1 m の高さの空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) 及び地表面の放射性 Cs 沈着量 (kBq/m^2) の分布マップを作成することができる。

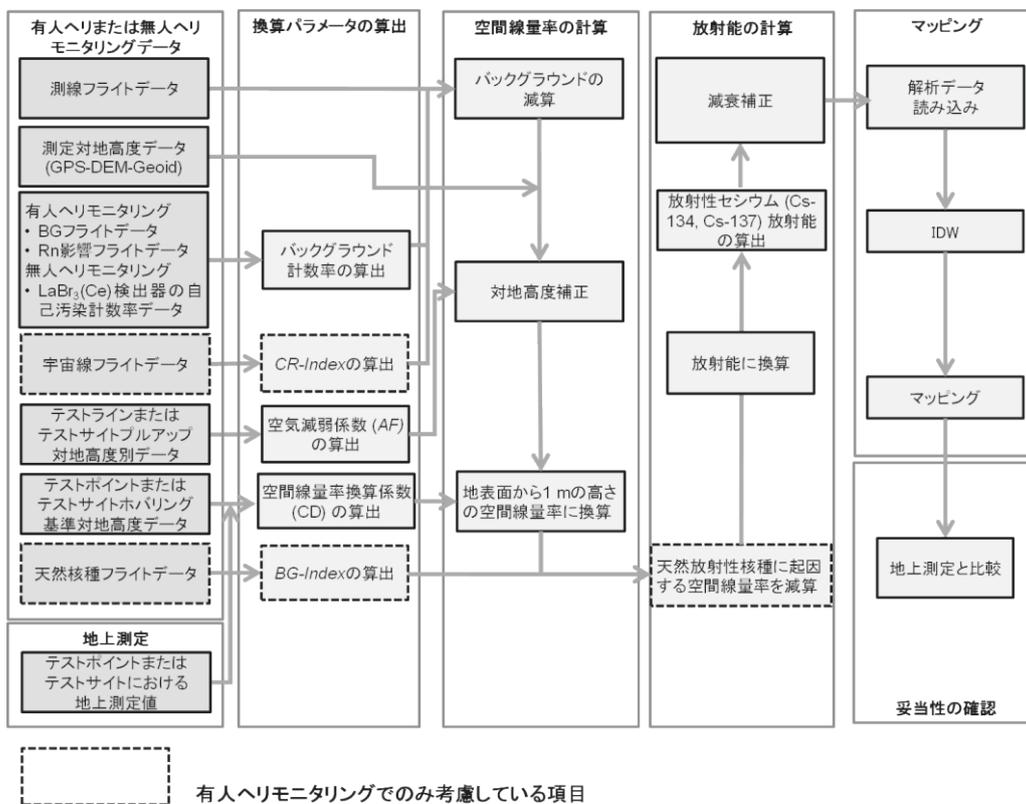


Fig. 4-15 解析のフロー

4.5. 空間線量率への換算方法

航空機モニタリングにより上空で取得した γ 線計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率 (D) へ換算する手順の概要は、以下の通りである。

- ① バックグラウンド減算：全計数率 (C_{all}) から天然放射性核種からの γ 線計数率 (C_{nat})、宇宙線及びその他 (有人ヘリモニタリングの場合は空气中ラドン子孫核種や有人ヘリ機体に起因するバックグラウンド計数率、無人ヘリモニタリングの場合は $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の自己汚染に起因する計数率を含む。) に起因する計数率 (C_{cos} 及び C_{self}) を減算する。
- ② 対地高度補正：実際のフライト高度と基準高度とのずれにより生じる γ 線計数率の多少を高度補正係数 (HF) により補正する。
- ③ 空間線量率への換算：①、②を経て得られた計数率を空間線量率換算係数 (CD) によって除して地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算する。

以上の上空で取得した γ 線計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率 (D) への換算式を式 [1] に示す。

$$D = \frac{HF(C_{\text{all}} - C_{\text{nat}} - C_{\text{cos}} - C_{\text{self}})}{CD} \quad [1]$$

ここで、

D : 地表面から 1 m の高さの空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

C_{all} : 全計数率 (s^{-1})

C_{nat} : 天然放射性核種からの γ 線 (s^{-1})

C_{cos} : 宇宙線に起因する γ 線計数率 (s^{-1}) (有人ヘリモニタリングでのみ考慮)

C_{self} :

有人ヘリモニタリング：空气中ラドン子孫核種やヘリ機体に起因する γ 線計数率 (s^{-1})

無人ヘリモニタリング： $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の自己汚染に起因する計数率 (s^{-1})

HF : 対地高度補正係数 (m^{-1})

CD : 空間線量率換算係数 ($[\text{s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$)

である。

C_{nat} の算出方法については次節に記す「放射性 Cs の沈着量への換算方法」と密接な関係にあるため、4.6.1 項に詳述する。有人ヘリモニタリングにおける C_{cos} 、 C_{self} 、 HF 及び CD は 4.3.1 項に記した宇宙線フライト、BG フライト、テストラインフライト及びテストポイントフライトで取得したデータを基に求められる。無人ヘリモニタリングにおける HF 及び CD は 4.3.2 項に記したテストサイト段階ホバリング及びテストサイト定点ホバリングで取

得したデータを基に求められる。なお、無人ヘリモニタリングにおける C_{self} は海上において海拔高度 50 m～140 m のデータを取得することによって求めた。これら空間線量率の算出に関わる項や係数の詳細について以下に述べる。

4.5.1.バックグラウンド減算(宇宙線及びその他)

有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングにおいて、天然放射性核種からの γ 線、宇宙線(有人ヘリモニタリングでのみ考慮)及びその他(有人ヘリモニタリングの場合は空气中ラドン子孫核種、有人ヘリ機体のバックグラウンド計数率。無人ヘリモニタリングの場合は $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の自己汚染に起因する計数率。)に起因する γ 線計数率はバックグラウンドとなるため減算する必要がある。本項では、特に宇宙線及びその他の γ 線計数率の算出方法²²⁾について示す。

これまでの経験¹⁹⁾⁻²⁹⁾から、有人ヘリモニタリングについては海拔高度が上昇すると宇宙線由来の計数率が上昇することが分かっている。宇宙線由来の γ 線は、RSIシステムが測定している全エネルギー範囲(30 keV～3,000 keV)で計数されており、Tl-208が放出する2,614 keVの γ 線及びその散乱線の影響により、2,614 keV以下の計数から宇宙線による計数を弁別することは一般に難しい。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、これを用いて宇宙線寄与係数(*CR-Index*)を算出した。具体的には、海拔高度と30 keV～2,800 keVの計数率の関係から得られる回帰直線の傾きを、同様に海拔高度と2,800 keV以上の計数率の回帰直線の傾きで割った値を*CR-Index*と定義した。これにより、30 keV～2,800 keVに含まれる計数のうち高度に依存する成分を適切に抽出できる。Fig. 4-16に海拔高度と宇宙線の計数率の関係例¹⁸⁾を示す。この例は、沖縄と北海道での海上において、50 m～2,000 mの海拔高度で取得したデータの内、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、海拔高度と2,800 keV以上の γ 線の計数率は正の相関にあり、計測する場所に影響されない。宇宙線フライトで取得したデータを基に算出した*CR-Index*についてTable 4-4に示す。*CR-Index*は機体と検出器の組み合わせごとに設定し、測定データにおける2,800 keV以上の γ 線計数率に*CR-Index*を乗じることで C_{cos} を算出し、全計数率 C_{all} の減算に用いた。

空气中ラドン子孫核種、有人ヘリ機体のバックグラウンド計数率の減算については、BGフライト(地上からの放射線が届かないと考えられる対地高度約900 mをフライト)を実施して得られた γ 線計数率を用いる。BGフライトによって陸地及び海上で取得したスペクトルの例をFig. 4-17に示す。このように、BGフライトで得られるスペクトルには陸地と海上とで顕著な差異はなく、対地高度を十分に取れば陸地で得られたデータでもバックグラウンドの減算に用いることが可能である。また、2024年度(令和6年度)にBGフライトで取得したデータを基に算出した、バックグラウンド計数率の算術平均値をTable 4-4に

記した。標準的な解析手法では、BG フライトで取得した γ 線計数率の算術平均値を、当該日に測定したエリア全体における C_{self} の代表値として取り扱い、全計数率 C_{all} の減算に用いた。しかしながら、空気中のラドン子孫核種濃度は日単位や季節単位で時間依存的に変動し、地域依存性を持つことが知られている。よって標準的な解析手法によるバックグラウンドの減算には、ある程度の不確かさが伴うことが推察される。空気中ラドン子孫核種による影響を測定点ごとに除去してバックグラウンド計数率を評価し、減算する手法(ラドン弁別手法)については 8 章に詳述する。

無人ヘリモニタリングシステムに用いられている $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器は、 Cs-137 の放出する γ 線の光電ピーク (662 keV) に対し、半値幅が 1.8 keV~2.0 keV とエネルギー分解能に優れている。しかしながら、自己汚染があることが知られ、 Ac-227 の子孫核種、 La の放射性同位元素である La-138 が主な成分となる。 Ac-227 の子孫核種である Pb-211 及び Tl-207 の β 壊変により 1,400 keV 以下の β 線が放出され、同 Th-227 、 Ra-223 、 Rn-219 、 Po-215 及び Bi-211 から α 線が放出される⁴⁰⁾。 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器のバックグラウンドスペクトルを Fig. 4-18 に示す。2024 年 (令和 6 年) に海上で取得したバックグラウンドスペクトルを利用して、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の自己汚染に由来する計数率は 290.64 s^{-1} と算出した。これは地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するうえで妨害成分となるため、浜通り第 2 次モニタリングで取得した全計数率から 290.64 s^{-1} を差し引いた上で、空間線量率の評価に用いる方針とした。

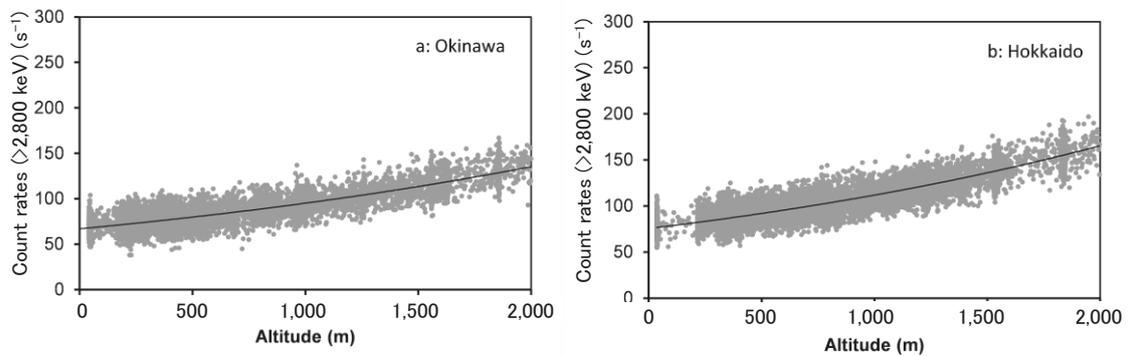


Fig. 4-16 RSI システムによる海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例¹⁸⁾

(左：沖縄海域、右：北海道海域)

(図中の曲線は、測定データの指数関数による近似曲線である。)

Table 4-4 RSI システムと有人ヘリの組み合わせごとのバックグラウンド計数率及び CR-Index

RSI System	ヘリコプター機種 (機体番号)	運航会社	CR-Index	バックグラウンド計数率(s ⁻¹)
RSI 1	Bell412 (JA6928)	AAC	2.97	466
	S-76 (JA6901)	AAC	3.83	282
	Bell430 (JA05TV)	NNK	2.93	465

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

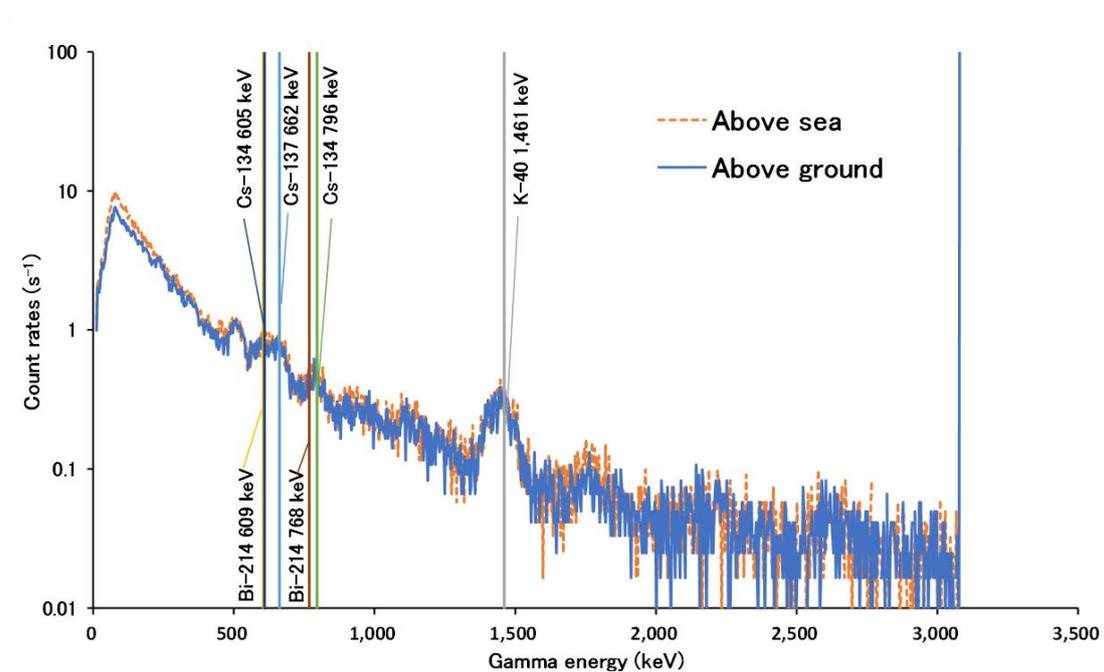


Fig. 4-17 RSI システムにより BG フライトで取得した陸上と海上での γ 線スペクトル例

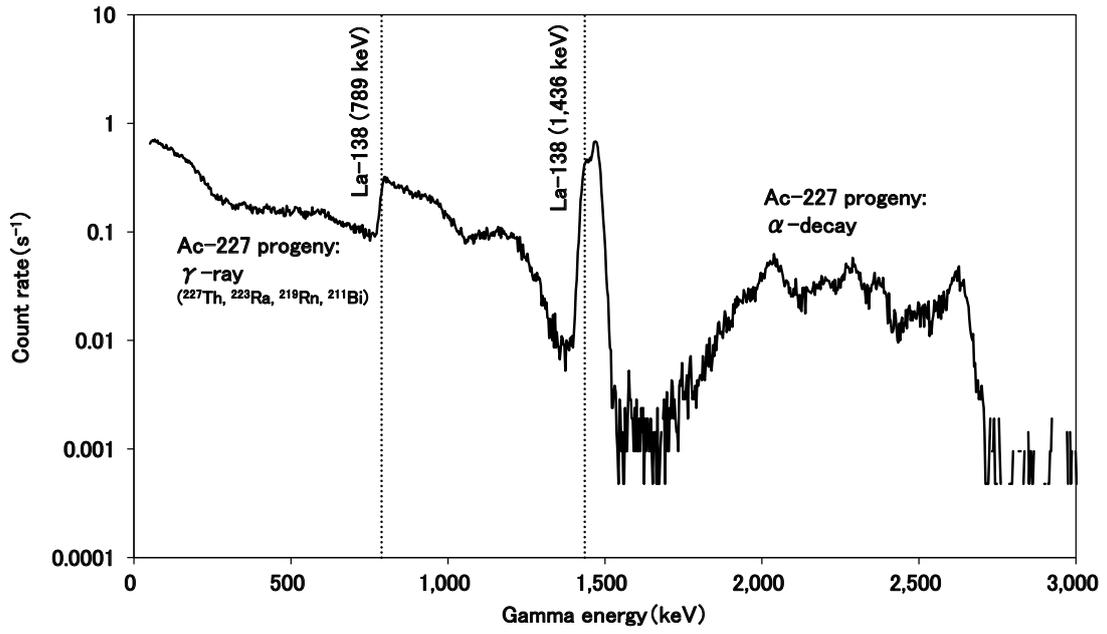


Fig. 4-18 無人ヘリモニタリングシステムにおける $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の自己汚染による γ 線スペクトル例 (海上飛行において取得したデータ)

4.5.2.対地高度補正

各測定点における対地高度と基準対地高度とのずれによって生じる γ 線計数率の増減は、空気中での γ 線の減衰に起因するため、対地高度補正係数 HF を用いて補正する必要がある。 HF を算出するためには、まず対地高度と計数率の関係から空気減弱係数 AF を求める必要がある。2025 年度 (令和 6 年度) では、有人ヘリモニタリングにおける AF をテストラインで取得した対地高度と計数率の関係に対して非線形最小二乗法を用いて指数関数回帰することで求めた。得られた回帰曲線の傾きが AF に相当する。Fig. 4-19 に対地高度と計数率の関係例と、非線形回帰により得られた近似曲線を示す。解析に用いた手法の詳細は文献²⁸⁾に示している。求めた AF を用いて、各測定点における計数率を基準対地高度における計数率に換算するための対地高度補正係数 HF は計算式 [2] により算出した。

$$HF = \exp[AF (H_{\text{std}} - H_m)] \quad [2]$$

ここで、

HF : 対地高度補正係数 (Height correction Factor, (m^{-1}))

AF : 空気減弱係数 (Attenuation Factor, (m^{-1}))

H_{std} : 基準対地高度 (有人ヘリモニタリング : 300 m、無人ヘリモニタリング : 80 m)

H_m : 対地高度 (m) (楕円対地高度 - DEM - ジオイド高度)

である。

対地高度は GPS で記録した楕円対地高度から、10 m メッシュの数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM)⁴¹⁾及びジオイド高⁴¹⁾を差し引いて求めた*1。

2024 年度 (令和 6 年度) の有人ヘリモニタリングでの解析に使用した換算パラメータとその標本標準偏差 (1σ) について Table 4-5 に示す。有人ヘリモニタリングに関しては 4.3.1 項の冒頭に述べたように、Bell412、Bell430 及び S-76 については 2012 年から 2014 年 (第 6 次モニタリングから第 9 次モニタリング及び東日本第 3 次モニタリングから東日本第 5 次モニタリング) で取得した数値の算術平均を取って決定されたものである。これまでに実施してきた東電福島原子力発電所周辺の空間線量率の評価と一貫性を持たせる観点から、2024 年度 (令和 6 年度) においてもこれらの換算パラメータを固定値として用いた (以下、固定パラメータ)。なお、固定パラメータは Microsoft Excel® の指数近似機能によって得られたものである。

有人ヘリモニタリングについて、RSI システムの健全性及び固定パラメータを用いるこ

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

との妥当性を確認するために、2024年度(令和6年度)にテストラインフライトのデータを取得し空気減弱係数 AF を算出した。 AF のデータ一覧をTable 4-6に示す。Table 4-5に示した固定パラメータの 1σ から外れる程に大きく算出された AF は、Bell412(JA6928)については7月10日にTestLine 4、7月18日にTestLine 3で取得したもの、Bell430(JA05TV)については9月25日にTestLine 1で取得したもの、S-76(JA6901)については9月11日にTestLine 5で取得したものであった。これら以外のデータ(Bell430(JA05TV)でTestLine Aで取得した2データ)については固定パラメータと概ね同様の値であった。以上より、有人ヘリモニタリングについて、RSIシステムの健全性が確認でき、第19次モニタリング及び東日本第15次モニタリングで使用した全ての有人ヘリ機体に対して、固定パラメータの AF を用いることを妥当とした。ただし、現行の固定パラメータを過信することなく、継続して用いるか否かを都度、検討することが必要である。

浜通り第2次無人ヘリモニタリングについて、「令和6年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業」¹⁶⁾で取得した数値(10データ)及び80 km圏内外の航空機モニタリング事業で取得した数値(2データ)について、テストサイト段階ホバリングで取得した各対地高度と γ 線計数率をMicrosoft Excel[®]の指数近似機能によって回帰した。これらの内、回帰式の決定係数が0.99以上のデータを抽出した上で、それらの傾きの算術平均値を算出し、解析に用いる AF (-0.00690 m^{-1})とした。

第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングに用いる AF は「令和6年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業」¹⁶⁾と同一($-0.00675 \text{ (m}^{-1}\text{)}$)とした。

これら浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングの AF に差異はなく、妥当な数値が得られたと考える。

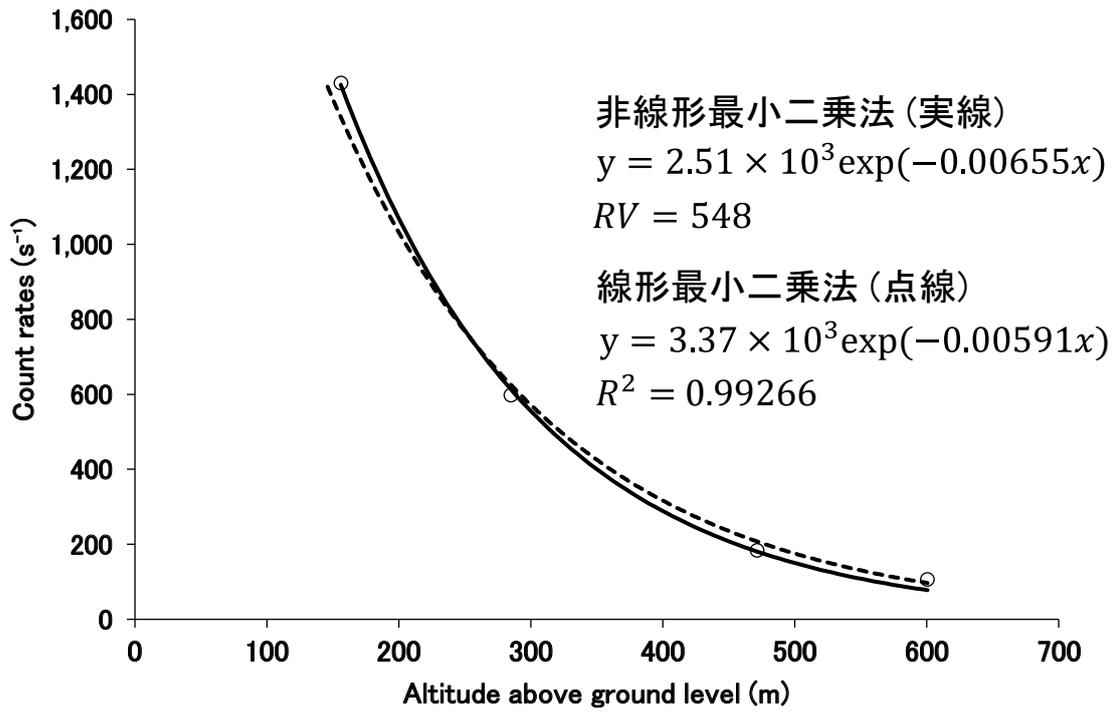


Fig. 4-19 対地高度と計数率の関係例²⁸⁾
 (Bell412 (JA6928)、2022年9月14日、TestLine 4にて実施)

Table 4-5 有人ヘリモニタリングで使用した空気減弱係数 AF のまとめ

Helicopter	AF (m^{-1})	Number of Data
Bell412 (JA6928)	-0.0072 ± 0.00047	21
Bell430 (JA05TV)	-0.0072 ± 0.00040	35
S-76 (JA6901)	-0.0072 ± 0.00052	2

※誤差は1 σ (標準偏差)を示す。

Table 4-6 2024 年度に評価した有人ヘリモニタリングの空気減弱係数 AF データ一覧

モニタリング	ヘリコプター機種 (機体番号) (運航会社)	RSIシステム	実施年日	テストライン名	非線形最小二乗法による 指数関数回帰の結果	
					AF (m ⁻¹)	RV
東日本第15次 モニタリング	Bell412 (JA6928) (AAC)	RSI 1	2024/07/10	TestLine 4	-0.00640	17
			2024/07/18	TestLine 3	-0.00578	111
Average -0.00609						
モニタリング	ヘリコプター機種 (機体番号) (運航会社)	RSIシステム	実施年日	テストライン名	非線形最小二乗法による 指数関数回帰の結果	
					AF (m ⁻¹)	RV
東日本第15次 モニタリング 第19次 モニタリング	Bell430 (JA05TV) (NNK)	RSI 1	2024/09/25	TestLine 1	-0.00623	358
			2024/10/22	TestLine A	-0.00717	268
			2024/11/16	TestLine A	-0.00718	2,241
Average -0.00686						
モニタリング	ヘリコプター機種 (機体番号) (運航会社)	RSIシステム	実施年日	テストライン名	非線形最小二乗法による 指数関数回帰の結果	
					AF (m ⁻¹)	RV
東日本第15次 モニタリング	S-76 (JA6901) (AAC)	RSI 1	2024/09/11	TestLine 5	-0.00661	164

※NNK: 日本航空株式会社、AAC: 朝日航空株式会社

※RV: 指数関数回帰における残差分散

4.5.3.空間線量率への換算

RSI システムは有人ヘリの機内に搭載するため、有人ヘリの機底の遮へい効果に依存して、 γ 線計数率を地表面から1 mの高さの空間線量率に換算するための係数(CD)は変化すると考えられることから、機種または機体ごとに設定が必要である。AFと同様の理由で、CDも固定パラメータを用いることを基本方針とした。固定パラメータとして用いているCDについてTable 4-7に示す。有人ヘリモニタリングに関して、Bell412、Bell430については2012年から2014年(第6次モニタリングから第9次モニタリング及び東日本第3次モニタリングから東日本第5次モニタリング)で取得した数値の算術平均値とその標本標準偏差(1σ)である。S-76については、2016年度(平成28年度)に実施した第11次モニタリングにおいて、Bell430の固定パラメータをベースに、Bell430とS-76とのオーバーラップフライトの比較結果を基に設定されたものである。無人ヘリモニタリングに関して、浜通り第2次無人ヘリモニタリングについては、「令和6年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策等委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業」¹⁶⁾で取得したCD(10データ)と本報告で取得したCD(2データ)の算術平均値を用いた。

有人ヘリモニタリングにおいては、RSIシステムの健全性及び機体ごとのCDを固定パラメータとして用いることの妥当性を確認するために、2024年度(令和6年度)におけるテストポイントフライトデータを取得した。また、CDを算出するのに必要となる地上測定値をテストポイントから半径1,000 mの範囲において60地点でNaI(Tl)検出器を用いて取得した。無人ヘリモニタリングについても2024年度(令和6年度)におけるテストサイト定点ホバリングデータを取得した。CDを算出するのに必要となる地上測定値はテストサイトにおいてKURAMA-IIにより、地表面から1 mの高さの空間線量率を取得した。

有人ヘリモニタリングにおけるCDは、テストポイントにおける地上測定値の平均値とテストポイント周辺で対地高度300 mを3分間ホバリングして得られた計数率の平均値との比から求めた。地上測定値として、3分間のホバリング中の緯度及び経度の平均値を求め、その地点から半径500 m円内における平均値を用いた。取得したデータをTable 4-8～Table 4-10に示す。また、テストポイントにおける地上測定値について、Fig. 4-20～Fig. 4-25に示す。なお、地上測定値には天然放射性核種による寄与が含まれる。取得したCDにはややばらつきがみられ、Bell412(JA6928)のCD(Table 4-8)については、2024年(令和6年)7月18日にTestPoint 3で取得したCDが、Table 4-7で示した固定パラメータに対する 1σ の範囲外であったが、同年に取得した全CDの平均値を取ると固定パラメータとほとんど一致した。Bell430(JA05TV)のCD(Table 4-9)については、いずれもTable 4-7で示した 1σ 以内であり、2024年度(令和6年度)に取得したCDの全データの平均値は固定パラメータと10%以内で一致した。S-76(JA6901)のCD(Table 4-10)については、固定パラメータよりも約1.35倍高く算出された。S-76(JA6901)における固定パラメータCDについては上述

した通り、Bell430のパラメータをベースにオーバーラップフライトの結果から決定されたものである。そのため、S-76によるテストポイントフライトで実際に取得されるCDとは、やや乖離する傾向にあると推察される。

有人ヘリモニタリングにおける固定パラメータの妥当性を検証するために、Bell412 (JA6928) と S-76 (JA6901) 及び S-76 (JA6901) と Bell430 (JA05TV)の組み合わせでヘリコプター機種または機体ごとの γ 線計数率を比較した。Fig. 4-14 (右) に示した測線において対地高度 300 m でオーバーラップフライトを実施し、当該フライトで得た全計数率に対して、オーバーラップフライトを実施した日におけるBGフライトで取得した計数率及びTable 4-4に示したCR-Indexを適用してバックグラウンドを減算した後、Table 4-5に示したAFを基に算出したHFにより、基準対地高度 (300 m) における計数率に補正して (以下、CR-Index・HF補正計数率) 比較した (Fig. 4-26)。本図中に示した回帰直線式の傾きが各ヘリコプター機体同士のCR-Index・HF補正計数率の比であると解釈でき、この傾きがTable 4-7に示したCDの比と一致することが理想である。つまり、S-76 (JA6901) / Bell412 (JA6928) \cong 1.300、Bell430 (JA05TV) / S-76 (JA6901) \cong 0.909がそれぞれの理想値である。この比が回帰直線の傾きと大きく異なる場合、いずれかの機体のCDに対し、当該回帰直線における傾きと一致するように補正を施すことを検討する。Fig. 4-26より回帰直線の傾きは、S-76 (JA6901) / Bell412 (JA6928) \cong 1.284、Bell430 (JA05TV) / S-76 (JA6901) \cong 0.790であり、全てのヘリコプター機体間で理想値との差異は概ね10%前後に収まった。ここで、CDはTable 4-7に示した固定パラメータから20%前後は揺らぐことが分かっており、今回のオーバーラップフライトの結果と理想値との差異は許容範囲内であることから、いずれの機体に対してもCDの補正を施す必要性はないと判断された。このように、オーバーラップフライトの結果は、解析に用いるCDの数値が妥当であるか (再設定を検討すべきか) を判断するための材料の一つとなる。

浜通り第2次無人ヘリモニタリングのCDについては、前述の別事業で取得した数値 (10データ) 及び本報告で取得した数値 (2データ) の算術平均値 (7,197 ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$)) とした。なお、第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングに用いるCDは「令和6年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費 (東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約) 事業」¹⁶⁾と同一 (7,195 ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$)) とした。

以上を踏まえ、RSIシステムの健全性が確認でき、第19次モニタリング及び東日本第15次モニタリングで使用した全ての有人ヘリ機体に対して、固定パラメータのCDを用いることは、現状では妥当であるとした。無人ヘリモニタリングについては、浜通り第2次無人ヘリモニタリングと第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングのCDに顕著な差異はなく、妥当な数値が得られたと考えられる。

Table 4-7 使用した空間線量率換算係数 CD のまとめ

Helicopter	CD ($\mu\text{Sv/h}$)	Number of Data
Bell412 (JA6928)	11,000 \pm 2,100	42
Bell430 (JA05TV)	13,000 \pm 2,800	65
S-76 (JA6901)	14,300	-

※誤差は1 σ (標準偏差)を示す。

※S-76のCDに関しては、第11次モニタリングにおいて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 4-8 2024 年度に取得した CD データ一覧 (Bell412(JA6928))

モニタリング	RSIシステム	実施年日	テストポイント名	地上測定値			テストポイントフライトデータ			CD ($\text{s}^{-1}/[\mu\text{Sv/h}]$)	
				空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	標準偏差 (2σ)	相対標準偏差 (%)	計数率 (s^{-1})	標準偏差 (2σ)	対地高度 (ft)		標準偏差 (2σ)
東日本第15次 モニタリング	RSI 1	2024/07/10	TestPoint 4	0.06	0.02	29	1,156	99	1,078	14	8,700
		2024/07/18	TestPoint 3	0.05	0.02	30	1,450	200	991	75	13,100
Average										11,000	

※運輸会社: 朝日航空株式会社

Table 4-9 2024 年度に取得した CD データ一覧 (Bell430(JA05TV))

モニタリング	RSIシステム	実施年日	テストポイント名	地上測定値			テストポイントフライトデータ			CD ($\text{s}^{-1}/[\mu\text{Sv/h}]$)	
				空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	標準偏差 (2σ)	相対標準偏差 (%)	計数率 (s^{-1})	標準偏差 (2σ)	対地高度 (ft)		標準偏差 (2σ)
東日本第15次 モニタリング	RSI 1	2024/09/25	TestPoint 1	0.05	0.01	26	1,349	148	933	103	13,200
		2024/10/22	TestPoint E	0.71	0.48	67	10,120	1,308	1,019	63	13,900
第19次 モニタリング	RSI 1	2024/10/22	TestPoint D	0.19	0.06	29	3,183	590	1,054	110	14,500
		2024/11/16	TestPoint E	0.40	0.28	69	8,456	1,997	834	43	13,400
2024/11/16	TestPoint D	0.20	0.06	32	4,089	606	940	51	14,800		
Average										14,000	

※運輸会社: 中日本航空株式会社

Table 4-10 2024年度に取得したCDデータ一覧 (S-76(JA6901))

モニタリング	RSIシステム	実施年日	テストポイント名	地上測定値			テストポイントフライトデータ				CD (s ⁻¹ /[μSv/h])
				空間線量率 (μSv/h)	標本標準偏差 (2σ)	相対標準偏差 (%)	計数率 (s ⁻¹)	標本標準偏差 (2σ)	対地高度 (ft)	標本標準偏差 (2σ)	
東日本第15次 モニタリング	RSI 1	2024/09/11	TestPoint 5	0.09	0.02	24	2.106	225	1,031	14	19,300

※運輸会社:朝日航洋株式会社

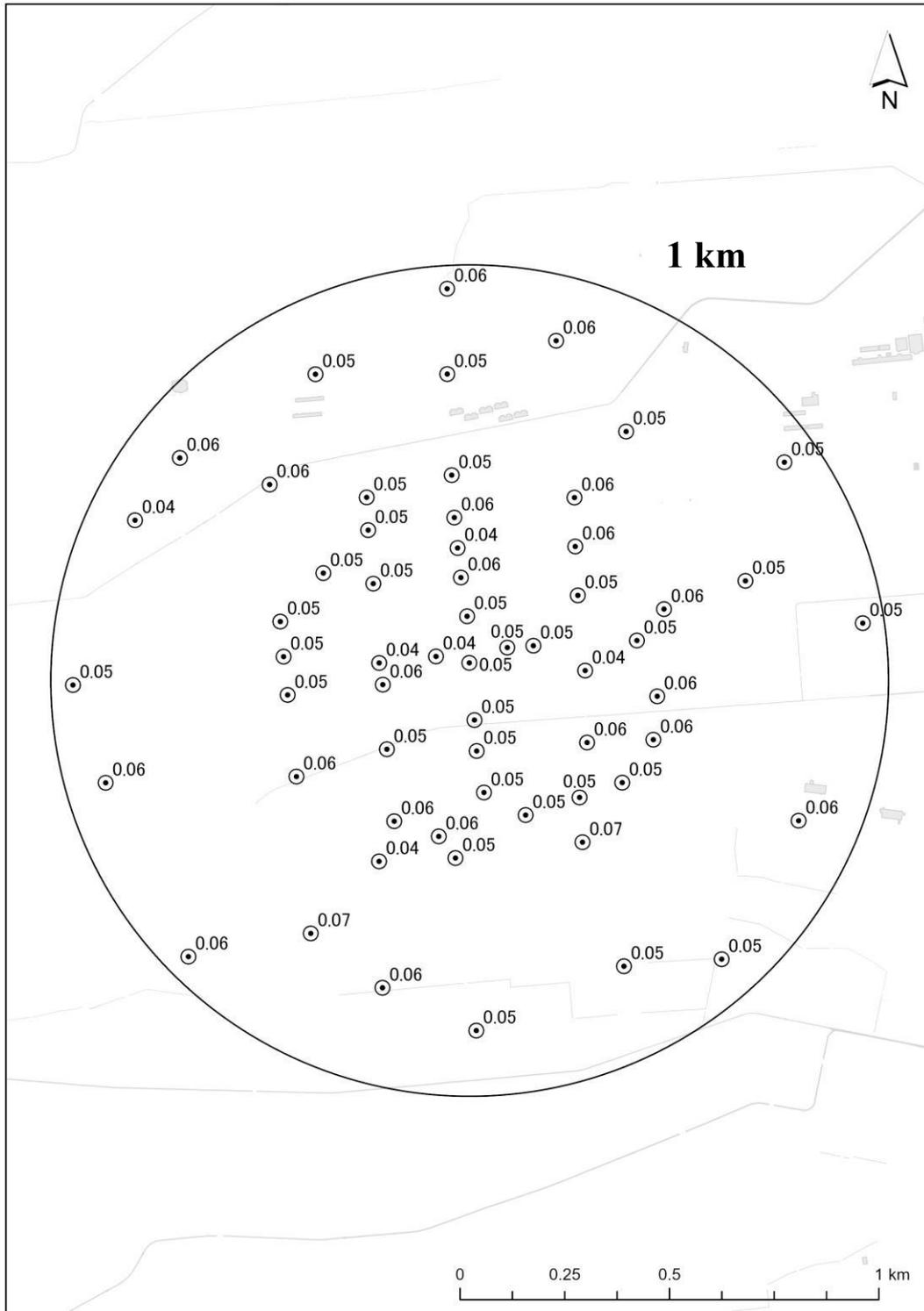


Fig. 4-20 地上測定データ (TestPoint 1)

(各地点での数値は空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、天然放射性核種による寄与を含む。)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

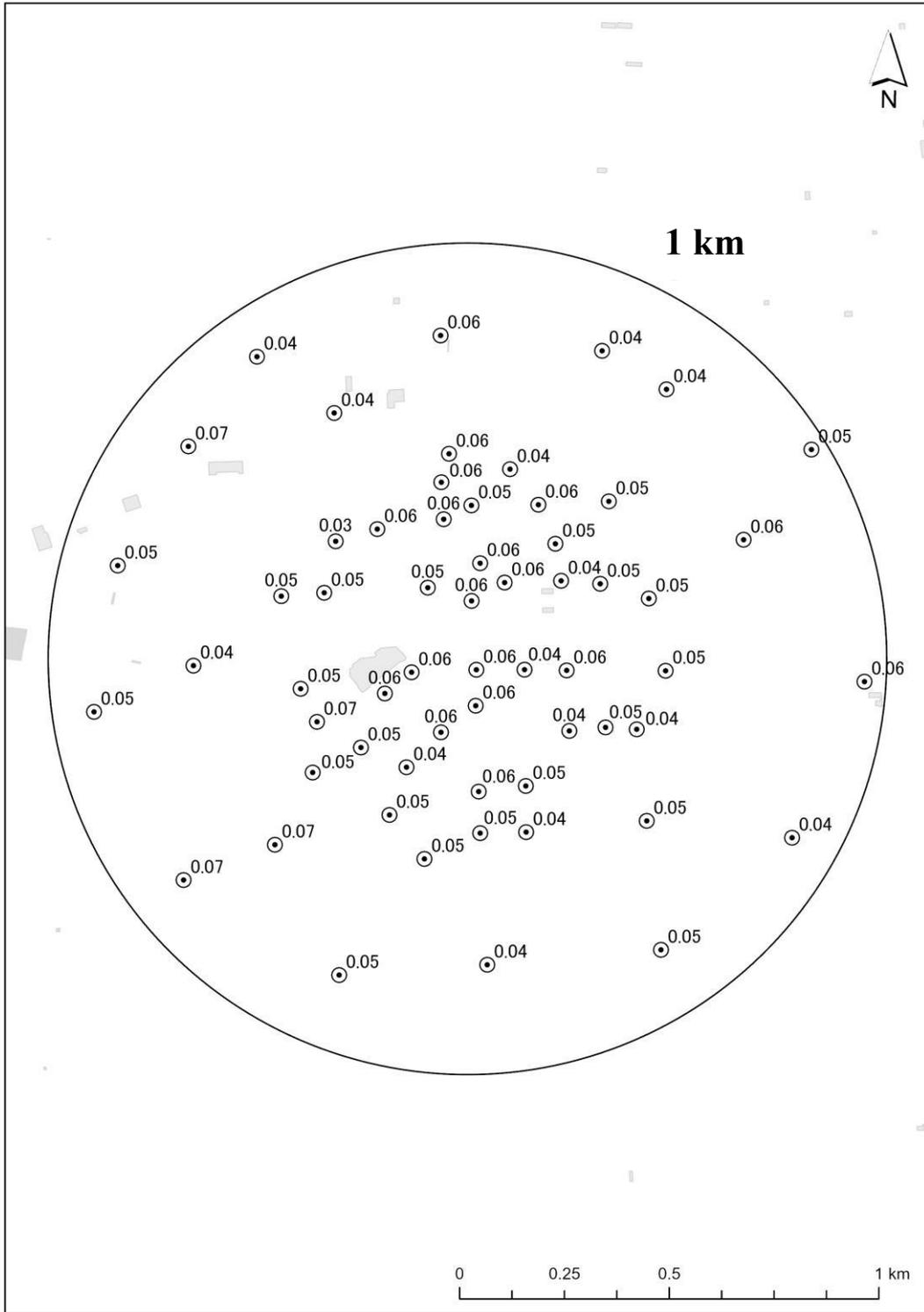


Fig. 4-21 地上測定データ (TestPoint 3)

(各地点での数値は空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、天然放射性核種による寄与を含む。)

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

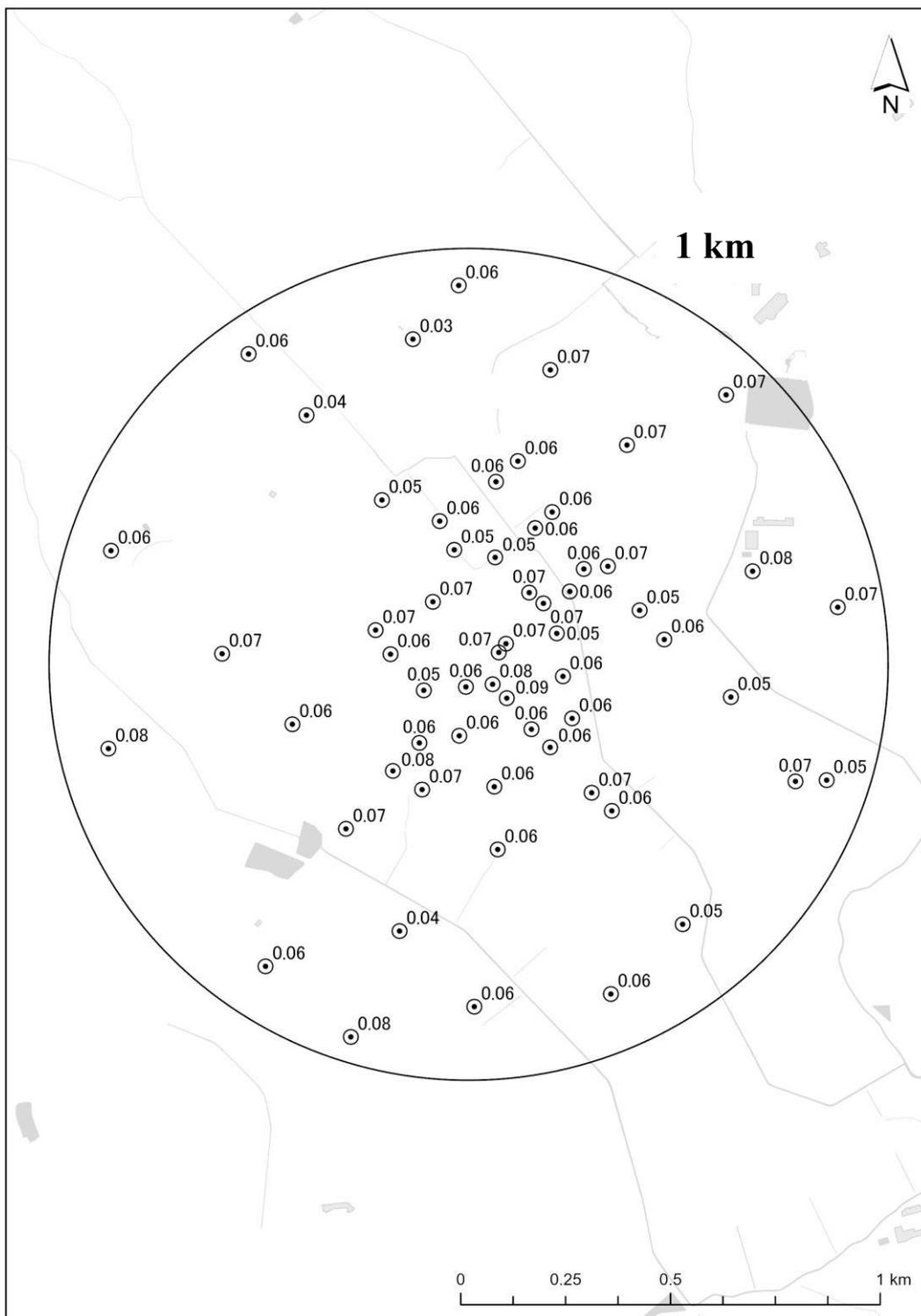


Fig. 4-22 地上測定データ (TestPoint 4)

(各地点での数値は空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、天然放射性核種による寄与を含む。)

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

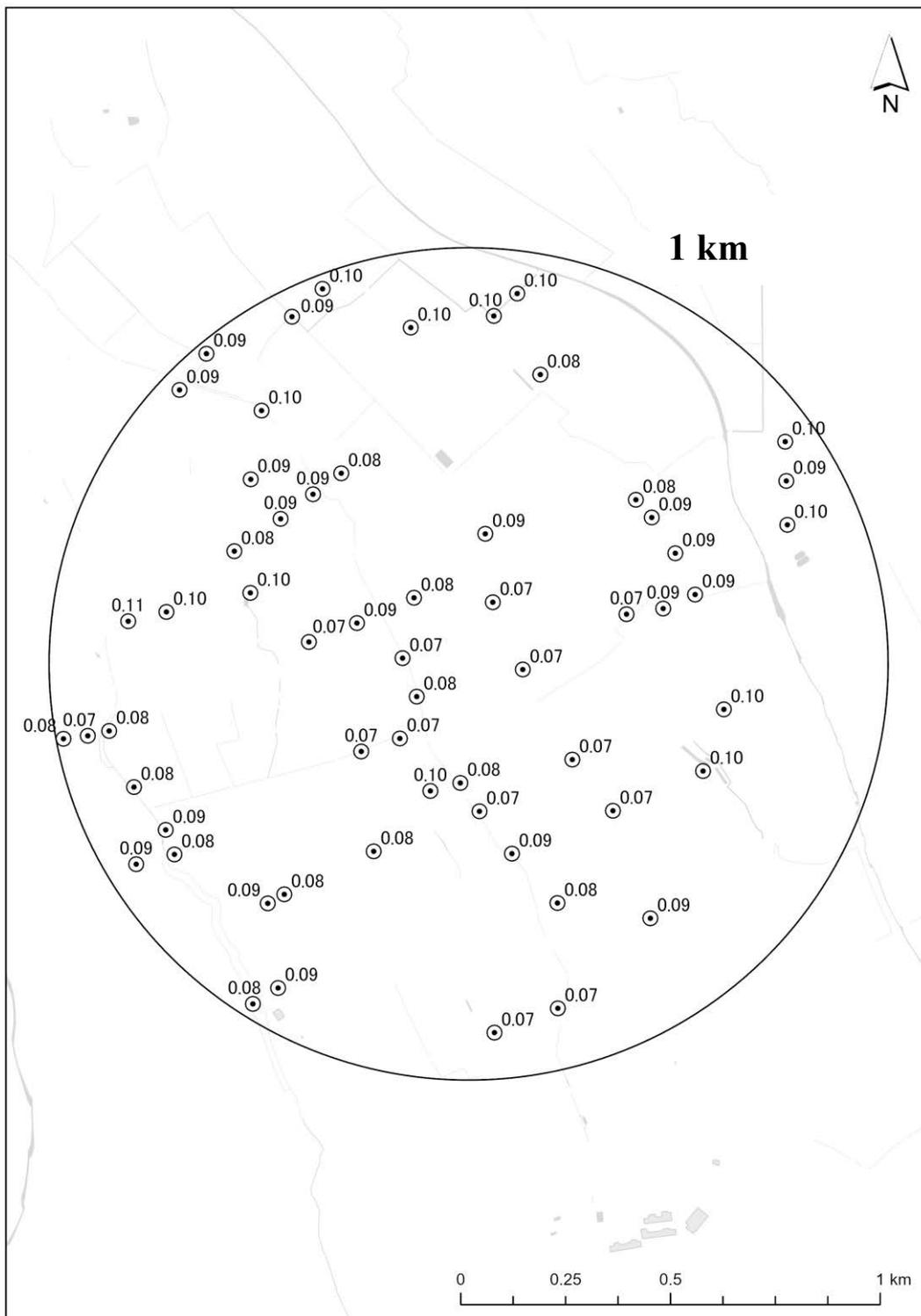


Fig. 4-23 地上測定データ (TestPoint 5)

(各地点での数値は空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、天然放射性核種による寄与を含む。)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

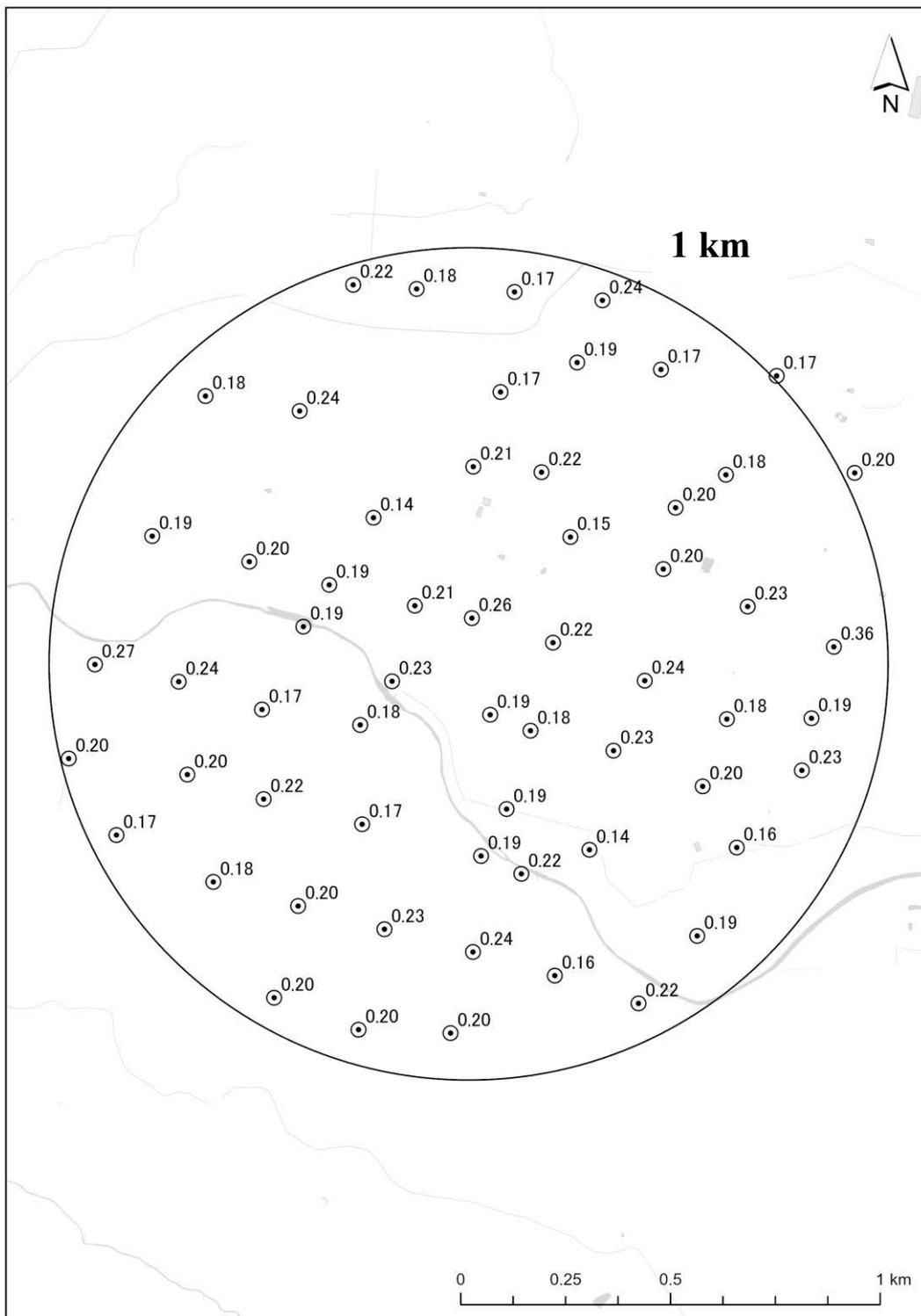


Fig. 4-24 地上測定データ (TestPoint D)

(各地点での数値は空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、天然放射性核種による寄与を含む。)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

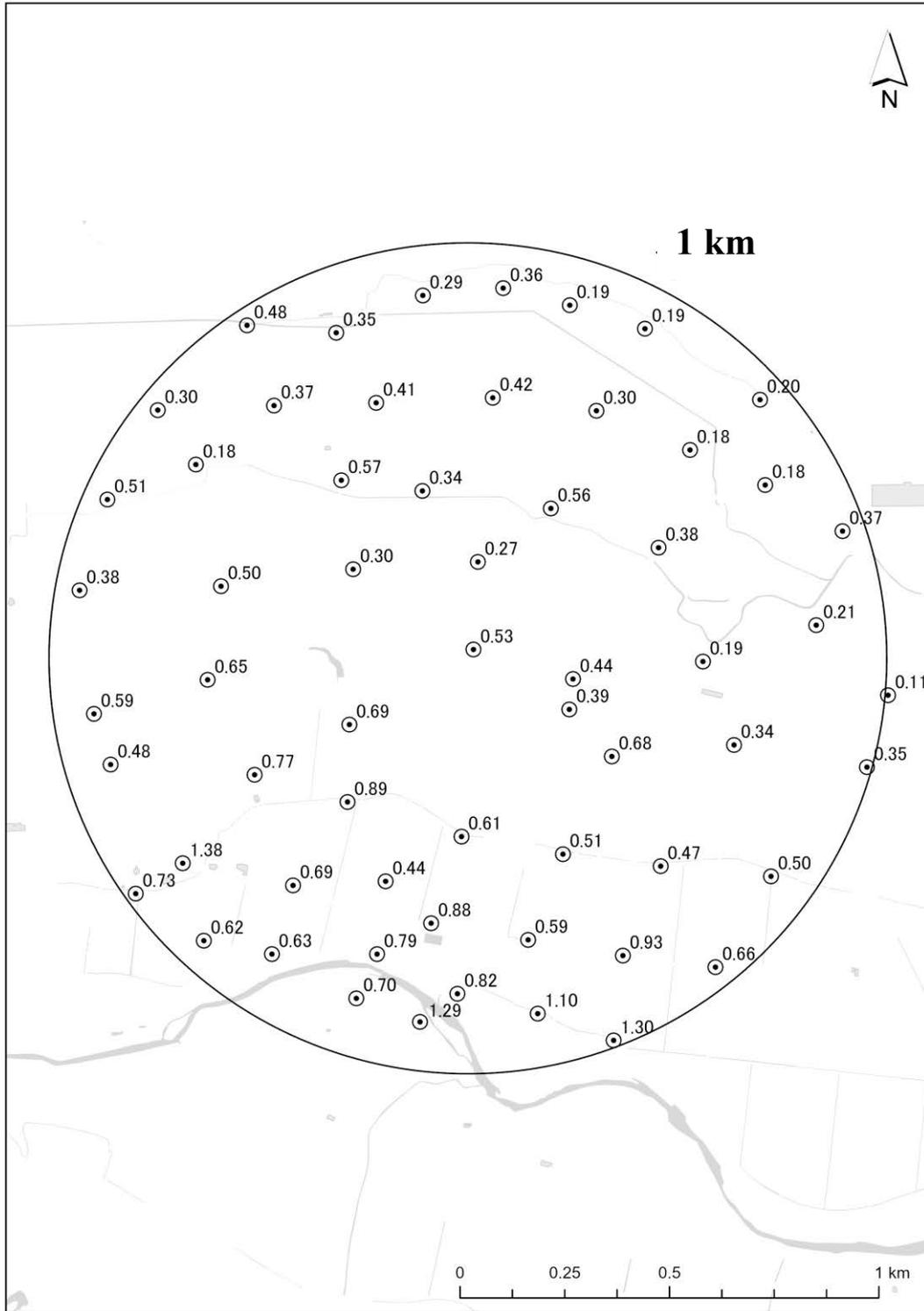


Fig. 4-25 地上測定データ (TestPoint E)

(各地点での数値は空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、天然放射性核種による寄与を含む。)

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

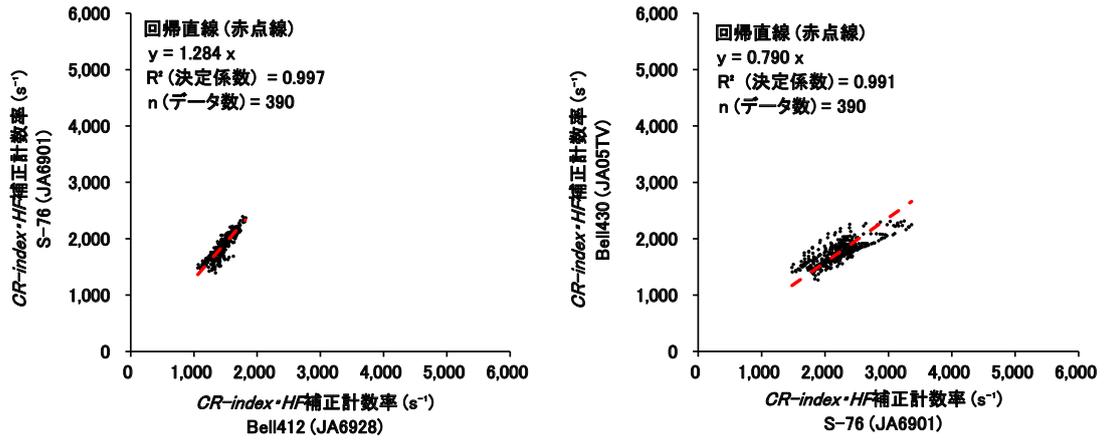


Fig. 4-26 オーバーラップフライトにおけるヘリコプター機種または機体ごとの *CR-Index* ・ *HF* 補正計数率の関係

4.6. 放射性 Cs の沈着量への換算方法

4.6.1. 天然放射性核種の弁別と放射性 Cs 起源の計数率及び沈着量の算出

天然放射性核種の弁別方法は DOE が開発した MMGC 法 (Man Made Gross Count) を参考にした³⁾。本法は天然放射性核種のみを含む地域を測定して得られる γ 線スペクトルにおいて、放射性 Cs が放出する γ 線エネルギー範囲外である 1,400 keV～2,800 keV の計数率と全計数率との比 (*BG-Index*) が一定であることに着目し、天然放射性核種起源の計数率を推定するものである。天然放射性核種起源の計数率を弁別し、放射性 Cs に起因する空間線量率及び沈着量を求める方法の概要は以下の通りである。

- ① 有人ヘリモニタリングの機種または機体と RSI システムの組み合わせごとに東電福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs による影響がない地域をフライトして得られたデータを基に *BG-Index* を算出する。
- ② 実際のフライトデータの 1,400 keV～2,800 keV の計数率に *BG-Index* を乗じて天然放射性核種起源の計数率を計算し、これを全計数率から減算することで放射性 Cs 起源の計数率を推定する。
- ③ 放射性 Cs 起源の計数率に換算係数を適用して、放射性 Cs に起因する空間線量率に換算した上で地表面の放射性 Cs の沈着量に換算する。

BG-Index 算出に用いる γ 線スペクトルの ROI (Region of Interest) のイメージを Fig. 4-27 に示す。また、*BG-Index* の算出例を Fig. 4-28 に示す。本図に示したデータは、2011 年度に関西地方において、有人ヘリにより 1 秒ごとに測定した γ 線スペクトルから *BG-Index* を求め、その頻度を示したものである。このようにばらつきはあるものの、正規分布に近い形を示す。第 19 次モニタリング及び東日本第 15 次モニタリングで使用した有人ヘリ機種 (機体番号) と RSI システムの組み合わせごとに設定した *BG-Index*²⁸⁾ について Table 4-11 に示す。これらの数値を天然放射性核種起源の計数率を弁別するためのパラメータとして適用した。なお、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける放射性 Cs 沈着量の換算方法は、「令和 6 年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費 (東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約) 事業」¹⁶⁾ の手法にしたがった。

上記の放射性 Cs 起源の計数率及び地表面の放射性 Cs 沈着量の算出手順を以下に示す。また、放射性 Cs の沈着量を求める計算式を式 [3] に示す。

- ① 測定で得られた γ 線スペクトルから 1,400 keV～2,800 keV の計数率 (C_{BG}) を計算する。
- ② C_{BG} に *BG-Index* を乗じて天然放射性核種起源の計数率 (C_{nat}) を推定する。
- ③ 測定で得られた全エネルギー範囲の γ 線計数率 (C_{all}) から C_{nat} 、宇宙線に起因する γ 線計数率 (C_{cos}) 及び空气中ラドン子孫核種やヘリ機体に起因する γ 線計数率 (C_{self}) を差し引くことにより、放射性 Cs に起因する計数率 ($C_{Cs} = C_{all} - C_{nat} - C_{cos} - C_{self}$) を求め

る。

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

⑤ 式 [3] より、 D_{Cs} を「空間線量率－放射能換算係数」 (CF ($[\mu Sv/h]/[kBq/m^2]$); 4.6.2 項にて詳述する。) で除して地表面の放射性 Cs の沈着量 Rd (kBq/m^2) を求める。

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

ここで、

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

$$C_{Cs} = C_{all} - C_{nat} - C_{cos} - C_{self}$$

$$C_{nat} = C_{BG} BG-Index$$

である。なお、詳細は 4.12.節に述べるが、 CF の単位は本来 $[\mu Gy/h]/[kBq/m^2]$ であり、 $[\mu Sv/h]/[kBq/m^2]$ に換算するにあたり、 $Gy : Sv = 1 : 1.2$ とした。

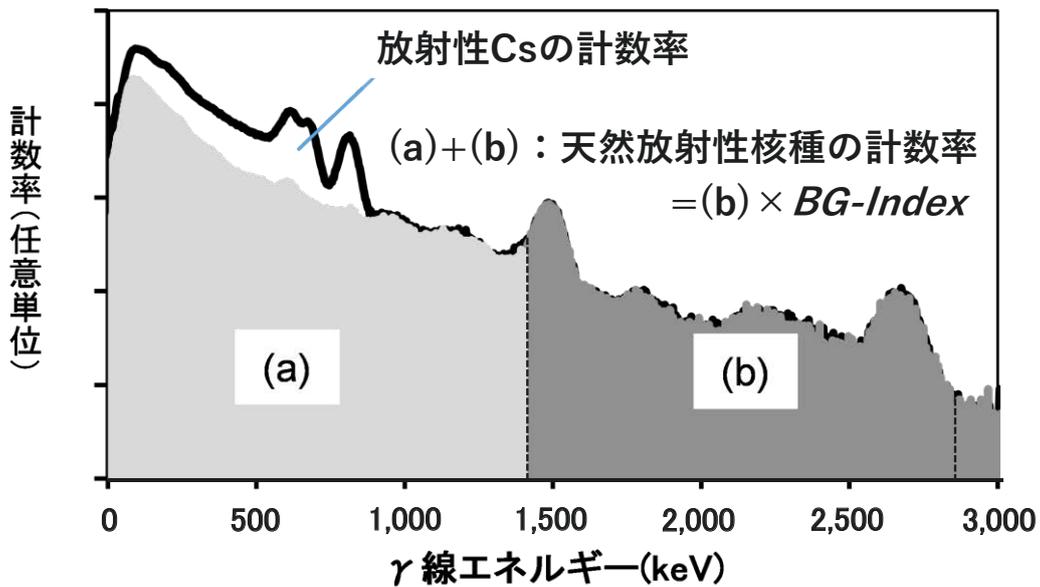


Fig. 4-27 放射性 Cs に起因する計数率の算出イメージ

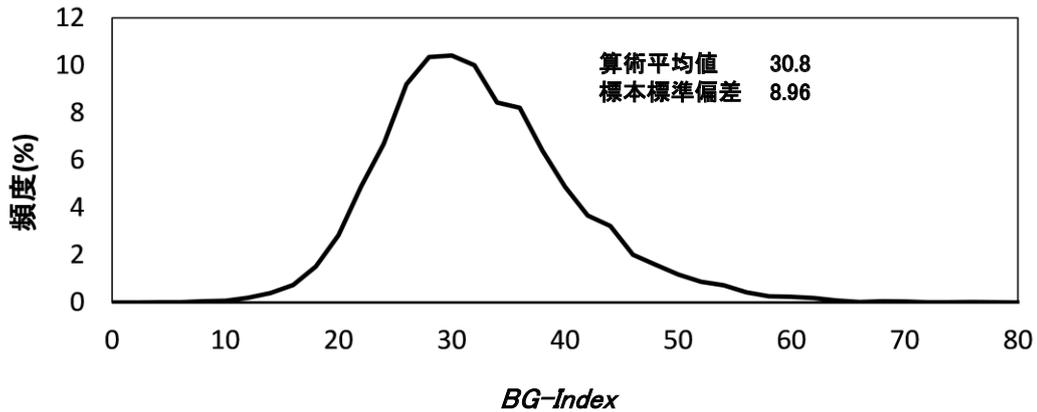


Fig. 4-28 *BG-Index* の算出例

(関西地方において1秒ごとに測定した γ 線スペクトルから求めた*BG-Index*と頻度の関係、全 16,000 データ : Bell430 (JA05TV) で取得したデータの一部)

Table 4-11 *BG-Index* 一覧

Helicopter (Body No.)	RSI System	Operation Company	<i>BG-Index</i>
Bell412 (JA6928)		AAC	30.3
Bell430 (JA05TV)	RSI 1	NNK	33.7
S-76 (JA6901)		AAC	27.6

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

4.6.2.空間線量率－放射能換算係数

本研究では、地上の放射性 Cs の沈着量に換算する「空間線量率－放射能換算係数」(*CF*)に、文献^{42),43)}に示されるデータを使用する。*CF*は、土壌への放射性 Cs の浸透度を示す重量緩衝深度 (β) によって異なった値が設定されている⁴²⁾。これまで、80 km 圏内外の航空機モニタリングにおいては、過去の解析結果との比較を考慮し $\beta = 1.0$ (g/cm²) のときの *CF* を継続的に使用している。一方、規制庁と原子力機構が行っている放射性物質分布状況等調査の結果²⁹⁾から、80 km 圏内の土壌において、重量緩衝深度 (β) が年々変化していることが報告されている。ここで調査されている β は、環境中での放射性 Cs の動態観測が目的であるため、人間活動による影響の少ない土壌を対象としている。一方、80 km 圏内外の有人ヘリ及び無人ヘリ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。このような測定対象の多面性や流動性を考えると β を固定することは合理的でないが、本研究では、従来との比較のために 1.0 とした場合について解析するとともに、 β に他の値を与えた場合に換算係数がどの程度

影響があるかを検討した。

Fig. 4-29 に文献^{42),43)}に示されている β と CF の関係について示す。本図で対数による近似曲線を記載したように、 β と CF は対数関係にある。具体例として、Cs-137 の場合、 $\beta = 1.0$ (g/cm²) では $CF = 0.00444$ 、 $\beta = 2.0$ (g/cm²) では $CF = 0.00372$ となる。同様に Cs-134 では、 $\beta = 1.0$ (g/cm²) のとき $CF = 0.00173$ 、 $\beta = 2.0$ (g/cm²) のとき $CF = 0.00144$ であり、いずれも β の増加に伴い CF が低下する。これらの値から、 $\beta = 1.0$ と $\beta = 2.0$ の場合で比較すると、両核種とも CF に約 16% 程度の差が生じることが分かる。このように、 β の設定により CF は変化するため、適切な β の設定を行って地上の放射性 Cs の沈着量への換算に適用することが望ましく、今後の課題であるといえる。

本報告における第 19 次モニタリング、東日本第 15 次モニタリング及び浜通り第 2 次無人ヘリモニタリングの基本的な解析方針として、Fig. 4-29 に示した β の設定値が及ぼす放射性 Cs 沈着量換算係数への影響は参考情報に留め、過去との比較を考慮して緩衝深度 $\beta = 1.0$ (g/cm²) の場合の換算係数^{42),43)}を適用した。ただし、第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングに関しては、これまでに実施してきた「原子力施設等防災対策等委託費及び放射性物質測定調査委託費 (東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約) 事業」における解析結果との一貫性を持たせるため、同事業で使用された $\beta = 4.49$ (g/cm²)¹⁶⁾ の場合の換算係数を適用した。

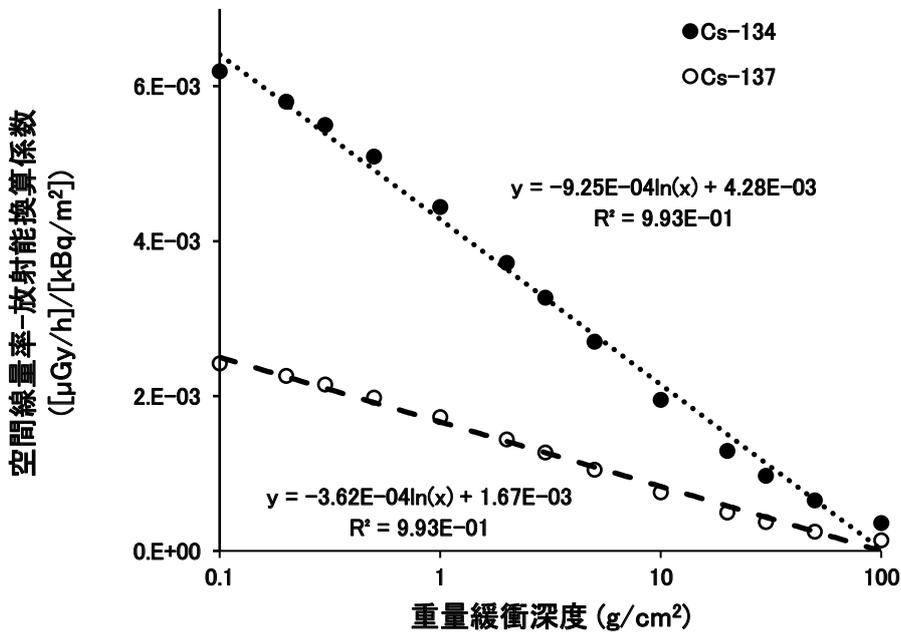


Fig. 4-29 重量緩衝深度 β と空間線量率-放射能換算係数 CF の関係
(文献^{42),43)}のデータを基に対数による近似曲線を表示)

4.7. 減衰補正

4.6節では、放射性Cs(Cs-134及びCs-137の合計)について、計数率から沈着量を求める方法を述べた。ここでは、Cs-134及びCs-137のそれぞれの物理減衰を考慮し核種ごとの沈着量を求める方法について記す。地表面から1mの高さの空間線量率からCs-134及びCs-137の放射能を評価する際には、重量緩衝深度 $\beta = 1.0$ (g/cm²)の場合のCFを適用してCs-137の放射能濃度を求め、さらにCs-134 / Cs-137濃度比を用いて、Cs-134の放射性物質濃度に換算した。

データ取得完了日におけるCs-137の濃度(C_{Cs-137})は、式[4]に示すように、航空機モニタリングデータから得られた全空間線量率から天然放射性核種に起因するバックグラウンド空間線量率を差し引いた空間線量率($E_{Cs-137+Cs-134}$ (μSv/h))に、Cs-137濃度へ換算するための係数(A)を乗じて算出した。Cs-134の濃度(C_{Cs-134})は、式[5]に示すように、Cs-137濃度(C_{Cs-137})にデータ取得完了日におけるCs-134 / Cs-137濃度比(B)を乗じて求めた。

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

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

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

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

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

Cs-134 / Cs-137濃度比(B)は2011年8月に文部科学省が行った福島県で実施した50地点以上の可搬型ゲルマニウム半導体検出器(以下、可搬型Ge検出器)による測定データ⁴⁴⁾に基づき、同年8月13日時点でのCs-134 / Cs-137 = 0.917 (B_0)を基準として設定した。この基準日からデータ取得完了日まで両核種の物理減衰を考慮し、当該日の濃度比へ補正した。

なお、本報告書5章で示す評価日基準の空間線量率は、以下の手順により算出した。

- ① 式[4]、式[5]により、各測定日のCs-137及びCs-134濃度を求める。
- ② 式[6]を用いて、①で求めた濃度をデータ取得完了日(評価日)に合わせて物理減衰補正する。
- ③ 減衰補正後の濃度をCFにより空間線量率に換算し、バックグラウンド空間線量率を加算する。

本手法では、最終的な空間線量率を示す際に、天然放射性核種に起因するバックグラウンド空間線量率を再度加算している。そのため、5章の空間線量率マップは放射性Cs由来の寄与に天然放射性核種の寄与を加えた空間線量率を示している。

4.8. 検出限界値

有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングにおける計数率から全空間線量率及び放射性Csの沈着量への換算式をそれぞれ式[7]及び式[8]に示す。本式を基に、検出限界値及び信頼性について検討を行った。前述した通り、式[8]におけるCFの単位は本来[μGy/h]/[kBq/m²]であるが、[μSv/h]/[kBq/m²]に換算するにあたり、Gy:Sv=1:1.2とした。

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

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

ここで、式[7]については、

D : 全空間線量率 (μSv/h)

C_{all} : 全計数率 (s⁻¹)

C_{cos} : 宇宙線に起因するγ線計数率(s⁻¹)

= 宇宙線に起因するγ線計数率 (s⁻¹) (有人ヘリモニタリングでのみ考慮)

C_{self} :

有人ヘリモニタリング:

空气中ラドン子孫核種やヘリ機体に起因するγ線計数率 (s⁻¹)

無人ヘリモニタリング:

LaBr₃(Ce)検出器の自己汚染に起因する計数率 (s⁻¹)

CD : 空間線量率換算係数 ([s⁻¹]/[μSv/h])

AF : 空気減弱係数 (m⁻¹)

H_{std} : 基準対地高度 (有人ヘリモニタリング: 300 m、無人ヘリモニタリング: 80 m)

H_{m} : 測定対地高度 (m)

であり、さらに式[8]については、

Rd_{134} : Cs-134の沈着量 (Bq/m²)

(以下、Cs-137の場合は134を137に読み替える。)

C_{nat} : 天然放射性に由来するγ線計数率(s⁻¹)

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

CF : 空間線量率 – 放射能換算係数 ($[\mu\text{Sv/h}]/[\text{Bq/m}^2]$)^{42),43)}

$R_{\frac{134}{134+137}}$: 全放射性 Cs 放射能に対する Cs-134 の放射能割合

DC_{134} : 減衰補正係数

$= \exp(-\lambda\tau)$ (λ : Cs-134 の崩壊定数、 τ : 2011 年 8 月 13 日からの経過時間)

である。

4.8.1. 空間線量率の検出限界値

有人ヘリモニタリングにより算出される空間線量率は BG_{self} と BG_{cos} に影響を受ける。なお、無人ヘリモニタリングでは 4.3.2 項で述べたように、 BG_{cos} の影響は無視できる。これまでの有人ヘリモニタリングの測定結果^{18),22),23),24),25),26),27),28),29)}を見ると、 C_{cos} は概ね 200 s^{-1} ~ 500 s^{-1} の範囲に入ることが分かっている。また、 C_{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 s^{-1} であったことから、バックグラウンド計数率 (N_B) を $N_B = C_{\text{cos}} + C_{\text{self}} = 900 \text{ s}^{-1}$ として検出限界値の評価を行った。

一般的に、検出限界値を求める際には、バックグラウンド計数率 (N_B) の標本標準偏差 (σ) を式 [9] に示した Currie の式⁴⁵⁾に当てはめ、検出限界値 (N_D) を算出する。

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

有人ヘリモニタリングの場合、 N_B を 900 s^{-1} とすると、 N_D は 142 s^{-1} となる。これに、RSI システムの標準的な CD ($13,000 [\text{s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$) から RSI システムによる空間線量率の検出限界値を計算すると、約 $0.01 \mu\text{Sv/h}$ となる。無人ヘリモニタリングの場合も同様に計算した結果、空間線量率の検出限界値は約 $0.04 \mu\text{Sv/h}$ と求まっている⁴⁶⁾。

4.8.2. 放射性 Cs の沈着量の検出限界値

放射性 Cs の沈着量は、 γ 線スペクトルのデータからバックグラウンド (有人ヘリモニタリングの場合は宇宙線、空气中ラドン子孫核種、有人ヘリ機体のバックグラウンド計数率、無人ヘリモニタリングの場合は $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の自己汚染に起因する計数率を含む。) を差し引き求めている。放射性 Cs の沈着量の検出限界値を求める上で、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。これを計数率の検出限界とし、例えば有人ヘリモニタリングの場合、RSI システムの標準的な CD ($13,000 [\text{s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$) 及び $\beta = 1.00 (\text{g/cm}^2)$ 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。有人ヘリモニタリングの場合では、バックグラウンド計数率を標準的な

3,000 s⁻¹とし計算を行った。この条件を、式 [9] にあてはめると、767 s⁻¹となる。これに、標準的な CD (13,000 [s⁻¹]/[μSv/h]) を用いて空間線量率に換算する。さらに、Cs-134 と Cs-137 の組成比を本報告におけるモニタリングが完了した年月日である 2024 年 (令和 6 年) 12 月 19 日における 0.014 とし、β = 1.00 における CF (Cs-134 : 5.33 × 10⁻³ [μSv/h]/[kBq/m²], Cs-137 : 2.08 × 10⁻³ [μSv/h]/[kBq/m²]) を用いて、放射性 Cs の沈着量の検出限界値を求めた。なお、CF の単位を [(μGy/h)]/[kBq/m²] から [(μSv/h)/(kBq/m²)] に換算する際、Gy : Sv = 1 : 1.2 とした。この結果、放射性 Cs の沈着量の検出限界値は、約 28 kBq/m² と評価できた。無人ヘリモニタリングの場合も同様に計算した結果、放射性 Cs の沈着量の検出限界値は約 4 kBq/m² と評価された³¹⁾。これら放射性 Cs の沈着量の検出限界値を前項の空間線量率の検出限界値とともに Table 4-12 にまとめた。

ここで参考情報として、第 19 次モニタリングと同時期に規制庁と原子力機構により実施された、可搬型 Ge 検出器による測定結果から評価された β = 4.49 (g/cm²)¹⁶⁾ を適用した場合を考える。Fig. 4-29 に示した近似曲線式に β を代入し、[(μSv/h)/(kBq/m²)] に換算して得られる CF は、Cs-134 : 3.51 × 10⁻³ [μSv/h]/[kBq/m²]、Cs-137 : 1.37 × 10⁻³ [μSv/h]/[kBq/m²] である。これら CF を基に、上記と同様な仮定の下で算出される放射性 Cs の沈着量の検出限界値は、例えば有人ヘリモニタリングでは約 42.1 kBq/m² となり、β = 1.00 (g/cm²) の場合より 1.5 倍程度大きくなる。このように、β の設定値が航空機モニタリングにおける放射性 Cs の検出限界値に及ぼす影響は比較的大きい。以上のことから、放射性 Cs の分布状況を正確に把握するには、β の適切な設定が肝要である。

Table 4-12 RSI システムの検出限界値

放射線計測システム (搭載航空機)	検出限界値	
	地表面から 1 m の高さの 空間線量率 (μSv/h)	地表面の放射性 Cs 沈着量 (kBq/m ²)*
RSI 1 (有人ヘリ)	0.01	27.8
LaBr ₃ (Ce) (無人ヘリ)	0.04	4

*BG 計数率は 3,000 s⁻¹ と仮定した。

基準年月日 : 2024 年 12 月 19 日

4.9. 不確かさ

有人ヘリ及び無人ヘリ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、計数率から全空間線量率を求める式 [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：有人ヘリモニタリングの場合、Table 4-7 に示したように、固定パラメータに対して、測定状況により 20% 程度の誤差が生じる。本測定の実験を重ねてきた現在では、その不確かさは小さくなってきている。
- ・ 高度補正係数 *HF* の選択：*CD* と同様に、テストラインフライトまたはテストサイト定点ホバリングデータ測定得状況により 5% 前後の不確かさが生じる。
- ・ 高度情報に係る誤差：海拔高度は GPS で測位しているが、衛星の位置等の測位状況によっては、海拔高度に最大 30 m 程度の誤差が生じる。本誤差を低減する手法について検討できておらず、今後の課題である。
- ・ ラドン子孫核種の影響：日本においては、特に冬場に大陸由来のラドン子孫核種の影響が比較的大きいことが知られている。有人ヘリモニタリングでは空气中ラドン子孫核種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。

これらの要因が空間線量率の評価に影響を与えるが、本報告書では各要因を統合した厳密な不確かさ解析は実施していない。一方で、参考情報として、本年及び過去年度¹⁸⁾²⁹⁾の航空機モニタリングでは、地上測定値との比較において航空機モニタリングによる空間線量率が高めとなる傾向が確認されている(詳細は 4.11 節に示す)。本傾向は、上記の誤差要因が複合的に影響していると考えられる。

4.10.補間方法

航空機モニタリングにより得られる測定データは、GPS で記録した位置における値であり、これらのデータだけでは連続的な放射線分布を把握することが難しい。測定エリア全域の空間線量率の分布を連続的にマッピングするためには、測定データのない地点における値を推定するための補間が必要となる。有人ヘリモニタリング及び無人ヘリモニタリングともに測定データを補間し連続的な分布マップを作成している。

国際原子力機関 (IAEA) は空間線量率や放射性物質沈着量を作成する際の一般的な指針として、IDW (Inverse Distance Weighted : 逆距離加重法)、クリギング (Kriging)、スプライン (Spline)、Natural Neighbor 等の複数の補間方法を例示している⁴⁷⁾。ただし、これらの手法の中から特定の方法を標準として指定しているわけではない。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、それ以後の解析にも同手法を用いた。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に対し、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を重みとして与え、その加重平均により補間地点の推定値を求める方法である。IDWによる補間地点における推定値は以下の式 [10] で表される⁴⁸⁾。

$$\hat{z}_0 = \frac{\sum_{i=1}^s d_{NT}(p_0, p_i)^{-\lambda} z_i}{\sum_{i=1}^s d_{NT}(p_0, p_i)^{-\lambda}} \quad [10]$$

ここで、

\hat{z}_0 : 補間地点における空間線量率の推定値

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

z_i : 各サンプル点を持つ実測値

s : 補間地点から近傍のサンプル点

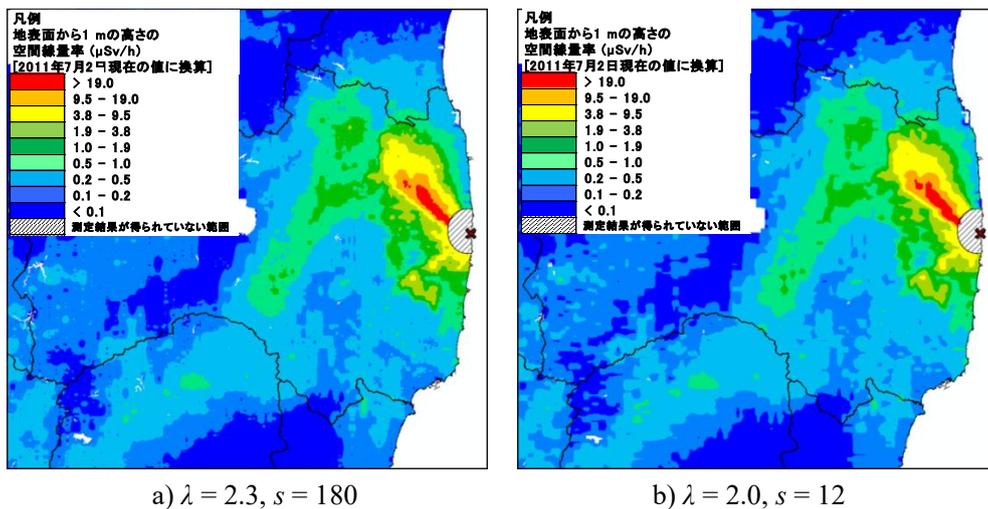
λ : 距離による重みの減衰を制御する乗数 (一般に2が多く用いられる)

である。

IDWによる補間の条件として「補間地点とサンプル点間の距離が大きくなるにつれて、その補間地点においてサンプル点が推定値に与える影響が減衰していく」ことが前提になる。そのため、推定する(重み付け平均)値は補間地点から近傍 s 点の最高値より大きくなり、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、有人ヘリモニタリング及び無人ヘリモニタリングともに、 λ として 2.3 を、 s として 180 を適用した。Fig. 4-30 にパラメータ設定の異なる場合の空間線量率マップを示す。 λ を 2.3、 s を 180 とした Fig. 4-30 a) と λ を 2.0、 s を 12 とした Fig. 4-30 b) を比べると、両者とも分布傾向に顕著な違いはないが、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。

補間に先立ち、測定データは一定の空間解像度でメッシュ化して扱うこととした。Fig. 4-4 に示した通り、有人ヘリモニタリングでは対地高度約 300 m、無人ヘリモニタリングでは対地高度約 80 m から測定を実施し、それぞれ、ヘリ直下の地上を中心とする半径約 300 m、半径約 80 m 円内における放射線量の平均値が測定される。空間線量率等のマッピングにおいては、有人ヘリによる測定範囲が広く、これを基準として考えるのが妥当と考えられること、地域基準メッシュ (1 km) 内に収めることを考慮して、メッシュサイズは 250 m とした。



*第 3 次モニタリングの結果を使用

Fig. 4-30 IDW に入力するパラメータとマップの関係

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

4.11.地上測定値との比較

有人ヘリモニタリング結果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かつ有人ヘリモニタリング測線近傍の地点を選定し、全 300 地点 (80 km 圏内 : 50 地点、80 km 圏外 : 250 地点) において地上測定を行った。ただし、80 km 圏外で行った地上測定データの内 1 点は、有人ヘリモニタリングの対象区域外に位置していたため、本節で行う比較対象から除外した。地上測定の方法は 4.3 節の「テストポイントフライト」で記載したものと同一である。また、測線と地上測定地点間の水平距離は概ね 50 m 以内である。Fig. 4-31 に有人ヘリモニタリングによる空間線量率と地上測定値との比較を示す。比較は散布図 (左) 及び相対誤差 ((有人ヘリモニタリングによる空間線量率 - 地上測定値) / 地上測定値) のヒストグラム (右) で行った。ここで、相対誤差が 0 であれば有人ヘリモニタリングによる空間線量率と地上測定値が一致し、正であれば有人ヘリモニタリングによる空間線量率の方が大きく、負 (ただし、-1.0 が最低値である。) であれば有人ヘリモニタリングによる空間線量率の方が小さく評価されたことを意味する。散布図を見ると、91% (全 299 点中 272 点) のプロットがファクター2 に収まり、地上測定値と非常に良く整合した。相対誤差のヒストグラムは-0.5~0.5 に主要な分布がある一方で、0.5 以上の領域にも分布しており、弱いながらも多峰性が見られた。相対誤差が-0.5~0.5 から外れたデータの大部分は東日本第 15 次モニタリングにおいて山間部で測定されたものであり、Bell412 (JA6928) で測定した範囲については栃木県西部から群馬県東部にかけて広がる足尾山地の周辺、Bell430 (JA05TV) で測定した範囲については福島県西部の越後山脈の周辺であった。つまり、山間部での有人ヘリモニタリングでは、空間線量率が地上測定値の 2 倍近くとなる場合がある。これは、地形が複雑な地域では「地表面が平坦で放射能分布が一様」という有人ヘリモニタリングにおける空間線量率換算の前提が成立しにくく、谷地形からの寄与などが加わるためと考えられる。

また、他の信頼のできる地上測定値として、同時期に実施された規制庁と原子力機構が行っている、福島県内における NaI(Tl)検出器 (アロカ株式会社製 TCS-172B) を用いた地上測定値及び可搬型 Ge 検出器 (Canberra 製 Falcon 5000) を用いた Cs-137 の沈着量の地上測定値¹⁶⁾を用いて、Fig. 4-31 と同様にして有人ヘリモニタリング及び無人ヘリモニタリングによる換算結果と比較した。なお、可搬型 Ge 検出器による測定値から地表面の放射性 Cs 沈着量に換算する際に用いる重量緩衝深度 (β) として 4.49 (g/cm²) が設定されている¹⁶⁾。空間線量率の比較及び放射性 Cs の沈着量の比較について、有人ヘリモニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング、第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの順に Fig. 4-32~Fig. 4-34 及び Fig. 4-35~Fig. 4-37 にそれぞれ示す。

散布図においてファクター2 を指標とすると、空間線量率について、有人ヘリモニタリングでは約 91% (全 4,775 点中 4,362 点)、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリングでは 89% (全 168 点中 149 点)、第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングでは約 80% (全 61 点中 49 点) が

ファクター2 に収まった。Cs-137 沈着量について、有人ヘリモニタリングでは約 45% (全 168 点中 76 点)、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリングでは約 46% (全 11 点中 5 点)、第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングでは約 33% (全 3 点中 1 点) がファクター2 に収まった。空間線量率に関しては有人ヘリモニタリング及び無人ヘリモニタリングとも、換算値はよく地上測定値を再現できているが、Cs-137 沈着量に関してはファクター2 を逸脱するケースが特に地上測定値が 100 kBq/m² 以下の領域で多く見られる。このことから、有人ヘリモニタリングによる Cs-137 の沈着量の換算値は、100 kBq/m² 以下の領域において妥当性に乏しいと考えられる。なお、無人ヘリモニタリングについては、Cs-137 沈着量の比較点数が極めて限られており、本結果から一般的な傾向を把握することは難しい。

次に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、有人ヘリモニタリングでは、ピークは 0 付近に位置しているように見えるが、-1.0 から 0.0 までの累積頻度は約 39% であり、0 以上の領域に頻度分布がやや偏っている。また平均値は 0.24、中央値は 0.10 であったことから、正規分布からはやや逸脱した分布であり、有人ヘリモニタリングによる空間線量率の方が地上測定値よりも 20% から 30% 程度大きくなる傾向にあることが分かった。浜通り第 2 次無人ヘリモニタリングについては、平均値は 0.29、中央値は 0.16 であり、正規分布からはやや逸脱した分布であることが窺われ、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリングによる空間線量率の方が地上測定値よりも 15% から 30% 程度は大きくなる傾向にあることが分かった。第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングについては、平均値は 0.53、中央値は 0.37 と地上測定値よりも大きい側に偏ったが、これらの大きい側に偏ったデータは、NaI(Tl)検出器による地上測定値が 1 μSv/h 以下の比較的低線量率の地点のものがほとんどであった。また、有人ヘリモニタリングによる Cs-137 沈着量については相対誤差が広く分布しており、2.0 を上回る領域 (有人ヘリモニタリングの方が 3 倍以上過大評価) に 30% 程度の頻度が認められた。加えて、平均値は 2.06 であるのに対し中央値が 0.37 であり、有人ヘリモニタリングによる Cs-137 沈着量の換算値の方が明らかに大きくなる方向に偏っていることが分かった。浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングについては上述した通り、比較点数が極めて限られており、一般的な傾向を把握することは難しい。

以上をまとめると、空間線量率及び Cs-137 の沈着量の地上測定値に対して、有人ヘリモニタリング及び無人ヘリモニタリングの換算値は過大評価となる傾向が見られた。空間線量率については、相対誤差の平均値及び中央値から、有人ヘリでは概ね 20%～30% 程度、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリングでは 15%～30% 程度、第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングでは 30%～50% 程度、地上測定値より高く評価される傾向が確認された。一方、Cs-137 沈着量については地上測定値が 100 kBq/m² 以下の領域を中心にファクター2 から外れるケースが多く、特に有人ヘリモニタリングでは相対誤差の中央値が約 0.37、平均値が約 2.06 と、地上測定値より大きい側に強く偏ることが分かった。この過大評価には、除染等により生じた局所的な空間線量率の低下を航空機モニタリングでは十分に捉えられない

点に加え、航空機モニタリングは比較的広いエリアの測定平均値を捉えるのに対し、NaI(Tl)検出器や可搬型 Ge 検出器による地上測定では局所域を測定しているという違いが影響していると考えられる。また、全計数率に換算係数等を適用して空間線量率及び Cs-137 の沈着量を求める手法そのものが複数の不確かさを含むこと、森林域や都市域の重量緩衝深度 β を 1.0 (g/cm²) とせざるを得ない地域が広いことも要因と考えられる。さらに、第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングでは、環境中での放射性 Cs の動態に基づいて β を設定したものの、地上測定値をどの程度再現できるかについては、 β の設定値の見直しによって改善が期待できる余地がある一方で、現時点では評価点数が限られており一般化はできない。以上より、有人ヘリモニタリングは空間線量率に関して比較的良好に地上測定値を再現するものの、沈着量の換算精度については改善の余地が大きい。今後、地上測定値との比較を継続するとともに、土地利用区分等を考慮して β の設定やその他の補正因子の改善を検討することで、より精度の高い沈着量推定が可能になると期待される。なお、地上測定値との比較については、以下のような要因を考慮しなくてはならない。

- ① 測定対象の範囲の違い：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。実際に測定される範囲は、有人ヘリモニタリングでは地上の半径 300 m 円内、無人ヘリモニタリングでは地上の半径 80 m 円内における放射線量の平均値となる。一方、地上測定による測定範囲は半径 30 m 程度の円の放射線量の平均値となる。よって、地上の放射線分布が一様の場所では整合しやすいが、地上の空間線量率の分布が均一でない場所では、測定結果が整合しにくいと考えられる。
- ② 周辺からの影響：地上の測定場所の近傍に大きな建物や森林等がある場合には、建物や樹木に沈着している放射性物質が地上測定に影響する可能性がある。また、上空で測定する場合においては、建物や森林等が地表面からの放射線を遮へいするため、単純に比較できない場所がある。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が、上記の影響を免れない場所も一部含まれている。

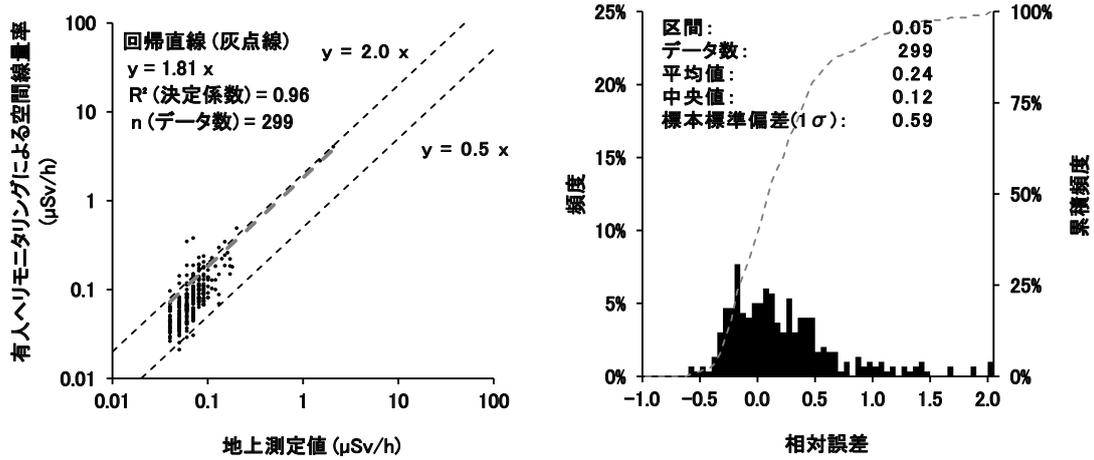


Fig. 4-31 測線近傍における地上測定値と有人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較
(左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

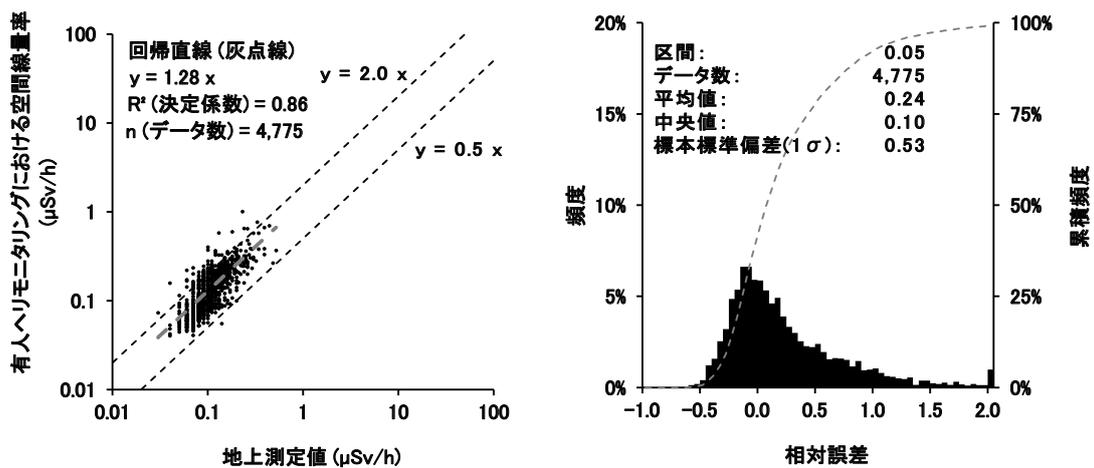


Fig. 4-32 ランダムな位置における地上測定値と有人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較
(地上測定値は原子力規制庁事業¹⁶⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

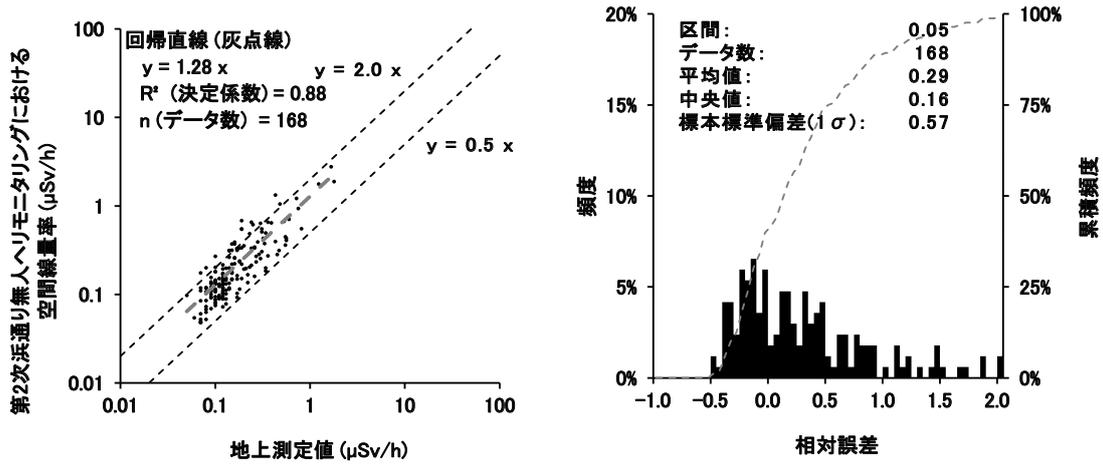


Fig. 4-33 ランダムな位置における地上測定値と浜通り第2次無人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較

(地上測定値は原子力規制庁事業¹⁶⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

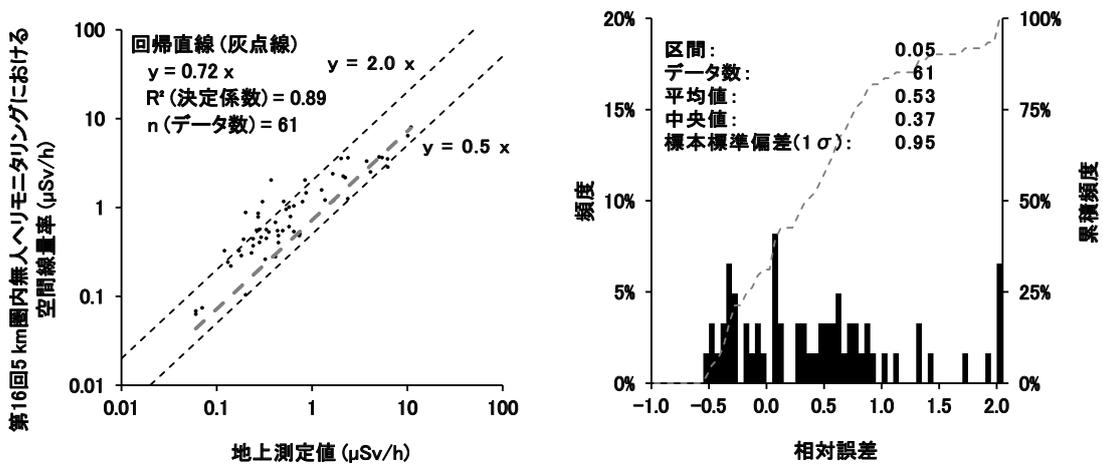


Fig. 4-34 ランダムな位置における地上測定値と第16回5km圏内無人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較

(地上測定値は原子力規制庁事業¹⁶⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

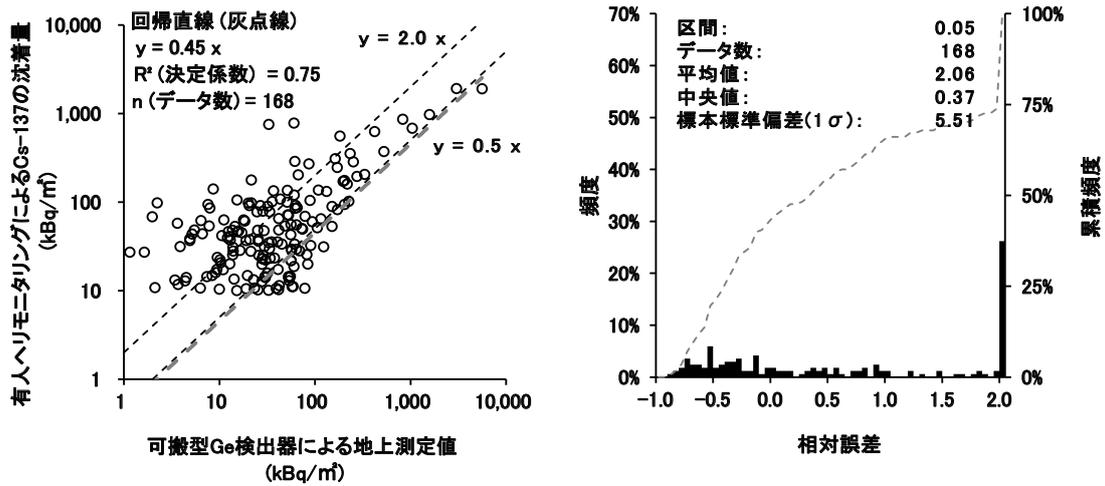


Fig. 4-35 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と有人ヘリモニタリングによる Cs-137 沈着量の比較

(地上測定値は原子力規制庁事業¹⁶⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

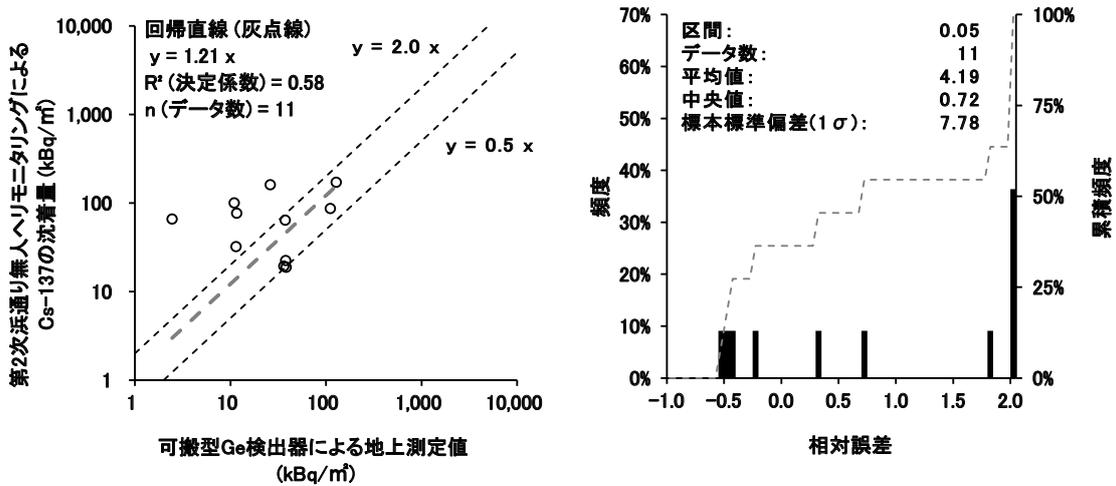


Fig. 4-36 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と浜通り第 2 次無人モニタリングによる Cs-137 沈着量の比較

(地上測定値は原子力規制庁事業¹⁶⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

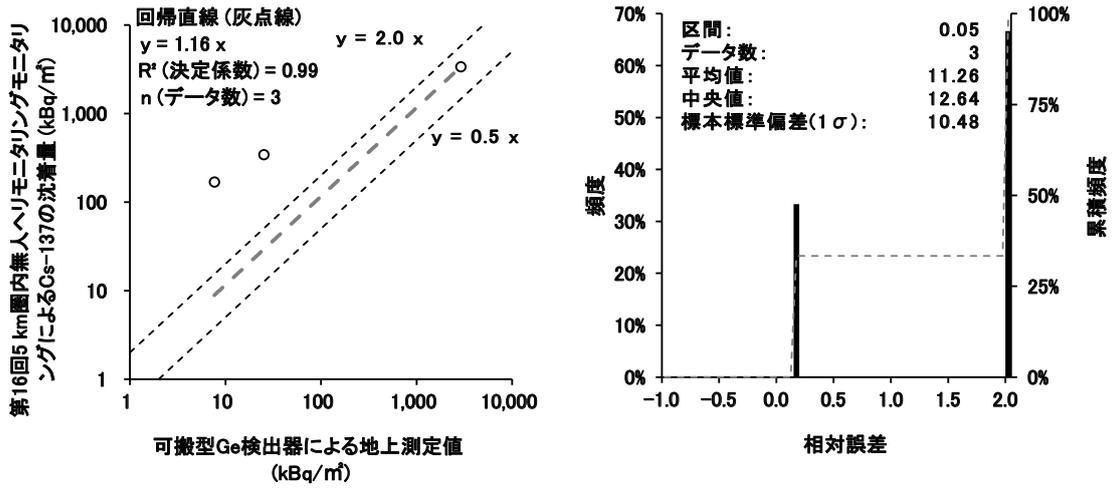


Fig. 4-37 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と第 16 回 5 km 圏内無人モニタリングによる Cs-137 沈着量の比較

(地上測定値は原子力規制庁事業¹⁶⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

4.12. 有人ヘリモニタリングにおける天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの作成

有人ヘリモニタリングでは、空間線量率マップの解釈を補助する目的で、天然放射性核種(主として K-40)に由来する空間放射線量率を推定し、放射性 Cs 由来の成分と区別したマップを作成している。天然放射性核種マップの作成手法は既に開発及び運用されており²⁰⁾本年度もその手法を踏襲した。その概要を以下に示す。

有人ヘリモニタリングで使用している RSI システムは γ 線のスペクトルを取得するため、原理的にはエネルギーに基づいて天然放射性核種と放射性 Cs の寄与を弁別することが可能である。しかし、放射性 Cs の沈着量が大きい地域では、K-40 が放出する 1,461 keV のピークに対し、Cs-134 の 1,365 keV (放出率 3.0%) のピークや散乱成分が重畳し、NaI(Tl)検出器のエネルギー分解能では両ピークを十分に分離できないことが課題であった。Fig. 4-38 に典型的な γ 線スペクトル例を示す。このようなピーク干渉を補正して天然放射性核種成分を抽出するため、関数適合法を用いたピークフィッティング手法が過年度に開発された。本年度の解析でも同手法を適用し、K-40 を含む天然放射性核種由来の空間線量率マップを作成した。同手法の詳細(ピークフィッティング式、パラメータ推定方法等)については文献²⁰⁾を参照されたい。

天然放射性核種由来の空間線量率を推定するにあたり、1,400 keV~2,800 keV の高エネルギー領域の計数率が比較的小さいことから、検出限界を下げる目的で、積算計数率に対し 21 点(21 秒)の移動平均処理を行った。有人ヘリコプターの平均移動速度を約 50 m/s とすると、移動平均が反映する実質的な空間的広がり約 1 km となる。また、このエネルギー領域に対する空気減弱係数 AF は、2014 年度のテストラインフライト結果から求めた値²⁰⁾(Table 4-13)を 2024 年度(令和 6 年度)も踏襲した。1,400~2,800 keV の平均エネルギーは通常的全エネルギー領域(30 keV~2,800 keV)よりも高いため、空気による減弱は相対的に小さく、その結果として AF の値も小さくなる。CD については、2012 年度以降のデータを用いてヘリ機種ごとの地上測定値との整合性を確認した(Fig. 4-39 (Bell412)、Fig. 4-40 (Bell430)及び Fig. 4-41 (S-76))ところ、空間線量率依存性は認められなかったため、従来と同一の固定値(Table 4-7)を使用した。空間線量率の単位については、2014 年度²⁰⁾と同様、航空機モニタリングで算出される値($\mu\text{Sv/h}$)を空気吸収線量率($\mu\text{Gy/h}$)に換算するため、1.2 で除する処理を行った。以下では、 $\mu\text{Gy/h}$ 単位に換算された値を「空間放射線量率」と呼ぶ。

以上の手法を第 19 次モニタリング及び東日本第 15 次モニタリングデータに適用し、天然放射性核種由来の空間放射線量率マップを作成した。一方、無人ヘリモニタリングに使用している LaBr₃(Ce)検出器については、本手法に必要なパラメータの算定が困難なため、現時点では本手法を適用できない。

本手法によって作成した、天然放射性核種由来の空間放射線量率マップ及び放射性 Cs 由来の空間線量率マップの一例を Fig. 4-42 に示す。本手法及びその解釈方法は過年度に確立

されたものであり、その妥当性については文献²⁰⁾を参照されたい。本年度は、この確立された手法を踏襲し、天然放射性核種由来の空間放射線量率マップを作成した。本手法の妥当性を確認するため、可搬型 Ge 検出器により評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率¹⁶⁾と有人ヘリモニタリングの値を比較した (Fig. 4-43)。可搬型 Ge 検出器による測定結果の内、降雨の影響等で空気カーマ率を算出できなかった地点及び航空機モニタリング範囲外の地点を除外し、最終的に 285 点を比較に用いた。散布図 (Fig. 4-43 (左)) では、約 92% (全 285 点中 261 点) がファクター2 に収まり、両者は概ね良好に一致した。Fig. 4-43 (右) に示した相対誤差 ((有人ヘリモニタリングの値 - 可搬型 Ge 検出器の値) / 可搬型 Ge 検出器の値) は有人ヘリモニタリングが大きく算出される傾向があり、平均値 0.28、中央値は 0.13 であったが、絶対値の差の平均は 0.01 $\mu\text{Gy/h}$ 程度と小さく、実用上は同等とみなせる。

以上のことから、過年度に導入した関数適合法を用いることで、放射性 Cs 由来成分を十分に弁別し、天然放射性核種由来の空間放射線量率を妥当な精度でステイできていると考えられる。

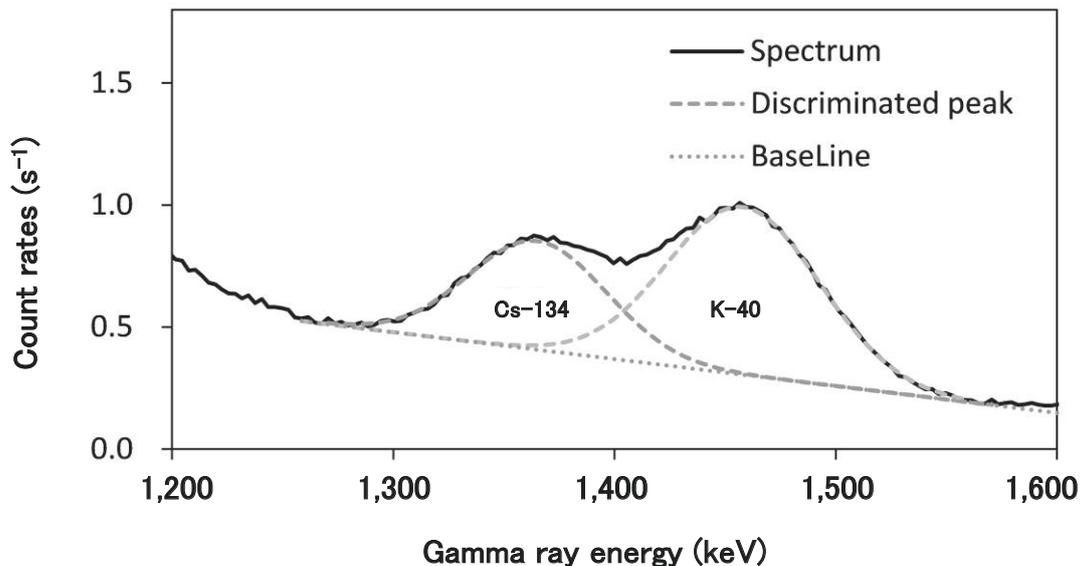


Fig. 4-38 関数適合法を用いた Cs-134 と K-40 の弁別の例

Table 4-13 使用した空気減弱係数 AF (m^{-1}) のまとめ
 (表中の SD は各パラメータの標本標準偏差 (1σ) である。)

Helicopter	AF (1,400 keV - 2,800 keV)	Number of Data	AF (30 keV - 2,800 keV)	Number of Data
Bel412 (JA6928)	-0.00580 ± 0.00080	11	-0.00720 ± 0.00042	21
Bel430 (JA05TV)	-0.00600 ± 0.00102	8	-0.00720 ± 0.00040	35
S-76 (JA6901)	-0.00591	2	-0.00720	2

※誤差は 1σ (標準偏差) を示す。

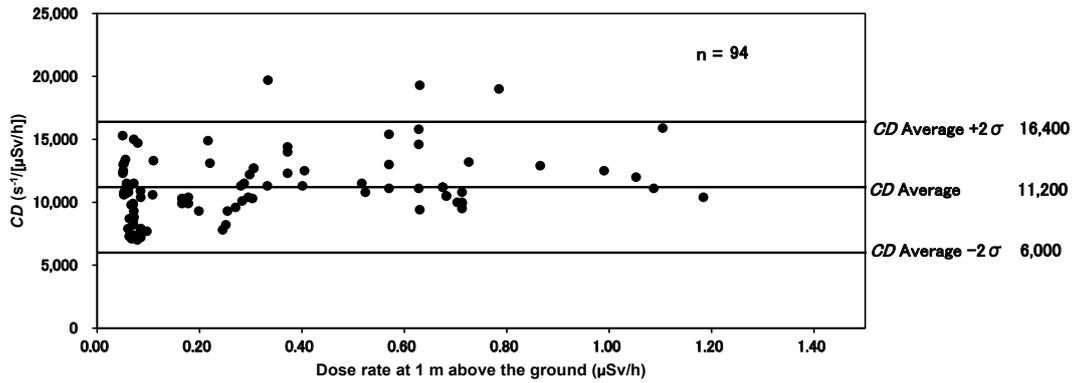


Fig. 4-39 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell412)
(本図中の σ は CD に対する標本標準偏差である。)

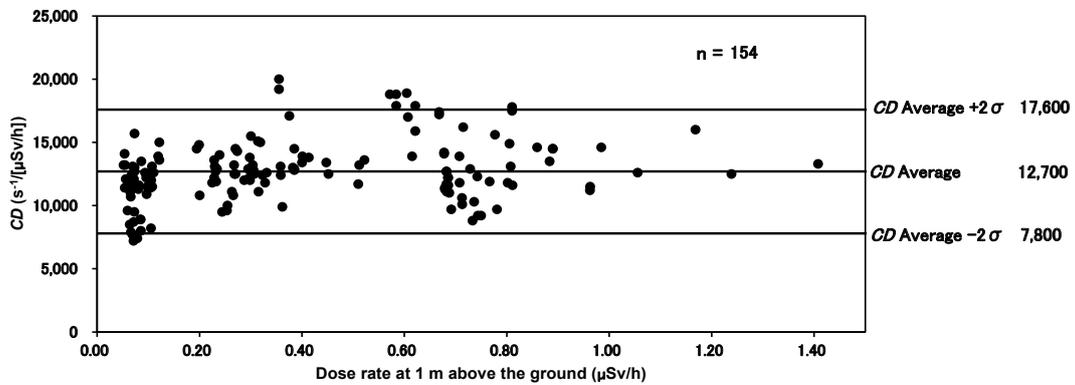


Fig. 4-40 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell430)
(本図中の σ は CD に対する標本標準偏差である。)

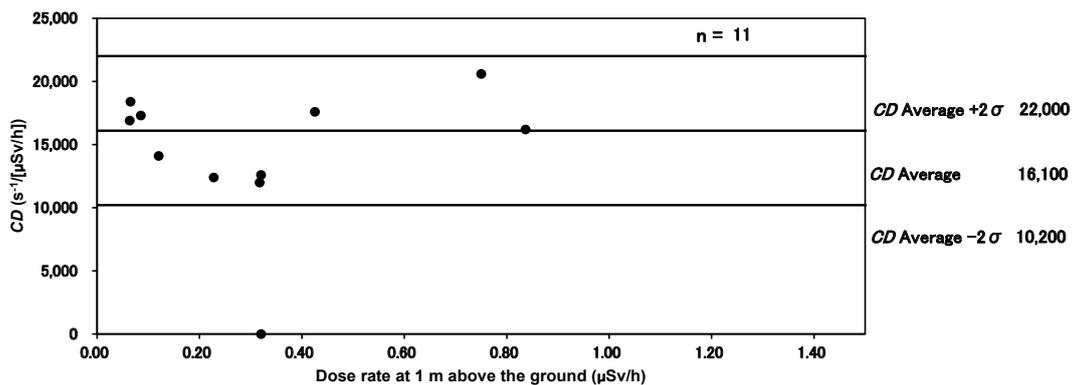
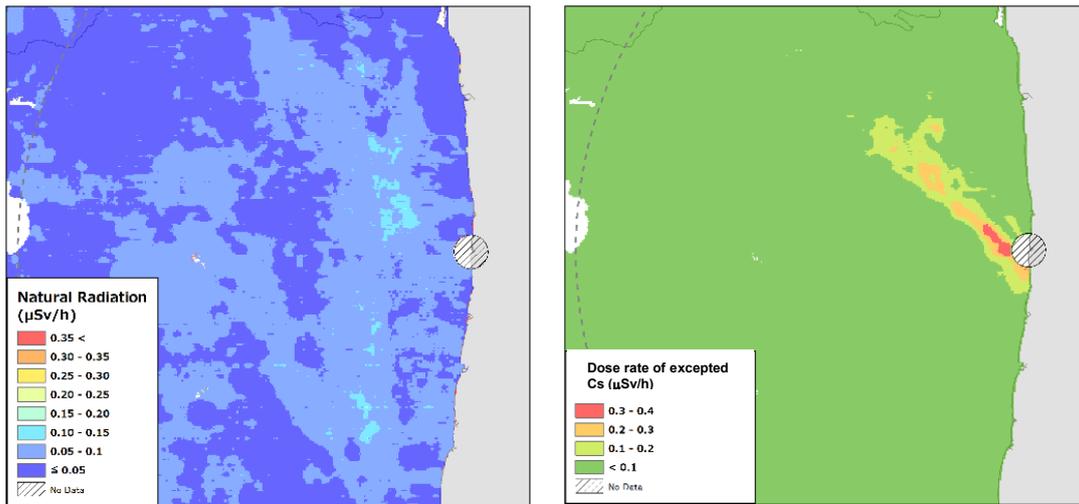


Fig. 4-41 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (S-76)
(本図中の σ は CD に対する標本標準偏差である。)



天然放射性核種由来の
空間放射線量率マップ

放射性 Cs 由来の
空間放射線量率マップ

Fig. 4-42 東電福島原子力発電所周辺における天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの作成例

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

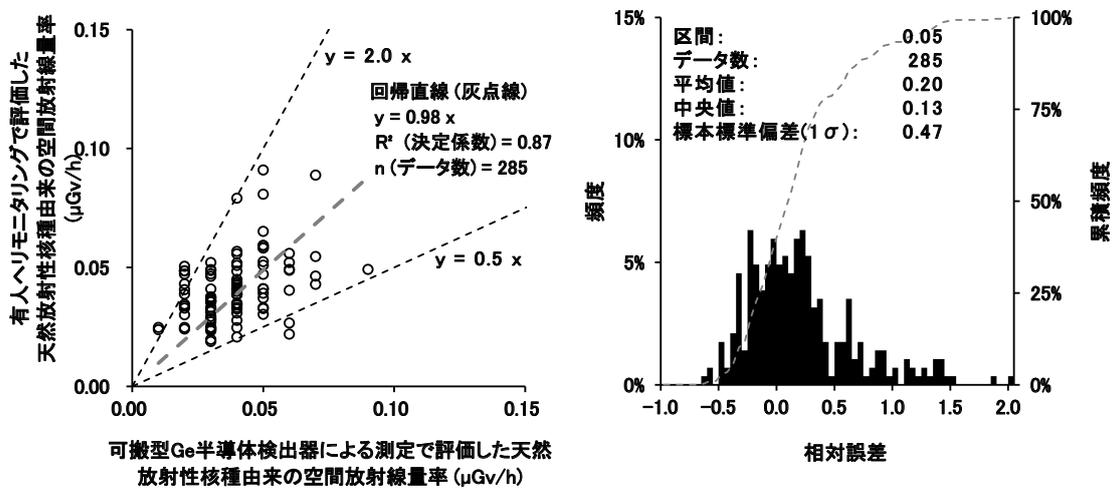


Fig. 4-43 可搬型 Ge 検出器による測定で評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率と有人ヘリモニタリングで評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率との比較

(左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

5. 有人ヘリ及び無人ヘリモニタリング結果

本章では有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングのフライト実績、これらのモニタリング結果を統合して作成した空間線量率マップ及び放射性 Cs 沈着量マップを示す。本研究で実施したモニタリングの時系列にしたがい、始めに東日本第 15 次モニタリングの結果を示し、次に第 19 次モニタリング、第 2 次浜通り無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの結果を示す。最後に、東日本第 15 次モニタリングと第 19 次モニタリング、第 2 次浜通り無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングのデータを統合した結果を示す。

5.1. ヘリコプターによるフライトの実績

5.1.1. 有人ヘリコプター

東日本第 15 次モニタリングではモニタリングを開始してから Bell412 (JA6928)、S-76 (JA6901) 及び Bell430 (JA05TV) の順に使用した。第 19 次モニタリングでは Bell430 (JA05TV) を使用した。

東日本第 15 次モニタリングでは、始めに Bell412 (JA6928) を使用した。2024 年 (令和 6 年) 7 月 10 日に栃木県芳賀郡芳賀町の栃木ヘリポートで航空機モニタリングシステムを機内に積み込み、測定を開始した。同日中に測定拠点を東京都江東区新木場の東京ヘリポートに移し、成田空港の航空管制圏を中心に千葉県北部と茨城県南部を 7 月 13 日まで測定した。7 月 14 日に測定拠点を群馬県前橋市の群馬ヘリポートに移し、群馬県の一部と栃木県西部を 7 月 30 日まで測定した。ここで、他事業で実施した島根原子力発電所周辺のバックグラウンド航空機モニタリングへの対応のため、本報告のモニタリングを一時中断した。9 月 11 日から、測定拠点を栃木ヘリポートに置いて S-76 (JA6901) を用いて東日本第 15 次モニタリングを再開し、栃木県及び茨城県の一部を 9 月 17 日まで測定した。9 月 18 日に Bell430 (JA05TV) に航空機モニタリングシステムを積み替え、測定拠点を宮城県栗原市の瀬峰飛行場に移した。9 月 19 日より同拠点でモニタリングを開始し、宮城県一部、山形県南東部、福島県西部を 10 月 14 日まで測定した。なお、東日本第 15 次モニタリングの期間中、10 月 2 日の測定中に機内に焦げた臭いが発生し、機体トラブルが疑われたため、モニタリングを一時中断した。調査の結果、ヘリ機体に装備されている高度計が故障したことが判明したため、当日中に交換部品を手配し、翌日にはモニタリング再開可能な状態に回復した。

第 19 次モニタリングでは、Bell430 (JA05TV) を継続使用し、10 月 15 日に福島県石川郡玉川村及び須賀川市にある福島空港に測定拠点を置いてモニタリングを開始し、宮城県南部及び福島県一部を 11 月 9 日まで測定した。ここで、ヘリ機体の定期点検を行うために、

11月10日から11月13日までモニタリング作業を中断した。11月14日より、測定拠点を栃木ヘリポートに移してモニタリングを再開し、茨城県北部及び福島県内の未測定エリアを11月19日まで測定した。東日本第15次モニタリング及び第19次モニタリングに要した期間をまとめると、以下の通りである。

[フライトに要した期間]

- ・東日本第15次モニタリング：2024年(令和6年)7月10日～10月14日(延べ51フライト)
- ・第19次モニタリング：同年10月15日～11月19日(延べ37フライト)

また、有人ヘリごとにフライトした距離や平均フライト速度、回数等をまとめた表をTable 5-1に示す。測線上をフライトしたときに取得したGPSデータを基に、ヘリコプターの飛行平均速度を算出したところ、全ての有人ヘリにおいて4.2節で示した速度の範囲内であった。東日本第15次モニタリングにおいてBell412(JA6928)の平均速度が比較的小さいのは、当該機体で起伏の激しい山岳地帯を中心に測定しており、その際に基準対地高度あるいは対地高度の許容範囲を遵守するために、飛行速度を落とす必要があるためである。

Table 5-1 東日本第15次モニタリング及び第19次モニタリングにおけるフライト実績

モニタリング名	実績		
	測線フライト距離 (km)	総飛行距離※ (km)	平均速度 (km/h)
東日本第15次モニタリング	7,707	19,681	Bell412 (JA6928) S-76 (JA6901) Bell430 (JA05TV)
第19次モニタリング	8,319	15,085	133 140 153 150

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

モニタリング名	Bell412 (JA6928)	
	測定開始	測定終了
東日本第15次モニタリング	2024年7月10日	2024年7月30日
第19次モニタリング		
		フライト回数
		19

モニタリング名	S-76 (JA6901)	
	測定開始	測定終了
東日本第15次モニタリング	2024年9月11日	2024年9月17日
第19次モニタリング		
		フライト回数
		12

モニタリング名	Bell430 (JA05TV)	
	測定開始	測定終了
東日本第15次モニタリング	2024年9月19日	2024年10月14日
第19次モニタリング	2024年10月15日	2024年11月19日
		フライト回数
		20
		37

モニタリング名	延べ フライト回数
東日本第15次モニタリング	51
第19次モニタリング	37

5.1.2.無人ヘリコプター

本年度に実施した無人ヘリモニタリングは、浜通り第2次無人ヘリモニタリングと第16回5km圏内無人ヘリモニタリングの2種類である。

まず、浜通り第2次無人ヘリモニタリングでは、東電福島原子力発電所を中心に測定エリアを北側(南相馬市、浪江町上空)と南側(富岡町、楡葉町上空)に分割し測定を行った。浜通り第2次無人ヘリモニタリングに要した期間は以下の通りである。また、詳細をTable 5-2に示す。

[フライトに要した期間]

2024年(令和6年)11月18日～12月19日(内11日間)

一方、第16回5km圏内無人ヘリモニタリングの詳細は、「令和6年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業」¹⁶⁾の報告書に記載されている。

なお、無人航空機を運用する上で、第三者(無人航空機の飛行に直接または間接的に関与していない者を指す)上空の飛行は航空法により禁止されている。このため、無人ヘリの運用事業者を通じて国土交通省から飛行許可を取得し、必要な住民周知活動を実施した。具体的には、各自治体への事前説明を行い、各市町の広報誌に無人ヘリモニタリングの実施に関するチラシを同封することで住民に周知した。チラシのサンプル(楡葉町の例)をFig. 5-1に示す。こうした周知活動により、住民が無人航空機の飛行への間接的関与者として扱われ、第三者からの定義⁴⁹⁾から外れるよう法規制に対応した。

Table 5-2 浜通り第2次無人ヘリモニタリングにおけるフライト実績

日付	内容	場所
2024年11月18日	測線フライト キャリブレーションフライト	南側(富岡町) 北側(浪江町)
2024年11月20日	測線フライト	南側(富岡町、楡葉町)
2024年12月4日	測線フライト	南側(富岡町、楡葉町)
2024年12月5日	測線フライト キャリブレーションフライト	南側(楡葉町) 北側(浪江町)
2024年12月9日	測線フライト	南側(富岡町、楡葉町)
2024年12月10日	測線フライト	北側(南相馬市、浪江町)
2024年12月11日	測線フライト	北側(浪江町)
2024年12月12日	測線フライト	北側(南相馬市、浪江町)
2024年12月13日	測線フライト	北側(南相馬市)
2024年12月15日	測線フライト	北側(南相馬市、浪江町)
2024年12月19日	測線フライト	北側(浪江町)

檜葉町内において無人ヘリコプターを用いた環境放射線モニタリング調査を実施いたします



使用する無人ヘリコプター

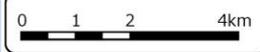
操縦の様子（基地局）

令和6年11月～12月のうち1週間程度の期間において無人ヘリコプターを用いた環境放射線モニタリング調査を実施いたします。調査では檜葉町内の一部、上空80mを写真の無人ヘリコプターが下記ルートを飛行いたします。住民の皆さま方のご理解とご協力をよろしくお願いいたします。



※本モニタリングは原子力規制庁からの受託事業に基づき実施するものです。
 ※本モニタリングは国土交通省東京航空局長より「無人航空機の飛行に係る許可・承認書」の許可を得た事業者（株式会社JDRONE）が実施します。

— 飛行予定ルート
 背景地図：地理院タイル使用



本件についてのお問い合わせ先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）
 福島廃炉安全工学研究所 廃炉環境国際共同研究センター 環境モニタリンググループ
 担当：中間 茂雄 電話番号：0244-25-2072

Fig. 5-1 住民周知用のチラシのサンプル (檜葉町の例)

5.2. 東日本第 15 次モニタリング

東日本第 15 次モニタリングの結果を基に、地表面から 1 m の高さの空間線量率の分布状況を示した「空間線量率マップ」を Fig. 5-2 に示す。また、放射性 Cs の沈着量 (Cs-137 及び Cs-134 の合計量) の状況を示した「放射性 Cs 沈着量マップ」を Fig. 5-3 に示す。また、Cs-137 及び Cs-134 の沈着量マップを Fig. 5-4 及び Fig. 5-5 にそれぞれ示す。空間線量率及び放射性 Cs の沈着量は、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリングを実施した最終日である 2024 年 (令和 6 年) 12 月 19 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。

① 天然放射性核種を含む空間線量率

環境省が示した追加被ばく線量の考え方⁵⁰⁾を参考に、除染基準である空間線量率 $0.23 \mu\text{Sv/h}$ が 1.0 mSv/年 に相当するとし、以下のように空間線量率マップの色合いを区分した。

- ・ $19.0 \mu\text{Sv/h}$ = 約 100 mSv/年 相当
- ・ $9.5 \mu\text{Sv/h}$ = 約 50 mSv/年 相当
- ・ $1.9 \mu\text{Sv/h}$ = 約 10 mSv/年 相当
- ・ $1.0 \mu\text{Sv/h}$ = 約 5.0 mSv/年 相当
- ・ $0.5 \mu\text{Sv/h}$ = 約 2.5 mSv/年 相当
- ・ $0.2 \mu\text{Sv/h}$ = 約 1.0 mSv/年 相当
- ・ $0.1 \mu\text{Sv/h}$ = 約 0.5 mSv/年 相当

② 放射性 Cs の沈着量

玄米中の放射性 Cs 濃度が 2011 年 (平成 23 年) 当時の食品衛生法上の暫定規制値 (500 Bq/kg) となる土壌中の放射性 Cs 濃度の上限値は $5,000 \text{ Bq/kg}$ である⁵¹⁾。この濃度の放射能が 5 cm までに沈着している水田の土壌を面積 $10,000 \text{ cm}^2$ 、深さ 15 cm まで採取し、攪拌した場合の濃度を計算すると、約 $1,000 \text{ kBq/m}^2$ 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 ($150 \text{ L/m}^2 \times 1.3 \text{ kg/L} \times 5,000 \text{ Bq/kg} = 975,000 \text{ Bq/m}^2 \approx 1,000 \text{ kBq/m}^2$)。

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

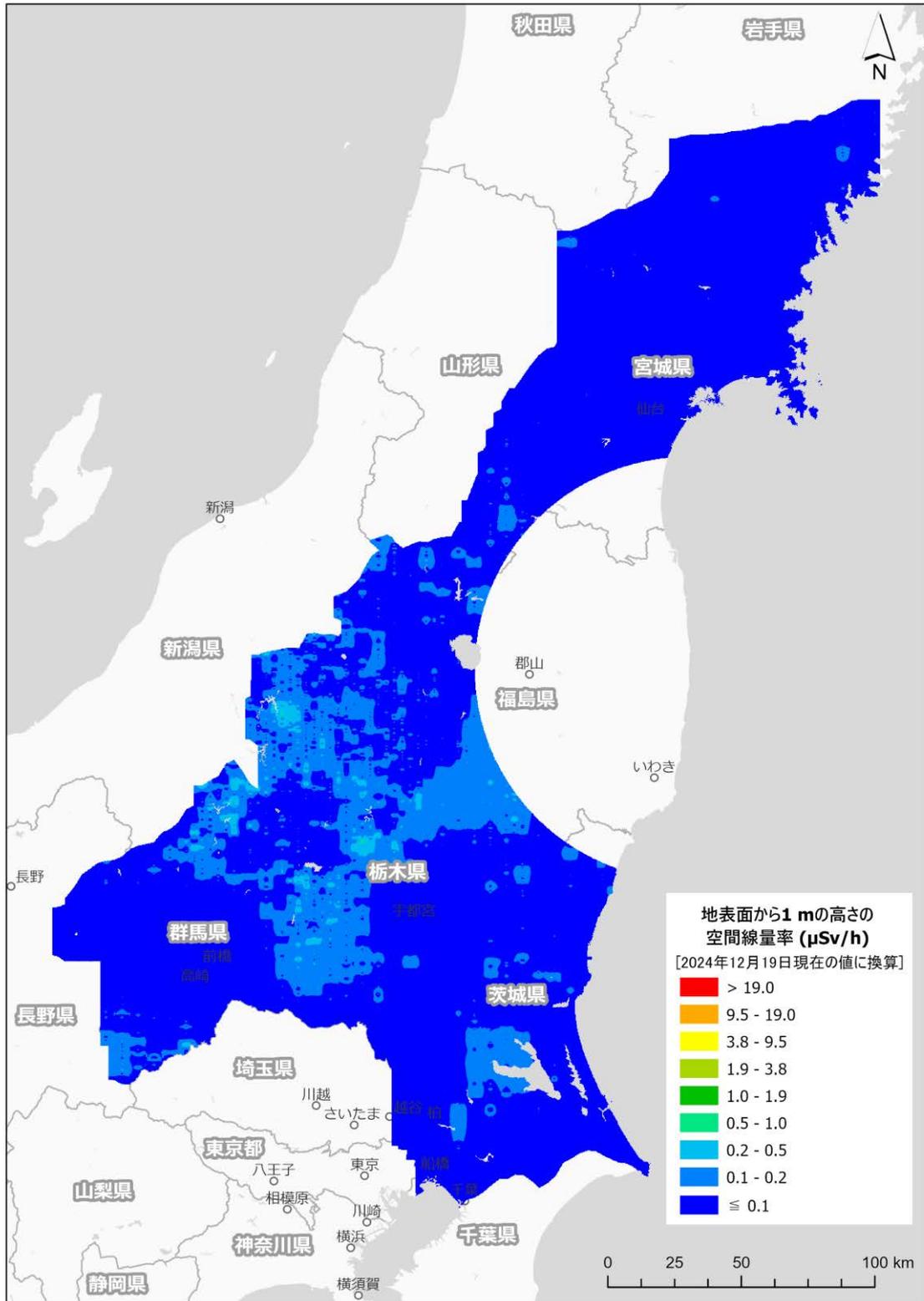


Fig. 5-2 東日本第 15 次モニタリングにおける空間線量率マップ (天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

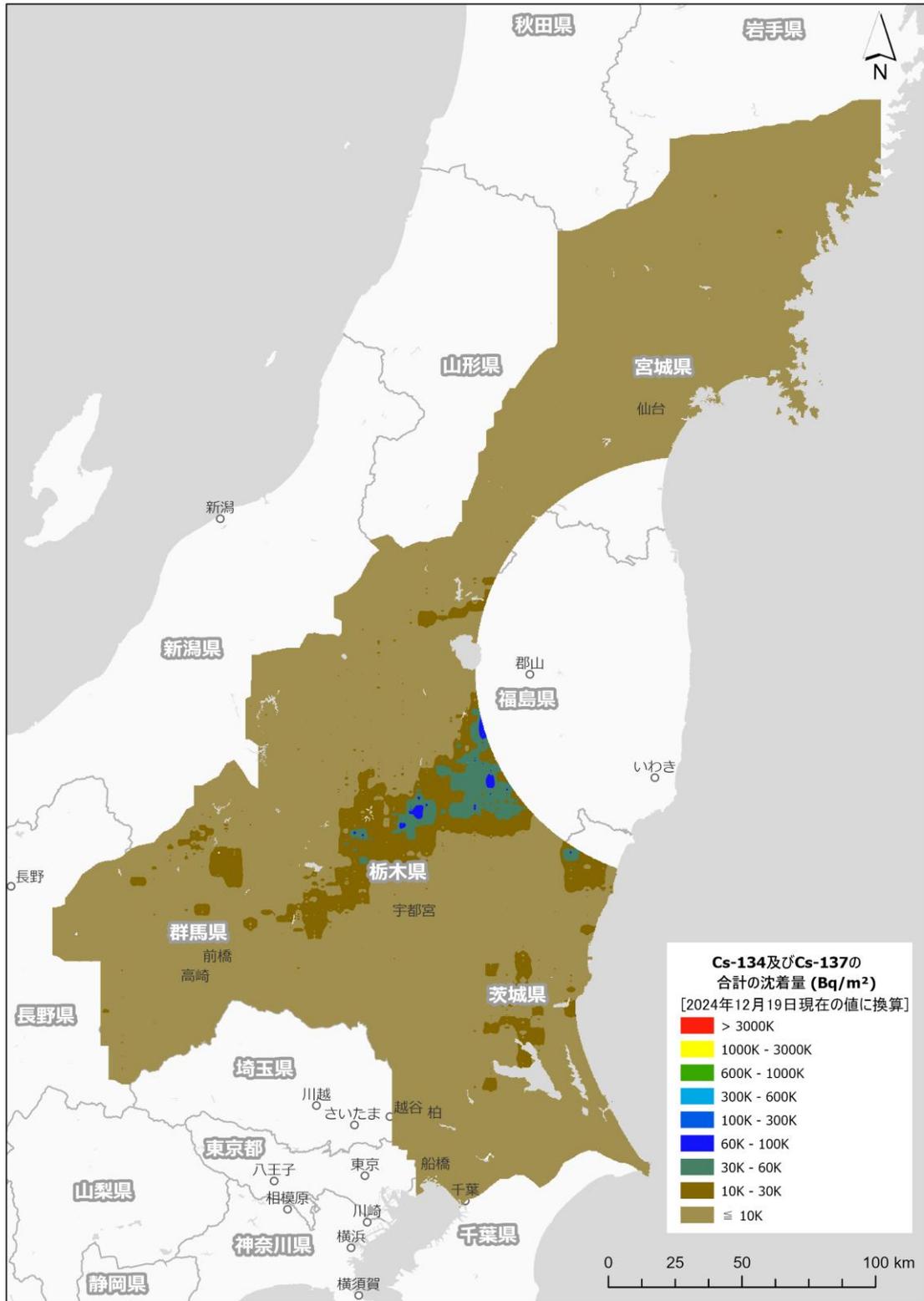


Fig. 5-3 東日本第15次モニタリングにおける放射性Cs沈着量マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

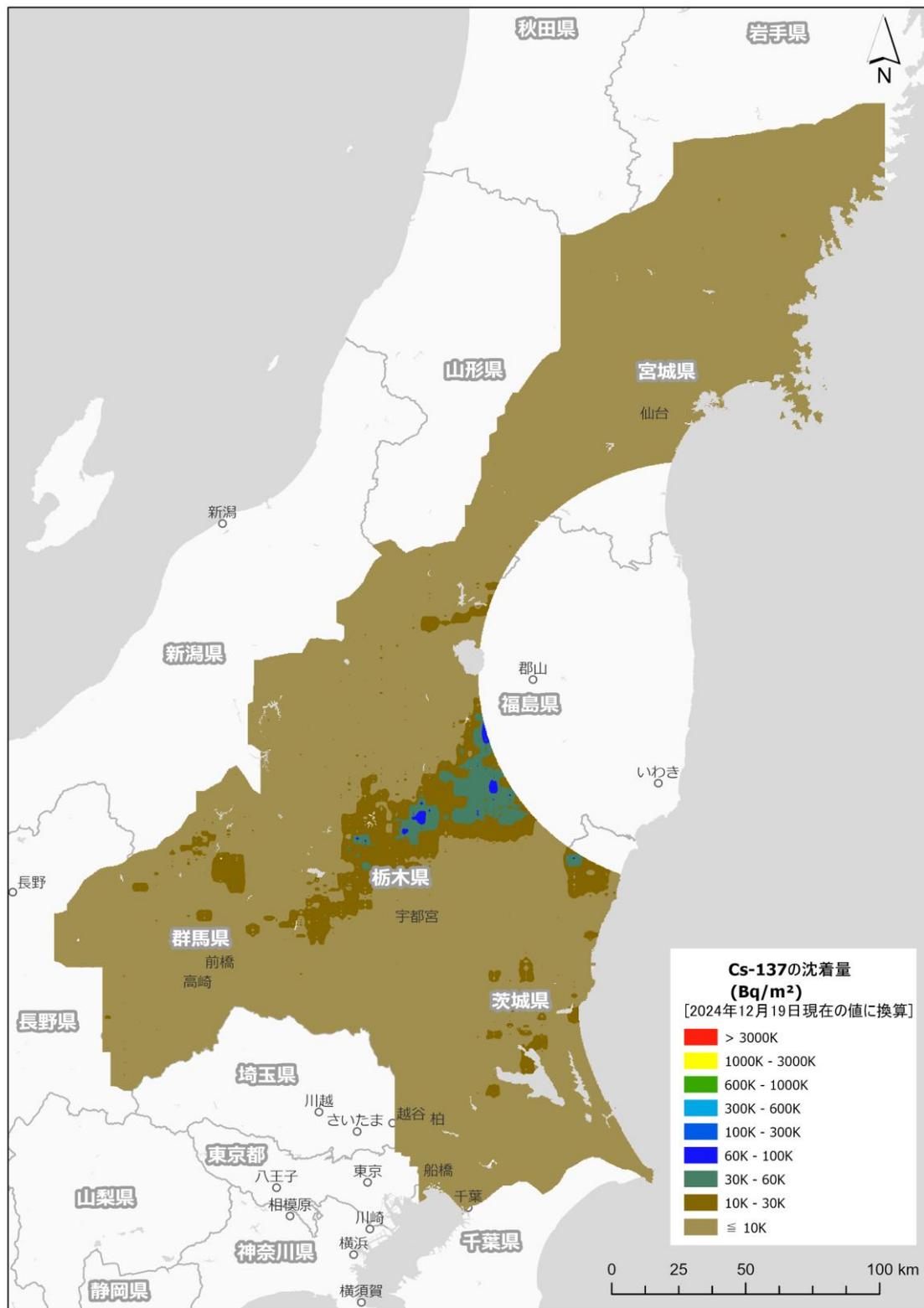


Fig. 5-4 東日本第15次モニタリングにおけるCs-137沈着量マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

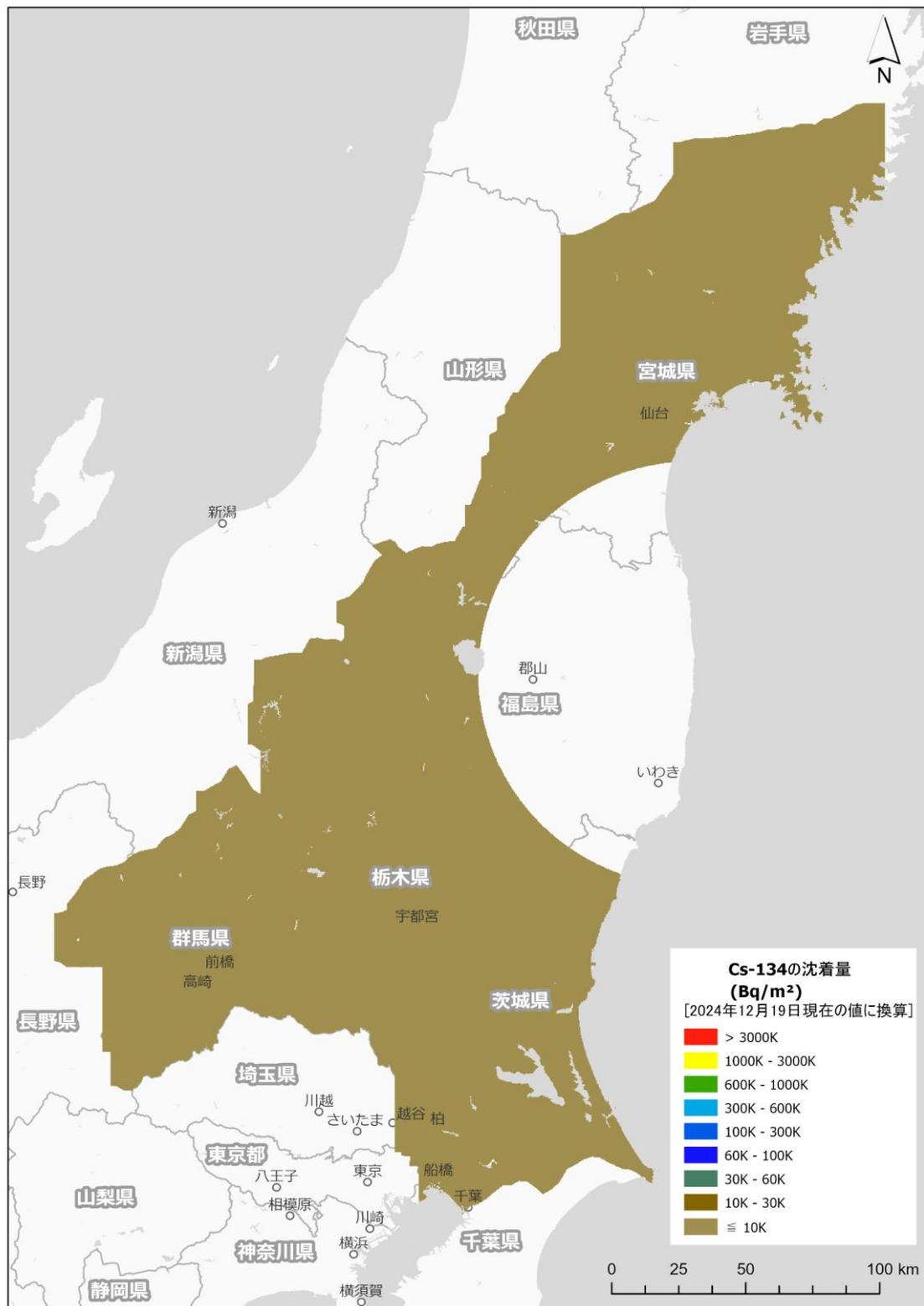


Fig. 5-5 東日本第15次モニタリングにおけるCs-134沈着量マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパンデータ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

5.3. 第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5km圏内無人ヘリモニタリング

80 km圏内を測定対象範囲とした第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングの結果²⁹⁾を基に、地表面から1 mの高さの空間線量率の分布状況を示した「空間線量率マップ」を Fig. 5-6 に示す。また、放射性Csの沈着量(Cs-137及びCs-134の合計量)の状況を示した「放射性Cs沈着量マップ」を Fig. 5-7 に示す。またCs-137及びCs-134の沈着量マップを Fig. 5-8 及び Fig. 5-9 にそれぞれ示す。放射性Csの沈着量マップについては前述したように、第19次モニタリングと浜通り第2次無人ヘリモニタリングでは $\beta=1.0(\text{g}/\text{cm}^2)$ としたときの換算係数を使用したため、誤差を多分に含む可能性があることに留意する必要がある。なお、空間線量率及び放射性Csの沈着量は、浜通り第2次無人ヘリモニタリングを実施した最終日である2024年(令和6年)12月19日現在の値に減衰補正した。

また、80 km圏外を測定対象範囲とした東日本第15次モニタリングとの整合性を確認しつつ、福島県周辺域全体の広域的な空間線量率分布を示すことを目的として、当該モニタリングのデータと第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングで取得した全データを統合した。統合処理は、各モニタリングで取得した点データ(空間線量率及び放射性Csの沈着量)を単一のデータセットとして結合し、同一基準日(2024年12月19日)に減衰補正した上で、IDWにより一括補間してマップ化したものである。統合データを用いて作成した空間線量率マップ及び放射性Cs沈着量マップを Fig. 5-10 及び Fig. 5-11 にそれぞれ示す。また、Cs-137及びCs-134の沈着量マップを Fig. 5-12 及び Fig. 5-13 にそれぞれ示す。有人ヘリ及び無人ヘリの測定範囲の境界付近における不自然な不連続は見られず、全体として整合的な分布が得られた。

有人ヘリモニタリングのデータのみを用いて作成した、天然放射性核種由来の空間放射線量率マップを Fig. 5-14 に示す。空間放射線量率の分布を見ると新潟県と福島県の県境に天然の放射線量が高い場所が存在する。ここは、帝釈山地という花崗岩の分布地帯として知られた場所であり、過去に日本全国の空間線量率を航空機モニタリングにより計測した結果¹⁸⁾でも、この近辺の空間放射線量率は比較的高いことが見出されている。天然放射性核種由来の空間放射線量率は、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放射線量率の解析手法が導入された2015年度(平成27年度)から2023年度(令和5年度)までに作成した天然放射性核種由来の空間放射線量率マップを Fig. 5-15 に示す。このように、各年度で天然放射性核種由来の空間放射線量率マップが顕著に異なることはなく、本手法により全計数率から放射性Csに起因する計数率が適切に除外できていると判断される。

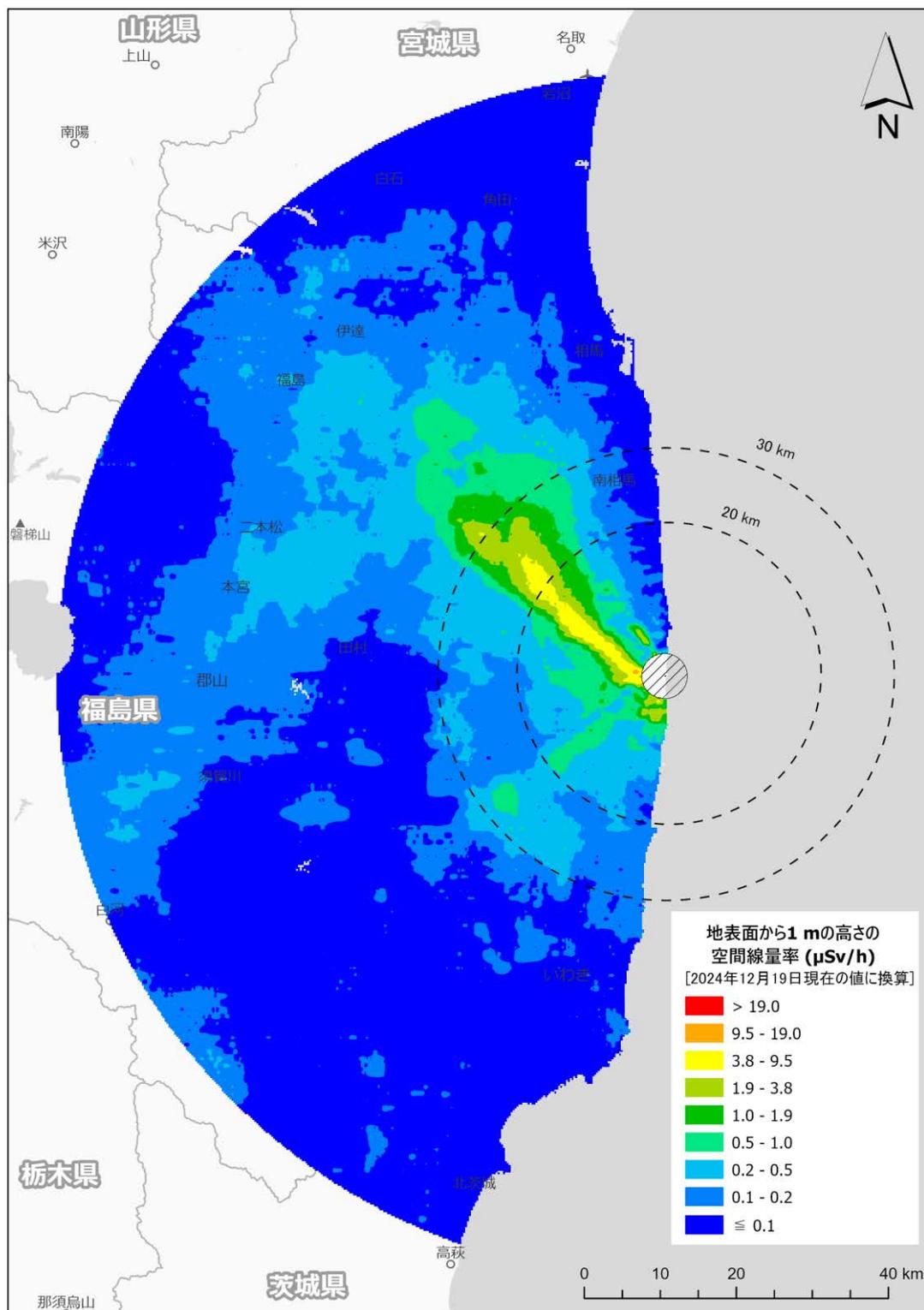


Fig. 5-6 第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングにおける空間線量率マップ (天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

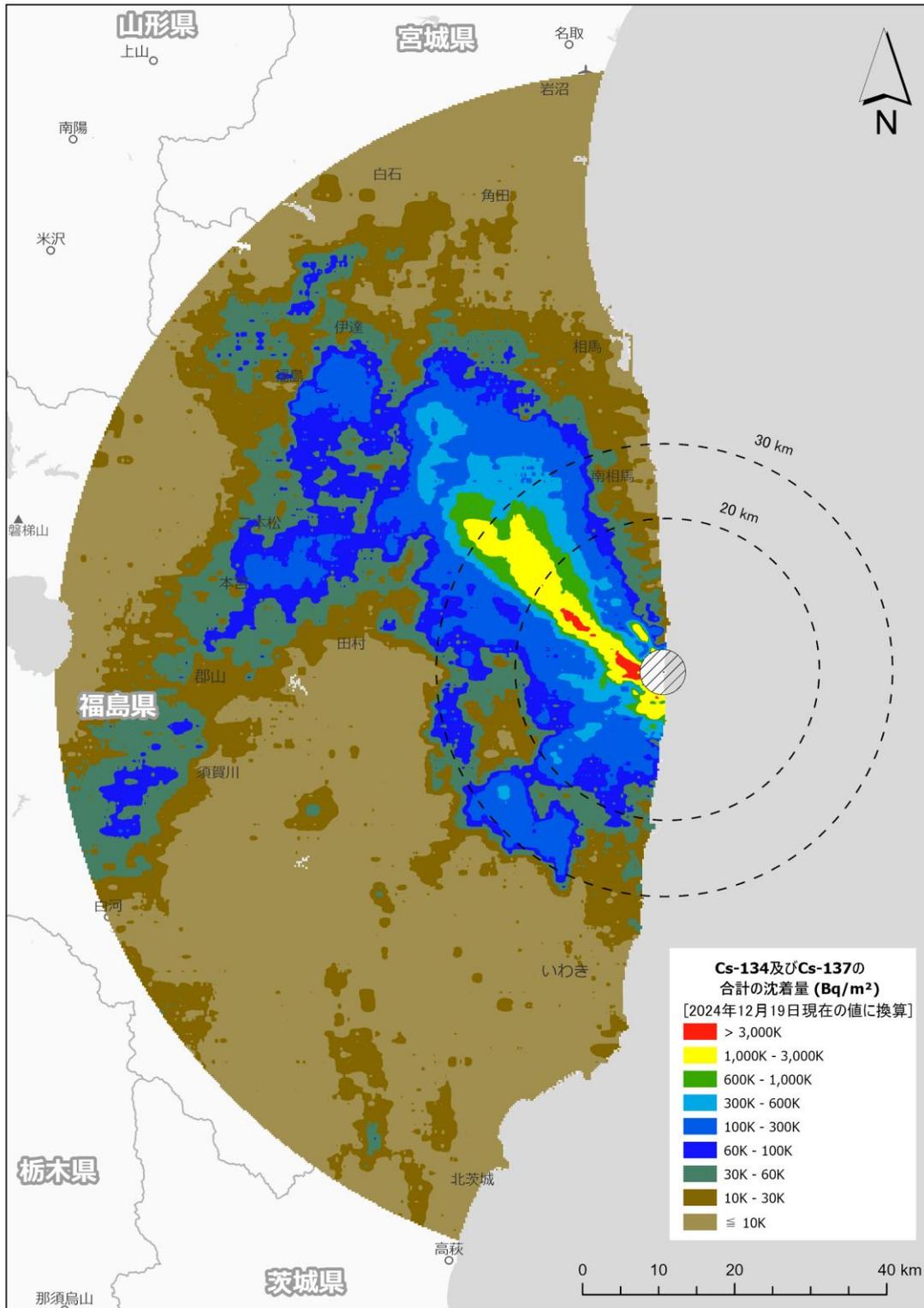


Fig. 5-7 第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングにおける放射性Cs沈着量マップ

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

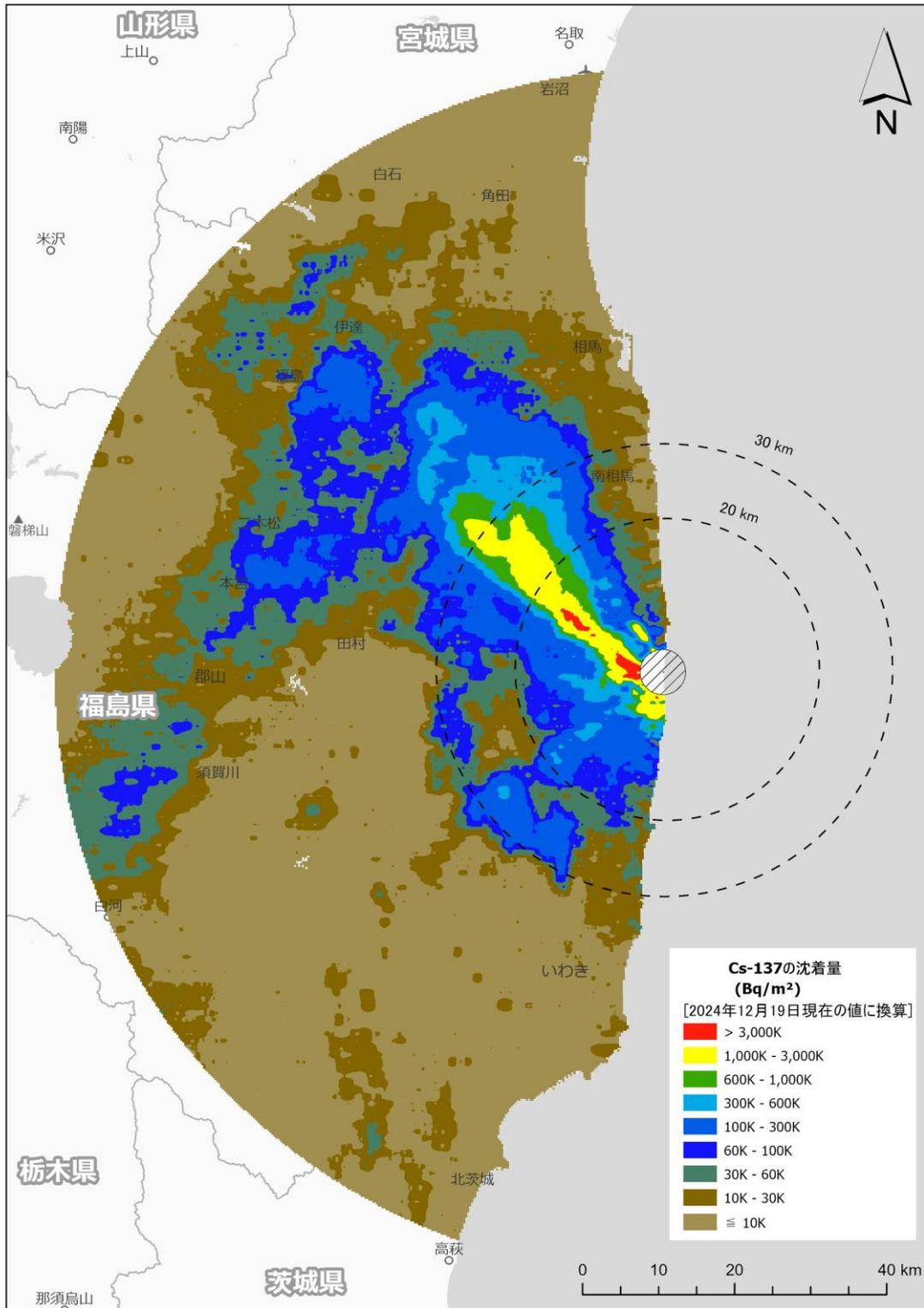


Fig. 5-8 第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングにおけるCs-137沈着量マップ

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

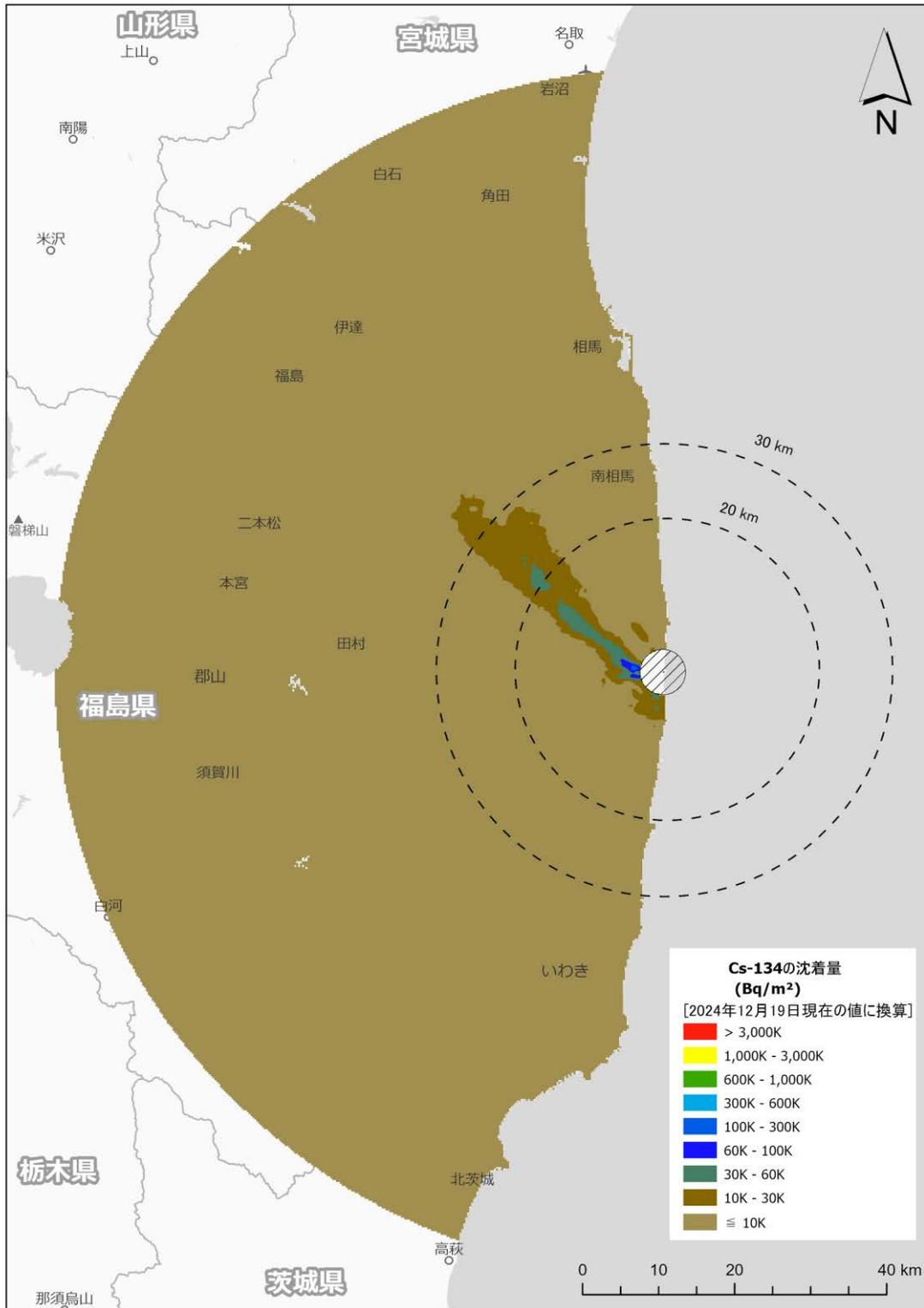


Fig. 5-9 第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングにおけるCs-134沈着量マップ

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

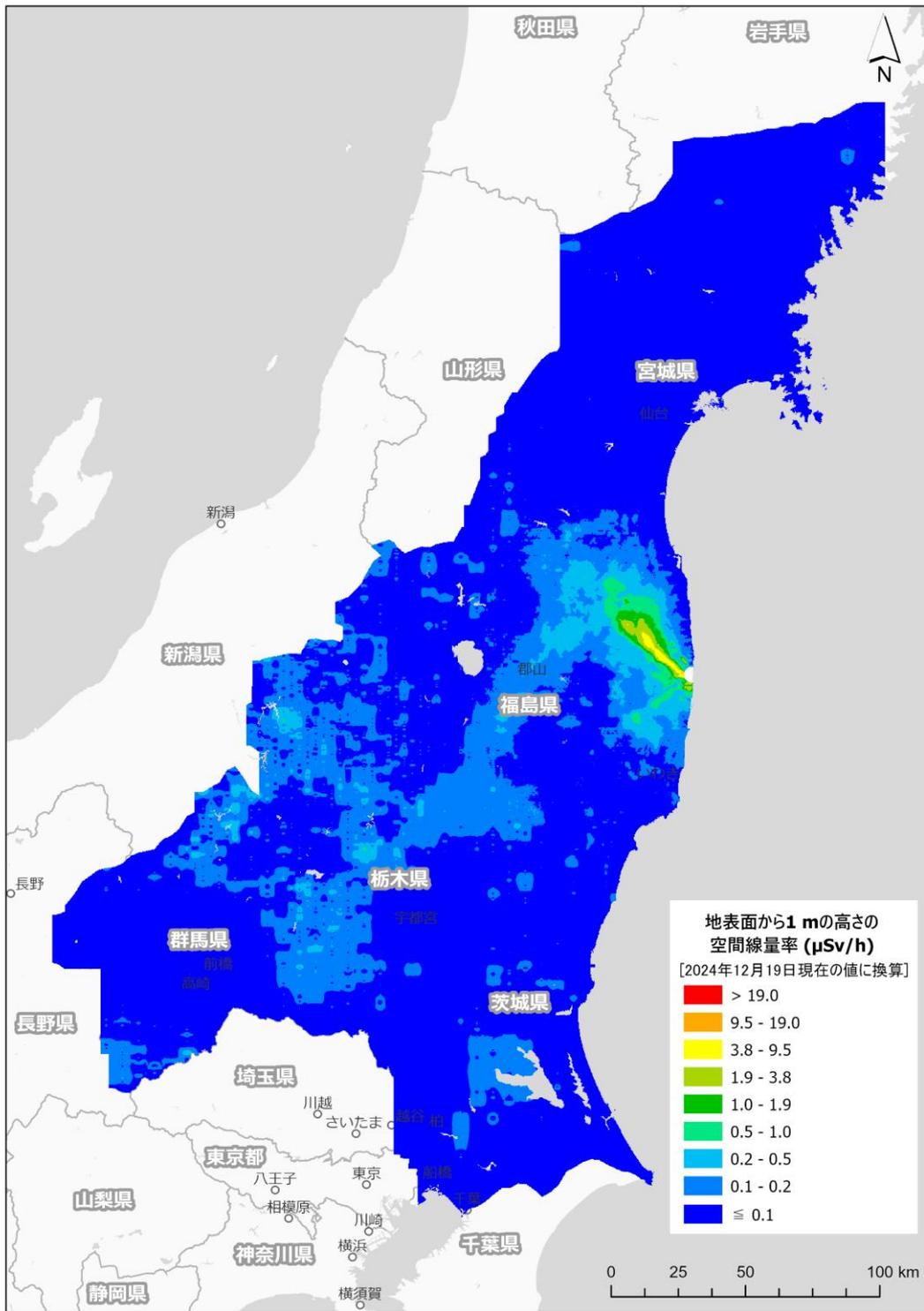


Fig. 5-10 東日本第 15 次モニタリングと第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける空間線量率マップ (天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

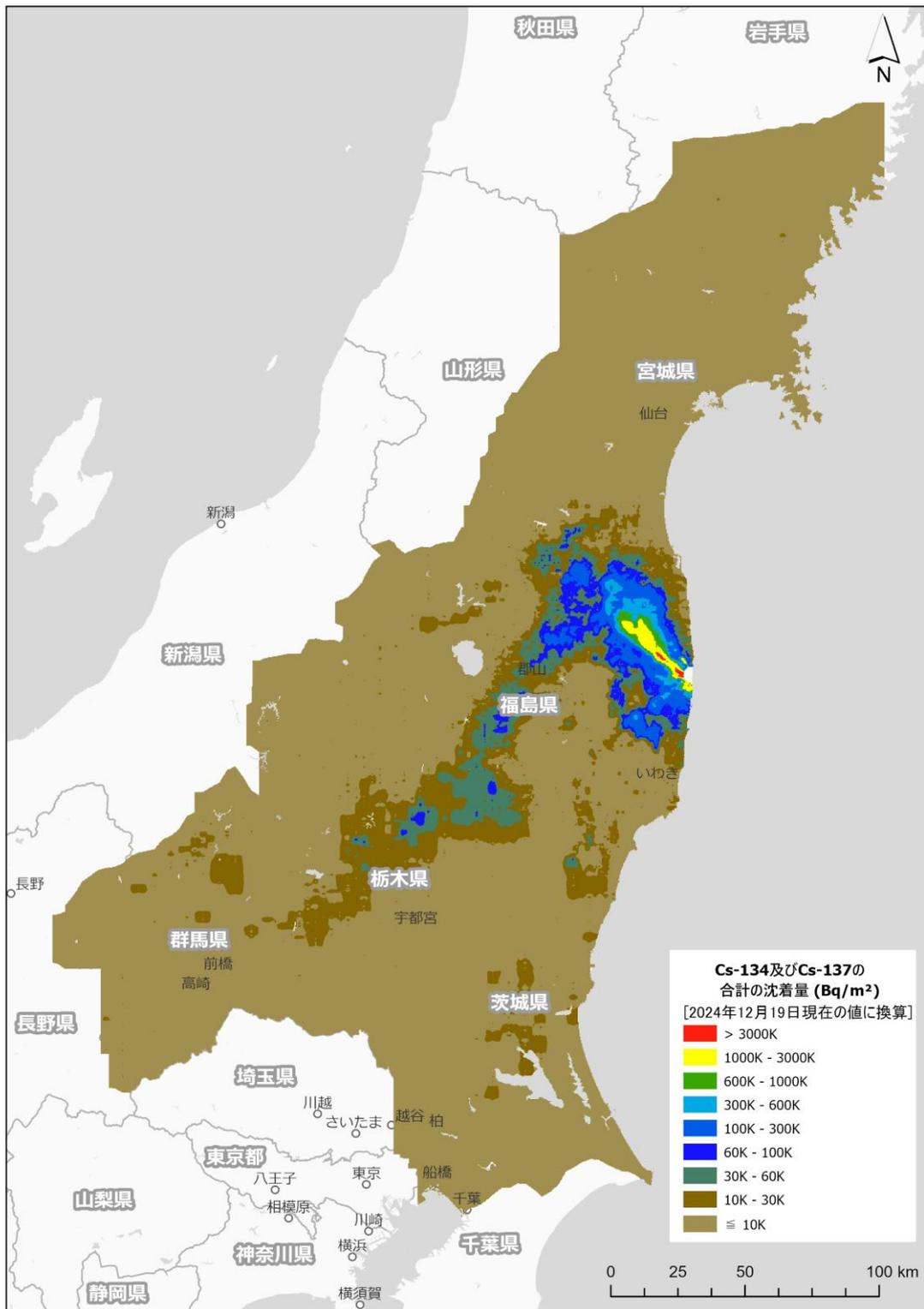


Fig. 5-11 東日本第15次モニタリングと第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

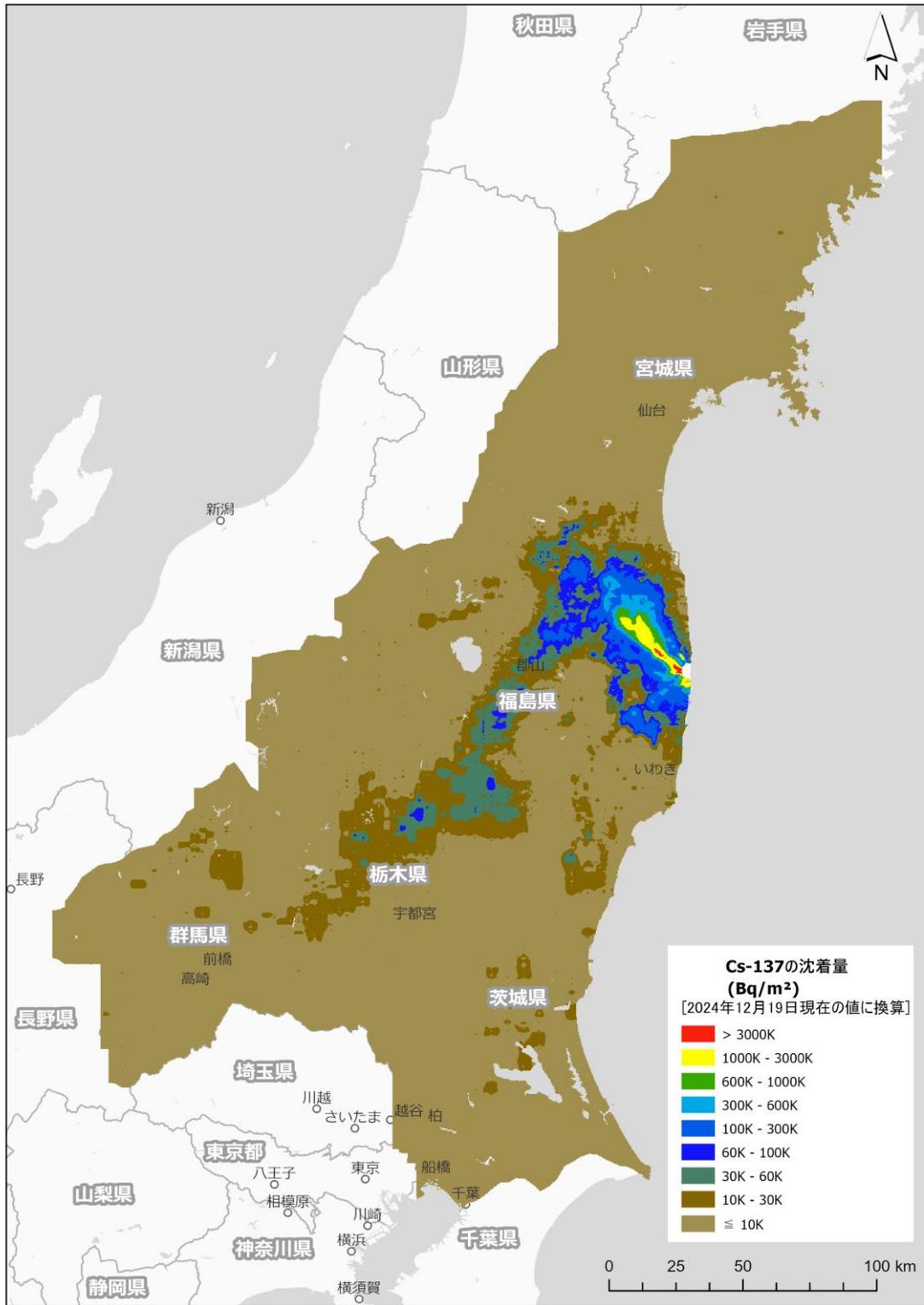


Fig. 5-12 東日本第15次モニタリングと第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

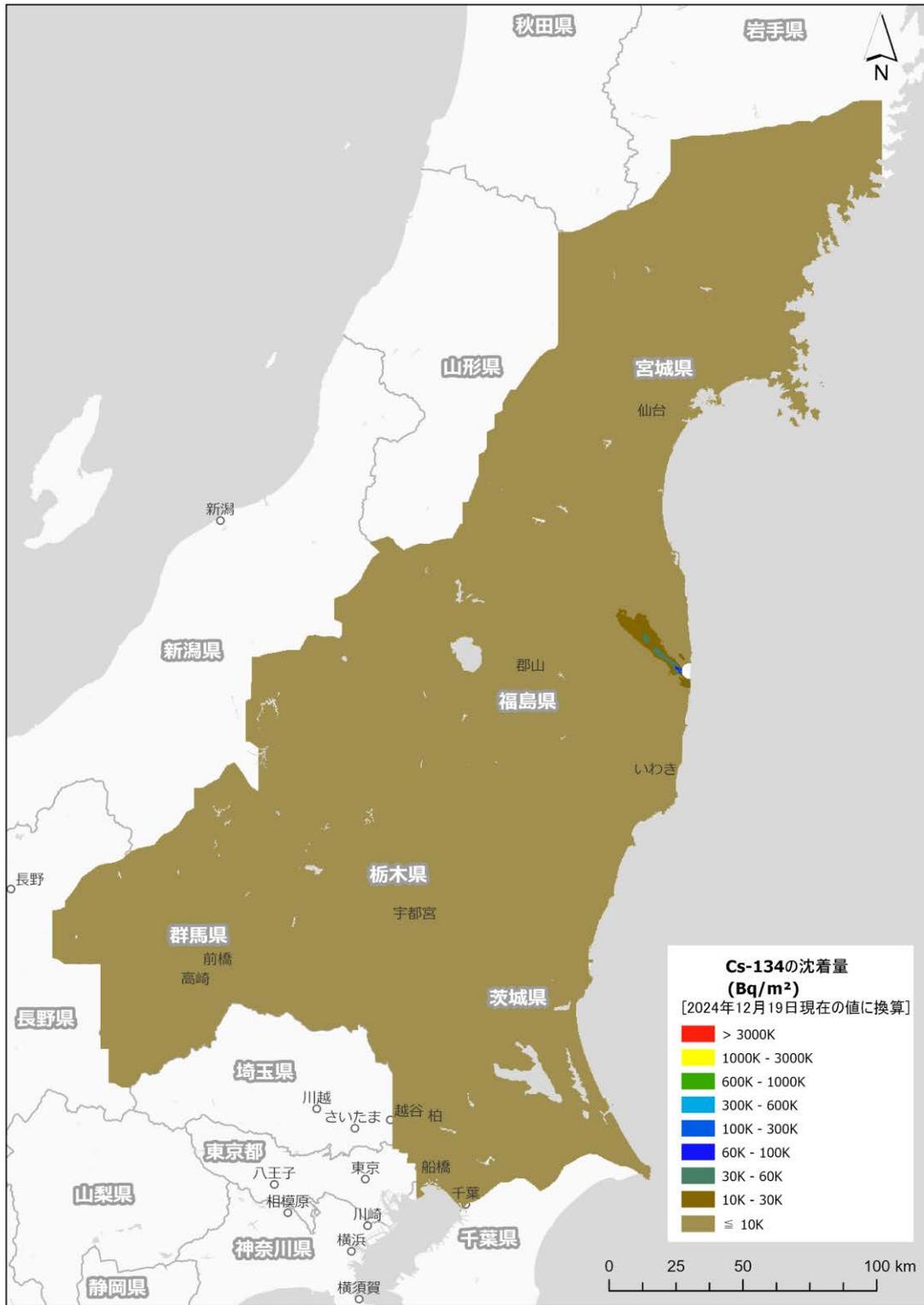


Fig. 5-13 東日本第15次モニタリングと第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおけるCs-134沈着量マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

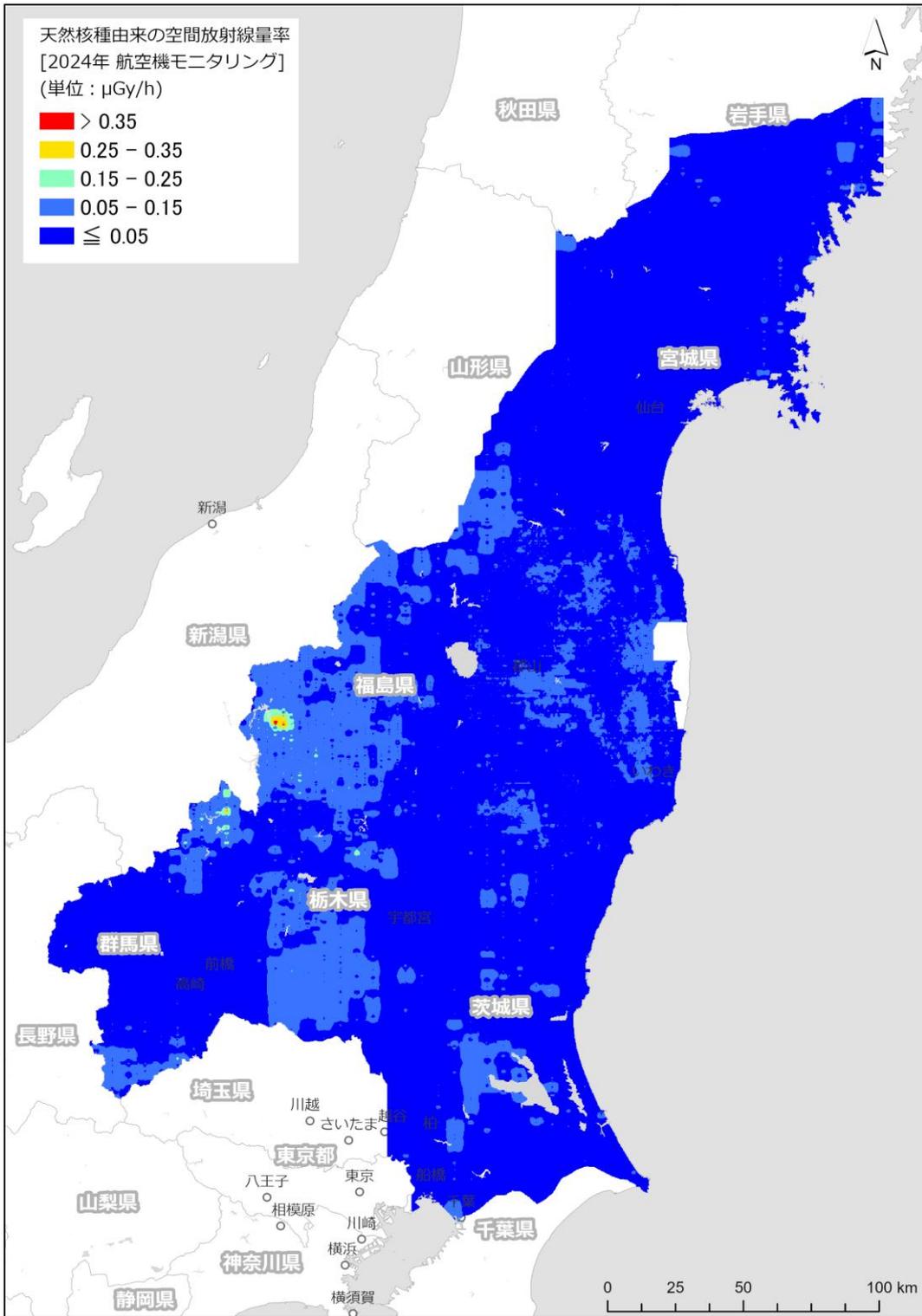
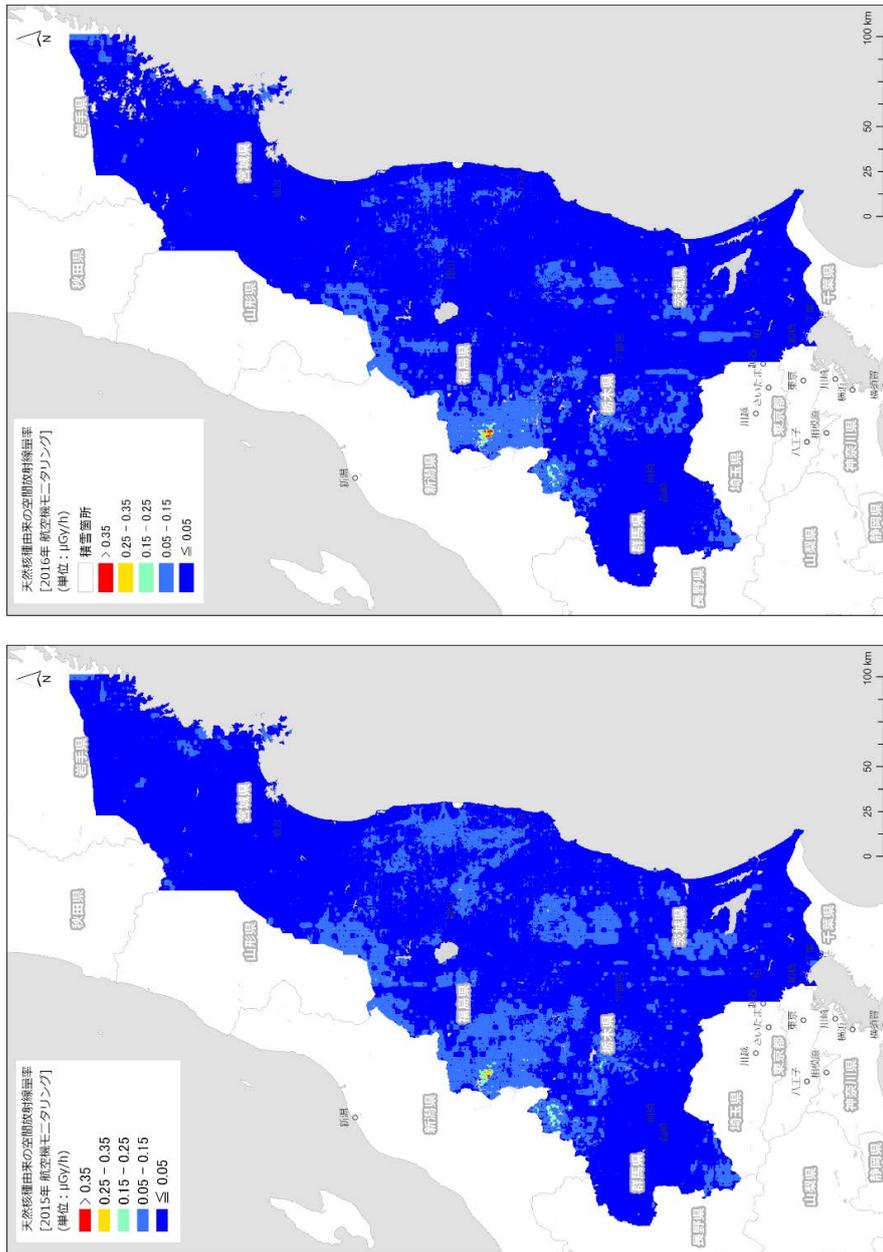


Fig. 5-14 東日本第15次モニタリング及び第19次モニタリングにおける天然放射性核種由来の空間放射線量率マップ

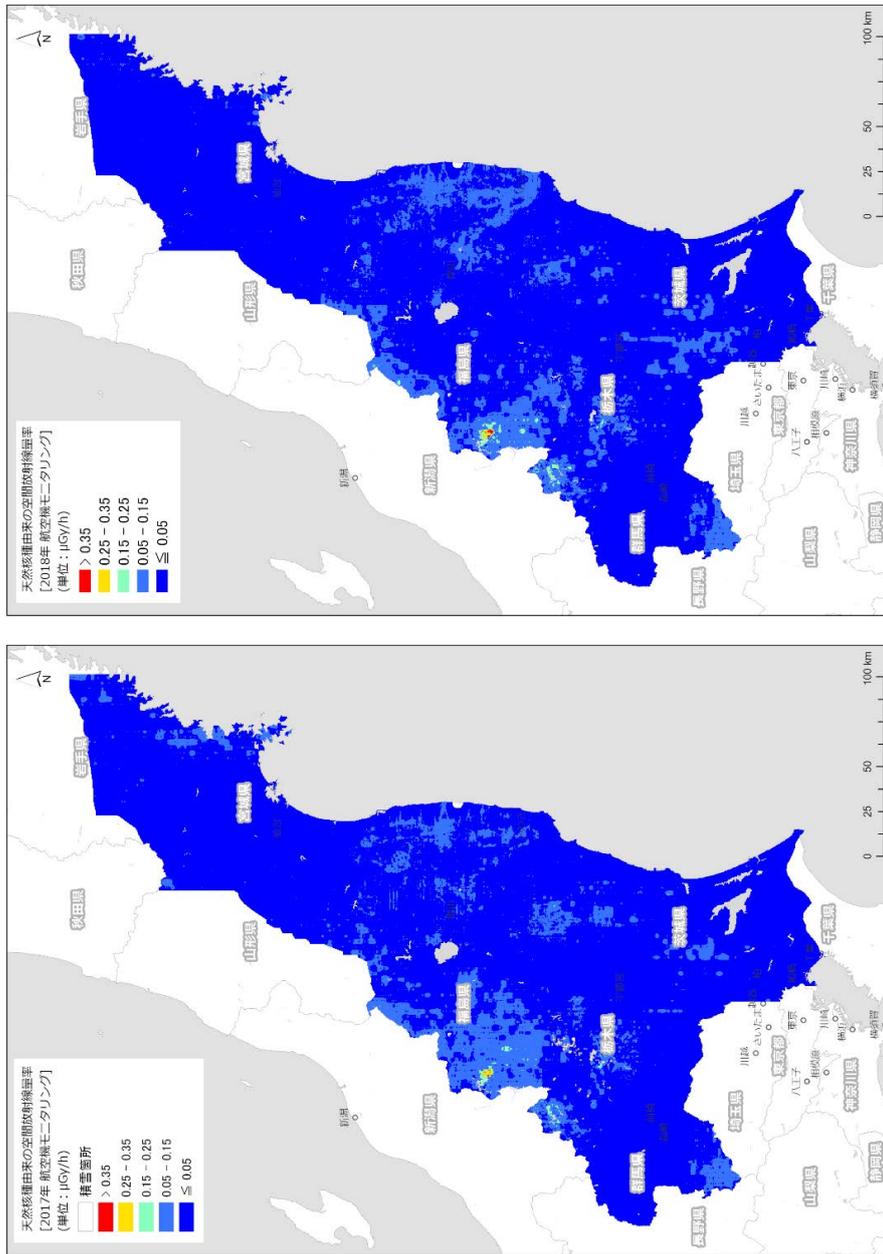
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)



2015年度
2016年度

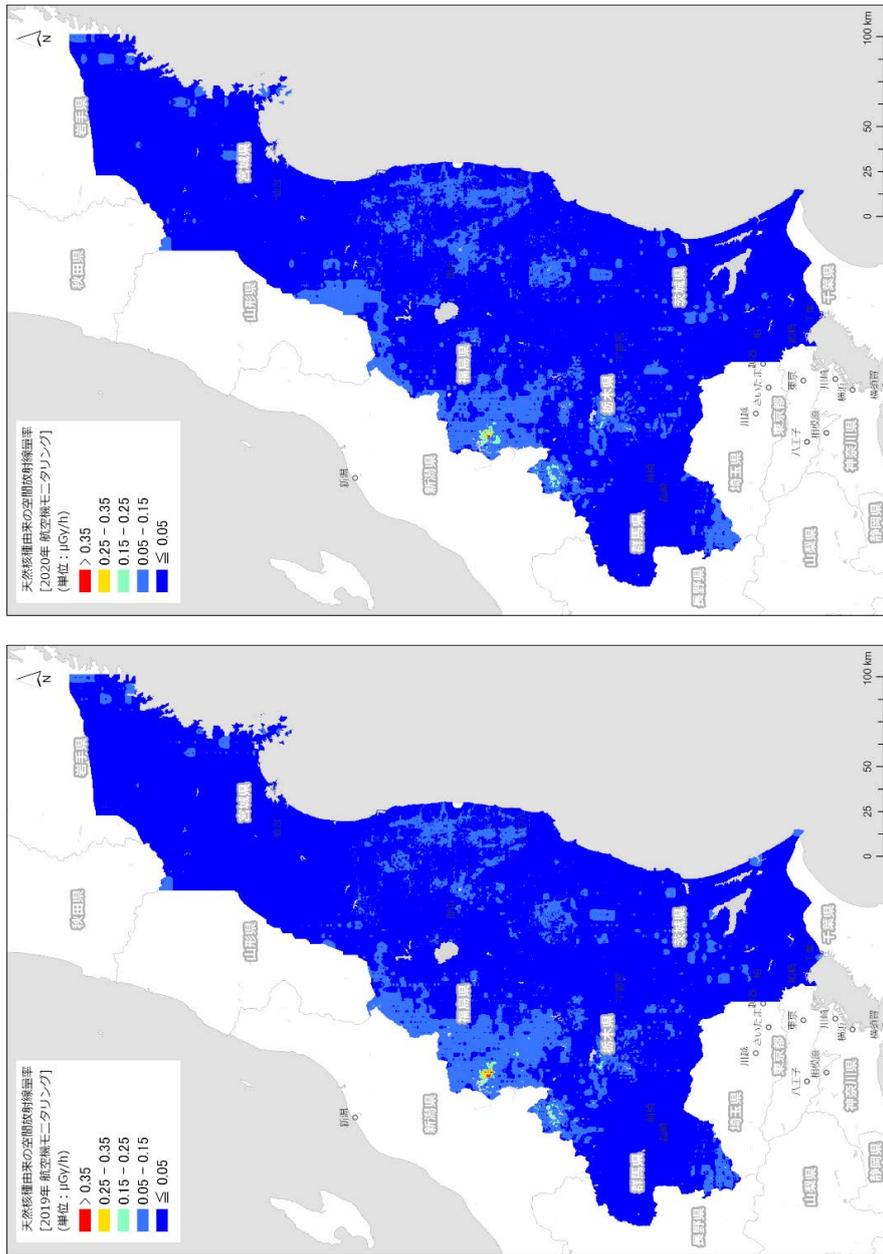
Fig. 5-15 各測定年度における天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの比較
(1/5)

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



2017年度
2018年度
Fig. 5-15 各測定年度における天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの比較
(2/5)

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



2019年度
2020年度
Fig. 5-15 各測定年度における天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの比較
(3/5)

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

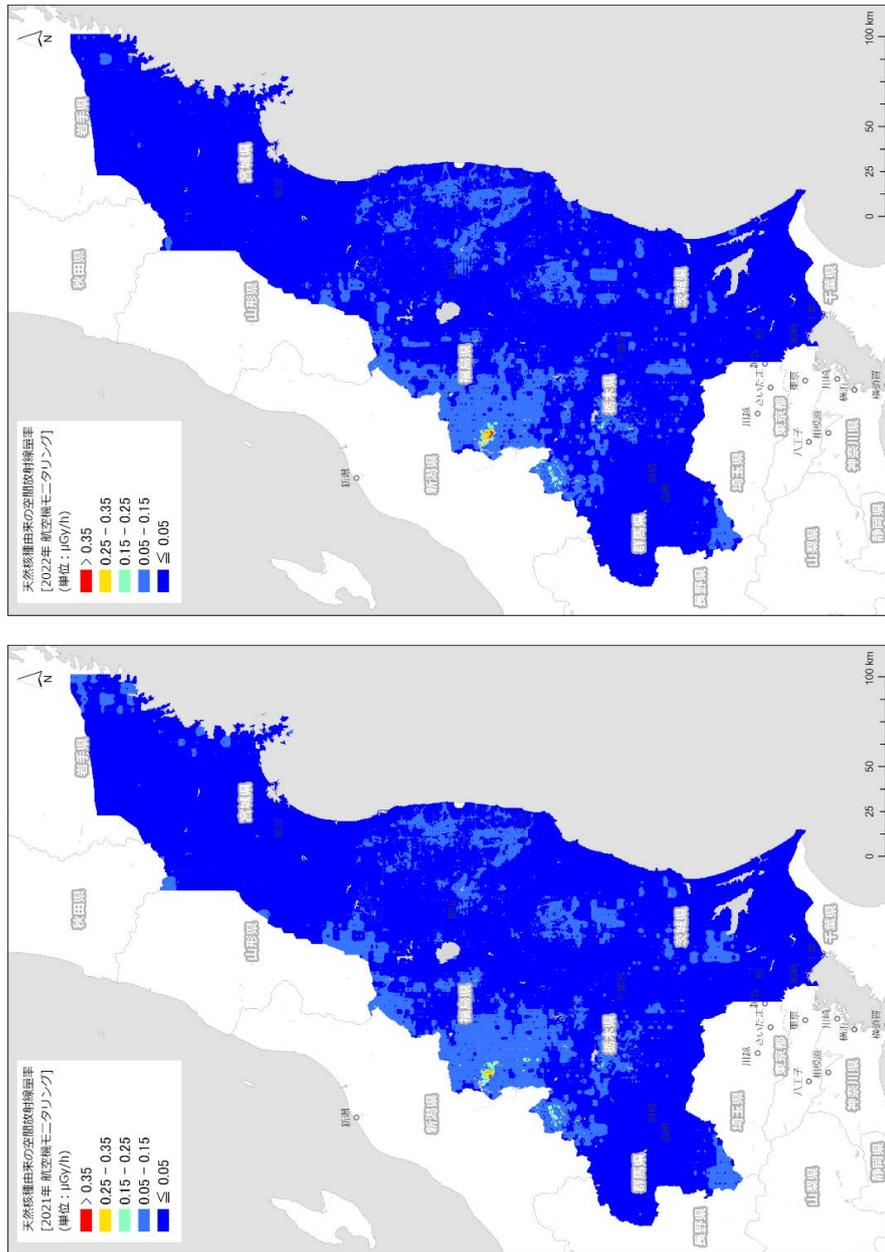
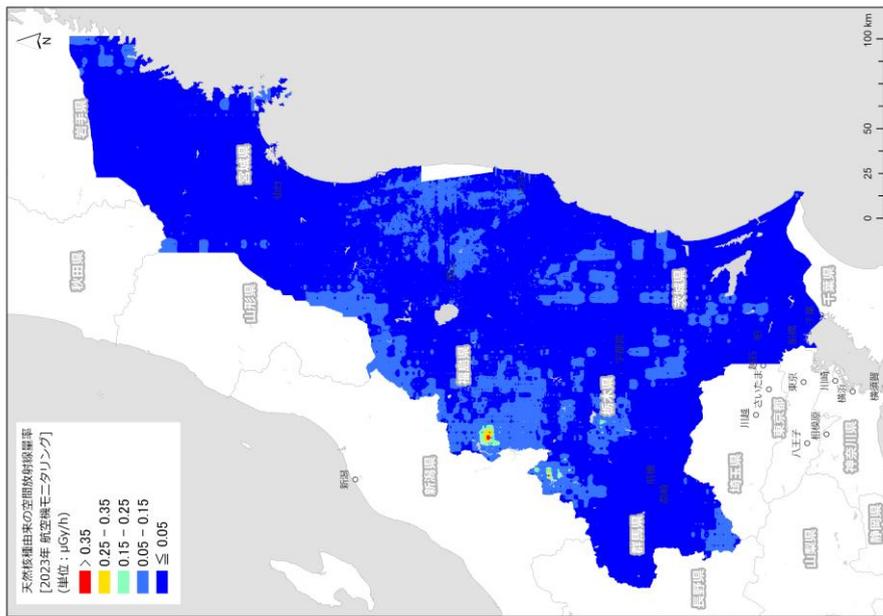


Fig. 5-15 各測定年度における天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの比較
(4/5)

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



2023年度

Fig. 5-15 各測定年度における天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの比較
(5/5)

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

6. 有人ヘリ及び無人ヘリモニタリング結果の考察

6.1. 過去の有人ヘリモニタリング結果との比較

これまでの 80 km 圏内における航空機モニタリングによる空間線量率分布の測定結果を比較する。第 3 次モニタリング以前については自衛隊のヘリコプターを使用し、簡易的なパラメータを適用していたため、比較対象として用いるのは適切でない。そこで過去の結果との比較対象として、使用パラメータの算出方法やデータ解析手法が初めて定型化した第 4 次以降を選択した。第 4 次モニタリング以降の空間線量率分布を Fig. 6-1 に示す。このように、時間の経過とともに空間線量率が比較的高いことを意味する暖色系の面積が小さくなっていることが分かる。なお、5.1 節に記述した空間線量率マップの色合い区分ごとのメッシュの面積(合計約 8,923 km²)から、各区分の面積割合を算出して Table 6-1 及び Fig. 6-2 にまとめた。これら図表からも空間線量率が経年により減少していることが分かる。19.0 $\mu\text{Sv/h}$ を超える地域は第 10 次モニタリングで見られなくなり、第 16 次モニタリングにおいて全てのメッシュで 19.0 $\mu\text{Sv/h}$ 未満となった。ただし、0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 以下の領域では天然放射性核種による影響が相対的に強く、測定値のばらつきにより必ずしも経年にしたがって減少しない場合がある。また、第 18 次モニタリングでは、第 17 次モニタリングに対して 0.2 $\mu\text{Sv/h}$ ~0.5 $\mu\text{Sv/h}$ の面積が 1%程度増加したが、2023 年度(令和 5 年度)より、80 km 圏内における航空機モニタリングに無人ヘリモニタリングを導入したことに伴い、有人ヘリモニタリングの経路が一部変更されたことに起因すると推察された²⁹⁾。年間被ばく線量が 1.0 mSv に相当する、0.2 $\mu\text{Sv/h}$ を上回るメッシュの面積割合は第 4 次モニタリング時点で 95.5%であったが、第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリング時点では 20.8%まで減少した。2024 年度(令和 6 年度)において 0.2 $\mu\text{Sv/h}$ を上回ったメッシュは、以下の通りであった。

- ・宮城県

白石市の南西端の極一部、伊具郡丸森町の南端

- ・福島県

いわき市の北端、郡山市の中央部、白河市の北端、須賀川市の中央部、相馬市の西部、伊達市の中央以南、田村市の東部一帯、二本松市の中央部一帯、福島市の中央部及び南東部、南相馬市の北西部から南西部の一帯、本宮市の中央部から東部及び南西端の極一部、伊達郡川俣町のほとんど全域、伊達郡国見町の西部及び北端、伊達郡桑折町の中央部、田村郡三春町の北東部の極一部、東白川郡棚倉町の南東端、東白川郡塙町の北西部、双葉郡大熊町のほとんど全域、双葉郡富岡町のほとんど全域、双葉郡浪江町の東端部を除くほとんど全域、双葉郡檜葉町の北部一帯と南西部及び南部中央、双葉郡広野町の西端及び北端、双葉郡双葉町のほとんど全域、安達郡大玉村の東端部、岩瀬郡天栄村の東

部、相馬郡飯館村のほとんど全域、双葉郡葛尾村の全域、双葉郡川内村の中央部を除く全域

次に、第4次モニタリングと2024年度(令和6年度)に実施した80 km圏内における有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングを統合した全データとの比較結果を散布図として Fig. 6-3 に示す。本図に示した回帰直線の傾きを、80 km 圏内における空間線量率の全体平均的な減少傾向として捉えることができる。また、本図中には重量緩衝深度(β)を1.0 g/cm²とした場合における、放射性Csの物理的半減期から算出した理論的な減衰を表す破線を示す。このように2024年度の有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングの測定結果は、物理的半減期に基づく理論値よりも大きく減少する傾向を示した。一方、80 km 圏内では地表面から1 mの高さの空間線量率が0.2 μ Sv/h以下の、天然放射性核種による影響が相対的に大きい場所が多くなってきている。放射性Csから放出される γ 線に起因する空間線量率の減少傾向を見るには、天然放射性核種による影響を無視できるような空間線量率が比較的高い場所を選定するのがよい。そこで、2011年9月30日時点の避難指示区域(以下、旧避難指示区域)における有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングの結果を抽出し、空間線量率が比較的高い領域のデータを用いて比較を行うこととした。旧避難指示区域における、これまでのモニタリング結果について Fig. 6-4 に示す。次に、旧避難指示区域における空間線量率の減少傾向を定量的に把握するため、各モニタリングにおける空間線量率マップのメッシュ中心点での比を算出し比較を行った。第4次モニタリングと第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングとの空間線量率の比較を Fig. 6-5 に、同様にCs-137の沈着量の比較を Fig. 6-6 にそれぞれ示す。ここで、最小二乗法による近似は数値の大きな結果に影響を受けやすいため、より適切に変化率を評価できる方法として、空間線量率の相対減少率(例えば、(第19次モニタリングの結果-第4次モニタリングの結果)/(第4次モニタリングの結果))をヒストグラムとしても表示した。空間線量率の散布図及びヒストグラムと比較して、Cs-137の沈着量の散布図及びヒストグラムの分布はばらつきが大きい。特に、Fig. 6-6の散布図において、第4次モニタリングによるCs-137の沈着量が100 kBq/m²であった領域の前後で、第19次モニタリング及び浜通り第2次無人ヘリモニタリングによるCs-137の沈着量が急激に減少するような傾向が見られた。第16回5 km圏内無人ヘリモニタリング¹⁶⁾については、第4次モニタリングによるCs-137の沈着量が1,000 kBq/m²であった領域の前後で同様の傾向が見られた。これは、空間線量率は全計数率から宇宙線、空气中ラドン子孫核等に起因するバックグラウンド計数率を差し引いてから換算しているのに対し、Cs-137の沈着量はこれらに加えて天然放射性核種由来のバックグラウンド計数率を差し引いてから換算しているため、計数誤差が相対的に大きくなることが一因として考えられる。4.11節でも記載した通り、100 kBq/m²以下のようなCs-137の沈着量が比較的小さな領域については、有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングでCs-137の沈着量を正確に評価するのは困難であることが示唆される。しかしながら、

両者のヒストグラムとも平均値と中央値がほとんど同値であり、正規分布に近いといえる。各ヒストグラムの相対変化率の平均値を指標とすると、第 4 次モニタリングが行われた 2011 年 (平成 23 年) 11 月から、空間線量率については相対変化率が約 85%~95%と評価された。一方、Cs-137 の沈着量については相対変化率が約 60%~75%と評価されたが、第 19 次モニタリング及び浜通り第 2 次無人ヘリモニタリングでは、東電福島原子力発電所事故からの経過日数に伴う β の変化と土地利用区分による β の違いを考慮せずに 1.0 (g/cm²) として一律に固定しているため、本節で示した相対変化率には、ある程度の不確かさが伴うことに留意する必要がある。

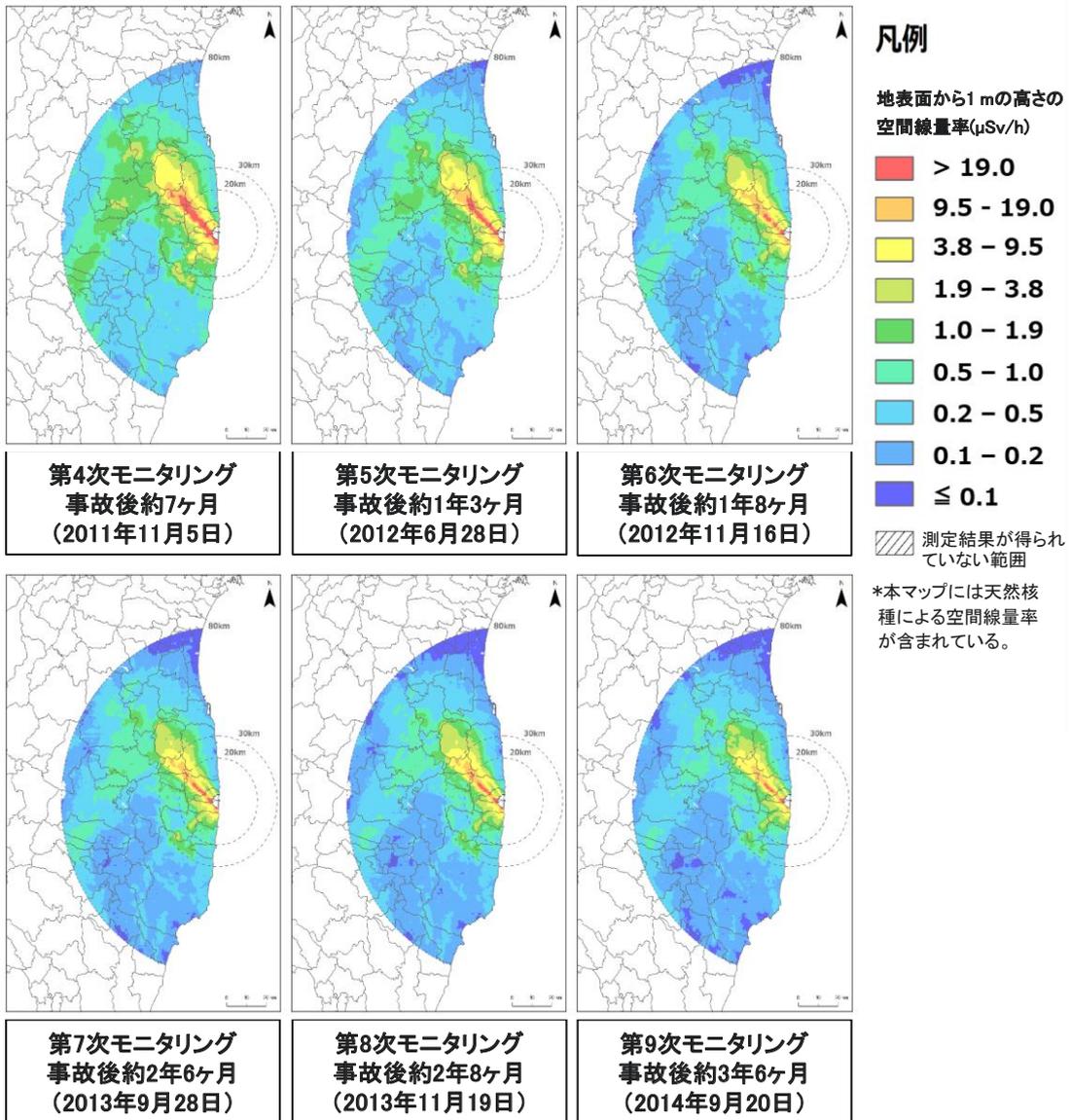


Fig. 6-1 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較

(1/3)

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

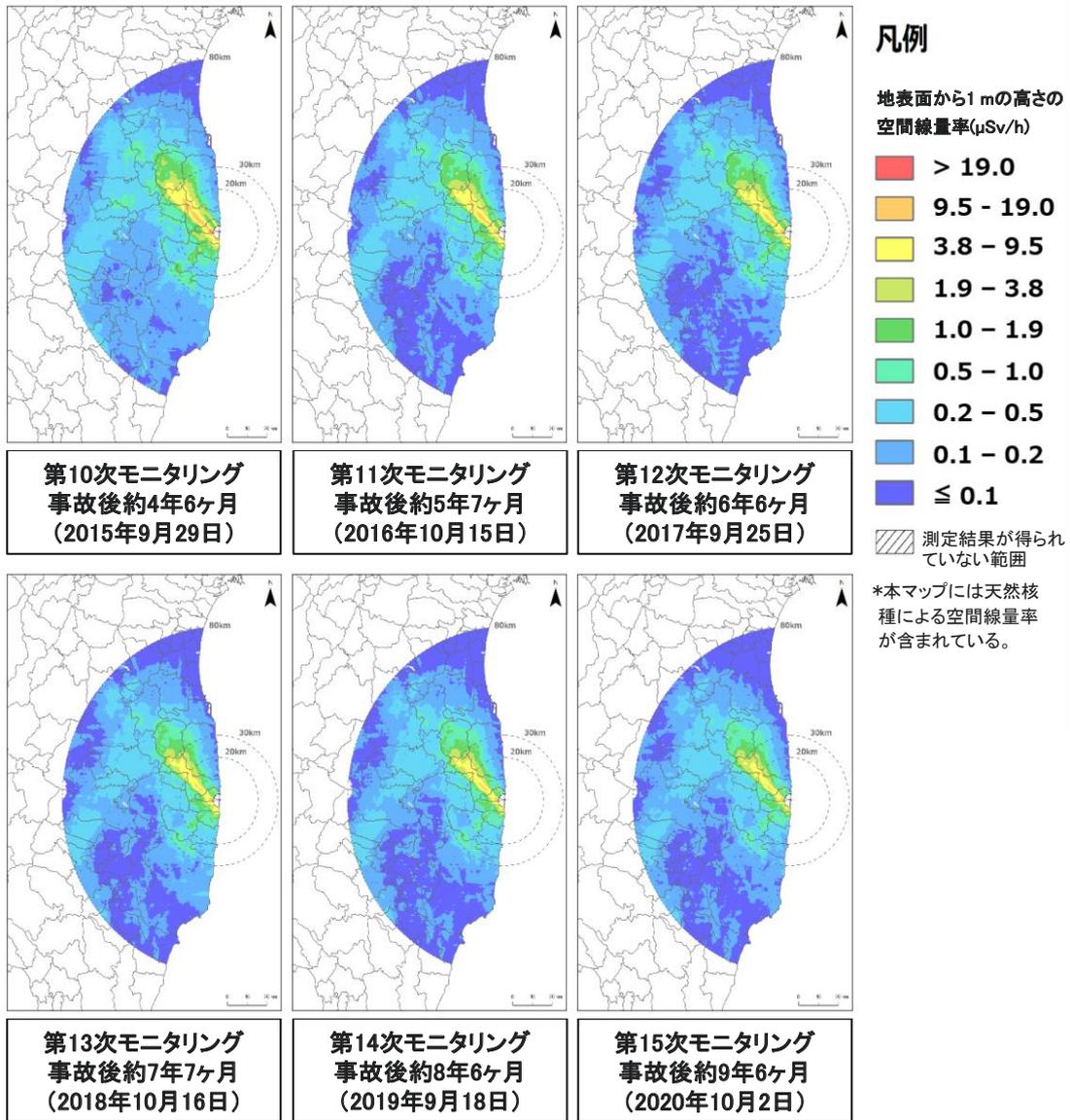


Fig. 6-1 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較

(2/3)

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

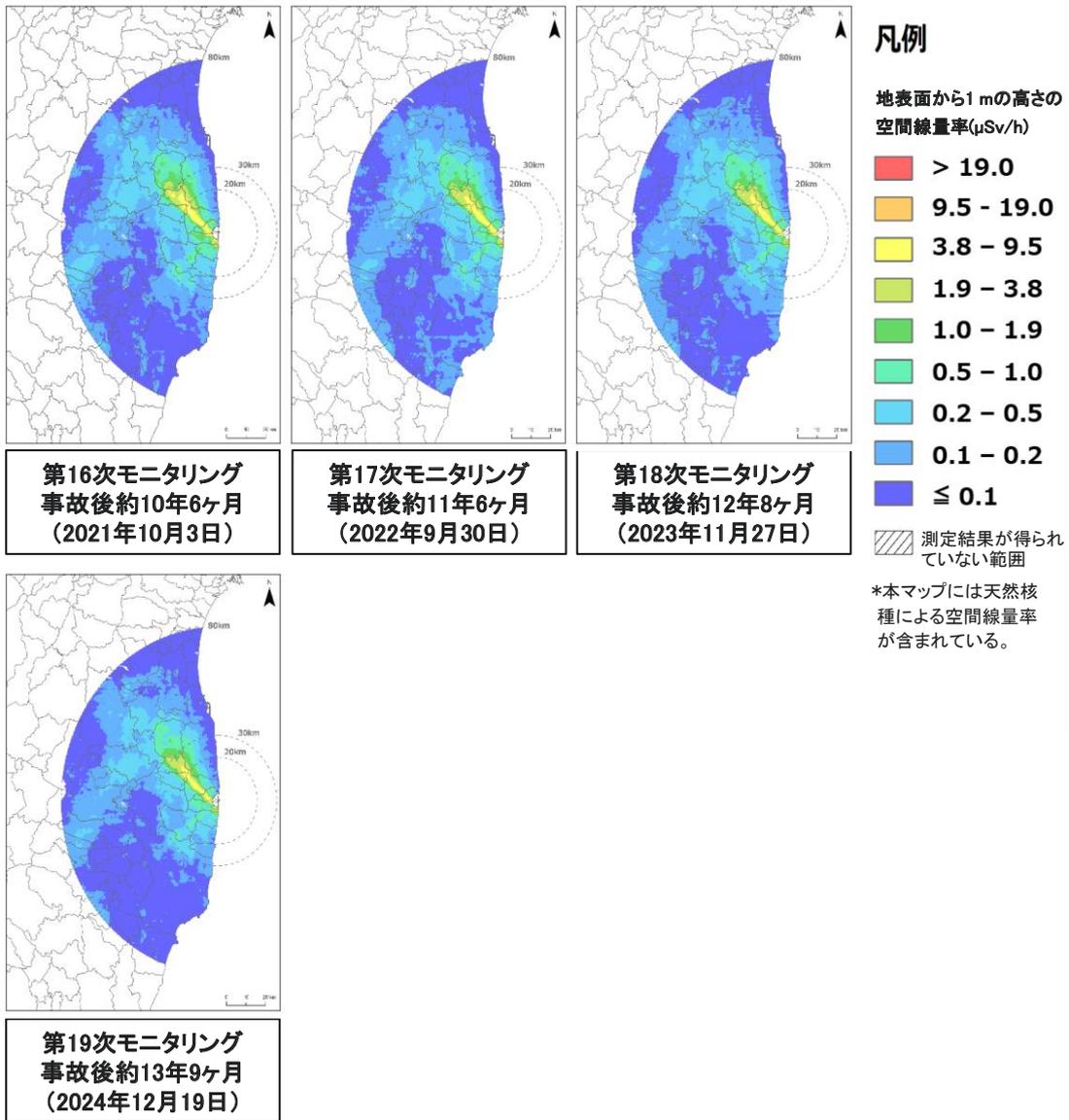


Fig. 6-1 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較

(3/3)

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

Table 6-1 80 km 圏内における空間線量率の面積割合の経年推移 (表形式)
(1/2)

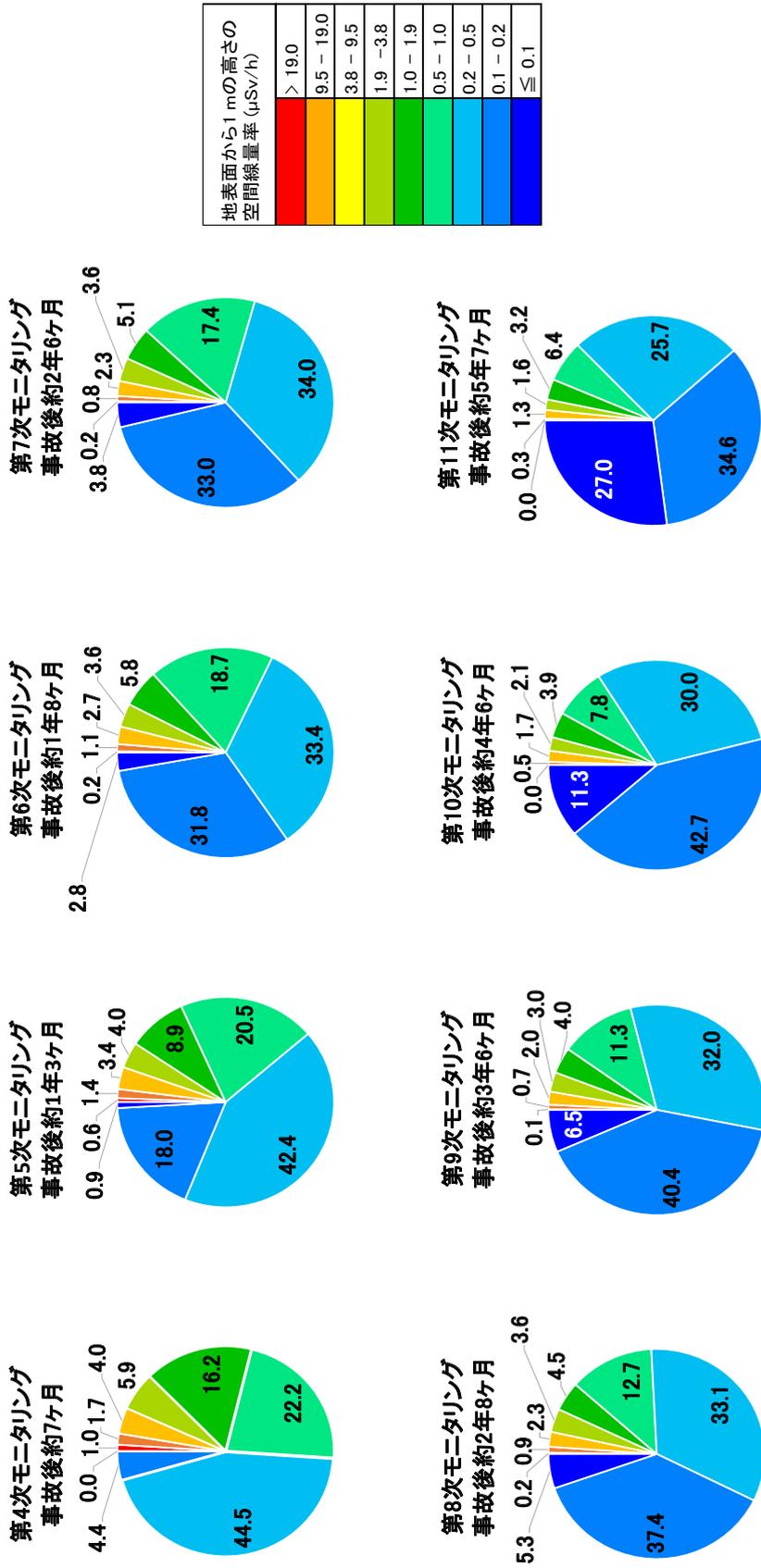
空間線量率 (μSv/h)	面積割合 (%)										
	第4次モニタリング 事故後約7ヶ月	第5次モニタリング 事故後約1年3ヶ月	第6次モニタリング 事故後約1年8ヶ月	第7次モニタリング 事故後約2年6ヶ月	第8次モニタリング 事故後約2年8ヶ月	第9次モニタリング 事故後約3年6ヶ月	第10次モニタリング 事故後約4年6ヶ月	第11次モニタリング 事故後約5年7ヶ月			
> 19.0	1.0	0.6	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0			
9.5 - 19	1.7	1.4	1.1	0.8	0.9	0.7	0.5	0.3			
3.8 - 9.5	4.0	3.4	2.7	2.3	2.3	2.0	1.7	1.3			
1.9 - 3.8	5.9	4.0	3.6	3.6	3.6	3.0	2.1	1.6			
1.0 - 1.9	16.2	8.9	5.8	5.1	4.5	4.0	3.9	3.2			
0.5 - 1.0	22.2	20.5	18.7	17.4	12.7	11.3	7.8	6.4			
0.2 - 0.5	44.5	42.4	33.4	34.0	33.1	32.0	30.0	25.7			
0.1 - 0.2	4.4	18.0	31.8	33.0	37.4	40.4	42.7	34.6			
≦ 0.1	0.0	0.9	2.8	3.8	5.3	6.5	11.3	27.0			
合計	100	100	100	100	100	100	100	100			
0.2を上回る割合	95.5	81.1	65.5	63.3	57.3	53.1	45.9	38.4			

※面積の合計値は約8,923 km²である。
※面積割合の合計値は端数処理の関係上、必ずしも100%とはならない。

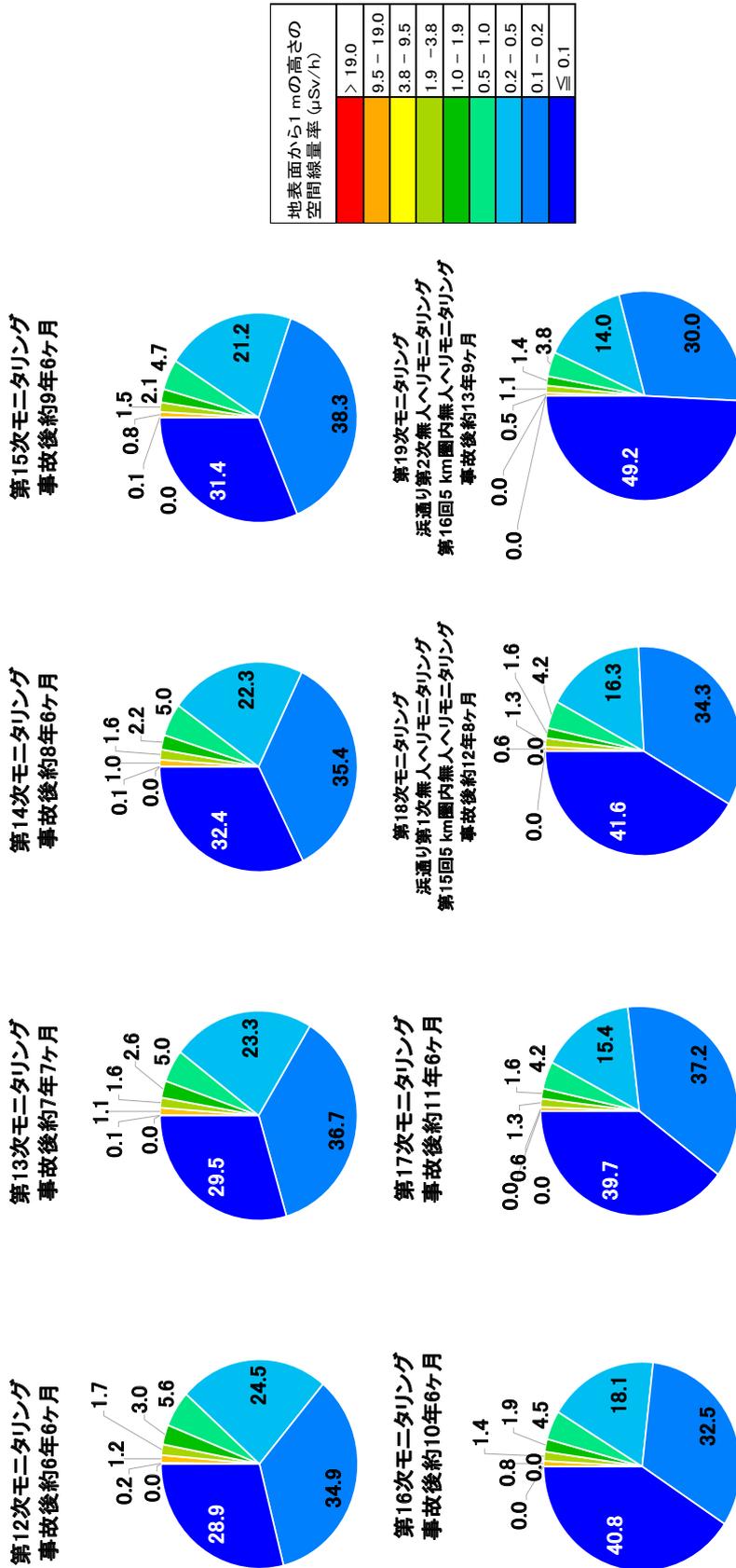
Table 6-1 80 km 圏内における空間線量率の面積割合の経年推移 (表形式)
(2/2)

空間線量率(μSv/h)	面積割合 (%)							
	第12次モニタリング 事故後約6年6ヶ月	第13次モニタリング 事故後約7年7ヶ月	第14次モニタリング 事故後約8年6ヶ月	第15次モニタリング 事故後約9年6ヶ月	第16次モニタリング 事故後約10年6ヶ月	第17次モニタリング 事故後約11年6ヶ月	第18次モニタリング 浜通り第1次無人へ りモニタリング 第15回5 km圏内無 人へりモニタリング 事故後約12年8ヶ月	第19次モニタリング 浜通り第2次無人へ りモニタリング 第16回5 km圏内無 人へりモニタリング 事故後約13年9ヶ月
> 19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9.5 - 19	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
3.8 - 9.5	1.2	1.1	1.0	0.8	0.8	0.6	0.6	0.5
1.9 - 3.8	1.7	1.6	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.1
1.0 - 1.9	3.0	2.6	2.2	2.1	1.9	1.6	1.6	1.4
0.5 - 1.0	5.6	5.0	5.0	4.7	4.5	4.2	4.2	3.8
0.2 - 0.5	24.5	23.3	22.3	21.2	18.1	15.4	16.3	14.0
0.1 - 0.2	34.9	36.7	35.4	38.3	32.5	37.2	34.3	30.0
≤ 0.1	28.9	29.5	32.4	31.4	40.8	39.7	41.6	49.2
合計	100	100	100	100	100	100	100	100
0.2を上回る割合	36.2	33.7	32.2	30.3	26.8	23.1	24.1	20.8

※面積の合計値は約8,923 km²である。
※面積割合の合計値は端数処理の関係上、必ずしも100%とはならない。



※面積の合計値は約8,923 km²である。
 ※面積割合の合計値は端数処理の関係上、必ずしも100%とはならない。
 Fig. 6-2 80 km 圏内における空間線量率の面積割合の経年推移 (円グラフ形式)
 (1/2)



※面積の合計値は約8,923 km²である。
 ※面積割合の合計値は端数処理の関係上、必ずしも100%とはならない。
 Fig. 6-1 80 km 圏内における空間線量率の面積割合の経年推移 (円グラフ形式) (2/2)

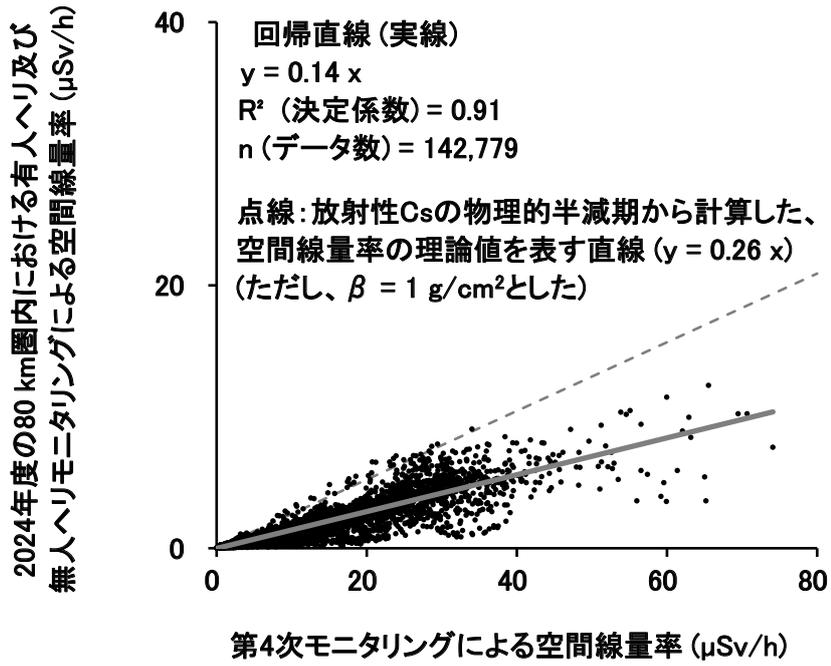


Fig. 6-3 第4次モニタリング及び2024年度の80 km圏内における有人へり及び無人へりモニタリングによる空間線量率算出結果の比較 (天然放射性核種による寄与を含む。)

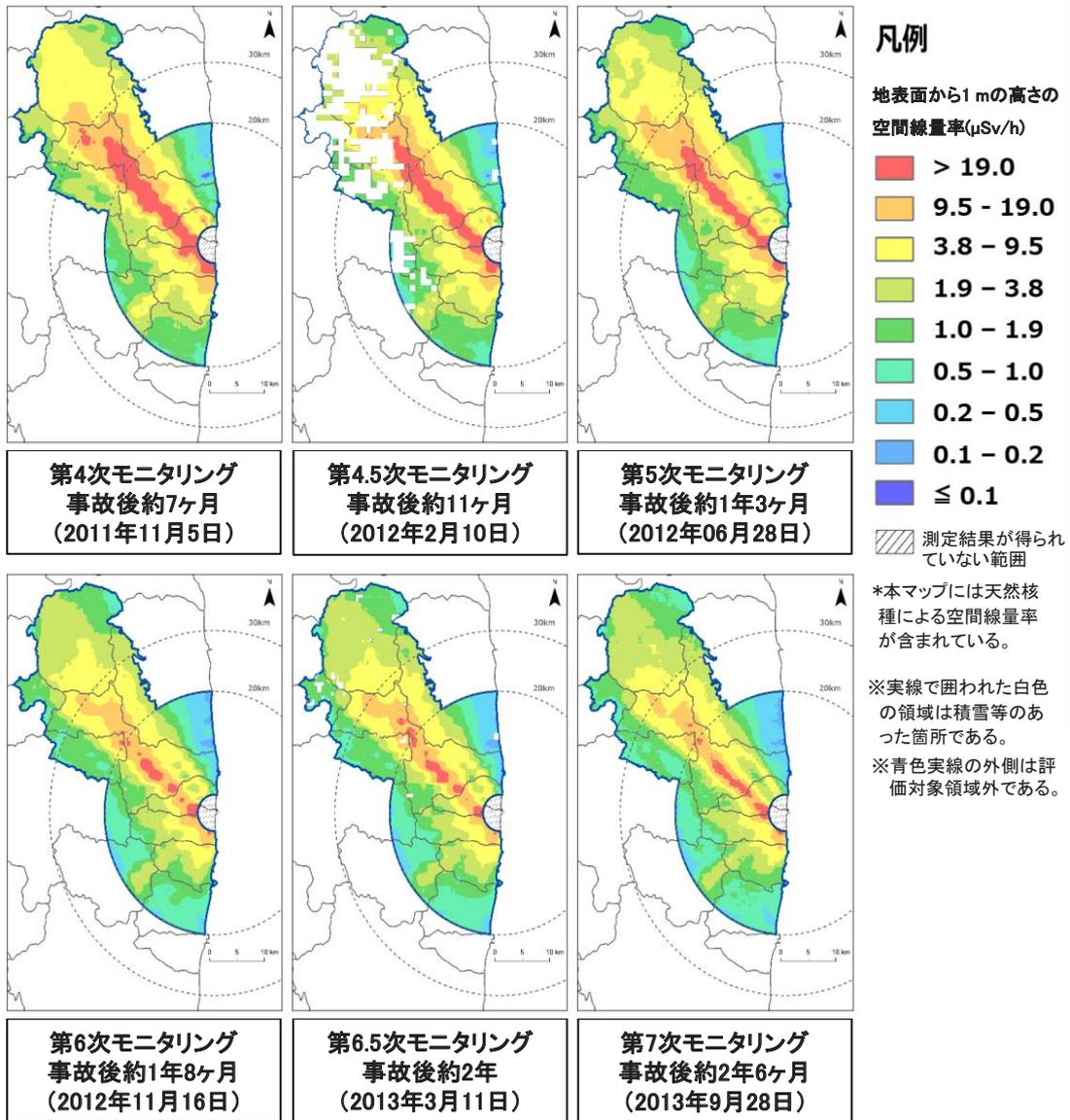


Fig. 6-4 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(1/3)

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

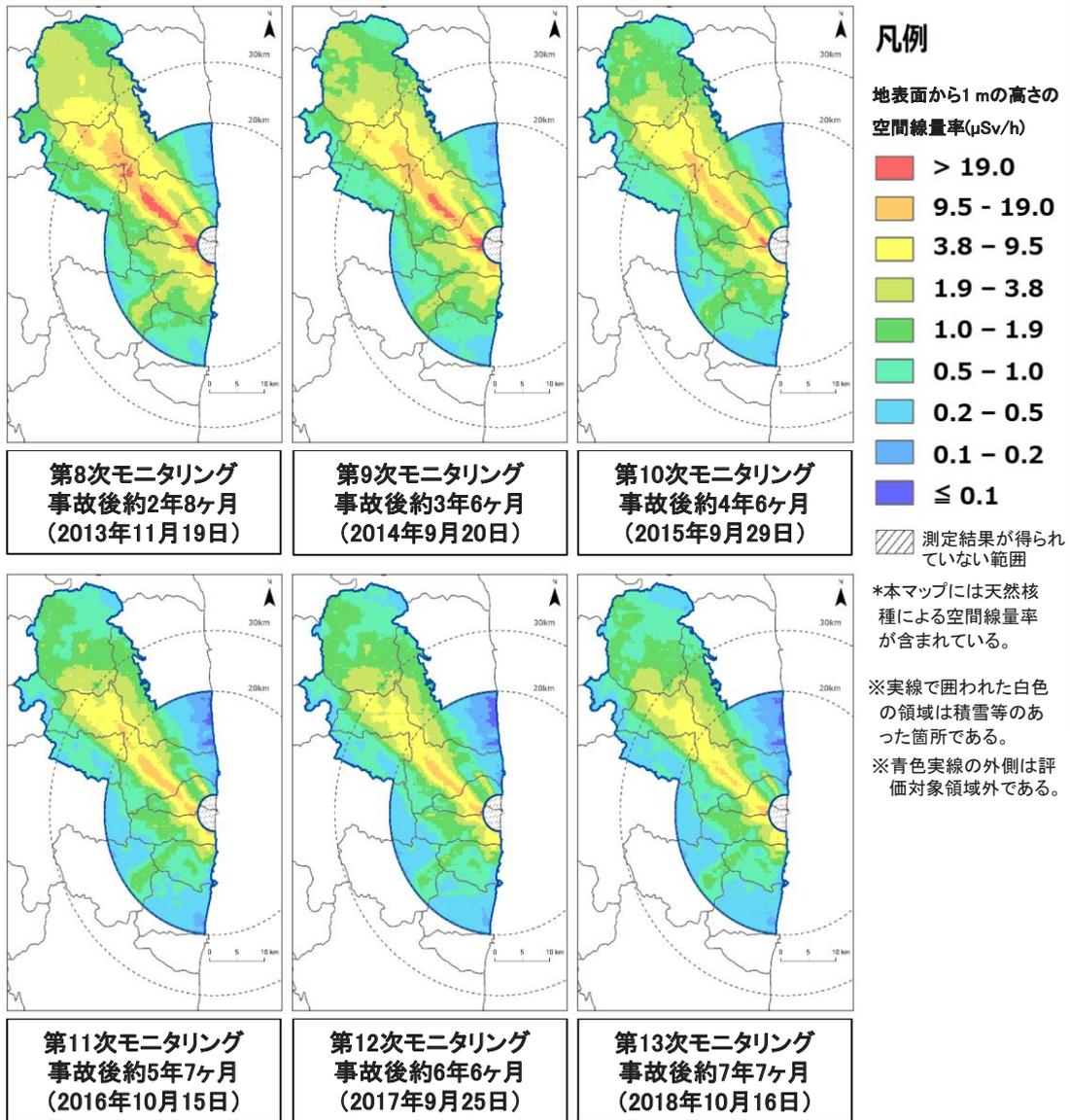


Fig.6-4 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(2/3)

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

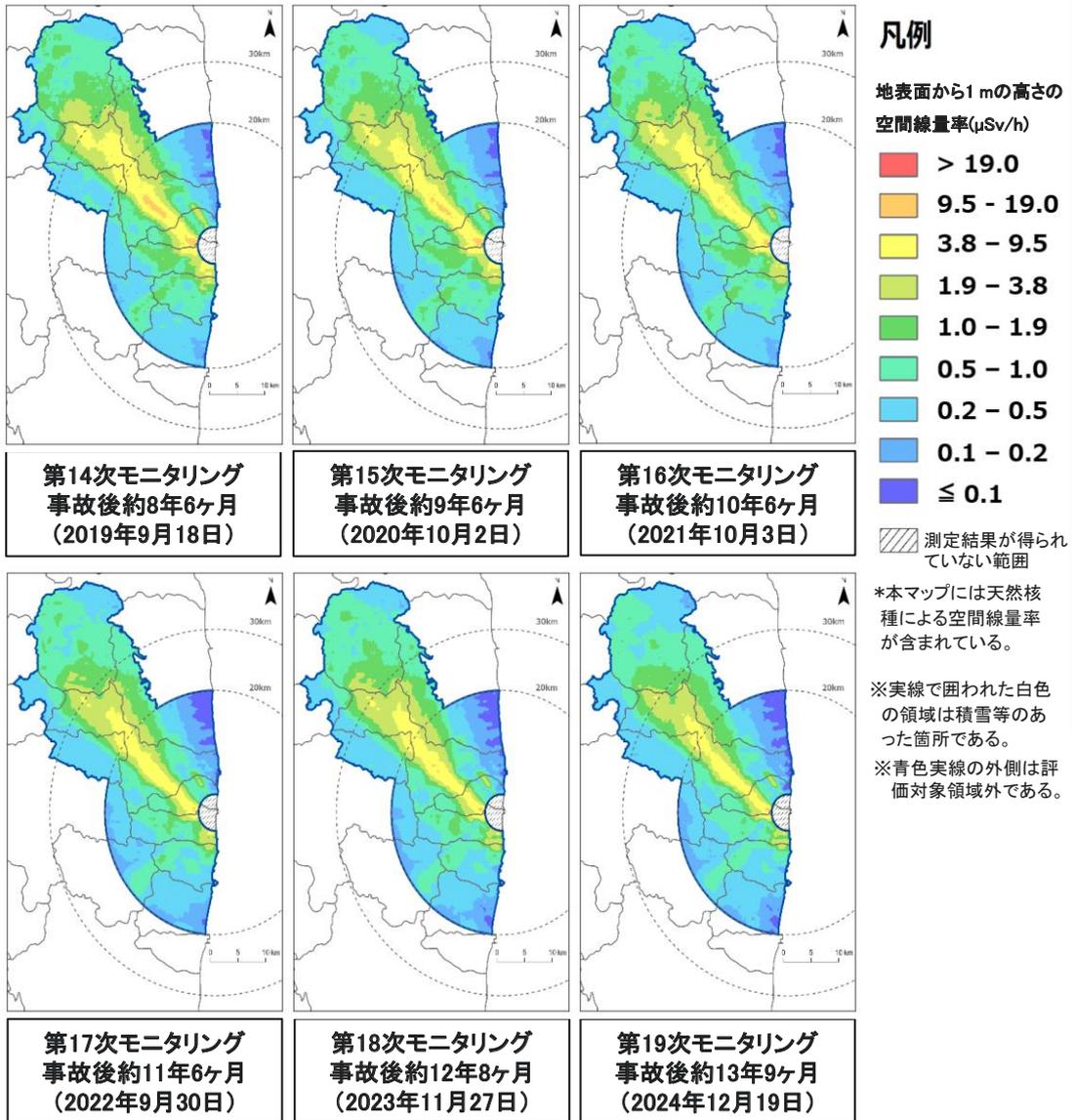


Fig.6-4 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(3/3)

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

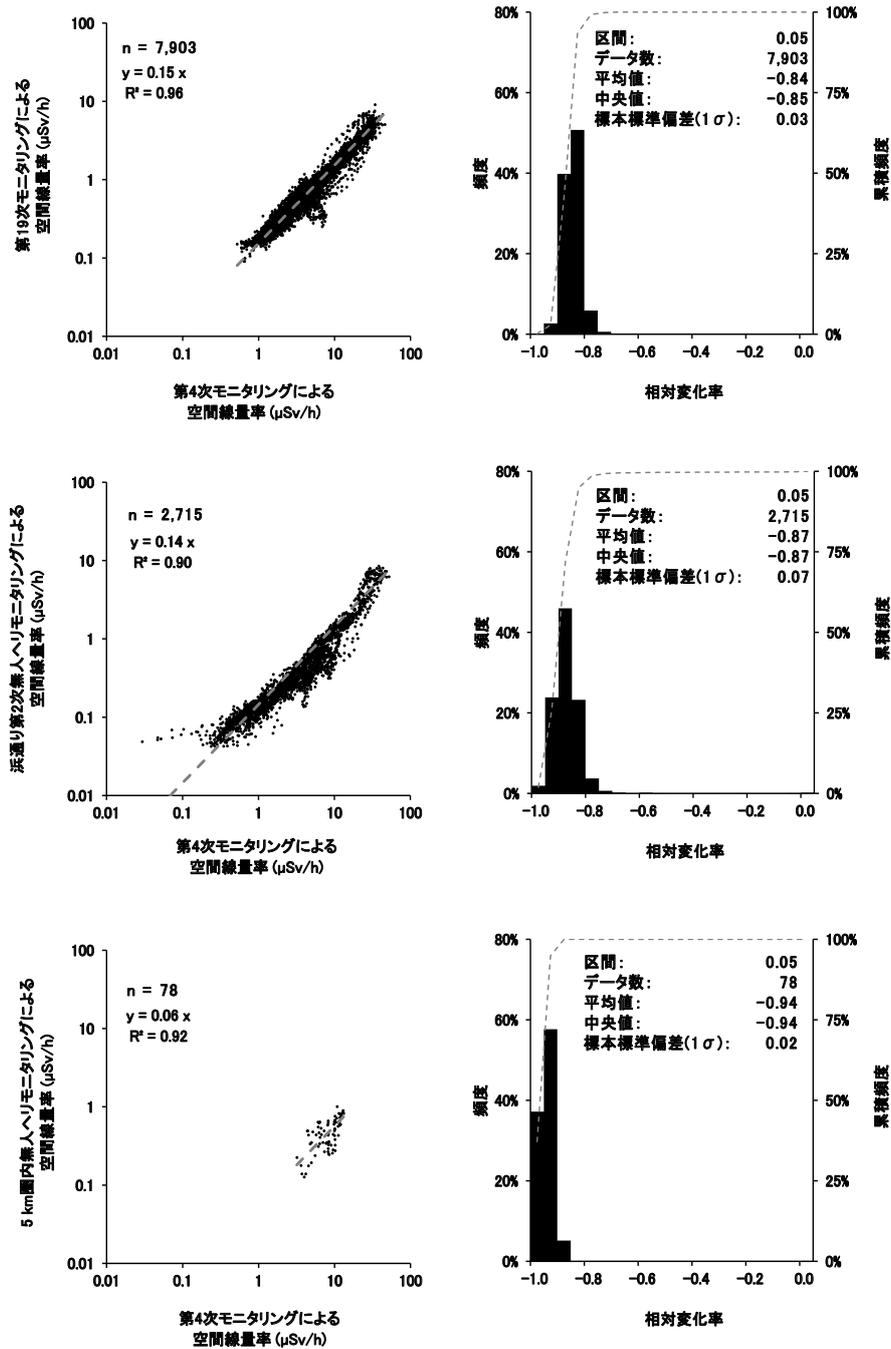


Fig. 6-5 旧避難指示区域における第4次モニタリングと第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km 圏内無人ヘリモニタリングの空間線量率算出結果の比較 (天然放射性核種による寄与を含む。)

(左：散布図、右：相対変化率のヒストグラム)

(上段：第19次モニタリング、中段：浜通り第2次無人ヘリモニタリング、下段：第16回5 km 圏内無人ヘリモニタリング)

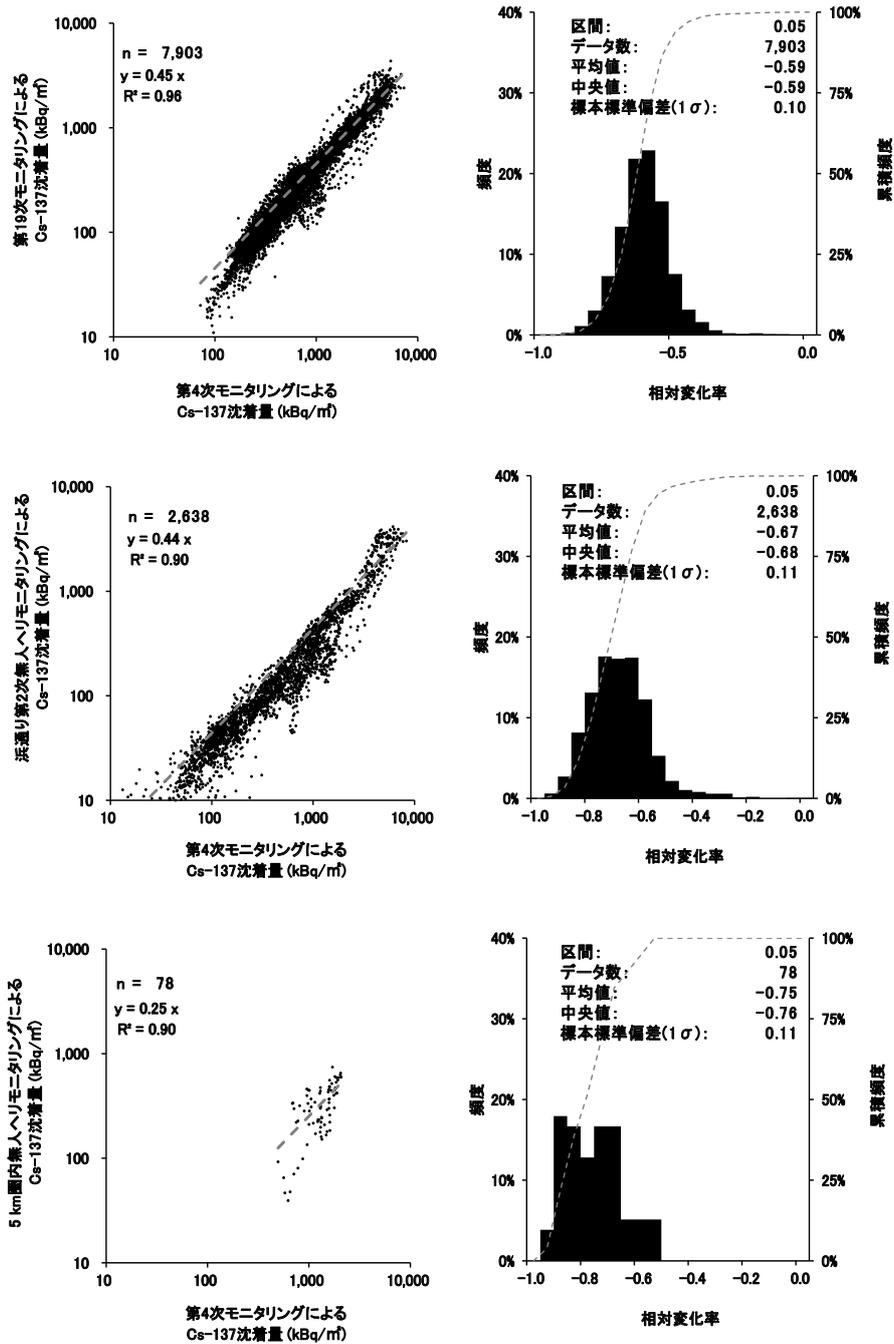


Fig. 6-6 旧避難指示区域における第4次モニタリングと第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングのCs-137沈着量算出結果の比較(天然放射性核種による寄与を含む。)

(左：散布図、右：相対変化率のヒストグラム)

(上段：第19次モニタリング、中段：浜通り第2次無人ヘリモニタリング、下段：第16回5 km圏内無人ヘリモニタリング)

6.2. 実効半減期の算出

東電福島原子力発電所事故から約 14 年経過し、事故直後から実施してきた 80 km 圏内外の航空機モニタリング測定データはビッグデータとして蓄積されてきている。環境中における放射性物質の変化は、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結果から、複数の指数関数で近似できることが知られており、東電福島原子力発電所事故後においても有人ヘリ及び無人ヘリで取得したデータを利用して、空間線量率の実効半減期が評価されている⁴⁶⁾。ここでは、これまでの測定データの変化傾向を定量的に把握するため、測定データの指数関数近似について検討した。その結果として求められる実効半減期は、空間線量率の遡及的な評価及び測定データの信頼性の推定や将来の空間線量率の推定に重要なパラメータとなる。

2011 年 (平成 23 年) から得られている航空機モニタリングの測定データのうち 80 km 圏内について政府の定めた統計に用いる基準地域メッシュ (1 km × 1 km) ごとに平均化した。80 km 圏内における総メッシュ数は 10,174 メッシュであるが、河口域や湖などの水域が含まれるメッシュを除き、2011 年度 (平成 23 年度) の第一次モニタリングの結果が 0.5 μSv/h 以上であった 4,939 メッシュを評価対象とした。近年、80 km 圏内においても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。空間線量率の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。そこで、KURAMA-II による走行サーベイ結果を基に市町村ごとに評価されたバックグラウンド空間線量率⁵²⁾を用いて放射性 Cs 由来の空間線量率を算出した。以下の本節における空間線量率は、天然放射性核種による空間線量率を減算した放射性 Cs 由来の空間線量率である。

指数関数近似に用いたデータは、それぞれの測定手法ごとに、調査期間において全てのデータがそろっているメッシュのみ抽出した。抽出したデータについて、式 [11] に示した 2 つの指数項からなる指数関数による近似を行い、空間線量率の実効半減期を算出した。

$$D = a \exp\left(-\frac{0.693}{t_{\text{short}}}t\right) + b \exp\left(-\frac{0.693}{t_{\text{long}}}t\right) + C \quad [11]$$

ここで、

D: 全空間線量率 (μSv/h)

a: 減衰が速い成分の空間線量率 (μSv/h)

t_{short}: 減衰が速い成分の実効半減期 (年)

b: 減衰が遅い成分の空間線量率 (μSv/h)

t_{long}: 減衰が遅い成分の実効半減期 (年)

t: 東電福島原子力発電所事故からの経過時間 (年)

C: 減衰の速い及び遅い成分に含まれない空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

である。

なお、式 [11] において $t = 0$ とした場合の $a + b + C$ は東電福島原子力発電所事故直後の空間線量率を意味する。定数 **C** は 0 を初期値として反復計算を行い、 t_{short} 等のパラメータの近似解が通常取り得る信頼区間内で収束せず、その標本標準偏差が近似解の 2 倍以上になった場合には別途、初期値を与えて再計算して求めた。近似曲線については最小二乗法により 95% の信頼区間を計算するとともに、実効半減期についても 95% の信頼区間を計算した。

Fig. 6-7 に 80 km 圏内における有人ヘリモニタリング結果に指数関数近似を適用した結果を示す。Fig. 6-7 (左) では、各測定時期における全てのメッシュの空間線量率値を灰色点 (Data) として示し、その算術平均値を白丸 (Average) で示した。黒線は平均値に対して求めた指数関数フィッティング曲線であり、点線及び一点鎖線はその 95% 信頼区間を示す。Fig. 6-7 (右) は式 [11] の各成分を分離して示したものである。点線は短半減期成分 (**a** 項)、破線は長半減期成分 (**b** 項)、二点鎖線は定数項 **C** を表し、太線が全体の近似曲線である。これより、東電福島原子力発電所事故から 2 年目までは減衰の速い成分による影響が顕著であり、2 年目以降は減衰の遅い成分が支配的であることが分かる。指数関数近似の結果得られた実効半減期に関する各成分について Table 6-2 にまとめた。減衰の速い成分については、有効数字 2 桁で表記すると、約 0.48 年 (95% 信頼区間 : 0.37 年 ~ 0.60 年) となり、東電福島原子力発電所事故の初期においては全空間線量率への寄与割合が比較的大きいものの、事故から概ね半減期の 4 倍強で空間線量率への寄与が実質的に無くなった成分であることが示唆される。減衰の遅い成分については、有効数字 2 桁で表記すると、2.4 年 (95% 信頼区間 : 2.1 年 ~ 2.8 年) となり、東電福島原子力発電所事故から約 14 年経過した現在、半減期の約 6 倍強を経過し空間線量率に寄与し続けている成分であることが示唆される。両成分ともに 95% 信頼区間が平均値 $\pm 30\%$ 以内で実効半減期を推定できており、空間線量率の遡及的な評価及び将来の空間線量率の推定に有効であると考えられる。

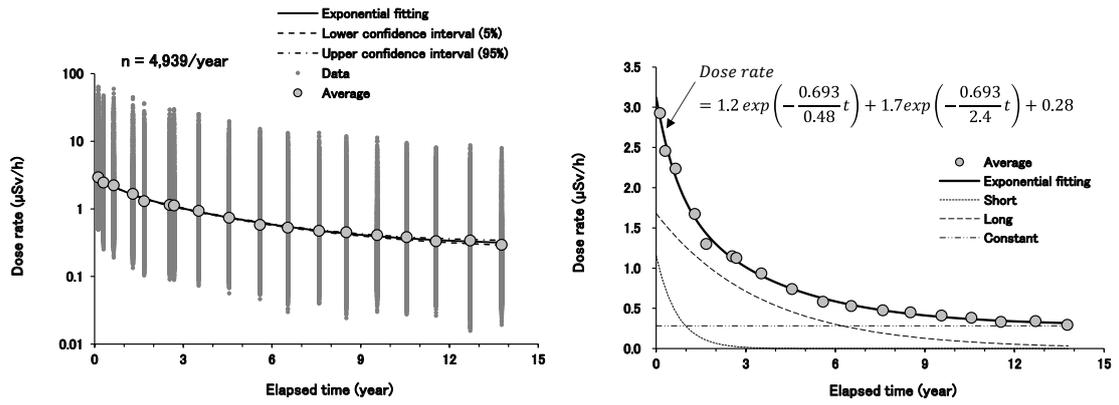


Fig. 6-7 測定値の指数関数近似

Table 6-2 指数関数近似から求めた実効半減期

速い成分		遅い成分	
半減期 (年)	95%信頼区間 (年)	半減期 (年)	95%信頼区間 (年)
0.48	0.37~0.60	2.4	2.1~2.8

6.3. 土地利用区分による空間線量率の変化傾向の違い

国土地理院が提供している「国土数値情報土地利用細分メッシュデータ」⁵³⁾ (以下、土地利用メッシュデータ) を利用し、東電福島原子力発電所周辺における土地利用区分による空間線量率の減少率の違いを考察する。なお、適用する土地利用メッシュデータは、第4次モニタリング (2011年、平成23年) から第8次モニタリング (2013年、平成25年) に対しては平成21年度公開版、第9次モニタリング (2014年、平成26年) から第10次モニタリング (2015年、平成27年) に対しては平成26年度公開版、第11次モニタリング (2016年、平成28年) から第15次モニタリング (2020年、令和2年) に対しては平成28年度公開版、第16次モニタリング以降に対しては令和3年度公開版 (2025年 (令和7年) 3月1日現在の最新版) とした。80 km 圏内の土地利用メッシュデータについて、Fig. 6-8 (平成21年度公開版)、Fig. 6-9 (平成26年度公開版)、Fig. 6-10 (平成28年度公開版) 及び Fig. 6-11 (令和3年度公開版) に示す。これらの土地利用区分の内、人為的活動等により空間線量率に最も違いが現れると考えられる市街地部及び東電福島原子力発電所周辺において大部分を占める森林部について、過去の80 km 圏内の空間線量率の変化率を比較した。市街地部及び森林部の定義は以下の通りである。

- ・森林部：多年生植物の密生している地域とする。Fig. 6-8～Fig. 6-11 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. 6-8～Fig. 6-11 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節に示したように、測定範囲を250 m × 250 m 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変化率 (例えば、第4次モニタリングに対する第19次モニタリングの相対変化率の場合、(第19次モニタリングの結果－第4次モニタリングの結果) / (第4次モニタリングの結果) となる。) を算出することにより行った。なお、第4次モニタリングに適用した土地利用メッシュデータ (平成21年度公開版) とは異なる土地利用メッシュデータを適用した第8次モニタリング以降を比較対象とする場合には、土地利用区分が平成21年度から不変のデータのみを抽出し、相対変化率の計算に用いた。

令和6年度の80 km 圏内での第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおけるメッシュごとの第4次モニタリングに対する相対変化率の比較結果を Fig. 6-12、Fig. 6-13 及び Fig. 6-14 にそれぞれ示す。第4次モニタリングに対する第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km 圏内無人ヘリモニタリングの減少率は、それぞれ平均値で市街地部では約79%、約87%及び約95%であり、森林部では約79%、約86%及び約88%であった。

東電福島原子力発電所の比較的近傍を測定した浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの方が、第 19 次モニタリングよりも相対変化率が大きい傾向にあった。また、市街地部と森林部の相対変化率については、第 19 次モニタリングでは同一であったが、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングでは市街地部の方が 1%～7%程度大きかった。

第 4 次モニタリングを基準とした、第 5 次モニタリング以降それぞれの各土地利用区分における空間線量率の相対変化率を Table 6-3～Table 6-7 に示す。2023 年度 (令和 5 年度) 以降については、80 km 圏内のモニタリングに無人ヘリモニタリングを導入したことに伴い、Table 6-7 に示した通り、モニタリング種別に切り分けて比較することとした。第 17 次モニタリング以前の相対変化率の計算結果では、森林部よりも市街地の方が 2%～7%相対変化率が大きい傾向にある。これはウェザリング効果や除染活動により、市街地における放射性 Cs が減少したことに起因すると推察される。しかしながら、東電福島原子力発電所事故から約 14 年経過した現在では、環境中の放射性 Cs の変化量が相対的に小さくなり、市街地部と森林部における空間線量率の変化量の差異が見えづらくなっていると考えられる。なお、Fig. 6-8～Fig. 6-11 の凡例に示した全エリアの相対変化率と森林部のみの相対変化率は概ね同様であった。これは、80 km 圏内の土地利用区分の 65%が森林であることに起因すると考えられる。規制庁による東電福島原子力発電所近傍の車両モニタリングや人手による空間線量率測定結果から解析した結果²⁹⁾によれば、森林部はその他の土地利用区分と比較して減衰速度が小さく、環境中の放射性 Cs が物理的半減期にほとんどしたがって減少していることが報告されている。本報告で得られた森林部の相対変化率もこの傾向と整合している。一方で、森林部と市街地部の相対変化率の差については、文献²⁹⁾に示された地上測定 (車両モニタリングや人手による測定) では両者の性より明瞭に表れているのに対し、有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングでは差異が相対的に小さくなる傾向が見られた。これは、有人ヘリ及び無人ヘリ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。

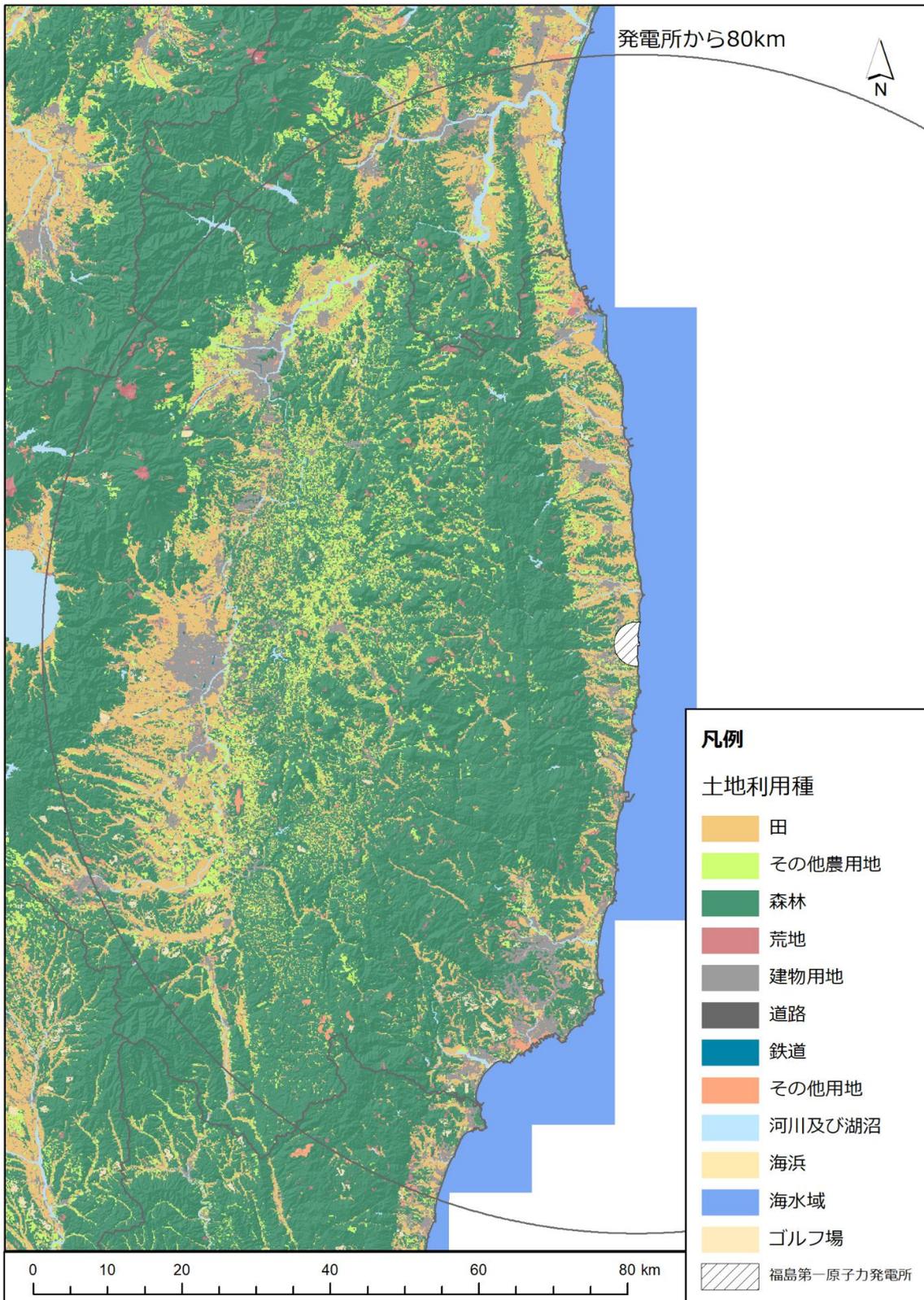


Fig. 6-8 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ⁵³⁾より)

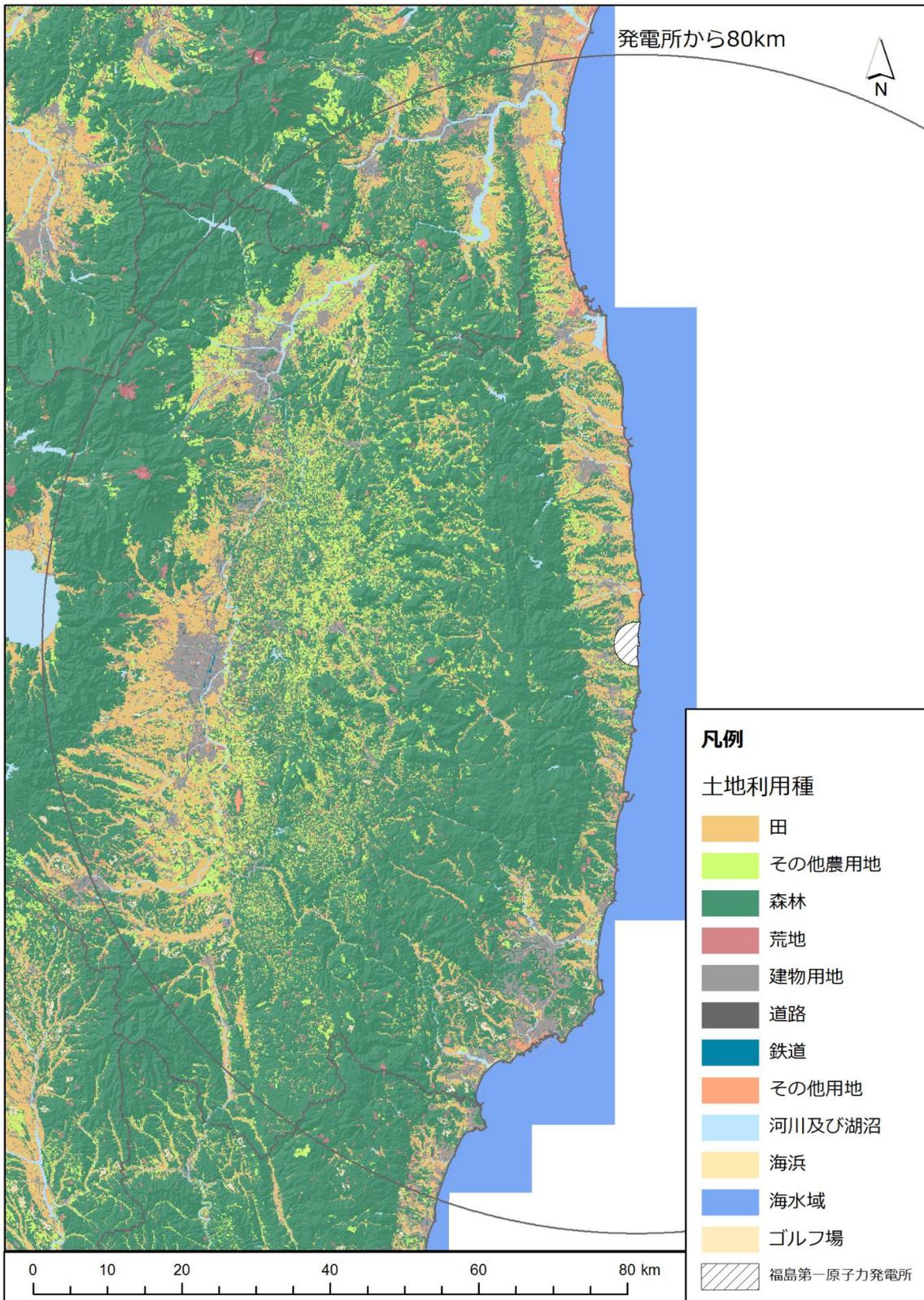


Fig. 6-9 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ⁵³⁾より)

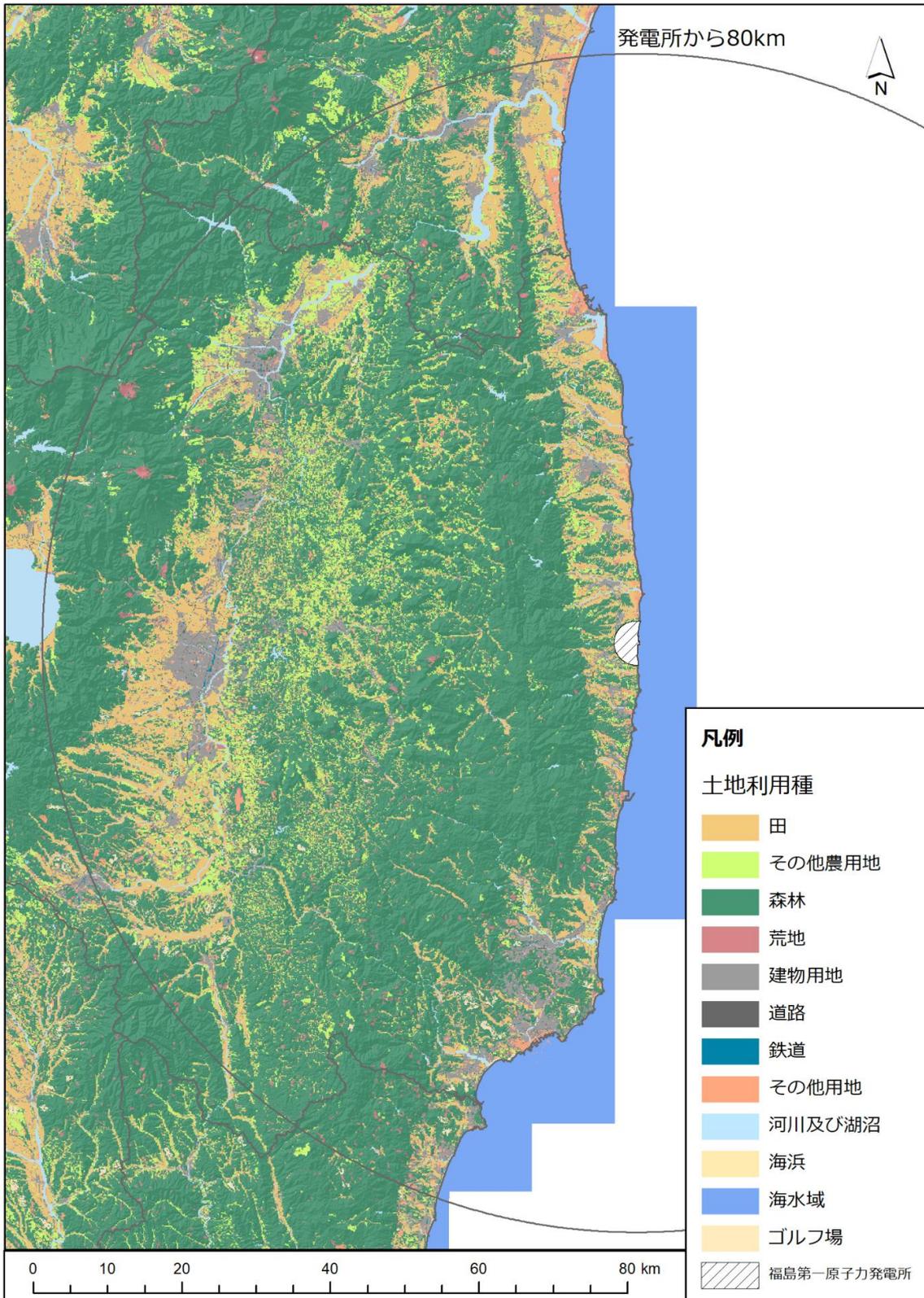


Fig. 6-10 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ⁵³⁾より)

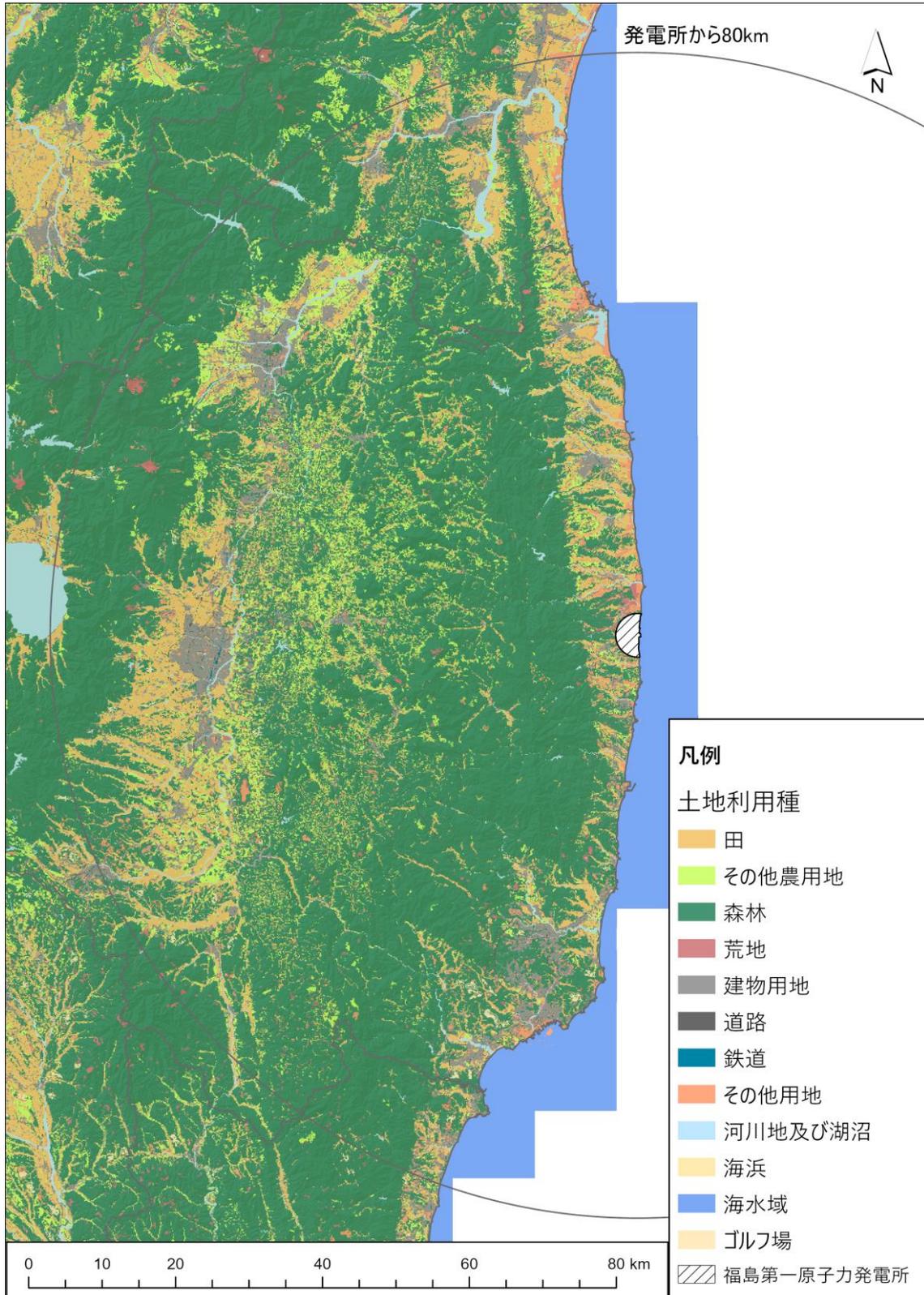


Fig. 6-11 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (令和 3 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ⁵³⁾より)

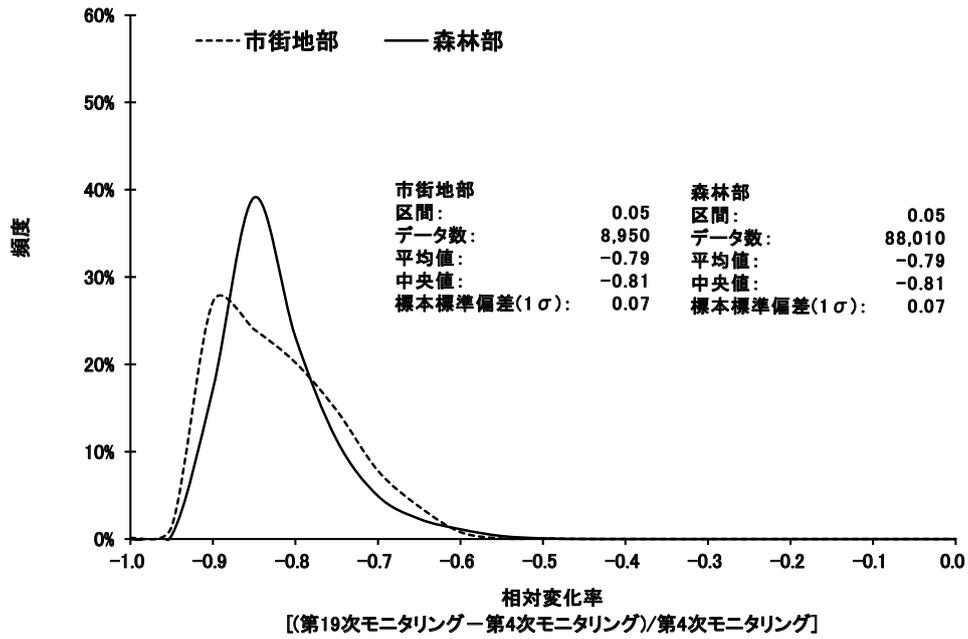


Fig. 6-12 森林部及び市街地部における地表面から1mの高さの空間線量率の第4次モニタリングに対する第19次モニタリングの相対変化率の比較

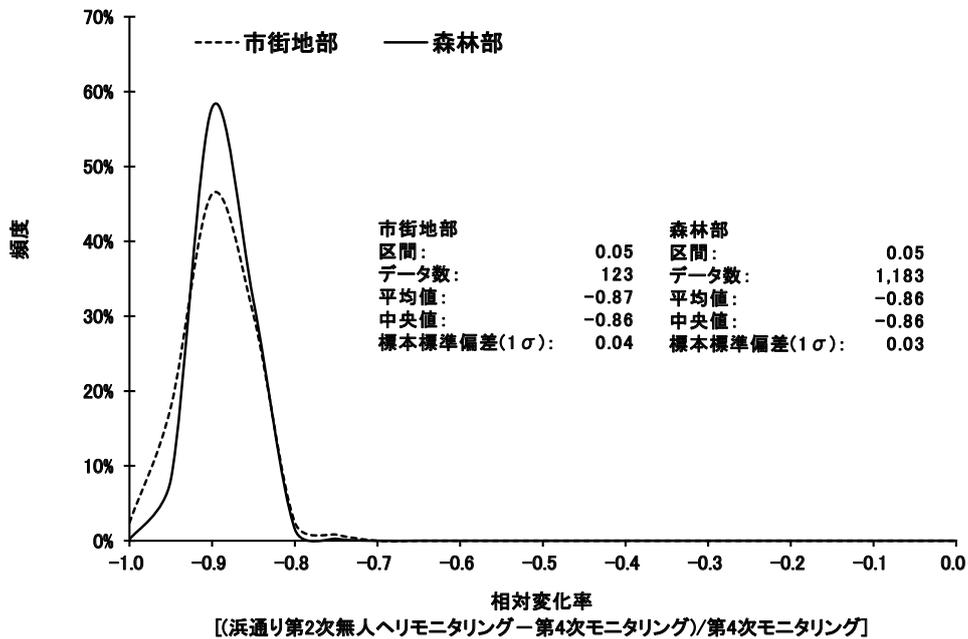


Fig. 6-13 森林部及び市街地部における地表面から1mの高さの空間線量率の第4次モニタリングに対する浜通り第2次無人ヘリモニタリングの相対変化率の比較

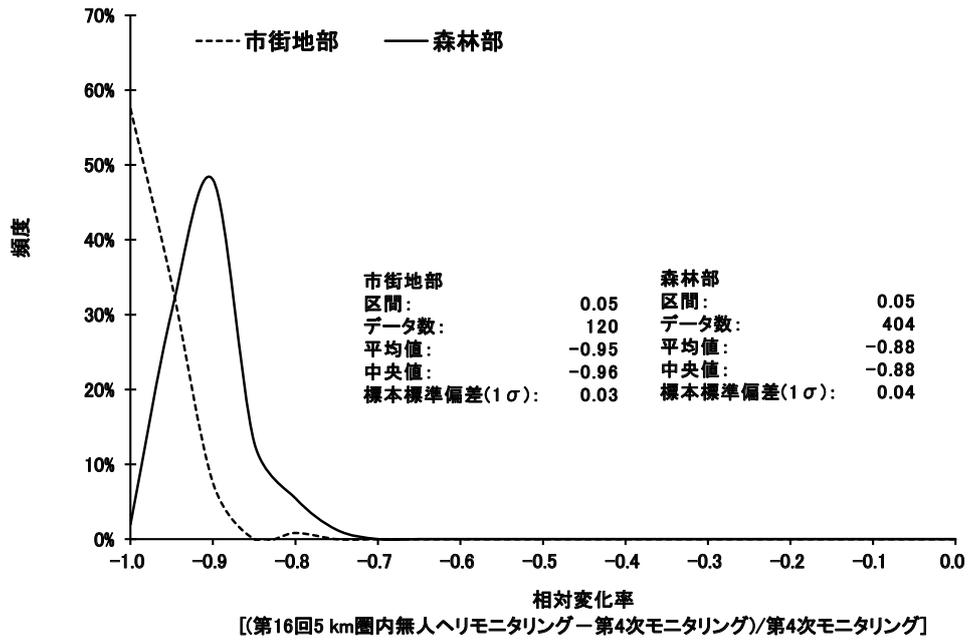


Fig. 6-14 森林部及び市街地部における地表面から1 mの高さの空間線量率の第4次モニタリングに対する第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングの相対変化率の比較

Table 6-3 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較
(国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(平成21年度公開版)⁵³⁾に基づく)

エリア	面積 (km ²)	相対変化率							
		(第5次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング Ave.	SD(1σ)	(第6次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング Ave.	SD(1σ)	(第7次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング Ave.	SD(1σ)	(第8次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング Ave.	SD(1σ)
市街地部	732	-0.31 ± 0.11	0.11	-0.47 ± 0.09	0.09	-0.50 ± 0.08	0.08	-0.56 ± 0.10	0.10
森林部	5,852	-0.28 ± 0.10	0.10	-0.45 ± 0.08	0.08	-0.46 ± 0.09	0.09	-0.51 ± 0.09	0.09
全域	8,923	-0.29 ± 0.11	0.11	-0.45 ± 0.08	0.08	-0.47 ± 0.09	0.09	-0.52 ± 0.10	0.10

※Ave.: 平均値、SD: 標準偏差

Table 6-4 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較
(国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(平成26年度公開版)⁵³⁾に基づく)

エリア	面積 (km ²)	相対変化率	
		(第9次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング Ave.	SD(1σ)
市街地部	791	-0.59 ± 0.09	0.09
森林部	5,771	-0.56 ± 0.09	0.09
全域	8,923	-0.56 ± 0.09	0.09

※Ave.: 平均値、SD: 標準偏差

Table 6-5 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較
(国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(平成28年度公開版)⁵³⁾に基づく)

エリア	面積 (km ²)	相対変化率					
		(第11次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング	(第12次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング	(第13次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング	(第14次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング	(第15次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング	Ave. SD(1σ)
市街地部	836	± 0.07	± 0.08	± 0.10	± 0.08	± 0.10	± 0.10
森林部	5,843	± 0.06	± 0.07	± 0.08	± 0.08	± 0.08	± 0.08
全域	8,923	± 0.07	± 0.08	± 0.08	± 0.08	± 0.08	± 0.08

※Ave.: 平均値、SD: 標本標準偏差

Table 6-6 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較
(国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(令和3年度公開版)⁵³⁾に基づく)

エリア	面積 (km ²)	相対変化率		
		(第16次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング	(第17次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング	Ave. SD(1σ)
市街地部	888	± 0.08	± 0.11	± 0.11
森林部	5,924	± 0.07	± 0.08	± 0.08
全域	8,923	± 0.07	± 0.08	± 0.08

※Ave.: 平均値、SD: 標本標準偏差

Table 6-7 森林部及び市街地部における空間線量率のモニタリング種別ごとの相対変化率の比較
(国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(令和3年度公開版)⁵³⁾に基づく)

エリア	面積 (km ²)	相対変化率		面積 (km ²)	相対変化率	
		Ave.	SD(1σ)		Ave.	SD(1σ)
市街地部	830	-0.77	± 0.09	833	-0.79	± 0.07
森林部	5,829	-0.77	± 0.07	5,793	-0.79	± 0.07
全域	8,682	-0.77	± 0.08	8,645	-0.80	± 0.07
相対変化率						
エリア	面積 (km ²)	相対変化率		面積 (km ²)	相対変化率	
		Ave.	SD(1σ)		Ave.	SD(1σ)
市街地部	36	-0.88	± 0.04	37	-0.87	± 0.04
森林部	56	-0.85	± 0.04	106	-0.86	± 0.03
全域	156	-0.86	± 0.06	217	-0.86	± 0.05
相対変化率						
エリア	面積 (km ²)	相対変化率		面積 (km ²)	相対変化率	
		Ave.	SD(1σ)		Ave.	SD(1σ)
市街地部	21	-0.93	± 0.03	18	-0.95	± 0.03
森林部	39	-0.87	± 0.04	30	-0.88	± 0.04
全域	85	-0.89	± 0.05	67	-0.90	± 0.05

7. 地形の起伏による影響と補正方法の評価

7.1. 背景

山地及び丘陵地の面積は、日本の国土に対して約 7 割を占めている。我が国における原子力発電所の立地周辺地域にも、このような山地及び丘陵地が多く存在する。有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングにおいては、測定される γ 線計数率に対して高度補正係数や空間線量率換算係数による補正を施して、地表面から 1 m の高さの空間線量率の計算を行っている。これは測定対象となる地表面が平坦であると仮定した単純な補正方法であり、このような仮定に基づいて計算を行った場合、山間部では、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コード PHTIS⁵⁴⁾によって地形の起伏を考慮した解析が行われた²⁴⁾。具体的には、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 [1] で示した通り、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が、平坦な地形上における空間線量率換算係数に対する起伏のある地形上の空間線量率換算係数の比の平均値は 0.9 となり、地形を平坦とみなした場合に空間線量率が高く評価される傾向にあることが示唆された²⁴⁾。

本章では、当該解析結果を基に、起伏のある地形上で測定された計数率をより正確に空間線量率に換算する方法を検討し、第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングのデータに適用した。その計算結果と地上測定値を比較し、地形の起伏を考慮した解析手法による空間線量率換算値の精度向上効果を評価した。

7.2. 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} (有人ヘリモニタリング : 300 m、無人ヘリモニタリング : 80 m) で飛行しながら測定した場合、4.1 節に記載した通り、測定点直下において H_{std} と概ね同一の半径内における γ 線計数率を測定していることになる。つまり、有人ヘリモニタリングの場合は直線距離で約 425 m、無人ヘリモニタリングの場合は約 115 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、上述した H_{std} において測定している場合でも、Fig. 7-1 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の標高 (E) よりも高い場合、線源と検出器の平均距離はより近くなる。さらに、有人ヘリモニタリングでは検出器から直線距離 425 m、無人ヘリモニタリングでは検出器から直線距離 115 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。以上を踏まえて、地形を平坦と見なした場合の空間線量率に対して地形の起伏を考慮に入れた補正を考慮して空間線量率を算出する方法(以下、地形補正手法)が2023年度(令和5年度)に開発された²⁹⁾。東電福島原子力発電所から5 km圏内の無人ヘリモニタリングデータに本手法を適用した結果、空間線量率が標準的解析手法の場合よりも10倍近く大きくなり、19.0 $\mu\text{Sv/h}$ を超える明らかに不自然な補正結果が確認され、指数関数的に変化する空気減弱係数 AF の項の影響が強すぎるものが原因であったためと考えられた²⁹⁾。

本研究では、地形を平坦と見なした場合の空間線量率 D_{FLT} から、地形の起伏を考慮に入れた補正を考慮した空間線量率 D_{TOPO} を算出する補正式として、式[12]のように指数関数項に平方根をとることで急激な補正を緩和するよう改良した。

$$D_{TOPO} = D_{FLT} \frac{S_{FLT}}{S} \sqrt{\exp(AF(H_{m'} - H_{std}))} \quad [12]$$

ここで、 $H_{m'}$ は測定時の対地高度 H_m から以下のように求められる。

$$H_{m'} = H_m - (E_{\text{mean}} - E) \quad [13]$$

本研究において改良した地形補正手法を用いて、第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングの解析を行い、規制庁と原子力機構が行っている、福島県内におけるNaI(Tl)検出器(日立製作所製TCS-172B)を用いた地上測定値¹⁶⁾との比較を行った。なお、比較には半径80 km圏内に位置する地上測定値のみ(全4,842点)を用いた。本手法を適用する前後の80 km圏内における第19次モニタリング、第2次浜通り無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングで得られた空間線量率マップの比較をFig. 7-2に示す。標準的解析手法を用いた場合と比較して、地形補正手法では全体的に空間線量率がやや低くなる傾向が見られた。

本手法を適用する前後の空間線量率の換算値と地上測定値との比較結果を散布図及び相対誤差のヒストグラムについて、第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングの順にFig. 7-3~Fig. 7-5に示す。なお、相対誤差は、地上測定値(D_{GND})に対する D_{GND} と有人ヘリまたは無人ヘリモニタリングによる空間線量率(D_{ARM})の差の比($(D_{ARM} - D_{GND}) / D_{GND}$)を取って算出した。散布図より、第19次モニタリングについては、ファクター2に収まったプロットの割合は、標準的解析手法では約91%(全4,615点中4,210点)であったのに対し、地形補正手法では約94%(全4,615点中4,342点)であった。浜通り第2次無人ヘリモニタリングについては、ファクター2に収まったプロットの割合は、標準的解析手法では約88%(全167点中147点)であったのに対し、地形補正手法では約91%(全167点中152点)であった。第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングについては、ファクター2に収まったプロットの割合は、標準的解析手法で

は80%(全60点中48点)であったのに対し、地形補正手法では約83%(全60点中50点)であった。これらの結果より、第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5km圏内無人ヘリモニタリングの全てにおいて、地形補正手法の適用により、地上測定値との整合性がやや改善された。次に、相対誤差のヒストグラムより、第19次モニタリングについては、標準的解析手法に比べて地形補正手法では0付近に頻度分布が多くなり、理想的な分布に近づいた。標本標準偏差については標準的解析手法では0.54であったのに対し、地形補正手法では0.50となり、相対誤差のばらつきがやや改善された。同様に、平均値については0.25から0.11に、中央値については0.11から-0.02となった。浜通り第2次無人ヘリモニタリングについては、標準的解析手法に比べて地形補正手法では0.5以上の領域にあった頻度分布が0に近づいた。標本標準偏差については標準的解析手法では0.57であったのに対し、地形補正手法では0.50となった。同様に、平均値については0.30から0.13に、中央値については0.17から0.04となった。第16回5km圏内無人ヘリモニタリングについては、標準的解析手法と地形補正手法とで頻度分布の概形はさほど変化せず、不連続な分布が認められた。標本標準偏差については標準的解析手法では0.89であったのに対し、地形補正手法では0.74となった。同様に、平均値については0.46から0.25に、中央値については0.34から0.16となった。また、相対誤差の絶対値を取り、その算術平均値に100を乗じた値(平均絶対パーセント誤差;0%に近いほど地上測定値との整合性が良い)を比較したところ、第19次モニタリングでは、標準的解析手法では約38%であったのに対し、地形補正手法では約33%であった。浜通り第2次無人ヘリモニタリングについては、標準的解析手法では約45%であったのに対し、地形補正手法では約38%であった。第16回5km圏内無人ヘリモニタリングについては、標準的解析手法では約64%であったのに対し、地形補正手法では約51%であった。いずれの場合も、地形補正手法を適用すると標準的解析手法よりも地上測定値との整合性が5%~10%程度改善される傾向が見られた。

以上のことから、2024年度(令和6年度)に補正方法を改良した地形補正手法が有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングの両方に有効に機能し、本手法により地上測定値との整合性が改善されることを確認できた。しかしながら、80km圏内の測定データ量に対して、地形補正手法による空間線量率の再算出には48時間近く要しているのが現状である。また、地形補正手法を適用するための地形データは、80km圏内しか整備されていない。今後は、地形補正手法の処理高速化に向けたアルゴリズム改良に取り組むとともに、東電福島原子力発電所周辺以外のエリアにも適用できるように地形データの整備を拡充していくなど、本手法の実用性向上を目指した改良に取り組んでいく予定である。

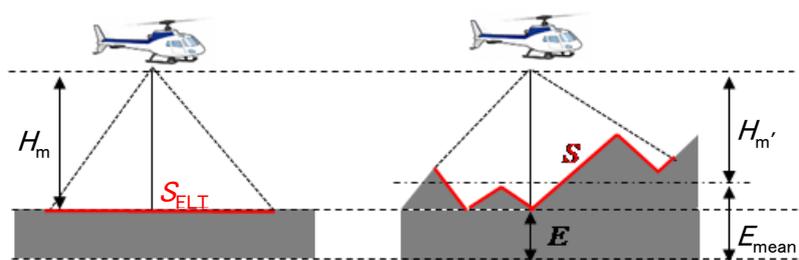


Fig. 7-1 地形の起伏による影響を補正する場合に考慮すべき点

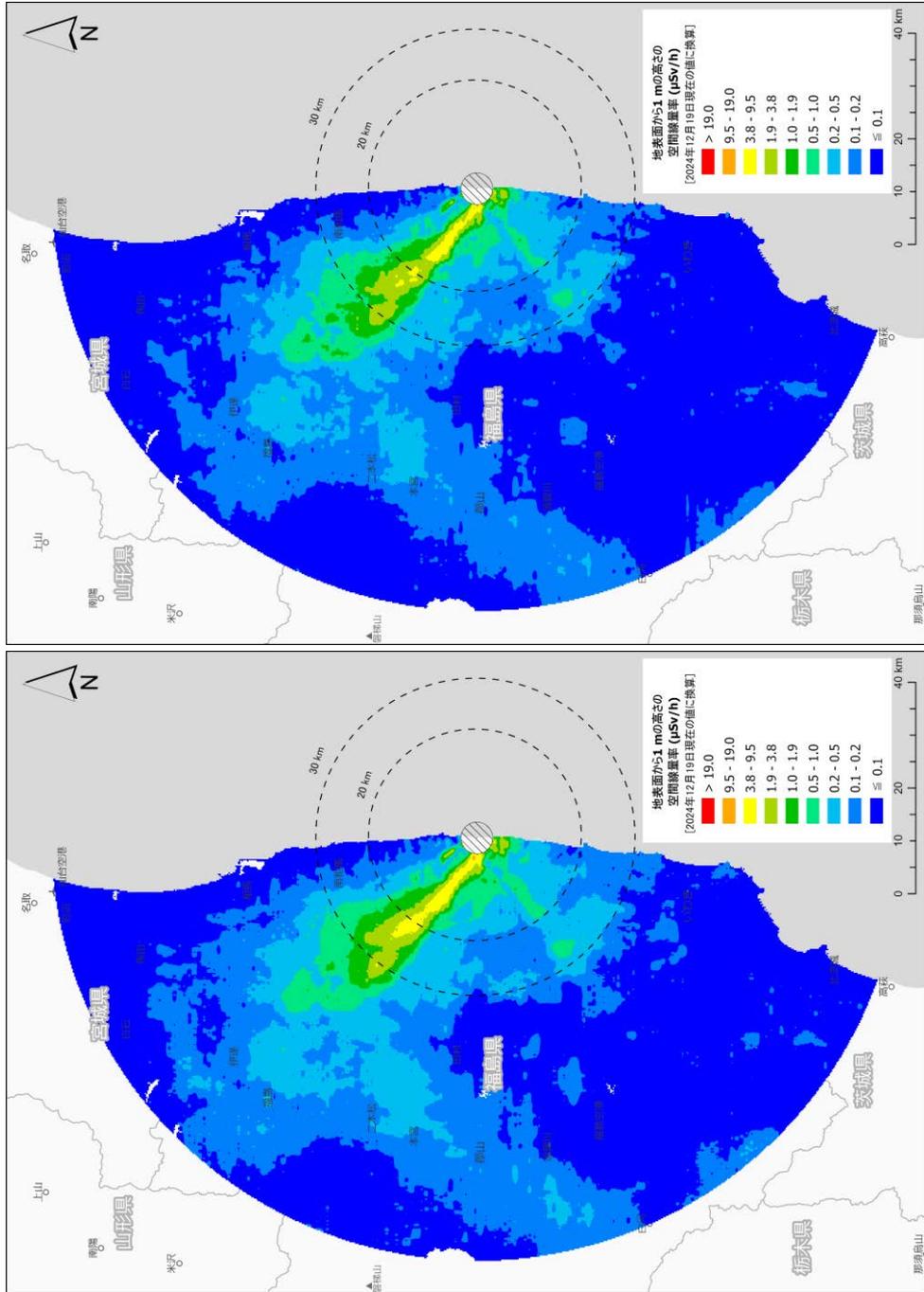


Fig. 7-2 80 km 圏内における第 19 次モニタリング、第 2 次浜通り無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングによる空間線量率マップの比較 (左：標準的解析手法を用いた場合、右：地形補正手法を用いた場合。いずれも天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、ESRI ジャパンデータ コンテンツ (© Esri Japan) を使用。)

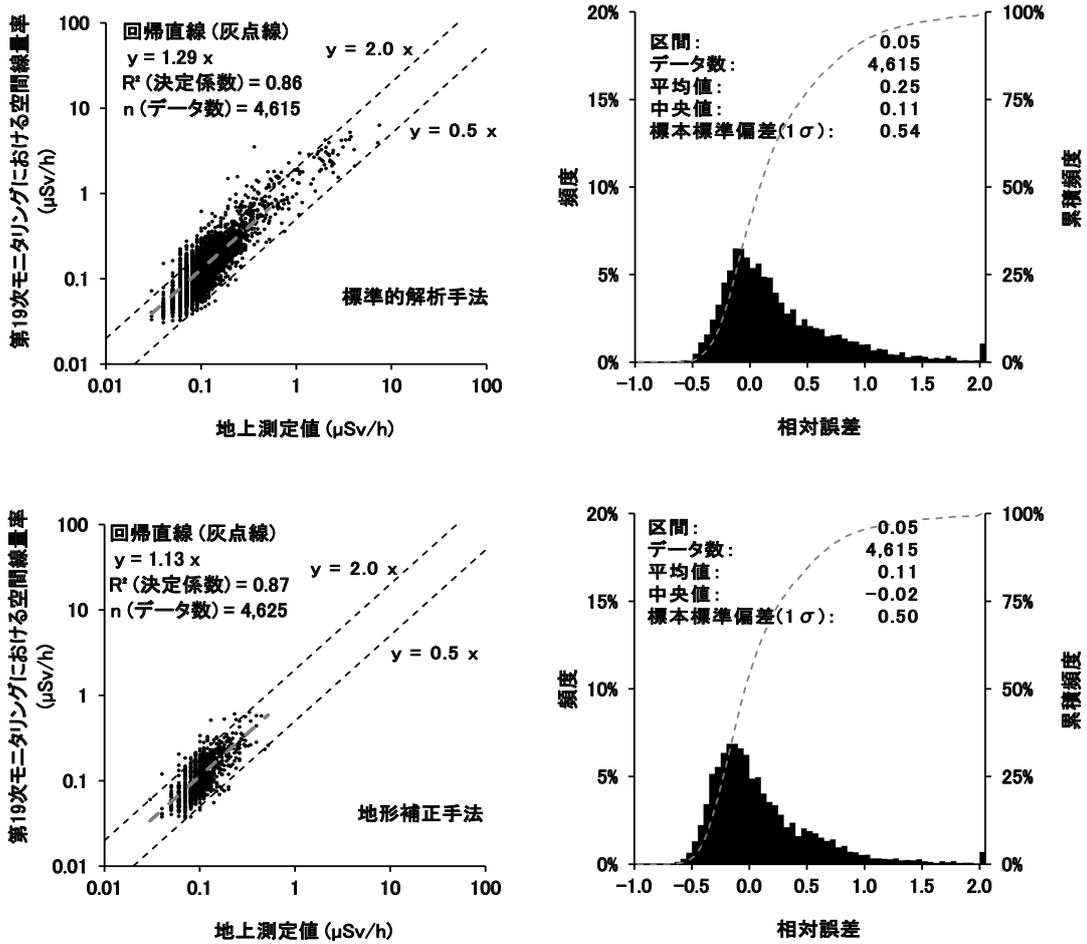


Fig. 7-3 第19次モニタリング結果と地上測定値との比較

(上段：標準的解析手法を用いた場合、下段：地形補正手法を用いた場合。いずれも天然放射性核種による寄与を含む。)

(左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

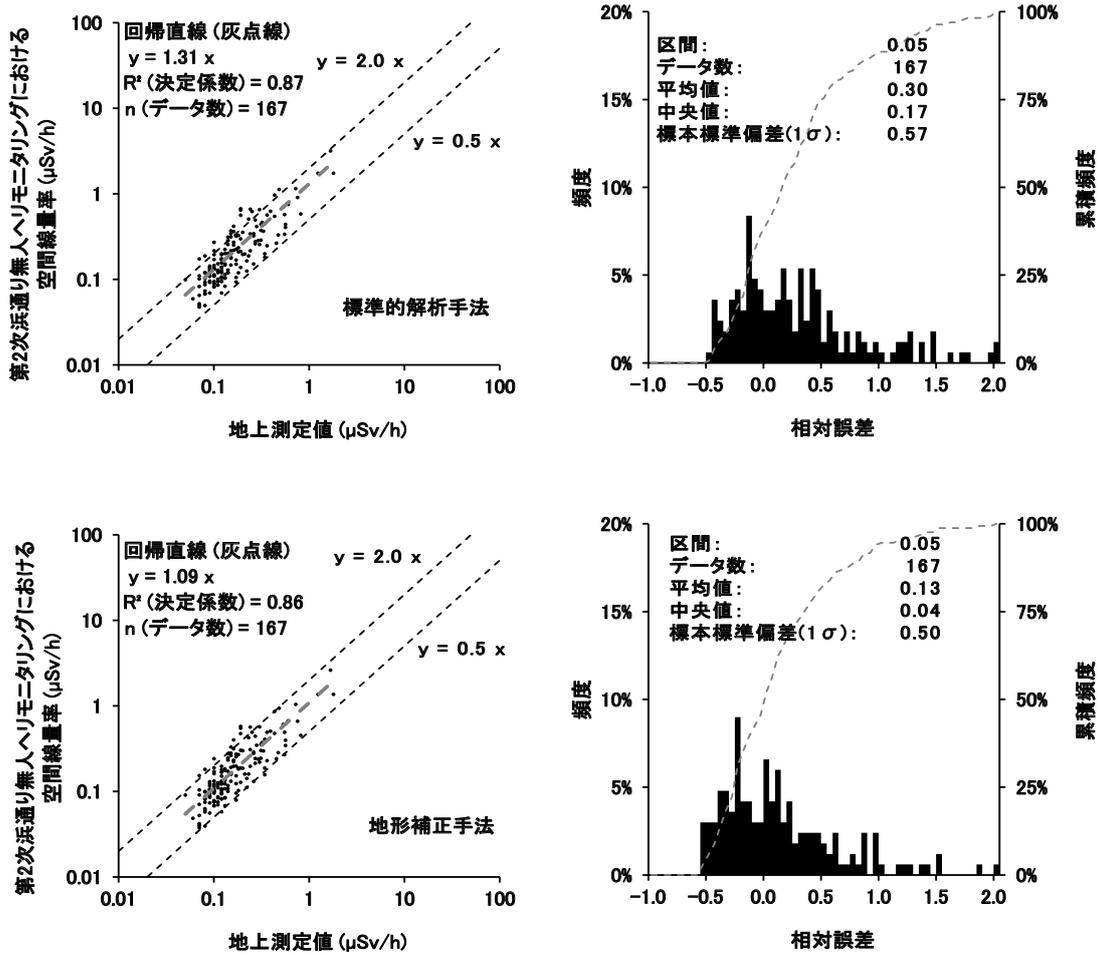


Fig. 7-4 浜通り第2次無人ヘリモニタリング結果と地上測定値との比較

(上段：標準的解析手法を用いた場合、下段：地形補正手法を用いた場合。いずれも天然放射性核種による寄与を含む。)

(左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

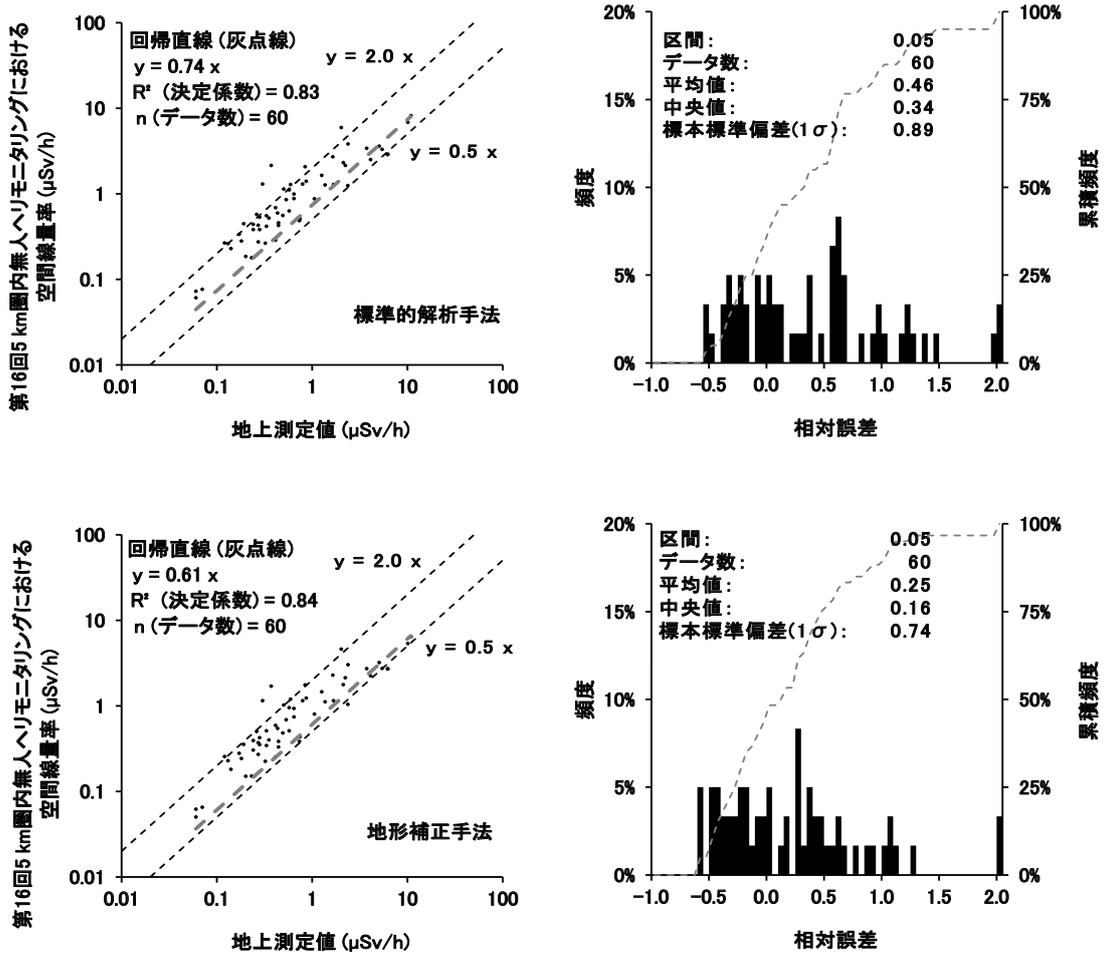


Fig. 7-5 第16回5 km圏内無人ヘリモニタリング結果と地上測定値との比較
 (上段：標準的解析手法を用いた場合、下段：地形補正手法を用いた場合。いずれも天然放射核種による寄与を含む。)
 (左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

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、Fig. 8-1 に示すようにラドンが存在し、気体であるラドンの一部は地殻中から大気中に散逸する。大気中に散逸したラドン (Rn-222 : ラドン、Rn-220 : トロン) は、Po、Pb 及び Bi などのラドン子孫核種に壊変し、大気中の微粒子に吸着され大気中を浮遊する。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/m^3 程度となっている⁵⁵⁾が、有人ヘリモニタリングにおける基準測定対地高度である対地 300 m 付近におけるラドン子孫核種濃度が測定された例はほとんどない。このラドンの濃度レベルは比較的低いものの、有人ヘリモニタリングにおいて機体の周辺にラドンが存在するような場合、測定される計数率に一定の影響があると考えられる。また、日単位や季節単位で空気中におけるラドン子孫核種濃度が変動することが知られており⁵⁶⁾、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。

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。大気中に存在するラドン子孫核種 (主に Pb-214、Bi-214) が放出する γ 線は、地表面から放出される天然放射性核種の γ 線エネルギーと近接しており、スペクトル上で両者を弁別することが困難である。さらに、Cs-134 が放出する 569 keV、605 keV、796 keV のピークとも一部のラドン子孫核種のピークが近接しているため、東電福島原子力発電所事故の影響が残る地域では、放射性 Cs 由来の γ 線と大気中ラドン子孫核種由来の γ 線とを区別することが一層難しくなる。有人ヘリモニタリングで使用している NaI(Tl)シンチレーション検出器は、Ge 半導体検出器に比べてエネルギー分解能が低く、近接するピークの分離が本質的に困難である。したがって、ラドン子孫核種の寄与を適切に取り除かない場合、空間線量率換算に系統誤差を生じる可能性がある。この課題を解決するため、2015 年度にはラドン子孫核種の寄与を推定し除去する「ラドン弁別手法」を開発し²¹⁾、2016 年度には有人ヘリモニタリング解析システムに実装した²²⁾。2017 年度には実測データに適用し、その妥当性を検証した²³⁾。本研究においては、本手法の更なる高度化に向けて、8.2 節にて詳述するパラメータの蓄積及び検証を行った。以下では、大気中ラドン子孫核種の影響を除去した空間線量率マップの作成とその妥当性について述べる。

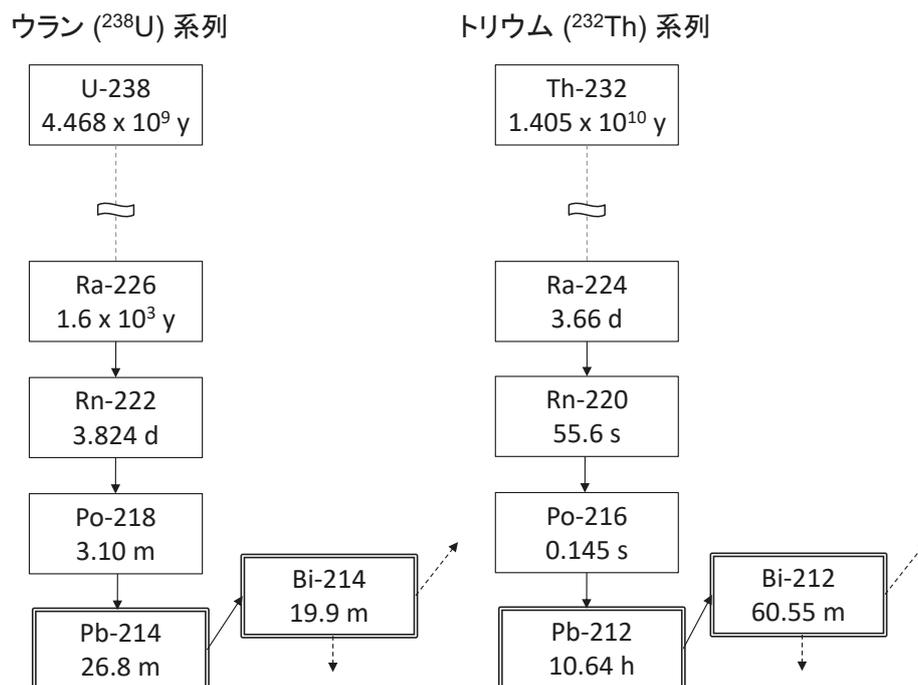


Fig. 8-1 ウラン系列及びトリウム系列
(核種名の下の数値は半減期を表す。)

Table 8-1 ラドン子孫核種の放出する γ 線

Nuclide	Series	Gamma energy (keV)	Branching ratio (%)	Note
Pb-212	Th	239	43.3	
Pb-214	U	352	37.6	
Tl-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	
Tl-208	Th	2,615	99.2	

8.2. ラドン弁別手法の概略

航空機モニタリングにおいて大気中ラドン子孫核種に起因する γ 線計数率を推定する方法として、全計数率を取得する検出器に加え、大気中ラドン子孫核種由来の γ 線を測定するための検出器を併用し、両者の計数率比換算パラメータを求める手法が示されている⁴⁷⁾。原子力機構ではこの手法を参考に、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器を大気中ラドン子孫核種の測定に用いる測定体系を構築し、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器と $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率に基づく換算パラメータの設定方法について検討と改良を重ねてきた²¹⁾⁻²⁹⁾。本節では、ラドン弁別手法の概略を示す。

Fig. 8-2 に有人ヘリ内に搭載した $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の配置を示す。 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器は、地表面からの γ 線をできる限り遮へいするため、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の上方に配置した。Fig. 8-3 は、両検出器と放射線源の位置関係を模式的に示している。地表面起源の γ 線は主に下方向から飛来するため、上側に設置した $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器には届きにくい。一方、大気中のラドン子孫核種からの γ 線はほぼ等方的に飛来するため、両検出器の計数率比に特徴が表れる。この幾何学的性質を利用し、次の2つの指標を定義する。

- ・ラドンインデックス (以下、 RI) : 海上データにおける $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の計数率を $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率で割った値($C_{\text{NaI,a}} / C_{\text{LaBr,a}}$)。海上では地表面起源の γ 線の影響がほとんどなく、ラドン子孫核種起源の γ 線が主成分となる。
- ・グラウンドインデックス (以下、 GI) : 陸地データにおける $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の計数率を $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率で割った値($C_{\text{NaI,g}} / C_{\text{LaBr,g}}$)。陸地では地表面起源の γ 線の寄与が相対的に増大するため、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率が相対的に低下し、結果として GI は RI より大きくなる。

これら2つのパラメータを用いることで、大気中ラドン子孫核種の計数率を推定し、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器で検出された全計数率からその寄与を差し引くことにより、地表面由来の計数率を抽出する。そのために用いる計算式を式 [14] に示す。

$$C_{\text{NaI,g}} = \frac{GI(C_{\text{NaI,all}} - RI \cdot C_{\text{LaBr,all}})}{GI - RI} \quad [14]$$

ここで、

$C_{\text{NaI,g}}$: $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器における地表面起源の計数率 (30 keV~2800 keV) (s^{-1})

$C_{\text{NaI,all}}$: $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器における全計数率 (30 keV~2800 keV) (s^{-1})

$C_{\text{LaBr,all}}$: $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器における全計数率 (50 keV~700 keV) (s^{-1})

である。

式 [14] により得られる $C_{\text{NaI,g}}$ はラドン子孫核種による寄与を差し引いた $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器における地表面起源の計数率であり、以降の空間線量率への換算に用いる。

なお、ヘリコプターの機種または機体ごとの γ 線の遮へい効果が異なるため、*RI*及び*GI*も機体ごとに独立に求める必要がある。*RI*及び*GI*の求め方及び取得データは8.3節で詳述する。

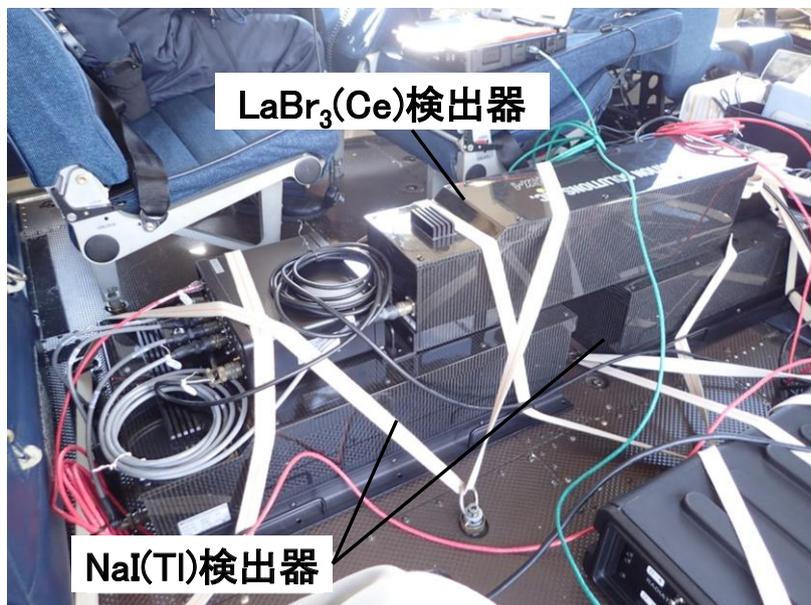


Fig. 8-2 空气中ラドン子孫核種測定用の検出器と有人ヘリへの搭載状況

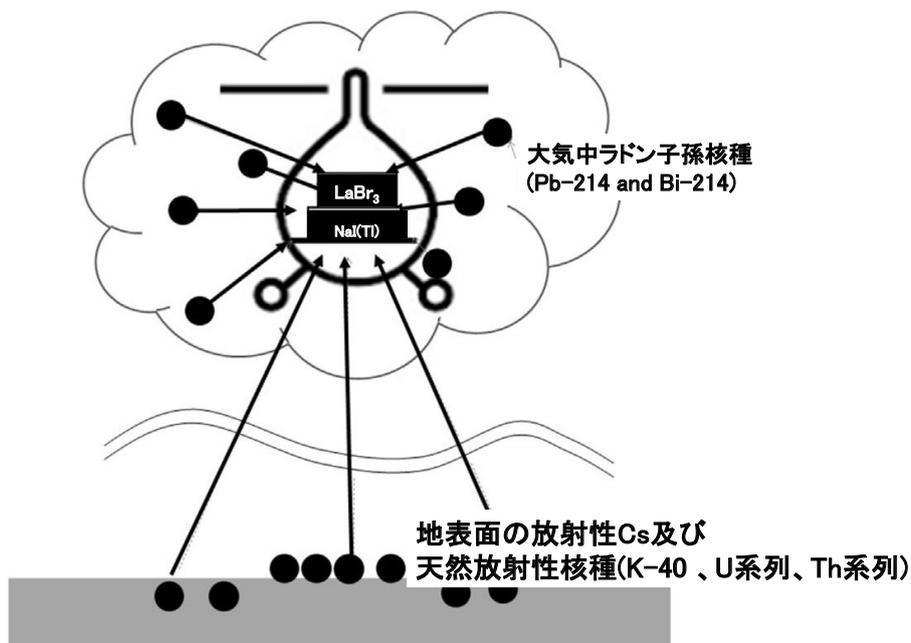


Fig. 8-3 空气中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ

8.3. パラメータ (*RI* 及び *GI*) の決定

式 [14] を用いたラドン弁別法の信頼性は *GI* と *RI* の設定精度に依存する。これらのパラメータは、有人ヘリの機体構造による γ 線遮へい特性により変動することが過去のモニタリングから明らかとなっている²²⁾⁻²⁹⁾。このため、本年度は東日本第 15 次モニタリングで使用したヘリコプターごとに実測データから数値を決定した。なお、東日本第 15 次モニタリングで使用した有人ヘリ機種 (機体番号) は Bell412 (JA6928)、S-76 (JA6901)、Bell430 (JA05TV) である。

計数率の変動による影響をなるべく低減するために、東日本第 15 次モニタリングにおいて取得した計数率データ及び GPS データ (緯度、経度及び飛行高度) を 40 秒平均し、全計数率から宇宙線及び有人ヘリ機体に起因する γ 線計数率の寄与をバックグラウンドとして減算した上で *RI* 及び *GI* の算出に用いた。このとき、*RI* については海上でフライトしたデータの内、海拔高度が $300 \text{ m} \pm 150 \text{ m}$ で取得したデータを抽出し、*GI* については陸上で取得したデータの内、対地高度が $290 \text{ m} \sim 320 \text{ m}$ のデータのみを抽出した。抽出したデータに対して線形回帰 (ただし、切片が 0 であることを前提とする) を実施して得られた線形回帰式の傾き (回帰係数) を *RI* 及び *GI* とする。

これまで、データ数が少ない或いはばらつきが比較的大きく外れる値が含まれるデータに対して最小二乗法による線形回帰を実施した場合、回帰係数に悪影響を及ぼすケースが見られた⁵⁷⁾。また、外れ値の影響を緩和した上で回帰係数を求めるため、最小絶対値法によるロバストな線形回帰を導入した結果、外れ値が生じない場合には効果を発揮せず、当該手法は汎用性に乏しいという知見が得られた⁵⁸⁾。これまでは、x 軸 ($\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率) または y 軸 ($\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の計数率) のいずれか一方にのみ有意な誤差が含まれるという仮定の下に線形回帰を行っており、この仮定が *RI* 及び *GI* の算出に悪影響を及ぼす可能性があると考えられるため、本研究では x 軸及び y 軸の両方向の誤差を考慮に入れた回帰手法である直交距離回帰⁵⁹⁾を導入した。直交距離回帰は測定データ点と回帰直線の直交距離の二乗和を最小とする回帰アルゴリズムであり、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器及び $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の計数率の両者に含まれる誤差を考慮した上で回帰係数を求めることが可能である。さらに、直交距離回帰に簡易的にロバスト性を持たせるために、x 軸及び y 軸データの標準偏差の逆数を重みとした重み付き回帰を組み合わせることで *RI* 及び *GI* の算出に用いた。本報告では、この手法を「重み付き直交距離回帰」と呼称する。

RI 及び *GI* の算出に係る $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の計数率と $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率の関係を Fig. 8-4 及び Fig. 8-5 に示す。本図には最小二乗法及び重み付き直交距離回帰による線形回帰で得られた近似直線と回帰式を併記した。Fig. 8-4 については、海上での測定により取得したものであり、ラドン子孫核種に起因する計数率のみが反映されていると考えられるが、ややばらつきが大きい。これは大気中ラドン子孫核種の分布の不均一さや抽出対象とするデータの海拔高度範囲が広いことに起因すると思われる。Fig. 8-4 より、いずれのヘリ機種に

においても重み付き直交距離回帰による回帰係数の方が、最小二乗法による回帰係数よりも大きくなる傾向にあった。また、Fig. 8-5 の *GI* の場合はデータ数が多く、ばらつきも比較的小さいため、重み付き直交距離回帰と最小二乗法とで回帰係数にほとんど違いは生じなかった。なお、上記のように、本図のデータは陸上で取得したものであり、実環境中においてラドン子孫核種による影響が含まれないデータを取得することは困難であることから、*GI* にはラドン子孫核種の影響がある程度含まれていることに留意する必要がある。

本報告では、*RI* 及び *GI* は重み付き直交距離回帰による回帰係数をメインとして解析に使用することとした。即ち、Bell412 (JA6928) の *RI* は 25.6、*GI* は 29.7 とし、S-76 (JA6901) の *RI* は 21.3、*GI* は 30.9 とし、Bell430 (JA05TV) の *RI* は 17.5、*GI* は 27.5 とした。また、これらのパラメータを用いた解析結果と最小二乗法による回帰係数を用いた解析結果との比較は 8.5 節にて地上測定値を用いて行う。

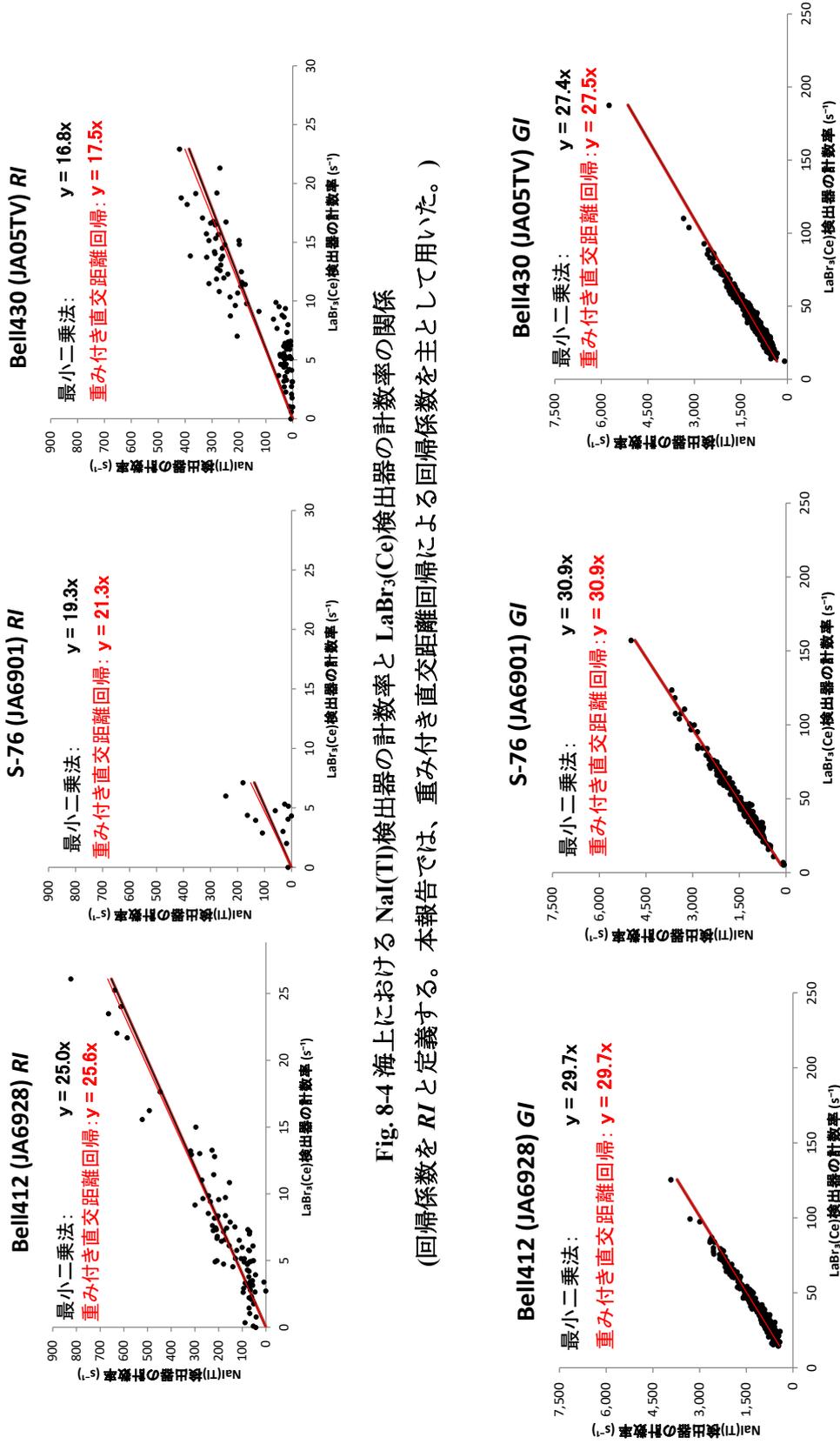


Fig. 8-4 海上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr₃(Ce)検出器の計数率の関係

(回帰係数を RI と定義する。本報告では、重み付き直交距離回帰による回帰係数を主として用いた。)

Fig. 8-5 陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr₃(Ce)検出器の計数率の関係

(回帰係数を GI と定義する。本報告では、重み付き直交距離回帰による回帰係数を用いた。)

8.4. *GI* の高度補正方法

GI は、2015 年度 (平成 27 年度) に実施した予備的な調査において、対地高度に依存して数値が変化することが確認された²¹⁾。*GI* は本来、地表面起源の γ 線と大気中ラドン子孫核種による γ 線の寄与が分離された状態を想定して定義される指標である。しかしながら、実環境下ではラドン子孫核種の寄与を完全に排除した計数率を取得することは不可能であり、理論通りの条件を満たした *GI* の高度依存性を実測のみから評価することはできない。そこで、2017 年度 (平成 29 年度) には、実際の測定体系を模擬した計算シミュレーションを実施し、ラドン子孫核種の寄与を含まない理想条件における *GI* の高度依存性を解析することで、高度補正係数の評価を行った。その結果、式 [15] に示すように高度補正係数として 0.0333 を適用すればよいことが見出された²²⁾。本報告では、式 [15] に基づき *GI* の高度補正を行った。

$$GI_{\text{corr}} = 0.0333 \times (H_m - H_{\text{std}}) + GI \quad [15]$$

ここで、

*GI*_{corr} : 高度補正後の *GI*

*H*_m : 測定時における対地高度 (m)

*H*_{std} : 有人ヘリモニタリングにおける基準対地高度 (300 m)

GI : 高度補正前の *GI*

である。

8.5. 東日本第 15 次モニタリングのデータへの適用

放射性 Cs の影響が大きな地域では大気中のラドン子孫核種の影響はほとんど無視できるが、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ラドン弁別手法は効果的である。よって、本手法は放射性 Cs の影響が比較的大きい 80 km 圏内を測定した第 19 次モニタリング、浜通り第 2 次無人ヘリモニタリング及び第 16 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングには適用せず、東日本第 15 次モニタリングにのみ適用した。なお、今までの経験から GI を実測データに基づく数値よりも 1 程度小さく設定した方が、空間線量率の換算値が地上測定値と良く整合するという知見が得られている²²⁾⁻²⁹⁾。この妥当性を検証するために、Fig. 8-5 に示した直交距離回帰に基づく GI を基準値とし、この基準値から 1 及び 2 を減じた場合についても解析を実施した。すなわち、Bell412 (JA6928) では 29.7、S-76 (JA6901) では 30.9、Bell430 (JA05TV) では 27.5 を GI の基準値とし、それぞれの GI を 28.7 及び 27.7、29.9 及び 28.9、26.5 及び 25.5 とした場合についても解析した。

(1) 空間線量率マップ及び空气中ラドン子孫核種由来の γ 線計数率マップ

GI を上記のように設定して空間線量率マップ及びラドン子孫核種由来の γ 線計数率マップを作成した。Fig. 8-6 にラドン弁別手法を適用した東日本第 15 次モニタリングの空間線量率マップを示す。本図には比較のため、標準的解析手法による空間線量率マップ (Fig. 5-2 で示したものと同一である) も示した。Bell412 (JA6928) で測定した群馬県の一部と栃木県西部については、標準的解析手法によるマップと比べ、ラドン弁別手法によるマップの方が $0.1 \mu\text{Sv/h} \sim 0.2 \mu\text{Sv/h}$ の分布面積が大きくなる傾向が見られた。一方で、Bell430 (JA05TV) で測定した福島県西部については、標準的解析手法によるマップよりも、ラドン弁別手法によるマップの方が $0.1 \mu\text{Sv/h} \sim 0.2 \mu\text{Sv/h}$ の分布面積が小さくなる傾向が見られた。なお、S-76 (JA6901) で測定した栃木県及び茨城県の一部のほとんどで、両解析手法で求めた空間線量率が $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 程度と小さく、空間線量率値の差異は明確に視認できるレベルでは生じなかった。また、ラドン弁別手法による空間線量率の換算値は GI を基準値から減じるほど全体的に大きくなる傾向にあった。

ここで、ラドン子孫核種の影響の大きい地域について考察するために、空气中のラドン子孫核種由来の計数率のマップを作成した (Fig. 8-7)。本マップはラドン弁別手法の過程で計算した NaI(Tl) 検出器における空气中ラドン子孫核種由来の計数率をマッピングしたものである。この計数率は NaI(Tl) 検出器における全計数率から、式 [14] により算出した $C_{\text{NaI,g}}$ を減算し求めたものである。測定日時が場所により異なるため、空气中ラドン子孫核種由来の計数率は離散的である。ラドン子孫核種由来の計数率が高く算出されたのは、奥羽山脈や越後山脈から関東山地に渡る山岳部等、標高の比較的高い場所であった。一方、標高の低い仙台平野や関東平野ではほとんど計数されなかった。ラドン子孫核種の起源としては中国大陸からの大気輸送と測定地近傍における地殻からの放出が考えられ、前者の影響

は特に日本海側の冬季に大きくなる傾向にある⁶⁰⁾。一方、東日本第 15 次モニタリングの測定時期は 2024 年(令和 6 年)7 月 10 日～10 月 14 日であったことから、中国大陸からの大気輸送による影響は冬季に見られるレベルに比して小さいと考えられ、測定地近傍における地殻由来のものの時間変化は小さく、前者より支配的な影響力を持つと推察される。さらに、本結果はラドン子孫核種に起因する計数率が比較的高く算出された標高の高いエリアでは花崗岩がある程度大きな岩体として分布していること及び平野部では花崗岩体が極狭小であるか、またはほとんど分布しておらず、段丘堆積物や海岸平野堆積物が主体であること⁶¹⁾と矛盾しない。なお、標準的解析手法では、BG フライトにより得られた計数率をバックグラウンドとして減算しているが、その中にはラドン子孫核種由来の計数率も含まれており、ある程度正確にラドン子孫核種の影響が差し引かれていると思われる。BG フライトで取得したデータを用いた場合とラドン弁別手法を用いた場合とで、全計数率から減算されるバックグラウンド計数率の値がどのように異なるかについては次節で比較する。

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

ラドン弁別手法で作成した空間線量率マップの妥当性を評価するために、地上測定値 249 点との比較を行った。ここで、80 km 圏外で行った地上測定の全 250 地点の内 1 点は 80 km 圏内の領域に位置していたため、比較対象から除外した。なお、*RI* 及び *GI* の算出方法の違いがラドン弁別手法における空間線量率の換算値に及ぼす影響を見るため、重み付き直交距離回帰だけでなく、Fig. 8-4 及び Fig. 8-5 に示した最小二乗法に基づく *RI* 及び *GI* を用いた場合についても解析を実施した。この時、上記のように最小二乗法における *GI* の基準値を定め、この基準値から 1 及び 2 減じた場合の空間線量率の換算値についても、地上測定値と比較した。

直交距離回帰に基づく *RI* 及び *GI* を用いた場合の比較結果を Fig. 8-8 に示す。散布図においては回帰直線の傾きが標準的解析手法で 1.27、ラドン弁別手法では 1.19～1.30 となった。また、ラドン弁別手法においては *GI* を減じるほどに回帰直線の傾きが大きくなった。これは Fig. 8-6 で見られた通り、*GI* を減じることで有人ヘリモニタリングによる空間線量率の換算値が上昇することに起因すると推察される。また、ファクター2 に収まるプロットの数に着目すると、標準的解析手法では 91% (全 249 点中 227 点) であったのに対し、ラドン弁別手法では *GI* を基準値とした場合で 96% (全 249 点中 239 点)、*GI* を基準値から 1 減じた場合で 95% (全 249 点中 236 点)、*GI* を 2 減じた場合で 94% (全 249 点中 234 点) となり、ラドン弁別手法を適用すると地上測定値との整合が向上する傾向が見られた。しかしながら、相対誤差の平均値及び中央値については、標準的解析手法の方が 0 に近いが、ラドン弁別手法を適用した場合との顕著な差は認められなかった。また、ラドン弁別手法を適用した場合においては、*GI* を減じずに基準値のままとした場合に最も相対誤差の平均値及び中央値が 0 に近かった。ヒストグラムの頻度分布に注目すると、標準的解析手法では、

4.11 節にも記載したように山間部の有人ヘリモニタリングデータと地上測定値が整合せず、弱いながらも多峰性が見られた。一方、ラドン弁別手法については、0.10 付近をピークとする概ね左右対称で単峰的な分布であり、地上測定値よりも空間線量率を全体的に 20%程度過大評価する傾向が見られた。

RI 及び *GI* の算出方法の違いがラドン弁別手法における空間線量率の換算値に及ぼす影響を見るため、最小二乗法に基づく *RI* 及び *GI* を用いた場合の比較結果を Fig. 8-9 に示す。散布図については重み付き直交距離回帰の場合に比較して回帰直線の傾きが大きくなる傾向にあり、ファクター2に収まるプロットの数については、*GI* を基準値とした場合で 96% (全 249 点中 239 点)、*GI* を基準値から 1 減じた場合で約 96% (全 249 点中 238 点)、*GI* を 2 減じた場合で約 94% (全 249 点中 233 点) となり、重み付き直交距離回帰の場合とほとんど同様であった。相対誤差のヒストグラムについては、*GI* を基準値としたときに平均値及び中央値が最も 0 に近くなり、重み付き直交距離回帰の場合よりも相対誤差の平均値や中央値は大きくなる傾向にあった。

以上をまとめると、ラドン弁別手法を用いると標準的解析手法よりも地上測定値の再現性が改善される傾向にあった。また、ラドン弁別手法において、*GI* を基準値から 1 または 2 減じたときに地上測定値との相対誤差が大きくなる傾向にあったのは、今までの経験則と異なるものであった。このような結果が得られた明確な要因は判然としないが、ラドン弁別手法で *RI* 及び *GI* の算出に従来用いてきた最小二乗法と、今回新たに導入した重み付き直交距離回帰とで同様の傾向であったことから、少なくとも回帰アルゴリズムの違いに起因するものではないことが推察される。ラドン弁別手法で重み付き直交距離回帰を用いると、最小二乗法を用いた場合よりも地上測定値との再現性が良くなる傾向が見られたことから、今後は、ラドン弁別手法において *RI* 及び *GI* を求めるための標準的な方法として、重み付き直交距離回帰を使用するのがよいと考える。ラドン弁別手法において、*GI* を経験則に基づき変化させることなく、地上測定値との整合性を最もよくするために必要な知見を見出すことは、今後の課題である。

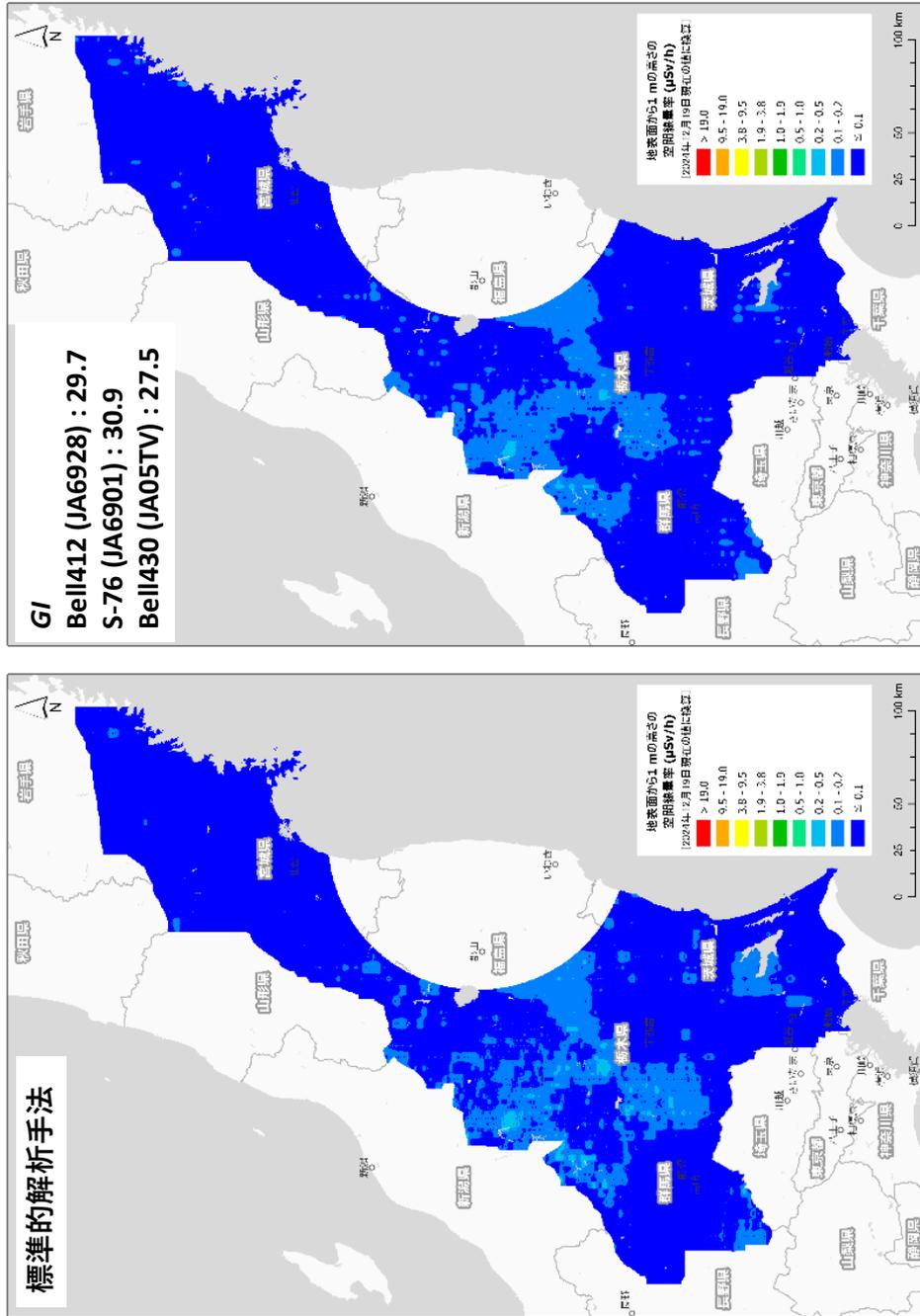


Fig. 8-6 ラドン弁別手法適用前後の東日本第15次モニタリングの空間線量率マップ
 (天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)
 (1/2)

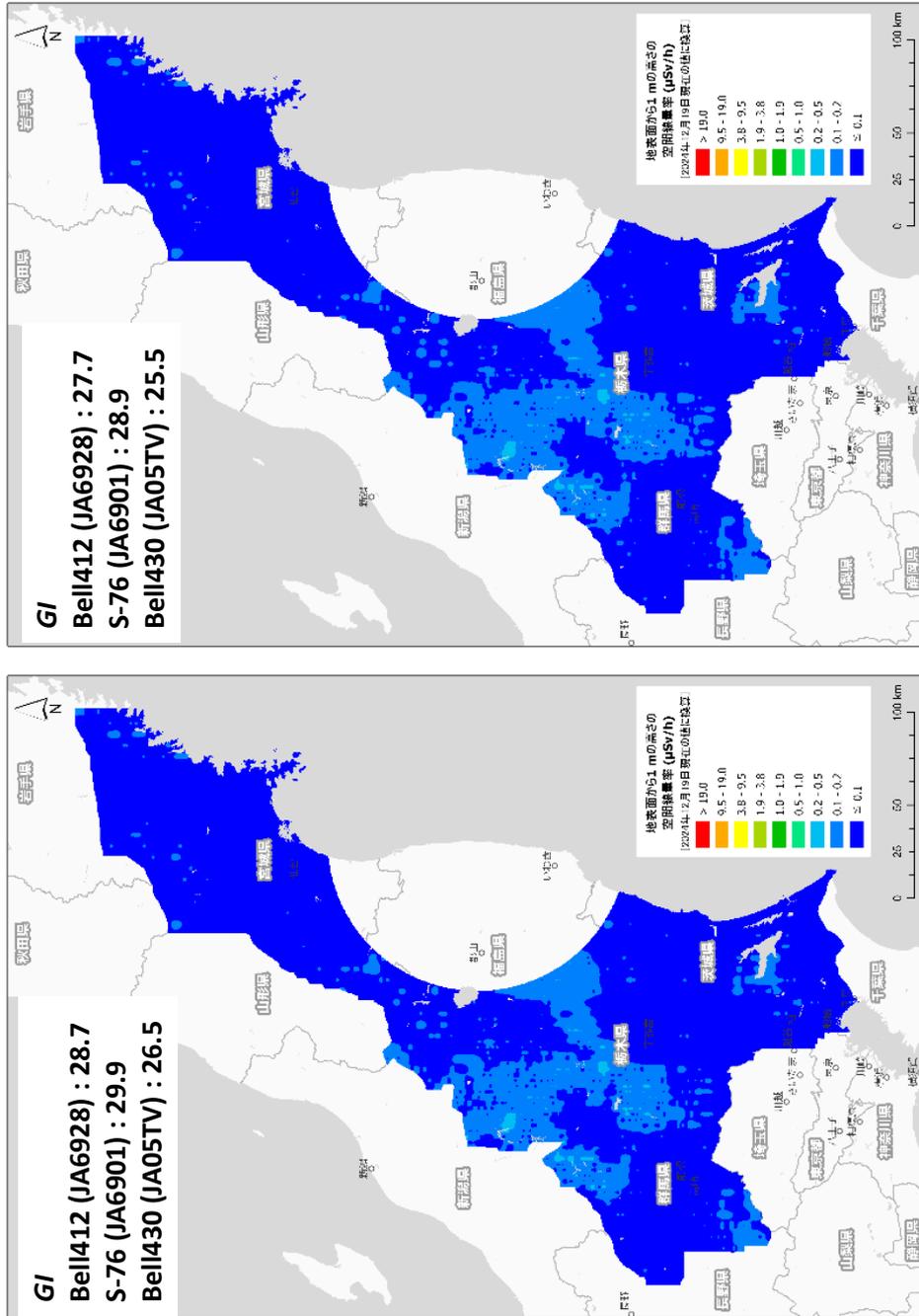


Fig. 8-6 ラドン弁別手法適用前後の東日本第15次モニタリングの空間線量率マップ (天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

(2/2)

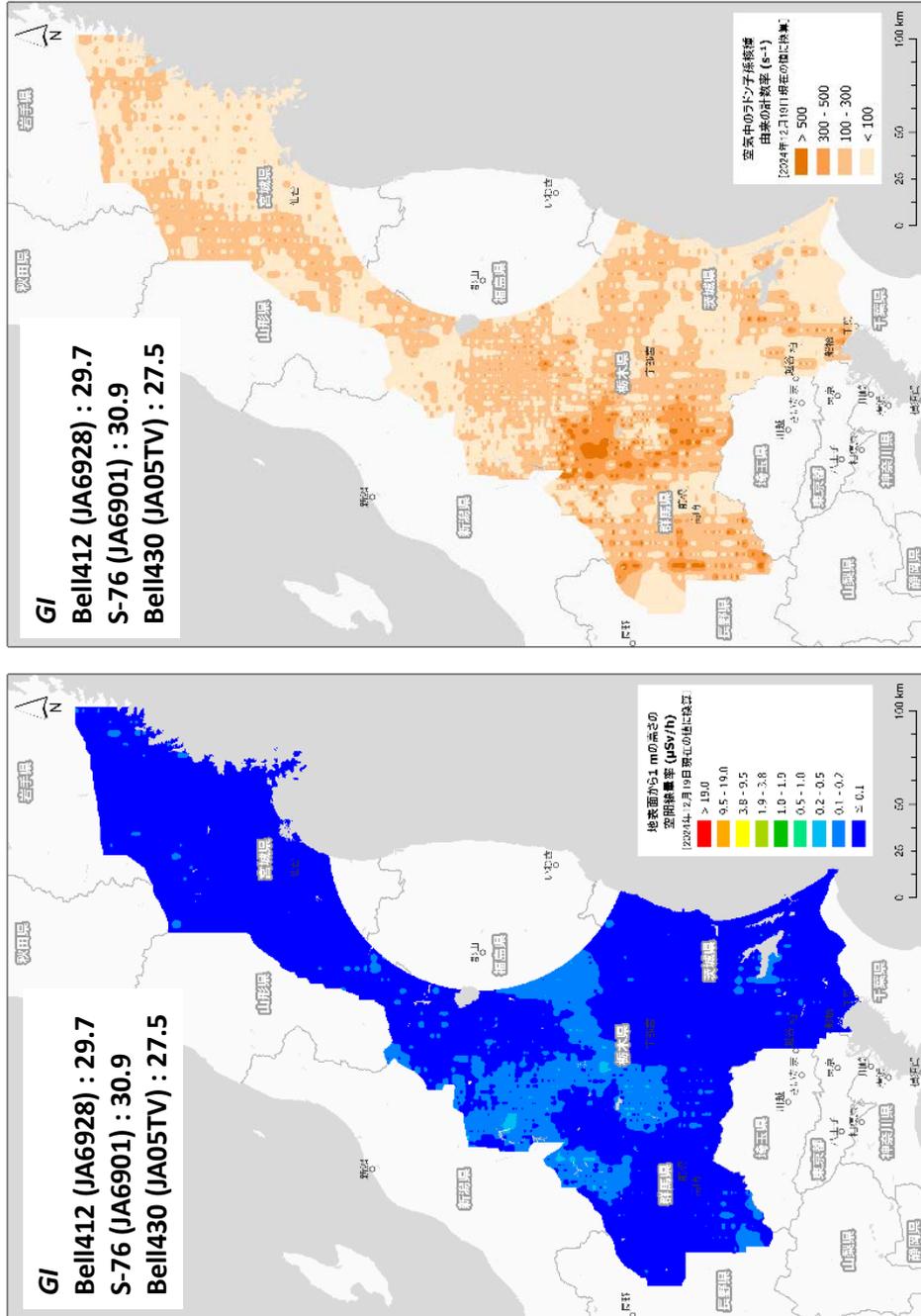


Fig. 8-7 東日本第15次モニタリングの測定結果から計算した空気中ラドン子孫核種の計数率マップ
 (天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

(1/2)

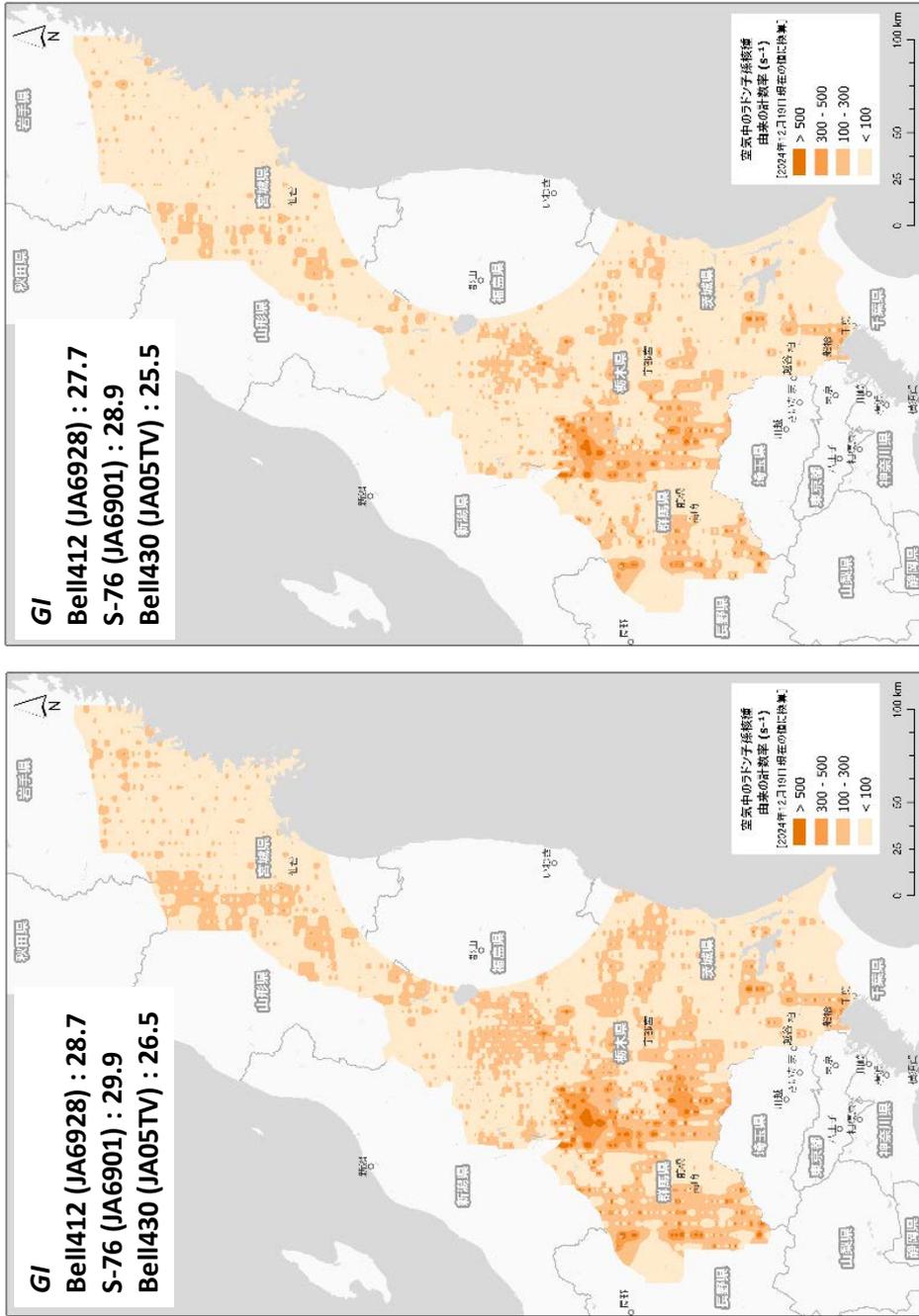


Fig. 8-7 東日本第 15 次モニタリングの測定結果から計算した空気中ラドン子孫核種の計数率マップ
 (天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)
 (2/2)

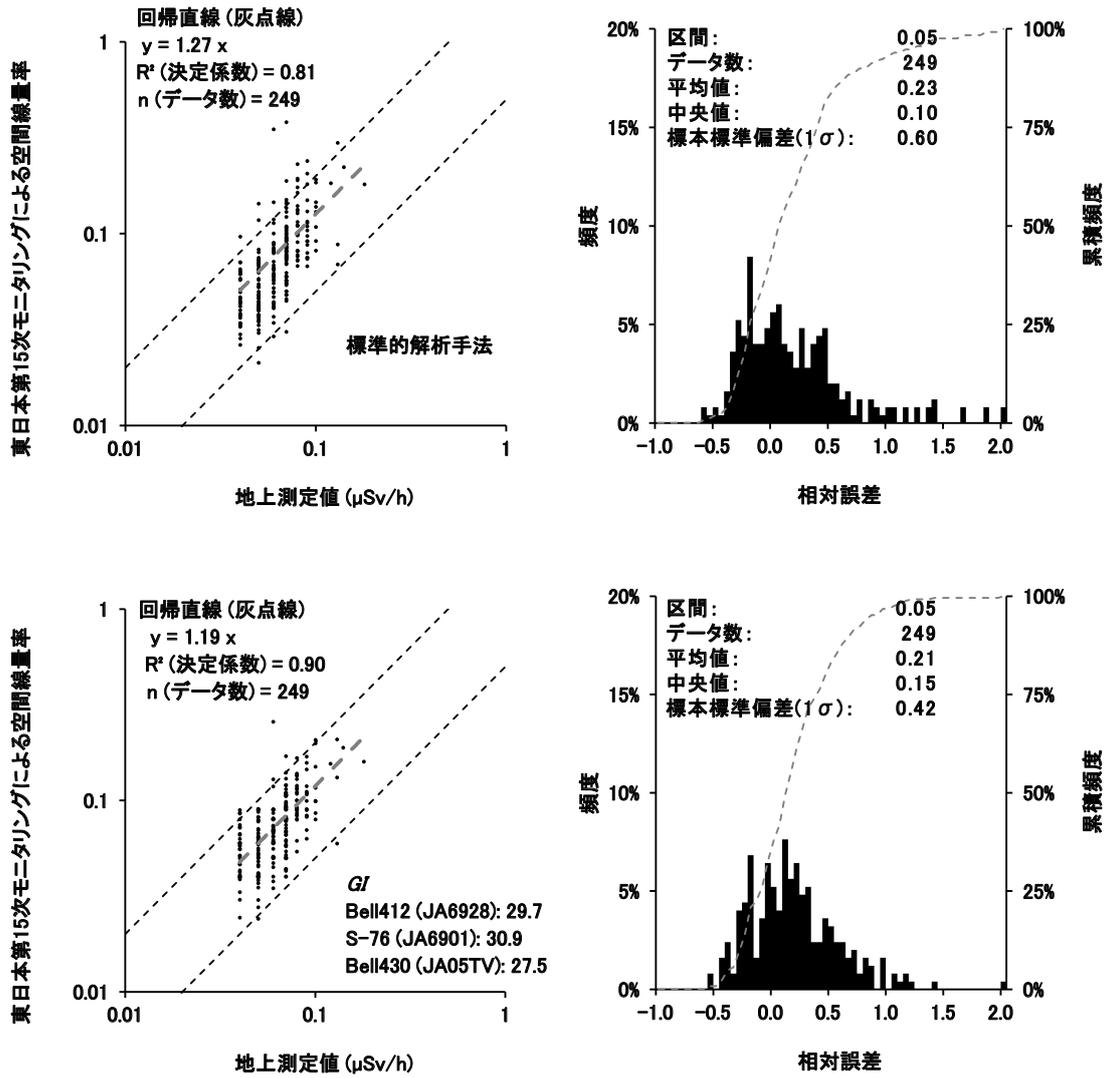


Fig. 8-8 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率と地上測定値との比較
 (重み付き直交距離回帰による RI 及び GI を用いた場合)
 (左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

(1/2)

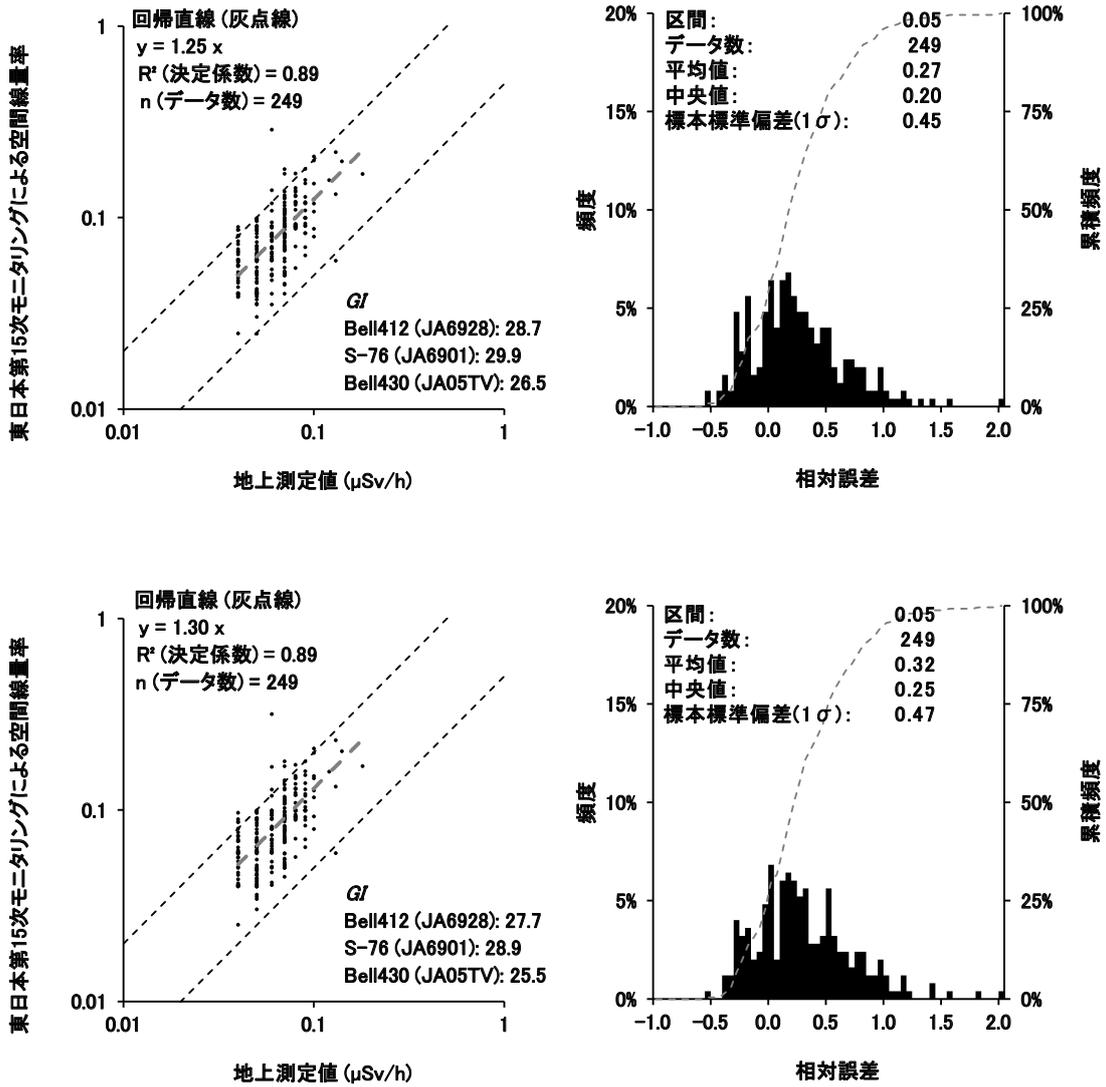


Fig. 8-8 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率と地上測定値との比較
 (重み付き直交距離回帰による *RI* 及び *GI* を用いた場合)
 (左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

(2/2)

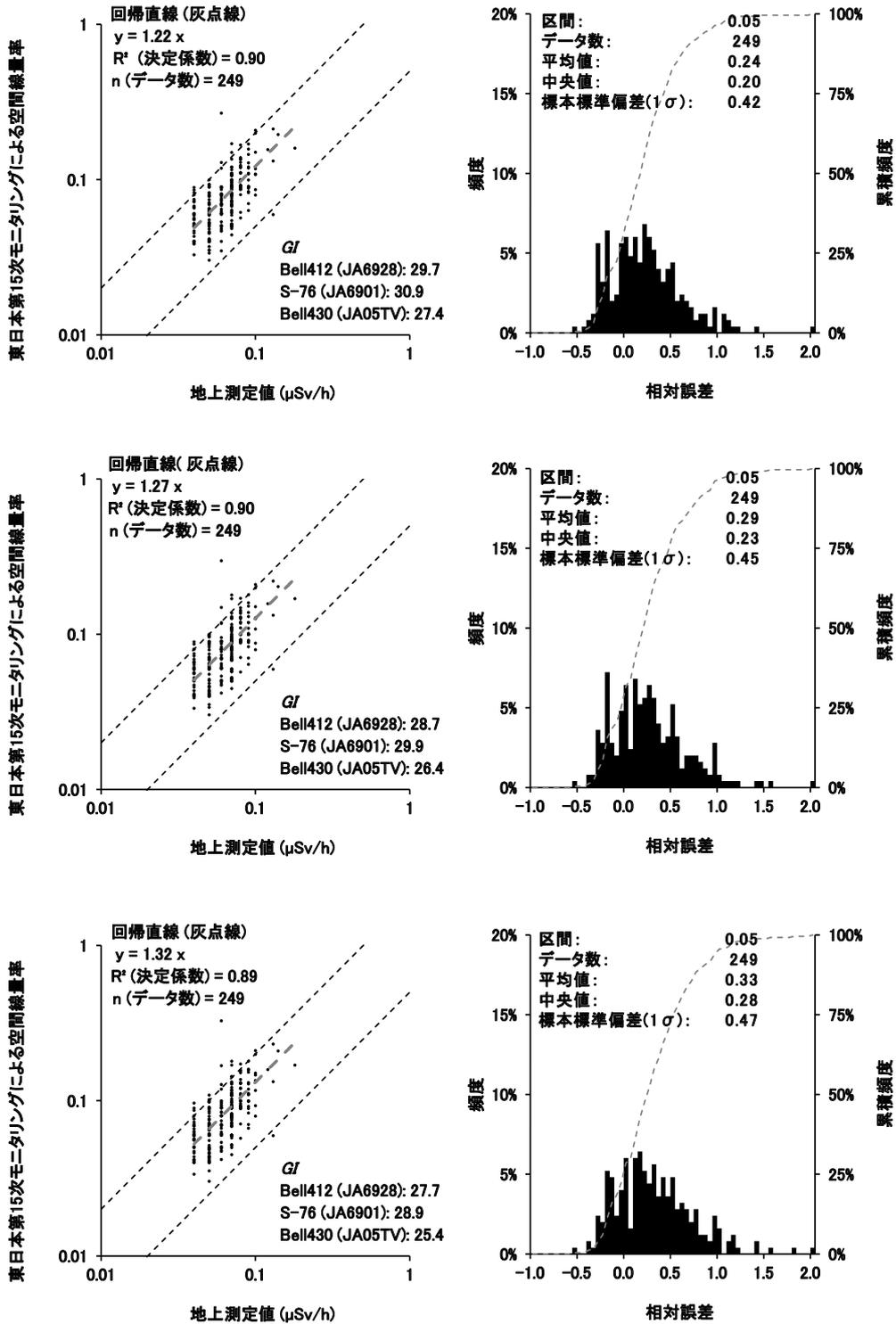


Fig. 8-9 ラドン弁別手法適用後の空間線量率と地上測定値との比較
 (最小二乗法による *RI* 及び *GI* を用いた場合)
 (左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

8.6. バックグラウンド計数率の比較

Fig. 4-15 のフロー図に則った標準的解析手法においては、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て得られたデータをバックグラウンド計数率として減算しており、ある程度正確にラドン子孫核種由来の計数率を差し引くことができていると考えられる。ここで、標準的解析手法で用いた測定日ごとのバックグラウンド計数率と各ヘリコプターにおける *GI* を基準値とした場合のラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率の比較を Fig. 8-10 に示す。いずれも、標準的解析手法における BG フライトを実施した時刻及び場所で取得した計数率データを基に算出したものである。本図には比較のため、東電福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs が存在しないと考えられる中国電力島根発電所周辺で、2024 年度 (令和 6 年度) に実施したモニタリング (島根 BG (前期) 及び島根 BG (後期) と表記) において、標準的解析手法に用いたバックグラウンド計数率とラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率もプロットした。Fig. 8-10 より、東日本第 15 次モニタリングにおいては、Bell412 (JA6928) 及び S-76 (JA6901) の場合、BG フライトで取得した計数率よりもラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率の方が高くなる傾向が見られた。逆に、Bell430 (JA05TV) の場合は、ラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率の方が低くなる傾向が見られた。Fig. 8-6 で見られたように、Bell412 (JA6928) により測定した栃木県西部及び群馬県一帯では、ラドン弁別手法で求めた空間線量率よりも標準的解析手法で求めた空間線量率の方が低くなる傾向が見られた。逆に、Bell430 (JA05TV) で測定した福島県西部では、ラドン弁別手法で求めた空間線量率の方が高くなる傾向が見られた。以上のことから、ラドン弁別手法では、Bell412 (JA6928) の測定領域では標準的解析手法よりもバックグラウンド減算がやや過剰であったため、空間線量率が低く算出され、逆に、Bell430 (JA05TV) の測定領域ではバックグラウンド減算がやや不足していたため、空間線量率が高く算出されたと解される。しかしながら、機体ごとの遮へい特性の違いや、測定地域におけるラドン濃度の時間変動等、バックグラウンド計数率に影響を及ぼし得る要因はいくつか考えられるものの、これらが空間線量率マップの色合いが顕著に異なる程の差異が生じるとは考えにくい。また、島根 BG (前期) 及び島根 BG (後期) で使用した Bell412 (JA6928) 及び S-76 (JA6901) について、ラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率の方が BG フライトで取得した計数率よりもやや高くなる傾向が見られた。特に、S-76 (JA6901) では前者の計数率が約 1.5 倍程度高くなった。このように、同一のヘリ機体を用いたとしても、測定地域及び測定時期により、ラドン弁別手法で求まるバックグラウンド計数率と BG フライトで取得する計数率の関係に違いが認められた。

標準的解析手法では BG フライトにより得られた計数率を、その日の測定エリア全体におけるバックグラウンド計数率の代表値として扱うことから、特に、測定エリア近傍における地殻から放出されるラドン子孫核種由来の計数率を適切に除去できない可能性が高い。一方、ラドン弁別手法では、各測定点における全計数率から空気中のラドン子孫核種 (遠

方からの輸送及び近傍の地殻から放出されたものを含む) に起因する計数率を切り出して除去できる点に強みがあり、上記のような地域依存性を適切に反映した空間線量率の分布マップの作成に有効である。よって、ラドン弁別手法の更なる高度化に係る検討を重ねていく必要があると考える。

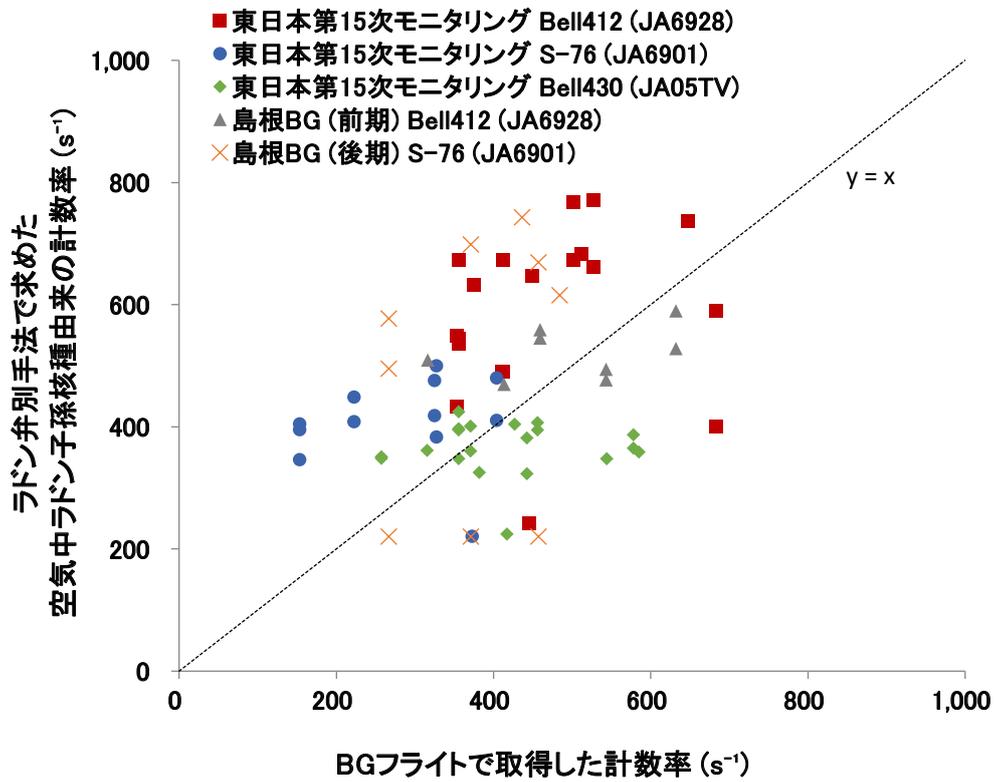


Fig. 8-10 BG フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空气中ラドン子孫核種由来の計数率の比較

9. 無人飛行機を用いたフライト試験

9.1. 背景

東電福島原子力発電所事故後、「原子力災害対策マニュアル⁶²⁾」が改定され、原子力災害時における事故後の対応について大幅な改定が行われた。改定後のマニュアルでは、緊急時モニタリング体制の強化や情報伝達手段の見直しなどが新たに盛り込まれた。これを踏まえ、緊急時における航空機モニタリングの実施主体である原子力規制庁緊急時対応センター (Emergency Response Center; ERC) 放射線班を技術的に支援する立場である原子力機構としても、モニタリング技術の高度化や関係機関との連携体制の強化に継続的に取り組む必要がある。運用上の介入レベル (Operational Intervention Level、以下、OIL) の区域設定やスクリーニングの重要性分類のための緊急時モニタリングは、迅速かつタイムリーに行われる必要がある。東電福島原子力発電所事故後の対応において、発電所周辺の空間線量率分布把握のために無人ヘリコプター等の無人航空機が活用されている^{31),32)}。また、無人航空機を用いた放射性プルームの計測技術について要素技術開発が行われている⁶³⁾⁻⁶⁵⁾。無人航空機によるモニタリングは車両や人手によるモニタリングと比較して、モニタリング要員の被ばく低減が可能のほか、モニタリングに際して陸路を用いないため住民の避難との干渉を防ぐことができ、またモニタリングポストのような点での測定と比較して面的な放射線分布の評価が可能である等の特長がある。以前までの無人航空機システムは原子力災害時における緊急時モニタリングにすぐ運用できる状況にはなく、上記の「原子力災害対策マニュアル」の枠組みを考慮し、活用シーンに合わせた要素技術開発が必要であった。

原子力施設敷地外に放射性物質が放出された場合、数時間以内に緊急時防護措置を準備する区域 (Urgent Protective action planning Zone : 原子力施設から概ね 5 km~30 km 圏内、以下、UPZ) の OIL1 区域の住民は避難もしくは屋内退避が必要になる。OIL1 区域の特定のためモニタリング要員が安全に無人機を運用するためには、少なくとも UPZ 外からの遠隔操縦が必要になる (Fig. 9-1 参照)。本図では、既存の無人航空機システムと、緊急時に備えて構築すべき無人航空機システムの 2 種類を比較している。既存システムでは UPZ の外側から安全に運用するための通信距離や運用体制が十分でない一方、将来的に備えるべきシステムでは、UPZ 外から長距離通信で運用が可能となり、緊急時に必要なモニタリングを迅速に実施できる体制を想定している。また、時系列な対応課題の抽出も重要である。Fig. 9-2 に原子力発電所事故時の対応を時系列でシミュレーションした例を示す。Fig. 9-2 では、理想的な無人航空機システムによる運用の想定、以前の無人航空機システム (東電福島原子力発電所周辺の放射線モニタリングで現在運用されているヤマハ発動機製の無人ヘリコプター (Fig. 3-6 参照) に、2023 年度 (令和 5 年度) までの測定システム²⁹⁾を用いた場合を想定) での対応可能な部分と対応が難しい部分を示した。Fig. 9-2 に示したように、既存の無人航空機システムでは緊急時のモニタリングに即座に対応できる機能及び体制が構築され

ておらず、機器の動作状況や測定情報をリアルタイムで監視する機能がなかったため、機器に故障や異常が生じた際、その状況を即時に把握することができなかった。また、機体が地上に戻り測定要員が機器の復旧を完了するまで測定データの取得が不可能であった。さらに、上空で取得した γ 線計数率は、地表面から1 mの高さの空間線量率への換算を行ったうえでマッピングする必要がある、これらの解析処理は専門技術者が専用ソフトなどを使用して各自のコンピュータで行っていた。このように以前の無人航空機システムでは、測定や解析の工程で手間と時間を要し、緊急時モニタリングに対応するためのシステム効率性が不十分であった。なお、現行の無人ヘリコプターでは、フライトの時間が最大約90分と短いことや通常の通信システムでは長距離通信(数十キロメートル以上)による運用が難しいなど、未だハード的な課題も残っている。

本章では、原子力災害時における緊急時モニタリングでの運用を想定し、商用化された無人航空機の中でも稼働時間の長いEdge Autonomy製(ラトビア)のPenguin Cを用いた基礎性能評価試験を実施した結果を報告する。また本試験を通して、無人航空機運用技術の慣熟を図るとともに、無人航空機を原子力災害時の緊急時モニタリングにおいて運用する際に、必要となる機能等について検討を行った。さらに、以前の無人航空機システムで課題となっていた、機器状態のリアルタイム監視の欠如、異常発生時の即時把握の困難、機体帰還前のデータ取得不可、並びに解析処理の手作業依存といった点を改善するために、本研究では放射線測定システムの改良を行った。これら改良を加えた測定システムの有効性について、実際のフライト試験を通じて検証した結果についても述べる。

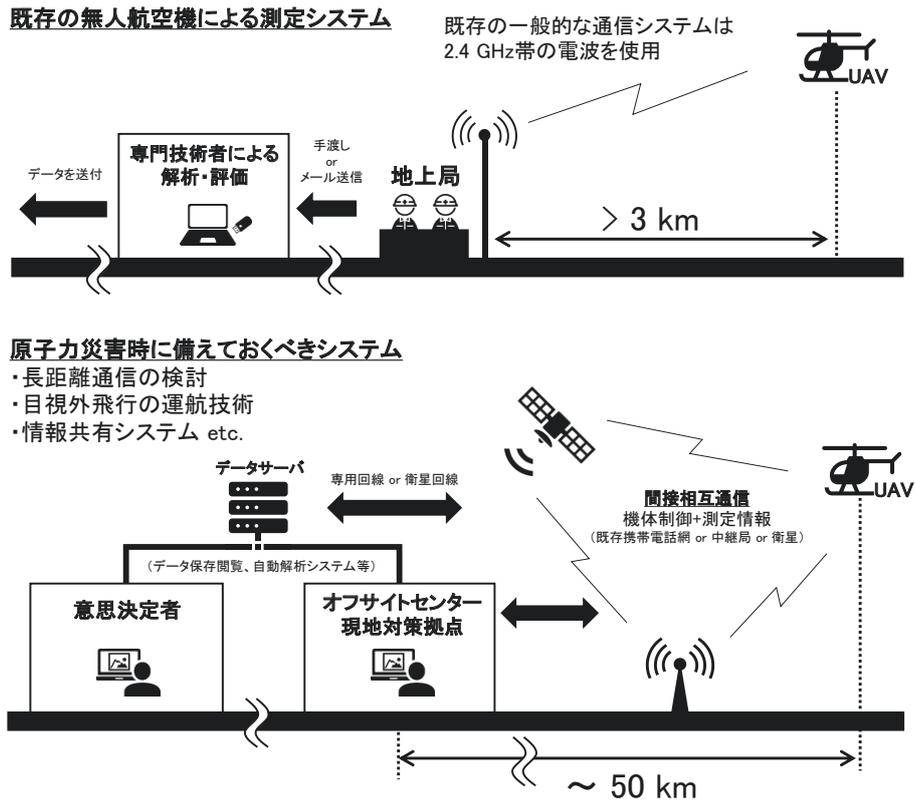
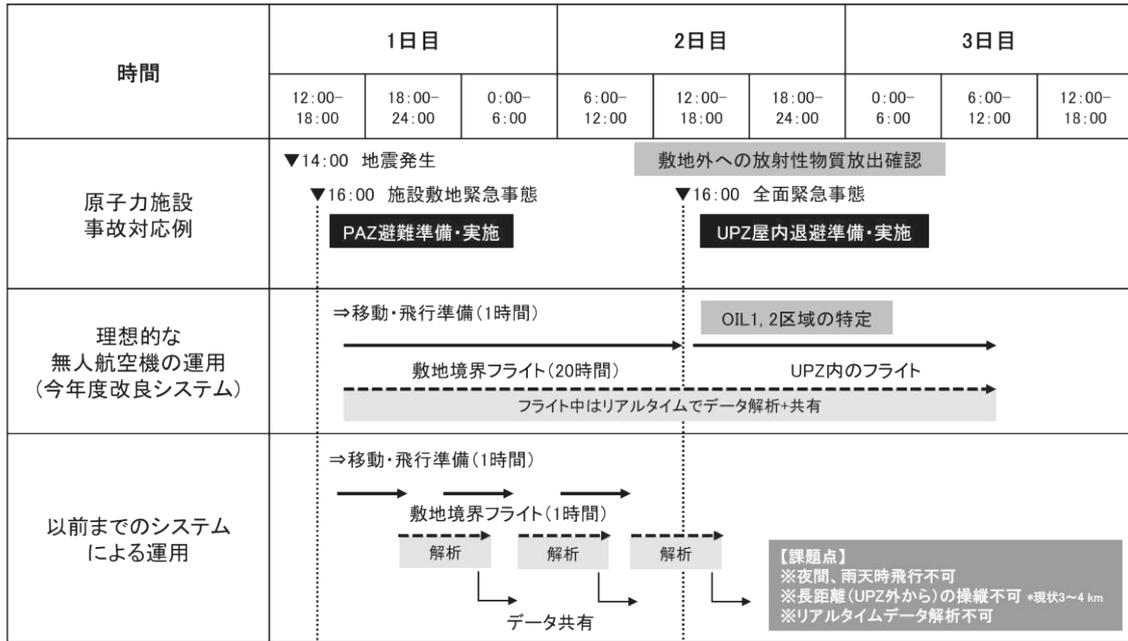


Fig. 9-1 既存システムと緊急時に備えて構築すべき無人航空機システムの比較イメージ



※PAZ(Precautionary Action Zone:原子力施設から概ね5 km圏内)
 ※UPZ(Urgent Protective action planning Zone: 原子力施設から概ね5 km~30 km圏内)

Fig. 9-2 原子力発電所事故を例にした既存の無人航空機による対応シミュレーション

9.1.1.原子力災害時に運用する無人航空機の必要性能及び試験機の選定

原子力災害時に緊急時モニタリングを行うという観点から無人航空機に必要とされる性能として以下の項目が挙げられる。

- (1) 長時間(20時間以上)のフライトが可能であること。
- (2) 放射線検出器を搭載するため5 kg程度のペイロードが確保されること。
- (3) 離陸のための滑走路を要しないこと。
- (4) 予め設定したプログラムにより自律飛行が可能であること。
- (5) 同無人航空機によるフライトの実績が100時間を超え、墜落事故に対する平均故障間隔(Mean Time Between Failure、以下、MTBF)が評価されていること。
- (6) 風速10 m/s以下でのフライトが可能であること。
- (7) 雨天時のフライトが可能であること。

近年、無人航空機の技術革新は目覚ましく、国内外で様々な製品が開発されているが、上記の要求性能に近い国内外の代表的な無人航空機の例を Fig. 9-3 に示す。無人航空機の種類は、固定翼機(飛行機タイプ)と回転翼機(ヘリコプタータイプ)に分けられる。両タイプの一般的な利点・欠点は以下の通りである。

- ・ 固定翼機
 利点：燃費が良く航続時間が長い。
 欠点：離着陸のための滑走路が必要(カタパルト方式で離陸できる機体もある)。

- ・ 回転翼機
 利点：ホバリングできるため、固定点での長時間測定等が可能。
 欠点：固定翼機に比べると燃費が悪い。

固定翼機としては国内で原子力機構と国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構が共同開発した UARMS (Unmanned Airplane for Radiation Monitoring System) がある。航続時間は 6 時間であり、さらに中継器を用いることで 20 km 以遠からのオートパイロットの操縦実績があり、緊急時モニタリングへの運用機種として有力候補である。本機種は実用機の試験段階で製品化はされていないが、日本のメーカーが開発に一から携わっていることから細かい部分のカスタマイズが可能なところに強みがある。

回転翼機では、既に東電福島原子力発電所事故後の環境放射線モニタリング等に利用されているヤマハ発動機株式会社の無人ヘリコプター (FAZER R G2) が挙げられる。航続距離は、固定翼機に及ばないものの、約 90 分の連続フライトが可能であり、最大積載量は 30 kg と、既存のバッテリー駆動のドローンと比べると様々なミッションに適用可能である。また同社の無人ヘリコプターは、全国の農薬散布業務に国内で 1,000 台以上が運用されていること、操縦者の免許制度や保守及びメンテナンスの工場が全国に配備されていることなど、運用面で優位な点が多い。FAZER R G2 は同社が独自に、10 年以上前から開発を重ねてきたものであり、製品としての完成度が高く、東電福島原子力発電所事故後の環境放射線モニタリングにおいて 100 時間以上のフライトを行っているが、人的ミス以外の事故がなく信頼性が高いことも魅力である。しかしながら、緊急時モニタリングで要求される UPZ 外からの遠隔操縦、長時間連続飛行、長距離での広域サーベイといった運用要件を考えると、最大 90 分の航続時間では対応可能な範囲に限界がある。

これらを踏まえ、本試験では、緊急時モニタリングに求められる必要性能を最も満たす機種として、固定翼機である Edge Autonomy 製の Penguin C を選定した。同社は中東を中心とした国外に数多くの納入実績を持ち、Penguin C は最大 20 時間の連続航行が可能であり、オプションとして衛星通信を使えることやカタパルト方式の離陸など、緊急時モニタリングに必須となる長時間、長距離、広域運用に適した特性を備えている。本研究では、この Penguin C を用いて実際に飛行試験を行い、その性能評価と国内運用に向けた課題の抽出を行った。



名称	Penguin C	UARMS	FAZER R G2
メーカー (国)	Edge Autonomy (ラトビア)	JAEA-JAXA共同開発 (日本)	ヤマハ発動機株式会社 (日本)
サイズ	翼長 3.3 m	翼長 4 m	全長 3.7 m
最大離陸重量 (kg)	23	50	110
燃料	混合燃料 (ガソリン+オイル)	混合燃料 (ガソリン+オイル)	ガソリン
航続時間 (分)	1200	360	100
離着陸方法	カタパルトで離陸 パラシュートで着陸	滑走路	約3 m×3 m平面で離着 陸可能
最大通信距離 (km)	180 *高出力電波使用時	5	∞ (衛星通信使用時)
最大積載重量 (ペイロード:kg)	燃料と合わせて7.64	10	35

Fig. 9-3 国内外の無人航空機の例

9.1.2.選定した機種のパフォーマンス

選定した Penguin C の外観及びカタログ性能について、それぞれ Fig. 9-4 及び Table 9-1 に示す。カタログデータより、翼長は 3.3 m、機長は 2.3 m の大きさで、専用ケースに収納可能である。燃料として、ガソリンとオイルの混合燃料が用いられ、飛行時間は最大 20 時間以上とされている。ペイロードスペースにカメラ等の機器搭載が可能であり、最大積載重量は 5 kg である。また、機体は防水仕様となっており、5 mm/h 程度の雨天時でも運用可能である。離陸には空圧のカタパルトを使用し、着陸にはパラシュートを利用する。機体制御には専用のソフトウェアを用いており、離発着を含めてマニュアルでの操縦は必須ではない。

Penguin C のカタログスペックより、原子力災害時における緊急時モニタリングに運用するにあたって必要となる以下の性能があることを確認した。

- (1) 長時間 (20 時間以上) のフライトが可能であること。

Penguin C は特製の燃料噴射式エンジンを備えており、20 時間以上の連続フライ

トが可能とされている。Edge Autonomy 社によると、同機種これまでの最長飛行時間は 21 時間である。ただし同実績は、ペイロード等のバッテリーを余分に消費する機器を搭載せず燃料を満杯にし、最適な気象条件の下で得られたものである。

- (2) 放射線検出器を搭載するため 5 kg 程度のペイロードが確保されること。

Penguin C 本体には最大 5 kg までのペイロードを搭載できる。なお、離陸条件及び気象条件(離陸高度、風速、機体重量等)によってカタパルトによる発射圧力及び離陸重量が変わるため、5 kg までペイロードを搭載できない場合がある。

- (3) 離陸のための滑走路を要しないこと。

Penguin C は滑走路を必要とせず、持ち運び可能な空気式カタパルトから発射及び離陸する。

- (4) 予め設定したプログラムにより自律飛行が可能であること。

フライトコントロールシステム (Cloud Cap Technology 社製オートパイロット Piccolo Command Center) で事前に作成したフライトプランにより飛行可能である。

- (5) 同無人航空機によるフライトの実績が 100 時間を超え、墜落事故に対する MTBF が評価されていること。

Penguin C の通常のフライト及びテストフライト実績はどちらも 1,000 時間を超え、Edge Autonomy 社内で MTBF が評価されている。実際の MTBF については社外秘となっているが、事故の分類を Table 9-2 のようにし、運用結果をデータベース化することで評価を行っている。

- (6) 風速 10 m/s 以下でのフライトが可能であること。

本機体がフライト可能な条件として、最大風速は 20 m/s、カタパルト発射時の向かい風は最大 10 m/s、パラシュート展開時の地表の突風は最大 8 m/s が限界値とされている。

- (7) 雨天時のフライトが可能であること。

5 mm/h 程度までならば雨天時でもオペレーションは可能とされている。



Fig. 9-4 Penguin C 外觀写真

Table 9-1 Penguin C のカタログスペック ⁶⁶⁾

機体の仕様	
翼幅	3.3 m
最大離陸重量 (MTOW)	23 kg
飛行時間	20 時間以上
飛行距離	最大 100 km ※トラッキングアンテナを使用した場合
巡航速度	19 m/s～22 m/s
限界高度	4,500 m (≒15,000 ft) ※平均海面
離陸方式	可搬型空気圧式カタパルト
最大離陸高度	3,000 m (≒10,000 ft) ※海拔高度
着陸方式	パラシュート及びエアバッグ
動作温度	-25°C～+40°C
凍結防止機能	加熱式ピトー管 (+10°C以下の場合に使用)
環境対応	雨天時オペレーション可 (降水量 5 mm/h まで)
エンジン仕様	
タイプ	燃料噴射式、28 cc エンジン
温度制御システム	フラップによる自動制御
燃料タイプ	オクタン価 98 ガソリンとオイル混合燃料
オイルタイプ	Edge Autonomy 製 2 ストロークエンジンオイル
燃料重量	5.0 kg
発電システム	100 W、オンボード発電システム
データリンク仕様	
周波数	2.4 GHz 帯または 5.7 GHz 帯
リンクレート	最大 12 Mbps
フライトコントロールシステム	
オートパイロット ・タイプ	Cloud Cap Technology 社製 Piccolo Command Center 及び Edge Autonomy 社製 CoPilot
地上局	
タイプ	可搬型地上局、タッチスクリーン、2 画面タイプ
アンテナ	
タイプ	指向性・無指向性自動切換式トラッキングアンテナ
カタパルト	
タイプ	可搬型空気圧式
最大発射圧力	11.5 Bar (1.15 MPa)

Table 9-2 Edge Autonomy における MTBF 計算時の事故分類⁶⁷⁾

アクシデント (偶然の事故) 機体の重大なダメージ、墜落または緊急着陸を引き起こす欠陥であり、MTBF の計算対象として分類されるもの	インシデント (人為的な事故) MTBF の計算対象として分類されないもの
<ul style="list-style-type: none"> ・ 人的要因 ・ 通信障害 ・ エンジンの故障 ・ パラシュートシステムの故障 ・ フライト中のパーツの分離 ・ GPS 障害 ・ ソフトウェアの故障 ・ アビオニクス (通信機器、航法システム、自動操縦装置の類の電子機器) の故障 ・ 離陸に影響を及ぼすカタパルトの欠陥 ・ 着陸エリア外での着陸 	<ul style="list-style-type: none"> ・ パラシュートリリースの欠陥 ・ 離陸後のカタパルトの損傷 (離陸に影響を与える可能性のない損傷や摩耗の増加など) ・ エアバッグの欠陥 ・ ソフトウェアのクラッシュ <ul style="list-style-type: none"> - ソフトウェアの再起動で解決する場合 - 墜落の原因とならないもの ・ 制御不能な要因による損傷：戦争、ストライキ、暴動、犯罪、落雷、他の航空機との衝突など、当事者が制御できない異常な出来事または状況が発生した場合に両当事者の責任または義務を根本的に免除するもの。

9.2. フライト試験概要及び結果

9.2.1. フライト試験概要

Penguin C を用いたフライト試験について、実施日及び各試験内容を Table 9-3 に示す。フライト試験では以下の項目について重点的に評価した。

- (1) 機体基本性能及び信頼性：フライト中の飛行位置、機体姿勢、エンジン、機体システム等
- (2) 夜間フライトに必要となる機能及び運用体制
- (3) 放射線測定システム

フライト試験では、1時間飛行を7回、夜間想定フライト試験1時間飛行を2回、6時間飛行を1回、合計10回の試験を実施した。各フライトの詳細情報を Table 9-4 に示す。フライト No.2024-01、No.2024-02、No.2024-08 では、キャリブレーションフライトを実施した。キャリブレーションフライトでは、各対地高度で円を描くフライトを実施し、地表面からの距離に伴う計数率の減衰率を取得した。併せて、歩行式サーベイメータ (KURAMA-II) により地表面から1 m の高さの空間線量率を測定し、Penguin C による測定値を地表面から1 m の高さの空間線量率に換算するためのパラメータを取得した。

フライト試験の工程を Fig. 9-5 に示す。フライト前の機体の健全性確認は Penguin C 用の「機体健全性確認の点検手順書」にしたがって実施した。この点検手順書はメーカーのマニュアルを基に原子力機構が独自に作成したものであり、機材の更新履歴やフライト試験で得られた知見を反映し、常に最新版となるようアップデートしている。健全性確認では点検手順書に従い、カタパルト、トラッキングアンテナ、地上局及び機体の組み立てとエンジン動作確認までを行い、部品の脱落や摩耗がないか、各機器との通信に異常は見られないかどうかを確認した。点検はフライト実施予定の前週などフライトまでに余裕をもって行った。なお、フライト直前にも機体の詳細な点検等を事前に完了していることを前提とした飛行前の最終確認として、プリフライトチェックにて機体の状態確認を実施した。

フライト前の事前確認の他に、機体の定期保守点検を実施した。定期保守点検については、Penguin C のメーカーである Edge Autonomy 社が作成している各機器専用マニュアルに点検頻度や内容が記されており、本マニュアルを基にして原子力機構が独自に「定期保守点検手順書」を作成し、これに従って保守点検を実施した。定期保守点検手順書の内容は、メーカーのマニュアル更新や、試験経験を踏まえて追加が必要な部分があれば、随時更新を行っている。定期保守点検頻度は Edge Autonomy 社が指定する通り、5回のフライトごとに1回または対象機体を用いてフライトを行っていない場合には月に1回とした。なお、本試験は Edge Autonomy 社が発行する Penguin C フライトのための免許を有する、株式会

社 JDRONE に試験実施を委託した。委託内容は、機体の定期保守点検、フライト前の各種準備 (機体組立て、通信確認、エンジン動作確認、カタパルト及び地上局機器の設定等)、離陸、着陸操作、並びに飛行中の運用支援を含む一連の作業である。

Table 9-3 試験日及び試験内容一覧

試験日 (2024 年)		実施場所	試験内容	フライト No.
6月13日	(木)	福島ロボット テストフィールド (福島県南相馬市)	飛行試験 1 回 1 時間フライト (キャリブレーションフライト)	2024-01
6月14日	(金)		飛行試験 1 回 1 時間フライト (キャリブレーションフライト)	2024-02
7月9日	(火)		飛行試験 1 回 1 時間フライト (測定フライト)	2024-03
7月10日	(水)		飛行試験 1 回 1 時間フライト (測定フライト)	2024-04
7月11日	(木)		飛行試験 1 回 1 時間フライト (測定フライト)	2024-05
7月12日	(金)		飛行試験 1 回 1 時間フライト (測定フライト)	2024-06
9月9日	(月)		飛行試験 1 回 夜間想定フライト	2024-07
9月11日	(水)		飛行試験 1 回 6 時間フライト (キャリブレーションフライト)	2024-08
12月2日	(月)		飛行試験 1 回 1 時間フライト (測定フライト)	2024-09
12月3日	(火)		飛行試験 1 回 夜間想定フライト	2024-10

Table 9-4 各フライト試験の詳細情報

項目	各フライト情報													
	2024/6/13	2024/6/14	2024/7/9	2024/7/10	2024/7/11	2024/7/12	2024/9/9	2024/9/11	2024/12/2	2024/12/3				
日付	2024/6/13	2024/6/14	2024/7/9	2024/7/10	2024/7/11	2024/7/12	2024/9/9	2024/9/11	2024/12/2	2024/12/3				
フライト番号	2024-01	2024-02	2024-03	2024-04	2024-05	2024-06	2024-07	2024-08	2024-09	2024-10				
試験地*1	RTF北西	RTF北西	RTF北西	RTF北西	RTF北西	RTF北西	RTF北西	RTF北西	RTF	RTF北西				
天候	晴れ	晴れ	曇り	曇り	雨	雨	晴れ	晴れ後雨	晴れ	晴れ				
外気温(℃)	24	25	29	25	24	24	27	32	13	15				
風速/離陸(m/s)	2.2	2.5	0	1.2	0	1.7	2.9	1.5	2.0	4.8				
風速/着陸(m/s)	2.9	2.5	0	1.3	1.4	2.0	0.5	2.0	0	1.0				
風向/離陸(度)*2	130	100	130	180	180	130	90	110	80	260				
風向/着陸(度)*2	183	70	60	180	160	130	110	340	0	280				
気圧(hPa)	1,005	1,009	1,000	1,007	997	1,001	1,014	1,010	1,019	1,018				
離陸時間	11:07	10:16	11:02	10:41	10:04	11:58	11:38	10:28	13:10	14:10				
着陸時間	12:43	11:41	12:26	11:57	11:24	13:20	12:55	16:29	14:15	15:26				
飛行時間	1時間36分	1時間25分	1時間24分	1時間16分	1時間20分	1時間22分	1時間17分	6時間01分	1時間05分	1時間16分				
機体番号	0056	0056	0056	0056	0056	0056	0094	0056	0056	0094				
エンジン番号	1044	1044	1044	1044	1044	1044	EFL-1	1044	1044	EFL-1				
ペイロード	放射線検出器、パイロットランプ	放射線検出器	放射線検出器	放射線検出器	放射線検出器	放射線検出器	EPS-2097、パイロットランプ	放射線検出器	放射線検出器	EPS-2097、パイロットランプ				
離陸重量(kg)	19.84	19.49	19.84	19.84	19.84	19.84	19.49	20.74	19.45	19.62				
搭載燃料(kg)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.90	3.00	2.01	2.03				
消費燃料(kg)	0.50	0.60	0.48	0.48	0.48	0.54	0.61	2.10	0.37	1.37				
最大エンジン回転数(rpm)	6,448	6,444	6,300	6,200	6,200	6,200	6,353	6,305	6,239	6,237				

*1RTF：福島ロボットテストフィールド

*2北を0度、東を90度とする。



Fig. 9-5 フライト試験の工程

9.2.2.機体の基本性能及び信頼性の確認及びその評価結果

Penguin C 機体の基本性能及び信頼性の確認を行うため、計 10 回のフライト試験を行い、フライト中の飛行位置、機体姿勢、エンジン、機体システム等の情報を記録した。各フライト試験の作業情報詳細を Table 9-5～Table 9-14 に、各フライトの飛行軌跡を Fig. 9-6～Fig. 9-15 に示す。フライト試験の結果、フライト No.2024-03、No.2024-09 及び No.2024-10 を除いて、フライト中の機体の動作異常やシステム異常等は見られなかった。これら 3 フライトでは、飛行中に機体座標が一時的に基地局周辺の座標へジャンプする異常が確認されたが、自動操縦機能には支障がなく、いずれも安全に着陸できた。ただし、機体の離陸に使用するカタパルト及び機体の部品交換や修理を行った。Table 9-15 に交換及び修理した部品一覧を示す。Penguin C はラトビア製の機体であり、部品の購入は海外から輸入する必要がある。よって部品の調達に数ヶ月を要する場合もあった。海外からの輸入機体を運用する場合には各予備パーツを予め保持しておくことで、スムーズな運用が可能となる。

Table 9-5 フライト No.2024-01 の作業情報詳細

フライトNo	2024-01	風速/離陸 (m/s)	2.2	離陸重量 (kg)	19.84
日時	2024/6/13	風速/着陸 (m/s)	2.9	搭載燃料 (kg)	2.00
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	130	消費燃料 (kg)	0.50
ペイロード	放射線検出器 パイロットランプ	風向/着陸 (度)	183	内容	1時間フライト
天候	晴れ	離陸時間	11:07	機体番号	0056
気温 (°C)	24	着陸時間	12:43	エンジン番号	1044
気圧 (hPa)	1,005	飛行時間	1時間36分	最大エンジン回転数 (rpm)	6,448
プリフライトチェック					
<p>離陸場所と基地局をRTFから北西にある上洪佐市有地とし、関連機器一式設置完了後の10時45分頃にプリフライトチェックを開始した。プリフライトチェックにおいては基地局から送信されたコマンドによる舵面コントロールは問題なく実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>11時07分頃に離陸を実行した。機体がカタパルトから南東方向へ射出された後、ウェイポイント0に向けて飛行して目標高度まで問題なく到達し、その後のウェイポイント1での旋回飛行で基地局及び目視で異常がないことを確認したため、そのままミッション飛行に移行した。</p>					
ミッション					
<p>11時10分頃にRTF敷地外の農地上空を半径250 mの円を左旋回するミッション飛行を開始した。また高度を180 mから10分ごとに20 mずつ上昇させ、1時間経過で高度300 mに達するミッションを実行した。機体をオートパイロットモードで飛行し、対気速度は極端に変化せず23 m/s~24 m/sを保ち、異常なくミッションを実行していると基地局及び目視で確認した。</p>					
着陸					
<p>高度300 m到達から10分経過後に着陸態勢に入った。上空とRTF内滑走路の気象状況より風速2.9 m/sの南からの風で制限区域を逸脱する恐れがないため、RTF内滑走路へ北からの進入で着陸可能と判断した。着陸コマンドの送受信からエンジンカット、パラシュート及びエアバッグの展開までの流れを問題なく実行したことを確認し、12時43分頃にRTF内滑走路上へ着陸した。総飛行時間は1時間36分であった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸後、機体及びエアバッグ、パラシュートに汚れや傷がないかの点検を実施した。機体後部の底面にあるシャークフィンアンテナに摩滅した傷があり、エアバッグには擦り傷の他に後部に貫通した穴が開いていることを確認した。機体がパラシュート展開後、風に流され、アスファルトへ滑るように着陸したため、エアバックがアスファルトに擦れてしまい、穴が空いてしまったと考えられる。また、機体の重心位置の関係上、機体頭部がやや上を向いてしまうことにより機体後部からの着陸になってしまう。このため、機体後方下部にあるシャークフィンアンテナが突き出て、着陸の衝撃でエアバッグを貫通し、先端が擦れてしまったと考えられる。機体回収後、JDRONE事務所に機体健全性確認の点検手順書に従ってエアバッグの補修作業を行い、再使用可能な状態であることを確認した。</p>					

*RTF: 福島ロボットテストフィールド



Fig. 9-6 フライト No.2024-01 の飛行軌跡
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸⁾に Penguin C のフライト軌跡を追記して掲載)

Table 9-6 フライト No.2024-02 の作業情報詳細

フライトNo	2024-02	風速/離陸 (m/s)	2.5	離陸重量 (kg)	19.49
日時	2024/6/14	風速/着陸 (m/s)	2.5	搭載燃料 (kg)	2.00
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	100	消費燃料 (kg)	0.60
ペイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	70	内容	1時間フライト
天候	晴れ	離陸時間	10:16	機体番号	0056
気温 (°C)	25	着陸時間	11:41	エンジン番号	1044
気圧 (hPa)	1,009	飛行時間	1時間25分	最大エンジン回転数 (rpm)	6,444
プリフライトチェック					
<p>前日と同様に離陸場所と基地局をRTFから北西にある上渋佐市有地とした。機体の両翼、胴体にパイロットランプを取り付け、関連機器一式設置完了後、10時00分頃にプリフライトチェックを開始した。プリフライトチェックにおいては基地局から送信されたコマンドによる舵面コントロールは問題なく実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>10時16分に離陸を実行した。機体がカタパルトから南東方向へ射出された後、ウェイポイント0に向けて飛行して目標高度まで問題なく到達し、その後のウェイポイント1での旋回飛行で基地局及び目視で異常がないことを確認したため、そのままミッション飛行に移行した。</p>					
ミッション					
<p>10時20分頃に昨日と同様に、RTF敷地外の農地上空を半径250mの円を左旋回で飛行し、高度を180 mから10分ごとに20 mずつ上昇させ、1時間経過で高度300 mに達するよう設定してミッション飛行を開始した。機体をオートパイロットモードで飛行し、対気速度は極端に変化せず23~24m/sを保ち、異状なくミッションを実行していると基地局及び目視で確認したが、パイロットランプの点灯が1箇所目視で確認することができなかった。</p>					
着陸					
<p>高度300 m到達から10分経過後に着陸態勢に入った。上空とRTF内滑走路の気象状況より東風のため着陸には不向きな天候であったが2.0 m/s~3.0 m/sで着陸における風の影響は弱いと考えられたため、RTF内滑走路へ北からの進入で着陸可能と判断した。着陸コマンドの送受信からエンジンカット、パラシュート及びエアバックの展開までの流れを問題なく実行したことを確認し、11時41分にRTF内滑走路付近の地面へ着陸した。総飛行時間は1時間25分であった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸後、機体の損傷確認にて両翼及び尾翼、胴体に傷はなかったが、右翼のパイロットランプが脱落していることが判明した。飛行中に確認することができなかったことから、離陸の衝撃で脱落してしまったと考えられる。着陸地点が草木のない乾いた土の上であった為、エアバックに土などの汚れがあることを確認した。事務所にてエアバックの清掃及びエアバック、パラシュートの損傷確認を行い、不具合が認められなかったため、次のフライトにも使用可能な状態であるとした。</p>					

*RTF: 福島ロボットテストフィールド



Fig. 9-7 フライト No.2024-02 の飛行軌跡
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸)に Penguin C のフライト軌跡を追記して掲載)

Table 9-7 フライト No.2024-03 の作業情報詳細

フライトNo	2024-03	風速/離陸 (m/s)	0.0	離陸重量 (kg)	19.84
日時	2024/7/9	風速/着陸 (m/s)	0.0	搭載燃料 (kg)	2.00
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	130	消費燃料 (kg)	0.48
ペイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	60	内容	1時間フライト
天候	曇り	離陸時間	11:02	機体番号	0056
気温 (°C)	29	着陸時間	12:26	エンジン番号	1044
気圧 (hPa)	1,000	飛行時間	1時間24分	最大エンジン回転数 (rpm)	6,300
プリフライトチェック					
<p>南風の成分が強いため離陸場所と基地局をRTFから北西にある上洪佐市有地とし、関連機器一式設置完了後の10時40分頃にプリフライトチェックを開始した。プリフライトチェックにおいては基地局から送信されたコマンドによる舵面コントロールは問題なく実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>11時02分頃に離陸を実行した。機体がカタパルトから南東方向へ射出された後、ウェイポイント0に向けて飛行して目標高度まで問題なく到達し、基地局及び目視で異常がないことを確認したため、そのままミッション飛行に移行した。</p>					
ミッション					
<p>11時10分頃にRTF敷地外の農地上空でミッション飛行を実施した。このミッションでは、半径250 m、高度250 mの左旋回の円を描く飛行パターンを設定し、ウェイポイントの位置を5回変更した。各ウェイポイント変更後には、約10分間の飛行を行った。オートパイロットモードで飛行し、対気速度は極端に変化せず23 m/s～24 m/sを保ち、ミッションの実行を基地局及び目視で確認した。本フライトで、フライト中に機体座標が基地局周辺の座標に何度も飛んでしまう事象が現れたが、機体のエラー表示が無く、機体の自動操縦機能に問題がないためフライトを継続した。この事象が起こった原因として、機体に搭載されているGPSの問題ではなく、機体もしくは基地局のアンテナの不具合や電波干渉が原因であると考えられる。</p>					
着陸					
<p>気象状況は風速0 m/s～0.5 m/sとほとんど無風で制限区域を逸脱する恐れがないため、RTF内滑走路へ北からの進入で着陸可能と判断した。着陸コマンドの送受信からエンジンカット、パラシュート及びエアバッグの展開までの流れを問題なく実行したことを確認し、12時26分頃にRTF内滑走路上へ着陸した。総飛行時間は1時間24分であった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸後、機体及びエアバッグ、パラシュートに汚れや傷がないかの点検を実施した。機体後部の底面にあるシャークフィンアンテナに摩滅した傷があり、エアバッグには擦り傷のほかに後部に貫通した穴が開いていることを確認した。機体がパラシュート展開後、風に流され、アスファルトへ滑るように着陸したため、エアバッグがアスファルトに擦れてしまい、穴が空いてしまったと考えられる。また、機体の重心位置の関係上、機体頭部がやや上を向いてしまうことにより機体後部からの着陸になってしまう。このため、機体後方下部にあるシャークフィンアンテナが突き出て、着陸の衝撃でエアバッグを貫通し、先端が擦れてしまったと考えられる。機体回収後、事務所にて機体健全性確認の点検手順書に従ってエアバッグの補修作業を行い、再使用可能な状態であることを確認した。</p>					

*RTF: 福島ロボットテストフィールド



Fig. 9-8 フライト No.2024-03 の飛行軌跡
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸)に Penguin C のフライト軌跡を追記して掲載)

Table 9-8 フライト No.2024-04 の作業情報詳細

フライトNo	2024-04	風速/離陸 (m/s)	1.2	離陸重量 (kg)	19.84
日時	2024/7/10	風速/着陸 (m/s)	1.3	搭載燃料 (kg)	2.00
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	180	消費燃料 (kg)	0.48
パイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	180	内容	1時間フライト
天候	曇り	離陸時間	10:41	機体番号	0056
気温 (°C)	25	着陸時間	11:57	エンジン番号	1044
気圧 (hPa)	1,007	飛行時間	1時間16分	最大エンジン回転数 (rpm)	6,200
プリフライトチェック					
<p>前日と同様に南風の成分が強いため、離陸場所と基地局の設営を北西の上渋佐市有地とした。関連機器一式設置完了後、10時10分頃よりプリフライトチェックを開始した。プリフライトチェックにおいては基地局から送信されたコマンドによる舵面コントロールは問題なく実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>10時41分頃に離陸を実行した。機体がカタパルトから南東方向へ射出された後、ウェイポイント0に向けて飛行して目標高度まで問題なく到達し、基地局及び目視で異常がないことを確認したため、そのままミッション飛行に移行した。</p>					
ミッション					
<p>10時50分頃にRTF敷地外の農地上空でミッション飛行を実施した。このミッションでは、半径250 m、高度200 mの左旋回を描く飛行パターンを設定し、ウェイポイントの位置を5回変更した。各ウェイポイント変更後には、約10分間の飛行を行った。オートパイロットモードで飛行し、対気速度は極端に変化せず23 m/s～24 m/sを保ち、異状なくミッションを実行していると基地局及び目視で確認した。</p>					
着陸					
<p>気象状況は風速1.5 m/s～2.8 m/sの南南東の風であったため、RTF内滑走路へ北からの進入で着陸可能と判断した。着陸コマンドの送受信からエンジンカット、パラシュート及びエアバッグの展開までの流れを問題なく実行したことを確認し、11時57分頃にRTF内滑走路上へ着陸した。総飛行時間は1時間16分であった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸後、機体外部及びエアバッグ、パラシュートに汚れや傷がないか点検した。エアバッグに約2 cmの小さな傷があったため、前日と同様に機体回収後、事務所にて機体健全性確認の点検手順書に従ってエアバッグの補修作業を行い、再使用可能な状態であることを確認した。</p>					

*RTF: 福島ロボットテストフィールド



Fig. 9-9 フライト No.2024-04 の飛行軌跡
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸)に Penguin C のフライト軌跡を追記して掲載)

Table 9-9 フライト No.2024-05 の作業情報詳細

フライトNo	2024-05	風速/離陸 (m/s)	0	離陸重量 (kg)	19.84
日時	2024/7/11	風速/着陸 (m/s)	1.4	搭載燃料 (kg)	2.00
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	180	消費燃料 (kg)	0.48
パイロット	放射線検出器	風向/着陸 (度)	160	内容	1時間フライト
天候	雨	離陸時間	10:04	機体番号	0056
気温 (°C)	24	着陸時間	11:24	エンジン番号	1044
気圧 (hPa)	997	飛行時間	1時間20分	最大エンジン回転数 (rpm)	6,200
プリフライトチェック					
<p>本フライトでは6時間フライトを実施する予定であったが、2つの理由から1時間フライトに変更した。1つ目の理由は、離陸時の風速が0 m/sであり、対気速度を十分に得ることができなかったことである。2つ目の理由は、気温が24°Cと高く、揚力が十分に得られないことである。これらの理由から、カタパルトプレッシャーを最大にしても離陸できないため、機体離陸重量を軽くする必要があった。そのため、搭載燃料を3 kgから2 kgに減らし、フライト予定を1時間に変更した。関連機器一式設置完了後、9時40分頃よりプリフライトチェックを開始した。プリフライトチェックにおいては基地局から送信されたコマンドによる舵面コントロールは問題なく実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>10時04分頃に離陸を実行した。機体がカタパルトから南東方向へ射出された後、ウェイポイント0に向けて飛行したが、高度上昇が間に合わず、約100 m～150 mオーバーランした後、ウェイポイント1を周回するプログラムに移行した。高度上昇が間に合わなかったのは、風速が0 m/sとほとんど無風であったため対気速度が得られなかったこと、気温が高かったことの2つの理由により、揚力が十分に得られなかったことが考えられる。</p>					
ミッション					
<p>10時10分頃にRTF敷地外の農地上空でミッション飛行を実施した。このミッションでは前日と同様、半径250 m、高度200 mの左旋回の円を描く飛行パターンを設定し、ウェイポイントの位置を5回変更した。各ウェイポイント変更後には、約10分間の飛行を行った。オートパイロットモードで飛行し、対気速度は極端に変化せず23 m/s～24 m/sを保っていた。また、フライト中に2.0 mm/h～3.0 mm/h程度の降雨があったが、異常なくミッションを実行していると基地局及び目視で確認した。</p>					
着陸					
<p>気象状況は、風速1.0 m/s～2.0 m/sの南東の風で、制限区域を越える恐れがないため、RTF内滑走路へ北からの進入で着陸可能と判断した。着陸コマンドの送受信からエンジンカット、パラシュート及びエアバッグの展開までの流れを問題なく実行したことを確認し、11時24分頃にRTF内滑走路上へ着陸した。総飛行時間は1時間20分であった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸後、機体外部及びエアバッグ、パラシュートに汚れや傷がないか点検した。前日と同様にエアバッグに約1 cmの小さな傷があったため機体回収後、事務所にて機体健全性確認の点検手順書に従ってエアバッグの補修作業を行い、再使用可能な状態であることを確認した。</p>					

*RTF: 福島ロボットテストフィールド



Fig. 9-10 フライト No.2024-05 の飛行軌跡
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸)に Penguin C のフライト軌跡を追記して掲載)

Table 9-10 フライト No.2024-06 の作業情報詳細

フライトNo	2024-06	風速/離陸 (m/s)	1.7	離陸重量 (kg)	19.84
日時	2024/7/12	風速/着陸 (m/s)	2.0	搭載燃料 (kg)	2.00
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	130	消費燃料 (kg)	0.54
パイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	130	内容	1時間フライト
天候	雨	離陸時間	11:58	機体番号	0056
気温 (°C)	24	着陸時間	13:20	エンジン番号	1044
気圧 (hPa)	1,001	飛行時間	1時間22分	最大エンジン回転数 (rpm)	6,200
プリフライトチェック					
<p>南東風の成分が強いため、離陸場所と基地局の設営を北西の上渋佐市有地とした。雨の影響で1時間程度遅れて準備を開始した。関連機器一式設置完了後、11時20分頃よりプリフライトチェックを開始した。プリフライトチェックにおいては基地局から送信されたコマンドによる舵面コントロールは問題なく実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>11時58分頃に離陸を実行した。機体がカタパルトから南東方向へ射出された後、ウェイポイント0に向けて飛行して目標高度まで問題なく到達し、基地局及び目視で異常がないことを確認したため、そのままミッション飛行に移行した。</p>					
ミッション					
<p>12時02分頃にRTF敷地外の農地上空でミッション飛行を実施した。このミッションでは、半径250 m、高度200 mの左旋回のパターンを描く飛行パターンを設定し、ウェイポイントの位置を5回変更した。各ウェイポイント変更後には、約10分間の飛行を行った。オートパイロットモードで飛行し、対気速度は極端に変化せず23 m/s～24 m/sを保ち、異常なくミッションを実行していると基地局及び目視で確認した。</p>					
着陸					
<p>気象状況は、風速1.0 m/s～2.5 m/sの南東の風で、制限区域を越える恐れがないため、RTF内滑走路へ北からの進入で着陸可能と判断した。着陸コマンドの送受信からエンジンカット、パラシュート及びエアバッグの展開までの流れを問題なく実行したことを確認し、13時20分頃にRTF内滑走路上へ着陸した。総飛行時間は1時間22分であった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はロボットテストフィールド内の砂地であり、機体を損傷させる突起物等は無かった。機体やパラシュート、エアバッグに目立った損傷は発生しなかったため、継続して使用可能な状態であることを確認した。</p>					

*RTF: 福島ロボットテストフィールド



Fig. 9-11 フライト No.2024-06 の飛行軌跡
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸)に Penguin C のフライト軌跡を追記して掲載)

Table 9-11 フライト No.2024-07 の作業情報詳細

フライトNo	2024-07	風速/離陸 (m/s)	2.9	離陸重量 (kg)	19.49
日時	2024/9/9	風速/着陸 (m/s)	0.5	搭載燃料 (kg)	1.90
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	90	消費燃料 (kg)	0.61
ペイロード	カメラ パイロットランプ	風向/着陸 (度)	110	内容	夜間想定フライト
天候	晴れ	離陸時間	11:38	機体番号	0094
気温 (°C)	27	着陸時間	12:55	エンジン番号	EFI-1
気圧 (hPa)	1,014	飛行時間	1時間17分	最大エンジン回転数 (rpm)	6,353
プリフライトチェック					
<p>本フライトは夜間フライトを想定しており、事前に機体の両翼、胴体にパイロットランプを取り付け、搭載物をカメラへと換装作業後、動作確認をした。</p> <p>東風の成分が強いため離陸場所と基地局をRTFから北西にある上渋佐市有地とした。関連一式設置完了後の10時30分頃にプリフライトチェックを開始した。プリフライトチェックにおいては基地局から送信されたコマンドによる舵面コントロールは問題なく実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>11時38分頃に離陸を実行した。機体がカタパルトから南東方向へ射出された後、ウェイポイント0に向けて飛行して目標高度まで問題なく到達し、基地局及び目視で異常がないことを確認し、そのままミッション飛行に移行した。</p>					
ミッション					
<p>11時50分頃にRTF敷地外の農地上空でミッション飛行を実施した。ミッションの内容はウェイポイントの位置を変更せず、半径250 m、高度250 mの左旋回のパターンを描く飛行パターンに設定し、搭載したカメラで周辺の撮影を行った。オートパイロットモードで飛行し、対気速度は極端に変化せず23 m/s～24 m/sを保ち、異常なくミッションを実行していると基地局及び目視で確認したが、パイロットランプの点灯が1箇所目視で確認することができなかった。</p>					
着陸					
<p>気象状況は風速0.5 m/s～1 m/sの東の風であったため、RTF内滑走路へ北からの進入で着陸可能と判断した。着陸コマンドの送受信からエンジンカット、パラシュート及びエアバッグの展開までの流れを問題なく実行したことを確認し、12時55分頃にRTF内滑走路上へ着陸した。総飛行時間は1時間17分であった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸後、機体外部及びエアバッグ、パラシュートに汚れや傷がないか点検を実施した。その結果、右翼のパイロットランプが脱落していることが判明した。飛行中に確認することができなかったことから、離陸の衝撃で脱落してしまったと考えられる。</p> <p>また、エアバッグに約2 cm小さな傷があったため、事務所にて機体健全性確認の点検手順書に従ってエアバッグの補修作業を行い、再使用可能な状態であることを確認した。</p>					

*RTF: 福島ロボットテストフィールド



Fig. 9-12 フライト No.2024-07 の飛行軌跡
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸)に Penguin C のフライト軌跡を追記して掲載)

Table 9-12 フライト No.2024-08 の作業情報詳細

フライトNo	2024-08	風速/離陸 (m/s)	1.5	離陸重量 (kg)	20.74
日時	2024/9/11	風速/着陸 (m/s)	2.0	搭載燃料 (kg)	3.00
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	110	消費燃料 (kg)	2.10
ペイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	340	内容	6時間フライト
天候	晴れ後雨	離陸時間	10:28	機体番号	0056
気温 (°C)	32	着陸時間	16:29	エンジン番号	1044
気圧 (hPa)	1,010	飛行時間	6時間1分	最大エンジン回転数 (rpm)	6,305
プリフライトチェック					
<p>東風の成分が強いため離陸場所と基地局をRTFから北西にある上洪佐市有地とした。関連一式設置完了後9時頃にプリフライトチェックを開始した。プリフライトチェックにおいては基地局から送信されたコマンドによる舵面コントロールは問題なく実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>10時28分頃に離陸を実行した。機体がカタパルトから南東方向へ射出された後、ウェイポイント0に向けて飛行して目標高度まで問題なく到達し、基地局及び目視で異常がないことを確認し、そのままミッション飛行に移行した。</p>					
ミッション					
<p>10時33分頃にRTF敷地外の農地上空でミッション飛行を実施した。ミッションの内容はウェイポイントの位置を変更せず、高度を180 mから45分ごとに20 mずつ上昇させ、300 mまでのミッションとした。機体をオートパイロットモードで飛行し、対気速度は極端に変化せず23 m/s～24 m/sを保ち、異常なくミッションを実行していると基地局及び目視で確認した。</p>					
着陸					
<p>ミッション終了後、着陸態勢へと入った。上空ではRTF内滑走路で測定した風向よりも北風であったが、風速2 m/sで制限区域を逸脱する恐れがないため、RTF内滑走路へ北からの進入で着陸可能と判断した。着陸コマンドの送受信からエンジンカット、パラシュート及びエアバッグの展開までの流れを問題なく実行したことを確認し、16時29分頃にRTF内滑走路上へ着陸した。総飛行時間は6時間1分であった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はRTF内の砂地であり、機体を損傷させる突起物等は無かった。機体やパラシュート、エアバックに目立った損傷はなかったが、土などの汚れが付着しており、雨で濡れていることを確認した。事務所にて機材の清掃、乾燥後に再度、機材を確確認したところ、不具合が認められなかった。次回のフライトにも使用可能な状態であるとした。</p>					

*RTF: 福島ロボットテストフィールド



Fig. 9-13 フライト No.2024-08 の飛行軌跡
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸)に Penguin C のフライト軌跡を追記して掲載)

Table 9-13 フライト No.2024-09 の作業情報詳細

フライトNo	2024-09	風速/離陸 (m/s)	2.0	離陸重量 (kg)	19.45
日時	2024/12/2	風速/着陸 (m/s)	0.0	搭載燃料 (kg)	2.01
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	80	消費燃料 (kg)	0.37
ペイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	0	内容	1時間フライト
天候	晴れ	離陸時間	13:10	機体番号	0056
気温 (°C)	13	着陸時間	14:15	エンジン番号	1044
気圧 (hPa)	1,019	飛行時間	1時間5分	最大エンジン回転数 (rpm)	6,239
プリフライトチェック					
<p>関連機器一式設置完了後、12時30分頃にプリフライトチェックを開始した。プリフライトチェックでは基地局から送信されたコマンドによる舵面コントロールは問題なく実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>気象状況はやや東風であり、RTF敷地内から北に向けての離陸には適していない風向きであったが、風速が2 m/sと弱く離陸時に影響がないと判断したため、13時10分に離陸を実行した。機体がカタパルトから北方向へ射出された後、ウェイポイント0に向けて飛行して目標高度まで問題なく到達した。その後、ウェイポイント1での旋回飛行で基地局及び目視で異常がないことを確認したため、そのままミッションフライトに移行した。</p>					
ミッション					
<p>13時15分頃にミッションフライトを実施し、RTF敷地外農地上空に1点のウェイポイントを置き、5分おきにウェイポイントを移動する方式とした。本ミッションにおける高度設定は200 mとし、オートパイロットによる対気速度は23 m/s~24 m/sと一定しており、ミッションの実行を基地局及び目視で確認した。本フライトではフライト中に機体座標が基地局周辺の座標に何度も飛んでしまう事象が現れたが、機体のエラー表示が無く、機体の自動操縦機能に問題がないためフライトを継続した。これはフライトNo.2024-3と同様の事象と考えられる。原因として、機体に搭載されているGPSの問題ではなく、機体もしくは基地局のアンテナの不具合や電波干渉が原因であると考えられる。</p>					
着陸					
<p>気象状況は風速0 m/sであったため、RTF内滑走路へ北からの進入での着陸可能と判断した。着陸コマンドの送受信からエンジンカット、パラシュート及びエアバッグの展開まで問題なく実行したことを確認し、14時15分にRTF敷地内へ着陸した。総飛行時間は1時間5分であった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はRTF内の砂地であり、機体を損傷させる突起物等は無かった。機体やパラシュート、エアバックに目立った損傷はなかったが、土などの汚れが付着していることを確認した。事務所にて機材の清掃後に再度確認し、不具合が認められなかった。次のフライトにも使用可能な状態であったとした。</p>					

*RTF: 福島ロボットテストフィールド



Fig. 9-14 フライト No.2024-09 の飛行軌跡
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸)に Penguin C のフライト軌跡を追記して掲載)

Table 9-14 フライト No.2024-10 の作業情報詳細

フライトNo	2024-10	風速/離陸 (m/s)	4.8	離陸重量 (kg)	19.62
日時	2024/12/3	風速/着陸 (m/s)	1.0	搭載燃料 (kg)	2.03
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	260	消費燃料 (kg)	1.37
ペイロード	カメラ パイロットランプ	風向/着陸 (度)	280	内容	夜間想定フライト
天候	晴れ	離陸時間	14:10	機体番号	0094
気温 (°C)	15	着陸時間	15:26	エンジン番号	EFI-1
気圧 (hPa)	1,018	飛行時間	1時間16分	最大エンジン回転数 (rpm)	6,237
プリフライトチェック					
<p>本フライトは夜間フライトを想定して、現場にて機体の両翼及び胴体の下部にパイロットランプを取り付けてランプが機能することを確認した。離陸時に南西からの風が吹くと気象情報により確認したため、離陸場所と基地局をRTFから北西にある上渋佐市有地とし、関連機器一式設置完了後、13時00分頃にプリフライトチェックを開始した。プリフライトチェックにおいては基地局から送信されたコマンドによる舵面コントロールは問題なく実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>風速が最大4.8 m/s、風向きが西風で離陸には不向きな条件であったが、風が弱まる間を見計らって14時10分に離陸を実行した。機体がカタバルトから東南方向へ射出された後、ウェイポイント0に向けて飛行して目標高度まで問題なく到達した。その後のウェイポイント1での旋回飛行で基地局及び目視で異常がないことを確認したため、そのままミッションフライトに移行した。</p>					
ミッション					
<p>14時15分頃にRTF敷地外の農地上空を半径250 mの円を左旋回で飛行し、ウェイポイントの位置を変更せず高度200 mを維持するよう設定してミッション飛行を開始した。搭載したカメラで機体の周辺を撮影しながらオートパイロットモードで飛行し、対気速度は23 m/s～24m/sを保ち、ミッションの実行を基地局及び目視で確認した。また、パイロットランプの点灯も確認することができた。本フライトでも先日と同様に機体の座標が基地局周辺の座標に飛んでしまう事象が起きたが、機体のエラー表示が無く、機体の自動操縦機能に問題がないためフライトを継続した。先日とは別の機体を使用しているが、同様の事象が起こったため、機体の不具合ではなく、基地局のアンテナに不具合が生じていると考えられる。</p>					
着陸					
<p>気象状況が西風であり着陸には不向きな天候であったが、1.0 m/s～1.7 m/sで着陸における風の影響は弱いと考えられたため、RTF内滑走路へ北からの進入で着陸可能と判断した。着陸コマンドの送受信からエンジンカット、パラシュート及びエアバッグの展開までの流れを問題なく実行したことを確認し、15時26分にRTF内滑走路付近の地面へ着陸した。総飛行時間は1時間16分であった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はRTF内滑走路上のコンクリートであったため、機体下部やエアバッグ、両翼に傷が発生する恐れがあった。機体回収後、事務所にて破損した部分がないことを確認したため、再使用可能な状態であるとした。</p>					

*RTF: 福島ロボットテストフィールド



Fig. 9-15 フライト No.2024-10 の飛行軌跡
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸)に Penguin C のフライト軌跡を追記して掲載)

Table 9-15 10回のフライト試験で修理交換した部品一覧

対応	部品名	
補修	エンジン(燃料ホース)	EFI-1
補修	エンジン(ダクトテープ)	EFI-1
交換	左翼(ナットのみ)	WL-4
補修	エアバック	A-4
交換	エンジンボルト	PNC-0094

9.2.3.夜間フライトに必要なとなる機能及び運用体制の確認評価結果

無人航空機で夜間フライトを実施するにあたっては、まず関連法規に準じて事前に関係各所への申請を行い、飛行許可を得る必要がある。以下に、該当する航空法の条文を示す。

航空法	
<p>第九章 無人航空機 (飛行の方法) 第一百三十二条の八十六 無人航空機を飛行させる者は、次に掲げる方法によりこれを飛行させなければならない。 (略) 2 無人航空機を飛行させる者は、技能証明を受けた者が機体認証を受けた無人航空機を飛行させる場合(立入管理措置を講ずることなく無人航空機を飛行させるときは、一等無人航空機操縦士の技能証明を受けた者が第一種機体認証を受けた無人航空機を飛行させる場合に限る。)を除き、次に掲げる方法により、これを飛行させなければならない。 一 日出から日没までの間において飛行させること。 (略) 5 前三項の規定は、次の各号のいずれかに該当する場合には、適用しない。 (略) 二 前号に掲げるもののほか、国土交通省令で定めるところにより、あらかじめ、第二項各号に掲げる方法のいずれかによらずに無人航空機を飛行させることが航空機の航行の安全並びに地上及び水上の人及び物件の安全を損なうおそれがないことについて国土交通大臣の承認を受けて、その承認を受けたところにしたが、これを飛行させる場合</p>	<p>(以下、略)</p>

上記の通り、夜間(日出から日没以外の時間を指す)に飛行する場合には国土交通大臣の承認を得る必要がある。夜間フライトの申請は、同省が運営するオンラインサービス『DIPS』を通して行うことができる。飛行許可を得るためには、同省が作成している「航空局標準マニュアル」に則った機体性能を保持し、またマニュアルに則った運用体制が必要となる。同マニュアルが示す夜間飛行実施にあたり必要となる体制は以下の通りである。

無人航空機飛行マニュアル

(空港等周辺・150m以上・DID・夜間・目視外・30m・催し・危険物・物件投下)

場所を特定した申請について適用 国土交通省航空局標準マニュアル①

令和4年12月5日版

3-7 夜間飛行を行う際の体制

- (1) 夜間飛行においては、目視外飛行は実施せず、機体の向きを視認できる灯火が装備された機体を使用し、機体の灯火が容易に認識できる範囲内での飛行に限定する。
- (2) 飛行高度と同じ距離の半径の範囲内に第三者が存在しない状況でのみ飛行を実施する。
- (3) 操縦者は、夜間飛行の訓練を修了した者に限る。
- (4) 補助者についても、飛行させている無人航空機の特徴を十分理解させておくこと。3-1(5)に示す第三者の立入管理措置を行う場合には、補助者の配置に代えることができる。
夜間の離発着場所において車のヘッドライトや撮影用照明機材等で機体離発着場所に十分な照明を確保する。

夜間飛行を行う場合、航空局標準マニュアルにしたがい、機体の向きを視認できる灯火の装備が求められる。本マニュアルでは、灯火以外の特別な追加装備は規定されていないが、本研究の飛行試験においては、LEDライトが離陸時に脱落する事象が数回確認された。このため、実運用を想定すると、灯火の取り付け強度や固定方法の改善など、脱落防止対策を講じる必要がある。

夜間フライト想定試験では、灯火機能としてLEDライトを機体の両翼裏面に装着し、フライト時における地上からのライト視認性確認を行った。LEDライトは一般の航空機と同様に、左翼に赤いライト、右翼に緑のライトを配置した。Fig. 9-16はLEDの装着状況を示す参考写真である。試験の結果、写真ではLEDの光点は視認しにくいものの、日中の対地高度200mの飛行においても地上からLEDの発光と機体の向きを視認できた。このため、LEDライトを両翼裏面に装着することで、夜間飛行に必要な視認性を確保できると判断した。また、夜間でも周囲の状況を確認できる暗視カメラ(Epsilon140: Edge Autonomy社製)を機体に搭載したフライト試験を実施した。Fig. 9-17は暗視カメラで日中に撮影した赤外線(IR)画像である。夜間フライト時は、暗視カメラを搭載することで、フライトの安全性をさらに向上させることができると考えられる。

運用体制については、操縦者の夜間飛行に対する技能向上、また夜間における周囲監視の方法や、機体特性の再確認が必要である。2025年(令和7年)3月時点において、日本でのPenguin Cによる夜間フライトの実績はなく、「航空局標準マニュアル」に則った夜間フライトの運用体制は整えられていない。今後、国内外のテストフィールド等において、夜間フライトの経験を積むことで、運用体制の基盤構築が可能である。

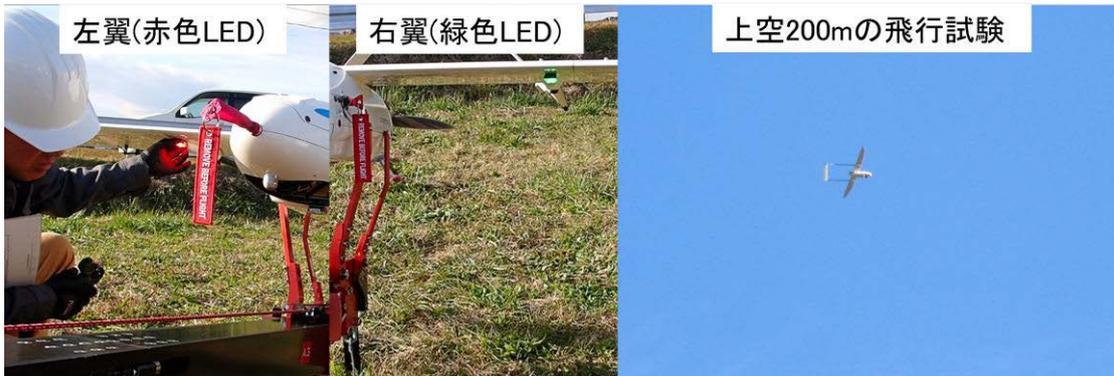


Fig. 9-16 LED ライトを装着した状態の試験の様子



Fig. 9-17 日中に撮影したフライト時の赤外線カメラ画像

9.2.4.放射線測定システムの運用試験

無人航空機で放射線測定を実施するにあたって、機体に搭載する放射線測定システムが必要となる。本項では、過年度に原子力機構で製作した無人航空機搭載用放射線測定試作システム²⁸⁾を Penguin C に搭載し、機体のデータ通信を用いたシステムの運用試験を行った結果を示す。

まず、本試験で使用した Penguin C 搭載用放射線測定試作システム(以下、測定システム)の概要を Fig. 9-18 に示す。測定システムはシステム A、システム B 及びシステム C の 3 つで構成される。

システム A は Penguin C 機体本体に搭載される。システム A の外観を Fig. 9-19 に示す。システム A には放射線検出器モジュール(クリアパルス株式会社製)、運行用カメラ(株式会社東邦技研製 IPC312SB-ADF28K-IO)、GNSS センサー(u-blox 社製 UBX-M8030-KT)、気圧温湿度計(OMRON 社製 2JCIE-BU)が搭載されており、それらのデータは、データログ

ーPC によって USB メモリに保存されると同時に、機体通信を用いて地上基地局にあるシステム B に送信される。なお、システム A はシステム B からの信号を受信して遠隔操作が可能となっている。データは全て、GNSS から得られた時刻情報で関連付けされており、1 秒ごとに日時、緯度、経度、高度、気圧、温湿度、β 線及び γ 線計数率 (環境用検出器の場合は γ 線計数率のみ)、γ 線スペクトルの情報が得られる。検出器は、緊急時用と環境用の 2 種類あり、それぞれ緊急時における高線量場での迅速な線量率把握と、平常時レベルの空間線量率分布の取得を担っている。

緊急時用放射線検出器には HR-GAGG (High Energy Resolution $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}(Ce)$) とプラスチックシンチレータを使用した。HR-GAGG は、高い発光量と良好なエネルギー分解能、機械的強度及び耐環境性に優れたシンチレータであり、無人航空機搭載用途で扱いやすいという特徴を持つ。また、プラスチックシンチレータは β 線に対して高感度であるため、機体表面に付着した放射性物質による自己汚染の有無を β 線カウントの変化として把握することができる。緊急時用放射線検出器は、上部に HR-GAGG (10 mm × 10 mm × 10 mm) とプラスチックシンチレータ (25 mm × 25 mm × 0.3 mm)、下部に HR-GAGG (10 mm × 10 mm × 10 mm) を配置した構造としており、β 線はプラスチックシンチレータで、γ 線は HR-GAGG で検出する二層型検出システムとなっている。この構成により、原子力災害時の緊急時モニタリングで課題となる機体表面の汚染 (自己汚染) と空間線量率の同時評価が可能となる。

環境用放射線検出器には 4 つの HR-GAGG (10 mm × 10 mm × 10 mm) が使用されている。本検出器は緊急時用と同じ HR-GAGG シンチレータを用いているが、低線量率環境でも十分な計数統計を確保できるよう、同一素子を 4 個用いて検出面積と計数率を増加させている点が特徴である。これにより、バックグラウンドレベルの空間線量率分布を高精度に取得することが可能となる。

システム B は地上基地局に設置され、システム A の動作状況の確認、カメラ映像の確認、電源 ON/OFF などの遠隔操作、データの受信及び保存ができる。システム B の外観及び画面例を Fig. 9-20 に示す。システム B は、外部にデータを送信する機能を保持しており、データ受信側の PC が内部に http サーバを備え http 通信にて放射線測定データを受け入れることを前提として、http リクエストでデータ出力を行うことができる。http リクエストメソッドは POST を用いており、メッセージボディに JSON で放射線測定データを収納する。

システム C は外部に設置される Web サーバであり、システム B から送られてくるデータの保存、閲覧、解析等を行うことができる。システム C の画面例を Fig. 9-21 に示す。システム C は ArcGIS Pro (Environmental Systems Research Institute, Inc.) ライセンスを用いて、ボタン一つでクリギング法によるデータ内挿計算ができ、簡易的ではあるものの測定中に地表面から 1 m の高さの空間線量率への換算及びマッピングを行うことができる。当試験ではノート PC に Web サーバを構築し、システム B と LAN ケーブルで直接接続することで、データ受信を行ったが、インターネット通信環境を整えることで、現場だけでなく遠方に

においても、システム C を用いて測定データを確認できる仕様となっている。

これらの測定システムを Penguin C のフライト試験で運用した結果、システム A～C が相互に連携し、データ取得、伝送、解析までの一連の処理が一体的に実施可能であることを確認した。これにより、測定データの迅速な収集、機体状態や放射線データのリアルタイム監視、並びに機体の遠隔操作が可能となり、運用の効率化と確実性の向上につながった。また、地上要員が常に機体にアクセスする必要がなくなることで、現場作業に伴う被ばくリスクを低減し、全体として安全性が向上したと評価される。なお本試験では、システム A-B 間は機体の無線通信を、システム B-C 間は LTE 通信を用いてシステム運用試験を行った。過年度の航空機モニタリング事業²⁹⁾では、システム B と C が有線ケーブルで接続されていたが、本試験ではこれを LTE 通信により無線化したことにより、現場だけでなく遠隔地からも測定データを確認できる運用が可能となった。実際に緊急時モニタリングで Penguin C を長距離運用する場合には、通信手段の更なる検討が必要である。長距離通信のためには、システム A とシステム B の間に衛星通信や携帯回線を導入することで、遠隔地でも安定した通信を維持する必要がある。また、システム B 及びシステム C が外部サーバと通信する際には、インターネット接続や VPN を介したセキュアな通信手段が求められる。今後は、これらの点を踏まえて非常時でも途切れない通信と機動的な運用が可能となる体制の整備を進める必要がある。

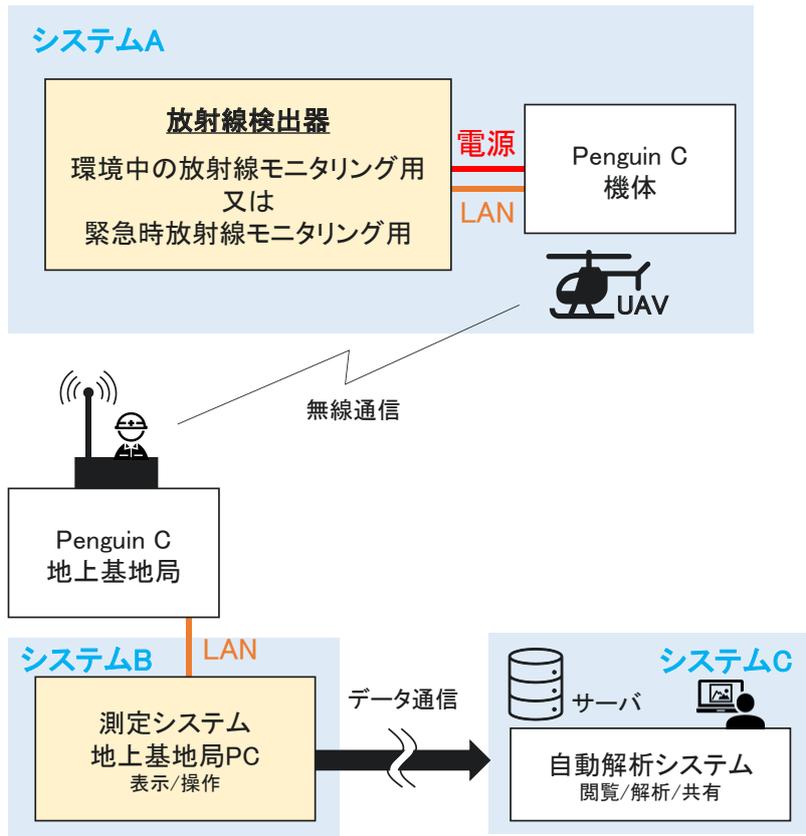


Fig. 9-18 システム運用試験でを使用した放射線測定システム

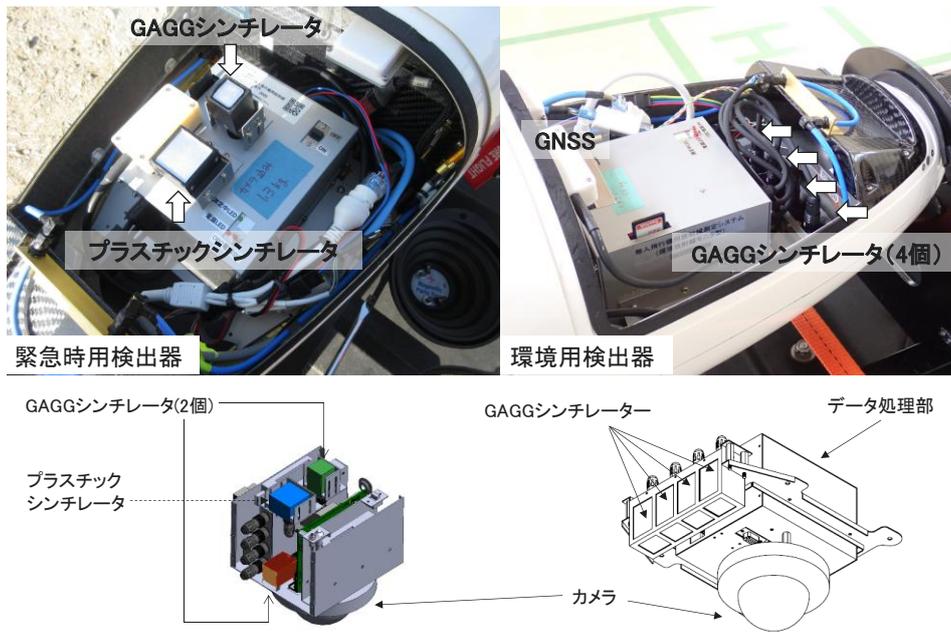


Fig. 9-19 システム A 外観図



Fig. 9-20 システム B 外観及び画面表示例

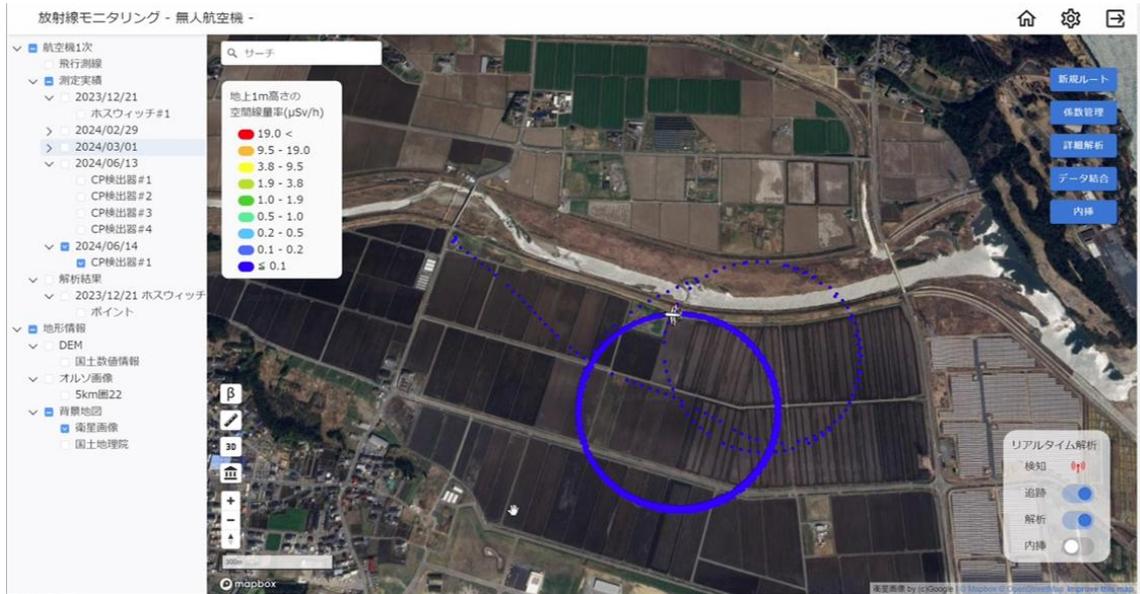


Fig. 9-21 システム C 画面例

9.2.5. キャリブレーションフライトの試験

キャリブレーションフライトは、無人航空機に搭載した放射線検出器で得られる上空の γ 線計数率を地表面から1mの高さの空間線量率へ換算するために必要となる、空気減弱係数 (AF) や空間線量率換算係数 (CD) といった換算パラメータを決定することを目的として実施した試験である。検出器で得られる計数率は、飛行高度や周囲の遮へい状況によって変動するため、フライト中の測定値を正確に地上の空間線量率へ換算するためには、予め高度依存性や検出効率を把握し、適切な換算係数を設定しておくことが不可欠である。本項では、これら換算パラメータの取得及び検証を目的として実施したキャリブレーションフライトの結果について述べる。

4.5.2 項で示した方法と同様に、キャリブレーションフライトで得られた対地高度と計数率の関係に対して Microsoft Excel[®]により指数近似を行った。環境用検出器は、4つのGAGGシンチレーション検出器の積算計数率を、緊急時用検出器は下方のGAGGシンチレーション検出器の計数率のみを解析に用いた。なお、計3回(フライトNo.2024-01, 2024-02及び2024-08)のキャリブレーションフライトでは対地高度は約180m、200m、220m、240m、260m、280m及び300mとした。フライト前に離陸地点で測定した計数率を対地高度1mのデータとし、併せて指数近似を行った。指数近似結果を Fig. 9-22 に示す。緊急時用検出器は環境用検出器に比べて、解析に用いている結晶の数が少ないことから、各高度の計数率は小さくなり、Fig. 9-22 の空気減弱係数 AF (m^{-1}) は、異なる値を示した。また、緊急時用検出器は計6時間フライトの方が、計1時間フライトよりも各高度の計数率の標準

偏差が小さくなることで、近似式の決定係数の値がより 1 に近くなった。また、キャリブレーションで得られた *AF* 及び *CD* の妥当性(上空での測定値を地上値に換算する際の精度)を検証するため、Fig. 9-23～Fig. 9-25 に示した歩行サーベイによる地表面から 1 m の高さの空間線量率と比較した。歩行サーベイは、測定者がバックパック型の放射線検出器を背負って歩行して面的な空間線量率分布を取得する手法であり、本試験では株式会社日本遮蔽技研製「ホットスポットファインダー」を使用した。同装置には CsI(Tl)結晶 (38 mm × 38 mm × 25 mm) が搭載されており、1 秒間隔で空間線量率を取得できる。測定に際しては、バックパック内の検出部が地表面から概ね 1 m となるように装着位置を調整した。これらの測定は 2024 年(令和 6 年)6 月 14 日、9 月 11 日及び同年 12 月 3 日に実施した。

環境用検出器は、広い範囲の地上測定を行った 2024 年 12 月 3 日に測定日時が近い 12 月 2 日のフライトデータ(フライト No.2024-09)を *CD* の評価に用いた。緊急時用検出器は計 2 回キャリブレーションフライトを行ったが、6 時間フライトを行った 2024 年 9 月 11 日のフライト No.2024-08 を *AF* の解析に用いた。*CD* の評価には、地上測定を行った 2024 年 6 月 14 日及び 9 月 11 日と同日のフライトデータ(フライト No.2024-02 及び No.2024-08)を用いた。地上測定したデータの位置情報を基に作成した 50 m メッシュ平均値と、上空からの測定で得られた計数率のメッシュ平均値を比較することで各 *CD* を評価した。キャリブレーションフライト及び歩行サーベイの結果から算出した空間線量率換算係数 *CD* 及び空気減弱係数 *AF* の一覧を Table 9-16 に示す。4.5.2 項で示した解析方法及び Table 9-16 の換算パラメータを、フライト試験で取得した γ 線計数率に適用し、地表面から 1 m の高さの空間線量率マップを作成した結果を Fig. 9-26～Fig. 9-33 に示す。これらは、季節や地表の状況の違いが換算結果にどの程度影響するかを把握するため、6 月、7 月、9 月及び 12 月に実施した測定結果である。これら変化を定量的に比較するため、歩行サーベイの測定点を基準として 50 m メッシュを作成し、各測定時期に得られた空間線量率のメッシュ平均同士を比較した。過年度の航空機モニタリング事業²⁹⁾で行ったホスウィッチ検出器を用いた試験でも同様の 50 m メッシュを用いて比較しているため、本報告でも同一条件を採用した。また、メッシュ内の空間線量率の不均一性の影響を抑制するため、データ数が 2 点以上含まれるメッシュのみを解析対象とした。

Fig. 9-34 に歩行サーベイ、環境用検出器及び緊急時用検出器のそれぞれについて、各測定時期の空間線量率の分布を比較するための箱ひげ図を示す。歩行サーベイでは 6 月、9 月及び 12 月の 3 時期で線量率に大きな差は見られなかったが、12 月はわずかに高い傾向が見られた。これは、測定地点の大半が田んぼ周辺であり、6 月及び 9 月には水が張られていたのに対し、12 月には水がなく、地表面からの γ 線の遮へい状況が異なったためであると考えられる。環境用及び緊急時用検出器では、6 月に比べて 7 月の方が空間線量率が低い傾向にあった。これは田んぼの水深が 7 月の方が深く、地表面からの放射線の遮へいがより強く働いたためと考えられる。また、緊急時用検出器では、9 月時点では田んぼに水がほとんどなく、遮へい効果が小さかったことに起因すると推察される。これらの季節

による田んぼの状況の違いが空間線量率の変動に影響を与える現象は、2023 年度 (令和 5 年度) のホスウィッチ検出器による試験結果²⁹⁾でも確認されている。

次に、上空から測定した結果と地上測定の結果との比較について述べる。地上測定の位置情報を基に 50 m メッシュを作成し、各マッピングデータ値を 50 m 四方のメッシュに平均化し、同じメッシュ同士で地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値を比較した。また、メッシュ内の空間線量率の不均一性の影響を低減するため、データ数が 2 つ以上のメッシュを選定し解析に用いた。Fig. 9-35 及び Fig. 9-36 に、環境用及び緊急時検出器を用いた地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値を比較した結果を示す。各データの地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値を比較した散布図を見ると、全体平均としては概ね 1 : 1 の関係であった。環境用検出器については、4 つの GAGG シンチレーション検出器を使用しているため、バックグラウンドレベルの空間線量率を評価することができた。OIL 判断が必要となるような線量率が比較的高いエリアでの使用を主目的とした緊急時検出器については、地上測定値が 1 : 1 の関係から逸脱するプロットが散見された。これは、緊急時検出器では機体の直下の空間線量率分布を評価するために、下方の HR-GAGG シンチレーション検出器で得た計数率のみを解析に用いているため、低線量率エリアでは十分に γ 線を計数できず、空間線量率評価の不確かさが大きかったためと考えられる。本試験のように、東電福島原子力発電所事故由来の放射性核種の地表面沈着から長時間が経過したエリアを測定する場合、緊急時検出器の下方だけでなく上方の HR-GAGG シンチレーション検出器の γ 線計数率も併せて解析することが必要になると考えられる。相対誤差のヒストグラムを見ると、どちらの検出器も平均値はおおよそ 0 を示し、標準偏差は環境用検出器で約 0.2、緊急時検出器で 0.3 であった。ばらつきはあるものの、地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値は地上測定値とよく整合した。

環境用検出器と緊急時検出器の空間線量率の適用範囲についてより詳細に検討するために、環境用及び緊急時検出器の測定結果を比較する。環境用検出器の位置情報を基に 50 m メッシュを作成し、各マッピングデータ値を 50 m 四方のメッシュに平均化し、同一メッシュ同士で地表面から 1 m の高さの空間線量率を比較した。また、メッシュ内の空間線量率の不均一性の影響を減らすために、データ数が 2 つ以上含まれるメッシュを選定し解析に用いた。同時期に実施した 2 つの検出器の測定データを比較した結果を Fig. 9-37 に示す。3 つの飛行データのうち、高度 200 m で飛行した際のデータが、環境用検出器に対する緊急時検出器の相対誤差の平均値が最も 0 に近くなった。これは、高度 250 m で飛行した場合と比べて、緊急時検出器は環境用検出器と同様に十分に γ 線を計数でき、精度よく空間線量率を評価できたことが示唆される。6 月のフライトでは、キャリブレーションのために狭い範囲を飛行したため比較データが少なく、7 月のフライトデータよりも相対誤差の標準偏差が大きくなった。7 月のフライトで高度 200 m と 250 m のデータを比較したところ、高度 250 m の方が相対誤差の平均値が 0 から乖離する傾向にあった。これは、飛行高度が高くなることで緊急時検出器では γ 線の計数が難しくなり、空間線量率評価

の不確かさが大きくなったためと考えられる。これは、Fig. 9-37に見られたように、緊急時用検出器では高さに対する計数率の変化が環境用検出器に比べて小さいことと矛盾しない。よって、比較的 low 線量率のエリアに対して緊急時検出器を適用する際には、 γ 線を十分に計数できるくらいの低高度を飛行する必要があることが分かった。

試験では機体の基本性能試験も並行しており、約 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 四方のエリアを 1 時間程度かけて測定を行った。Fig. 9-37 に示した環境用検出器と緊急時用検出器の比較結果において、河川敷の周辺で得られたデータの一部に、7 月のフライトで環境用検出器に対して、緊急時検出器で評価した地表面から 1 m の高さの空間線量率が 2 倍近く高いものが認められた。このようなデータについては、空間線量率が不均一で局所的に高い場所があったために生じたものであり、無人機に対して同一の飛行経路を予めプログラムしても免れない経路差により、このような局所的差異を補足できなかったと推察される。しかし、このような事象が認められたのは、本試験で空間線量率の評価対象とした約 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 四方のエリアに含まれる計 355 箇所の内 2 箇所のみであった。このことから、環境用検出器及び緊急時用検出器ともに、評価対象エリア内の空間線量率分布を妥当に評価できていると考えられる。実際の緊急時モニタリングでは、広範囲を網羅的に測定することを目的としているため、本試験よりも測定密度が低くなり、局所的な空間線量率分布の不均一性の評価が難しいと推察される。本試験結果を踏まえて、無人機による緊急時モニタリングを行うことを見据えて、使用する検出器に応じた適切な測線間隔、対地高度などを検証する必要がある。

また、本試験では、 $0.20\ \mu\text{Sv/h}$ を超えるエリアはほとんど含まれておらず、空間線量率がこれより高いエリアでの実測定を実施できていない。東電福島原子力発電所周辺のエリアでフライト測定試験を行い、多様な空間線量率レベルが含まれる環境で取得した測定データを基にして測定システムの精度評価を行うことで、特に緊急時用検出器の緊急時モニタリング時の地表面から 1 m の高さの空間線量率への換算精度の信頼性を高めることが期待できる。本試験を通じて環境用検出器と緊急時用検出器の有効性が検証できたことから、空間線量率のレベルに応じて、両検出器を使い分けて使用することで、原子力災害後の実効的な空間線量率評価に資すると考えられる。緊急時用検出器については、放射性プルーム由来の β 線についても評価可能な設計としている。今後、機体が放射性プルームに汚染された状況を模擬して、 β 線と γ 線を弁別したうえで地表面の空間線量率を評価するための解析方法を構築し、その実証試験に取り組む必要がある。

Table 9-16 無人航空機測定試験で得られた空気減弱係数 AF と空間線量率換算係数 CD

検出器	空気減弱係数 AF (m^{-1})	AF 評価に用いたフライトデータの日付	空間線量率換算係数 CD ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$)	CD 評価に用いたフライトデータの日付
環境用	-0.00696	2024/6/13	1,982	2024/12/2
緊急時用	-0.00424	2024/9/11	46.14	2024/6/14 2024/9/11

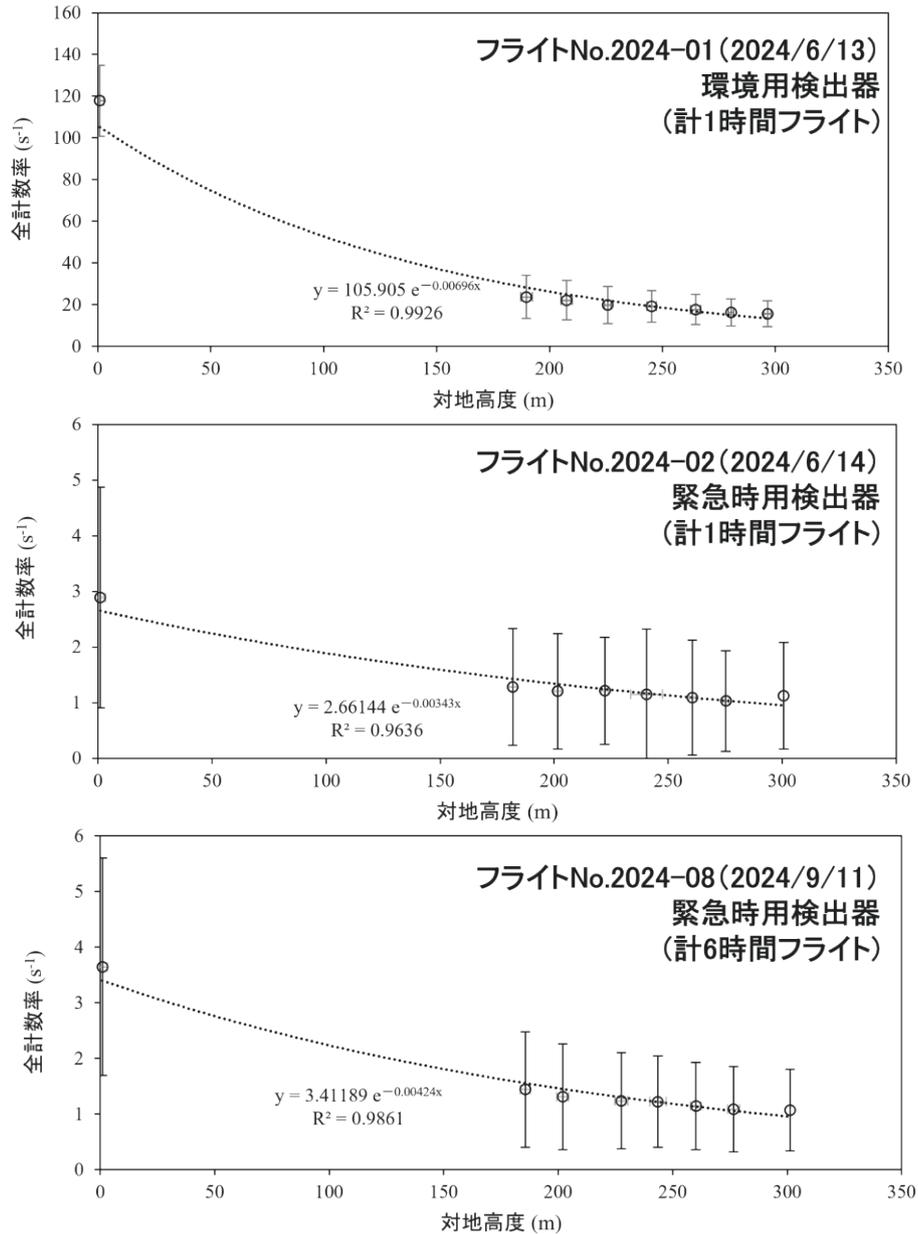


Fig. 9-22 キャリブレーションフライトで得られた対地高度と計数率の関係

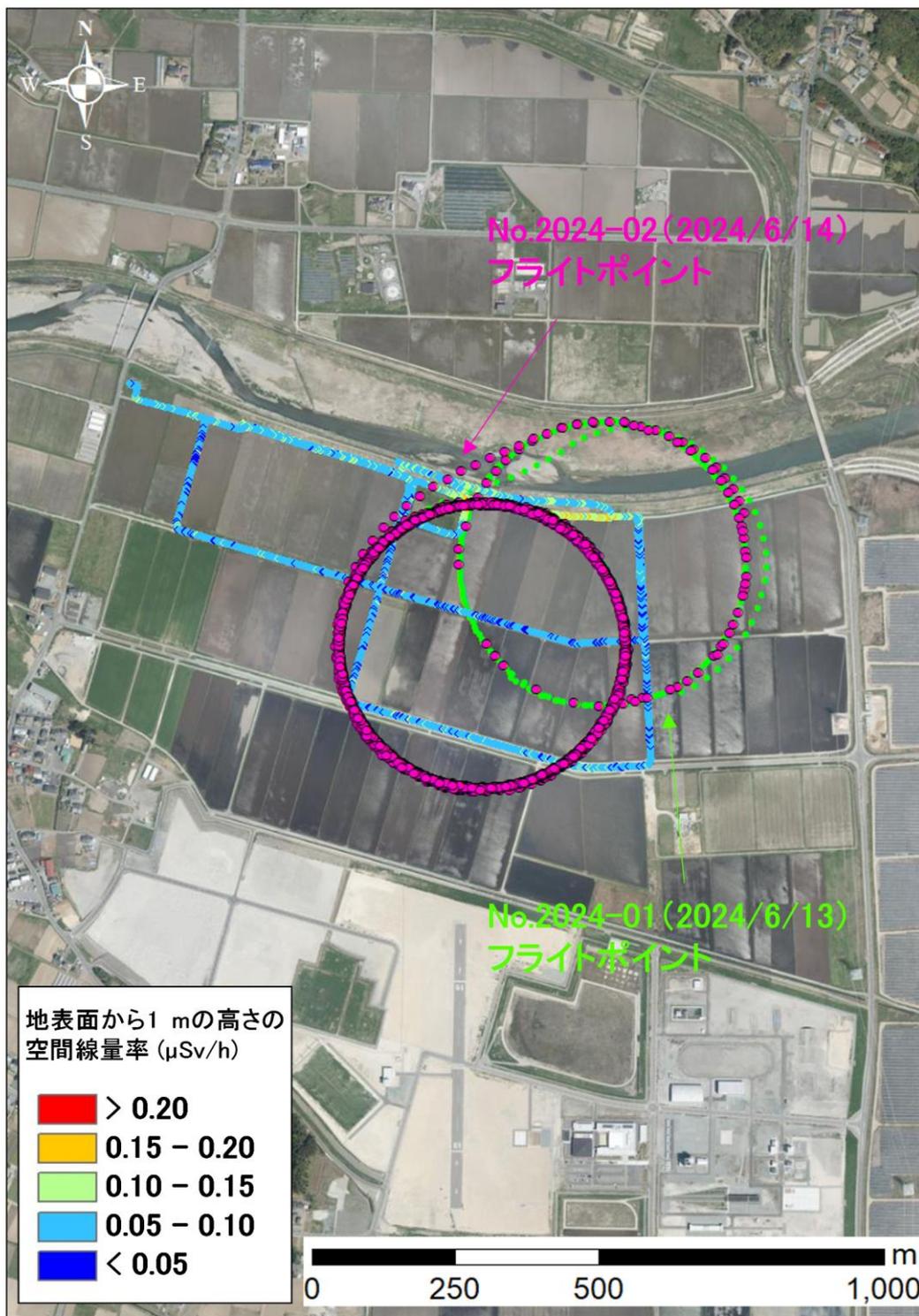


Fig. 9-23 歩行サーベイによる地上1 m 空間線量率測定結果 (2024年6月14日実施)
(天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、地理院地図 Vector[®]に Penguin C のフライト軌跡及び歩行式サーベイメータで得られた地表面から1 mの高さの空間線量率を追記して掲載)



Fig. 9-24 歩行サーベイによる地上1 m空間線量率測定結果 (2024年9月11日実施)
(天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸⁾に Penguin C のフライト軌跡及び歩行式サーベイメータで得られた地表面から1 mの高さの空間線量率を追記して掲載)

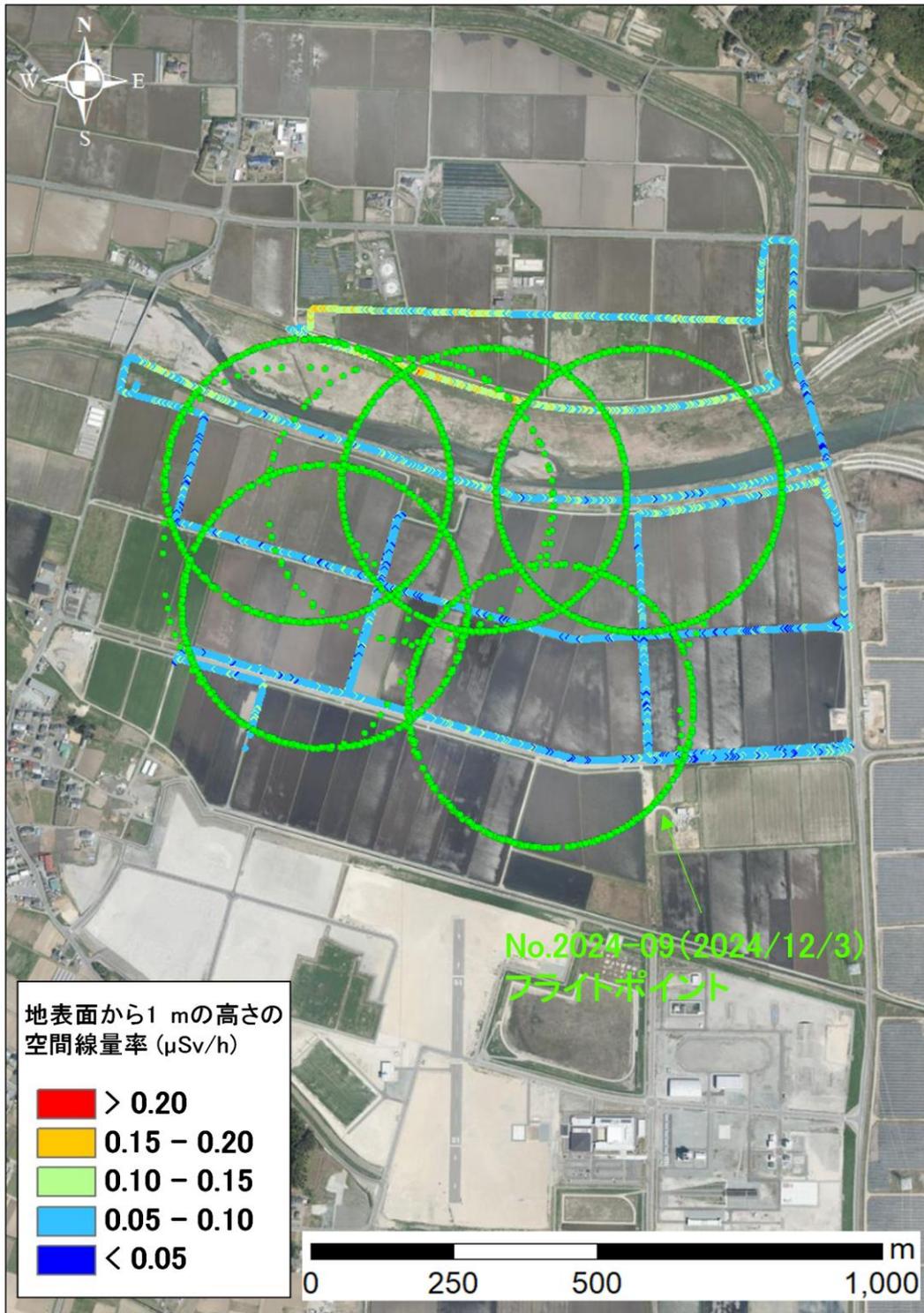


Fig. 9-25 歩行サーベイによる地上1 m空間線量率測定結果 (2024年12月3日実施)
 (天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸)に Penguin C のフライト軌跡及び歩行式サーベイメータで得られた地表面から1 mの高さの空間線量率を追記して掲載)

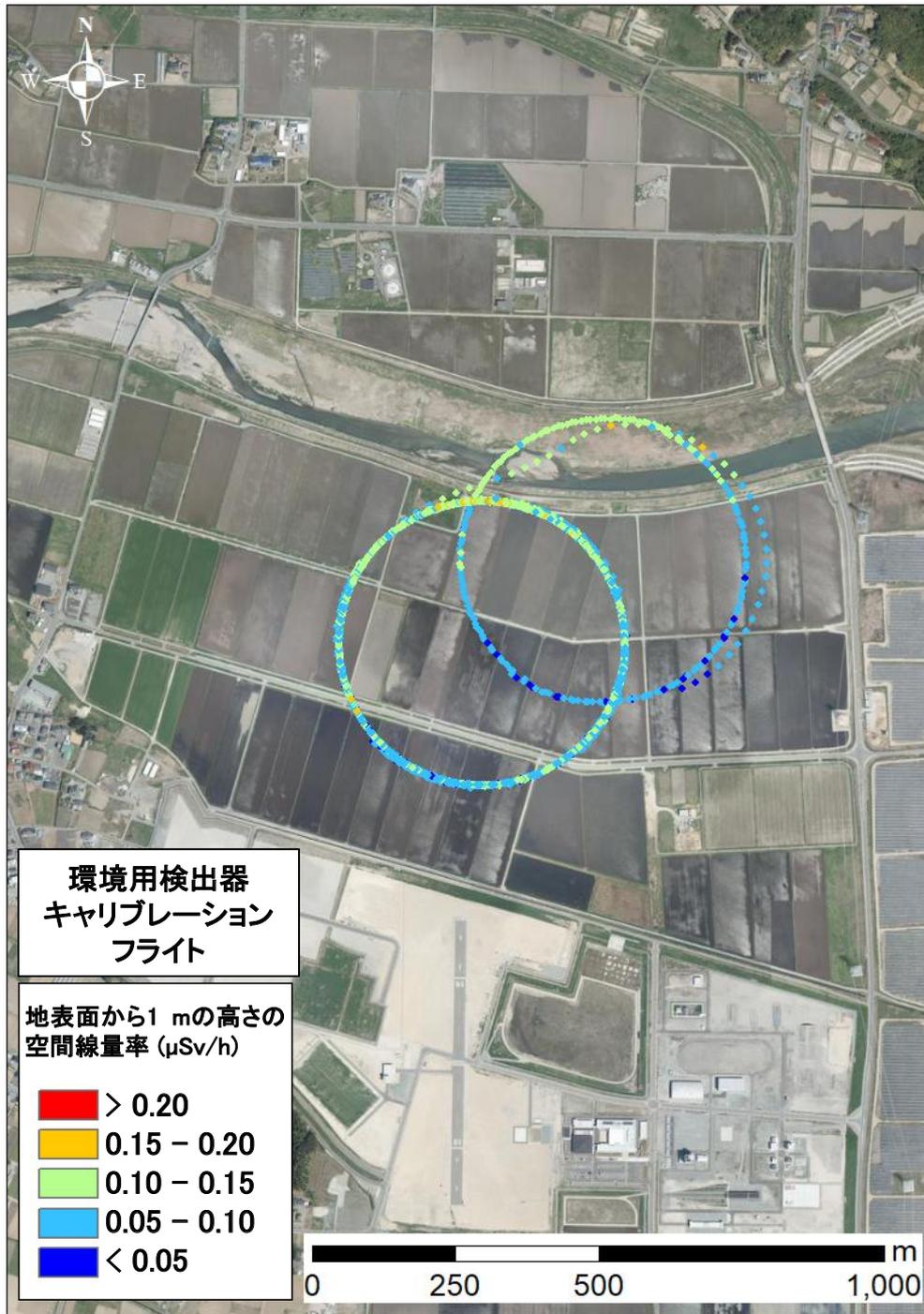


Fig. 9-26 無人航空機の実環境用検出器によるキャリブレーションフライトを基に評価した地表面から1 mの高さの空間線量率マッピング結果 (2024年6月13日測定)

(天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸。)

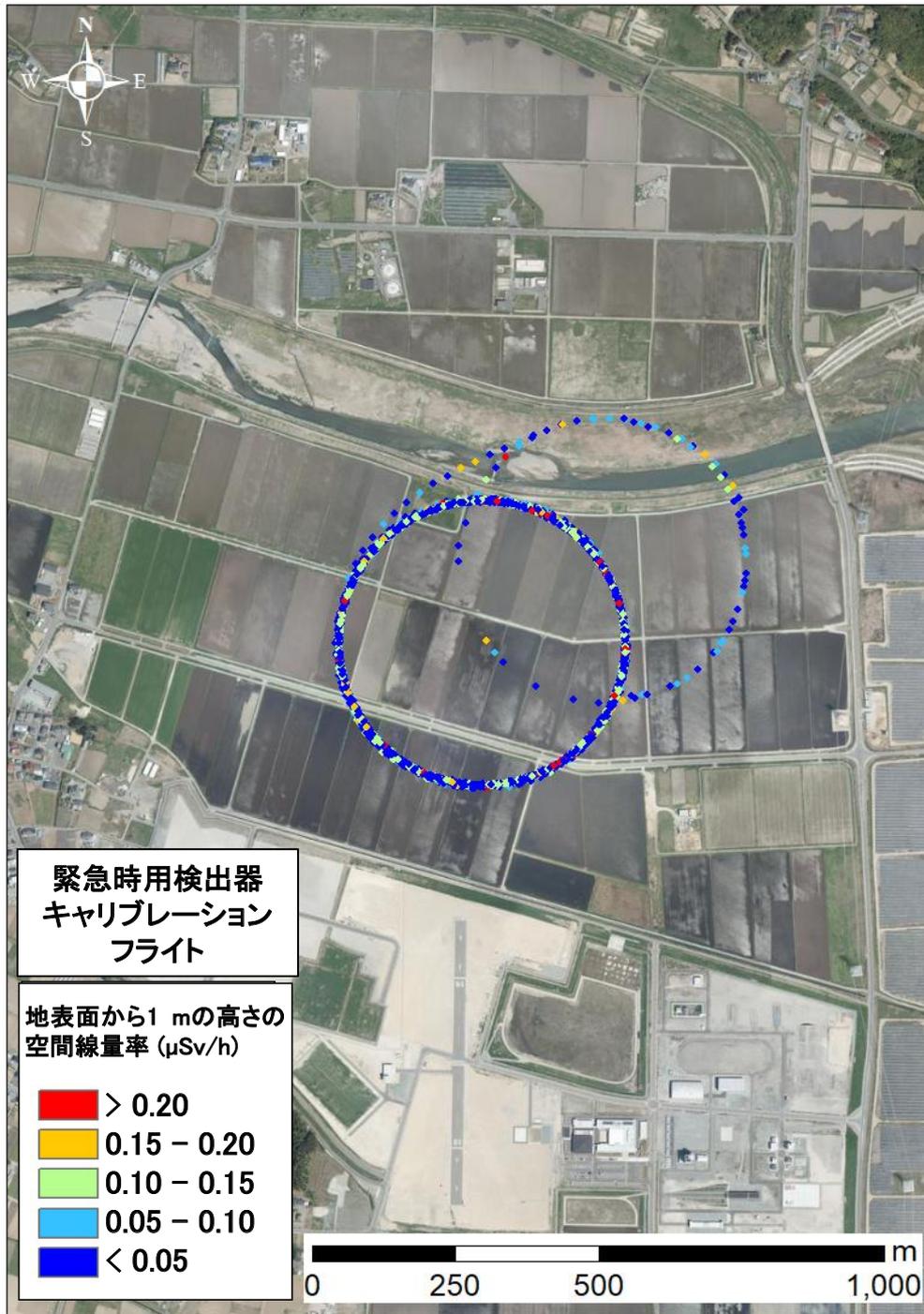


Fig. 9-27 無人航空機の緊急時用検出器によるキャリブレーションフライトを基に評価した地表面から1 mの高さの空間線量率マッピング結果 (2024年6月14日測定)

(天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸。)

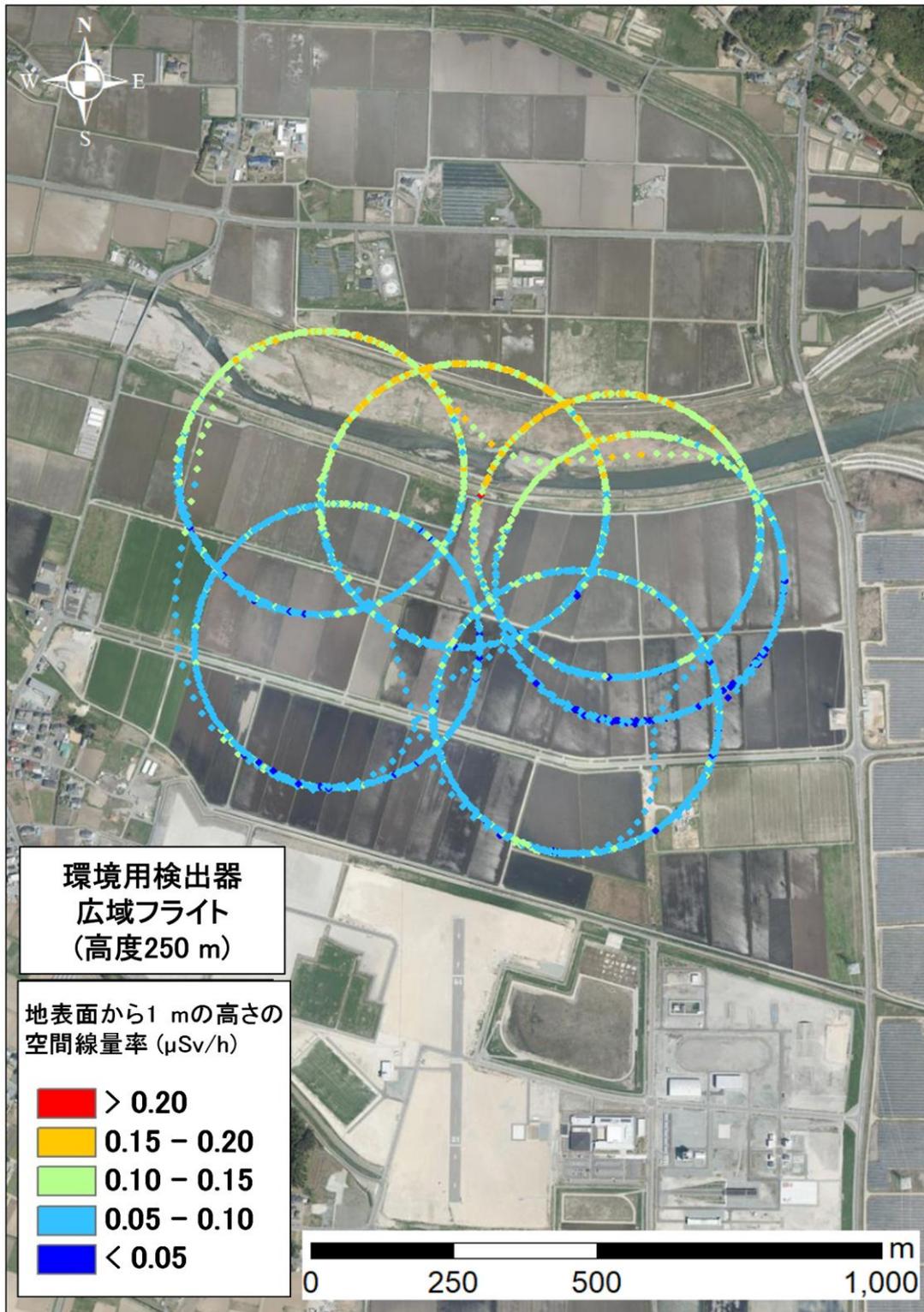


Fig. 9-28 無人航空機の環境用検出器による広域フライト (高度 250 m) を基に評価した地表面から 1 m の高さの空間線量率マッピング結果 (2024 年 7 月 9 日測定)

(天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸。)

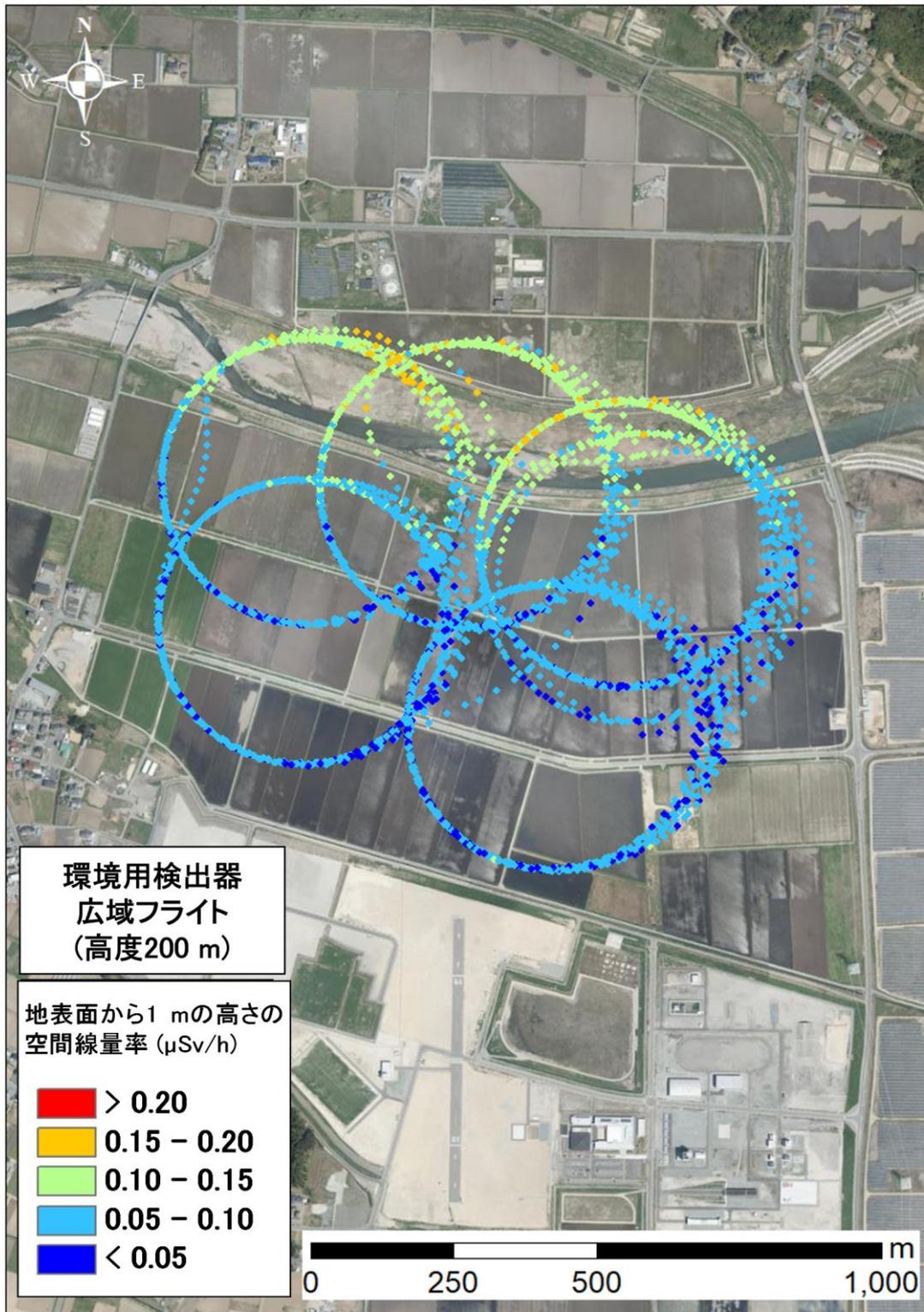


Fig. 9-29 無人航空機の環境用検出器による広域フライト (高度 200 m) を基に評価した地表面から 1 m の高さの空間線量率マッピング結果 (2024 年 7 月 10 日測定)

(天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸。)



Fig. 9-30 無人航空機の緊急時用検出器による広域フライト (高度 200 m) を基に評価した地表面から 1 m の高さの測定による空間線量率マッピング結果 (2024 年 7 月 11 日測定)
(天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸。)



Fig. 9-31 無人航空機の緊急時用検出器による広域フライト (高度 250 m) を基に評価した地表面から 1 m の高さの測定による空間線量率マッピング結果 (2024 年 7 月 12 日測定)
(天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸。)



Fig. 9-32 無人航空機の緊急時用検出器によるキャリブレーションフライトを基に評価した地表面から1 mの高さの測定による空間線量率マッピング結果 (2024年9月11日測定) (天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸。)



Fig. 9-33 無人航空機の環境用検出器による広域フライト (高度 200m) を基に評価した地表面から 1 m の高さの空間線量率マッピング結果 (2024 年 12 月 2 日測定)

(天然放射性核種による寄与を含む。背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁸。)

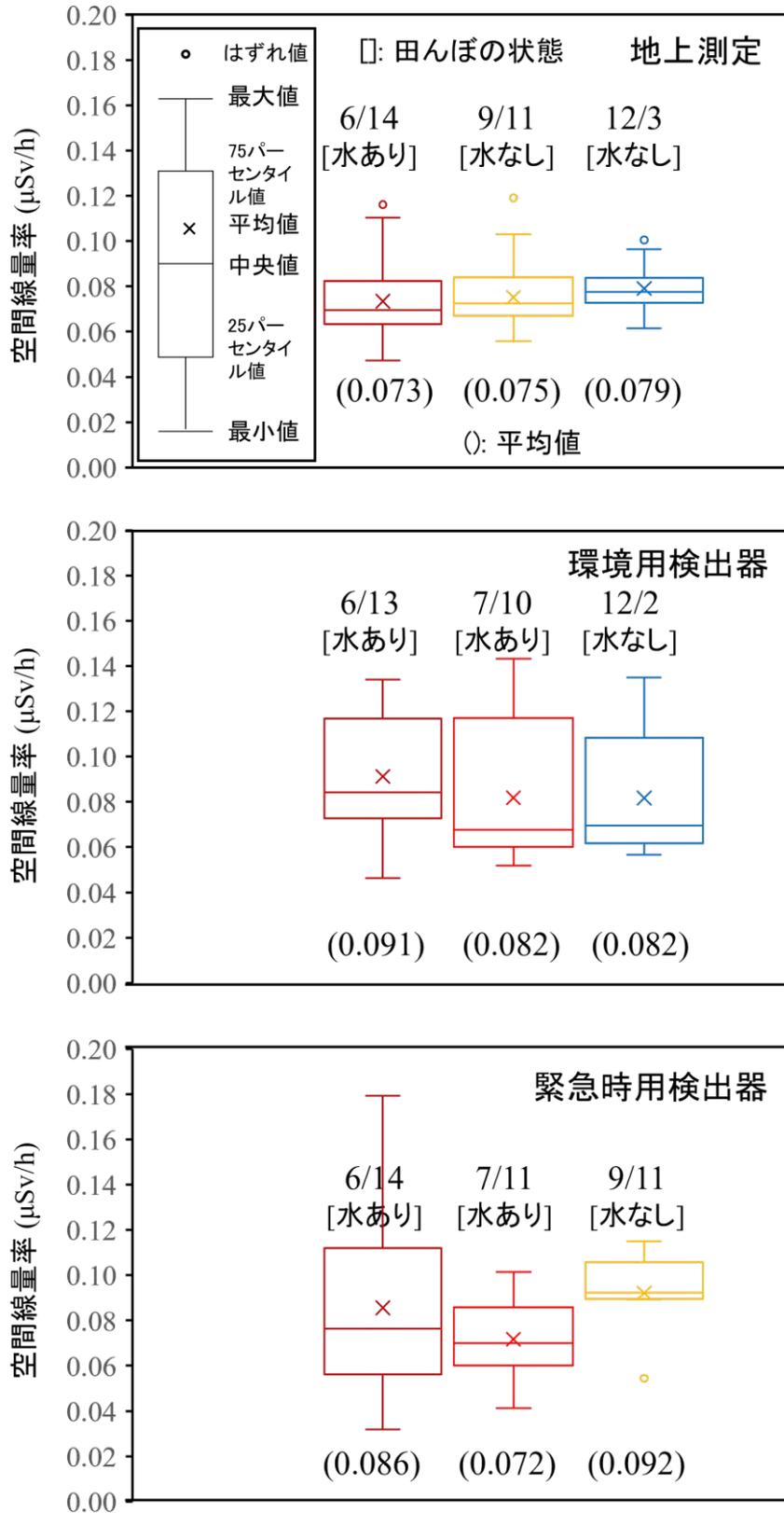


Fig. 9-34 空間線量率の箱ひげ図

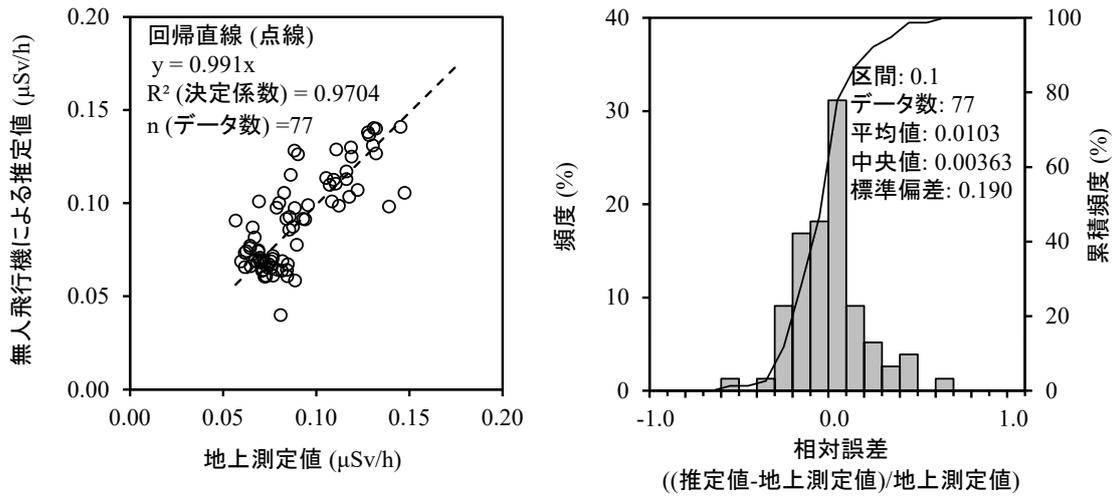


Fig. 9-35 地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値の比較結果 (環境用検出器)

(左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

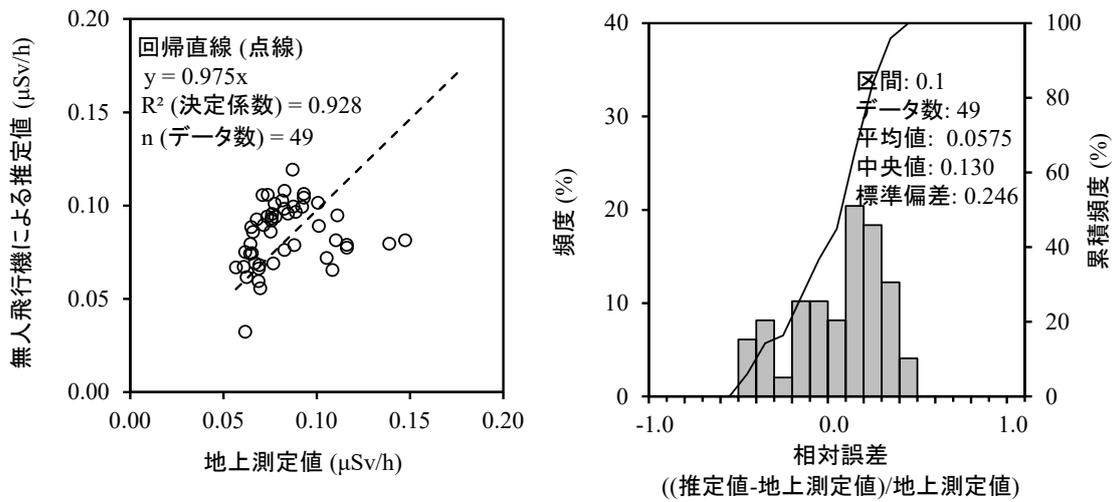


Fig. 9-36 地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値の比較結果 (緊急時用検出器)

(左：散布図、下段右：相対誤差のヒストグラム)

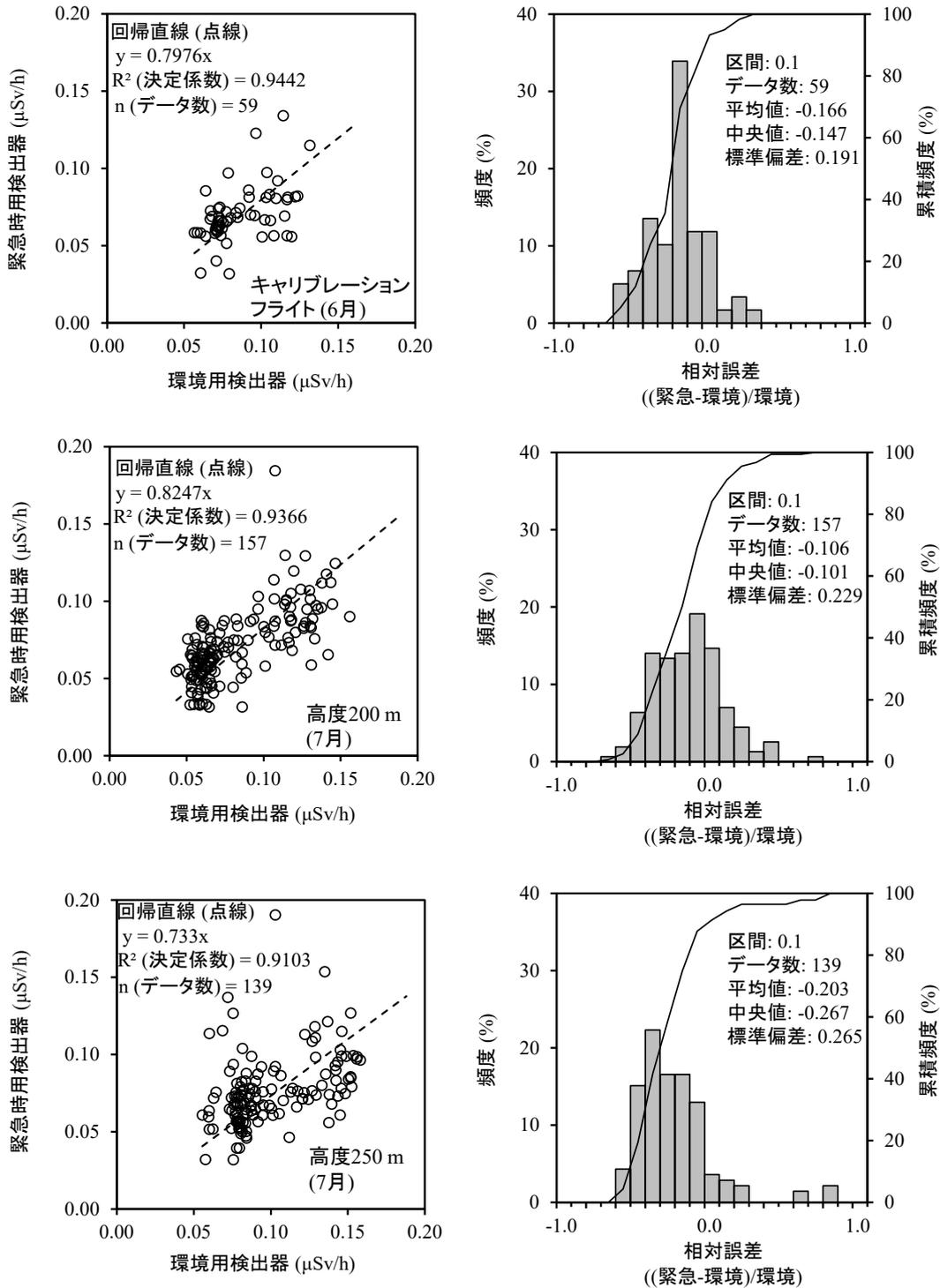


Fig. 9-37 地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値同士の比較結果

(左 : 散布図、右 : 相対誤差のヒストグラム、上段: 6 月のキャリブレーションフライトデータ、中段: 7 月の広域フライトデータ (高度 200 m)、下段: 7 月の広域フライトデータ (高度 250 m))

9.3. 機体の性能条件の評価結果

各種試験の結果と Penguin C の性能を踏まえ、原子力災害時における緊急時モニタリングを実施するために必要となる項目について、同機が対応可能であるか評価した結果を以下に示す。(1)～(7)については9.1.1項に示した項目と同一で、Penguin C 機体が有する性能について評価したものであり、(8)～(13)については Penguin C を原子力災害時における緊急時モニタリングのツールとして運用するにあたり具備すべき条件を独自に追加し、評価したものである。

(1) 長時間 (20 時間以上) のフライトが可能であること。

搭載機器を軽量化することで、連続 20 時間以上のフライトは可能である。実際に Edge Autonomy 社のテストにおいて、連続 20 時間以上のフライトを実施した実績がある。Penguin C はメーカーオリジナルの EFI エンジン (Electronic Fuel injection: 電子制御燃料噴射) を搭載しており、同エンジンは氷点下から高温まで対応する冷却装置を備え、高いエンジン効率を実現する性能を持つ。

2023 年度 (令和 5 年度) の試験結果²⁹⁾から、燃料消費率に影響を与える要因として、フライトプラン (飛行経路) 及び気温が関係していることが示唆された。2023 年度 (令和 5 年度) は 4 点のウェイポイントを巡回するフライトプランを用い、2024 年度 (令和 6 年度) は 1 点のウェイポイントを旋回し続けるプランを用いたが、試験結果のみを見ると、巡回型プランの方が燃料消費率が低い傾向が確認された。また、2023 年度 (令和 5 年度) の試験時の気温は 26℃、2024 年度 (令和 6 年度) は 32℃であり、気温が高い条件で燃料消費率が低くなる傾向も見られた。ただしこれらの比較はフライトプラン、気温以外の条件 (飛行高度、対気速度、機体重量、個体差等) も同時に異なっているため、特定の要因が燃料消費率にどの程度寄与したかを断定できるものではない。今後、条件を統一した試験を継続し、それぞれの要因の寄与度を定量的に評価することで、20 時間以上のフライトが確実に可能となる条件の明確化を進める必要がある。

(2) 放射線検出器を搭載するため 5 kg 程度のペイロードが確保されること。

Penguin C の最大離陸重量は 23 kg である。これに対し、空虚重量は計測時に使用した治具 0.36 kg とバランスをとるための重り 0.30 kg を引いた 15.64 kg である (Fig. 9-38)。よって搭載可能な重量は、燃料と搭載機器合わせて、7.46 kg である。燃料搭載量を 2 kg とすれば、5 kg 程度のペイロード搭載が可能である。本フライト試験において搭載したカメラや放射線検出器は 1 kg 程度であり、最大離陸重量に対して 4 kg 程度の余裕がある。



Fig. 9-38 Penguin C の空虚重量

(左図：空虚重量測定時の全体図、右図：空虚重量の計測結果 (治具及び重りを含む))

- (3) 離陸のための滑走路を要しないこと。

Penguin C の機体は車輪を有さず、離陸には可搬型空気圧式カタパルトを使用するため、滑走路は必要としない。ただし、アンカーペグによりカタパルトを地面に固定できる場所が必要となる。また、カタパルトからの離陸方向に障害物がないこと、Fig. 9-39 に示した緑の方向からの風向きである必要がある。なお風速 0 m/s (無風) の場合は、離陸方向にある障害物との距離を 200 m 以上確保することができれば、方向に制限はない。

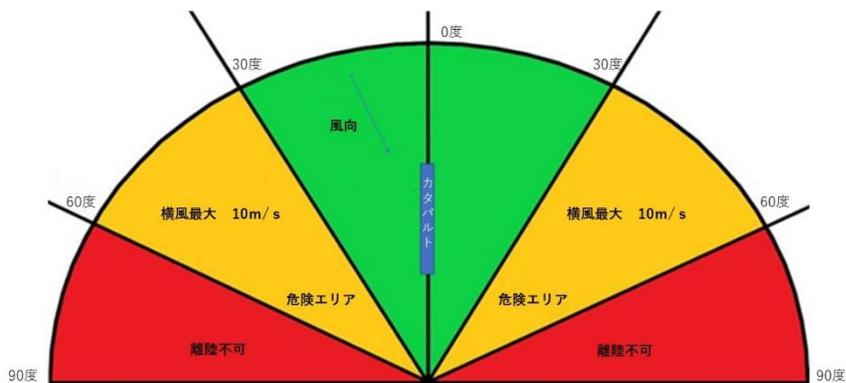


Fig. 9-39 カタパルトに対する打ち上げ時の風向

- (4) 予め設定したプログラムにより飛行可能であること。

Penguin C を制御するフライトコントロールシステム (Piccolo Command Center、以下 PCC) を使用し、フライトプラン作成することで、予め設定したフライトルート of プログラム飛行が可能である。

ただし飛行高度に対して対地高度が最低高度を下回らないことと、最高高度を超えないことを事前に確認する必要がある。2024 年度 (令和 6 年度) のフライト試験結果よ

り、機体は飛行中に目標高度から最大 20 m 程度上下することが分かった。よって、最低及び最高高度から 10 m 以上余裕を持たせて飛行経路や高度を設定する必要がある。

- (5) 同機種によるフライトの実績が 100 時間以上を超え、墜落事故に対する MTBF が評価されていること。

メーカー公表値で Penguin C のテストフライト実績は 13,000 時間を超え、様々な環境下におけるフライト試験を通じて、機体の耐久性及び堅牢性が実証されている。実際に、2024 年度 (令和 6 年度) 及び運用事業者 (株式会社 JDRONE) が持つ過去の実績含め、延べ約 88 時間のフライト試験を行っているが墜落事故及び墜落事故に至るような機器異常は確認されていない。また、MTBF については、メーカー内にて一定の基準を設け、各事象に対する評価が行われている。実際の数値については公表されていないが、事故分類基準については Table 9-2 に示した通りである。

- (6) 風速 10 m/s 以下でのフライトが可能であること。

フライト中、風速 10 m/s 以下であれば、フライトが可能である。Penguin C オペレーションに係る風速制限は下記の通り設定されている。

- ・フライト中：最大 20 m/s
- ・カタパルト発射時の向かい風：最大 10 m/s
- ・パラシュートリリース時の地上突風：最大 8 m/s

- (7) 雨天時のフライトが可能であること。

機体性能として 5 mm/h 程度の雨量までフライト可能である。雨や霧等湿度の高い環境における機体の耐久性を高めるため、2023 年度 (令和 5 年度) から静圧ポートを覆うプロテクターを導入した。2024 年度 (令和 6 年度) 雨天時においても問題なくフライトが出来た (No. 2024-05、2024-06、2024-08)。なお、離着陸後に再度モニタリングに向かう際には、濡れたエアバックやパラシュートを乾かすためにドライヤーなどが必要となる。

- (8) 事故発生から 1 時間以内に離陸が可能であること。

Penguin C は地上局及びトラッキングアンテナを含め機器一式の組立から離陸まで短時間で完了できるよう設計されている。大型の機器であるトラッキングアンテナ及びカタパルトの一部が予め組立済みであれば、準備開始から概ね 1 時間程度で離陸準備が可能である。

- (9) リアルタイムに画像や機体の位置やステータス情報を地上に送信可能であること。

フライト中、機体と地上局は常時相互通信可能な状態にある。地上局では、PCCを通して機体位置情報を、CoPilotを通してエンジン等のステータス情報をリアルタイムで確認することができる。フライト No. 2024-07、2024-10 でペイロードとしてカメラを搭載している場合には、上空でカメラが撮影している映像も同時に地上局にて受信及び確認が可能であった。フライト No. 2024-03、2024-09、2024-10 では、フライト中に GPS 測位座標が離陸地点付近に記録される事象が複数回発生した。本事象の発生原因には以下が考えられる。

- ・機体の姿勢によりアンテナが機体に隠れてしまい、機体と地上局間のデータ通信に影響を及ぼした。
- ・大地反射波と干渉し GPS 受信機が衛星から受け取る信号または機体と地上局間で送受信する信号が弱くなった。
- ・気象条件により GPS 受信機が衛星から受け取る信号または機体と地上局間で送受信する信号が弱くなった。

基地局アンテナを高所に設置することにより利得を上げることで通信強度を保てる可能性がある。また、今後も様々な場所や気象状況下で飛行試験を実施し、詳細な飛行データを収集することで、特定の条件下での電波干渉や通信不良の発生頻度やパターンを把握し、対策を講ずることが重要であると考えられる。

- (10) 原子力災害対策指針の OIL に則り避難等の防護措置が実施された後において、UPZ の外側から、データ通信が可能であること。

Penguin C のトラッキングアンテナにはオムニダイレクショナルアンテナ (無指向性アンテナ) とダイレクショナルアンテナ (指向性高利得アンテナ) が取り付けられており、機体までの距離に応じて利用するアンテナが自動的に切り替わる仕組みになっている。現在、オムニダイレクショナルアンテナとダイレクショナルアンテナの出力が 0.56 W であり、近距離で使用する場合はオムニアンテナ、長距離で使用する場合はダイレクショナルアンテナが対応する。オムニアンテナを使用した試験での通信距離は約 1 km であった。

UPZ の外側からの通信を想定するとダイレクショナルアンテナを使用することとなるが、長距離で機体と通信するためには機体と地上局のアンテナの出力を上げる必要がある。電波の出力を上げる場合、電波法に基づいて総務省の使用許可が必要となるのに加え、機体及び地上局の両方に増幅器 (アンプ) を搭載することも必要となる。また、長距離飛行を行う場合は、地球の丸みを考慮しなければならない (Fig. 9-40)。さらに、直線通信距離とフレネルゾーン*2 (Fig. 9-41、Fig. 9-42) を満たすために機体の高

*2 フレネルゾーン：無線通信などで、電力損失をすることなく電波が到達するために必要とする領域のこと。この領域内に障害物があると電波強度が確保されなくなる。

度とアンテナの高さを上げる必要がある (Fig. 9-43、Fig. 9-44)。例えば、現在使用しているアンテナを地上 3 m 地点に設置した場合、UPZ 外の通信を確保するには、機体は約 300 m~400 m の高度を維持する必要がある。低軌道衛星を用いたスターリンクと呼ばれる衛星通信サービスが近年活用され始めているが、角型の通信用アンテナの重量が約 4 kg あり、機体のペイロードだけに着目をすれば搭載可能である。しかし、大きさが約 50 cm × 30 cm と大きく通信用アンテナに電源供給が別途必要でまで考慮すると、無人航空機に搭載することは現状として難しい。今後より小型かつ電源管理が容易な衛星通信システムが市販された場合には、UPZ 外からの緊急時モニタリングに活用できると考えられる。

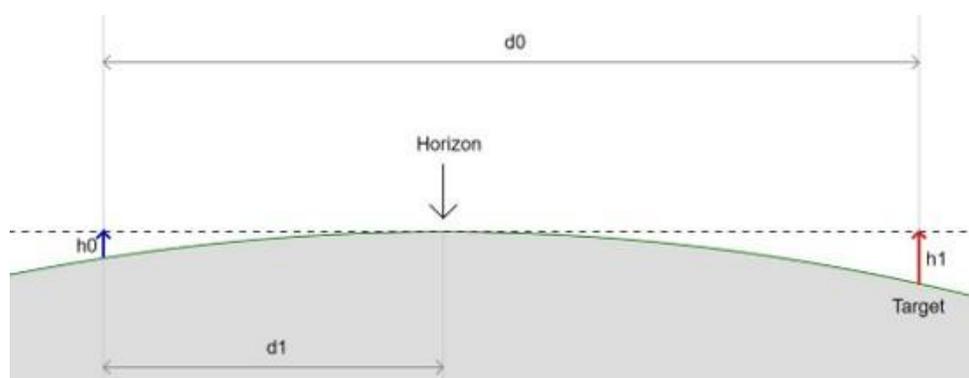


Fig. 9-40 地球の丸みによる影響

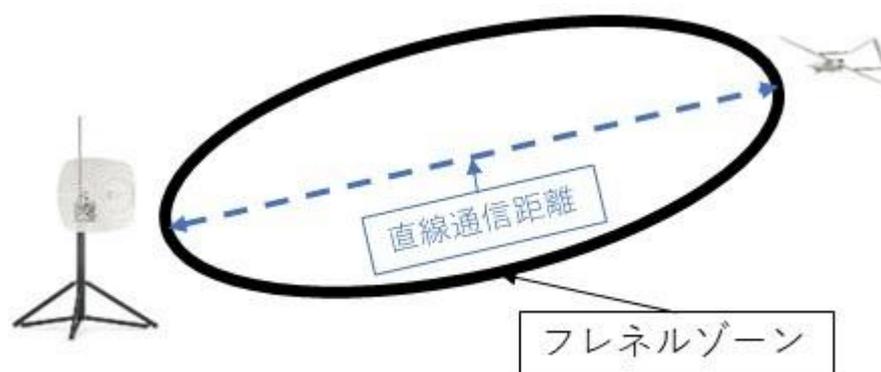


Fig. 9-41 直線通信距離とフレネルゾーン

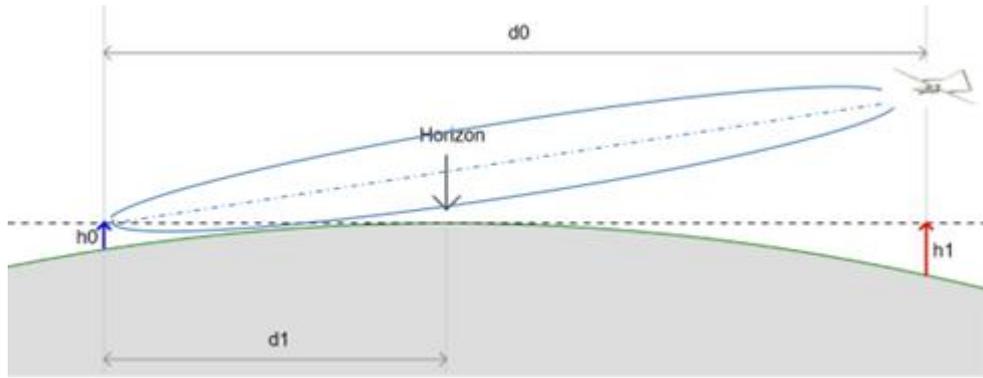


Fig. 9-42 フレネルゾーンと地球の丸みの影響

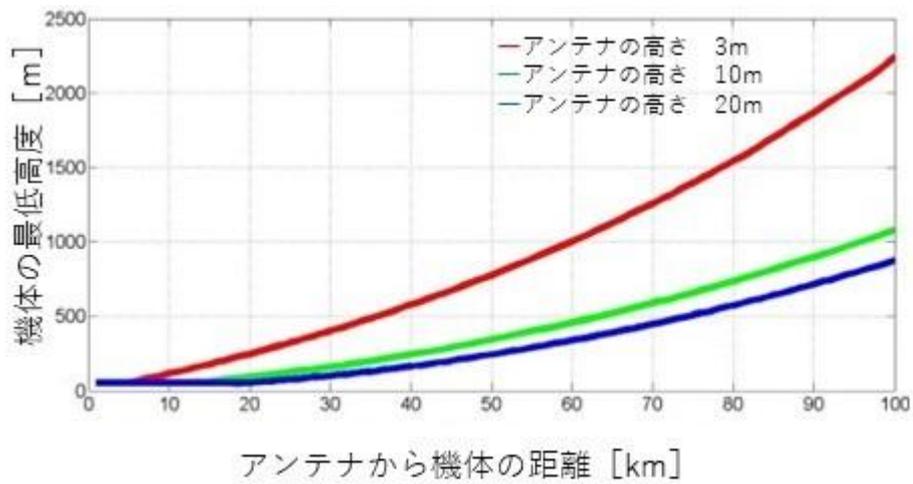


Fig. 9-43 フレネルゾーンに障害物がない場合の高さ相関

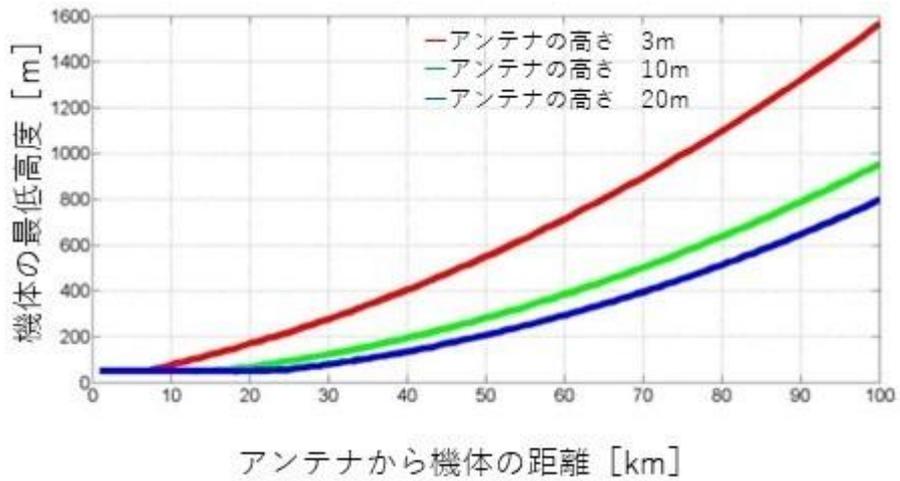


Fig. 9-44 フレネルゾーンに 20%の障害物がある場合の相関

(11) 夜間にフライトするための機能(暗視カメラ、航空灯など)を有すること。

夜間飛行に必要となる灯火類については、航空局標準マニュアルに準じ、機体の向きを視認できる灯火の装備が求められる。本研究では、フライト No. 2024-02、2024-07で、LEDパイロットランプを翼裏面に取り付け、離陸前には点灯を確認できたが、フライト中に目視確認ができず、着陸後の点検でパイロットランプが脱落していた。これは、面ファスナーの経年劣化及びカタパルト射出時の衝撃が原因と考えられた。フライト No.2024-10では、面ファスナーに加えて保護テープで補強した結果、離陸から着陸までランプの脱落はなく、フライト中に灯火を目視で確認することができた。なお、脱落防止を確実にするため、メーカーが販売する翼端組込式パイロットランプの使用についても今後検討する必要がある。

また、機体前方のペイロードベイには夜間観測用の赤外線カメラを搭載することが可能であり、フライト No. 2024-07、2024-10では、Penguin Cの標準搭載先として推奨される Octopus ISR Systems 製 Epsilon140 を搭載して試験を行った。Epsilon140 は可視光カメラと赤外線カメラを備えており、夜間においても周囲環境や対象物を赤外線画像で視認できることから、夜間飛行時の安全性向上に有効であることを確認した。

(12) 国内での規定基準類に準拠していること。

Penguin C 運用に際して依拠すべき日本国内規定基準類は、電波法及び高圧ガス保安法である。電波法は地上局と機体間の電波通信について適用され、高圧ガス保安法についてはカタパルトが同法適用対象であるか照合が必要となる。順に詳細を以下に述べる。

① 電波法

国内で電波を利用するためには、使用する無線設備が技術基準適合証明を受けていること、且つ、原則として無線局を開設することが必要となる。無線局開設申請にあたり、技術基準適合証明を受けている無線設備のみを使用する場合には、申請の一部が簡素化される特例措置が適用される。

Penguin C については、地上局と機体の通信に UAV IP Data link を使用している。UAV IP Data link は技術基準適合証明を受けている Microhard Systems Inc.製 pMDDL2450 無線モデムを利用している。同モデムの仕様を Table 9-17 に示す。同モデムは Table 9-18 に示す無線通信システムのうち携帯局に該当する。携帯局に該当する無線設備を運用する場合、無線局免許が必要であり、操作には無線従事者資格を要する。本研究で使用した地上局及び機体については、無線局免許状を申請し、必要な免許及び無線従事者資格を有した上で運用を行っている。

Table 9-17 無線モデム pMDDL2450 の仕様

周波数オプション	送信出力	チャンネル帯域幅
2.405 - 2.470 GHz	20 dB – 30 dB (100mW – 1.0W)	4/8 MHz

Table 9-18 ドローン等での使用が想定される主な無線通信システム

分類	無線局 免許	周波数帯	送信 出力	利用形態	備考	無線従事者 資格
免許及び登録を要しない無線局	不要	73 MHz 帯等	※1	操縦用	ラジコン用 微弱無線局	不要
	不要※2	920 MHz 帯	20 mW	操縦用	920 MHz 帯 テレメータ 用、テレコ ントロール 用特定小電 力無線局	
		2.4 GHz 帯	10 mW /MHz ※3	操縦用 画像伝送用 データ伝送用	2.4 GHz 帯小 電力データ 通信システ ム	
携帯局	要※4	169 MHz 帯	10 mW※5	操縦用 画像伝送用 データ伝送用	無人移動体 画像伝送シ ステム	第三級陸上 特殊無線技 士以上の資 格
		2.4 GHz 帯	1 W	操縦用 画像伝送用 データ伝送用		
		5.7 GHz 帯	1 W	操縦用 画像伝送用 データ伝送用		
その他	不要※6	800 MHz 帯 等	※7	操縦用、画像伝 送用、データ伝 送用		不要

*太文字：Penguin C 該当箇所

※1：500 m の距離において、電界強度が 200 μ V/m 以下のもの。

※2：技術基準適合証明等 (技術基準適合証明及び工事設計認証) を受けた適合表示無線設備であることが必要。

※3：変調方式や占有周波数帯幅によって出力の上限は異なる。

※4：運用に際しては、運用調整を行うこと。

※5：地上から電波発射を行う無線局の場合は最大 1W。

※6：携帯電話事業者の包括免許により運用。

※7：基地局によって制御される。

引用元：総務省電波利用ポータル、ドローン等に用いられる無線設備について、

<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/index.htm> (accessed 2025/3/1)

② 高圧ガス保安法

機体離陸の際に使用する可搬型空気圧式カタパルトはエアークンプレッサーを備えており、最大発射圧力が 1.15 MPa に達する。これは高圧ガス保安法第二条第一項に規定される「高圧ガス」に該当しているが、本機器のカタパルトは標準大気 (災害の発生のおそれがない高圧ガス) を使用するため、同法及び関連法規に規定される適用除外項目に該当する。よって、カタパルト使用にあたり同法に則る許可取得等は現時点では不要である。

高圧ガス保安法
 第三条 (適用除外)
 九 その他災害の発生のおそれがない高圧ガスであつて、政令で定めるもの

高圧ガス保安法施行令
 (適用除外)
 第二条
 5 法第三条第一項第九号の政令で定める高圧ガスは、次のとおりとする。
 一 圧縮装置 (空気分離装置に用いられているものを除く。次号において同じ。) 内における圧縮空気であつて、温度三十五度において圧力 (ゲージ圧力をいう。以下同じ。) 五メガパスカル以下のもの

(13) 少人数 (2~3 名) での運用が可能であること。

Penguin C は離陸地点までの機器一式 (機体、アンテナ、地上局及びカタパルトを指す) の運搬、機器組立、離陸、ミッションフライト並びに着陸までの一連の作業を最小人数 2 名で遂行することが可能であり、要件を満たしている。しかしながら、設営完了までに約 1 時間 30 分程度かかることから、災害時の迅速な対応を最優先事項とすると、2 名以上の作業員を配置し時間短縮を図ることが望ましい。少人数で運用する場合、使用している機材は重量物も多いため、安全性と効率を考慮して、機材積み降ろし用のリフターを備えた運搬車を準備しておくことが望ましい。

10. 今年度の成果と今後の課題

本章では、2024年度(令和6年度)の有人ヘリモニタリングシステムの保守点検と運用の実績と有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングにより得られた成果をまとめ、今後の課題について記す。

・RSIシステム及び高精度GPSシステムの保守方法について

RSIシステムを導入してから14年目が経過し、近年では軽微な異常が散見されるようになってきた。例えば、過去にはGPS受信エラーにより一部のデータが取得できない事例やRSIシステムのバグによる不具合が確認された。これらの問題に対し、GPSエラーについては、有人ヘリ機内におけるGPSアンテナの取り付け位置を見直すことで、現在はデータ未取得の発生を大幅に低減できている。また、RSIシステムのバグについては、航空機モニタリング実施前のシステムチェックを徹底することで、不調の早期発見と対策を可能とし、モニタリング作業への影響を最小限に抑える取り組みを継続している。一方で、RSIシステムの保守は導入からの経年により必要性が増すため、メーカーを含めた保守体制を継続して保持することが重要と考える。また、検出器に使用しているNaI(Tl)結晶は吸湿性を有し、空気中で潮解することが知られている。潮解による検出効率の低下時期については空気との接触状況にもよるため一概に言えないが、検出器のエネルギー分解能の変化を注視したうえで更新のタイミングを計画していく必要がある。また、NaI(Tl)結晶を被覆している金属性のケース内側に塗布されている酸化マグネシウム等の反射体に、機械的な振動等が原因で局所的な片寄りが生じる場合があり、波高値及びエネルギー分解能が変化する可能性もあることに留意する必要がある。

RSIシステムで現在用いているデータ収集装置(RS-701)の後継品(RS-705)がRSIから発売されており、将来的にRS-701に対するサポートが終了する懸念があることから、RS-705を2022年度(令和4年度)に1台、2024年度(令和6年度)に3台購入した。RS-705については有人ヘリモニタリングで要求されるデータ処理手順に適合するか確認するため、動作試験(通電試験、各検出器からの信号入力試験、取得データの解析適合性確認等)を実施した。その結果、RS-705はRS-701と同等の性能を有し、既存の有人ヘリモニタリング解析フローにおいても問題なく使用可能であることを確認した。以上を踏まえ、2025年度(令和7年度)よりRS-701と交換し運用を開始する予定である。今後も有人ヘリモニタリングを継続していく上で、RSIシステムの最新情報を入手するよう努めるとともに、トラブルの予防保全のために計画的に有人ヘリモニタリングシステムを更新する必要がある。

バッテリーについては、駆動時間等のパフォーマンスを一定レベルに維持するため、セル等の部品を定期的に新品に交換している。一方で、保有するバッテリー(全6台)は購入から14年が経過しようとしており、部品の交換によってだけでは解決困難なパフォーマンス低下が起こることも予想される。今後もバッテリーのパフォーマンスレベルの変化を注視しながら、内部点検等も併せた適切なメンテナンスを行っていく必要がある。

高精度 GPS システムについては、GNSS 受信機の性能が向上してきており、複数衛星からの信号受信を行うことが可能である。また、複数の周波数帯の信号を受信することで電離層遅延の解消が可能であり、測位誤差の改善も成されてきている。今後も GNSS 受信機に関する最新の知見を入手するよう努め、高精度 GPS システムの更新も随時検討することが必要である。さらに、RSI システムの GPS 測位データでなく、高精度 GPS システムの測位データをメインに使用して空間線量率マッピング等を実施することも検討する必要がある。

参考として、RSI システムの運用を開始した 2011 年度 (平成 23 年度) から 2024 年度 (令和 6 年度) までの RSI システムの保守及び運用実績を Table 10-1 に示す。従来、東電福島原子力発電所周辺の有人ヘリモニタリングは、2 機のヘリを用いて行っていたが、2024 年度 (令和 6 年度) よりヘリ 1 機のみで行うこととなった。現在は RSI 1 を主力として福島原子力発電所周辺の航空機モニタリングに使用しており、RSI 2 は予備機材として位置付けている。有人ヘリが 1 機体制になったことにより、RSI 1 に復旧困難な異常が生じた場合でも、RSI 2 に代替することで速やかにモニタリングの再開が可能である。

・空間線量率マップや放射性 Cs 沈着量マップについて

2023 年度 (令和 5 年度) より、80 km 圏内のモニタリングの一部に無人ヘリモニタリングを導入した。2024 年度 (令和 6 年度) は、浜通りエリアにおいて無人ヘリモニタリングの範囲を拡大した。有人ヘリモニタリングについては、様々なヘリコプターと RSI システムの組み合わせごとの解析パラメータの蓄積が行われ、信頼性の高い数値の選択が可能になってきたと判断し、各解析パラメータに固定パラメータを用いた。結果として、空間線量率マップは地上測定値とも良く整合し、今後も固定パラメータを用いることに大きな問題はないと考える。キャリブレーションフライトは、確認及び参考データの位置付けとしつつ、今後とも実施してデータを蓄積し、現行の解析パラメータを過信することなく、再設定を行うべきかを適宜検討する必要がある。他方で、Cs-137 の沈着量マップについては、特に 100 kBq/m² 以下の領域で可搬型 Ge 検出器による地上測定値を再現するのが困難であることが認められた。これには、第 19 次モニタリング及び浜通り第 2 次無人ヘリモニタリングにおいて、測定範囲全域で重量緩衝深度 $\beta = 1.0$ (g/cm²) を一律に適用していることが原因の一つと考えられることから、土地利用区分に応じて、より適切な β の設定値などについて検討し、Cs-137 沈着量の評価精度の向上に取り組む必要がある。また、Cs-134 と K-40 の γ 線エネルギーピークを弁別して作成した天然放射性核種由来の空間放射線量率マップは、可搬型 Ge 検出器による測定で評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率と良く一致した。このことから、上記の二つの放射性核種の複合ピークを仮定した関数適合法によって、Cs-134 が有意に存在するような地域においても、天然放射性核種の影響を推定できることを示した。

・地形の起伏を考慮した空間線量率の補正手法(地形補正手法)について

2023年度(令和5年度)のモニタリング結果に地形補正手法を適用したところ、東電福島原子力発電所から5 km圏内の無人ヘリモニタリングにおいて、地形を平坦と仮定している標準的解析手法と比べて、空間線量率が10倍近く過大に評価される場合が認められた。これを受けて2024年度(令和6年度)に地形補正手法による空間線量率の見直しを行い、空間線量率の急激な補正を緩和するよう補正式の改良を施した。改良した地形補正手法による空間線量率の換算結果について、地上測定値を用いて標準的解析手法と比較を行うことで、空間線量率の換算精度の向上効果の定量的評価を行った。改良した地形補正手法では、空間線量率は標準的解析手法に比べ全体的に低く評価される傾向にあり、過年度に見られた空間線量率の過大評価が解消されたことを確認した。空間線量率の換算結果と地上測定値との比較結果について、散布図に着目した場合、ファクター2に収まるプロットが標準的解析手法よりも明らかに増加した。また、相対誤差ヒストグラムに着目した場合、標準的解析手法に比べて平均値及び中央値が0に近づく等、相対誤差を小さくできることが分かった。今後、地形補正手法に掛かる処理時間を短縮できるよう計算アルゴリズムを改良するとともに、東電福島原子力発電所以外の測定エリアにも本手法を適用できるようにするなどの実用性向上に取り組む予定である。

・空気中ラドン子孫核種の弁別手法について

第15次東日本モニタリングのデータにラドン弁別手法を適用した。地上測定値と比較した結果から、当該手法はBGフライトを行ってバックグラウンドを減算する標準的解析手法についても精度的に劣るものでないことが分かった。ラドン弁別手法では、測定地点ごとに大気中ラドン子孫核種の影響が除去できることから、本手法の高度化を継続していくメリットは大きい。今後も標準的解析手法と比較しつつデータを蓄積し、本手法で独自に使用するパラメータ(RI及びGI)の算出方法を見直し、ラドン弁別手法の高度化を図る。例えば、ばらつきが生じやすいRIについて、外れ値の影響を確実に緩和して算出する方法を確立し、GIについては1減じるなどの経験的なプロセスを経ずに最適な値を算出する方法の検討などのブラッシュアップに取り組む予定である。

・無人航空機を用いたフライト試験について

原子力災害時等の緊急時モニタリングにおける、有人ヘリモニタリングの代替技術として期待されている無人航空機について運用技術開発を進めた。固定翼型のPenguin Cを用いて福島ロボットテストフィールドにて、計10回のフライト試験(総フライト時間約1,100分)を実施した。本試験には6時間にわたる長時間のフライト試験及び夜間想定フライトを含めた。全試験を予定通り完遂でき、システムの異常などは確認されなかった。以上のことより、Penguin Cのフライト性能に対する信頼性は高いものと考えられる。また、Penguin C専用の2つの放射線測定システム(環境用検出器及び緊急時検出器)の測定精度

を評価するため、当システム搭載して福島ロボットテストフィールドをフライトし、地表から 1 m の高さの空間線量率のマッピングを行った結果と歩行式サーベイメータによる地上測定値を比較した。その結果、両者は概ね 1 : 1 の関係にあることが見出され、当システムは一定の精度を有していることが確認できた。また、環境用検出器と緊急時用検出器に備えている放射線検出器 (HR-GAGG) の数が異なることに起因して、各検出器が対応できる空間線量率のレベルが異なることが示唆された。それぞれの検出器の活用目的に照らし合わせ、正確な空間線量率評価が可能なモニタリング条件 (測線間隔や対地高度) を検証する必要がある。なお、今回のフライト試験は空間線量率が概ね 0.20 $\mu\text{Sv/h}$ 以下のエリアで実施したものであり、空間線量率の範囲が限定的であった。今後、東電福島原子力発電所周辺でより高い空間線量率のエリアでフライト測定試験を行い、多様な空間線量率の環境で取得した測定データを基にして、当システムの精度評価を行うことで、実運用時の空間線量率の換算精度の信頼性を高めることが可能であると考えられる。

Table 10-1 RSI システムの保守及び運用実績

システム	構成機器	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度		
RSI 1 (主力)	Nal検出器 RSX-3(1)	購入 運用開始							更新	運用開始						運用継続		
	Nal検出器 RSX-3(2)	購入 運用開始								更新	運用開始					運用継続		
	LaBr ₃ 検出器 RSX-1						購入 運用開始									運用継続		
	RS-501	購入 運用開始										更新	運用開始			運用継続		
	RS-701 (2台)	購入 運用開始														運用継続		
	RS-705 (RS-701の後継品)													1台購入	1台購入	運用開始 予定		
	PDU	購入 運用開始											更新	運用開始		運用継続		
	バッテリー (3台)	購入 運用開始						修理 2台				修理 1台	修理 1台	修理 1台	修理 1台		運用継続	
	PC/RadAssist	購入 運用開始											更新	運用開始		運用継続		
	サブモニタ	購入 運用開始															運用継続	
RSI 2 (予備)	Nal検出器 RSX-3(1)	購入 運用開始							更新	運用開始						予備として 確保	保守継続	
	Nal検出器 RSX-3(2)	購入 運用開始											更新	運用開始		予備として 確保	保守継続	
	LaBr ₃ 検出器 RSX-1						購入 運用開始									予備として 確保	保守継続	
	RS-501	購入 運用開始											更新	運用開始		予備として 確保	保守継続	
	RS-701 (2台)	購入 運用開始														予備として 確保	保守継続	
	RS-705 (RS-701の後継品)														2台購入	保守継続		
	PDU	購入 運用開始											更新	運用開始		予備として 確保	保守継続	
	バッテリー (3台)	購入 運用開始						修理 2台				修理 1台	修理 1台	修理 1台	修理 1台		予備として 確保	保守継続
	PC/RadAssist	購入 運用開始											更新	運用開始		予備として 確保	保守継続	
	サブモニタ	購入 運用開始														予備として 確保	保守継続	
高精度 GPS	GPSアンテナ						購入 運用開始					更新	運用開始			運用継続		
	受信機						購入 運用開始					更新	運用開始			運用継続		
	気圧高度計						購入 運用開始					更新	運用開始			運用継続		
	タブレットPC						購入 運用開始					更新	運用開始			運用継続		

11. まとめ

2024年度(令和6年度)に予定された、東電福島原子力発電所から半径80 km圏内の有人ヘリ及び無人ヘリモニタリング各1回並びに80 km圏外の有人ヘリモニタリングそれぞれ1回を実施した。東電福島原子力発電所から半径5 km圏内の無人ヘリモニタリングについては、「令和6年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業」で実施され、得られた測定データを本報告で利用した。有人モニタリングと無人ヘリモニタリングの結果を統合して空間線量率及び放射性Csの地表面沈着量のマッピングを行って過去の結果と比較し、東電福島原子力発電所事故の影響があったエリアの空間線量率及び放射性Csの地表面沈着量の全体的な減少傾向を把握することができた。

東電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14年目となった。東電福島原子力発電所事故当時には定まっていなかった有人ヘリコプターによるモニタリングの測定及びデータ解析手法が円熟してきており、RSIシステムの定期的な保守及び軽微なトラブルへの対応経験並びに測定データ解析手法のノウハウが蓄積されてきている。また、測定データ解析手法の高度化に資するため、標準的解析手法をベースとした応用的データ解析手法の高度化を行った。それら応用的解析手法の有効性を評価するため、応用的解析手法を適用して得られた空間線量率マップと標準的解析手法によるものとの比較を実施した。地形の起伏を考慮に入れた換算手法を第19次モニタリング、浜通り第2次無人ヘリモニタリング及び第16回5 km圏内無人ヘリモニタリングのデータに適用し、空間線量率マップの作成を行った。地形を平坦と仮定する標準的解析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傾向にあった。地上測定値を用いて、それぞれのモニタリング手法による γ 線計数率から空間線量率への換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解析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換算精度の向上をもたらすことが示された。また、東日本第15次モニタリングのデータにラドン弁別手法を適用して空間線量率マップを作成した。本手法及び標準的解析手法により算出した地表面から1 mの高さの空間線量率と地上測定値とを比較した。標準的解析手法については山間部における空間線量率が地上測定値に対して2.0倍近く過大に評価される場合が見られたが、ラドン弁別手法では測定場所にほとんど依らず、過大評価する度合いも1.2倍以下に抑えることができた。ラドン弁別手法は各測定場所における測定データに基づいてバックグラウンドを減算できる点で、標準的解析手法よりも優れた手法であることが示唆された。

Penguin C について福島ロボットテストフィールドにて、システムの異常等無く、計10回のフライト試験を完遂した。東電福島原子力発電所から80 km圏内のモニタリングにも適用することも見据えて、次年度以降も引き続き本機体の運用を慣熟する試験及び放射線測定システムの測定精度の向上に資する試験を継続していく必要がある。

謝辞

本調査研究は、「令和 6 年度原子力施設等防災対策等委託費及び放射性物質測定調査委託費 (80km 圏内外における航空機モニタリング) 事業」による知見をとりまとめたものである。原子力機構、株式会社静環検査センター、株式会社 JDRONE、エイ・ティ・エス株式会社の 30 余名が、有人ヘリコプターに搭乗しての測定、地上での空間線量率測定、さらにデータ解析とそのマップ化に取り組んだ。有人ヘリコプターの運航は中日本航空株式会社、朝日航洋株式会社が行った。また、無人ヘリコプターによるモニタリング及び無人航空機を用いたフライト試験には、株式会社 JDRONE から多大な協力を頂いた。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.
- 3) Hendricks, T. J. and Riedhauser, S. R., An aerial radiological survey of the Nevada test site., DOE/NV/11718-324, 1999, 67p.
- 4) 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 γ 線サーベイシステム ARSAS, 保健物理, 25 (4), 1990, pp.391-398.
- 6) 森内茂, 長岡鋭, 坂本隆一, 堤正博, 斎藤公明, 天野光, 松永武, 柳瀬信之, 笠井篤, 緊急時における航空機サーベイ法確立とシステム実用化に関する検討, JAERI-M 89-017, 1989, 82p.
- 7) Saito, K. and Moriuchi, S., Conversion factors for estimating release rate of gaseous radioactivity by an aerial survey, JAERI-M 88-016, 1988, 84p.
- 8) 大西亮一, 無人ヘリコプターを活用した空中放射線測定システムについて, 航空と宇宙, 671, 2009, pp.8-14.
- 9) 原子力安全委員会, 環境放射線モニタリング指針, 2008.
- 10) 鳥居建男, 眞田幸尚, 杉田武志, 田中圭, 航空機モニタリングによる東日本全域の空間線量率と放射性物質の沈着量調査, 日本原子力学会誌(ATOMOΣ), 54(3), 2012, pp.160-165.
- 11) 眞田幸尚, 近藤敦也, 杉田武志, 鳥居建男, 航空機モニタリングによる放射性セシウムの汚染分布, 放射線, 38 (3), 2012, pp.137-140.
- 12) 眞田幸尚, 日本全域における航空機モニタリング, FBNews, 432, 2012, pp.7-11.
- 13) IAEA, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -(Second Report), 2011.
- 14) Inomata, Y., Aoyama, M., Hirose, K., Sanada, Y., Torii, T., Tsubono, T., Tsumune, D. and Yamada, M., Distribution of radionuclides in surface seawater obtained by an aerial radiological survey, J. Nucl. Sci. Tech., 51(9), 2014, pp.1059-1063.
- 15) 原子力規制委員会, 航空機モニタリング結果,
<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/results/airborne> (2025年7月14日閲覧).
- 16) 原子力規制委員会, 令和6年度放射性物質測定調査委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業, 成果報告書, 2025,

- https://www.nra.go.jp/nra/chotatsu/yosanshikou/itaku_houkoku-r_r6.html (2025年8月20日閲覧).
- 17) 福島原子力事故関連情報アーカイブ, 文部科学省航空機モニタリング行動計画, 2011, <https://f-archive.jaea.go.jp/dspace/handle/faa/8235> (2025年7月14日閲覧).
 - 18) 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.
 - 19) 眞田幸尚, 西澤幸康, 卜部嘉, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 土田清文, 石橋聖, 前島正道, 結城洋一, 鳥居建男, 平成25年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2014-012, 2014, 110p.
 - 20) 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.
 - 21) 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, 飛田晋一郎, 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.
 - 22) 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, 飛田晋一郎, 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, 2018, 117p.
 - 23) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一郎, 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.
 - 24) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 古宮友和, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 萩野谷仁, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成30年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-016, 2019, 116p.
 - 25) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 廣内淳, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和元年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-018, 2021, 121p.
 - 26) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 嶋田和真, 外間智規, 平岡大和, 卜部嘉, 外川織彦, 安藤真樹, 工藤保, 令和2年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2021-029, 2022, 132p.

- 27) 普天間章, 眞田幸尚, 長久保梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 坪雄一郎, 卜部嘉, 工藤保, 令和3年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2022-027, 2023, 148p.
- 28) 普天間章, 眞田幸尚, 長久保梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 坪雄一郎, 新井仁規, 扇柳仁, 卜部嘉, 工藤保, 令和4年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2023-027, 2024, 146p.
- 29) 普天間章, 眞田幸尚, 中間茂雄, 佐々木美雪, 越智康太郎, 長久保梓, 澤幡義郎, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 坪雄一郎, 新井仁規, 石田睦司, 卜部嘉, 工藤保, 令和5年度東京電力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及び無人飛行機による放射線モニタリングに係る技術開発(受託研究), JAEA-Technology 2024-021, 2025, 232p.
- 30) 原子力規制委員会, 令和5年度放射性物質測定調査委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業, 成果報告書, 2024, https://www.nra.go.jp/nra/chotatsu/yosanshikou/itaku_houkoku-r_r5.html (2025年7月14日閲覧).
- 31) 眞田幸尚, 西澤幸康, 山田勉, 池田和隆, 松井雅士, 土田清文, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 石田睦司, 卜部嘉, 志風義明, 杉田武志, 近藤敦哉, 鳥居建男, 原子力発電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定, JAEA-Research 2013-049, 2014, 129p.
- 32) Sanada, Y. and Torii, T., Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter, J. Environ. Radioact., 139, 2015, pp.294-299.
- 33) Sanada, Y., Kondo, A., Sugita, T., Nishizawa, Y., Yuuki, Y., Ikeda, K., Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi nuclear power plant, Explor. Geophys., 45, 2014, pp.3-7.
- 34) 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 (ATOMOS), 55(12), 2013, pp.702-706.
- 35) Torii, T., Sugita, T., Okada, C. E., Reed, M. S. and Blumenthal, D. J., Enhanced Analysis Methods to Derive the Spatial Distribution of ¹³¹I deposition on the Ground by Airborne Surveys at an Early Stage after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Health. Phys., 105(2), 2013, pp.192-200.
- 36) Ishizaki, A., Sanada, Y., Mori, A., Imura, M., Ishida, M. and Munakata, M., Investigation of snow cover effects and attenuation correction of gamma ray in aerial radiation monitoring, Remote Sens., 8(11), 2016, p.892.
- 37) Ishizaki, A., Sanada, Y., Ishida, M. and Munakata, M., Application of topographical source model for air dose rates conversions in aerial radiation monitoring., J. Environ. Radioact., 180, 2017, pp.82-89.

- 38) 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.
- 39) Tanigaki, M., Okumura, R., Takamiya, K., Sato, N., Yoshino, H., Yhinaga, H., Kobayashi, Y., Uebara, A., Yamana, H., Development of KURAMA-II and its operation in Fukushima, Nucl., Instrum., Methods Phys. Res. A, 781, 2015, pp.57-64.
- 40) Nicolini R., Camera F., Blasi N., Brambilla S., Bassini R., Boiano C., Bracco A., Crespi F.C.L., Wieland O., Benzoni G., Leoni S., Million B., Montanari D. and Zalite A., Investigation of the properties of a 1"× 1" LaBr3:Ce scintillator, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res., A582, 2007, pp.554-561.
- 41) 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://service.gsi.go.jp/kiban/> (2025年7月14日閲覧).
- 42) 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.
- 43) ICRU, Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU Report 53, 1994, 84p.
- 44) 文部科学省, 放射線量等分布マップ(放射性セシウムの土壌濃度マップ)の作成について,
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/017/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2011/09/02/1310688_2.pdf (2025年11月14日閲覧).
- 45) 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.
- 46) Sanada, Y., Urabe, Y., Sasaki, M., Ochi, K., Torii, T., Evaluation of ecological half-life of dose rate based on airborne radiation monitoring following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, J. Environ. Radioact., 192, 2018, pp.417-425.
- 47) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, 173p.
- 48) 塩出志乃, 逆距離加重法によるネットワーク空間上での点補間に関する研究, Theory and Applications of GIS, 13(1), 2004, pp.33-41.
- 49) 国土交通省, 無人航空機の目視外及び第三者上空等での飛行に関する検討会 とりまとめ, 令和4年4月,
https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk1_000057.html (2025年7月14日閲覧).
- 50) 環境省, 追加被ばく線量年間1ミリシーベルトの考え方,
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/18437.pdf> (2025年7月14日閲覧).
- 51) 農林水産省, 稲の作付に関する考え方,
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/ine_sakutuke.pdf (2025年7月15日閲覧).
- 52) 安藤真樹, 松田規宏, 斎藤公明, KURAMA-II を用いた走行サーベイ測定による東日本での天然放射性核種の空間線量率評価, 日本原子力学会和文論文誌, 16(2), 2017, pp.63-80.
- 53) 国土地理院, 国土数値情報土地利用細分メッシュデータ,

- <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html> (2025年7月14日閲覧).
- 54) Iwamoto, Y., Sato, T., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Matsuda, N., Hosoyamada, R. and Niita, K., Benchmark study of the recent version of the PHITS code, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 54(5), 2017, pp.617-635.
 - 55) Oikawa, S., Nakano, N., Sanada, T., Ohashi, N., Uesugi, M., Sato, K., Abukawa, J. and Higuchi, H., A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan, *J. Environ. Radioact.*, 65(2), 2003, pp.203-213.
 - 56) 西川嗣雄, ラドン族(2) –自然放射線環境, 福井大学地域環境研究教育センター研究紀要「日本海地域の自然と環境」, 5, 1998, pp.83-94.
 - 57) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 嶋田和真, 外間智規, 平岡大和, 卜部嘉, 外川織彦, 安藤真樹, 工藤保, 令和2年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), *JAEA-Technology* 2021-029, 2022, 132p.
 - 58) 普天間章, 眞田幸尚, 佐々木美雪, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 坪雄一郎, 新井仁規, 外間智規, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和4年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング及び無人航空機による放射線モニタリングに係る技術開発(受託研究), *JAEA-Technology* 2023-026, 2024, 161p.
 - 59) 永島弘文, 大舘孝幸, 荒井太紀夫, 最小距離2乗法による回帰直線の求め方, *J. Extra Corpor. Technol.*, 12(1), 1986, pp.51-54.
 - 60) 永井英志, 山澤弘実, 森泉純, 平尾茂一, 冬季日本海側における高空間線量率事象の解析, *Jpn. J. Health Phys.*, 53(4), 2018, pp.219-229.
 - 61) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 20万分の1日本シームレス地質図 2024年9月6日版, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (2025年7月14日閲覧).
 - 62) 原子力防災会議幹事会, 原子力災害対策マニュアル, 平成24年10月19日制定(令和6年7月2日一部改訂).
 - 63) 石崎梓, 眞田幸尚, 西澤幸康, 普天間章, 宗像 雅広, 平成28年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立(受託研究), *JAEA-Research* 2017-012, 2018, 58p.
 - 64) 眞田幸尚, 西澤幸康, 越智康太郎, 結城洋一, 石崎梓, 長田直之, 平成29年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立(受託研究), *JAEA-Research* 2018-009, 2019, 48p.
 - 65) 眞田幸尚, 越智康太郎, 石崎梓, 平成30年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立(受託研究), *JAEA-Research* 2020-006, 2020, 60p.
 - 66) UAV Factory Ltd., Penguin C Operator's Handbook V1.13, 2020.
 - 67) UAV Factory Ltd., MEAN TIME BETWEEN FAILURES DATA COLLECTION, 2020.
 - 68) 国土地理院, 地理院地図 Vector, <https://maps.gsi.go.jp/vector/> (2025年7月14日閲覧).

This is a blank page.

