

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)

Radiation Monitoring via Manned Helicopter around
the Nuclear Power Station in the Fiscal Year 2022
(Contract Research)

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 ト部 嘉
工藤 保

Akira FUTEMMA, Yukihiisa SANADA, Azusa NAGAKUBO, Yoshiharu KAWASAKI
Takeyuki IWAI, Shogo HIRAGA, Masashi HAGINOYA, Yuki MATSUNAGA
Yuichiro AKUTSU, Yoshinori ARAI, Jin OGIYANAGI, Yoshimi URABE
and Tamotsu KUDO

安全研究・防災支援部門
原子力緊急時支援・研修センター

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

March 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<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 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒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 Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, 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 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)

日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門

原子力緊急時支援・研修センター

普天間 章、眞田 幸尚、長久保 梓⁺¹、川崎 義晴^{*1}、岩井 毅行^{*1}、平賀 祥吾^{*1}、
萩野谷 仁^{*2}、松永 祐樹^{*2}、坪 雄一郎^{*3}、新井 仁規^{*3}、扇柳 仁、卜部 嘉^{*1}、工藤 保

(2023 年 12 月 1 日受理)

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波に起因した東京電力福島第一原子力発電所事故によって、大量の放射性物質が周辺環境に飛散した。事故直後より、放射線の分布を迅速かつ広範囲に測定する手法として、航空機等を用いた空からの測定方法が適用されている。日本原子力研究開発機構では、有人ヘリコプターを使用した航空機モニタリングを福島第一原子力発電所周辺において継続的に実施してきた。本報告書では、令和 4 年度に実施した福島第一原子力発電所周辺におけるモニタリング結果について取りまとめると共に、過去のモニタリング結果から空間線量率等の変化量を評価し、その変化要因について考察した。また、航空機モニタリングによる空間線量率の換算精度向上に資するために、航空機モニタリングデータを用いて地形の起伏を考慮に入れた解析を行った。地形の起伏を考慮に入れる前後での解析結果を比較し、本手法による精度向上効果を評価した。さらに、空気中のラドン子孫核種の弁別手法を測定結果に適用して、空気中のラドン子孫核種が航空機モニタリングに与える影響について評価した。

本調査研究は、日本原子力研究開発機構が原子力規制庁との委託契約により実施した「令和 4 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 安全研究センター

*1 株式会社 NESI

*2 検査開発株式会社

*3 原子力エンジニアリング株式会社

**Radiation Monitoring via Manned Helicopter
around the Nuclear Power Station in the Fiscal Year 2022
(Contract Research)**

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

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

(Received December 1, 2023)

By the accident at Tokyo Electric Power Company's (TEPCO's) Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS), caused by tsunami triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, a large amount of radioactive material was released into the surrounding environment. After the accident, Airborne Radiation Monitoring (ARM) via manned helicopter has been applied as a method to quickly and extensively measure the distribution of radiation. Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has continuously conducted ARM via manned helicopter around FDNPS. In this report, we summarize the results of the ARM around FDNPS in the fiscal year 2022, evaluate the changes of ambient dose rates and other parameters based on the comparison to the past ARM results, and discuss the causes of such changes. In order to contribute to improve the accuracy of ambient dose rate conversion, we analyzed the ARM data taking into account undulating topography, and evaluated the effect of this method. Furthermore, the effect of radon progenies in the air on the ARM was evaluated by applying the discrimination method to the measurement results.

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

This report summarized results that Japan Atomic Energy Agency carried out as commissioned business on "the projects of the radiation monitoring using manned helicopter around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station" of the Nuclear Regulation Authority in the fiscal year 2022.

+ 1 Nuclear Safety Research Center

* 1 NESI Inc.

* 2 Inspection Development Company Ltd.

* 3 Nuclear Engineering Co., Ltd.

目次

1. はじめに.....	1
2. 福島原子力発電所事故に係る航空機モニタリングの経緯.....	3
3. 測定システムとヘリコプター.....	12
3.1. 航空機モニタリングシステム.....	12
3.2. ヘリコプターの選定.....	14
3.3. 機体による γ 線遮蔽効果.....	17
3.4. RSI システムの保守.....	19
4. データ取得及び解析方法.....	22
4.1. 上空での測定値の地上への換算に関する基本的な考え方.....	22
4.2. 航空機モニタリングの方法.....	26
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.....	28
4.4. 解析のフロー.....	35
4.5. 空間線量率への換算方法.....	36
4.5.1. バックグラウンド減算 (宇宙線及びその他).....	36
4.5.2. 対地高度補正.....	38
4.5.3. 空間線量率への換算.....	42
4.6. 放射性 Cs の沈着量への換算方法.....	52
4.6.1. 天然放射性核種の弁別と放射性 Cs 起源の計数率の算出.....	52
4.6.2. 空間線量率－放射能換算係数.....	54
4.7. 減衰補正.....	56
4.8. 検出限界値.....	57
4.8.1. 放射性 Cs の沈着量の検出限界値.....	57
4.8.2. 空間線量率の検出限界値.....	59
4.9. 不確かさ.....	59
4.10. 補間方法.....	60
4.11. 地上測定値との比較.....	62
4.12. 天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの作成.....	65
5. 航空機モニタリング結果.....	70
5.1. ヘリコプターによるフライトの実績.....	70
5.2. 第 17 次モニタリング.....	72
5.3. 東日本第 13 次モニタリング.....	77
6. 航空機モニタリング結果の考察.....	91
6.1. 過去の航空機モニタリング結果との比較.....	91
6.2. 実効半減期の算出.....	102
6.3. 土地利用区分による空間線量率の変化傾向の違い.....	104
7. 地形の起伏による影響と補正方法.....	112
7.1. 背景.....	112
7.2. 地形の起伏による測定への影響.....	112
7.3. 地形の起伏による影響の補正.....	116
8. ラドン弁別手法を適用した空間線量率マップの作成.....	120
8.1. ラドン子孫核種.....	120

8.2. ラドン弁別手法の理論.....	122
8.3. パラメータ (RI 及び GI) の決定	124
8.4. GI の高度補正方法.....	126
8.5. 東日本第 13 次モニタリングのデータへの適用	128
8.6. バックグラウンド計数率の比較.....	136
9. 本年度の成果と今後の課題.....	138
10. まとめ.....	141
謝辞.....	142
参考文献.....	143

Contents

1. Introduction.....	1
2. History of ARM after FDNPS accident.....	3
3. Measurement system and helicopters	12
3.1. Measurement system of ARM	12
3.2. Helicopters	14
3.3. Test using radiation source	17
3.4. Maintenance of RSI system	19
4. Data acquisition and analysis.....	22
4.1. Basic concept of conversion to dose rate at 1 m above the ground.....	22
4.2. Method of ARM.....	26
4.3. Calibration flights	28
4.4. Outline of analysis method	35
4.5. Conversion procedure of dose rate at 1 m above the ground	36
4.5.1. Background (Cosmic ray and the others)	36
4.5.2. Height correction.....	38
4.5.3. Conversion factor from counting rates to dose rate.....	42
4.6. Conversion procedure of radiocesium deposition	52
4.6.1. The discrimination of counting rates by natural nuclide	52
4.6.2. Conversion factor from dose rate to radiocesium deposition	54
4.7. Decay correction	56
4.8. Detection limit	57
4.8.1. Detection limit of dose rate.....	57
4.8.2. Detection limit of radiocesium deposition.....	59
4.9. Uncertainty.....	59
4.10. Interpolation	60
4.11. Comparison with ground measurement data	62
4.12. Map of dose rate of natural nuclide	65
5. ARM results	70
5.1. Operational result of helicopters.....	70
5.2. The 17th ARM at area of 80 km range from the FDNPS	72
5.3. The 13th ARM in the East Japan	77
6. Discussion.....	91
6.1. Comparison with the past monitoring results	91
6.2. Evaluation of ecological half-life of dose rate.....	102
6.3. Difference in tendency change of dose rate resulted from the land use	104
7. Topographical effect and correction method.....	112
7.1. Background.....	112
7.2. Topographical effect on measurement data	112
7.3. Results of topographical effect correction	116
8. Discrimination of Rn progenies.....	120
8.1. Rn progenies	120

8.2. Theory of discrimination of Rn progenies	122
8.3. Parameters (<i>RI</i> and <i>GI</i>)	124
8.4. Height correction of <i>GI</i>	126
8.5. Application for ARM data	128
8.6. Comparison with the conventional technique.....	136
9. Future work.....	138
10. Summaries	141
Acknowledgements	142
References	143

Table list

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯	7
Table 2-2 航空機モニタリングに関わる技術開発の経緯	11
Table 3-1 搭載した RSI システムとヘリコプターの組み合わせ	15
Table 3-2 Cs-137 線源によるヘリコプター機体の遮蔽効果の比較	17
Table 4-1 キャリブレーションフライトの概略	30
Table 4-2 RSI システムとヘリコプターの組み合わせごとのバックグラウンド計数率及び <i>CR-Index</i>	38
Table 4-3 使用した空気減弱係数 <i>AF</i> のまとめ	40
Table 4-4 2022 年度に取得した空気減弱係数 <i>AF</i> データ一覧	41
Table 4-5 使用した空間線量率換算係数 <i>CD</i> のまとめ	43
Table 4-6 2022 年度に取得した <i>CD</i> データ一覧 (Bell412)	44
Table 4-7 2022 年度に取得した <i>CD</i> データ一覧 (Bell430)	44
Table 4-8 <i>BG-Index</i> 一覧	54
Table 4-9 RSI システムの検出下限値	58
Table 4-10 使用した空気減弱係数 <i>AF</i> (m^{-1}) のまとめ	67
Table 5-1 ヘリコプターごとのフライト距離及び速度とフライト回数	71
Table 6-1 福島原子力発電所から 80 km 圏内における空間線量率の面積割合の経年推移	96
Table 6-2 指数関数近似から求めた実効半減期	103
Table 6-3 森林部及び市街地部における空間線量率の相対減少率の比較 (国土数値情報土地利用細 分メッシュデータ (平成 21 年度公開版)に基づく)	110
Table 6-4 森林部及び市街地部における空間線量率の相対減少率の比較 (国土数値情報土地利用細 分メッシュデータ (平成 26 年度公開版)に基づく)	110
Table 6-5 森林部及び市街地部における空間線量率の相対減少率の比較 (国土数値情報土地利用細 分メッシュデータ (平成 28 年度公開版)に基づく)	111
Table 8-1 ラドン子孫核種の放出する γ 線	121
Table 9-1 RSI システムの保守及び運用実績	140

Figure list

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績	9
Fig. 3-1 RSI システムのブロック図	13
Fig. 3-2 RSI システムの外観	13
Fig. 3-3 機底に燃料タンクのないヘリコプター機種一覧	14
Fig. 3-4 線源試験イメージ	18
Fig. 3-5 RSI システムのエネルギー分解能及び Gain の変動 (RSI 1)	20
Fig. 3-6 RSI システムのエネルギー分解能及び Gain の変動 (RSI 2)	21
Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係	23
Fig. 4-2 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の積算計数に対する線源位置の関係	24
Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の線源位置ごとの計数の割合	24
Fig. 4-4 上空からの測定イメージ	25
Fig. 4-5 フライトイメージ	26
Fig. 4-6 予定したフライトの測線	27
Fig. 4-7 テストラインフライトのイメージ	31
Fig. 4-8 テストラインの場所	31
Fig. 4-9 テストポイントフライトのイメージ	32
Fig. 4-10 テストポイントの場所	33
Fig. 4-11 宇宙線フライトのイメージ	34
Fig. 4-12 Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージ	34
Fig. 4-13 天然核種フライトの測線とオーバーラップフライトの測線	34
Fig. 4-14 解析のフロー	35
Fig. 4-15 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例	37
Fig. 4-16 BG フライトで取得した陸上と海上での γ 線スペクトル例	38
Fig. 4-17 対地高度と計数率の関係例	40
Fig. 4-18 地上測定データ (TestPoint 1)	45
Fig. 4-19 地上測定データ (TestPoint 3)	46
Fig. 4-20 地上測定データ (TestPoint 4)	47
Fig. 4-21 地上測定データ (TestPoint 5)	48
Fig. 4-22 地上測定データ (TestPoint D)	49
Fig. 4-23 地上測定データ (TestPoint E)	50
Fig. 4-24 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 $CR\text{-}Index \cdot HF$ 補正計数率の関係	51
Fig. 4-25 放射性 Cs に起因する計数率の算出イメージ	53
Fig. 4-26 $BG\text{-}Index$ の算出例	53
Fig. 4-27 重量緩衝深度 β と空間線量率－放射能換算係数 CF の関係	55
Fig. 4-28 IDW に入力するパラメータとマップの関係	61
Fig. 4-29 測線近傍における地上測定値と航空機モニタリングによる空間線量率の比較	63
Fig. 4-30 ランダムな位置における地上測定値と航空機モニタリングによる空間線量率の比較	64
Fig. 4-31 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と航空機モニタリングによる Cs-137 沈着量の比較	64
Fig. 4-32 関数適合法を用いた Cs-134 と K-40 の弁別	67
Fig. 4-33 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)	68

Fig. 4-34 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell430)	68
Fig. 4-35 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	68
Fig. 4-36 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航空機 モニタリングで評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率との比較	69
Fig. 5-1 第 17 次モニタリングにおける空間線量率マップ	73
Fig. 5-2 第 17 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ	74
Fig. 5-3 第 17 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ	75
Fig. 5-4 第 17 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ	76
Fig. 5-5 東日本第 13 次モニタリングにおける空間線量率マップ	78
Fig. 5-6 東日本第 13 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ	79
Fig. 5-7 東日本第 13 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ	80
Fig. 5-8 東日本第 13 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ	81
Fig. 5-9 第 17 次モニタリングと東日本第 13 次モニタリングにおける空間線量率マップ	82
Fig. 5-10 第 17 次モニタリングと東日本第 13 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ	83
Fig. 5-11 第 17 次モニタリングと東日本第 13 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ	84
Fig. 5-12 第 17 次モニタリングと東日本第 13 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ	85
Fig. 5-13 第 17 次モニタリングと東日本第 13 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	86
Fig. 5-14 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	87
Fig. 6-1 福島原子力発電所から 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較	93
Fig. 6-2 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較	97
Fig. 6-3 第 4 次モニタリング及び第 17 次モニタリングの空間線量率算出結果の比較	100
Fig. 6-4 旧避難指示区域における第 4 次モニタリング及び第 17 次モニタリングの空間線量率算出 結果の比較	101
Fig. 6-5 旧避難指示区域における第 4 次モニタリング及び第 17 次モニタリングの Cs-137 沈着量 算出結果の比較	101
Fig. 6-6 測定値の指数関数近似	103
Fig. 6-7 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版 国土地理院土地利用調査データより)	106
Fig. 6-8 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版 国土地理院土地利用調査データより)	107
Fig. 6-9 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版 国土地理院土地利用調査データより)	108
Fig. 6-10 森林部及び市街地における地表面から 1 m の高さの空間線量率の算出結果の比較	109
Fig. 7-1 無作為に抽出した評価点の位置	114
Fig. 7-2 数値標高マップから三角ポリゴンへの変換例	115
Fig. 7-3 平坦な地形と起伏のある地形における対地高度 300 m での計数率比の頻度分布	115
Fig. 7-4 地形の起伏による影響を補正する場合に考慮すべき点	117
Fig. 7-5 第 17 次モニタリングの空間線量率マップの比較	118
Fig. 7-6 第 17 次モニタリング結果と地上測定値との比較	119
Fig. 8-1 ウラン系列及びトリウム系列	121
Fig. 8-2 空気中ラドン子孫核種測定用の検出器とヘリコプターへの搭載状況	123
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	123

Fig. 8-4 海上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr ₃ 検出器の計数率の関係.....	125
Fig. 8-5 陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr ₃ 検出器の計数率の関係.....	125
Fig. 8-6 計算体系のイメージ.....	127
Fig. 8-7 計算体系のベンチマーク.....	127
Fig. 8-8 シミュレーションによる測定高度と <i>GI</i> の関係.....	127
Fig. 8-9 ラドン弁別手法適用前後の東日本第 13 次モニタリングの空間線量率マップ.....	131
Fig. 8-10 東日本第 13 次モニタリングの測定結果から計算した空气中ラドン子孫核種の計数率マップ.....	132
Fig. 8-11 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率と地上測定値との比較 (最小絶対値法による <i>RI</i> 及び <i>GI</i> を用いた場合).....	133
Fig. 8-12 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).....	135
Fig. 8-13 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.....	137

1. はじめに

短時間で広域のモニタリングを実施する方法の一つとして、有人のヘリコプターを用いた航空機モニタリング (Aerial Radiation Monitoring: 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か所に集め比較測定を実施することにより、データフォーマットや解析手法の標準化を行っている⁴⁾。

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

2011 年 (平成 23 年) 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震に起因して、福島原子力発電所事故が発生し、周辺環境に放射性物質が広く拡散したため、その影響を評価することが急務となり、航空機モニタリングが実施されることとなった。福島原子力発電所から半径 80 km 圏内において航空機モニタリングが DOE と文部科学省 (以下、文科省) により 2011 年 (平成 23 年) 4 月 6 日から開始され¹⁰⁾⁻¹²⁾、当該事業は 2013 年度 (平成 25 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¹³⁾。

原子力機構をはじめとした航空機モニタリングの経験のある研究機関や企業などが集結し、DOE の手法をベースに福島原子力発電所事故の状況や急峻な地形が多いという日本独特の環境を加味して、航空機モニタリングの測定及び評価手法の最適化を図ってきた。これら蓄積した測定及び解析技術を基に、大規模な原子力災害における我が国初の日本全域の航空機モニタリングを 2011 年 (平成 23 年) から 2012 年 (平成 24 年) にかけて行った¹²⁾。当時作成した福島原子力発電所周辺における空間線量率マップや地表面における放射性セシウム (以下、放射性 Cs) の沈着量マップは、避難指示区域設定の基礎資料となった他、様々なメディアや研究に活用された¹⁴⁾。

また、事故直後に実施された福島原子力発電所周辺の海上における航空機モニタリングデータを再解析し、事故直後の海上における I-131 や放射性 Cs の降下量マップを再構築し、シミュレーションと比較した例も報告されている¹⁵⁾。いずれの例も、福島原子力発電所事故後における航空機モニタリングによるデータ取得の有効性及び得られる情報量の多さを示している。

本報告書では、2022 年度 (令和 4 年度) に行った福島原子力発電所から 80 km 圏内外における航空機モニタリングの結果について報告する。2022 年度 (令和 4 年度) における福島原子力発電所から 80 km 圏内における航空機モニタリングを「第 17 次モニタリング」、80 km 圏外における航空機モニタリングを「東日本第 13 次モニタリング」と呼称する。また、航空機モニタリングによる空間線量率の評価のさらなる高度化を目的とし、地形の起伏を考慮した場合に空間線量率の計算結果に及ぼす影響について、第 17 次モニタリングのデータを用いて、地上測定値を指標として定量的評価を行ったさらに、東日本第 13 次モニタリングのデータを用いて、大気中のラドン子孫核種に起因する γ 線を弁別除去することで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。

2. 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

福島原子力発電所事故発生後に実施された航空機モニタリングの一連のスケジュールと実績について Table 2-1 及び Fig. 2-1 に示す。本報告では、これら一連の福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングを「本事業」と総称する。本事業では、2011 年(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¹⁶⁾」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」として福島原子力発電所から 80 km 圏内におけるモニタリングを開始した。また、同年 5 月 18 日から「第 2 次モニタリング」として福島原子力発電所から 80 km～100 km 圏をモニタリングした。その後、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、福島原子力発電所から 80 km 圏内のモニタリングを実施した。さらに、福島原子力発電所から 100 km 圏外にも放射性物質が拡散していることが予想されたため、同年 6 月 22 日から福島周辺県の宮城県、栃木県、茨城県を対象にモニタリングを実施した後、同年 8 月 2 日から、文科省委託事業である「広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査」として、原子力機構が主体となり東日本全域の航空機モニタリング「東日本第 1 次モニタリング」を実施した。その後、福島原子力発電所から 80 km 圏内のモニタリングを同年 10 月 22 日から「第 4 次モニタリング」として実施した。また、本事業を拡大する形で、2012 年(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航空機モニタリング「西日本・北海道モニタリング」を実施した。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航空機モニタリング(第 4.5 次)」として実施した。

2012 年度(平成 24 年度)は、それまでのデータに基づき、福島原子力発電所事故の影響が見られる地域に限定し、航空機モニタリングを継続した。空間線量率の比較的高い場所(0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 以上)で福島原子力発電所から 80 km 圏内を除く地域を対象に、2012 年(平成 24 年)4 月 2 日から「東日本第 2 次モニタリング」を実施し、同年 10 月 31 日から「東日本第 3 次モニタリング」を実施した。80 km 圏内については、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。

2013 年度(平成 25 年度)には本事業の主体が文科省から規制庁に移管され、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2013 年(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)で福島原子力発電所から 80 km 圏外を対象に「東日本第 4 次モニタリング」を実施した。同年度の結果については、眞田他(2014)¹⁷⁾に詳しく報告されている。

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

2015 年度(平成 27 年度)については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2015 年(平成 27 年)9 月 12 日から「第 10 次モニタリング」を実施した。また、同年 10 月 2 日から福島原子力

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

2016 年度(平成 28 年度)については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2016 年(平成 28 年) 9 月 14 日から「第 11 次モニタリング」を実施した。また、同年 10 月 15 日から福島原子力発電所から 80 km 圏外を対象に「東日本第 7 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、関西電力大飯発電所並びに高浜発電所周辺及び四国電力伊方発電所周辺の航空機モニタリングを実施した。同年度の結果については、眞田他 (2018)^{20),21)}に詳しく報告されている。

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

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

2019 年度(令和元年度)については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2019 年(令和元年) 8 月 29 日から「第 14 次モニタリング」を実施した。また、同年 9 月 18 日から福島原子力発電所から 80 km 圏外を対象に「東日本第 10 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、東北電力東通原子力発電所並びに日本原燃六ヶ所再処理工場及び北陸電力志賀原子力発電所周辺の航空機モニタリングを実施した。同年度の結果については普天間他 (2021)^{26),27)}に詳しく報告されている。

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

2021 年度(令和 3 年度)については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2021 年(令和 3 年) 8 月 31 日から「第 16 次モニタリング」を実施した。また、同年 9 月 26 日から福島原子力発電所から 80 km 圏外を対象に「東日本第 12 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率データのアップデートを目的として、関西電力大飯発電所並び

に高浜発電所周辺の航空機モニタリングを実施した。同年度の結果については普天間他(2023)^{30),31)}に詳しく報告されている。

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

また、これらの継続的な航空機モニタリングと並行して、関連する技術開発を実施してきた。Table 2-2 に航空機モニタリングに関連する技術開発の経緯について示す。2011 年度(平成 23 年度)は基本的な航空機モニタリングの手法を確立し、2012 年度(平成 24 年度)はその手法をルーチン的に利用できる解析システムを開発した。特に、地表面から 1 m の高さの空間線量率や地表面における放射性 Cs の沈着量への換算パラメータについては、実際にデータを取得しつつ評価する必要があったため、得られた結果を基に考察し最適化を図った。また、バックグラウンドとなる天然の放射線との識別方法に関するパラメータの設定には試行錯誤を重ねた^{32),33)}。さらに、航空機モニタリングの換算手法は地表面が平面で空間線量率が一様であると仮定しているため、山や谷などの地形が複雑な場所での精度が懸念されていたことから、地上の勾配を評価できるように 10 m メッシュの数値標高モデル(Digital Elevation Model: DEM)データの抽出ツールを開発した。本ツールにより、測定場所の直下に降ろした直線から 45°に降ろした直線と地表の交点内に含まれる DEM データを抽出し、測定場所の平均的な地表の高度を知ることができるようになり、測定場所の地形的勾配を評価できるようになった。

2013 年度(平成 25 年度)には、福島原子力発電所から 80 km 圏内の谷や山地形等の特徴的な地形の上空で航空機モニタリングデータを取得し、地形が航空機モニタリングデータに及ぼす影響に関する知見を取得した。さらに、高度な解析技術として、鳥居他^{34),35)}は DOE が事故直後に実施した航空機モニタリングデータの γ 線スペクトルをコベル法により再解析し、得られた I-131 のピーク面積からモンテカルロ計算コードにより地表面の沈着量に換算する手法を開発した。

2014 年度(平成 26 年度)には、NaI(Tl)シンチレーション式検出器(以下、NaI(Tl)検出器)で取得した γ 線スペクトルデータに関数フィッティング法を適用することにより、Cs-134 起源の 1,365 keV と K-40 起源の 1,461 keV の γ 線を弁別する手法を開発した。本手法は、放出エネルギーの近い人工放射性核種と自然放射性核種が形成する複合ピークの弁別に資するものであり、原子力発電所事故直後に人工放射性核種及び自然放射性核種の空間線量率を切り分けて評価するのに特に有用である。

2015 年度(平成 27 年度)には、空気中のラドン子孫核種に起因する γ 線計数率をより適切に減算することを目的として、空気中ラドン子孫核種から放出される γ 線を計測するための LaBr₃(Ce)シンチレーション式検出器(以下、LaBr₃ 検出器)を導入し、地表面から放出される γ 線と空気中ラドン子孫核種から放出される γ 線とのレスポンス差を利用して両者を弁別する基礎的な手法を構築した。本手法は 2016 年度(平成 28 年度)に航空機モニタリングの解析システムに組み込むとともに、福島原子力発電所から 80 km 圏外の航空機モニタリングデータに適用した。また 2015 年度(平成 27 年度)は、放射線計測とともにレーザー測量及び写真測量データを積雪の前後で取得し、積雪による放射線の減衰係数を評価した³⁶⁾。この手法により、事故直後に積雪があり放射線が遮蔽された場合においても一定の精度で航空機モニタリングが可能になった。

2016 年度 (平成 28 年度) には、測位精度の向上がなされた当時最新の全球測位衛星システム (以下、GNSS) を用いて航空機モニタリングを行い、既存の GNSS の性能と比較評価するとともに、測位精度が航空機モニタリングによる空間線量率の計算値に与える影響を評価した。

2017 年度 (平成 29 年度) には、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計算値を補正する手法を航空機モニタリングに適用できるようにシステム化した。

2018 年度 (平成 30 年度) には、地形の起伏を補正する手法を過去の航空機モニタリング結果に適用し、地上測定値を指標として従来手法と比較することにより、空間線量率の計算精度向上について定量的な評価を実施した。

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

2022 年度 (令和 4 年度) には、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 系で動作するよう更新した。これにより、解析システムの動作を高速化し、解析作業の更なる効率化を行った。

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯

(1/2)

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

※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
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	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 μ Sv/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	-
H30_BGモニタリング(1)	島根原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2018/07/20 ~07/27	-
第13次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2018/09/06 ~10/16	2019/03/08
東日本第9次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μ Sv/h以上)	JAEA OYO	JAEA OYO	2018/10/08 ~11/15	2019/03/08
H30_BGモニタリング(2)	浜岡原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2018/11/27 ~12/09	-
R1_BGモニタリング(1)	東通原子力発電所並びに六ヶ 所再処理工場から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2019/06/26 ~07/10	-
第14次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2019/08/29 ~09/18	2020/02/13
東日本第10次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μ Sv/h以上)	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)	美浜発電所並びに敦賀発電所 から80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2020/07/22 ~08/10	-
第15次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2020/08/25 ~10/02	2021/02/15
東日本第11次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μ Sv/h以上)	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並びに 京都大学複合原子力科学研 究所から80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2020/11/12 ~11/19	-
第16次モニタリング	福島原子力発電所から 80 km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	線量率の比較的高い場所 (0.2 μ Sv/h以上)	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)	美浜発電所並びに敦賀発電所 から80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2022/07/26 ~07/31	-
第17次モニタリング	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	線量率の比較的高い場所 (0.2 μ Sv/h以上)	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	-

※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

年	2011				2012				2013				2014				2015			
月	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	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5次モニタリング (06/22～06/28)				第7次モニタリング (08/27～09/28)				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)			
	第3次モニタリング (05/31～07/02)				第6次モニタリング (10/31～11/16)				第8次モニタリング (11/02～11/19)											
	警戒区域および計画的 避難準備区域 (4.5次) (02/06～02/10)				警戒区域および計画的 避難準備区域 (6.5次) (03/04～03/11)															
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～120km圏内 (05/18～05/26)				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6次モニタリング (10/02～11/04)			
	東日本第1次モニタリング 青森～福井・岐阜・愛知 (06/22～10/20)				東日本第2次モニタリング (04/02～05/07)				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

(1/2)

年 月	2016				2017				2018				2019				2020				2021				2022			
	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	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) 				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) 			
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) 				泊BG (07/24～08/02) 柏崎刈羽BG (07/26～08/10) および 09/30～10/01 				浜岡BG(11/27～12/09) 島根BG(07/20～07/27) 東日本第9次モニタリング (10/08～11/15) 				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) 				大飯・高浜BG (11/06～11/20) 東日本第12次モニタリング (09/26～10/25) 				伊方BG (11/11～11/21) 美浜・敦賀BG (07/26～07/31) 東日本第13次モニタリング (09/13～10/21) 			

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績

 $(2/2)$

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	航空機モニタリングで取得したデータを地表面から1 mの高さの空間線量率に換算するためのパラメータの最適化等、基本的な航空機モニタリングの解析手法を構築した。
2012 (H24)	航空機モニタリング解析システムの開発	2011年度に開発した手法をルーチ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	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	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	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 線スペクトルをコペ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。
	人工放射性核種と天然放射性核種の弁別評価手法の開発	スペクトルデータに関数フィッティング法を適用することにより、Cs-134起源の 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	LaBr ₃ 検出器を導入してデータを取得し、航空機モニタリングデータから空気中ラドン子孫核種に起因する 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。
	積雪の影響評価手法の開発	放射線計測とともにレーザー測量および写真測量データを積雪の前で取得し、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	空気中ラドン子孫核種に起因する γ 線計数率の減算システムを構築し、航空機モニタリングの解析システムに組み込むとともに、福島原子力発電所から80 km圏外の航空機モニタリングデータに適用した。
	GNSSの精度評価	測位精度の向上がなされた、当時最新のGNSSを用いて航空機モニタリングを行い、既存のGNSSの性能と比較評価するとともに、測位精度が航空機モニタリングによる空間線量率の計算値に与える影響について評価した。
2017 (H29)	地形の起伏を考慮した補正手法のシステム化	Ishizaki et al. (2017) ³⁷⁾ が開発した、地形の起伏を考慮して空間線量率の計算値を補正する手法を航空機モニタリングに適用できるようにシステム化した。
2018 (H30)	地形の起伏を考慮した補正手法による空間線量率計算精度の向上評価	地形の起伏を考慮した補正手法を過去の航空機モニタリング結果に適用し、地上測定値を指標として従来手法と比較することにより、空間線量率の計算精度の向上について定量的な評価を実施した。
2019(R1)	地形の起伏を考慮した補正手法の航空機モニタリング解析システムへの組み込み	地形の起伏を考慮した補正手法をの航空機モニタリング解析システムに組み込むとともに、福島原子力発電所から80 km圏内のデータに適用した。
2022(R4)	航空機モニタリング解析システムの更新	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系で動作するよう更新した。

3. 測定システムとヘリコプター

3.1. 航空機モニタリングシステム

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

今回のモニタリングで使用した Radiation Solutions Inc. (RSI, Canada) 製のシステム (以下、RSI システム) は、福島原子力発電所事故当時に DOE により行われた航空機モニタリングで用いられたシステムと同一であり、ヘリコプター機内に搭載するタイプである。RSI システムのブロック図を Fig. 3-1 に示し、外観を Fig. 3-2 に示す。検出部には、2"× 4"× 16"の NaI(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 検出器 (RSX-1) は空気中のラドン子孫核種に起因する γ 線計数率の弁別 (8 章に詳述する) に使用する。検出器で計測した 1,024 ch (0 ch~1023 ch) の γ 線のスペクトルは 1 秒ごとに同期する GPS による位置データとともに、RS-701 と呼ばれる NaI(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。各検出器のデータは RS-501 という装置で統合される。RS-501 は PC と接続でき、PC にインストールされている専用のソフトウェア (RadAssist) を使用することによって GPS による位置情報や γ 線の計数率情報をリアルタイムに確認できる。また、RSI システム全体は外付けのバッテリーで駆動し、完全充電で約 5 時間の稼働が可能である。本報告で使用した RSI システムは 2 セットあるため、以下ではそれぞれ RSI 1 及び RSI 2 と区別する。

また、RSI システムの GPS 受信機とは独立して高精度 GPS システムも機内に搭載している。当該システムでは高精度 GPS 受信機 (CORE 社製 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²²⁾。そのような事象が起きた際には、位置情報を高精度 GPS で取得された緯度、経度及び高度に置換する。

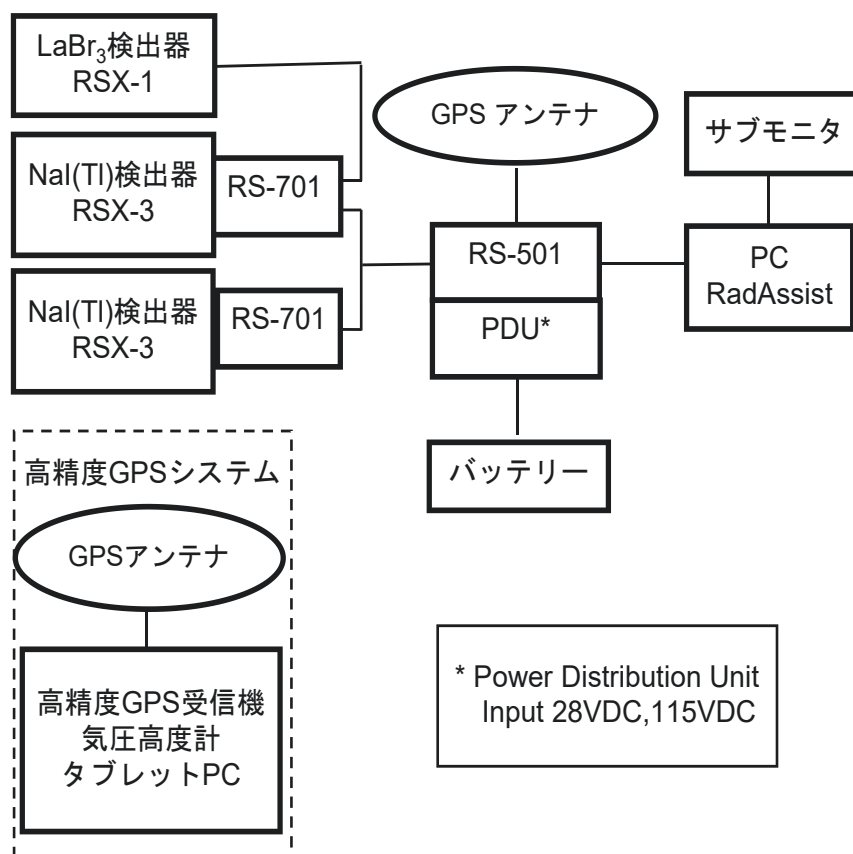


Fig. 3-1 RSI システムのブロック図

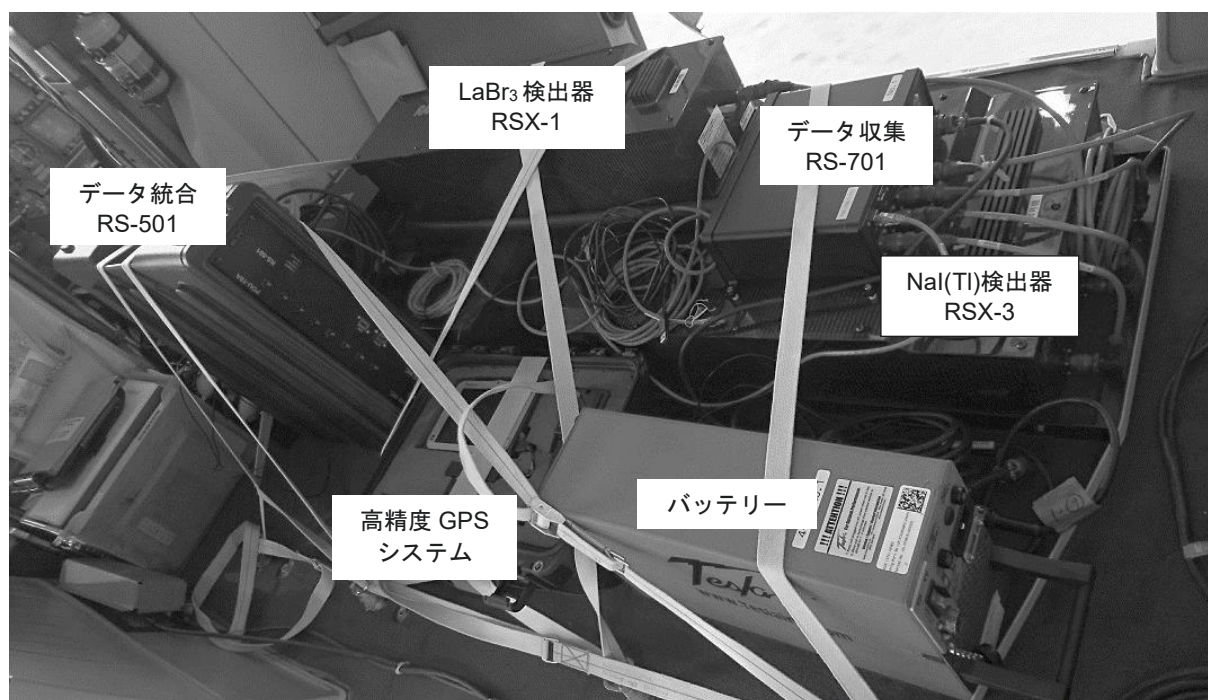


Fig. 3-2 RSI システムの外観

3.2. ヘリコプターの選定

RSI システムはヘリコプター機内に搭載するタイプであるため、ヘリコプターの機底に燃料タンクがある場合、燃料タンクの材料及び燃料による γ 線の遮蔽効果を考慮する必要がある。そこで、 γ 線の測定値への誤差の混入を避けるため、ヘリコプターは機底に燃料タンクのないものに限定した。選定した機種について、Fig. 3-3 に示す。また、2012 年以降の航空機モニタリングで使用了機種 (機体番号) と RSI システムの組み合わせを Table 3-1 に示す。2022 年度 (令和 4 年度) は機体繰りの都合から、Bell412 (JA9616、JA6928 及び JA412N)、Bell430 (JA05TV) を使用した。なお、Bell412 (JA412N) は原子力機構が行う航空機モニタリングにおいて初めて使用する機体である。



Bell430

ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



Bell412

ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



AS332

アエロスパシアル社製



S-76

シコルスキー・エアクラフト社製

Fig. 3-3 機底に燃料タンクのないヘリコプター機種一覧

Table 3-1 搭載した RSI システムとヘリコプターの組み合わせ

(1/2)

年度	モニタリング名	モニタリング期間	搭載したRSIシステムとヘリコプター機種(機体番号)の組み合わせ					
			RSI 1		RSI 2		RSI 3	
2012	第5次モニタリング	2012/06/22 ～06/28	Bell430 (JA05TV)	NNK	AS332 (JA9660)	NNK		
	第6次モニタリング	2012/10/31 ～11/16	Bell430 (JA6900)	AAC				
	東日本第3次モニタリング	2012/10/31 ～12/28	Bell412 (JA6767)	NNK	Bell430 (JA05TV)	NNK		
	警戒区域及び避難指示区域における航空機モニタリング(第6.5次)	2013/03/04 ～03/11	Bell412 (JA6767)	NNK				
2013	第7次モニタリング	2013/08/27 ～09/28	Bell430 (JA6900)	AAC	Bell412 (JA6928)	AAC		
			Bell412 (JA6767)	NNK	Bell430 (JA05TV)	NNK		
	東日本第4次モニタリング	2013/09/03 ～11/04	Bell430 (JA6900)	AAC	Bell430 (JA05TV)	NNK		
			Bell412 (JA6767)	NNK				
2014	第8次モニタリング	2013/11/02 ～11/19	Bell430 (JA6900)	AAC	Bell430 (JA05TV)	NNK		
	第9次モニタリング	2014/09/01 ～09/20	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6928)	AAC		
	東日本第5次モニタリング	2014/09/21 ～11/07	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6767)	NNK		
					Bell412 (JA6928)	AAC		
2015	第10次モニタリング	2015/09/12 ～09/30	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6928)	AAC		
	東日本第6次モニタリング	2015/10/02 ～11/04	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6767)	NNK		
					Bell412 (JA6928)	AAC		
	川内原子力発電所BGモニタリング	2016/02/01 ～02/07					Bell412 (JA6928)	AAC
2016	大飯・高浜発電所BGモニタリング	2016/07/20 ～08/01					Bell412 (JA9584)	AAC
	第11次モニタリング	2016/09/14 ～10/15	Bell430 (JA05TV)	NNK	S-76 (JA6901)	AAC		
	東日本第7次モニタリング	2016/10/15 ～11/18	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6767)	NNK		
					Bell412 (JA9616)	AAC		
2017	伊方発電所BGモニタリング	2016/11/29 ～12/11					Bell430 (JA05TV)	NNK
	泊発電所BGモニタリング	2017/07/24 ～08/02					Bell412 (JA6767)	NNK
	柏崎刈羽原子力発電所BG モニタリング	2017/07/26 ～08/10 2017/09/30 ～10/01						Bell430 (JA05TV) NNK
	第12次モニタリング	2017/09/09 ～09/25	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA9616)	AAC		
	東日本第8次モニタリング	2017/09/29 ～11/16	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6767)	NNK		
					Bell412 (JA9616)	AAC		
2017					Bell412 (JA6928)	AAC		
	玄海原子力発電所BGモニタリング	2017/11/28 ～12/05					S-76 (JA6655)	AAC

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

Table 3-1 搭載した RSI システムとヘリコプターの組み合わせ
(2/2)

年度	モニタリング名	モニタリング期間	搭載したRSIシステムとヘリコプター機種(機体番号)の組み合わせ			
			RSI 1	RSI 2	RSI 3	RSI 4
2018	島根原子力発電所BGモニタリング	2018/07/20 ～07/27			Bell430 (JA6900) AAC	
	第13次モニタリング	2018/09/06 ～10/16	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell430 (JA6900) AAC		
	東日本第9次モニタリング	2018/10/08 ～11/15	Bell430 (JA05TV) S-76 (JA6655) AAC	Bell412 (JA6767) NNK Bell430 (JA05TV) NNK		
	浜岡原子力発電所BGモニタリング	2018/11/27 ～12/09			Bell430 (JA05TV) NNK	
2019	東通・六ヶ所BGモニタリング	2019/06/26 ～07/10			Bell430 (JA6900) AAC	
	第14次モニタリング	2019/08/29 ～09/18	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell 412 (JA9616) AAC		
	東日本第10次モニタリング	2019/09/18 ～11/02	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA9616) AAC Bell412 (JA6767) NNK		
	志賀原子力発電所BGモニタリング	2019/11/21 ～11/29			Bell430 (JA6900) AAC	
2020	美浜・敦賀BGモニタリング	2020/07/22 ～08/10			Bell412 (JA9616) AAC	
	第15次モニタリング	2020/08/25 ～10/02	Bell430 (JA05TV) NNK Bell412 (JA6767) NNK	Bell412 (JA6928) AAC		
	東日本第11次モニタリング	2020/09/22 ～10/30	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA6928) AAC Bell412 (JA6767) NNK		
	近大炉・京大炉BGモニタリング	2020/11/12 ～11/19			Bell412 (JA6928) AAC	
2021	第16次モニタリング	2021/08/31 ～10/03	Bell430 (JA05TV) NNK Bell412 (JA6767)	Bell430 (JA02AX) AAC		
	東日本第12次モニタリング	2021/09/26 ～10/25	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell430 (JA02AX) AAC Bell412 (JA6767) NNK		
	大飯・高浜BGモニタリング	2021/11/06 ～11/20			Bell412 (JA6928) AAC	
2022	美浜・敦賀BGモニタリング	2022/07/26 ～07/31			Bell430 (JA02AX) AAC	
	第17次モニタリング	2022/09/01 ～09/30	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA9616) AAC Bell412 (JA6928) AAC		
	東日本第13次モニタリング	2022/09/13 ～10/21	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA6928) AAC Bell412 (JA412N) NNK		
	伊方BGモニタリング	2022/11/11 ～11/21			Bell412 (JA9616) AAC	

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

3.3. 機体による γ 線遮蔽効果

ヘリコプターは機底に燃料タンクのない機種を選定しているが、機種による機底の材質や構造の差異により、 γ 線の遮蔽の程度は異なると考えられる。ここでは、 γ 線遮蔽効果を把握するために点線源 (Cs-137：約 9.5 MBq) を用いて RSI システム検出器で測定した計数率を比較した。地上における空間線量率等への換算パラメータを設定する際に、ヘリコプター機種ごとにキャリブレーション (校正) を実施するため、この遮蔽効果の違いを単独でパラメータとして扱う必要はないが、使用するヘリコプターが γ 線計数率にどのような影響を及ぼし、それがヘリコプター機種ごとに設定する換算パラメータにどのような差異を生むのかを把握するのに参考となる情報である。

ヘリコプター機体の遮蔽効果の比較結果を Table 3-2 に示す。点線源と検出器の距離を 50 cm に固定し、計数率の測定時間平均値及び計数誤差 (計数率の平方根) を比較した。ただし、Bell412 (JA412N) については機体の構造の関係上、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位置の関係について Fig. 3-4 に示す。以下に比較結果の詳細を記す。

RSI 1 を用いた場合の Bell430 (JA05TV) における計数率 (No.1 と表記) を基準として、RSI 2 を用いた場合の Bell412 (JA9616) における計数率 (No.2 と表記)、Bell412 (JA6928) における計数率 (No.3 と表記) 及び Bell412 (JA412N) における計数率 (No.4 と表記) をそれぞれ比較した。No.1 に対して、No.2 の計数率は約 5 %、No.3 の計数率は約 13 %、No.4 の計数率は約 33 %低かった。No.4 は点線源と RSI システム検出器の距離が 50 cm でなく 90 cm であるため、計数率が顕著に低くなったと考えられる。いずれにせよ、これらの計数率差に対して計数誤差は圧倒的に小さいことから、No.1 と No.2、No.3 で見られた差異には、Bell430 と Bell412 の機体底部の構造の違いに起因する γ 線遮蔽効果の差異が強く関与していると思われる。同じヘリコプター機種及び RSI 検出器を用いた場合における計数率 (No.2 と No.3) に着目し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 線計数率の多寡に影響を及ぼすと考えられる。よって、今後も今回のような線源試験を実施し、使用する機種及び機体間の γ 線計数率差をなるべく小さくできるような配置を決定することが望ましい。

Table 3-2 Cs-137 線源によるヘリコプター機体の遮蔽効果の比較
(検出器から 50 cm または 90 cm 下方に線源を配置)

No.	Date	System	ヘリコプター機種及び機番 (運航会社)	Cs-137線源と検出器 の距離(cm)	計数率(s^{-1}) $\pm$ 計数誤差(s^{-1})	No.1を1に規格化
1	2022/08/29	RSI 1	Bell430 (JA05TV) (NNK)	50	(3.535 $\pm$ 0.006) $\times 10^5$	1.00
2	2022/08/29	RSI 2	Bell412 (JA9616) (AAC)	50	(3.352 $\pm$ 0.006) $\times 10^5$	0.95
3	2022/09/12	RSI 2	Bell412 (JA6928) (AAC)	50	(3.084 $\pm$ 0.006) $\times 10^5$	0.87
4	2022/10/08	RSI 2	Bell412 (JA412N) (NNK)	90	(2.363 $\pm$ 0.005) $\times 10^5$	0.67

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社
※計数率は自然放射性核種による寄与を差し引き、有効数字5桁目で四捨五入して有効数字4桁で表記した。

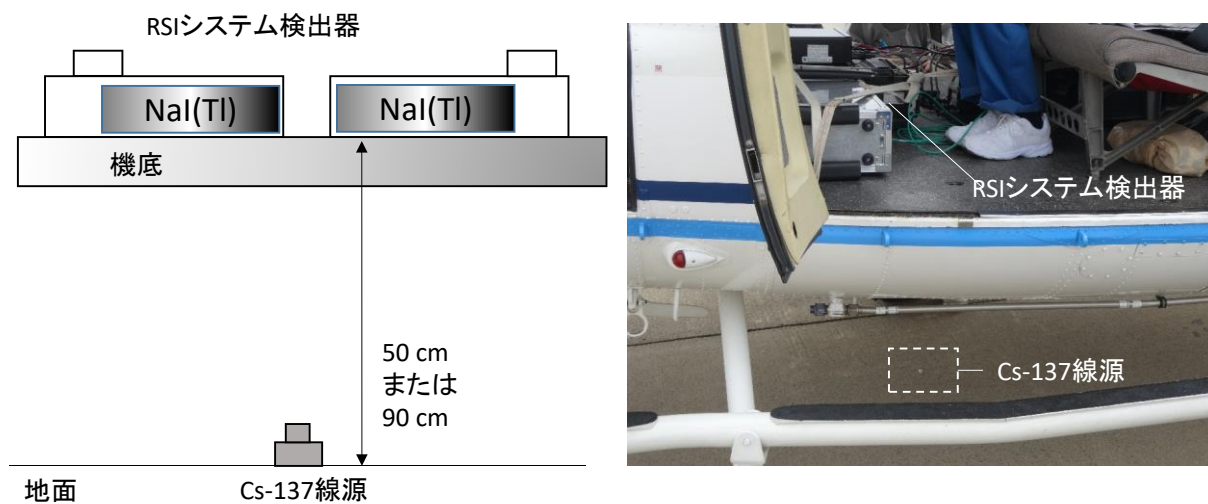


Fig. 3-4 線源試験イメージ

3.4. RSI システムの保守

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

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

2,614 keV のピークに対するエネルギー分解能については、メーカーから 6 %以下という保守の推奨値が示されている。日常の点検で数値を確認し、この推奨値を超えた場合には高圧電源の電圧を変更するなど再調整を実施する。また、アンプのゲインについては、同様にメーカーから示されている推奨値である 0.8 を下回る場合に高圧電源の電圧の再調整を行う。第 17 次モニタリング及び東日本第 13 次モニタリングの実施期間における RSI システム検出器のエネルギー分解能とアンプのゲインの推移について Fig. 3-5 及び Fig. 3-6 に示す。本図は、RSI システムに組み込まれている計 6 本の検出器ごとに示している。エネルギー分解能はモニタリング期間を通じて 6 %未満であり、アンプのゲインが 0.8 を下回ることがなかったため、再調整を実施する必要性は生じなかった。なお、ゲインは測定日を経るにつれて緩やかな上昇傾向にあるが、これは機器の異常ではなく、測定日が夏から秋に移り変わり、周囲の気温が低下するにつれて RSI システム自体の温度上昇も鈍くなることで、光電子増倍管に使用される電子素子のインピーダンスが減少しゲインが上昇するという、温度特性が反映されていると考えられる。RSI システムには一定期間ごとに自動でゲインを補正する機能があり、この温度特性はある程度までは補正可能である。また、実際には取得したデータを確認し、エネルギーピークの位置に変動がないことを確認している。

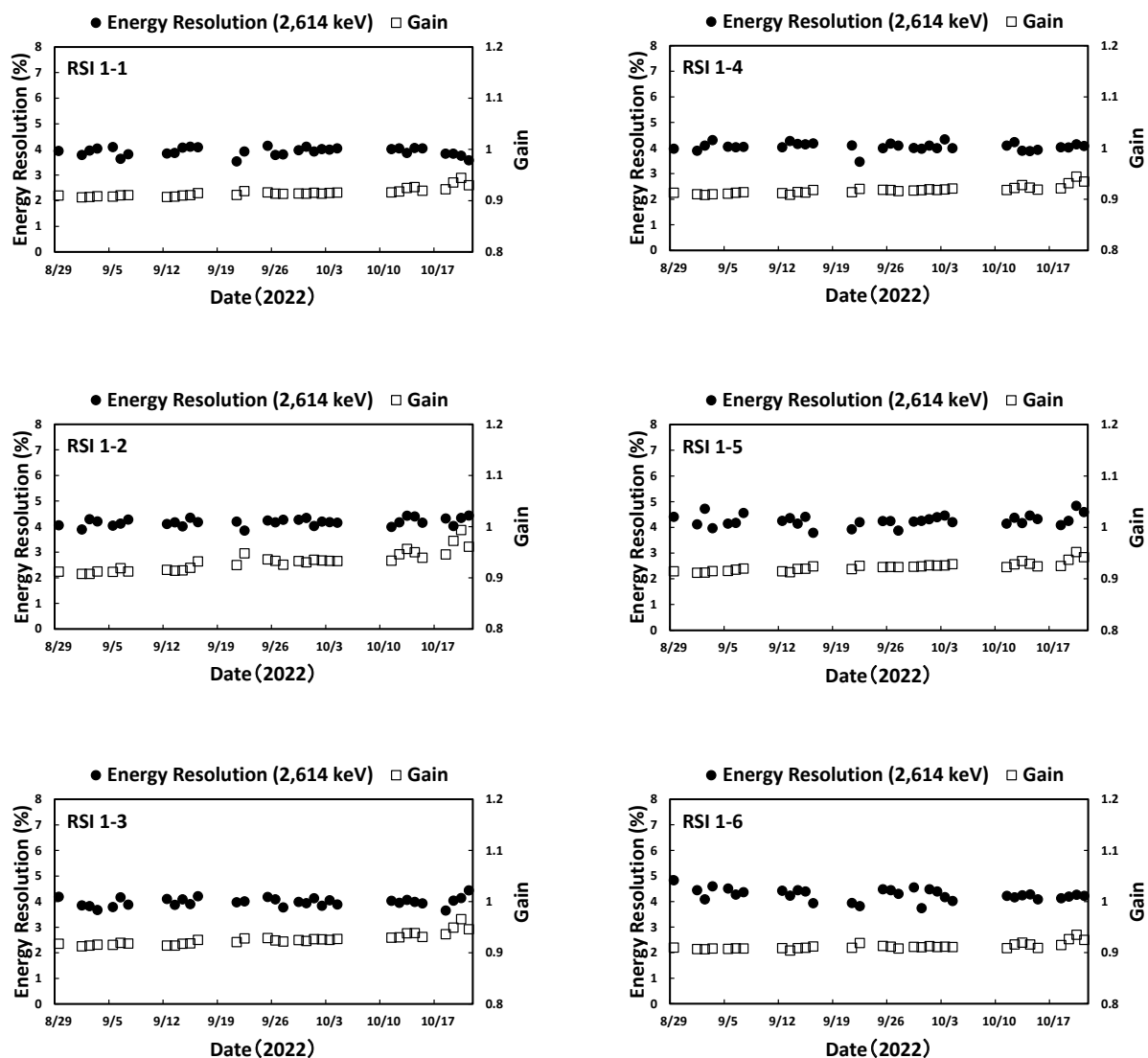


Fig. 3-5 RSI システムのエネルギー分解能及び Gain の変動 (RSI 1)

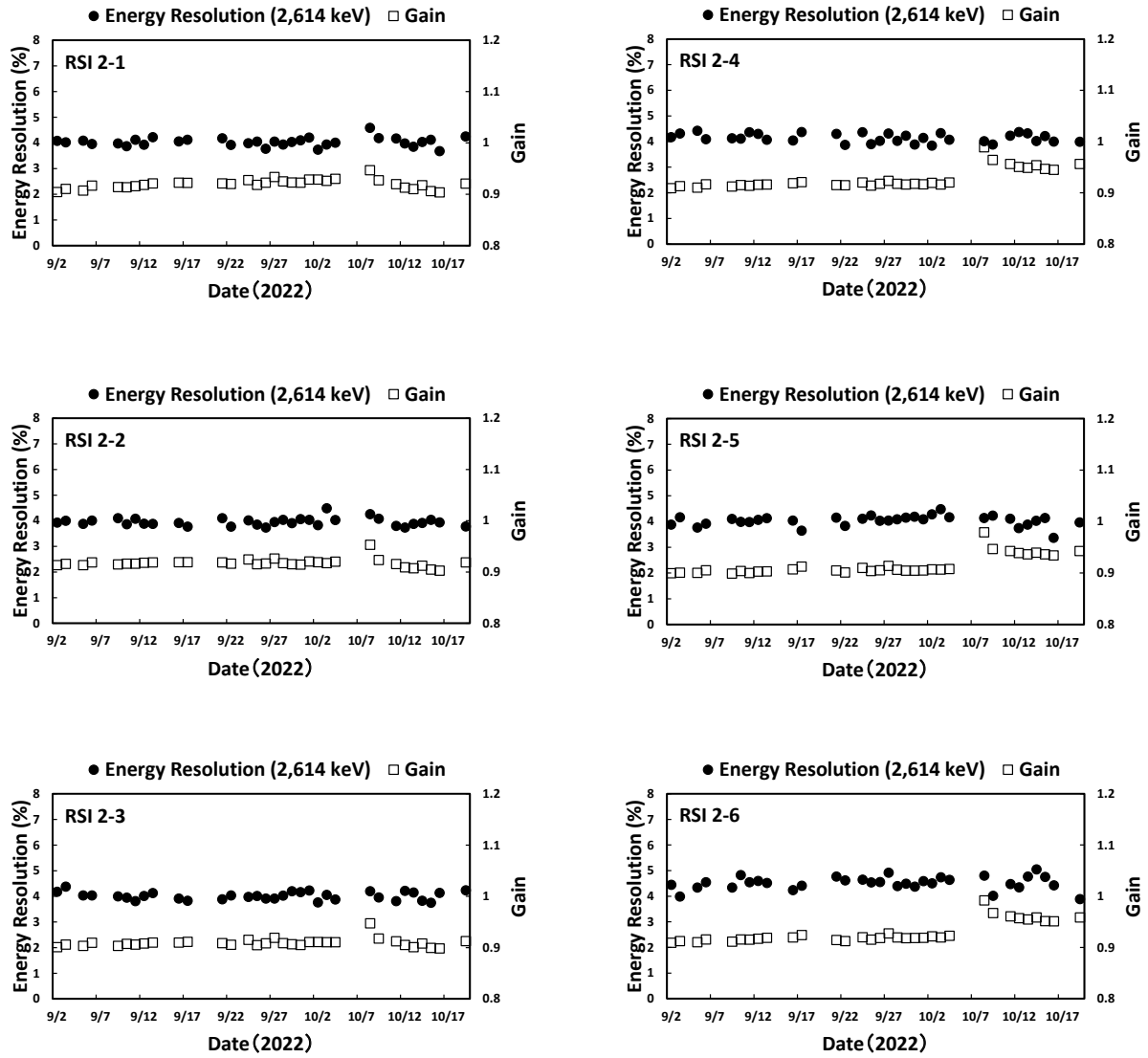


Fig. 3-6 RSI システムのエネルギー分解能及び Gain の変動 (RSI 2)

4. データ取得及び解析方法

4.1. 上空での測定値の地上への換算に関する基本的な考え方

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

- ・上空で測定されている計数値は、上空を頂点とし対地高度を高さとした円錐の底面部分に該当する地上の放射線量の平均値とする。
- ・測定対象となる地表は平坦かつ放射線の分布は一様とする。

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

当該計算では、Cs-134 と Cs-137 が無限平板 (実際の計算では、無限相当とした半径 2,000 m × 高さ 1 mm) で均一に分布していると仮定し、対地高度と空間線量率の関係が求められた (Fig. 4-1)。このように、対地高度 50 m 以上では、空間線量率と対地高度は指数の相関関係にある一方で、対地高度 50 m 以下では指数の関係から外れることが明らかとなった。また、対地高度 50 m 以上では地表面からの放射線が検出器軸 (地面と平行な方向) に対し垂直方向から入射する成分が支配的であるため、線源からの距離に対して指数関数的に γ 線が減衰する。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¹⁷⁾を示す。光子・電子挙動シミュレーションには、カスケードモンテカルロ計算コード 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³²⁾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 円柱線源が模擬された。当該シミュレーションでは、モデル化した検出器を線源円盤の中心軸上に配置し、線源円盤と検出器の距離を変化 (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、航空機モニタリングの基準高度である 300 m から計測した場合、線源の概ね 300 m の円内の放射線の計数が 80 %以上の割合を占めることが分かる。また、検出器の位置から同軸上の線源位置を中心として、100 m ごとのドーナツ状の面積で分割し、その部分の放射線が検出器で計数された割合を 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 300m 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、検出器と線源の距離が 100 m の場合は線源半径が 200 m、500 m の場合は線源半径が 400 m であり、この傾向は Fig. 4-1 で示された対地高度と上空での空間線量率の関係と矛盾せず、高度が低くなるにつれ

て高度と測定範囲の半径の関係が 1 : 1 から逸脱し、対地高度と比較して測定範囲が広くなることが示された。

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

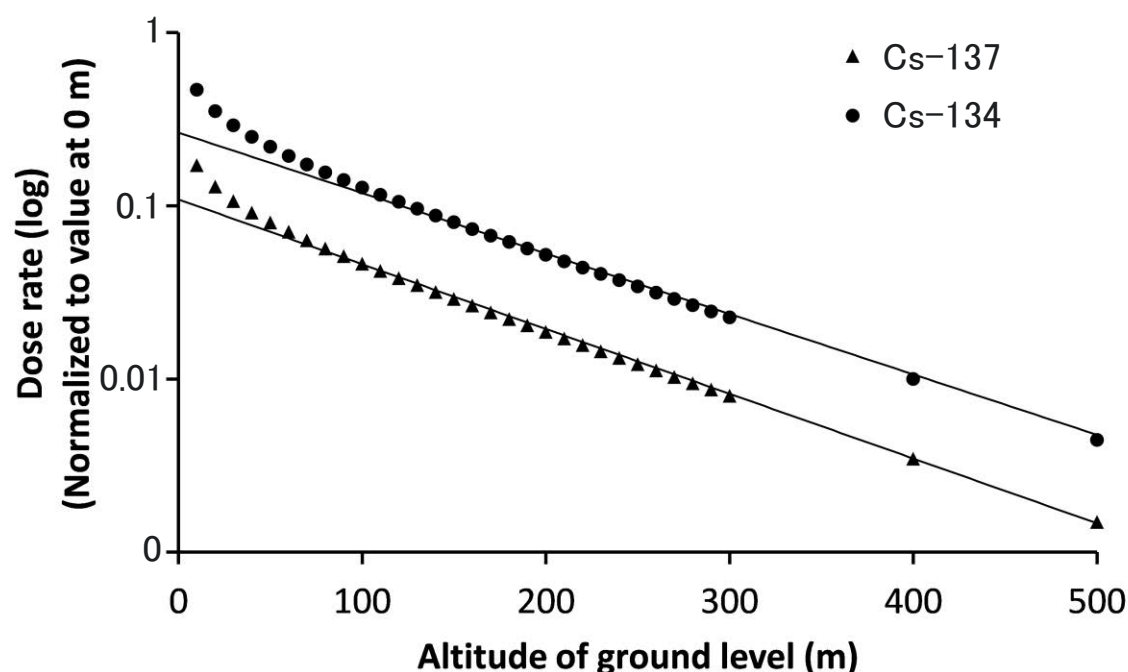


Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係¹⁷⁾

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

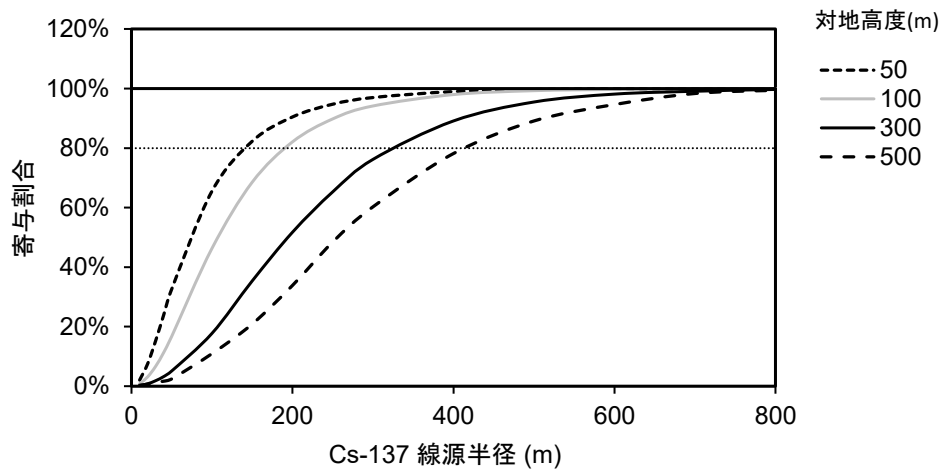


Fig. 4-2 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の積算計数に対する線源位置の関係 ¹⁷⁾
(上空での検出器の計数率を 100 % に規格化し、線源半径由来の計数率の割合を積算)

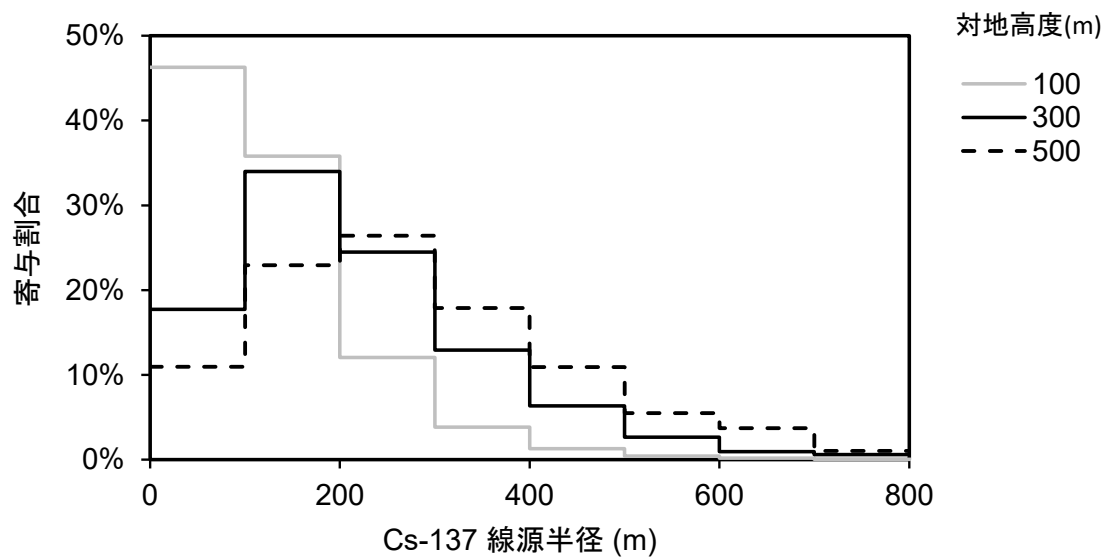


Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の線源位置ごとの計数の割合 ¹⁷⁾
(上空での検出器の計数率を 100 % に規格化し、100 m ごとのドーナツ状部分由来の計数率の割合)

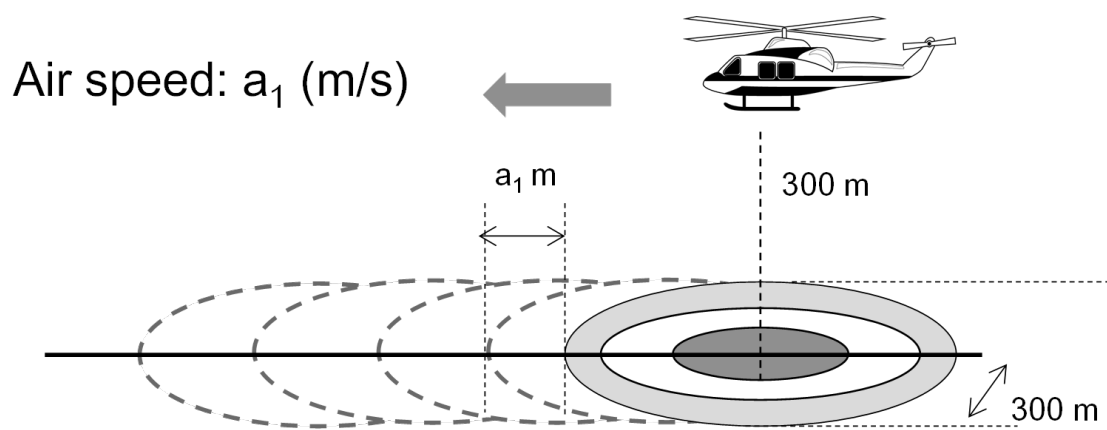


Fig. 4-4 上空からの測定イメージ

4.2. 航空機モニタリングの方法

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

航空機モニタリングによるデータは、下記のようなフライト条件で取得した。なお、条件は、気象条件や地形の高度勾配によって若干変化する。フライトイメージを Fig. 4-5 に示す。また、測定データは、1 秒ごとに GPS の位置情報と検出器の γ 線のスペクトルを記録し、下記の対地高度の許容範囲から逸脱した測定データは不確かさが比較的大きく含まれるため、空間線量率等の算出には用いないこととした。予定したフライト測線について Fig. 4-6 に示す。測線の方向は第 17 次モニタリングについては東西方向、東日本第 13 次モニタリングについては南北方向とした。

[フライト条件]

- 速度：160 km/h を基準とし、130 km/h～180 km/h の範囲
- 基準対地高度：300 m (= 1,000 ft)
- 対地高度の許容範囲：0 m～約 500 m (= 1,750 ft)
- 測線間隔
 - ・ 第 17 次モニタリング (福島原子力発電所から半径 3 km 以内及び海上を除く)
 - 0.6 km：2011 年 9 月 30 日時点における避難指示区域 (以下、旧避難指示区域)
 - 0.9 km：0.2 $\mu\text{Sv/h}$ (約 1.0 mSv/年 相当、5.2 節に詳述する。) 以上の地域
 - 1.8 km：その他の地域
 - ・ 東日本第 13 次モニタリング
 - 1.0 km：0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 以上の地域
 - 3.0 km または 6.0 km：その他の地域

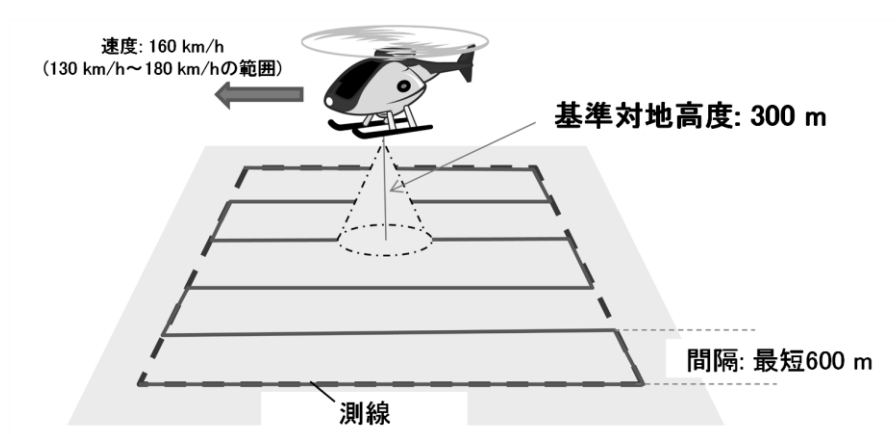


Fig. 4-5 フライトイメージ

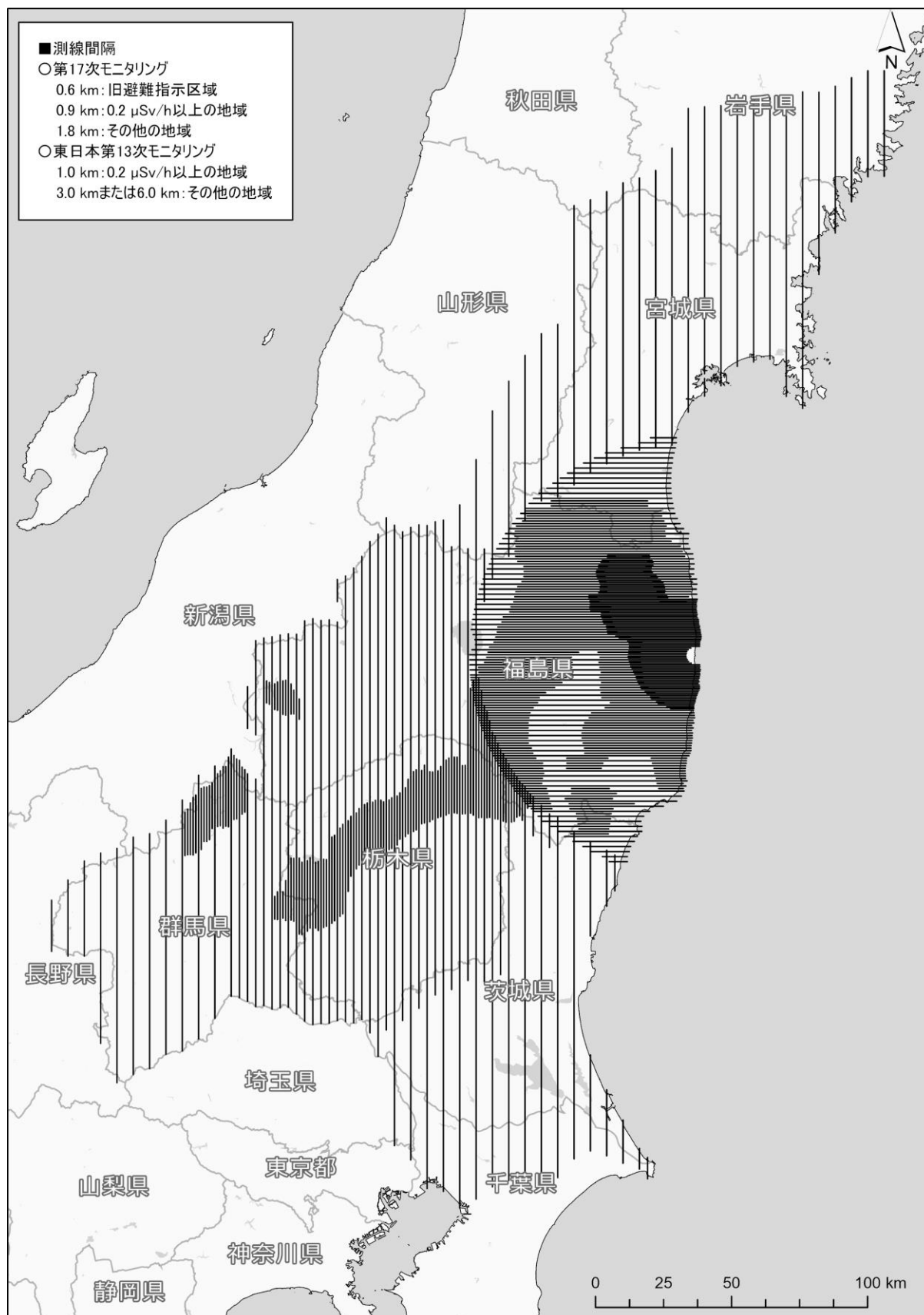


Fig. 4-6 予定したフライトの測線

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

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

航空機モニタリングにより上空で取得した 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、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、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及びBell430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。ここで、3.2節で記述したように、Bell412(JA412N)は航空機モニタリングで初めて使用する機体であることから、キャリブレーションフライトのデータを実際に取得し、従来用いているBell412に対する数値パラメータをそのまま適用することが妥当であるか否かを検討する必要がある。しかしながら、5.1節に詳述するが、当該機体にトラブルが発生したため、キャリブレーションフライトを実施できず、十分な検討材料を得られなかったため、他のBell412と同様のパラメータを適用する方針とした。

・テストラインフライト

実際のフライト対地高度と基準対地高度とのずれによって生じる γ 線計数率の多寡を補正するための実効的な空気減弱係数(Attenuation Factor: AF (m^{-1}))を求めるフライトである。本フライトは、線量率や地形の変化が少ない地点において距離が約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. 4-7に示す。また、テストラインとして選定した場所についてFig. 4-8に示す。

・テストポイントフライト

空間線量率の勾配が小さく、かつ地形の平坦な地点(テストポイント)を選定し、テストポイントから半径1,000 mの範囲内において、対地高度300 mを維持して3分間ホバリングして γ 線計数率を取得するものである。また、テストポイントの中心点から半径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. 4-9にテストポイントフライトのイメージを示す。また、テストポイントとして選定した場所をFig. 4-10に示す。

- 宇宙線フライト

宇宙線の影響を差し引くため、地上からの γ 線の影響が極めて少ないと考えられる海上を約 300 m～2,400 m まで上昇し、宇宙線に起因する γ 線計数率データを取得するものである。宇宙線フライトのイメージを Fig. 4-11 に示す。フライト場所は、陸地から十分に離れた海上であれば場所は問わないので、天候等を見ながら太平洋上の適当な位置で実施する。ただし、天候等の問題で海上への移動が困難な状況下では、起伏の少ない陸地において当該フライトを実施する。なお、陸地で実施した場合でも対地高度約 300 m から 2,400 m まで上昇するが、地上からの放射線の影響がほとんどないと考えられる対地高度約 900 m 以上で取得された γ 線計数率データを原則として用いることになる。

- Rn 影響フライト及び BG フライト

Rn 影響フライトは空気中に存在するラドン子孫核種の影響を考察するために、ある特定の場所（例えば、測定拠点近くの測線上）の上空において対地高度約 450 m～900 m までを直線的に上昇しデータを取得するものである。また、BG フライト（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. 4-12 に示す。

- 天然核種フライト

福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs による影響のないと考えられる場所において対地高度約 300 m をフライトすることによりデータを取得し、 γ 線スペクトルから天然放射性核種の影響を差し引き、地表面の放射性 Cs 沈着量を算出するためのスペクトルインデックスを算出するものである。天然放射性核種による影響の減算方法については4.6.1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。前述の通り、Bell412 (JA412N) は航空機モニタリングにおいて使用実績がないため、当該機体を用いて天然核種フライトを実施した。天然核種フライトの場所を Fig. 4-13 (左) に示す。

- オーバーラップフライト

各ヘリコプター機種または機体に設定される換算パラメータの妥当性評価を行うために、RSI システムとヘリコプター機種または機体の組み合わせの変更が生じる前後で、同一の場所をフライトして取得した γ 線計数率データを比較するものである。本フライトは、他のキャリブレーションとは異なり、換算パラメータの取得が目的でなく、実際に解析に用いる換算パラメータの妥当性を検証することを目的としている。オーバーラップフライトの場所を Fig. 4-13 (中央及び右) に示す。

Table 4-1 キャリブレーションフライトの概略

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

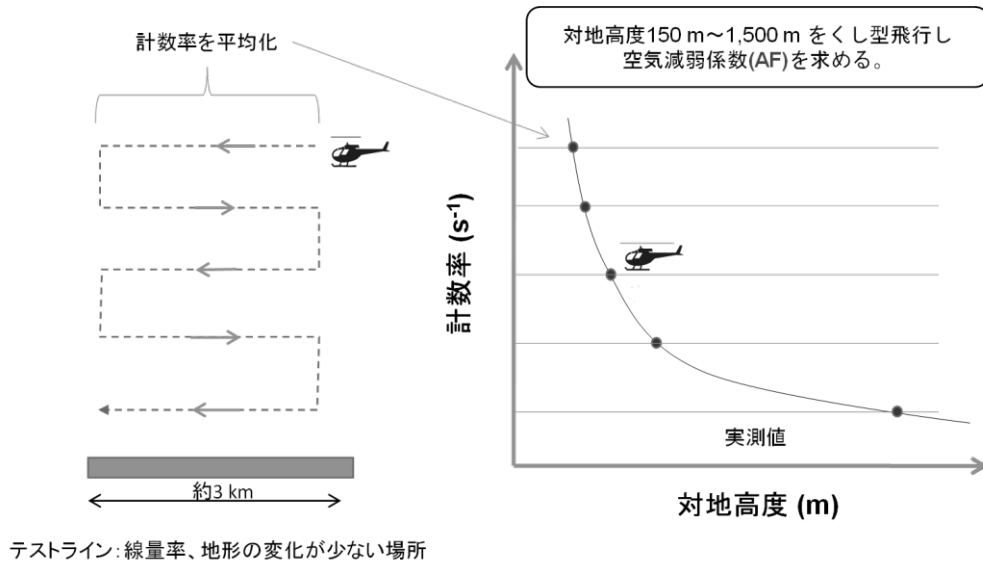
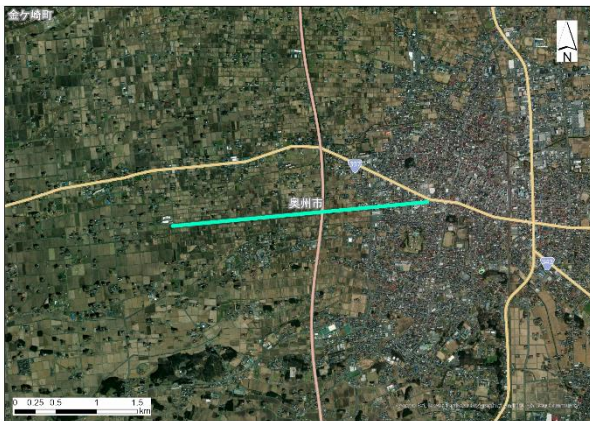
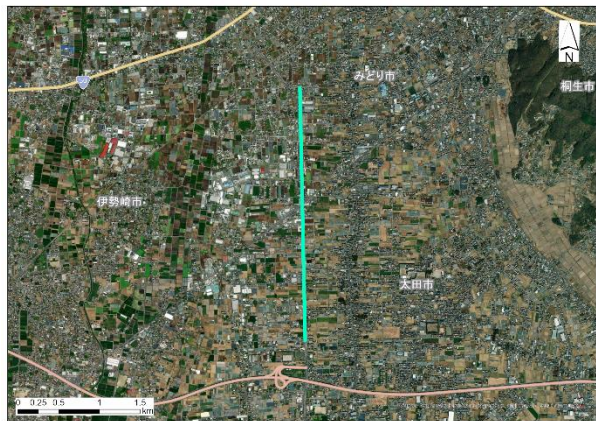


Fig. 4-7 テストラインフライトのイメージ



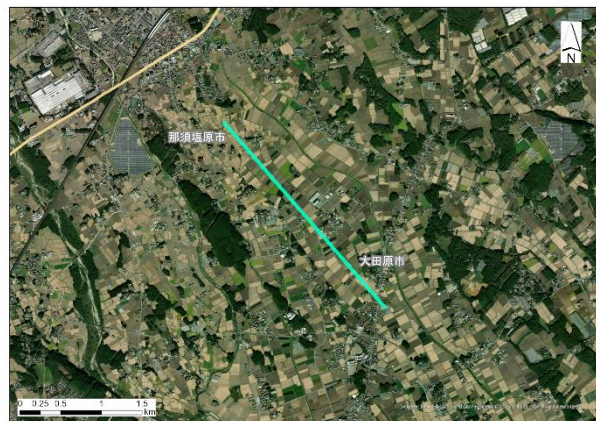
TestLine 1 (岩手県奥州市)



TestLine 3 (群馬県みどり市)



TestLine 4 (茨城県那珂市)



TestLine 5 (栃木県大田原市)

Fig. 4-8 テストラインの場所

(1/2)

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

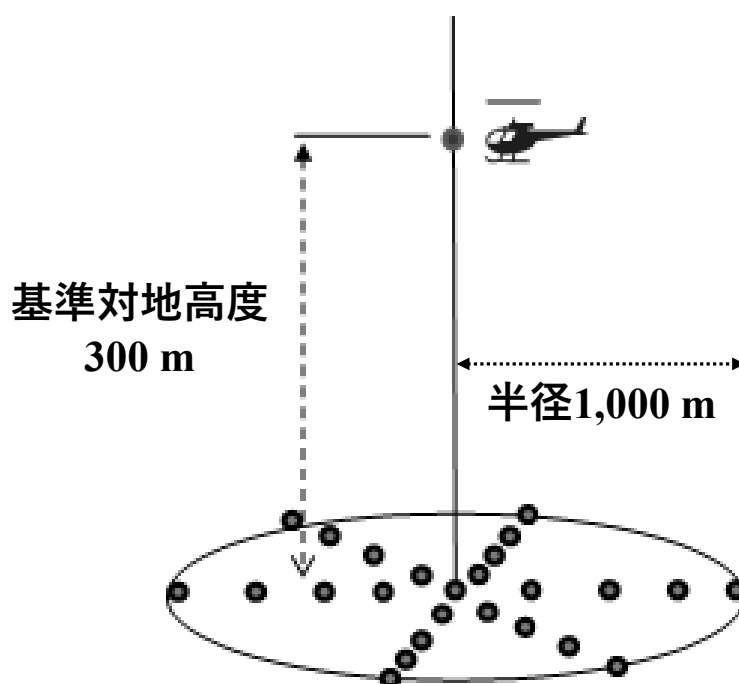


TestLine A (福島県須賀川市)

Fig. 4-8 テストラインの場所

(2/2)

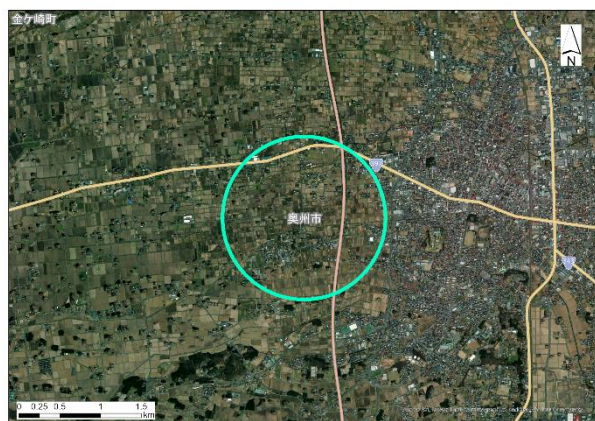
(背景地図は、Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community を使用。)



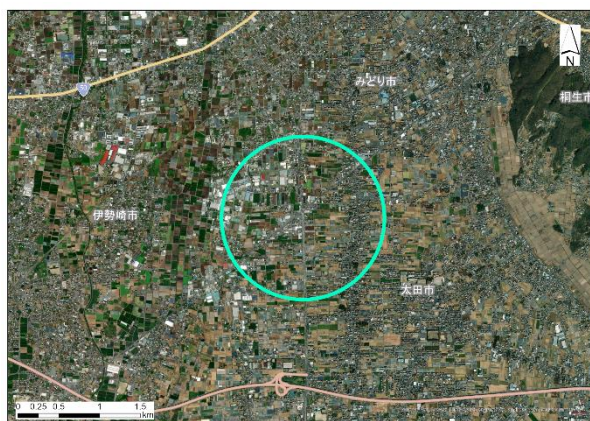
60地点を目安に地表面から1 mの高さの空間線量率($\mu\text{Sv/h}$)を測定する。

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。

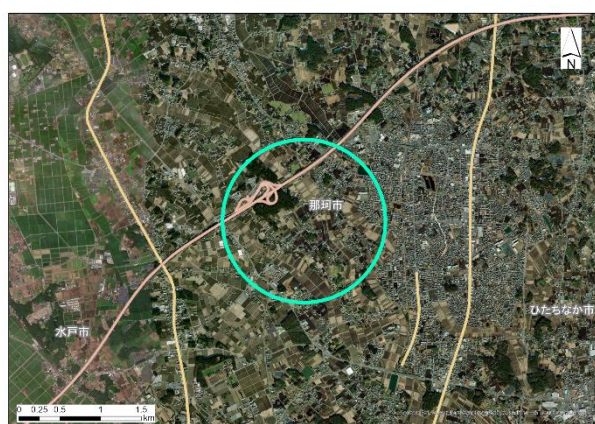
Fig. 4-9 テストポイントフライトのイメージ



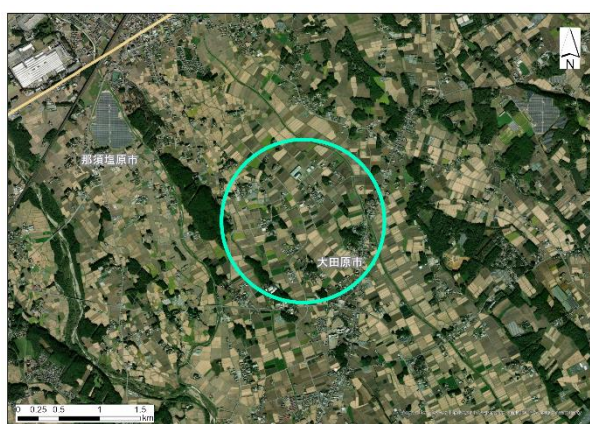
TestPoint 1 (岩手県奥州市)



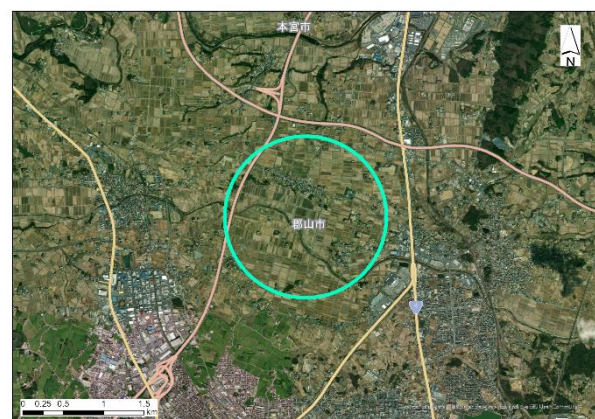
TestPoint 3 (群馬県みどり市)



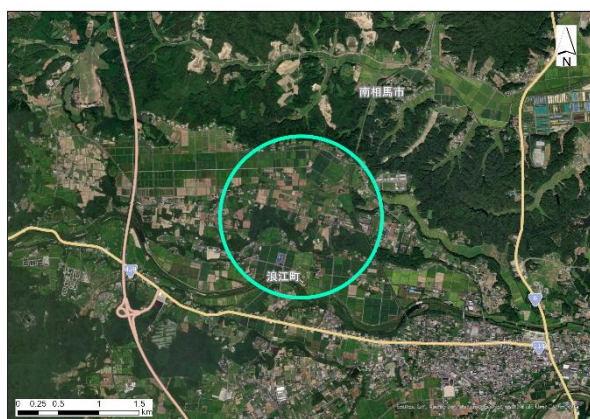
TestPoint 4 (茨城県那珂市)



TestPoint 5 (栃木県大田原市)



TestPoint D (福島県郡山市)



TestPoint E (福島県浪江町)

Fig. 4-10 テストポイントの場所

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

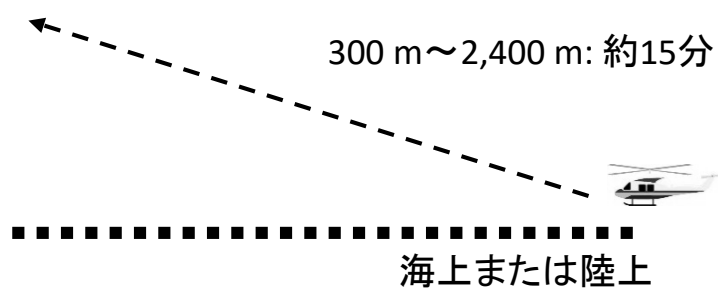


Fig. 4-11 宇宙線フライトのイメージ

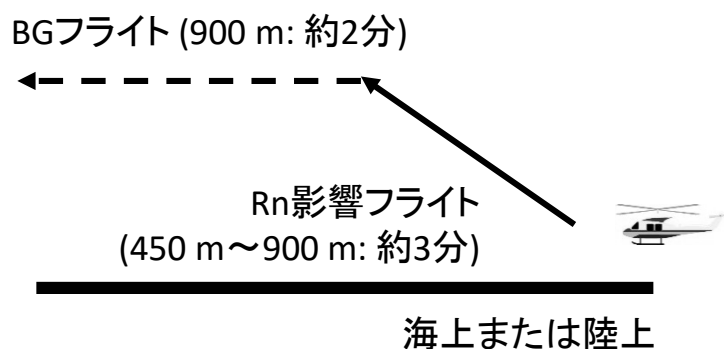
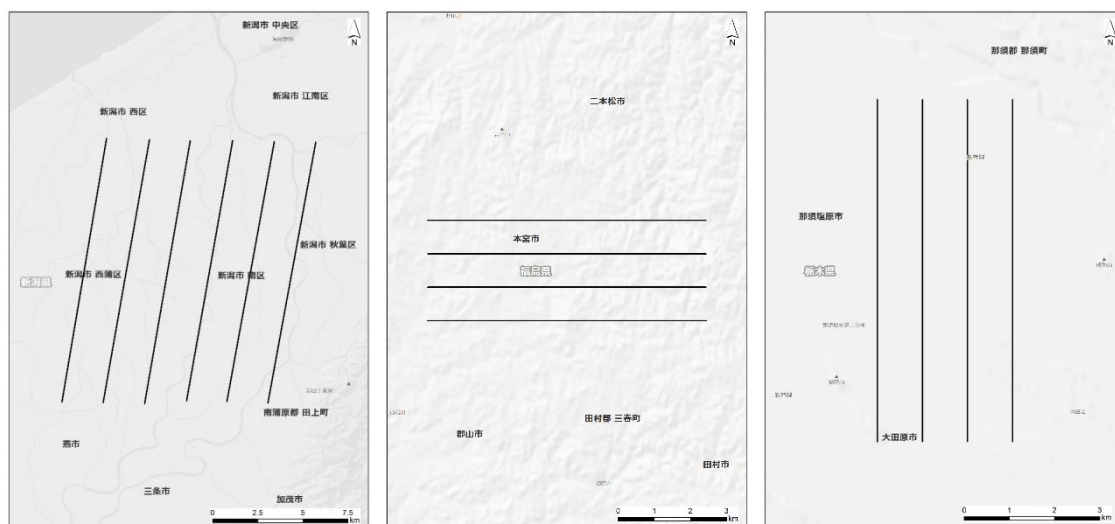


Fig. 4-12 Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージ



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 (福島県本宮市)	オーバーラップフライト測線 (栃木県那須塩原市)
------------------------	---------------------------	-----------------------------

Fig. 4-13 天然核種フライトの測線とオーバーラップフライトの測線
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

4.4. 解析のフロー

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

- ① 放射性Csからの γ 線
- ② 天然放射性核種からの γ 線
- ③ 宇宙線
- ④ その他(空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を含む。)

第17次モニタリング及び東日本第13次モニタリングでは、放射性Cs由来の γ 線を測定することが主目的であるため、全計数率から②～④起源の計数率はバックグラウンドとして減算する必要がある。これらを考慮した解析のフローをFig. 4-14に示す。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。なお、本節以降の空間線量率とは、周辺線量当量率(1 cm 線量当量率)を意味する。

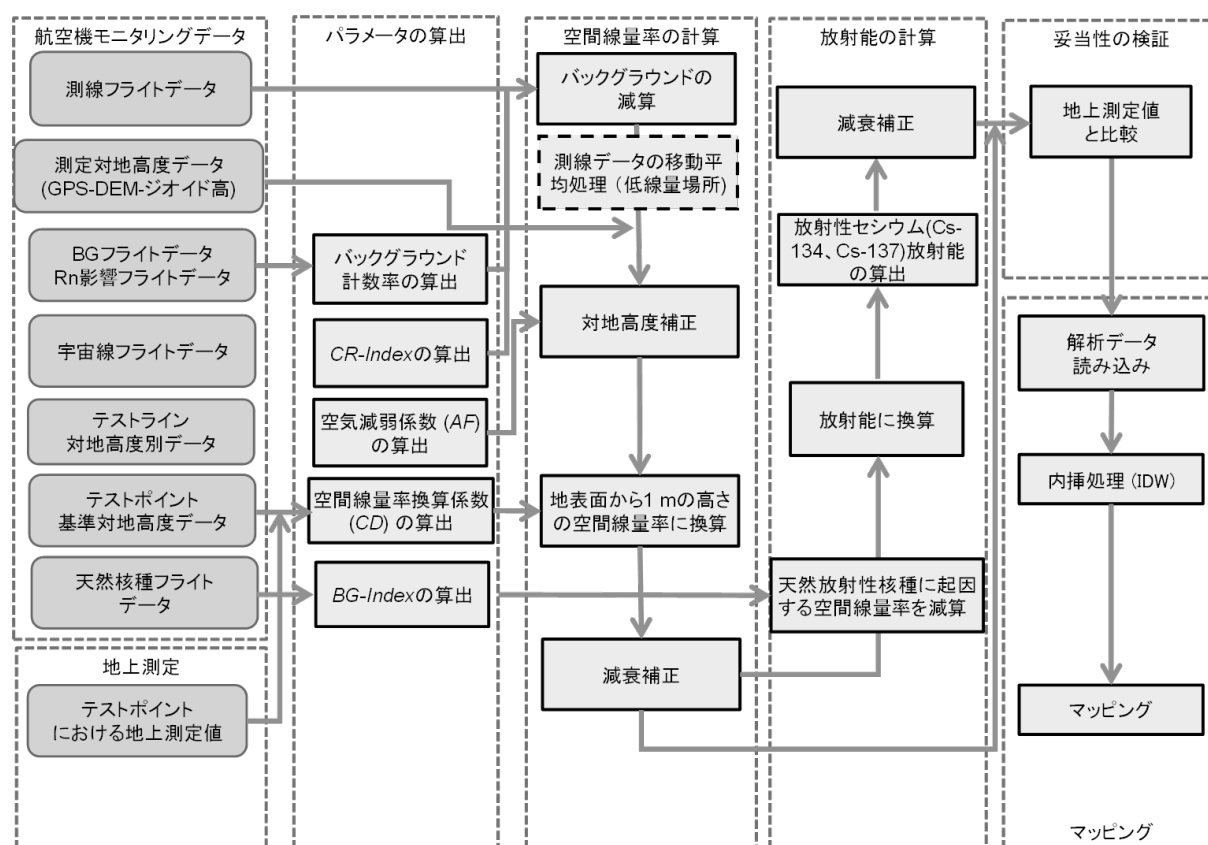


Fig. 4-14 解析のフロー

4.5. 空間線量率への換算方法

上空で取得した γ 線計数率を地表面から1 mの高さの空間線量率(D)へ換算する手順は、大まかに以下の通りである。

- ① バックグラウンド減算：全計数率(C_{all})から、前項で挙げたバックグラウンドから、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(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を含む。)に起因する計数率(C_{cos} 及び C_{air})を減算する。
- ② 対地高度補正：実際のフライト高度と基準高度とのずれにより生じる、 γ 線計数率の多寡を高度補正係数(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。

以上の一連の計算手順をまとめたものを式[1]に示す。

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

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})

C_{air} : 空气中にラドン子孫核種やヘリコプター機体に起因する γ 線計数率(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。 C_{cos} 、 C_{air} 、 HF 及び CD はそれぞれ、4.3節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。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)

航空機モニタリングにおいて、天然放射性核種からの γ 線、宇宙線及びその他(空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を含む。)に起因する γ 線計数率はバックグラウンドとなる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について示す。

これまでの経験から、海拔高度が上昇すると宇宙線起因の計数率が上昇することが分かっている。

る。宇宙線起因の γ 線は、RSIシステムが測定している全エネルギー範囲(30 keV～3,000 keV)で計数されており、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た。Fig. 4-15に海拔高度と宇宙線の計数率の関係例³²⁾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うち、2,800 keV以上の γ 線の計数率をプロットしたものである。なお、RSIシステムにおいて、3,000 keV以上の計数は最終チャンネル(1,023 ch)に積算される。このように、海拔高度と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。また、2,800 keVを超える γ 線の計数率と2,800 keV以下の計数率の比(*CR-Index*)は高度に依存せず一定の数値を示す。実測したデータを基に算出した*CR-Index*についてTable 4-2に示す。*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、ヘリコプター機体のバックグラウンド計数率の減算については、BGフライト(地上からの放射線が届かないと考えられる対地高度約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. 4-16に示す。このように、BGフライトで得られるスペクトルには陸地と海上とで顕著な差異はなく、対地高度を十分に取れば陸地で得られたデータでもバックグラウンドの減算に用いることが可能である。また、BGフライトで取得したデータを基に算出した、バックグラウンド計数率の算術平均値をTable 4-2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_{air} 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、空气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。空气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。

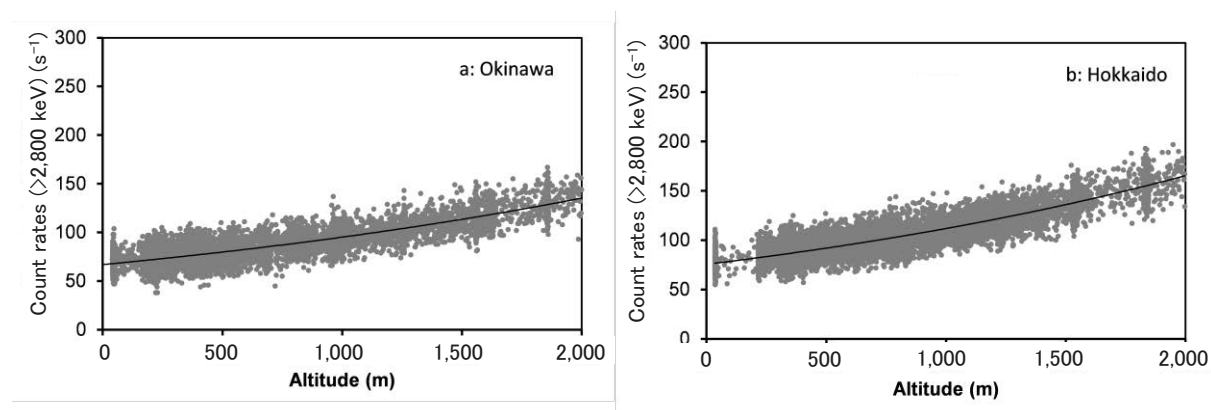


Fig. 4-15 海拔高度と2,800 keV以上の計数率の関係の例³²⁾

(a：沖縄海域、b：北海道海域)

(図中の曲線は、測定データの指数関数による近似曲線である。)

Table 4-2 RSI システムとヘリコプターの組み合わせごとのバックグラウンド計数率及び *CR-Index*

RSI System	ヘリコプター機種(機体番号)	運航会社	<i>CR-Index</i>	バックグラウンド 計数率(s^{-1})
RSI 1	Bell430 (JA05TV)	NNK	2.93	505
	Bell412 (JA9616)	AAC	2.97	417
RSI 2	Bell412 (JA6928)	AAC	2.97	453
	Bell412 (JA412N)	NNK	2.97	450

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

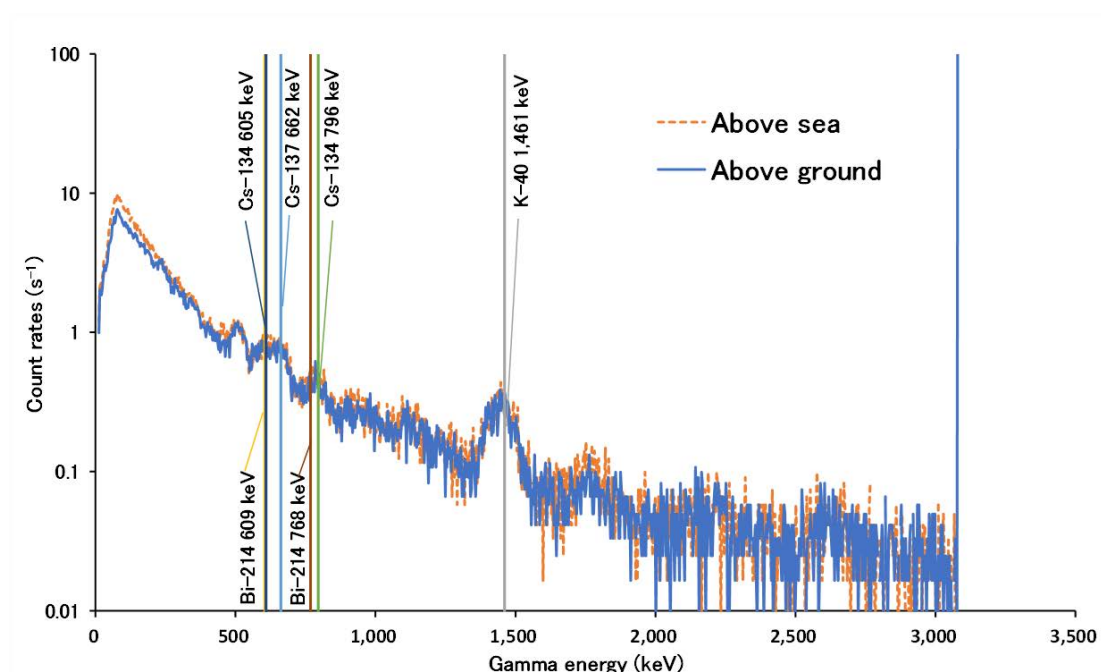


Fig. 4-16 BG フライトで取得した陸上と海上での γ 線スペクトル例

4.5.2. 対地高度補正

各測定点における対地高度と基準対地高度とのずれによって生じる γ 線計数率の多寡を補正するために、テストラインで取得したデータを基に、実効的な空気減弱係数 AF を求め、計算式 [2] から対地高度補正係数 HF を算出した。ここで、2022 年度 (令和 4 年度) より航空機モニタリング解析システムを Python3 で動作するよう更新したのに伴い、 AF は非線形最小二乗法により求めることとした。

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

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 (300 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)³⁹⁾及びジオイド高³⁹⁾を差し引いて求めた*1。Fig. 4-17 に対地高度と計数率の関係の例について示す。テストラインフライト中の対地高度及び計数率の平均値をプロットし、非線形最小二乗法によって指数関数回帰を Python3 で実施し、最適化された曲線 (Fig. 4-17 中の実線) の傾きを AF とした。指数関数回帰のあてはまりの良さは残差分散 (本報告では、実測値と回帰による推定値との差の平方和を、データ数－説明変数の個数 (2 個) で除算することで算出した。以下、RV) で評価した。RV は非負であり、小さいほど実測値と回帰による推定値がよく一致していることを意味する。また、Fig. 4-17 には Microsoft Excel®の指数近似機能によって得られた近似曲線 (本図中の点線) も併せて示した。本曲線は AF を算出するのに 2021 年度 (令和 4 年) まで利用していたもので、非線形回帰でなく指数関数の両辺を対数変換して線形回帰して得られたものである。このように、両者の差異は顕著ではないものの、非線形回帰の方が線形回帰よりも対地高度約 500 m の以下の領域で実測値によくフィットする傾向にあった。4.2 節に記載した通り、空間線量率等の計算に用いる航空機モニタリングデータは対地高度が約 500 m 以下のものに限定しているため、非線形回帰による AF の方が対地高度補正を行うのに、より適していると思われる。

ここで、実際に解析に使用した換算パラメータについて Table 4-3 に示す。本表に示した数値は 2012 年 (平成 24 年) から 2014 年 (平成 26 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) であり、今までに実施してきた福島原子力発電所周辺の空間線量率の評価に一貫性を持たせる観点から、これらの換算パラメータを固定値として用いている (以下、固定パラメータ)。これらの固定パラメータは上述の通り、Microsoft Excel®の指数近似機能によって得られたものである。

RSI システムの健全性及び固定パラメータを用いることの妥当性を確認するために、2022 年度 (令和 4 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 4-4 に示す。本表には、Python3 による非線形最小二乗法で算出した AF と Microsoft Excel®による線形最小二乗法で算出した AF を併記した。いずれの手法を用いた場合も、今年度取得した AF の平均値は Table 4-3 で示した固定パラメータよりもやや小さくなる傾

*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。

向にあった。とりわけ、非線形最小二乗法による場合、Bell430 (JA05TV) については10月14日にTestLine 1で取得した AF 、Bell412 (JA9616) については9月11日にTestLine Aで取得した AF 、Bell412 (JA6928) では全ての AF について、Table 4-3 に示した固定パラメータの 1σ から外れる程に小さく算出された。線形最小二乗法による場合、上記の AF に加え、Bell430 (JA05TV) により9月25日にTestLine Aで取得した AF が固定パラメータの 1σ から外れる程に小さく算出された。両者の AF に顕著な差異があるわけではないが、非線形最小二乗法による AF の方がテストラインの場所によらず概ね一定の値を示す傾向にあり、安定性に富むように思われる。 AF の算出に係る数学的なアプローチの違いが HF 、ひいては空間線量率の計算値にどれほどの影響を与えるのか注視しつつデータを蓄積し、固定パラメータを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。今年度は、今までに実施してきた福島原子力発電所周辺の空間線量率の評価に一貫性を持たせることを重視し、固定パラメータを用いることとした。

以上のことから、RSIシステムの健全性が確認でき、Bell412 及び Bell430 に対して固定パラメータの AF を用いることは、現状では妥当であるとした。

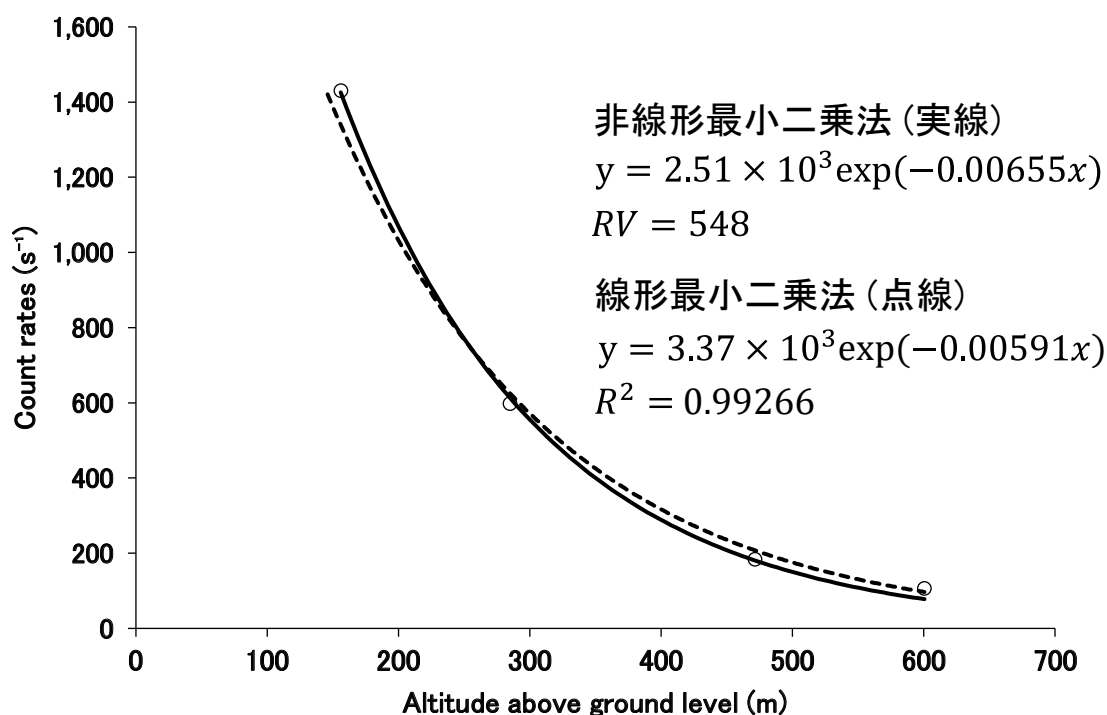


Fig. 4-17 対地高度と計数率の関係例
 (Bell412 (JA6928)、2022年9月14日、TestLine 4にて実施)

Table 4-3 使用した空気減弱係数 AF のまとめ
 (表中のSDは各パラメータの標本標準偏差(1σ)である。)

	Bell412 (JA9616、JA6928及びJA412N)			Bell430 (JA05TV)		
	Value	SD(1σ)	Number of Data	Value	SD(1σ)	Number of Data
$AF (m^{-1})$	-0.00720	± 0.00042	21	-0.00720	± 0.00040	35

※SD: 標本標準偏差

Table 4-4 2022 年度に取得した空気減弱係数 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		線形最小二乗法	
第17次 モニタリング 東日本第13次 モニタリング	Bell430（JA05TV） （NNK）	RSI 1	2022/09/12	TestLine A	AF(m ⁻¹)	RV	AF(m ⁻¹)	R ²
			2022/09/25	TestLine A	-0.00713	101	-0.00720	0.99998
			2022/09/30	TestLine A	-0.00713	1,764	-0.00675	0.99964
			2022/09/12	TestLine A	-0.00739	402	-0.00731	0.99996
			2022/10/14	TestLine 1	-0.00732	359	-0.00717	0.99990
			2022/10/20	TestLine 5	-0.00618	369	-0.00607	0.99768
			2022/10/20	TestLine 4	-0.00713	41	-0.00709	0.99996
Average					-0.00706		-0.00692	
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		線形最小二乗法	
第17次 モニタリング	Bell412（JA9616） （AAC）	RSI 2	2022/09/06	TestLine A	AF(m ⁻¹)	RV	AF(m ⁻¹)	R ²
			2022/09/11	TestLine A	-0.00749	1,860	-0.00713	0.99959
			Average		-0.00711		-0.00673	
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		線形最小二乗法	
東日本第13次 モニタリング	Bell412（JA6928） （AAC）	RSI 2	2022/09/14	TestLine 4	AF(m ⁻¹)	RV	AF(m ⁻¹)	R ²
			2022/09/25	TestLine 4	-0.00655	548	-0.00591	0.99266
			Average		-0.00612		-0.00617	

※NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航空株式会社

※RV: 指数関数回帰における残差分散、 R^2 : 線形最小二乗による決定係数

4.5.3. 空間線量率への換算

RSI システムはヘリコプターの中に搭載するため、ヘリコプターの機底の遮蔽効果に依存して、 γ 線計数率を地表面から 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ている。固定パラメータとして用いている CD について Table 4-5 に示す。本表に示されているのは AF と同様に、2012 年 (平成 24 年) から 2014 年 (平成 26 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。RSI システムの健全性及びこれら 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、2022 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 地点で取得した。

CD は、テストポイントにおける地上測定値の平均値とテストポイント周辺で対地高度 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 4-6 及び Table 4-7 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. 4-18～Fig. 4-23 に示す。なお、地上測定値は NaI(Tl)検出器の指示値であり、天然放射性核種による寄与が含まれる。取得した CD にはややばらつきがみられたものの、平均値と固定パラメータとの差異は、Bell412 (JA9616) を除けば、Table 4-5 で示した 1σ 以内であった。Bell412 (JA9616) で取得した CD の平均値が固定パラメータから乖離した要因として、9 月 11 日に TestPoint D 及び TestPoint E におけるテストポイントフライトで取得した CD が平均値に悪影響を及ぼしたことが挙げられる。当該フライトでは、雲を回避するために両テストポイントから 400 m～500 m 程度離れた位置で、かつ対地高度 300 m をうまく維持できない状況下でホバリングしたため、地上測定値と対比の良い計数率をうまく取得できず、従って本来得られるべき CD から乖離したと推察される。このことから、テストポイントフライトは晴天時に限定して行い、良質なデータを取得するよう努める必要がある。

また、固定パラメータの妥当性を検証するために、Fig. 4-13 (中央及び右) に示した測線において Bell412 (JA9616、JA6928 及び JA412N)、Bell430 (JA05TV) によって対地高度 300 m でオーバーラップフライトを同日中に実施し、得られた γ 線計数率の比較を行った。当該フライトで得た全計数率に対して、オーバーラップフライトを実施した日における BG フライトで取得した計数率及び Table 4-2 に示した $CR\text{-}Index$ を適用してバックグラウンドを減算した後、Table 4-3 に示した AF を基に算出した HF により、基準対地高度 (300 m) における計数率に補正して (以下、 $CR\text{-}Index \cdot HF$ 補正計数率) 比較した (Fig. 4-24)。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 $CR\text{-}Index \cdot HF$ 補正計数率の比であると解釈でき、この傾きが Table 4-5 に示した CD の比と一致することが望ましい。つまり、Bell412 同士及び Bell430 同士では 1.000 、 $Bell412 / Bell430 \approx 0.846$ 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. 4-24 より、 $Bell412 (JA6928) / Bell412 (JA9616) \approx 0.913$ 、 $Bell412 (JA6928) / Bell430$

(JA05TV) $\div$ 0.860、Bell412 (JA412N) / Bell430 (JA05TV) $\div$ 0.960、Bell412 (JA6928) / (Bell412 JA412N) $\div$ 1.114 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 4-5 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無いと判断された。このように、オーバーラップフライトの結果は解析に用いる CD の数値が妥当であるか、再設定を検討すべきかを判断するための材料の一つとなる。

以上のことから、RSI システムの健全性が確認でき、Bell412 及び Bell430 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。

Table 4-5 使用した空間線量率換算係数 CD のまとめ

	Bell412 (JA9616、JA6928及びJA412N)			Bell430 (JA05TV)		
	Value	SD(1 σ)	Number of Data	Value	SD(1 σ)	Number of Data
CD ([s ⁻¹]/[μ Sv/h])	11,000	$\pm$ 2,100	42	13,000	$\pm$ 2,800	65

※SD: 標本標準偏差

Table 4-6 2022 年度に取得した CD データ一覧 (Bell412)

モニタリング	ヘリコプター機種（機体番号） （運輸会社）	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)	標準偏差 (2 σ)	相対標準偏差 (%)	計数率 (s ⁻¹)	標準偏差 (2 σ)	対地高度 (ft)	標本標準偏差 (2 σ)	
第17次 モニタリング	Bell412 (JA9616) (AAC)	RSI 2	2022/09/06	TestPoint D	0.22	0.08	37	3,625	438	973	62	13,100
			2022/09/06	TestPoint E	0.73	0.50	69	9,855	1,539	1,015	43	13,200
			2022/09/11	TestPoint E	0.63	0.47	74	21,160	4,505	766	38	19,300
			2022/09/11	TestPoint D	0.22	0.08	37	5,604	784	813	56	14,900
Average												15,100

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)	標準偏差 (2 σ)	相対標準偏差 (%)	計数率 (s ⁻¹)	標準偏差 (2 σ)	対地高度 (ft)	標本標準偏差 (2 σ)	
東日本第13次 モニタリング	Bell412 (JA6928) (AAC)	RSI 2	2022/09/14	TestPoint 4	0.06	0.03	47	1,208	160	942	39	7,900
			2022/09/25	TestPoint 3	0.05	0.02	39	1,623	158	861	74	12,300
Average												10,100
※AAC: 朝日航空株式会社												

Table 4-7 2022 年度に取得した CD データ一覧 (Bell430)

モニタリング	ヘリコプター機種（機体番号） （運輸会社）	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)	標準偏差 (2 σ)	相対標準偏差 (%)	計数率 (s ⁻¹)	標準偏差 (2 σ)	対地高度 (ft)	標準偏差 (2 σ)	
第17次 モニタリング	Bell430 (JA05TV) (NNK)	RSI 1	2022/09/12	TestPoint D	0.23	0.09	41	2,819	417	1,175	95	13,600
			2022/09/12	TestPoint E	0.61	0.43	71	10,990	3,506	1,004	105	17,000
			2022/09/25	TestPoint D	0.23	0.09	37	4,164	332	949	38	13,100
			2022/09/25	TestPoint E	0.52	0.38	72	8,795	1,031	949	30	13,600
2022/09/30			TestPoint D	0.23	0.09	41	4,251	892	904	67	12,200	
2022/10/12			TestPoint D	0.22	0.09	38	3,248	835	1,038	68	11,800	
2022/10/14			TestPoint 1	0.05	0.02	29	1,433	146	966	62	13,200	
2022/10/20			TestPoint 5	0.09	0.02	29	2,105	253	989	28	13,500	
東日本第13次 モニタリング			2022/10/20	TestPoint 4	0.06	0.02	29	1,520	238	933	104	8,500
	Average											12,900
※NNK：中日本航空株式会社												

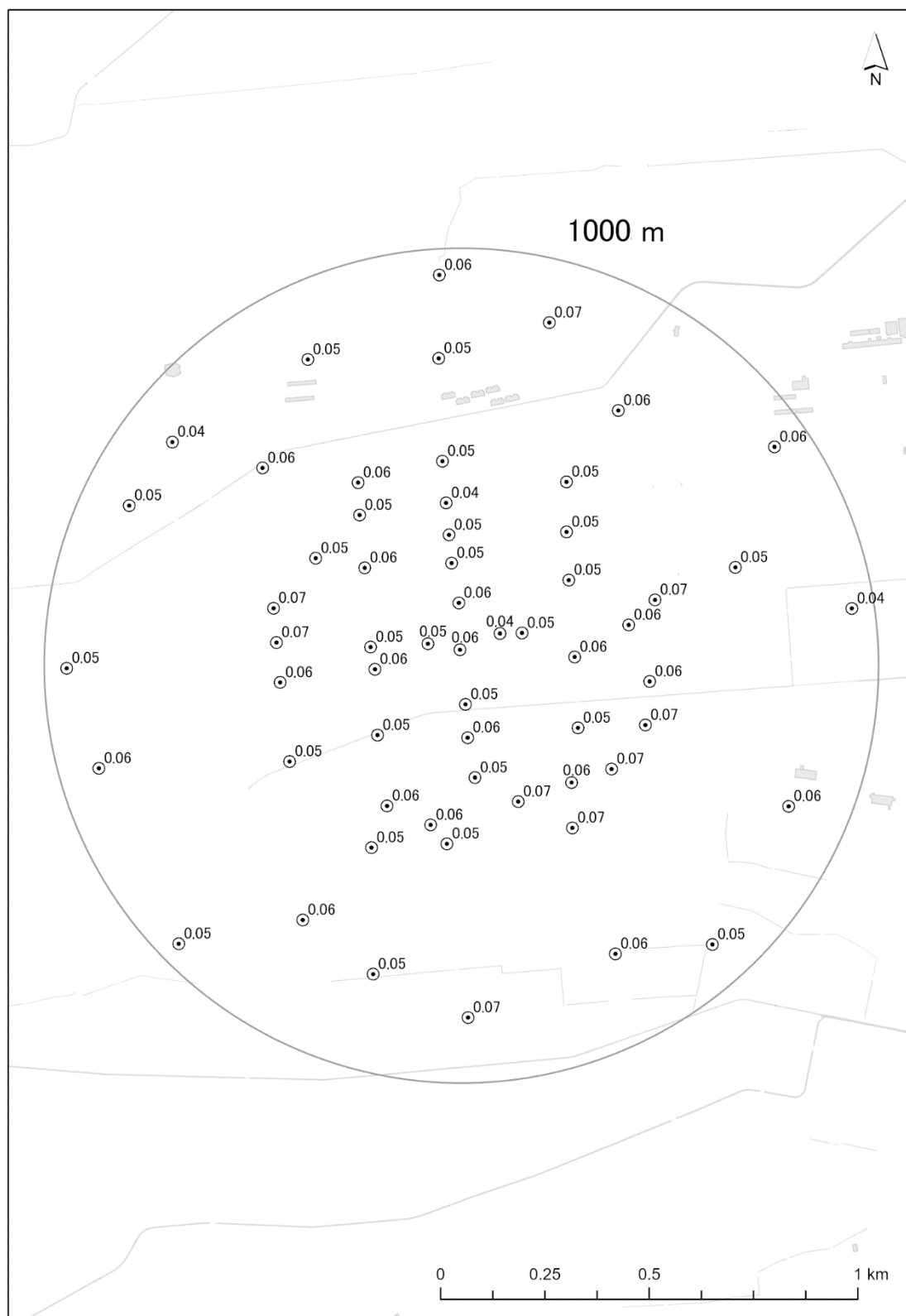


Fig. 4-18 地上測定データ (TestPoint 1)

(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。)

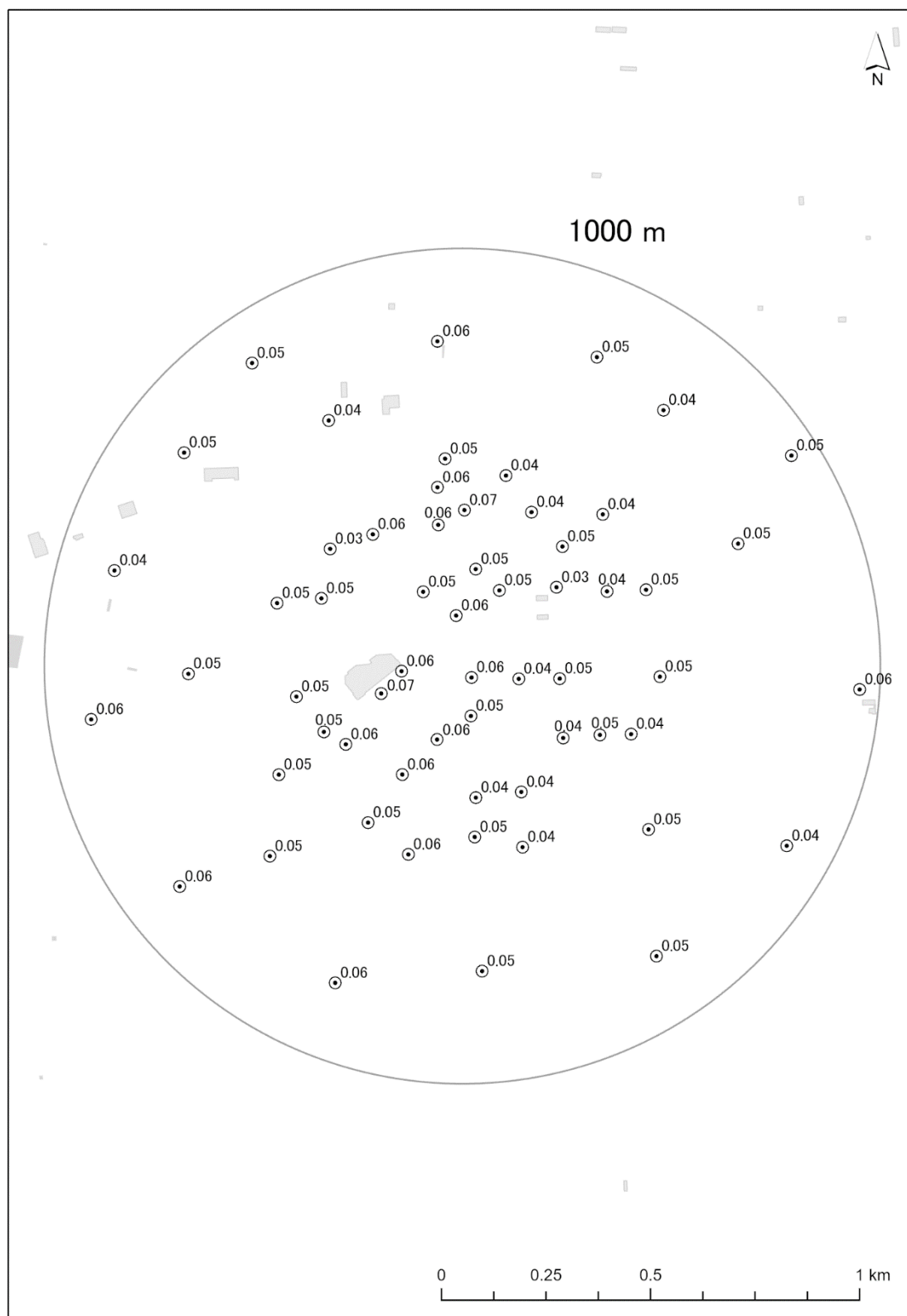


Fig. 4-19 地上測定データ (TestPoint 3)
 (空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、天然放射性核種による寄与を含む。)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

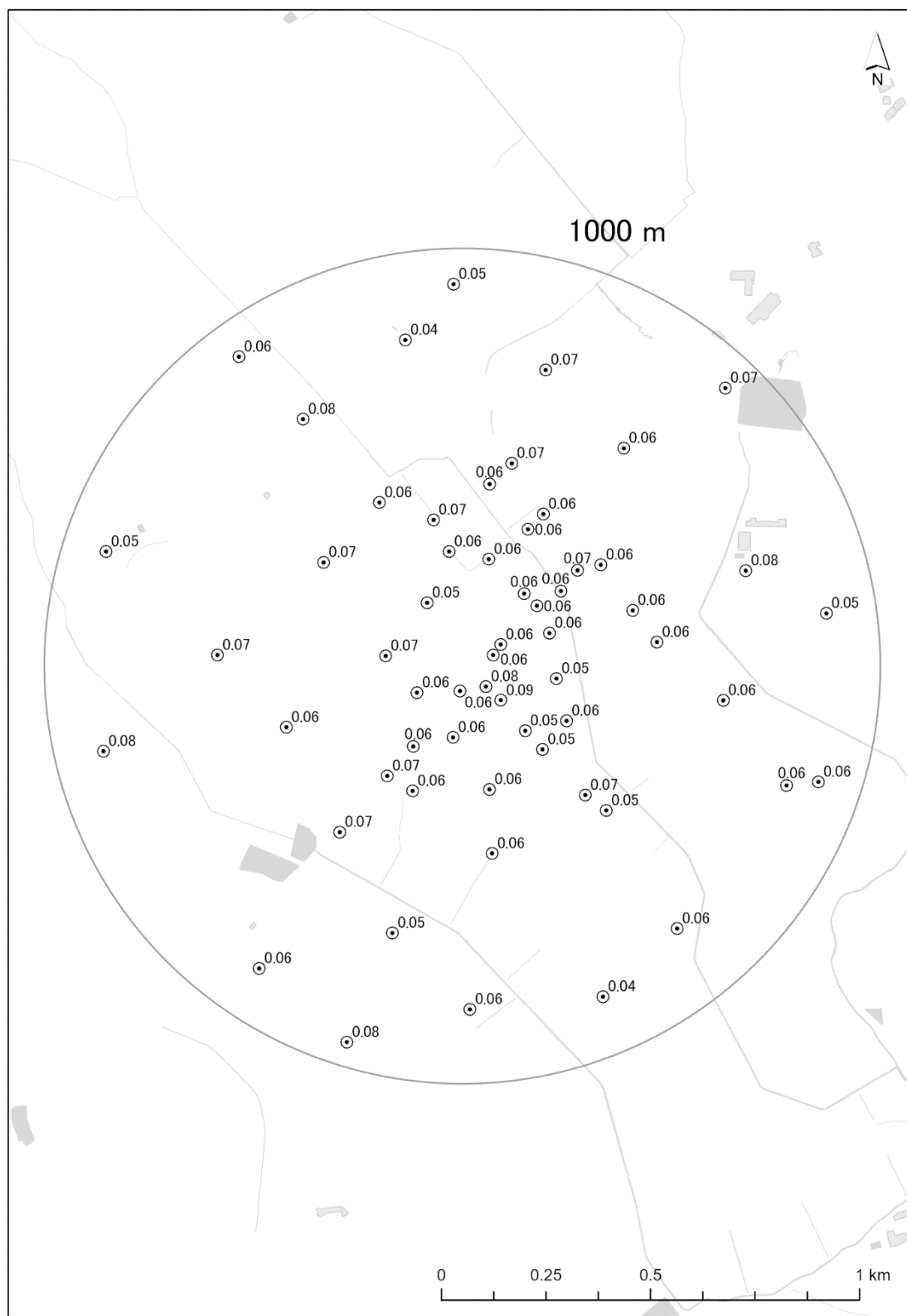


Fig. 4-20 地上測定データ (TestPoint 4)

(空間線量率 (μSv/h)、天然放射性核種による寄与を含む。)

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

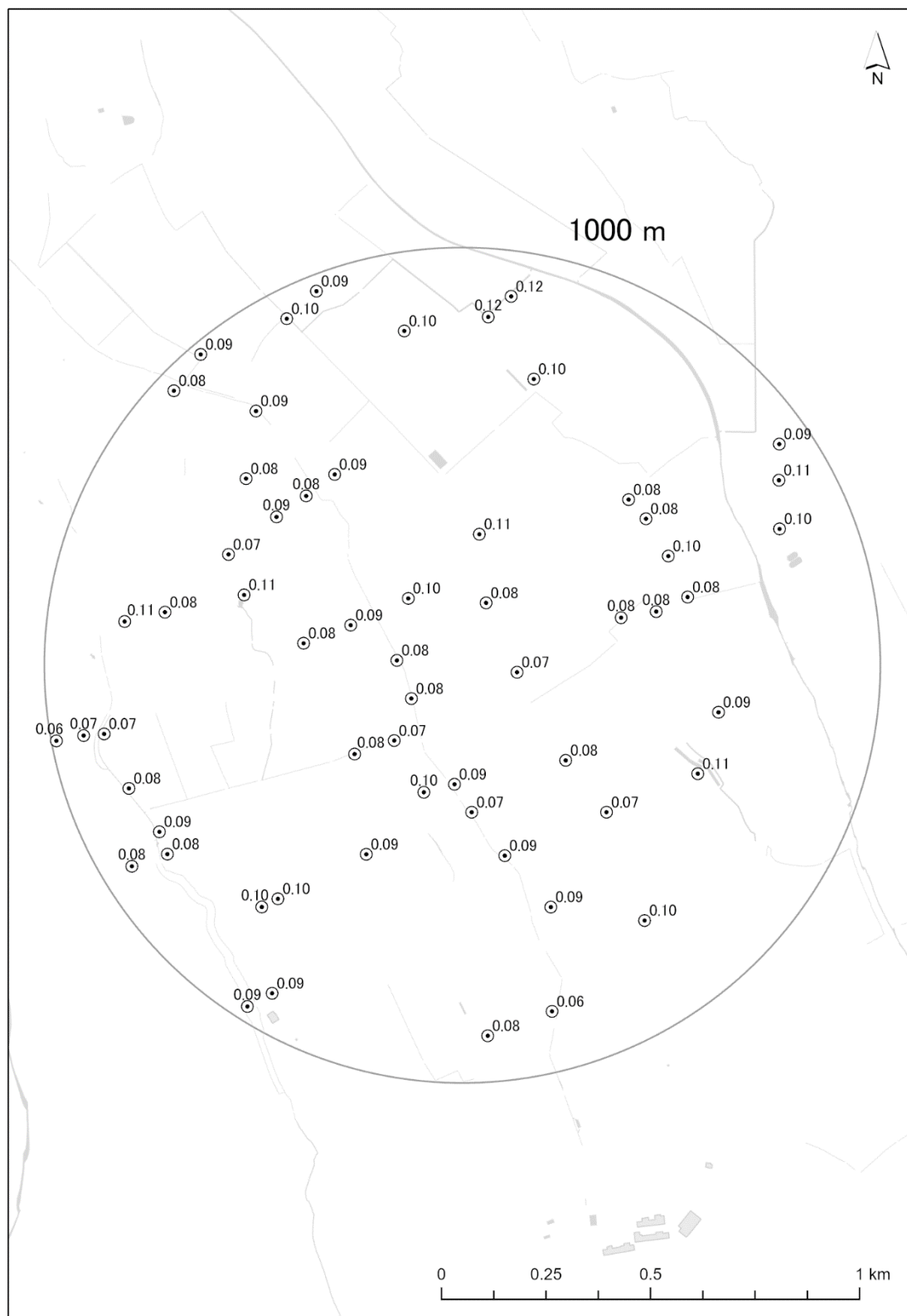


Fig. 4-21 地上測定データ (TestPoint 5)

(空間線量率 (μSv/h)、天然放射性核種による寄与を含む。)

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

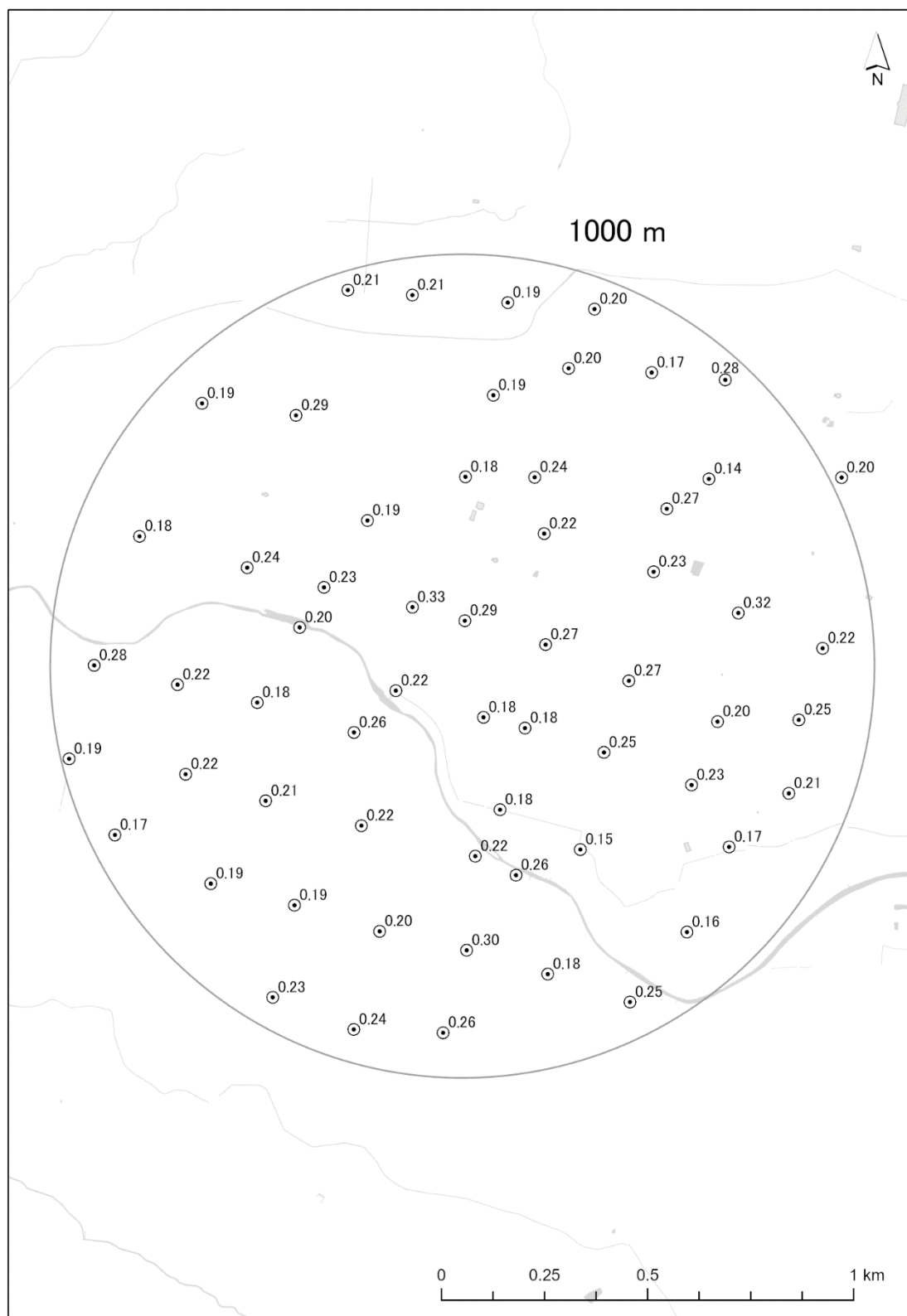


Fig. 4-22 地上測定データ (TestPoint D)

(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。)

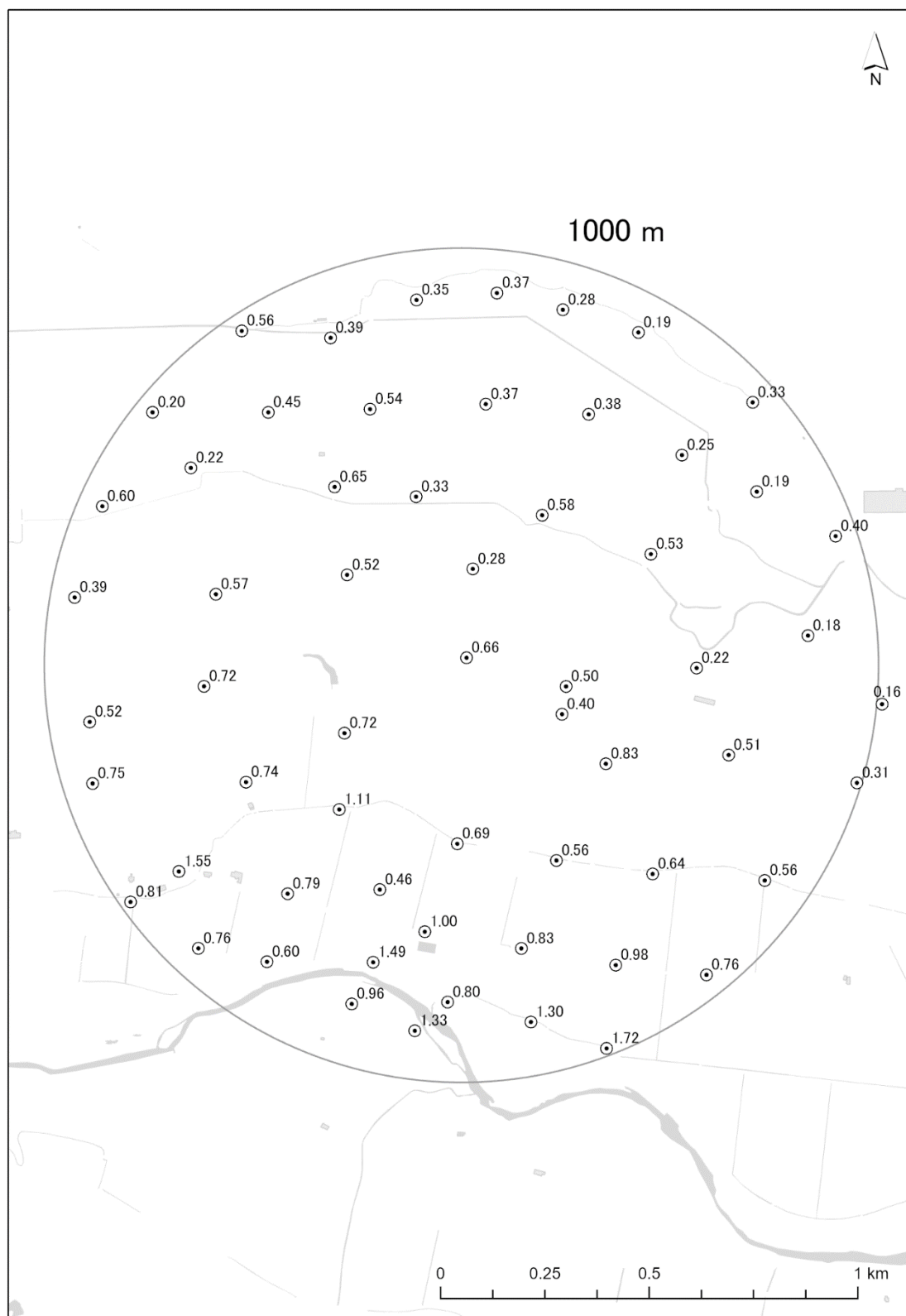


Fig. 4-23 地上測定データ (TestPoint E)

(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。)

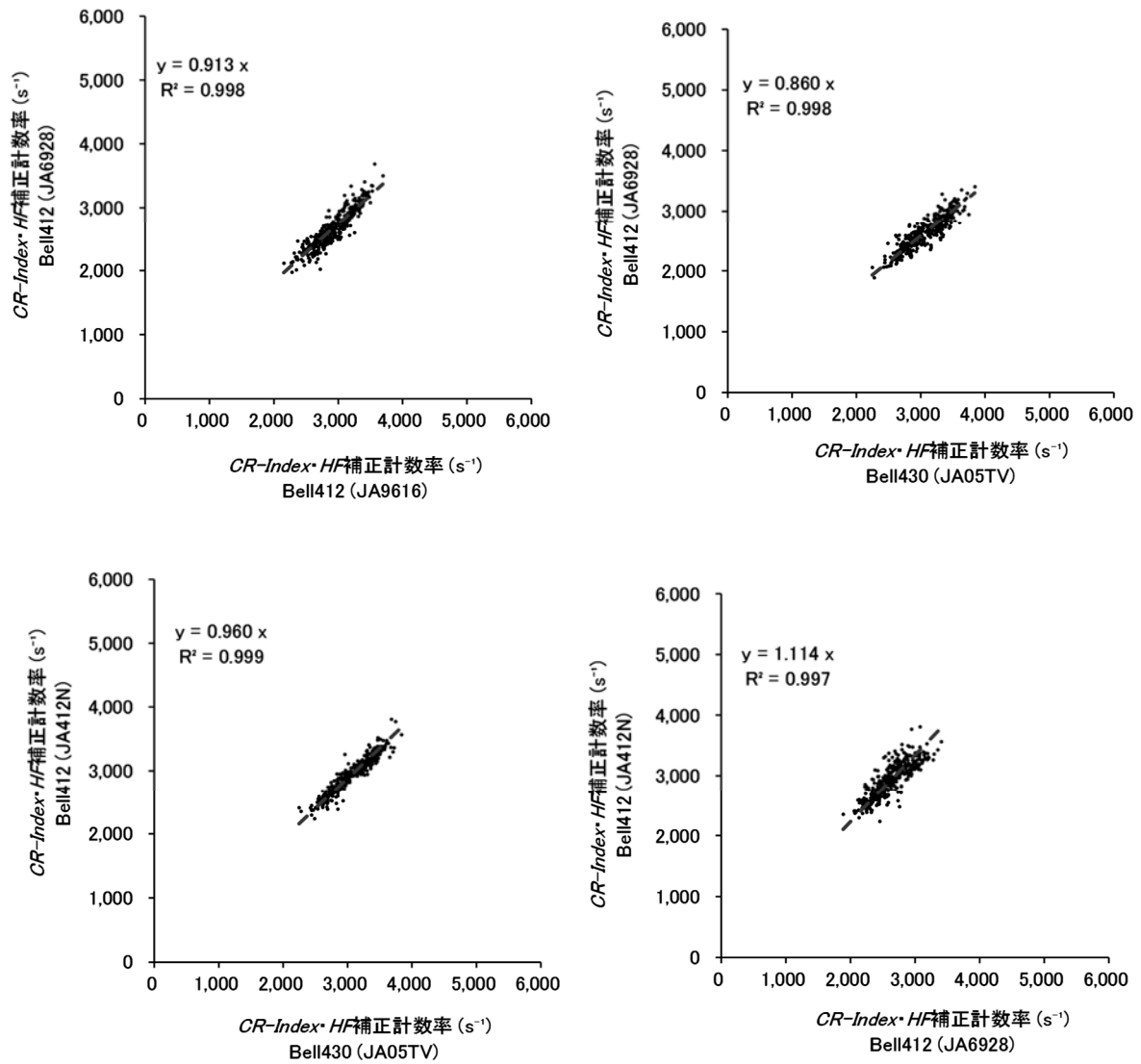


Fig. 4-24 オーバーラップフライトにおけるヘリコプター機種または機体ごとの *CR-Index*・*HF* 補正計数率の関係

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 起源の計数率の算出

天然放射性核種の弁別方法は DOE が開発した MMGC 法 (Man Made Gross Count) を参考にした³⁾。本法は天然放射性核種のみを含む地域を測定して得られる γ 線スペクトルにおいて、放射性 Cs が放出する γ 線エネルギー範囲外である 1,400 keV～2,800 keV の計数率と全計数率との比 (*BG-Index*) が一定であることに着目し、放射性 Cs 起源の計数率を推定するものである。具体的には、まず、ヘリコプター機種と RSI システムの組み合わせごとに、福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs による影響がない地域をフライトして得られたデータを基に *BG-Index* を算出する。次に、実際のフライトデータの 1,400 keV～2,800 keV の計数率に *BG-Index* を乗じて天然放射性核種起源の計数率を計算し、これを全計数率から減算することで放射性 Cs 起源の計数率を推定する。最後に、放射性 Cs 起源の計数率に換算係数を適用して、放射性 Cs に起因する空間線量率に換算したうえで地表面の放射性 Cs の沈着量に換算する。*BG-Index* 算出に用いるスペクトルの ROI (Region of Interest) のイメージを Fig. 4-25 に示す。また、*BG-Index* の算出例を Fig. 4-26 に示す。本図に示したデータは、2011 年度に関西地方において、1 秒ごとに測定した γ 線スペクトルから *BG-Index* を求め、その頻度を示したものである。このようにばらつきはあるものの、正規分布に近い形を示す。第 17 次モニタリング及び東日本第 13 次モニタリングで使用したヘリコプター機種と RSI システムの組み合わせごとに設定した *BG-Index* について Table 4-8 に示す。ここで、前述の通り Bell412 (JA412N) については、航空機モニタリングにおいて過去に使用実績のない機体であるため、Fig. 4-13 (左) に示した場所において天然核種フライトを実施して得られた計数率を基に *BG-Index* を算出した。その結果、Bell412 (JA412N) の *BG-Index* は 30.4 となり、Table 4-8 に示した Bell412 の値とほとんど同一であった。以上のことから、本モニタリングで使用した Bell412 に適用する *BG-Index* は Table 4-8 の値に統一することとした。

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

- ① 測定で得られた 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 $C_{all} - C_{nat} - C_{cos} - C_{air}$ により、放射性 Cs に起因する計数率 (C_{Cs}) を求める。
- ④ C_{Cs} に *HF* を乗じ、*CD* で除することで放射性 Cs に起因する空間線量率 (D_{Cs}) を算出する。
- ⑤ 式 [3] より、 D_{Cs} を空間線量率－放射能換算係数 (*CF* ($[\mu\text{Sv/h}]/[\text{kBq/m}^2]$); 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、

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

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

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

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

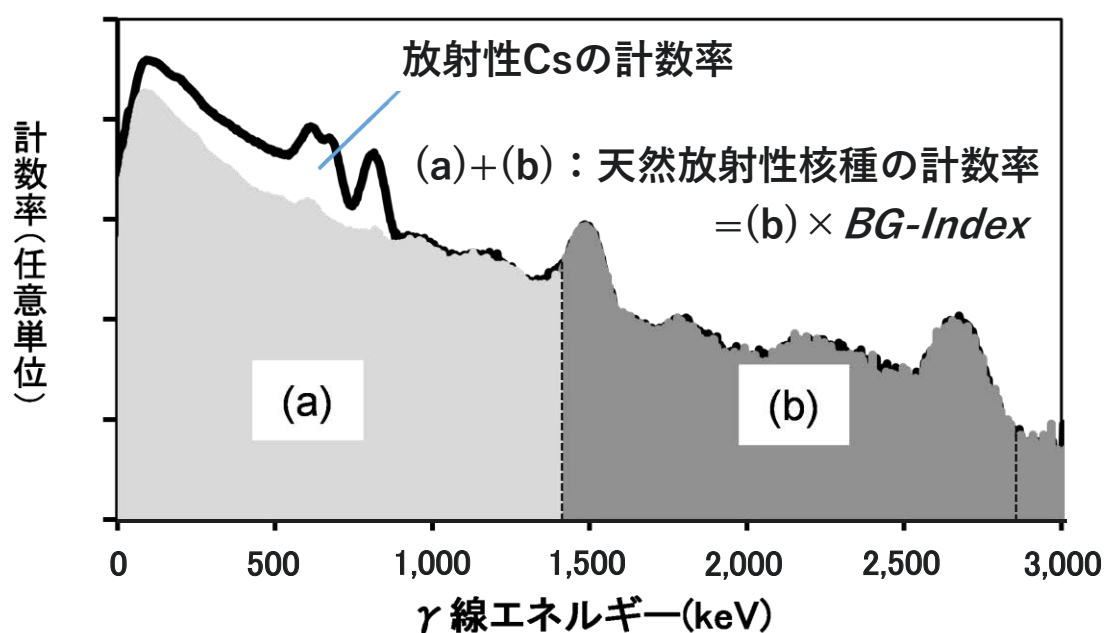


Fig. 4-25 放射性 Cs に起因する計数率の算出イメージ

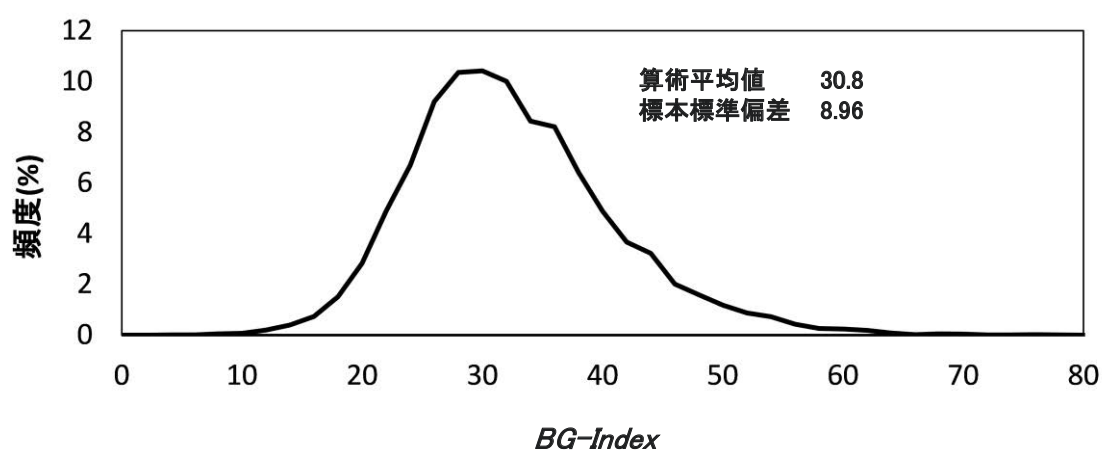


Fig. 4-26 $BG-Index$ の算出例

(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例)

Table 4-8 *BG-Index* 一覧

Helicopter (Body No.)	RSI System	Operation Company	<i>BG-Index</i>
Bell430 (JA05TV)	RSI 1	NNK	33.7
Bell412 (JA9616)	RSI 2	AAC	30.3
Bell412 (JA6928)		AAC	
Bell412 (JA412N)		NNK	

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

航空機モニタリングでは、地上の放射性 Cs の沈着量に換算する場合に、文献^{40),41)}に示される空間線量率－放射能換算係数 (Conversion Factor: CF ($[\mu\text{Gy/h}]/[\text{kBq/m}^2]$)) 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⁴⁰⁾。これまで、航空機モニタリングにおいては、過去との比較を考慮し $\beta = 1.0$ (g/cm^2) 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^{42), 43)}から、福島原子力発電所から 80 km 圏内の土壌において、重量緩衝深度 (β) が年々変化していることが報告されている。ここで調査されている β は、環境中での放射性 Cs の動態観測が目的であるため、人間活動による影響の少ない土壌を対象としている。一方、航空機モニタリングの対象は森林のような人間活動が希少な場所から住宅地や農地のような人間活動がある程度活発な場所まで多様な土地を含んでいる。さらに、その土地の利用の方法や程度は年々変わってゆく。このような多面的な因子を考えると、 β を固定することは合理的ではないが、従来との比較のために 1.0 とした場合について解析するとともに、 β に他の値を与えた場合に換算係数がどの程度影響があるかを以下に示す。

Fig. 4-27 に参考文献^{40),41)}に示されている β と CF の関係について示す。本図では、対数による近似曲線を記載したように、 β と CF は対数関係にある。例えば、 $\beta = 1.0$ (g/cm^2) と $\beta = 2.0$ (g/cm^2) にした際の放射性 Cs の沈着量と地表面から 1 m の高さの空間線量率の換算係数 ($[\mu\text{Gy/h}]/[\text{kBq/m}^2]$) には、Cs-134、Cs-137 とともに 16% 程度の差がある。このように、 β の設定により放射性 Cs に対する CF は変化するため、適切な β の設定を行って航空機モニタリングによる、地上の放射性 Cs の沈着量への換算に適用することは今後の課題である。本報告における解析の基本的な方針としては、Fig. 4-27 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/cm^2) の場合の換算係数^{40),41)}を適用した。

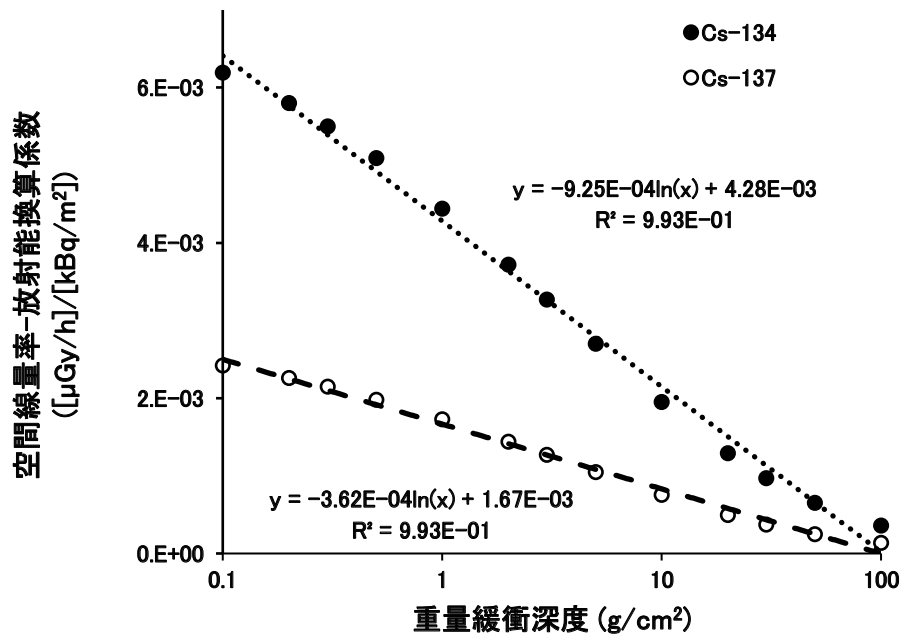


Fig. 4-27 重量緩衝深度 β と空間線量率－放射能換算係数 CF の関係
(参考文献^{40),41)}のデータを基に対数による近似曲線を表示)

4.7. 減衰補正

福島原子力発電所事故により放射性核種が放出されてから時間が経過し、半減期の短い核種はほぼ検出されないレベルにまで減衰しており、2011 年(平成 23 年)8 月 13 日以降では、Cs-134 と Cs-137 が評価対象核種である。ここでは、空間線量率から放射能への Cs-137 換算係数、Cs-134 / Cs-137 濃度比及び測定時点の空間線量率を評価時点の空間線量率に補正する方法について記述する。空間線量率から放射能への換算は、重量緩衝深度 $\beta = 1.0$ (g/cm²) の場合の CF を適用し、あらかじめ求めておいた Cs-134 / Cs-137 濃度比を用いて、地表面から 1 m の高さの空間線量率から地表面における Cs-134 及び Cs-137 の放射性物質濃度に換算した。Cs-134 / Cs-137 濃度比は同年 8 月に福島県で 50 ポイント以上の可搬型ゲルマニウム半導体検出器(以下、可搬型 Ge 検出器)による測定データを取得し、同年 8 月 13 日時点での Cs-134 / Cs-137 = 0.917 (B_0) を基本とした。その基準日から航空機モニタリングのデータ取得完了日に減衰補正して換算した。データ取得完了日における Cs-137 の濃度 (C_{Cs-137}) 及び Cs-134 の濃度 (C_{Cs-134}) は航空機モニタリングデータから求まる全空間線量率から、天然放射性核種によるバックグラウンドに起因する空間線量率を引いた空間線量率 ($E_{Cs-137+Cs-134}$ (μSv/h)) 及びデータ取得完了日における Cs-134 / Cs-137 濃度比 (B) を用い、下記の式 [4]、[5] から算出する。

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

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

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

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

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) としている。

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

- ① 換算した放射性 Cs 放射能を航空機モニタリングの取得完了日に合わせて減衰補正する。
- ② ①で得られた値を CF で除して、放射性 Cs 由来の空間線量率に換算する。
- ③ ②で得られた値にバックグラウンド空間線量率を加算し、全空間線量率とする。

4.8. 検出限界値

検出限界値 (Limit of Detection) と信頼性について評価を行った。式 [7] 及び式 [8] に航空機モニタリングにおける全空間線量率への換算方法及び放射性 Cs の沈着量の換算式について示す。本式をもとに、検出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 $[\mu\text{Gy/h}]/[\text{kBq/m}^2]$ であるが、 $[\mu\text{Sv/h}]/[\text{kBq/m}^2]$ に換算するにあたり、 $\text{Gy} : \text{Sv} = 1 : 1.2$ とした。

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

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

ここで、式 [7] については、

D : 全空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

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}) = $C_{\text{cos}} \text{ CR-Index}$ ($C_{\text{cos}} > 2,800 \text{ keV}$ の計数率)

C_{air} : 空气中ラドン子孫核種びヘリコプター機体に起因するバックグラウンド計数率 (s^{-1})

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

AF : 空気減弱係数 (m^{-1})

H_{std} : 基準対地高度 (300 m)

H_{m} : 測定対地高度 (m)

であり、さらに式 [8] については、

Rd_{134} : 放射性 Cs の沈着量 (Bq/m^2) (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})

= $C_{\text{BG}} \text{ BG-Index}$ (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 ($[\mu\text{Sv/h}]/[\text{Bq/m}^2]$)^{40),41)}

$R_{\frac{134}{134+137}}$: 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. 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 (宇宙線、空气中ラドン子孫核種及びヘリコプター機体に起因するバックグラウンド計数率) を差し引き求めている。放

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。この数値を計数率の検出下限とし、RSI システムの標準的な CD ($13,000 \text{ [s}^{-1}\text{]/[}\mu\text{Sv/h]}$) 及び $\beta=1.00 \text{ (g/cm}^2\text{)}$ の場合の CF で空間線量率に換算する。実際のバックグラウンドの計数率の数値は、空間線量率の場合に用いた BG_{air} と BG_{cos} 以外に BG_{nat} が含まれる。ここでは、バックグラウンド計数率を標準的な $3,000 \text{ s}^{-1}$ とし計算を行った。この条件を、式 [9] に当てはめると、 767 s^{-1} となる。これに、標準的な CD ($13,000 \text{ [s}^{-1}\text{]/[}\mu\text{Sv/h]}$) を用いて空間線量率に換算する。さらに Cs-134 と Cs-137 の組成比を第 17 次モニタリングの減衰補正日である 2022 年 (令和 4 年) 9 月 30 日における 0.028 とし、 $\beta=1.00$ における CF (Cs-134 : $5.33 \times 10^{-3} \text{ [}\mu\text{Sv/h]/[kBq/m}^2\text{]}$, Cs-137 : $2.08 \times 10^{-3} \text{ [}\mu\text{Sv/h]/[kBq/m}^2\text{]}$) を用いて、放射性 Cs の沈着量の検出下限値を求めた。なお、 CF の単位を $[(\mu\text{Gy/h})/[\text{kBq/m}^2]]$ から $[(\mu\text{Sv/h})/(\text{kBq/m}^2)]$ に換算する際、 $\text{Gy} : \text{Sv} = 1 : 1.2$ とした。この結果、放射性 Cs の沈着量の検出限界値は、約 27 kBq/m^2 と評価できた (Table 4-9)。

ここで参考情報として、第 17 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 $\beta = 4.31^{43})$ を適用した場合を考える。Fig. 4-27 に示した近似曲線式に β を代入し、 $[(\mu\text{Sv/h})/(\text{kBq/m}^2)]$ に換算して得られる CF は、Cs-134 : $3.51 \times 10^{-3} \text{ [}\mu\text{Sv/h]/[kBq/m}^2\text{]}$ 、Cs-137 : $1.37 \times 10^{-3} \text{ [}\mu\text{Sv/h]/[kBq/m}^2\text{]}$ 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約 44 kBq/m^2 であり、 $\beta=1.00$ の場合より 1.6 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 4-9 RSI システムの検出下限値

RSI System	Limit of detection	
	Dose rate at 1m above the ground ($\mu\text{Sv/h}$)	Radioactivity of deposition radiocesium (kBq/m^2)*
RSI 1, RSI 2	0.011	27

* Total BG count: $3,000 \text{ s}^{-1}$

Evaluated value on 30, Sep. 2022

4.8.2. 空間線量率の検出限界値

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

一般的に、検出下限値を求める際には、バックグラウンド計数率 (N_B) の標本標準偏差 (σ) を式 [9] に示した Currie の式⁴⁴⁾に当てはめ、検出下限値 (N_D) を算出する。

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

N_B を 900 s^{-1} とすると、 N_D は 142 s^{-1} となる。これに、RSI システムの標準的な CD ($13,000 [\text{s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$) 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 $0.011 \mu\text{Sv/h}$ となる (Table 4-9)。

4.9. 不確かさ

本手法において、航空機モニタリングにより算出される空間線量率における不確かさの要因としては、式 [7] から、以下の事項が挙げられる。

- ・ 検出器の計数誤差：一般的に、計数率に対して統計的な誤差が生じる。
- ・ CD の選択：Table 4-3 に示したように、固定パラメータに対して、測定状況により 20 % 程度の誤差が生じる。本測定の経験を重ねてきた現在では、その不確かさは小さくなっている。
- ・ 高度補正係数 HF の選択： CD と同様に、テストラインフライトデータ測定得状況により 5 % 前後の不確かさが生じる。
- ・ 高度情報に係る誤差：航空機モニタリングにおいて海拔高度は 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。これまでの測定の中でも空気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。

4.10. 補間方法

空間線量率や放射性物質沈着量のマッピングは、国際原子力機関 (IAEA) から標準的な方法が示されている⁴⁵⁾。補間方法には、IDW (Inverse Distance Weighted : 逆距離加重法)、クリギング (Kriging)、スプライン (Spline)、Natural Neighbor 等の多くの方法が存在する。本報告では、2011 年 4 月 6 日～29 日にかけて実施された第 1 次航空機モニタリングの解析を担当した DOE が用いた IDW を踏襲し、それ以後の解析を行った。IDW とはある補間地点の近傍にある複数のサンプル点の測定値を補間地点からサンプル点までの水平距離の逆数のべき乗関数により重み付け平均することで、ある補間地点における値を推定する方法である。IDW による、ある補間点における推定値は以下の式 [10] で表される⁴⁶⁾。

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

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

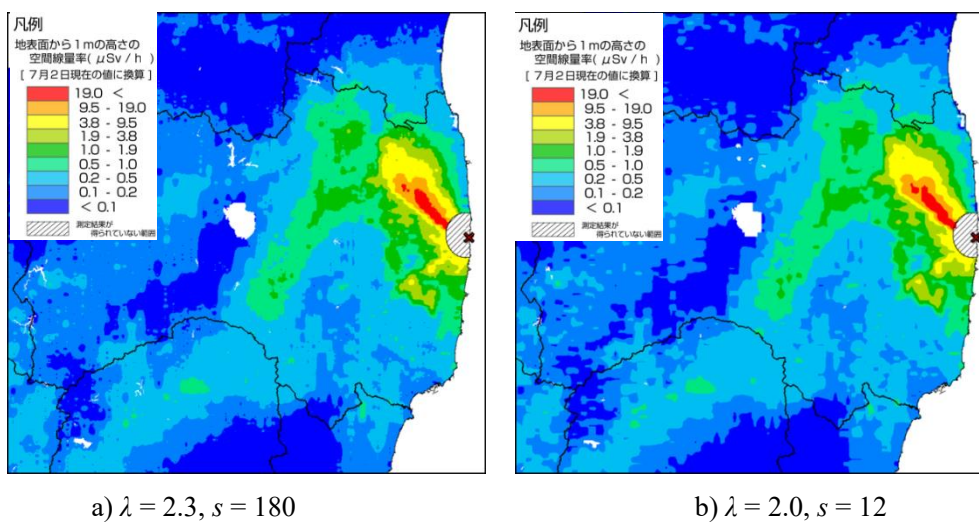
z_i : 各サンプル点を持つ実測値

s : 補間地点から近傍のサンプル点

である。

IDW による補間の条件として「補間地点とサンプル点間の距離が大きくなるにつれて、その補間地点においてサンプル点が推定値に与える影響が減衰していく」ことが前提になる。そのため、推定する (重み付け平均) 値は補間地点から近傍 s 点の最高値より大きくならず、最低値より小さくなることはない。また、IDW には複雑なパラメータ設定が不要である。必要となるのは、補間地点とサンプル点間の距離に応じて影響度を制御する乗数 λ と内挿処理の対象となるサンプル点数 s の 2 つである。IDW では λ と s の設定によって結果が異なってくるが、最良の値を決定するための基準が存在していない。 λ が大きいほど、補間地点近傍データの影響力が相対的に大きくなり、一般的に 2 がよく用いられるが、必ずしも 2 が最良であるとは限らない。本報告では、今まで積み上げてきた経験から、 λ として 2.3、 s として 180 を採用した。ちなみに、第 3 次航空機モニタリングの空間線量率の RMSE (Root Mean Squared Error: 二乗平均平方根誤差) は 0.208 であった。Fig. 4-28 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. 4-28 a) と λ を 2.0、 s を 12 とした Fig. 4-28 b) を比べると、両者とも概ねの分布傾向は一緒であるが、線量のレンジの境界をみると a) の方がなめらかになっていることが分かる。

航空機モニタリングにおいては Fig. 4-4 に示した通り、対地高度約 300 m から測定を実施するが、ヘリコプター直下の地上を中心とする半径 300 m 円内における放射線量の平均値が測定される。空間線量率等のマッピングにおいては、地域基準メッシュ (1 km) をベースとしつつ、上記の測定範囲を考慮して 250 m にメッシュサイズを決定した。



*第3次モニタリングの測定結果を使用

Fig. 4-28 IDW に入力するパラメータとマップの関係
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

4.11. 地上測定値との比較

航空機モニタリングの妥当性を検証するために、測定対象区域から地形的に平坦な場所であつた航空機モニタリング測線近傍の地点を選定し、地上測定を行った。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. 4-29 に航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値との比較を示す。比較は散布図 (左) 及び相対誤差 ((航空機モニタリングによる空間線量率 - 地上測定値) / 地上測定値) のヒストグラム (右) で行った。ここで、相対誤差が 0 であれば航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値が一致し、正であれば航空機モニタリングによる空間線量率の方が大きく、負 (ただし、-1.0 が最低値である。) であれば航空機モニタリングによる空間線量率の方が小さく評価されたことを意味する。散布図を見ると、93 % (全 350 点中 327 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 ~ 1.0 及び 1.0 付近に別の分布があり、弱いながらも多峰性が見られた。相対誤差の主要な分布から外れたデータのほとんどが東日本第 13 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 及び JA412N) 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、航空機モニタリングでは山間部において、地上測定値に対して空間線量率を 2 倍近く過大評価する場合がある。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 (日立製作所製 TCS-172B) を用いた地上測定値及び可搬型 Ge 検出器 (Canberra 製 Falcon 5000) を用いた Cs-137 の沈着量の測定値⁴³⁾を用いて、Fig. 4-29 と同様にして航空機モニタリングによる計算結果と比較した。なお、可搬型 Ge 検出器による測定値から地表面の放射性 Cs 沈着量に換算する際に用いる重量緩衝深度 (β) として 4.31 (g/cm²) が設定されている⁴³⁾。空間線量率の比較及び放射性 Cs の沈着量の比較について、Fig. 4-30 及び Fig. 4-31 にそれぞれ示す。散布図においてファクター2 を指標とすると、空間線量率においては 91 % (全 5,002 点中 4,549 点)、Cs-137 沈着量においては 48 % (全 219 点中 104 点) が収まった。空間線量率に関しては航空機モニタリングによる計算値は概ね地上測定値を再現できていると思われるが、Cs-137 沈着量に関しては可搬型 Ge 検出器による地上測定値が 100 kBq/m² 以下の領域で、航空機モニタリングによる計算値がファクター2 を逸脱するプロットが特に多い。このことから、航空機モニタリングによる Cs-137 の沈着量の計算値は 100 kBq/m² 以下の領域において、妥当性にやや乏しいと思われる。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 35 %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 0.13 であることから、正規分布からはやや逸脱した分布であることが窺われ、航空機モニタリングによる空間線量率の方が 10 %から 25 %程度は大きくなる傾向にあった。航空機モニタリングでは、除染等により生じた局所的な空間線量率の低下を反映できていないことが推察される。また、Cs-137 沈着量については相対誤差が広く分布しており、2.0 を上回る領域 (航空機モニタリングの方が 3 倍以上過大評価) に 20 %程度の特に大きな頻度が確認できる。加えて、平均値は 2.07 であるのに対し中央値が

0.10 であり、航空機モニタリングによる Cs-137 沈着量の計算値の方が明らかに大きく偏る傾向が示された。航空機モニタリングでは比較的広範囲を測定対象とすることに加え、全計数率に換算係数等を適用することで Cs-137 の沈着量をだまかに計算することから、その計算値には種々の不確かさが伴う。一方、可搬型 Ge 検出器は局所域を測定対象とし、エネルギー分解能に非常に優れ、詳細なスペクトル解析が可能である点で航空機モニタリングとは異なる。また、航空機モニタリングでは、前述の通り森林域や道路の多い都市域の重量緩衝深度の推定が難しいため、測定範囲全域で $\beta = 1.0$ (g/cm²) を一律に適用しており、その違いも影響していると考えられる。よって現状では、地上測定による Cs-137 の沈着量を航空機モニタリングで再現するには困難な点があると思われる。今後、地上測定値との比較をしつつ、土地利用区分に応じて、より適切な β の設定値について検討するなどし、Cs-137 沈着量の計算精度の向上に取り組む必要がある。

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

- ① 測定の範囲の違い：空中からの測定値は、上空を頂点とし対地高度を高さとした円錐の底面部分に該当する地上の放射線の平均値となる。実際には、測定される範囲は地上の半径 300 m 円内における放射線量の平均値となる。一方、地上測定による測定範囲は半径 30 m 程度の円の放射線量の平均値となる。よって、地上の放射線分布が一様の場合では整合しやすいが、地上の空間線量率の分布が均一でない場所では、測定結果が整合しにくいと考えられる。
- ② 周辺からの影響：地上の測定場所の近傍に大きな建物や森林等がある場合には、建物や樹木に沈着している放射性物質が地上測定に影響する可能性がある。また、上空で測定する場合においては、建物や森林等が地表面からの放射線を遮蔽するため、単純に比較できない場所がある。なお、本章において、比較用に取得した地上測定値は比較的地形が平坦な場所が多く、条件がよい場所を選定している。

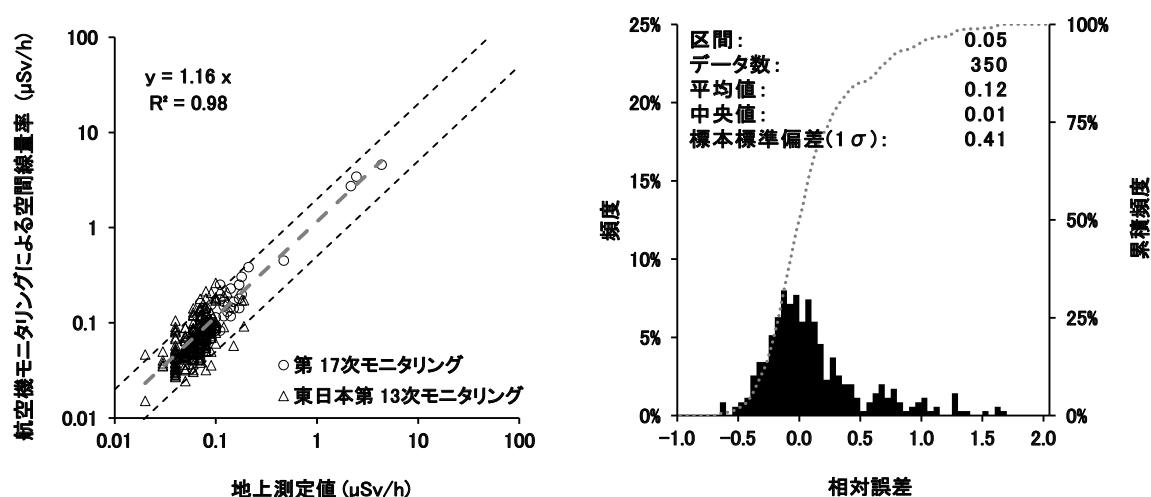


Fig. 4-29 測線近傍における地上測定値と航空機モニタリングによる空間線量率の比較
(左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

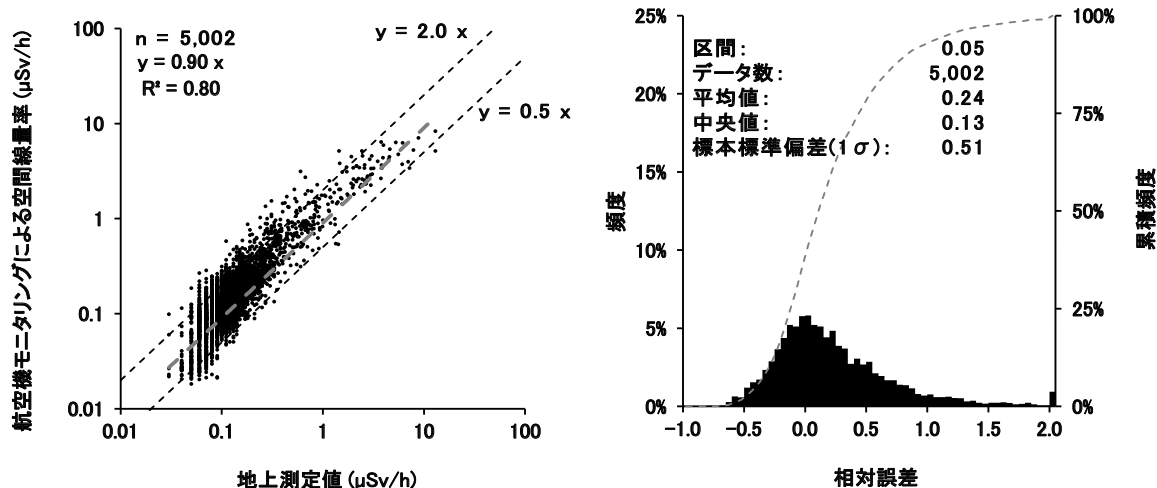


Fig. 4-30 ランダムな位置における地上測定値と航空機モニタリングによる空間線量率の比較
(地上測定値は原子力規制庁事業⁴³⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

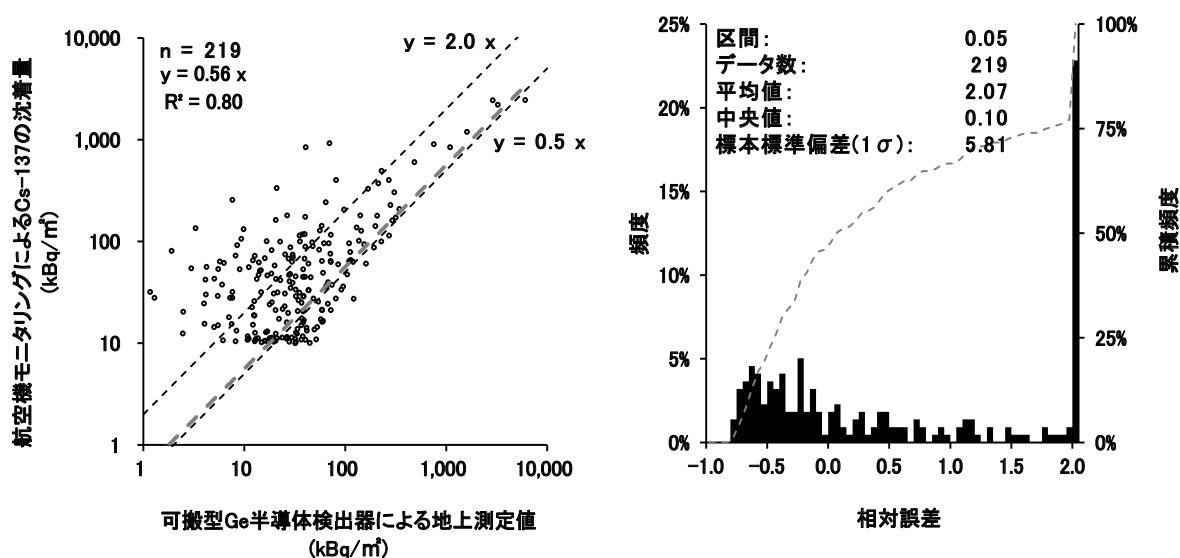


Fig. 4-31 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と航空機モニタリングによる Cs-137 沈着量の比較
(地上測定値は原子力規制庁事業⁴³⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

4.12. 天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの作成

天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの作成手法は 2014 年度 (平成 26 年度) に開発した^{18),47)}。航空機モニタリングで使用している RSI システムは γ 線のエネルギーを計測しているため、天然放射性核種由来の空間放射線量率を放射性 Cs による空間放射線量率と弁別して計測が可能である。しかしながら、これまで、放射性 Cs の影響の大きな地域においては、K-40 の放出する 1,461 keV のエネルギーピークの領域に、Cs-134 の放出する 1,365 keV (放出率 3.0 %) が干渉するため、正確な評価が難しかった。これらのピーク弁別に関数適合法⁴⁰⁾を適用することによって、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。

航空機モニタリングで使用している NaI(Tl)検出器では前述のように、放射性 Cs の影響が一定以上ある地域において K-40 の計数率を弁別することは難しい。Fig. 4-32 に典型的な γ 線スペクトルの例を示す。このような、お互いが干渉したスペクトルを弁別する手法として関数適合法⁴⁸⁾が有効である。本手法は、2 つのピークをガウス関数でそれぞれフィッティングし、干渉している部分の切り分けを行う。Fig. 4-32 のようにエネルギーピークを 2 つのガウス分布が干渉していると仮定した式 [11] を使用した。

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

ここで、 $S(i, j)$ は計数率、 E は γ 線エネルギー (keV)、 E_i はピークエネルギー (keV)、 σ^2 はピークの分散 (keV)、 $a + bE$ はベースライン、 c は正味のピーク計数率、 i, j は複合ピークのそれぞれの核種である。ピークの平均エネルギーや分散はフライト中に変わらないと仮定し、予め平均データから決定した。ここから、一般逆行列を用いて 1 秒ごとに a 、 b 、 c_i 、 c_j を求め、1,365 keV の Cs-134 が 1,400 keV 以上のエネルギーへ与える寄与割合から、Cs-134 由来の 1,400 keV ~ 2,800 keV に与える積算計数率 (CS_{1400}) を算出した。

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

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

ここで、 C_{1400} は 1,400 keV ~ 2,800 keV の積算計数率 (s^{-1})、 BG_{1400} は宇宙線由来の 1,400 keV ~ 2,800 keV の積算計数率 (s^{-1})、 CS_{1400} はラドン壊変生成物由来及びヘリコプター機体に起因する 1,400 keV ~ 2,800 keV の積算計数率 (s^{-1})、 $BG\text{-Index}$ は、福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs が沈着していない地域における全計数率と 1,400 keV ~ 2,800 keV の積算計数率の比率、 HF_{1400} は 1,400 keV ~ 2,800 keV の積算計数率に対する高度補正係数、 CD は空間線量率換算係数 ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$) である。1,400 keV ~ 2,800 keV の計数率が比較的小さいため、これらの係数を算出

する際には検出限界値を低くするために、積算計数率に対し 21 点 (21 秒) の移動平均を使用した。ヘリコプターの平均移動速度を約 50 m/s とすると、平均した測定エリアは 1 km ($50 \text{ m/s} \times 21 \text{ s} \approx 1,000 \text{ m}$) となる。1,400 keV～2,800 keV に対する空気減弱係数 AF は、4.5.2 項で示した固定パラメータと同様に、2014 年 (第 9 次モニタリング及び東日本第 5 次モニタリング) に実施したテストラインフライトの結果を基に Microsoft Excel® の指数近似機能で算出した値の算術平均値である。1,400 keV～2,800 keV に対する空気減弱係数を Table 4-10 に示す。本表には、通常の航空機モニタリングで使用している全エネルギー領域 (30 keV～2,800 keV) で算出した空気減弱係数を参考データとして併記した。本手法において対象としている γ 線エネルギー領域の平均値は、全エネルギー領域を対象とした場合よりも大きいため、空気により減弱される度合いが比較的小さくなる。従って、1,400 keV～2,800 keV に対する空気減弱係数が比較的小さくなっていることが分かる。 CD については、各使用ヘリ機種 (Bell412 及び Bell430) において、2012 年度から 2022 年度までに算出した CD と地上測定値との関係を調べたところ、空間線量率依存性が特に認められなかったことから、Table 4-5 に示した固定パラメータの数値と同一とした。地上測定値と算出した CD の関係について Fig. 4-33 (Bell412) 及び Fig. 4-34 (Bell430) に示す。

4.3 節に記載した通り、 CD の算出には地上測定値として NaI(Tl) 検出器による地上測定値 ($\mu\text{Sv/h}$) を用いている。空間放射線量の測定単位に Sv を用いている NaI(Tl) 検出器は通常、1 cm 線量当量 (周辺線量当量) でキャリブレーションされているため、航空機モニタリングで算出される空間線量率は必然的に 1 cm 線量当量率 (周辺線量当量率) を意味することになる。しかしながら、本項で作成する空間線量率マップは環境放射線に起因する空間放射線量を表現したものであり、このようなマップでは通常、放射線量率の単位として空気吸収線量率 ($\mu\text{Gy/h}$) が用いられるため、単位の換算が必要となる。空気吸収線量 (または自由空気中空気カーマ) から 1 cm 線量当量 (周辺線量当量) への換算手法についてはモンテカルロ法を用いた計算による評価例⁴⁹⁾や自然放射線の実測から算出した例⁵⁰⁾がある。自然環境中における γ 線の実効的エネルギーが 0.5 MeV 付近であると仮定した場合、いずれの例においても空気吸収線量 (Gy) : 1 cm 線量当量 (Sv) は概ね 1 : 1.2 と評価されている。以上のことから、式 [12] で求めた地表面から 1 m の高さの空間線量率 D_{nr} ($\mu\text{Sv/h}$) を 1.2 で除することにより、航空機モニタリングによる空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) を空気吸収線量率 ($\mu\text{Gy/h}$) に変換して、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。

福島原子力発電所周辺における、放射性 Cs の寄与分を取り除いた天然放射性核種由来の空間放射線量率マップと、取り除かれた放射性 Cs 由来の空間線量率マップを Fig. 4-35 に示す。Fig. 4-35 (左) に示した天然放射性核種由来の空間放射線量率マップには Fig. 4-35 (右) に示したマップのような発電所から北西方向への分布が見られない。このことから、本手法により放射性 Cs の影響を弁別できていると思われる。一方で、定量的な評価を行うため、福島県内において可搬型 Ge 検出器による測定で評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率⁴³⁾と航空機モニタリングで評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率を比較した結果を Fig. 4-36 に示す。可搬型 Ge 検出器による測定では天然放射性核種として、K-40 (1,461 keV)、ウラン系列では Pb-214 (352 keV) 及び Bi-214 (1,765 keV)、トリウム系列では Tl-208 (583 keV) 及び Ac-228 (911 keV) を評価対象としており、Fig. 4-36 にプロットされているのは上記の核種に由来する空気吸収線量率 (空気カーマ率) の合計値である。ただし、可搬型 Ge 検出器による測定を実施した 383 地点の内 94 地

点は測定時に降雨があったため⁴³⁾、比較対象外とした。また、残りの 289 点の内 3 点は航空機モニタリングによる空間放射線量率マップの範囲外に位置していたため比較対象外とし、286 点のデータを比較に用いた。散布図 (Fig. 4-36 (左)) を見てみると、0.05 $\mu\text{Gy/h}$ から 0.10 $\mu\text{Gy/h}$ の領域でややばらつきは大きいものの、ファクター2に 94 % (全 286 点中 268 点) が収まった。相対誤差は ((航空機モニタリングで評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率 - 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) / 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)) によって算出した。相対誤差のヒストグラム (Fig. 4-36 (右)) については 0.0 以上 (航空機モニタリングの方が過大評価) の領域でやや広範囲に分布が見られ、平均値及び中央値は 0.18 及び 0.15 であった。つまり、航空機モニタリングで評価した空間放射線量率の方が可搬型 Ge 検出器による空間放射線量率よりも概ね 20 % 高く算出されたことを意味するが、絶対値の差異の平均は 0.01 $\mu\text{Gy/h}$ 前後であり、両者は概ね等価である。以上のことから、2つの Gauss 分布を仮定した関数適合法により、精度よく全計数率から放射性 Cs による計数率を弁別し、天然放射性核種由来の空間放射線量率を推定できると考えられる。

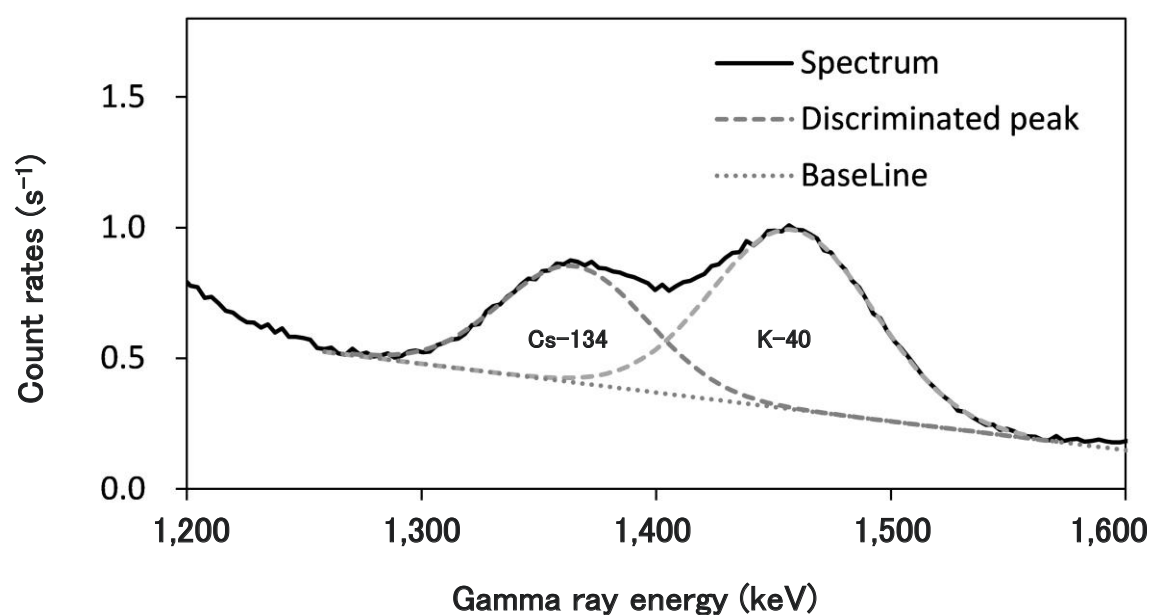


Fig. 4-32 関数適合法を用いた Cs-134 と K-40 の弁別

Table 4-10 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。)

Energy range	Bell412 (JA9616、JA6928及びJA412N)		Bell430 (JA05TV)	
	Value $\pm$ SD(1σ)	Number	Value $\pm$ SD(1σ)	Number
1,400 keV - 2,800 keV	-0.00580 $\pm$ 0.00080	11	-0.00600 $\pm$ 0.00102	8
30 keV - 2,800 keV	-0.00720 $\pm$ 0.00042	21	-0.00720 $\pm$ 0.00040	35

※SD: 標本標準偏差

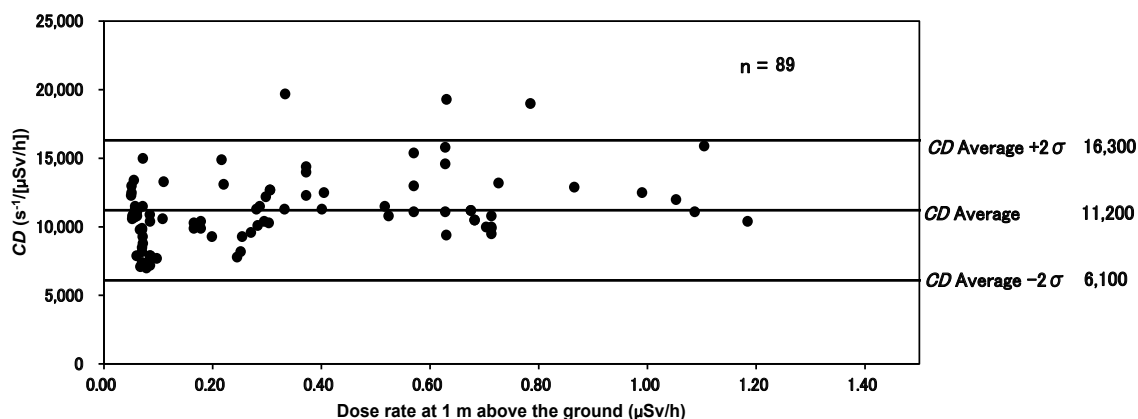


Fig. 4-33 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell412)
(本図中の σ は CD に対する標本標準偏差である。)

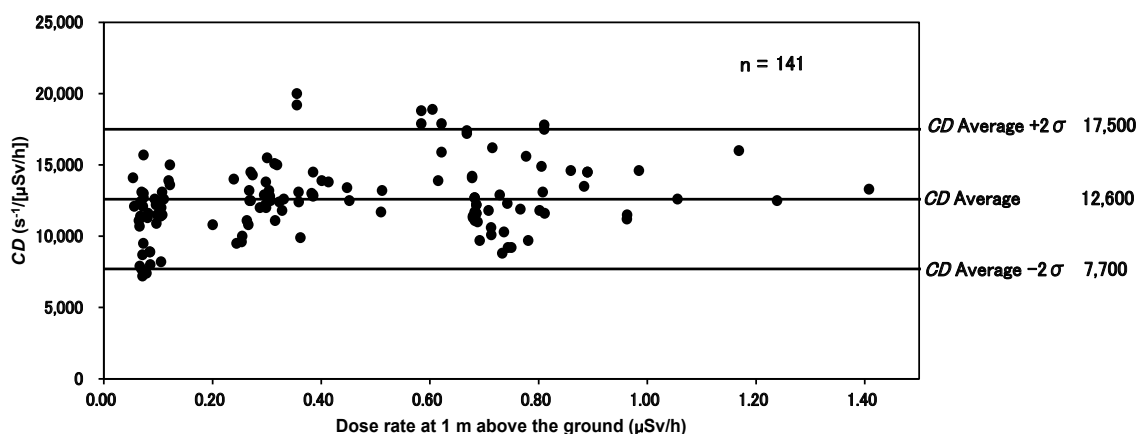
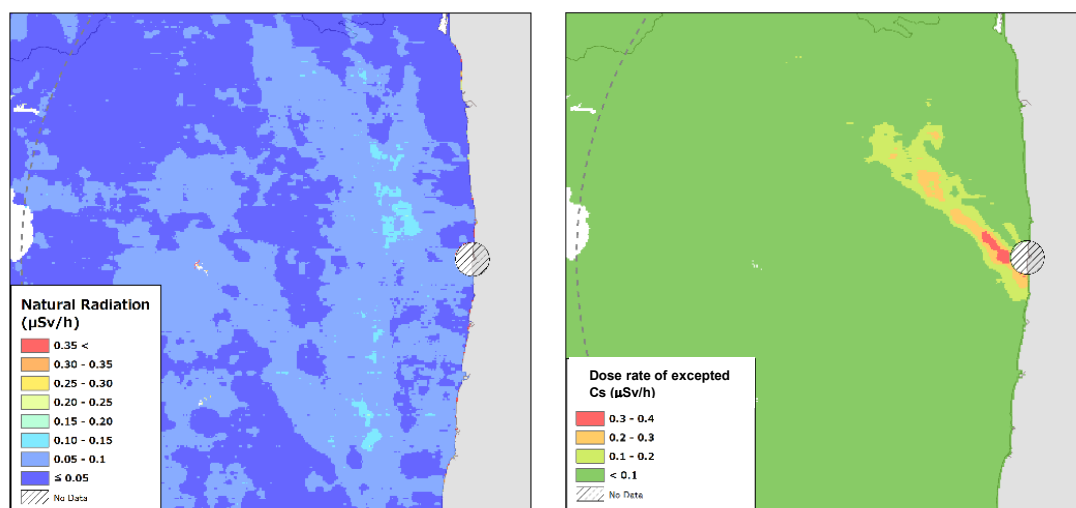


Fig. 4-34 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell430)
(本図中の σ は CD に対する標本標準偏差である。)



天然放射性核種由来の空間放射線量率マップ 放射性 Cs 由来の空間放射線量率マップ

Fig. 4-35 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。)

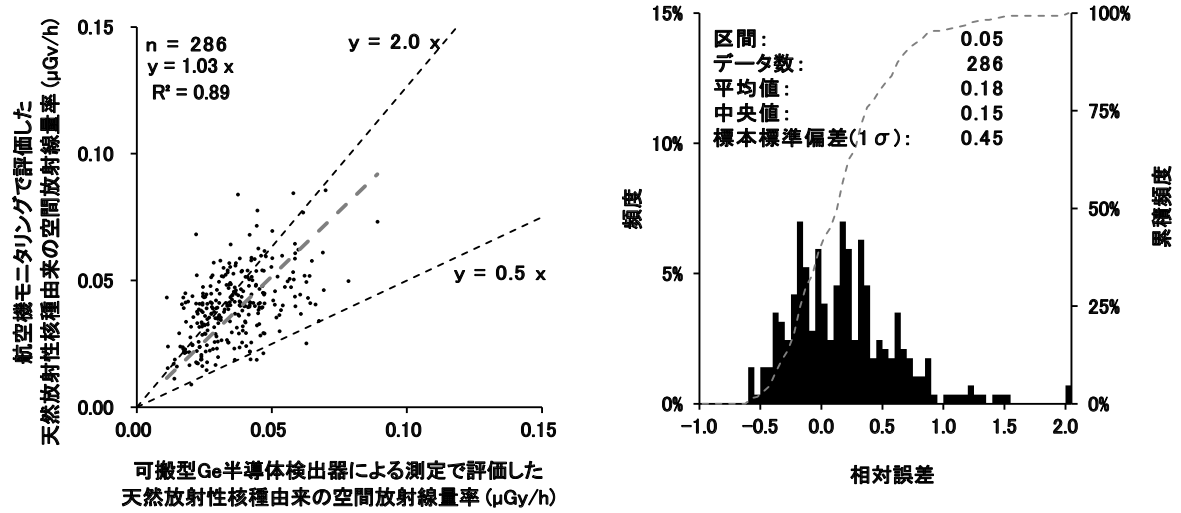


Fig. 4-36 可搬型 Ge 検出器による測定で評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率と航空機モニタリングで評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率との比較
(左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

5. 航空機モニタリング結果

5.1. ヘリコプターによるフライトの実績

3.2 節に記述した通り、第 17 次モニタリング及び東日本第 13 次モニタリングでは Bell412 (JA9616、JA6928 及び JA412N) 及び Bell430 (JA05TV) を使用した。第 17 次モニタリングでは機体繰りの都合上、福島県双葉郡楢葉町の山田浜付近を境界として測定エリアを南北に分割し、Bell430 (JA05TV) で北側を測定し、Bell412 (JA9616 及び JA6928) で南側を測定した。また、東日本第 13 次モニタリングでは福島原子力発電所を境界に測定エリアを南北に分割し、Bell430 (JA05TV) で北側 (宮城県一帯)、中央部 (福島県西部) 及び南側の一部 (栃木県北西部及び東部、茨城県東部及び西部、埼玉県東部) を測定し、Bell412 (JA6928 及び JA412N) で西側 (栃木県中央部から群馬県一帯) 及び南側 (茨城県、千葉県北部、埼玉県東部) を測定した。第 17 次モニタリング及び東日本第 13 次モニタリングに要した期間は以下の通りである。

[フライトに要した期間]

- ・ 第 17 次モニタリング：2022 年 (令和 4 年) 9 月 1 日～9 月 30 日 (延べ 46 フライト)
- ・ 東日本第 13 次モニタリング：同年 9 月 13 日～10 月 21 日 (延べ 67 フライト)

また、ヘリコプターごとにフライトした距離や平均フライト速度、回数等をまとめた表を Table 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、東日本第 13 次モニタリングにおける Bell412 (JA6928) を除き 4.2 節で示した速度の範囲内であった。東日本第 13 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。第 17 次モニタリングの期間中、9 月 11 日に Bell412 (JA9616) にエンジンオイル漏れが発見されたため、当該機体によるモニタリングを中断し、Bell412 (JA6928) に交代してモニタリングを継続した。東日本第 13 次モニタリングの期間中、10 月 19 日に Bell412 (JA412N) でフライト中に異常振動が発生したことを受け、当該機体によりモニタリングを継続することは作業安全性の観点から望ましくないと判断し、測定予定であったエリアの一部 (茨城県東部) を Bell430 (JA05TV) で代わりに測定した。

Table 5-1 ヘリコプターごとのフライト距離及び速度とフライト回数

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)		
			Bell430 (JA05TV)	Bell412 (JA9616)	Bell412 (JA6928)
第17次モニタリング	9,680	18,386	154	152	161
東日本第13次モニタリング	11,300	24,986	149		122

※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	Bell430 (JA05TV)		Bell412 (JA9616)		
	測定開始	測定終了	フライト回数	測定開始	測定終了
	2022年9月1日	2022年9月30日	30	2022年9月1日	2022年9月12日
東日本第13次モニタリング	2022年9月30日	2022年10月21日	24		

※¹エンジンオイル漏れが発見されたため、Bell412 (JA6928) に交代して、以降のモニタリングを継続した。

モニタリング名	Bell412 (JA6928)		Bell412 (JA412N)		
	測定開始	測定終了	フライト回数	測定開始	測定終了
	2022年9月12日	2022年9月12日	1		
東日本第13次モニタリング	2022年9月13日	2022年10月3日	29	2022年10月3日	2022年10月19日

※²異常振動が発生したため、Bell430 (JA05TV) に交代して、以降のモニタリングを継続した。

モニタリング名	延べ フライト回数
第17次モニタリング	46
東日本第13次モニタリング	67

5.2. 第 17 次モニタリング

航空機モニタリングの測定結果を基に、地表面から 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. 5-1 に示す。また、放射性 Cs の沈着量 (Cs-137 及び Cs-134 の合計量) の状況を示した「放射性 Cs 沈着量マップ」を Fig. 5-2 に示す。また Cs-137 及び Cs-134 の沈着量マップを Fig. 5-3 及び Fig. 5-4 にそれぞれ示す。放射性 Cs の沈着量マップについては前述したように、 $\beta = 1.0 \text{ (g/cm}^2\text{)}$ としたときの換算係数を使用したため、誤差を多分に含む可能性があることに留意する必要がある。なお、空間線量率及び放射性 Cs の沈着量は、第 17 次モニタリングを実施した最終日である 2022 年 (令和 4 年) 9 月 30 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⁵¹⁾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 Bq/kg である⁵²⁾。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 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 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 ($150 \text{ L/m}^2 \times 1.3 \text{ kg/L} \times 5,000 \text{ Bq/kg} = 975,000 \text{ Bq/m}^2 \div 1,000 \text{ kBq/m}^2$)。

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

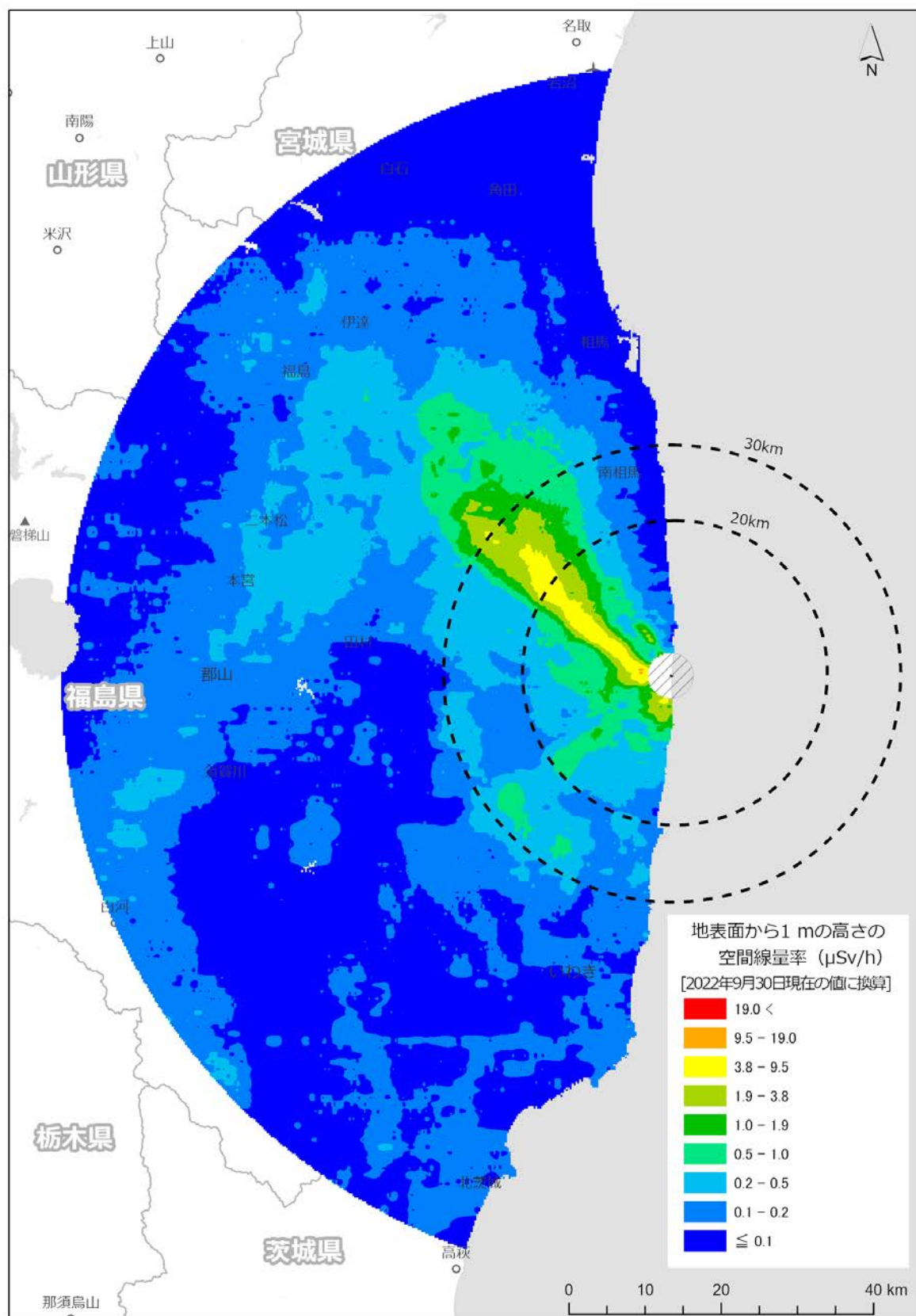


Fig. 5-1 第17次モニタリングにおける空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

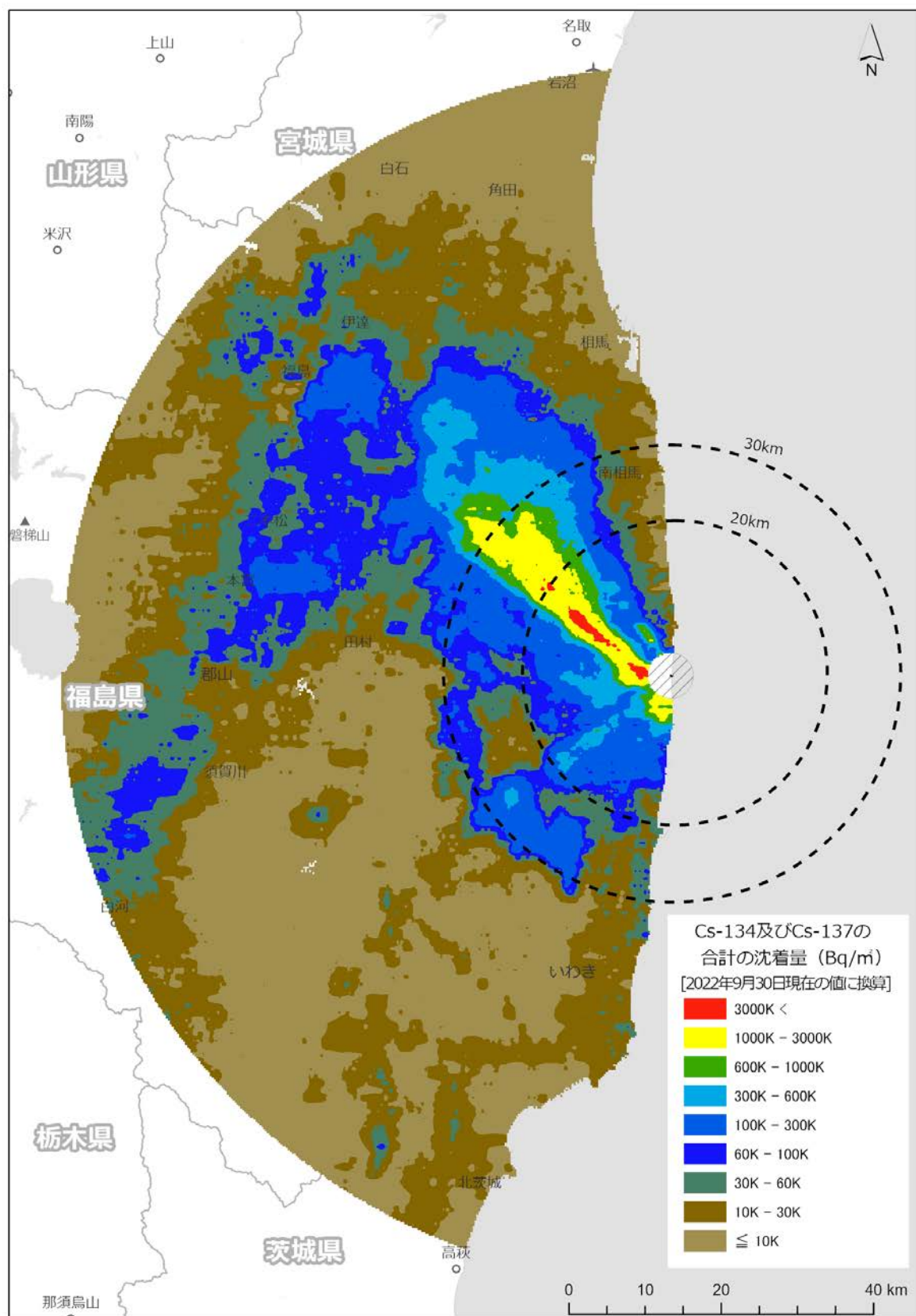


Fig. 5-2 第17次モニタリングにおける放射性Cs沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

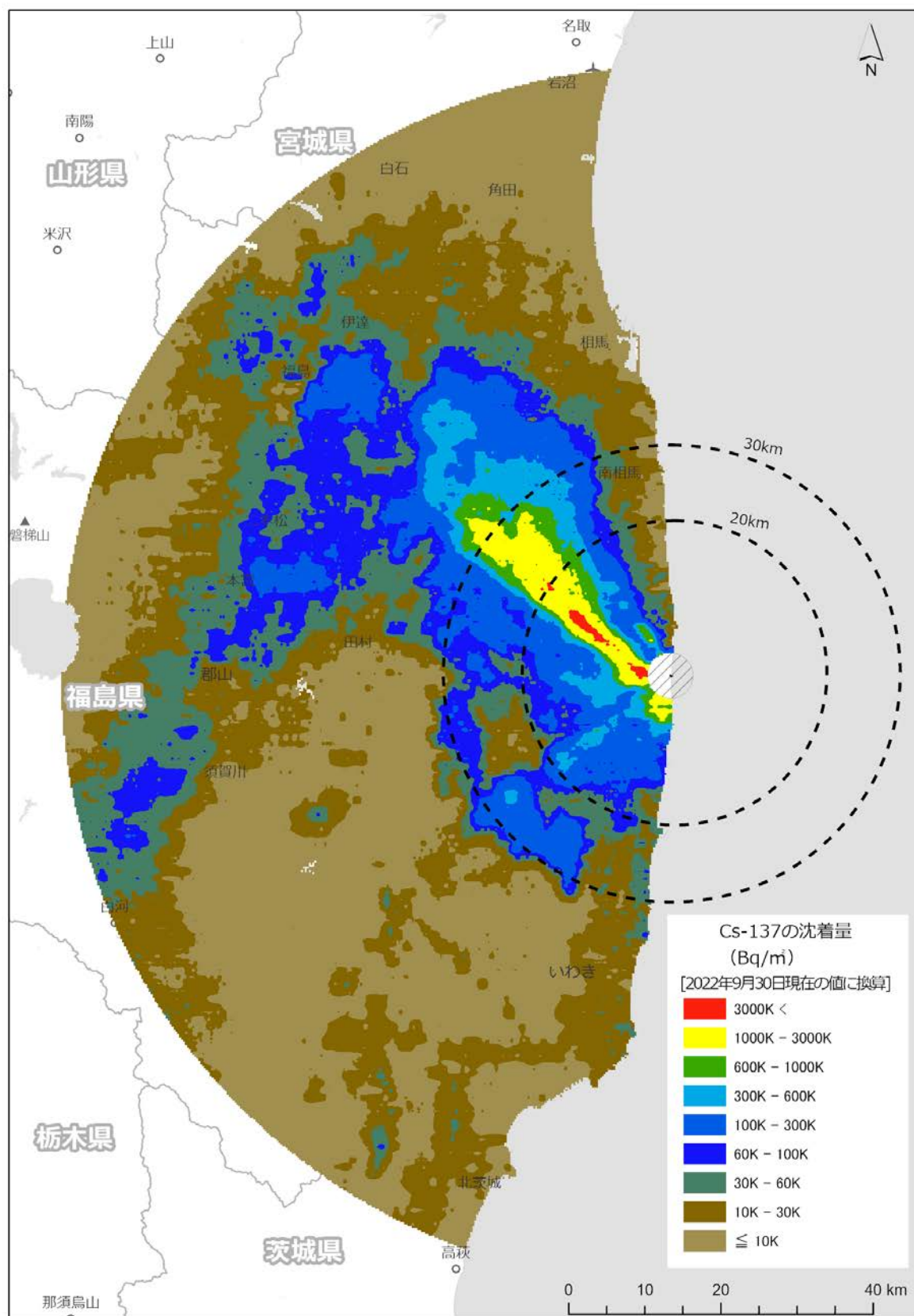


Fig. 5-3 第17次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

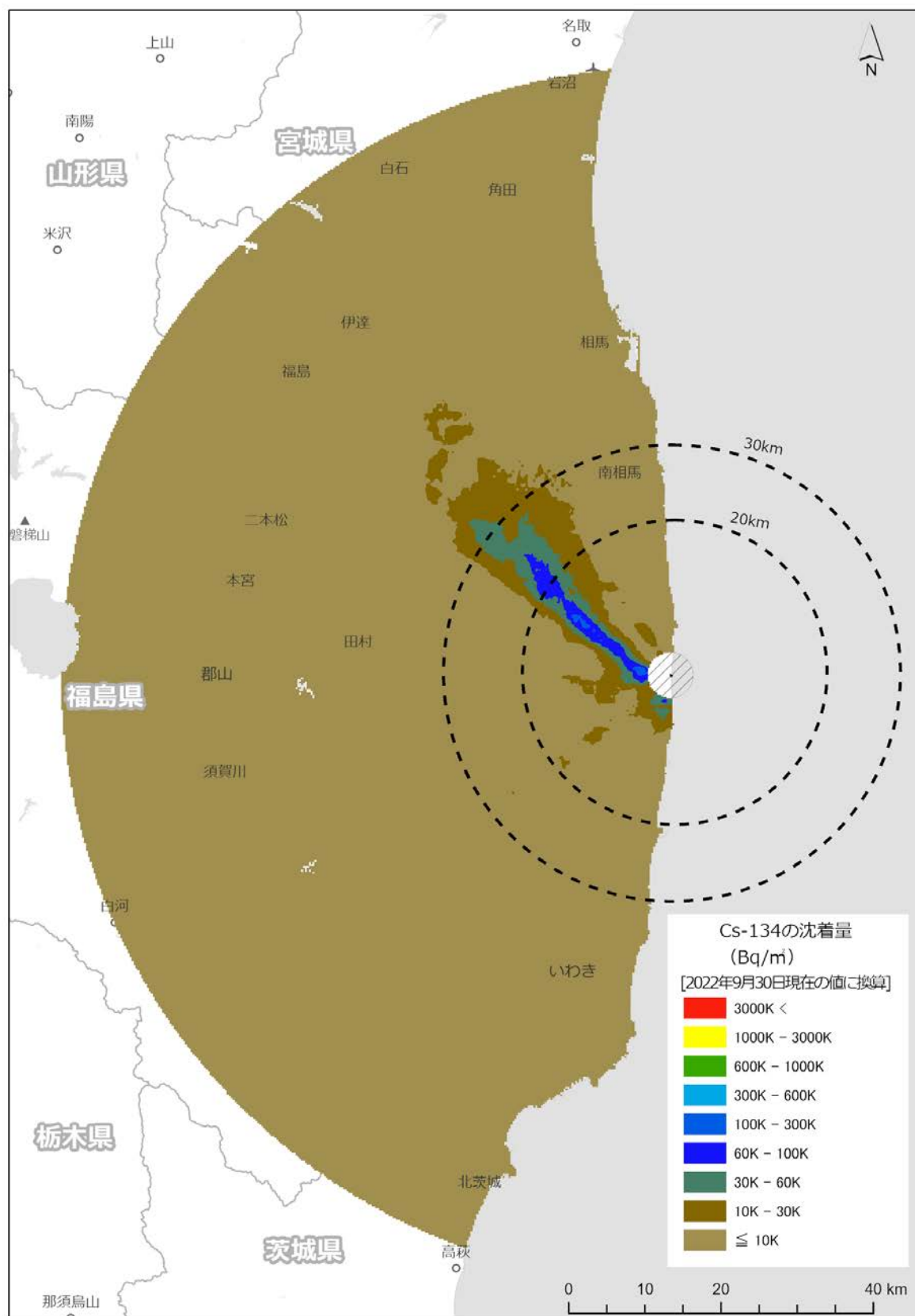


Fig. 5-4 第17次モニタリングにおけるCs-134沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

5.3. 東日本第 13 次モニタリング

航空機モニタリングの測定結果を基に、地表面から 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. 5-5 に示す。また、放射性 Cs の沈着量 (Cs-137 及び Cs-134 の合計量) の状況を示した「放射性 Cs 沈着量マップ」を Fig. 5-6 に示す。また、Cs-137 及び Cs-134 の沈着量マップを Fig. 5-7 及び Fig. 5-8 にそれぞれ示す。空間線量率及び放射性 Cs の沈着量は、東日本第 13 次モニタリングを実施した最終日である 2022 年 (令和 4 年) 10 月 21 日現在の値に減衰補正した。

また、第 17 次モニタリングとの整合性を確認するために、第 17 次モニタリング及び東日本第 13 次モニタリングで取得した全データを統合し、同年 10 月 21 日現在の値に減衰補正しマッピングした。第 17 次モニタリング及び東日本第 13 次モニタリングを統合した「空間線量率マップ」及び「放射性 Cs 沈着量マップ」を Fig. 5-9 及び Fig. 5-10 にそれぞれ示す。また、Cs-137 及び Cs-134 の沈着量マップを Fig. 5-11 及び Fig. 5-12 にそれぞれ示す。境界部分のマップの整合性も違和感がなく、よく一致していることが分かる。

天然放射性核種由来の空間放射線量率マップを Fig. 5-13 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⁴⁷⁾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わらないと考えられ、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 (平成 27 年) から 2021 年 (令和 3 年) 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. 5-14 に示す。このように、各年度で天然放射性核種由来の空間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ことが示唆される。

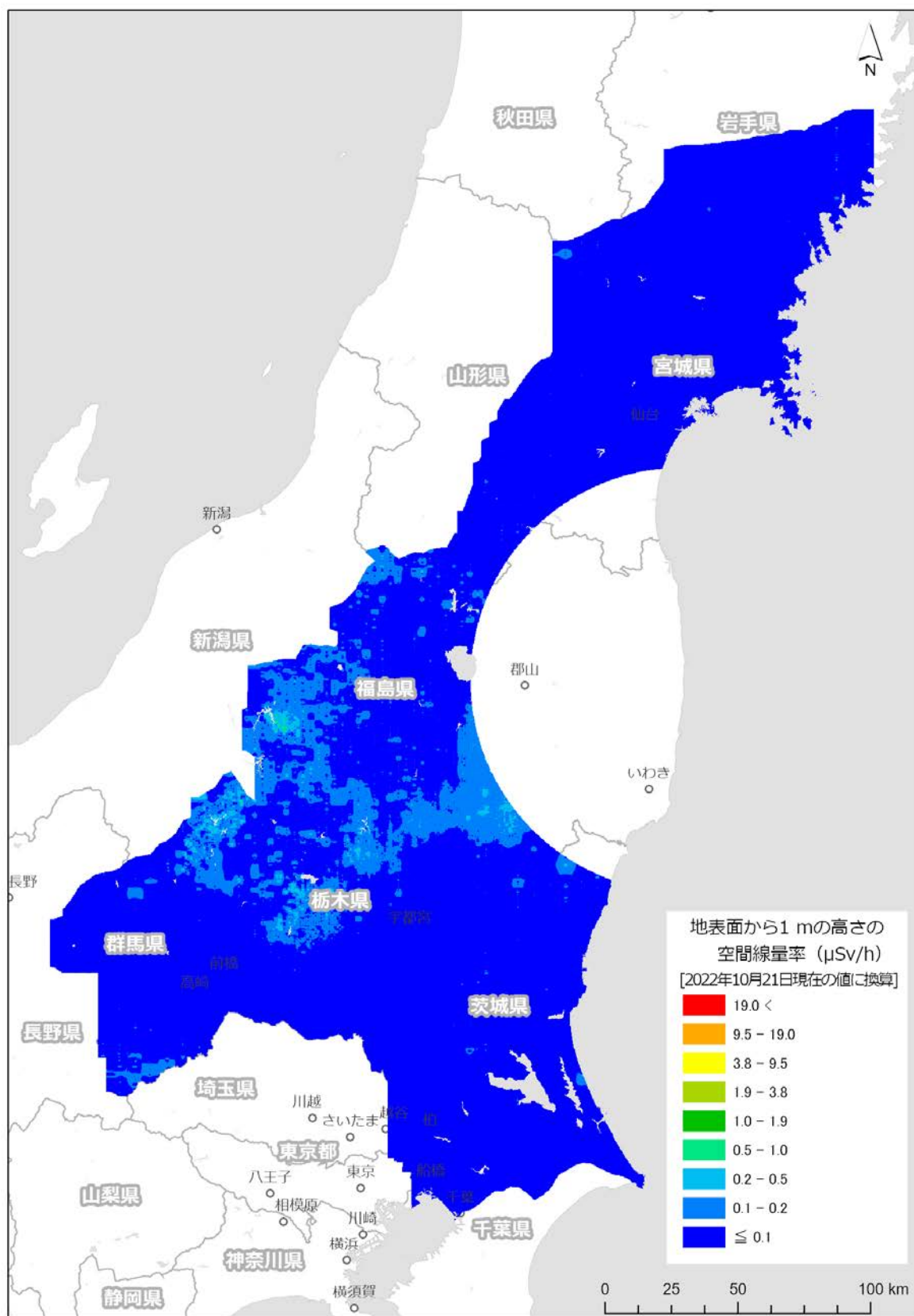


Fig. 5-5 東日本第13次モニタリングにおける空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。

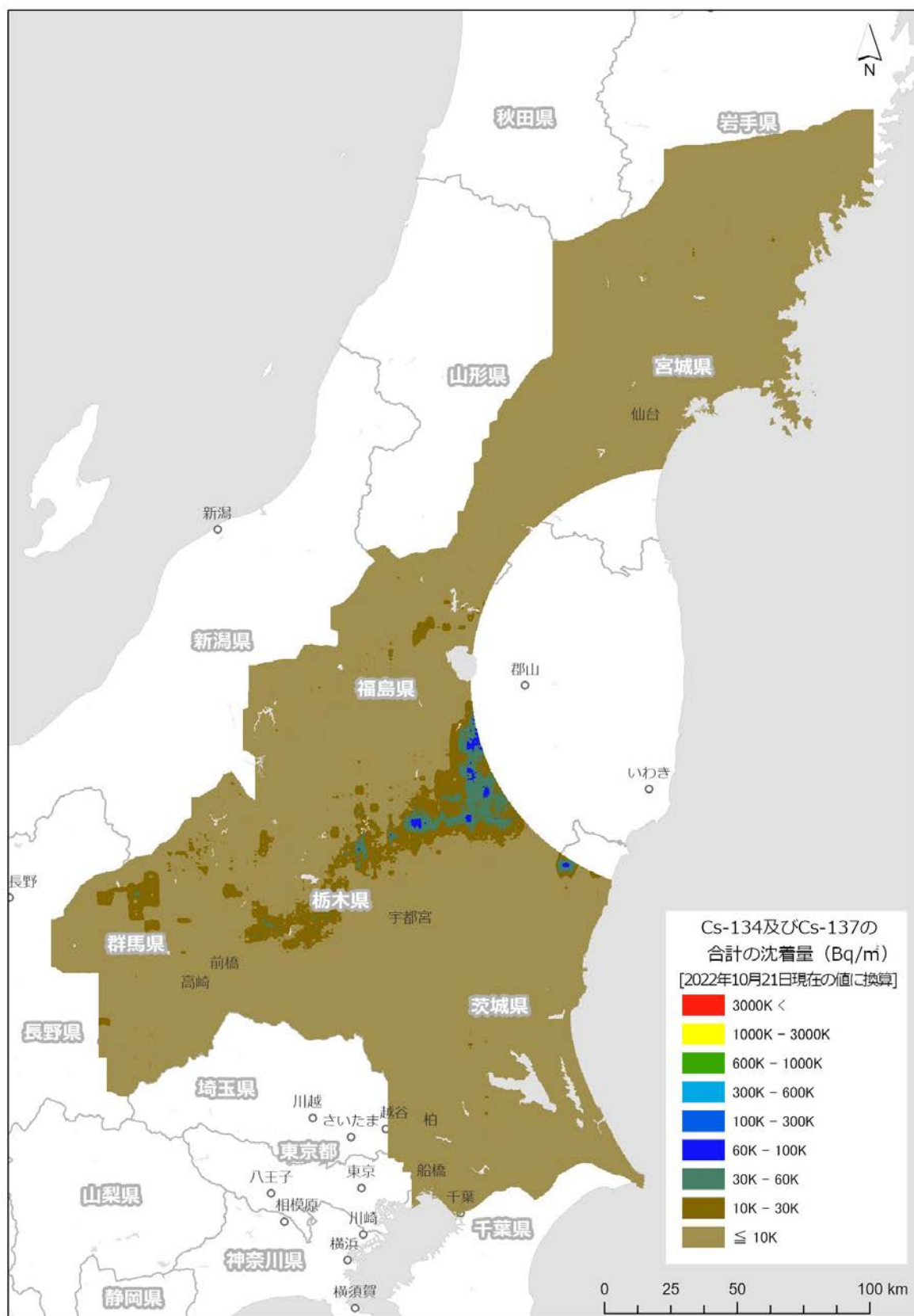


Fig. 5-6 東日本第13次モニタリングにおける放射性Cs沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

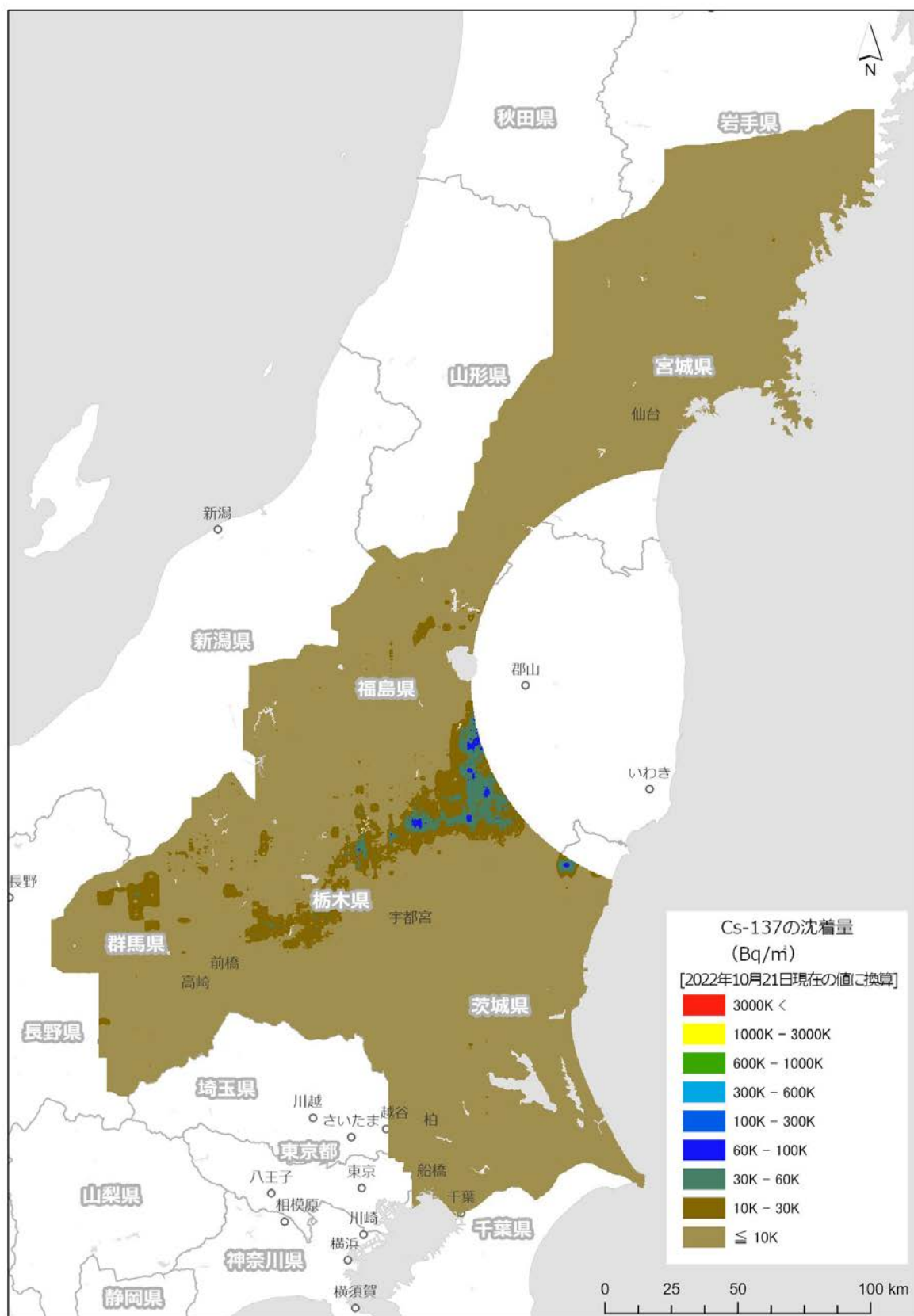


Fig. 5-7 東日本第13次モニタリングにおけるCs-137沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

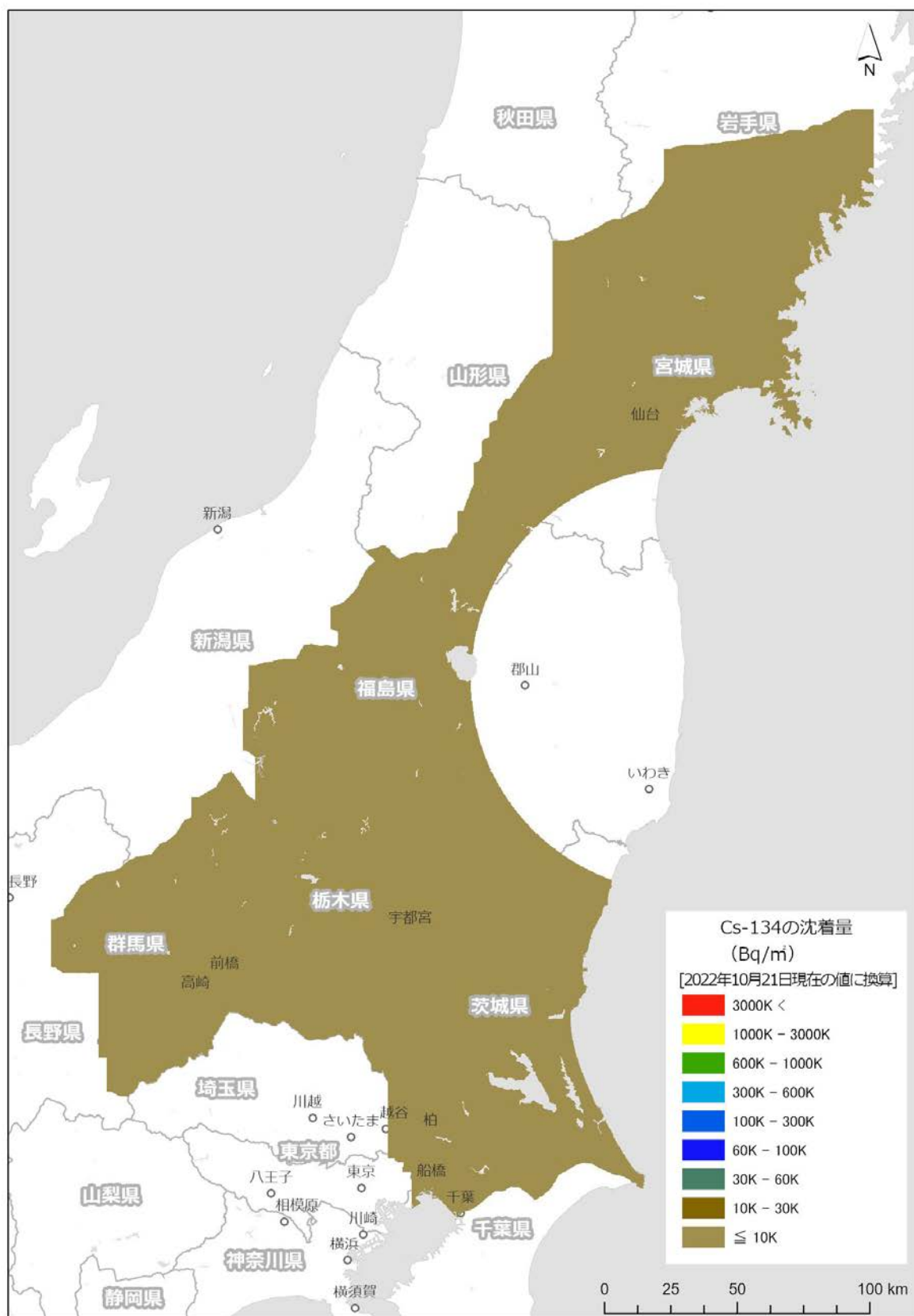


Fig. 5-8 東日本第13次モニタリングにおけるCs-134沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

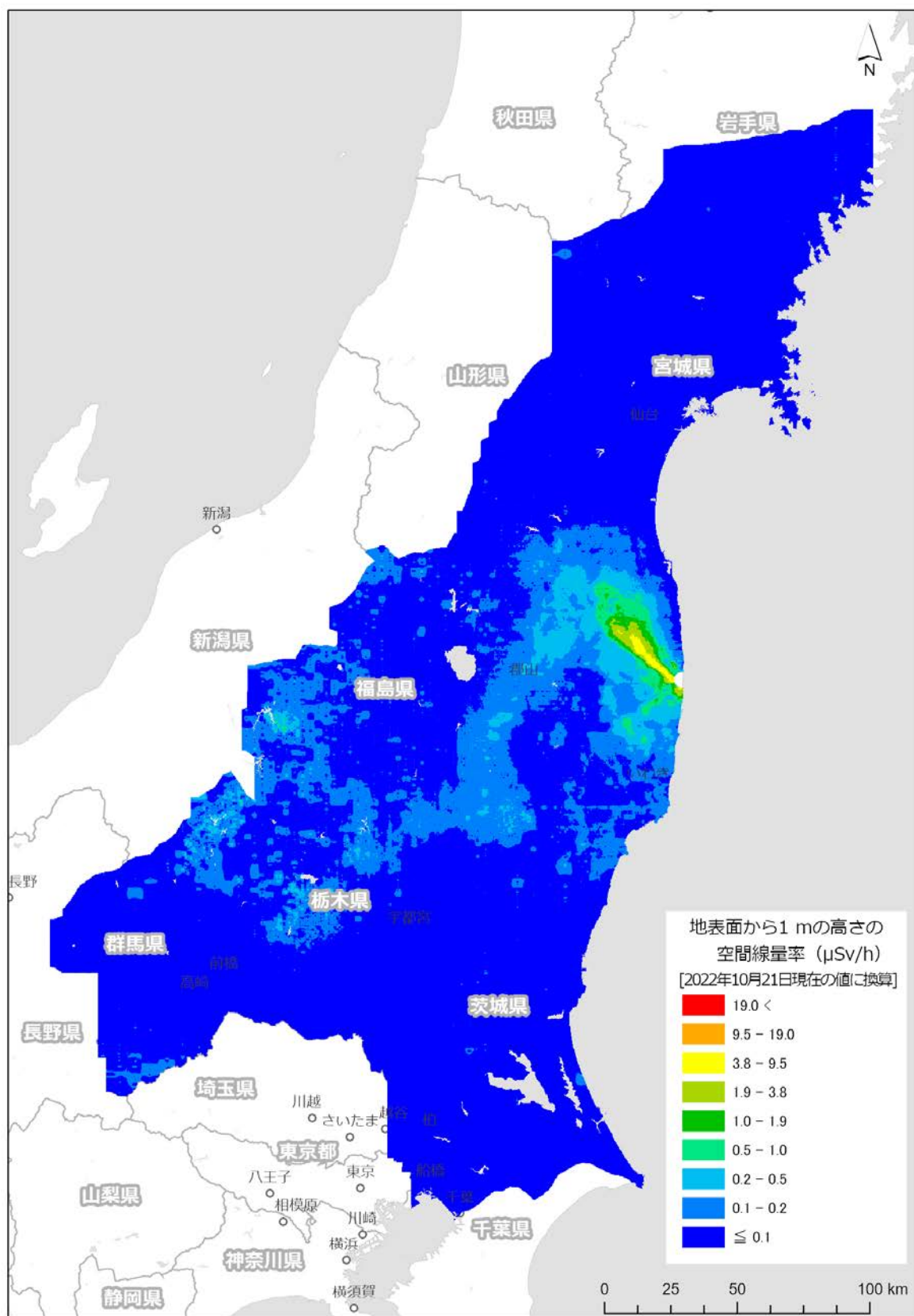


Fig. 5-9 第17次モニタリングと東日本第13次モニタリングにおける空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

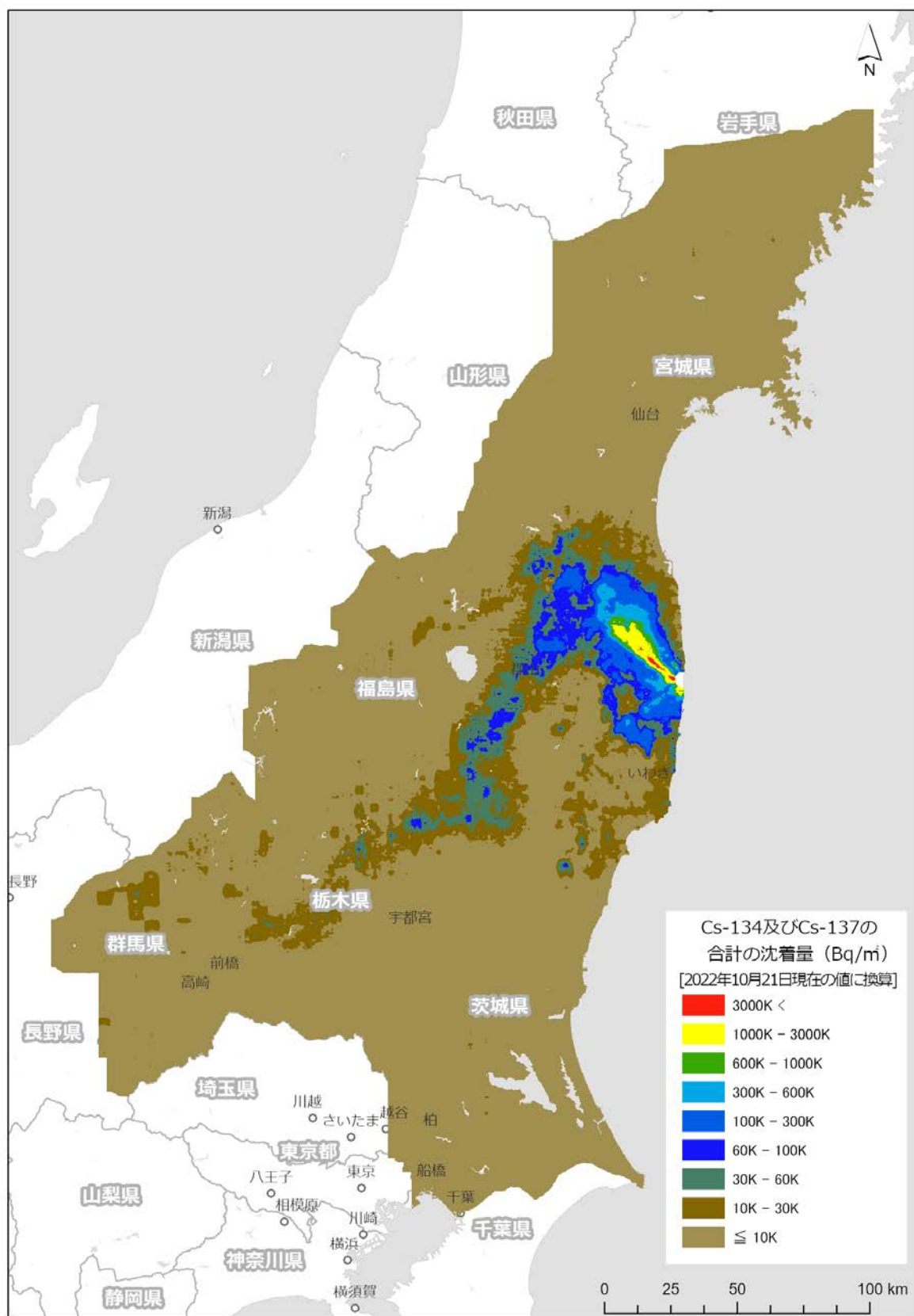


Fig. 5-10 第17次モニタリングと東日本第13次モニタリングにおける放射性Cs沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

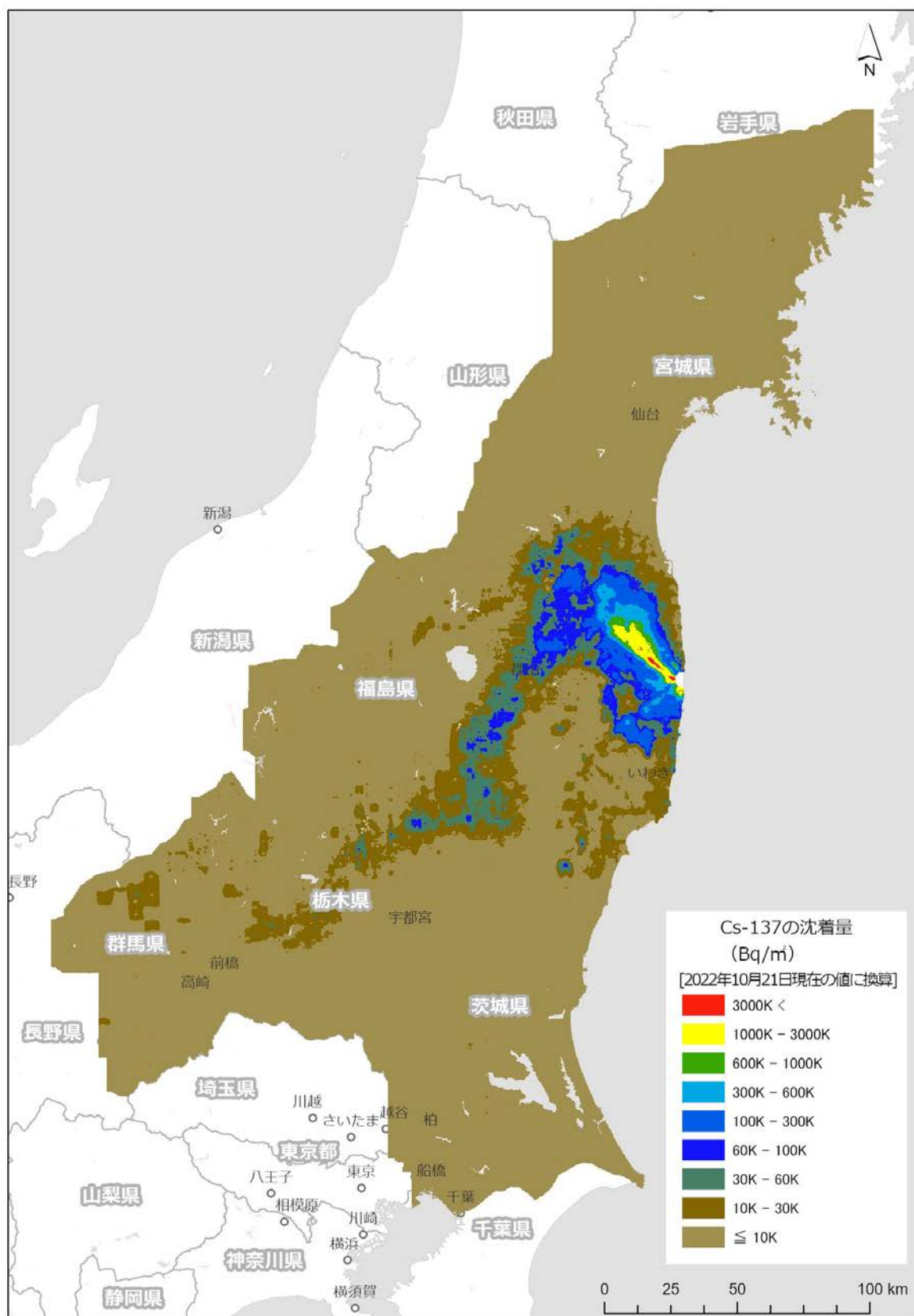


Fig. 5-11 第17次モニタリングと東日本第13次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

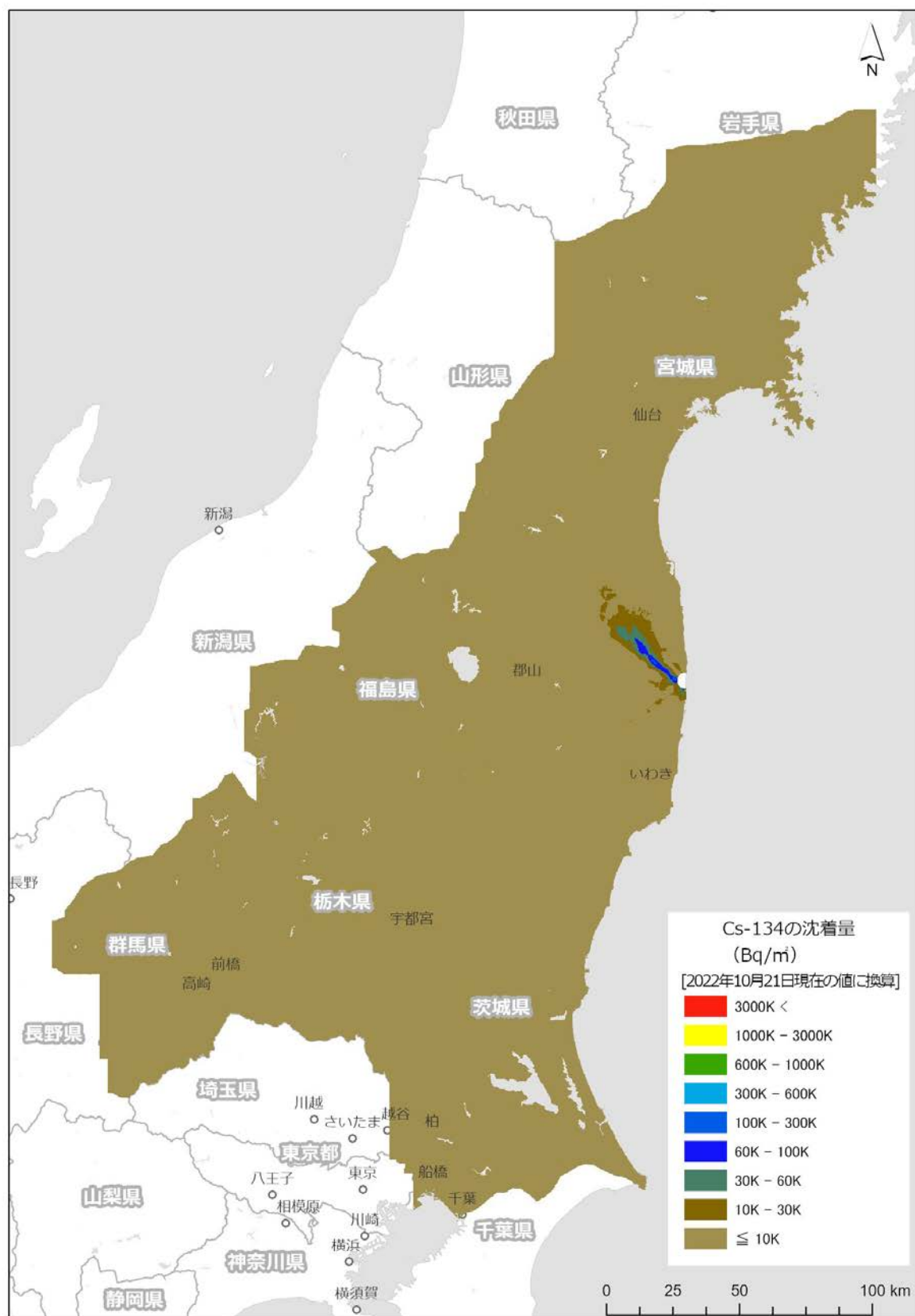


Fig. 5-12 第17次モニタリングと東日本第13次モニタリングにおけるCs-134沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

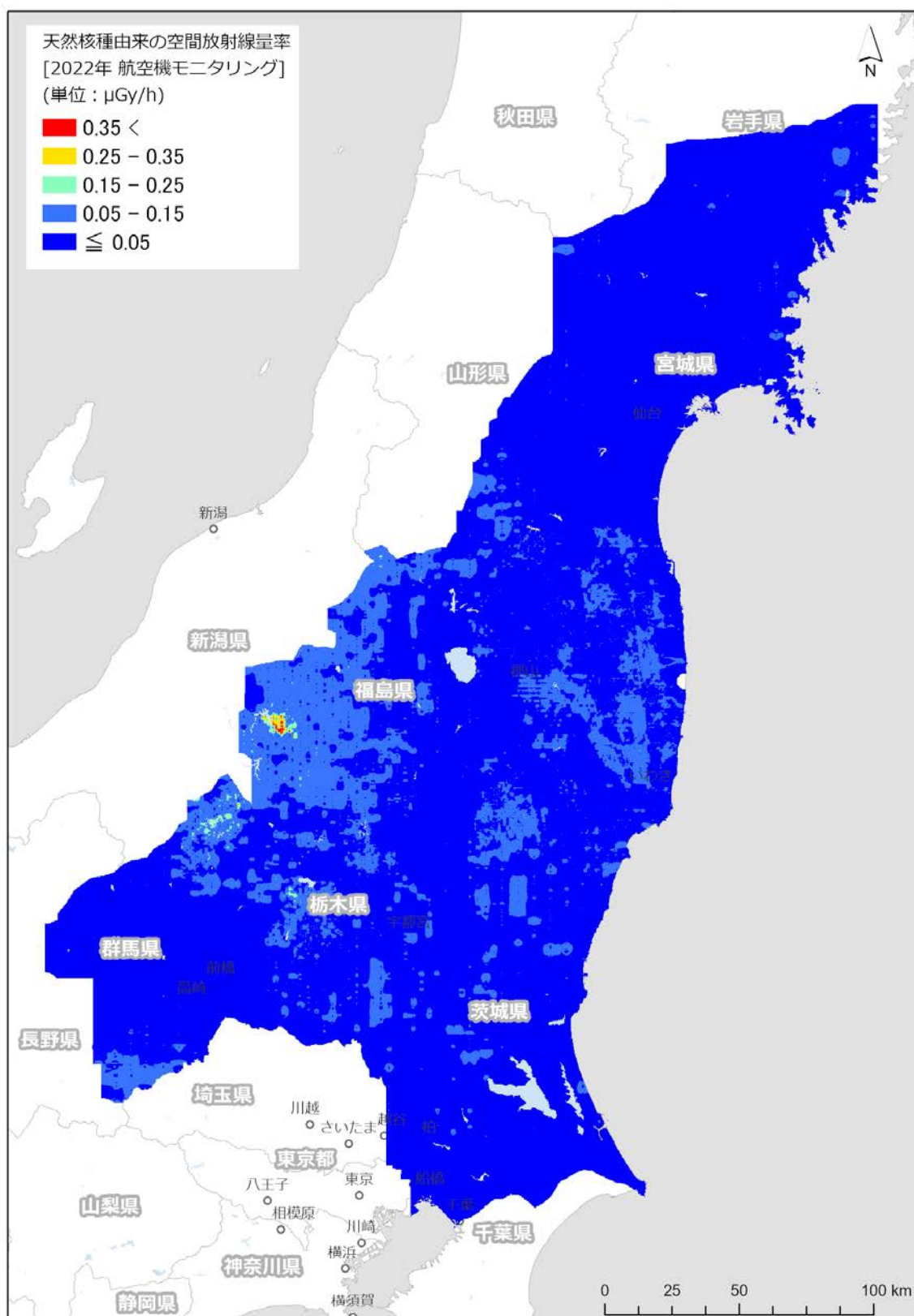
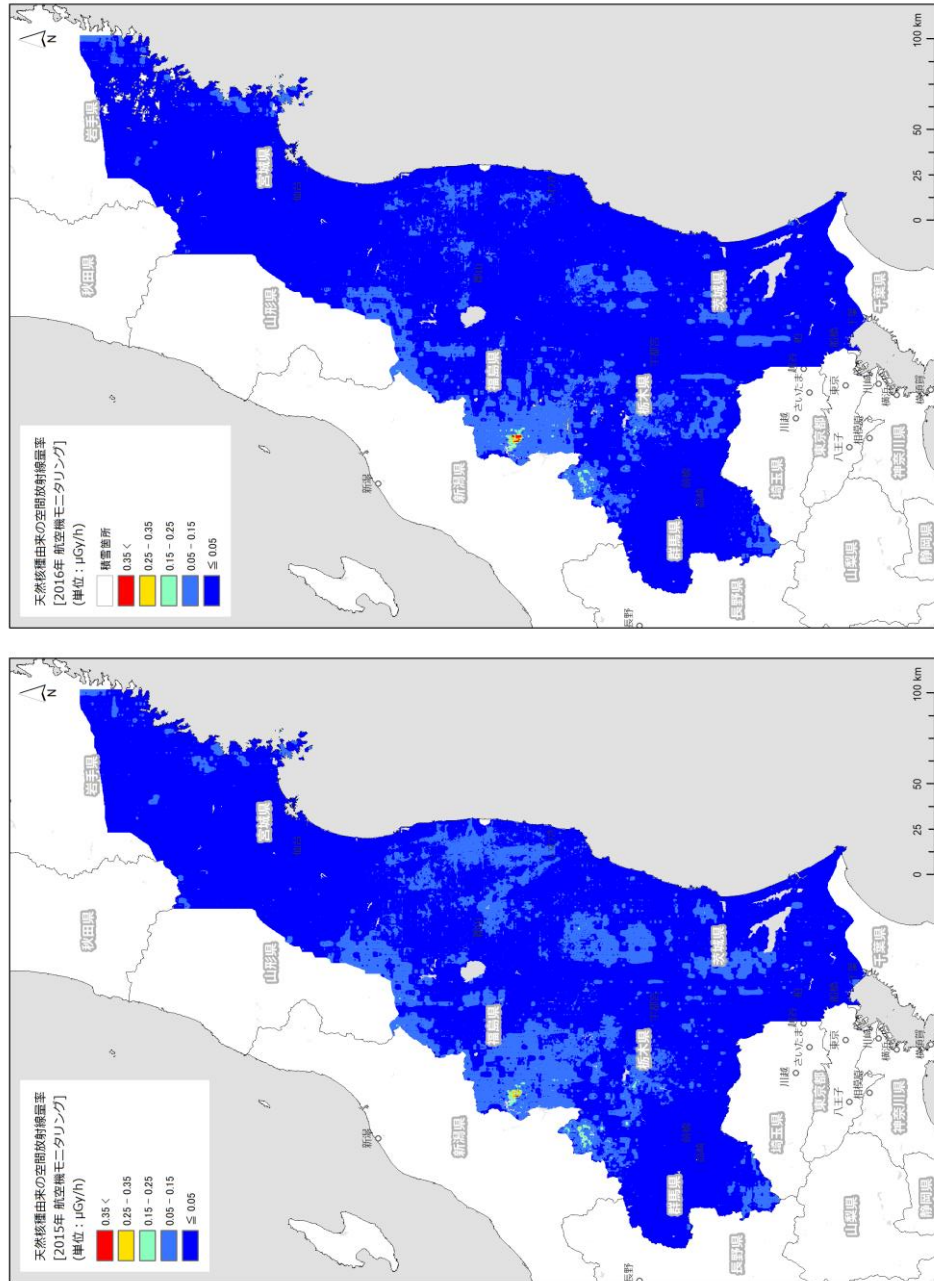


Fig. 5-13 第17次モニタリングと東日本第13次モニタリングにおける天然放射性核種由来の空間放射線量率マップ

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

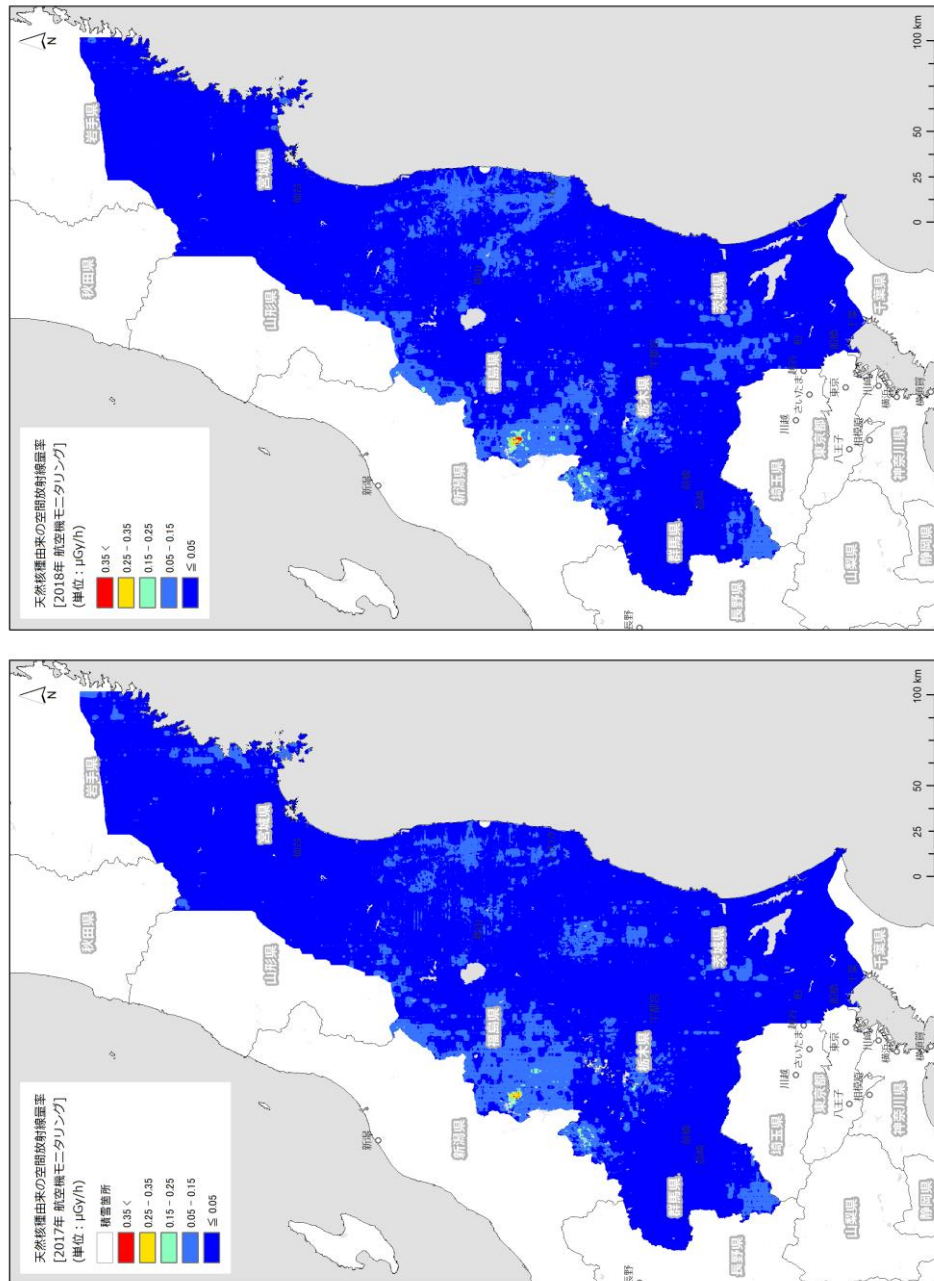


2015 年

2016 年

Fig. 5-14 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
(1/4)

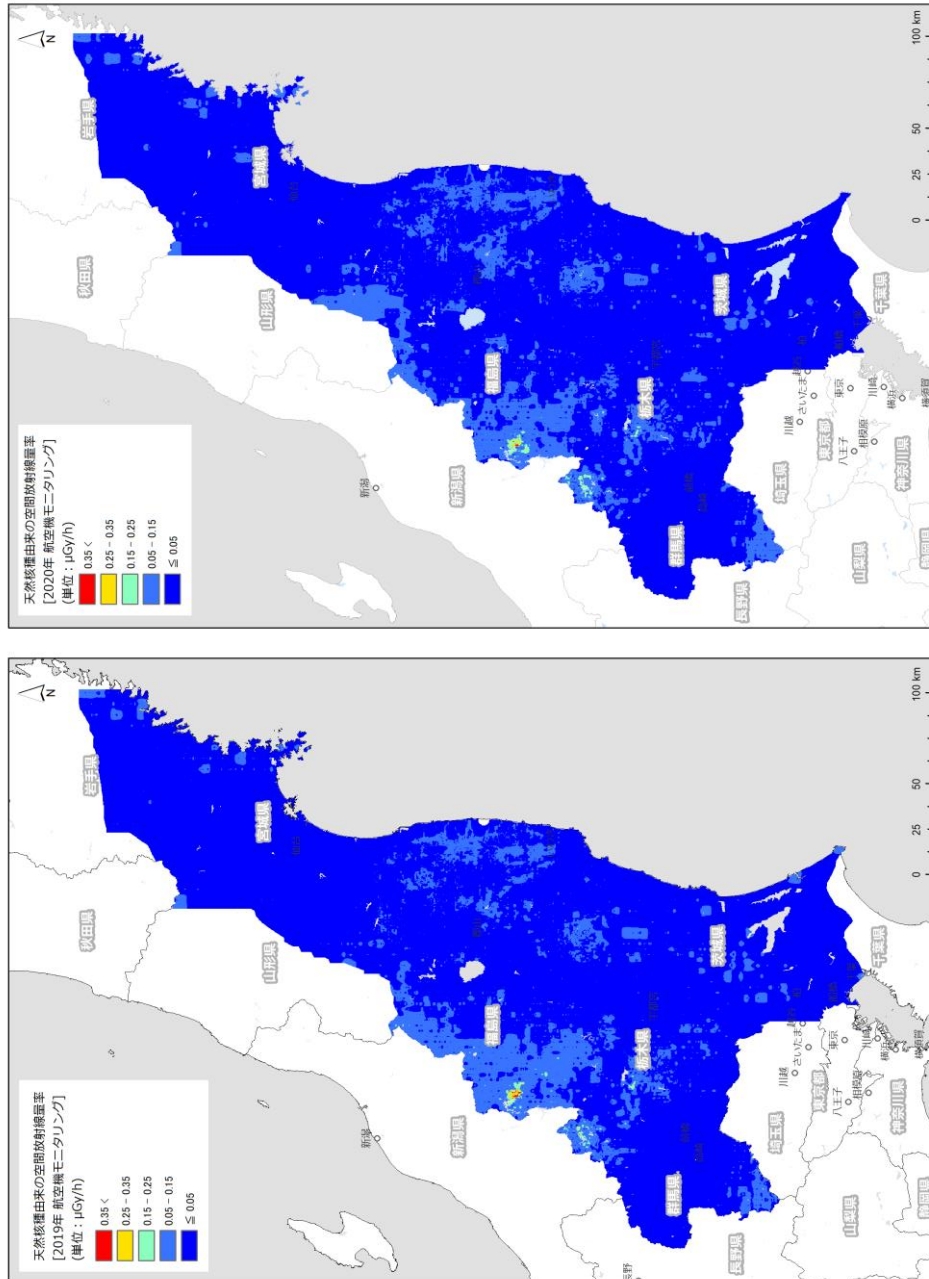
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)



2017年
2018年

Fig. 5-14 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
(2/4)

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

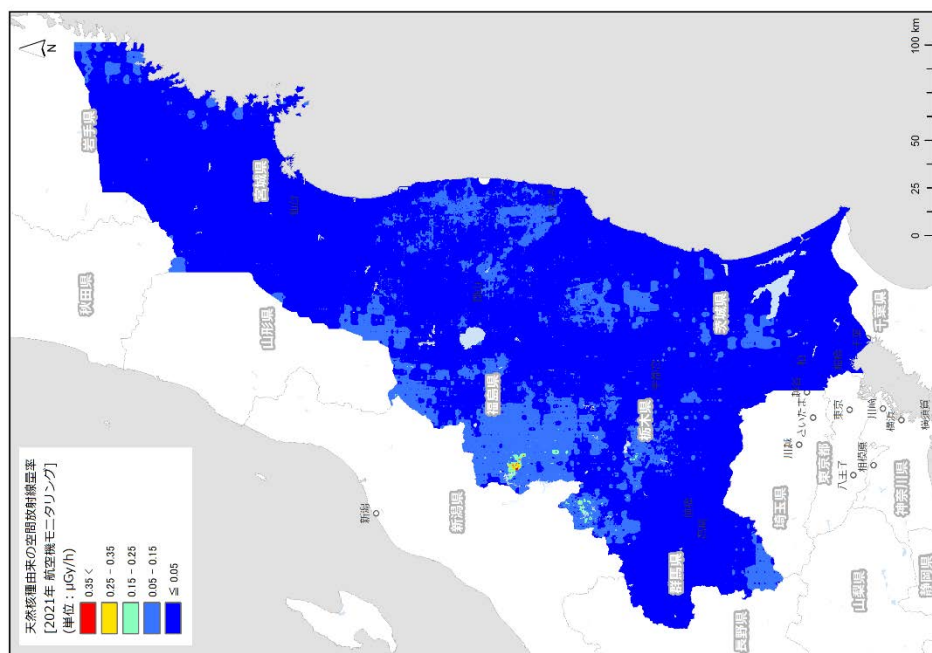


2019年

2020年

Fig. 5-14 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
(3/4)

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



2021 年

Fig. 5-14 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
(4/4)

6. 航空機モニタリング結果の考察

6.1. 過去の航空機モニタリング結果との比較

これまでの福島原子力発電所から 80 km 圏内における航空機モニタリングの結果について Fig. 6-1 に示す。このように、空間線量率が比較的高いことを意味する暖色系の面積が小さくなっていることが分かる。なお、第 4 次モニタリング以前については自衛隊のヘリコプターを使用し、簡易的なパラメータを適用していたため、比較対象として用いるのは望ましくない。そこで過去の結果との比較対象として、使用パラメータの算出方法やデータ解析手法が初めて定型化した第 4 次以降を選択した。5.1 節に記述した空間線量率マップの色合い区分ごとのメッシュの面積 (合計約 8,923 km²) から、各区分の面積割合を算出して Table 6-1 にまとめた。本表からも空間線量率が経年により減少していることが分かる。19.0 $\mu\text{Sv/h}$ 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従って減少しない場合がある。年間被ばく線量が 1.0 mSv に相当する、0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 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 17 次モニタリング時点では 23.1 %まで減少した。なお、第 17 次モニタリングにおいて 0.2 $\mu\text{Sv/h}$ を上回ったメッシュには、宮城県では白石市の南西端の極一部及び伊具郡丸森町の南端、福島県ではいわき市の北端、郡山市の中央南部及び北東部、白河市の北部、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、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、本宮市の中央部以東、伊達郡川俣町、伊達郡国見町の西部、伊達郡桑折町の中央部一帯、田村郡三春町の北部の極一部、東白川郡棚倉町の中央北部及び南部、東白川郡塙町の北西部、双葉郡大熊町、双葉郡富岡町、双葉郡浪江町の中央部以外、双葉郡楢葉町、双葉郡広野町の西部、中央部及び南東部、双葉郡双葉町、耶麻郡猪苗代町の北部の極一部、安達郡大玉村の南端部及び東端部、岩瀬郡天栄村の東部、西白河郡泉崎村の北西端の極一部、西白河郡西郷村の東端部、双葉郡飯舘村、双葉郡葛尾村及び双葉郡川内村、茨城県では北茨城市の北西部の極一部が含まれる。

次に、これまでの旧避難指示区域における航空機モニタリングの結果について Fig. 6-2 に示す。旧避難指示区域における空間線量率の減少傾向を定量的に把握するため、各モニタリングにおける空間線量率マップのメッシュ中心点の比を算出することで比較を行った。ここでも、上述した理由で第 4 次モニタリング以降の結果を比較対象とした。第 4 次モニタリングと第 17 次モニタリングの全領域における比較結果を散布図として Fig. 6-3 に示す。本図に示した回帰直線の傾きを空間線量率の全体平均的な減少傾向として捉えることができる。また、本図中には重量緩衝深度 (β) を 1.0 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。このように航空機モニタリングの測定結果は、物理的半減期に基づく理論値よりも大きく減少する傾向を示す。一方で、福島原子力発電所から 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 $\mu\text{Sv/h}$ 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。また、最小二乗法による近似は数値の大きな結果に影響を受けやすいため、より適切に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をヒストグラムとして表示した。Fig. 6-2 に示した空間線量率マップの各メッシュにおける相対変化率 ((第 17 次モニタリングの結果－第 4 次モニタリングの結果) / (第 4 次モニタリングの結果)) を算出し、ヒストグラムとして示した。第 17 次モニタリングと第 4 次モニタリングの空間線量率の比較を Fig. 6-4 に、第 17 次モニタリングと第 4 次モニタリングの Cs-137 の沈着量の比較を Fig. 6-5 にそれぞれ示す。空間線量率の散布図及びヒストグラムと比較して、Cs-137 の沈着量の散布図及びヒストグラムの分布はばらつきが大きい。特に、Fig. 6-5 (左) において、第 4 次モニタリングにおける Cs-137 の沈着量が 100 kBq/m^2 であった領域の前後で、第 17 次モニタリングにおける Cs-137 の沈着量が急激に減少するような傾向が見られた。これは、空間線量率は全計数率から宇宙線、空気中ラドン子孫核種及びヘリコプター機体に起因するバックグラウンド計数率を差し引いてから換算しているのに対し、Cs-137 の沈着量はこれらに加えて天然放射性核種由来のバックグラウンド計数率を差し引いてから換算しているため、計数誤差が相対的に大きくなることが一因として考えられるが、計数誤差のばらつきだけで本事象を説明するには困難な点がある。いずれにせよ、4.11 節でも記載した通り、 100 kBq/m^2 以下のような Cs-137 の沈着量が比較的小さな領域については、航空機モニタリングで Cs-137 の沈着量を正確に評価するのは困難であることが示唆される。しかしながら、両者のヒストグラムとも平均値と中央値がほとんど同値であり、正規分布に近いといえる。各ヒストグラムの相対減少率の平均値を指標とすると、第 4 次モニタリングが行われた 2011 年 (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 83 %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 58 %と評価されたが、航空機モニタリングにおいては、福島原子力発電所事故からの経過日数に伴う β の変化と土地利用区分による β の違いを考慮せずに $1.0 \text{ (g/cm}^2\text{)}$ として一律に固定しているため、本項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。

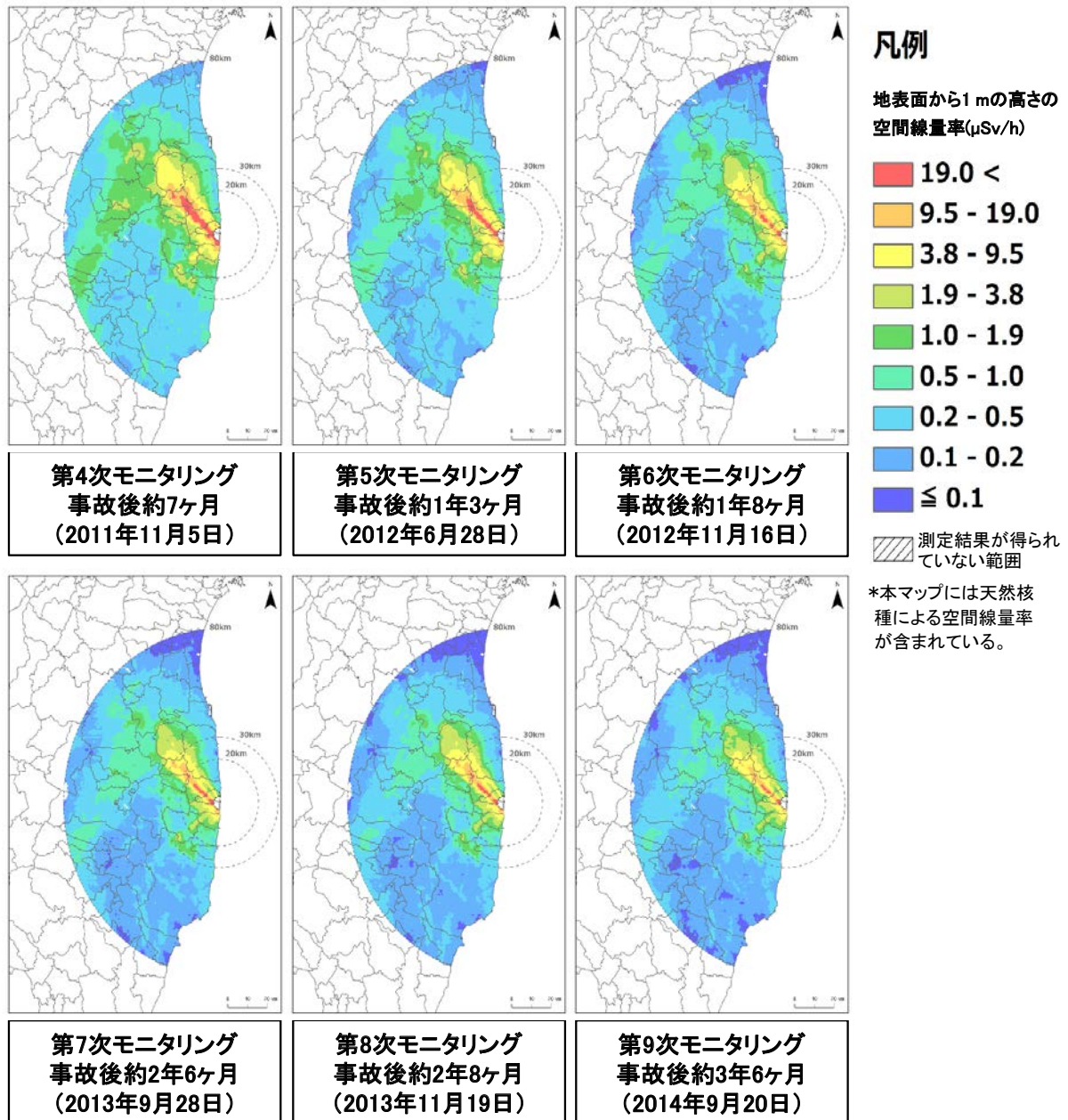


Fig. 6-1 福島原子力発電所から 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較

(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。)

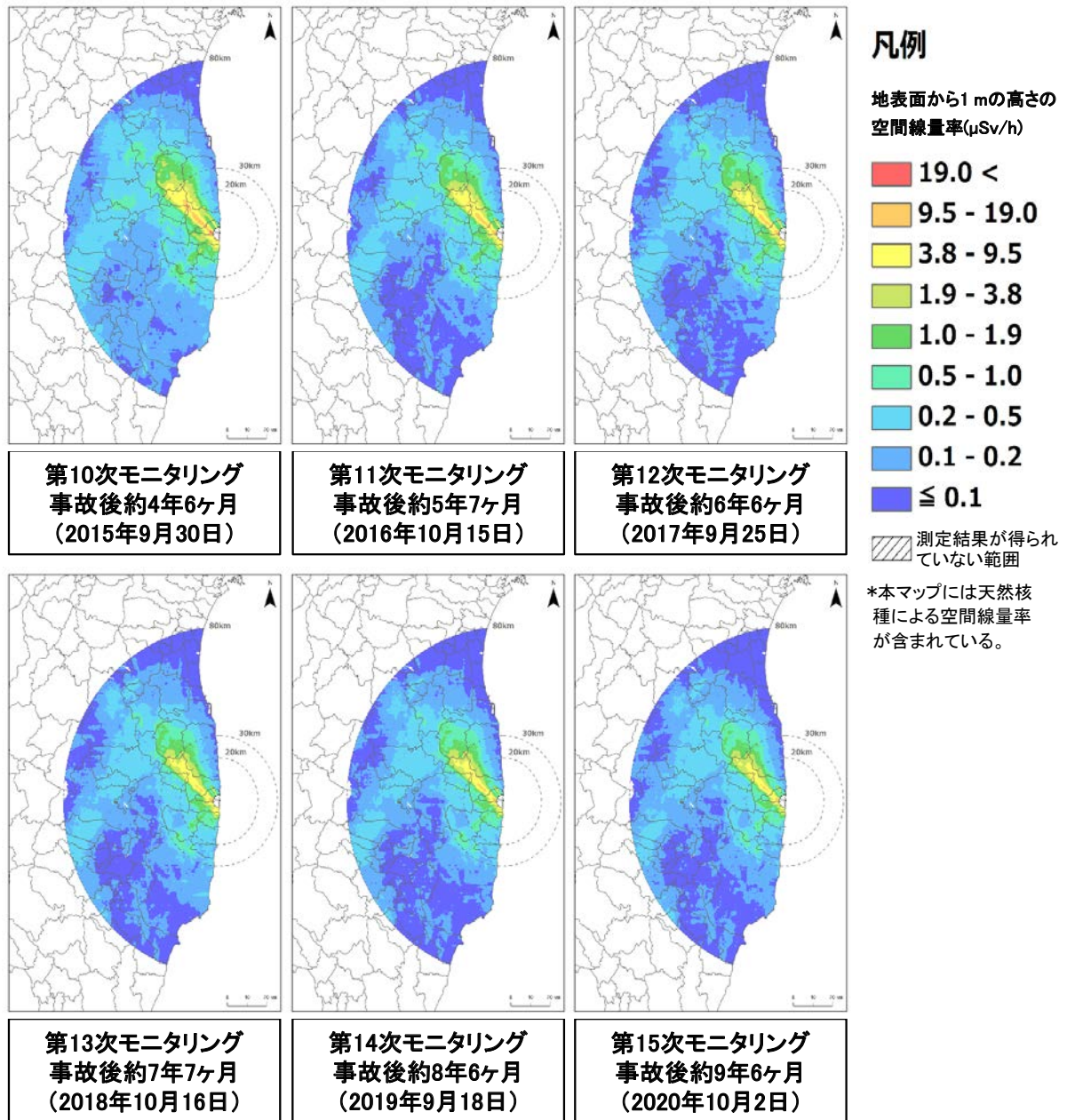


Fig. 6-1 福島原子力発電所から 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較

(2/3)

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

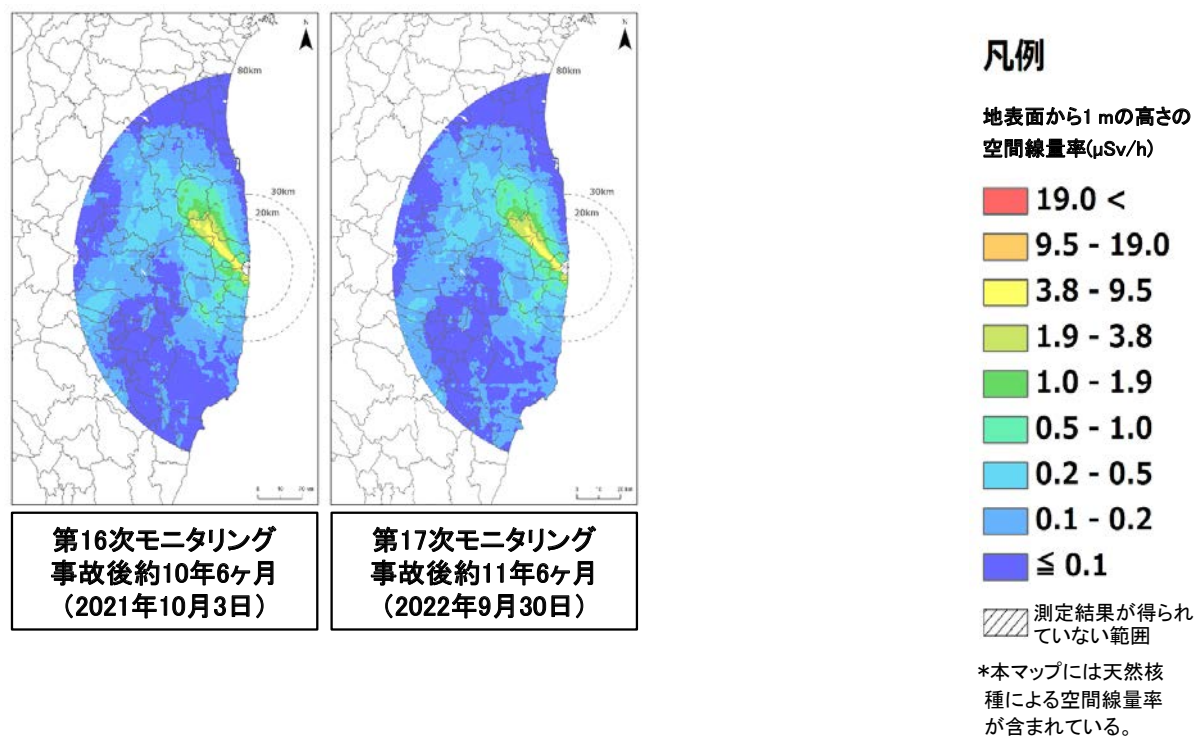


Fig. 6-1 福島原子力発電所から 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較
(3/3)

(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 福島原子力発電所から 80 km 圏内における空間線量率の面積割合の経年推移

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		

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0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	
19.0<	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	
3.8 - 9.5	1.2	1.1	1.0	0.8	0.8	0.6	
1.9 - 3.8	1.7	1.6	1.6	1.5	1.4	1.3	
1.0 - 1.9	3.0	2.6	2.2	2.1	1.9	1.6	
0.5 - 1.0	5.6	5.0	5.0	4.7	4.5	4.2	
0.2 - 0.5	24.5	23.3	22.3	21.2	18.1	15.4	
0.1 - 0.2	34.9	36.7	35.4	38.3	32.5	37.2	
≤ 0.1	28.9	29.5	32.4	31.4	40.8	39.7	
合計	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	

※面積の合計値は約8,923 km²である。

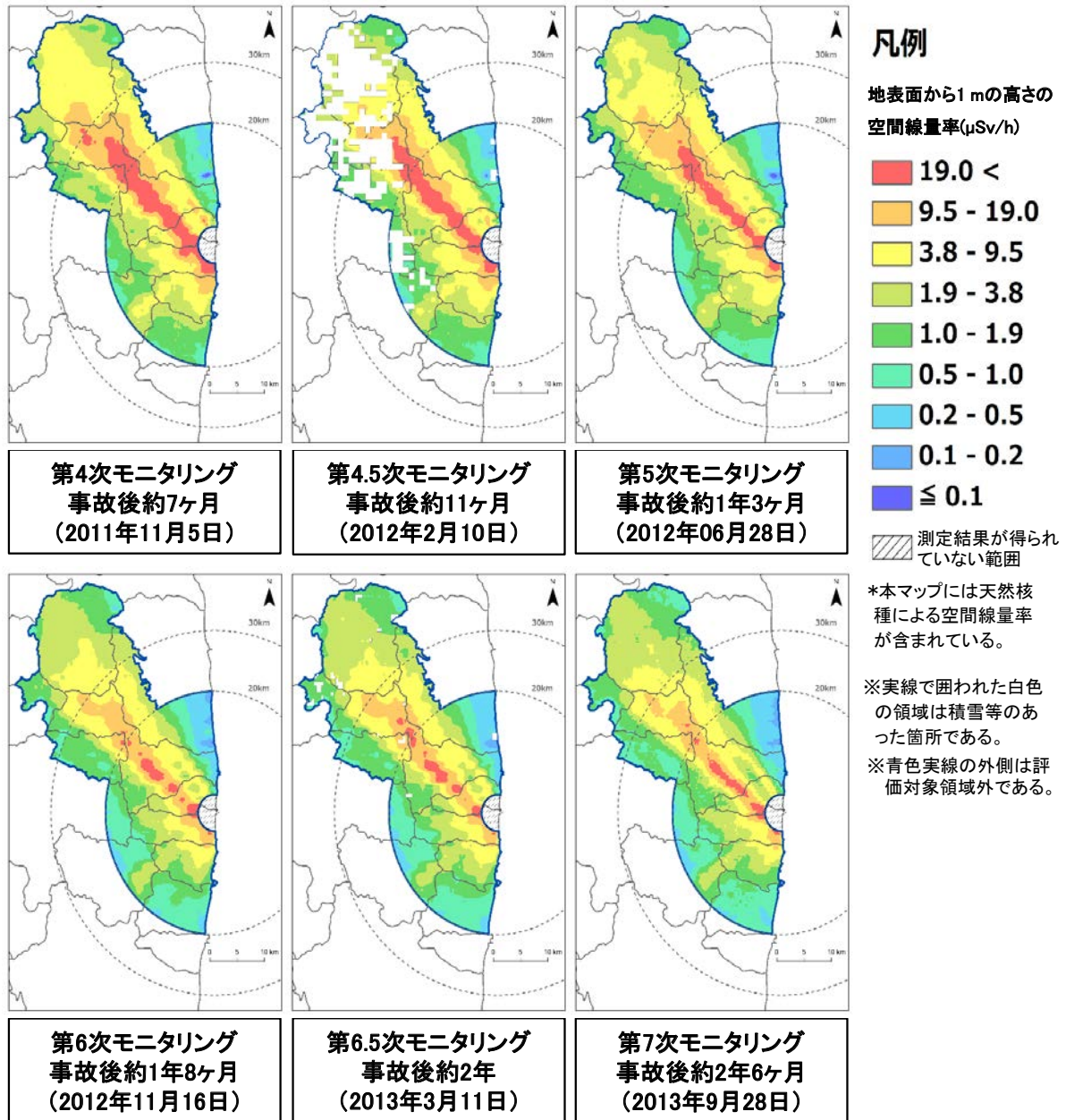


Fig. 6-2 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(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。)

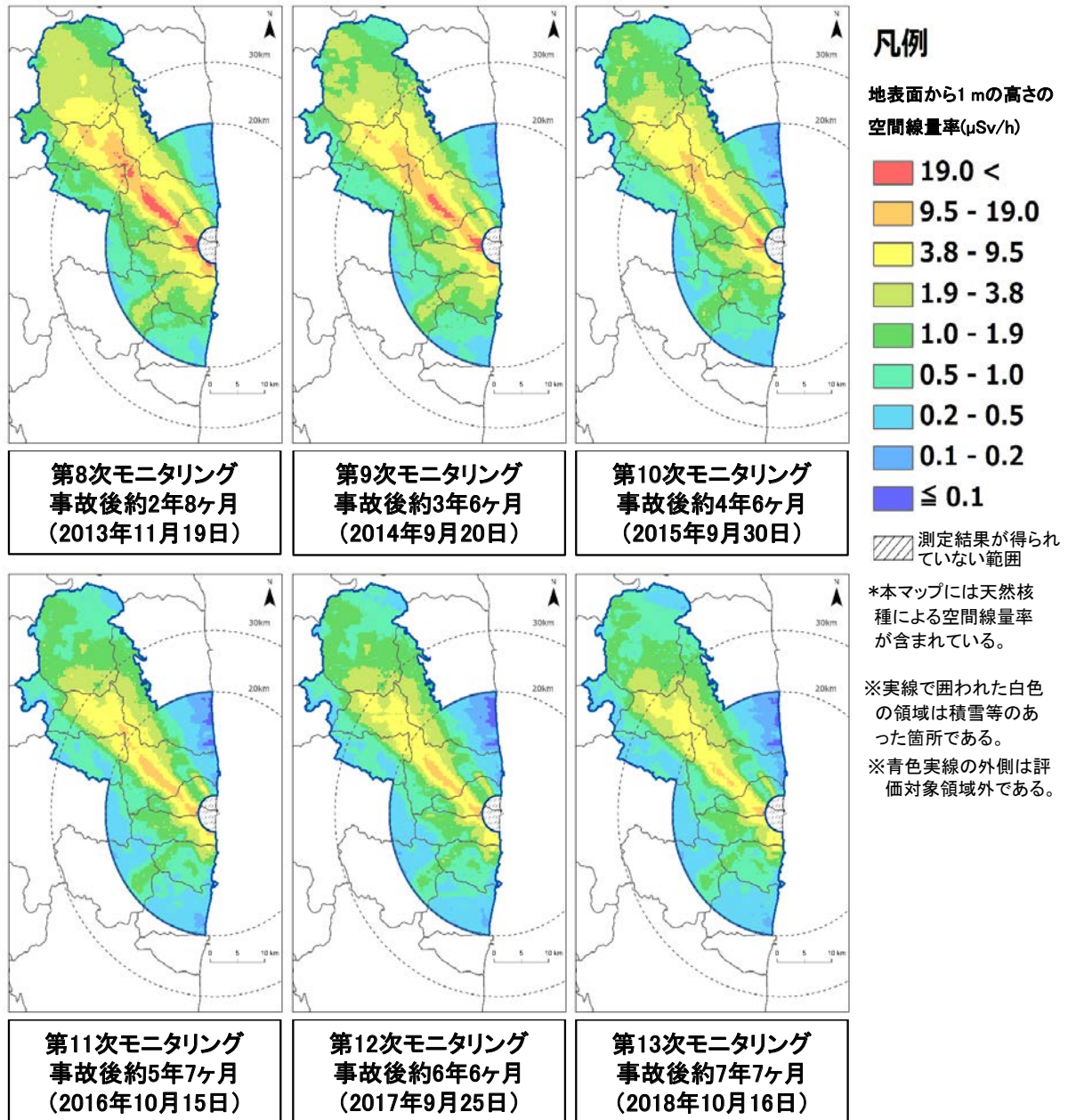


Fig.6-2 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(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。)

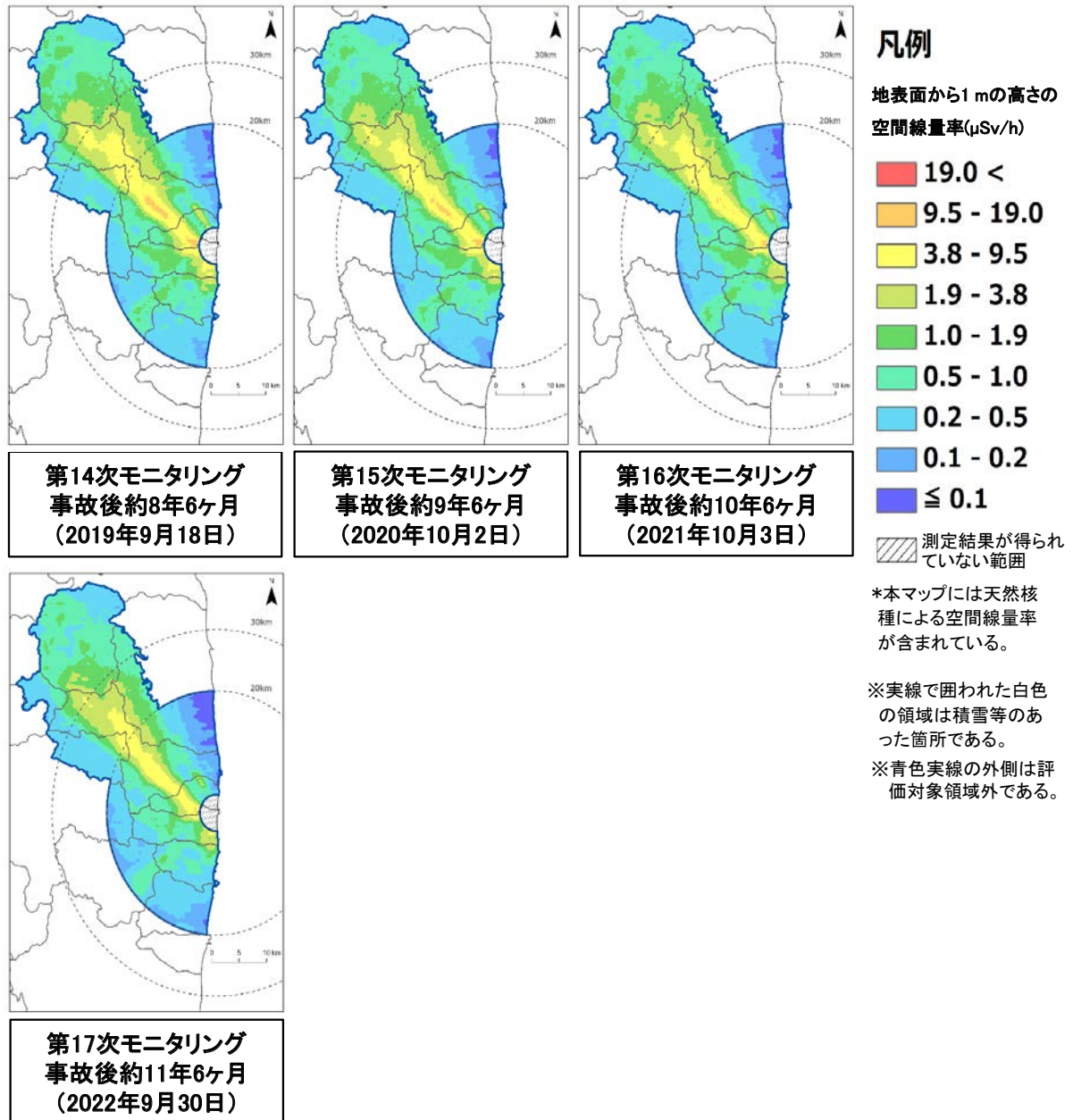


Fig.6-2 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(3/3)

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

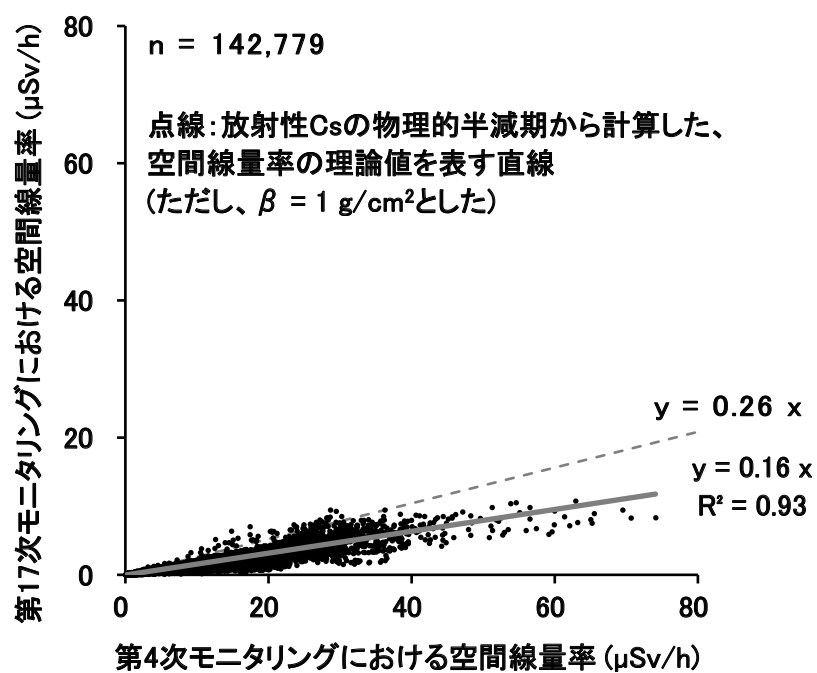


Fig. 6-3 第4次モニタリング及び第17次モニタリングの空間線量率算出結果の比較

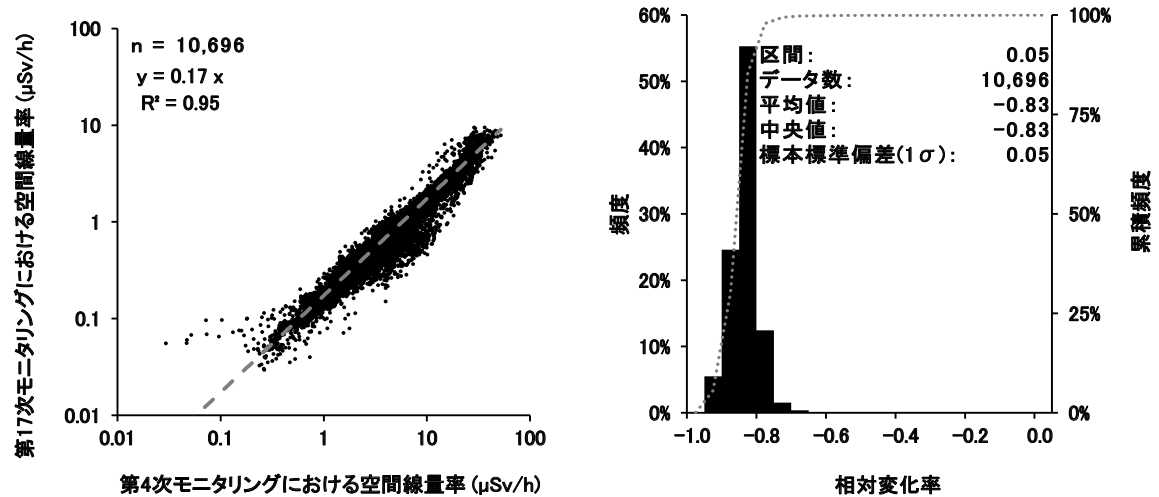


Fig. 6-4 旧避難指示区域における第4次モニタリング及び第17次モニタリングの空間線量率算出結果の比較

(左：散布図、右：相対変化率のヒストグラム)

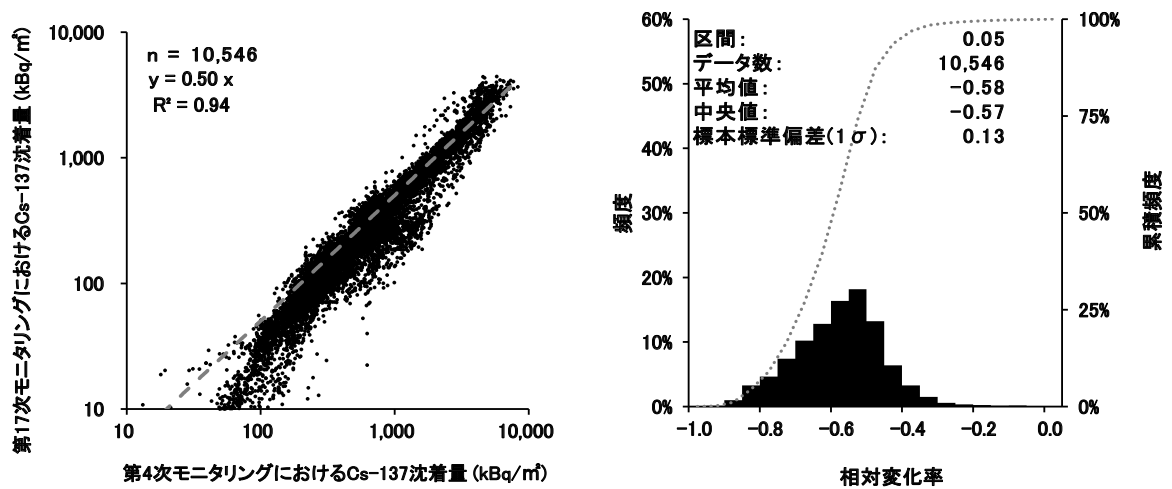


Fig. 6-5 旧避難指示区域における第4次モニタリング及び第17次モニタリングのCs-137沈着量算出結果の比較

(左：散布図、右：相対変化率のヒストグラム)

6.2. 実効半減期の算出

福島原子力発電所事故から約 12 年経過し、事故直後から実施してきた本事業の測定データはビッグデータとして蓄積されてきている。環境中における放射性物質濃度の変化は、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いる。Sanada et al. (2018)⁵³⁾は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の算出を行っている。ここでは、これまでの測定データの変化傾向を定量的に把握するため、測定データの指数関数近似について検討した。その結果として求められる実効半減期は、空間線量率の遡及的な評価及び測定データの信頼性の推定や将来の空間線量率の推定に重要なパラメータとなる。

2011 年 (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を政府の定めた統計に用いる基準地域メッシュ (1 km × 1 km) 毎に平均化した。福島原子力発電所を中心とした半径約 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、8,930 メッシュを評価対象とした。評価対象メッシュにおける空間線量率は、天然放射性核種によるバックグラウンド空間線量率に比較的近い数値を示す場所が多くなってきている。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。安藤他 (2017)⁵⁴⁾は、当該事業における KURAMA-II による走行サーベイ結果をもとに、東日本の市町村別のバックグラウンド空間線量率を推定している。ここでは、当該研究成果におけるバックグラウンド空間線量率データを採用し、市町村ごとに放射性 Cs 由来の空間線量率を算出した。

指数関数近似に用いたデータは、それぞれの測定手法毎に、調査期間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 [13] に示した 2 つの指数項からなる指数関数による近似を行い、空間線量率の実効半減期を算出した。

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

ここで、 D は空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、 t_{short} は実効半減期の減衰が速い成分、 t_{long} は実効半減期の減衰が遅い成分、 t は福島原子力発電所事故からの経過時間 (年) を表す。なお、ここで切片である $a + b$ は福島原子力発電所事故直後の空間線量率である。近似曲線については最小二乗法により 95 % の信頼区間を計算するとともに、実効半減期についても 95 % の信頼区間を計算した。

Fig. 6-6 に福島原子力発電所から 80 km 圏内全域における航空機モニタリング結果に指数関数近似を適用した結果を示す。本図におけるプロットは、航空機モニタリングにより算出された空間線量率の算術平均値であり、それらのプロットに対して縦軸方向に各メッシュにおける空間線量率値を表した。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を基にして、実効半減期に関する各成分について Table 6-2 にまとめた。減衰の速い成分については、有効数字 2 桁で表記すると、約 0.78 年 (95 % 信頼区間 : 0.70 年 ~ 0.86 年) となり、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 3 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、5.8 年 (95 %信頼区間 : 5.2 年~6.4 年) となり、福島原子力発電所事故から約 12 年経過した現在、半減期の約 2 倍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±10 %程度に収まる程に精度よく実行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資するものと考ええる。今後とも、本手法を用いて空間線量率の実効半減期を評価していくことが望ましい。

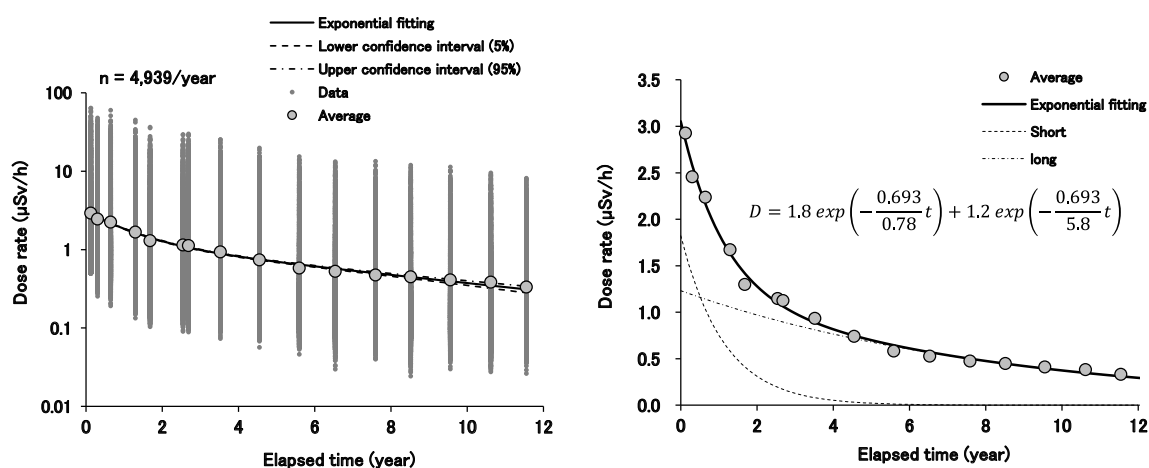


Fig. 6-6 測定値の指数関数近似

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)
0.78	0.70~0.86	5.8	5.2~6.4

6.3. 土地利用区分による空間線量率の変化傾向の違い

福島原子力発電所周辺における土地利用区分による空間線量率の減少率の違いを考察するため、国土地理院が提供している「国土数値情報土地利用細分メッシュデータ」⁵⁵⁾(以下、土地利用メッシュデータ)を利用した。なお、適用する土地利用メッシュデータは、第4次モニタリング(2011年、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)以降に対しては平成28年度公開版(2023年3月、令和4年度末現在の最新版)とした。福島原子力発電所から80km圏内の土地利用メッシュデータについて、Fig. 6-7(平成21年度公開版)、Fig. 6-8(平成26年度公開版)及びFig. 6-9(平成28年度公開版)に示す。これらの土地利用区分の内、人為的活動等により空間線量率に最も違いが現れると考えられる市街地部及び福島原子力発電所周辺において大部分を占める森林部について、過去の80km圏内のモニタリング結果を比較し、空間線量率の変化率を比較した。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. 6-7～Fig. 6-9の凡例中、森林を指す。
- ・市街地部：住宅地、市街地等で建物が密集しているところ、鉄道、操車場、道路などで、面的にとらえられるもの、運動競技場、空港、競馬場、野球場、学校港湾地区、人工造成地の空地等とする。Fig. 6-7～Fig. 6-9の凡例中、建物用地、道路、鉄道、その他用地を指す。

空間線量率の比較は、6.1節に示したように、測定範囲を250m×250mメッシュに区切り、同一メッシュ上における第4次モニタリングを基準とした空間線量率の相対変化率(例えば、(第17次モニタリングの結果-第4次モニタリングの結果)/(第4次モニタリングの結果))を算出した。なお、第4次モニタリングに適用した土地利用メッシュデータ(平成21年度公開版)とは異なる土地利用メッシュデータを適用した第8次モニタリング以降を比較対象とする場合には、土地利用区分が平成21年度から不変のデータのみを抽出し、相対変化率の計算に用いた。第4次モニタリングと第17次モニタリングにおける森林部及び市街地のメッシュごとの相対変化率の比較結果をFig. 6-10に示す。また第4次モニタリングを基準とした、第5次モニタリング以降それぞれの各土地利用区分における空間線量率の相対変化率をTable 6-3、Table 6-4及びTable 6-5に示す。第4次モニタリングに対する第17次モニタリングの相対減少率は、平均値で市街地部が約78%、森林部で約77%であり、ほとんど同値であった。一方、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%相対減少率が大きく、森林部よりも市街地の方が空間線量率の変化幅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のインベントリが減少したことに起因すると推察される。しかしながら、福島原子力発電所事故から約12年経過した現在では、放射性Csのインベントリ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思われる。なお、Fig. 6-7～Fig. 6-9の凡例に示した全エリアの変化率と森林部のみの変化率は概ね同様であった。これは、福島原子力発電所から80km圏内の土地利用区分の65%が森林であることに起因するとと思われる。規制庁による福島原子力発電所近傍の車両モニタリングや人手による空間線量率測定結果から解析した結果⁴²⁾によると、森林部はそれ以外のエリア

と比較して減衰速度が小さく、放射性 Cs の物理的半減期にほとんど従って減衰しており、本報告の結果もこれと同様である。ただし、森林部とそれ以外のエリアにおける相対変化率について、地上測定値よりも航空機モニタリングの方が両者の差が小さい傾向にあるのは、航空機モニタリングによる空間線量率の位置分解能と地上測定の位置分解能の差に起因すると考えられる。

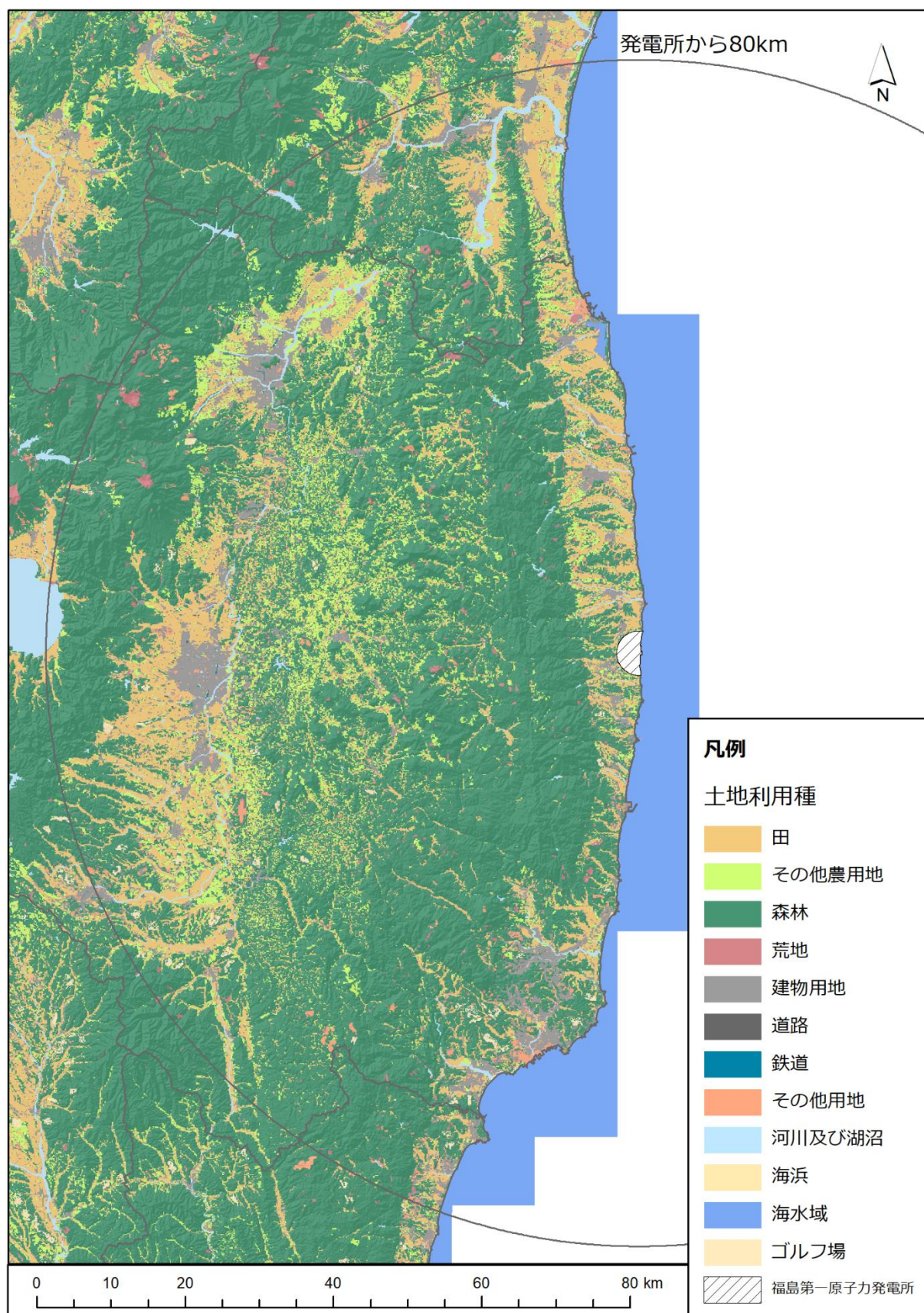


Fig. 6-7 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ
(平成 21 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ⁵⁵⁾より)

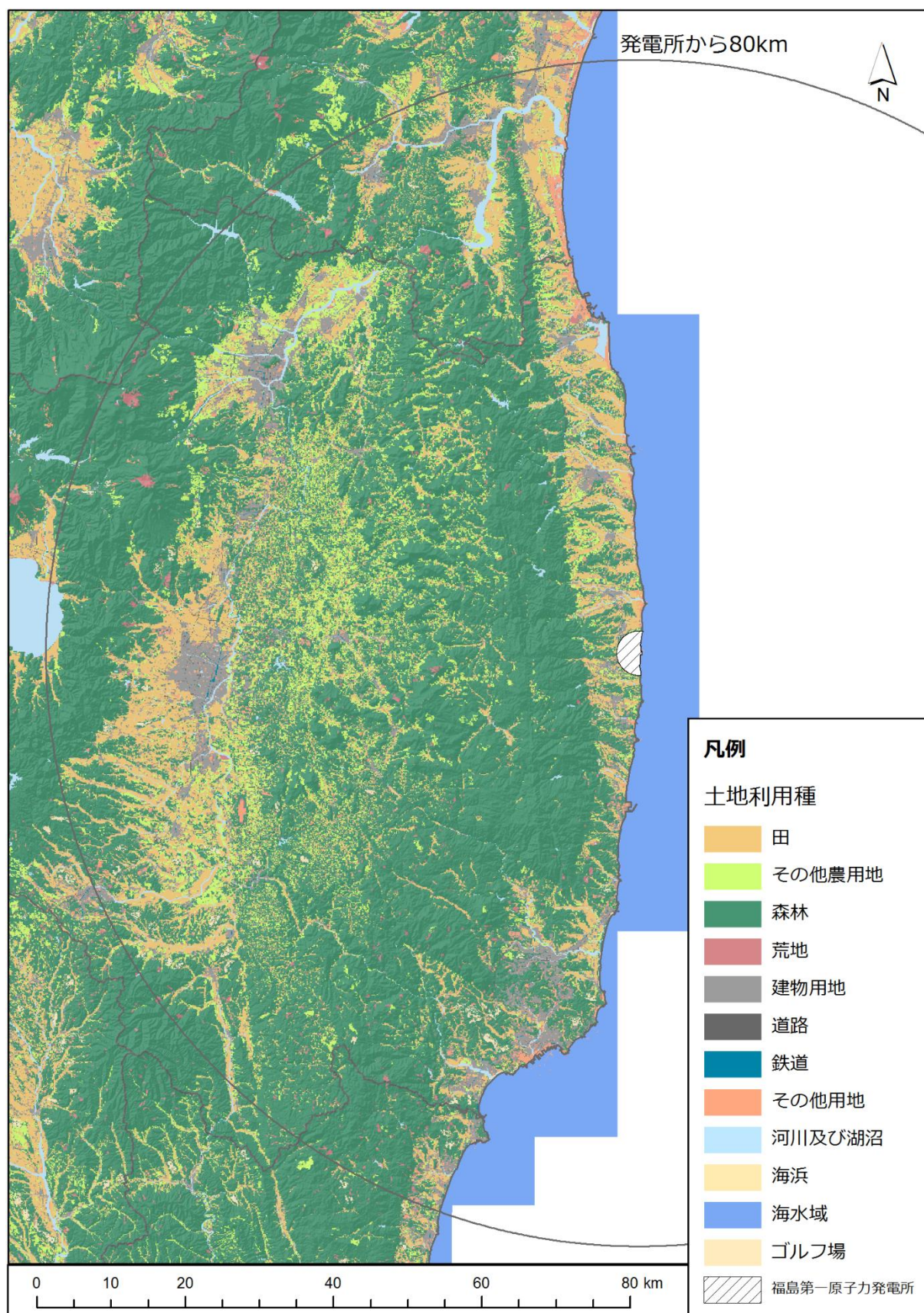


Fig. 6-8 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ
(平成 26 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ⁵⁵⁾より)

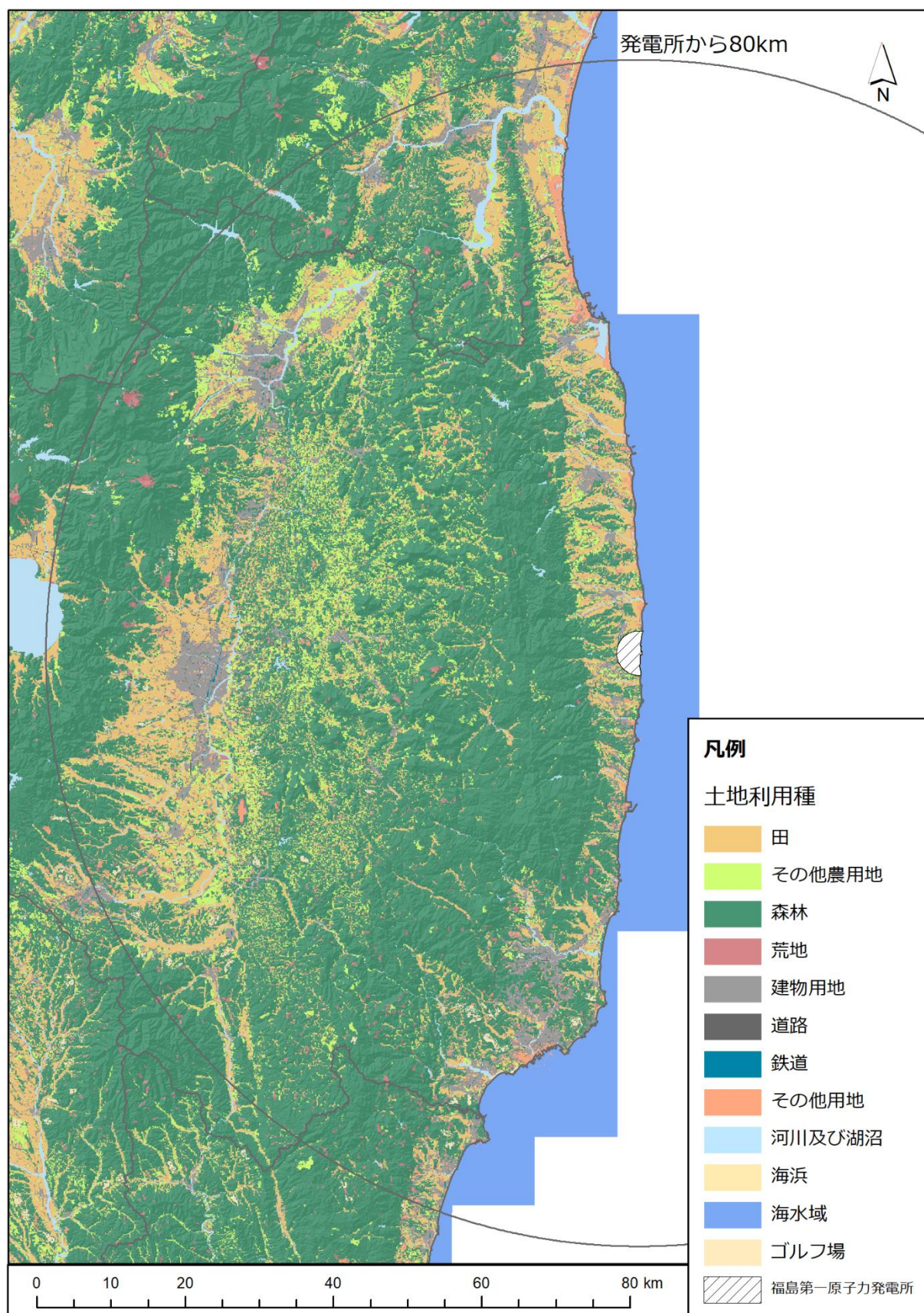


Fig. 6-9 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ
(平成 28 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ⁵⁵⁾より)

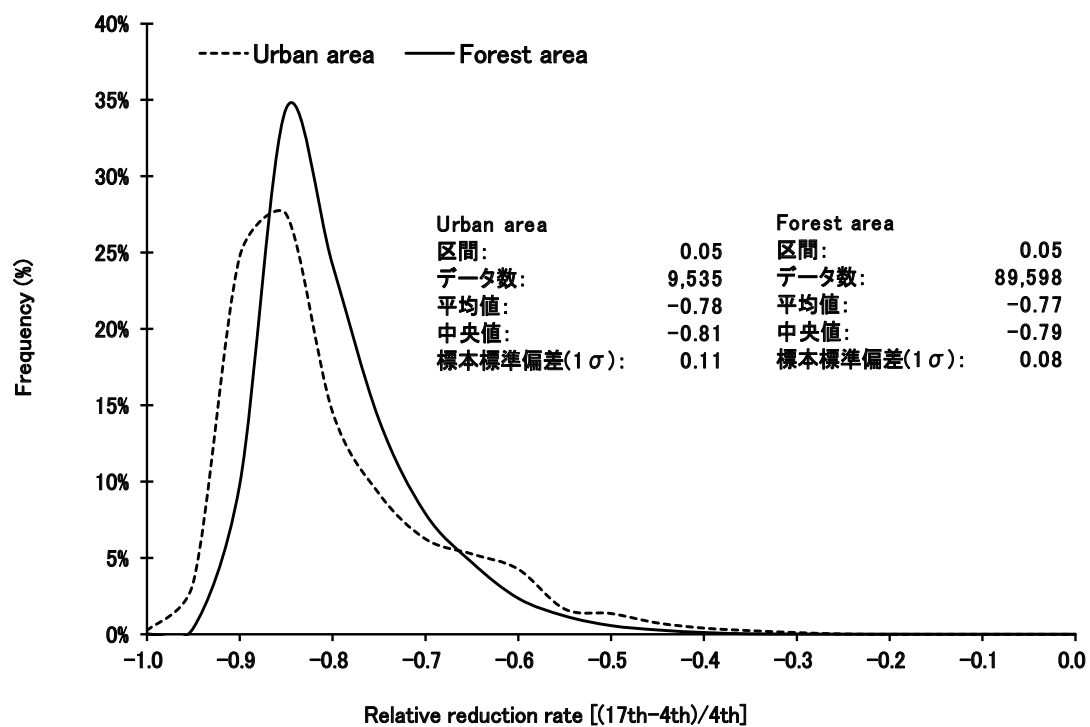


Fig. 6-10 森林部及び市街地における地表面から 1 m の高さの空間線量率の算出結果の比較
(第 4 次モニタリングに対する第 17 次モニタリングの相対減少率)

Table 6-3 森林部及び市街地部における空間線量率の相対減少率の比較
(国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版)⁵⁵⁾に基づく)

Area	Gross area (km ²)	Relative change rate of dose rate					
		(5th-4th)/4th		(6th-4th)/4th		(7th-4th)/4th	
		Ave.	SD(1σ)	Ave.	SD(1σ)	Ave.	SD(1σ)
Urban area	732	-0.31 ± 0.11		-0.47 ± 0.09		-0.50 ± 0.08	
Forest area	5,852	-0.28 ± 0.10		-0.45 ± 0.08		-0.46 ± 0.09	
All areas	8,923	-0.29 ± 0.11		-0.45 ± 0.08		-0.47 ± 0.09	

※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減少率の比較
(国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版)⁵⁵⁾に基づく)

Area	Gross area (km ²)	Relative change rate of dose rate			
		(9th-4th)/4th		(10th-4th)/4th	
		Ave.	SD(1σ)	Ave.	SD(1σ)
Urban area	791	-0.59 ± 0.09		-0.66 ± 0.09	
Forest area	5,771	-0.56 ± 0.09		-0.62 ± 0.09	
All areas	8,923	-0.56 ± 0.09		-0.63 ± 0.08	

※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減少率の比較
(国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版)⁵⁵⁾に基づく)

Relative change rate of dose rate															
Area	Gross area (km ²)	(11th-4th)/4th		(12th-4th)/4th		(13th-4th)/4th		(14th-4th)/4th		(15th-4th)/4th		(16th-4th)/4th		(17th-4th)/4th	
		Ave.	SD(1 σ)	Ave.	SD(1 σ)	Ave.	SD(1 σ)	Ave.	SD(1 σ)	Ave.	SD(1 σ)	Ave.	SD(1 σ)	Ave.	SD(1 σ)
Urban area	836	-0.73	± 0.07	-0.73	± 0.08	-0.74	± 0.10	-0.76	± 0.08	-0.76	± 0.10	-0.78	± 0.08	-0.78	± 0.11
Forest area	5,843	-0.70	± 0.06	-0.71	± 0.07	-0.72	± 0.08	-0.74	± 0.08	-0.74	± 0.08	-0.76	± 0.07	-0.77	± 0.08
All areas	8,923	-0.70	± 0.07	-0.72	± 0.08	-0.73	± 0.08	-0.74	± 0.08	-0.75	± 0.08	-0.77	± 0.07	-0.77	± 0.09
※Ave. : 平均值、SD:標準標準偏差															

※Ave.: 平均値、SD: 標準偏差

7. 地形の起伏による影響と補正方法

7.1. 背景

日本の国土に対して、山地及び丘陵地は約 7 割を占めている。我が国における原子力発電所の立地周辺地域にも、このような山地及び丘陵地が多く存在する。航空機モニタリングにおいては、測定される γ 線計数率に対して高度補正係数や空間線量率換算係数による補正を施して、地表面から 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、実際に地上で測定される空間線量率と航空機モニタリングにより算出される空間線量率とに乖離が生じる可能性がある。実際にどの程度の差異が生じるのかについて定量的な評価を行うために、モンテカルロシミュレーションによって地形の起伏を考慮した解析が行われた²⁴⁾。当該解析結果を基に、起伏のある地形上で測定された計数率をより正確に空間線量率に換算する方法を検討し、第 17 次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計算値の精度向上効果を評価した。

7.2. 地形の起伏による測定への影響

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

$$CD = \frac{D_{FLT}}{C_{FLT}} \quad [14]$$

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

$$CD_t = \frac{D_t}{C_t} \quad [15]$$

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

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

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

評価点の高度は、航空機モニタリングにおける基準高度である対地高度 300 m であり、計算には粒子輸送コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)⁵⁶⁾が用いられた。PHITS による計算において、設定する線源形状は Fig. 7-2 のように設定された。まず、数値標高モデル (DEM)³⁹⁾を基に、評価点直下から半径 800 m の領域が三角ポリゴンモデルに変換された。三角ポリゴンそれぞれを個々の平面線源とみなし、各三角形線源の強度は三角形面積を重みとした加重平均値として設定された。Cs-137 について、以上に示した計算から得られた計数率比の頻度分布を Fig. 7-3 に示す²⁴⁾。Fig. 7-3 から、計数率比の平均値は 0.9 となり、地形を平坦とみなした場合に空間線量率が高く評価される傾向にあることが示唆された。

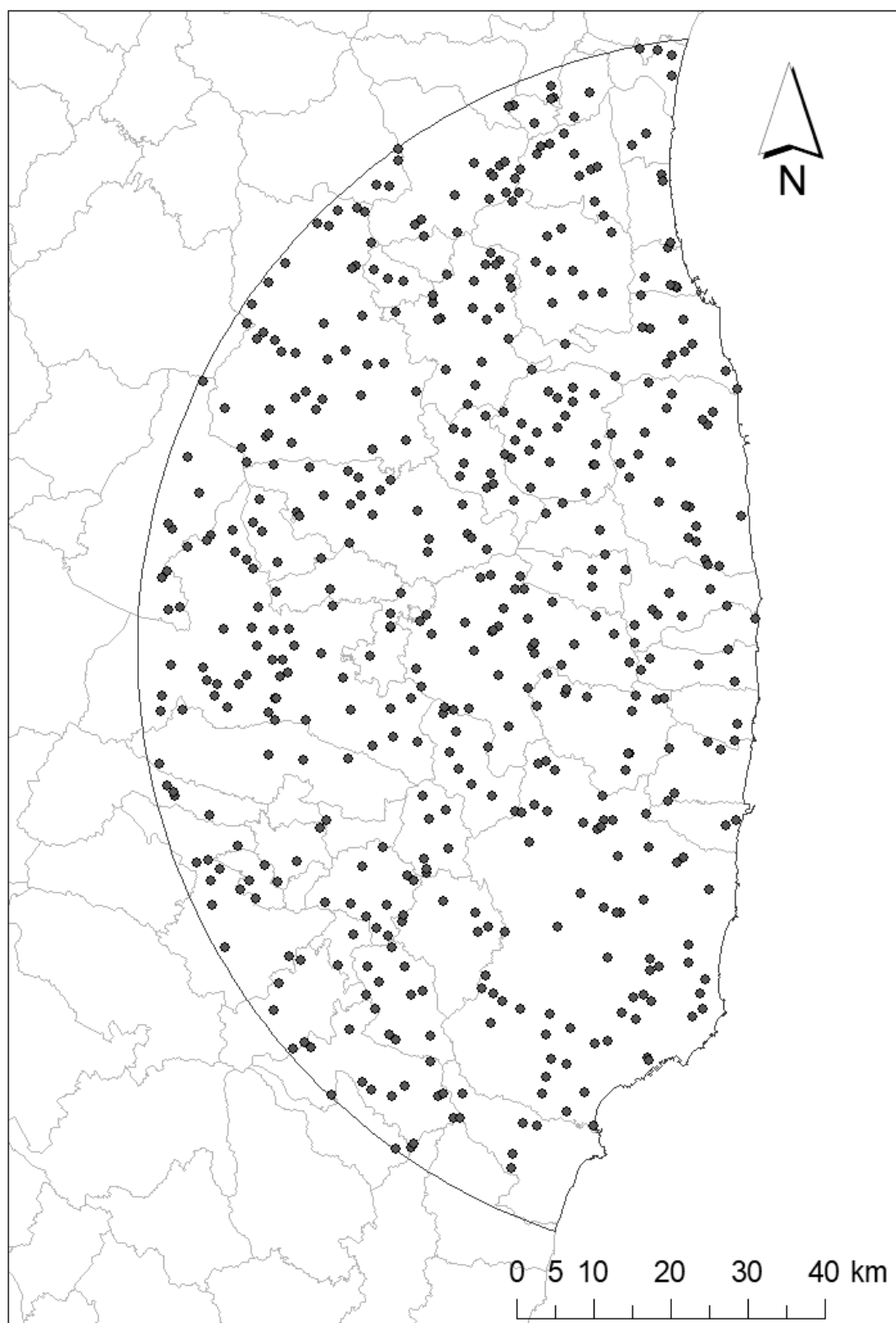


Fig. 7-1 無作為に抽出した評価点の位置²⁴⁾
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

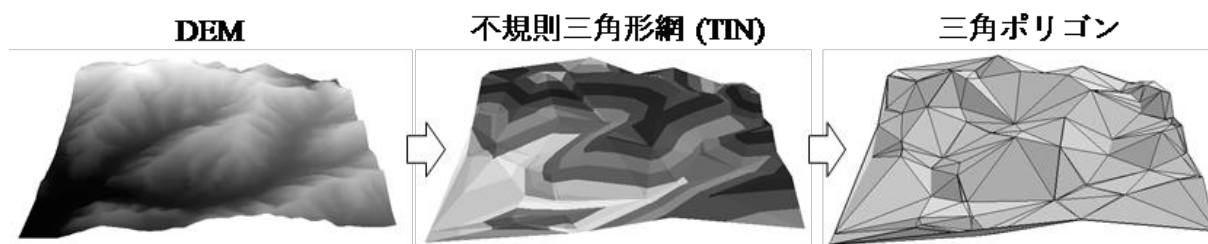


Fig. 7-2 数値標高マップから三角ポリゴンへの変換例 ²⁴⁾

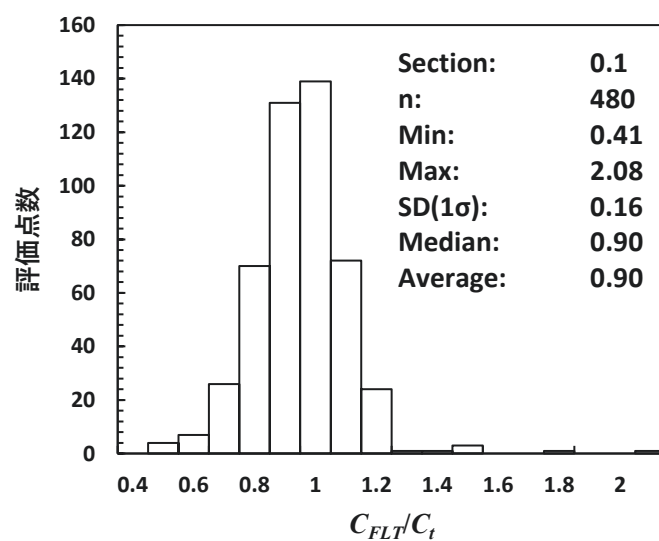


Fig. 7-3 平坦な地形と起伏のある地形における対地高度 300 m での計数率比の頻度分布 ²⁴⁾

7.3. 地形の起伏による影響の補正

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

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

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

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。

$$H_{m'} = H_m - (E_{\text{mean}} - E) \quad [18]$$

地形補正手法を用いて、第 17 次モニタリングの解析を行い、規制庁と原子力機構が行っている、福島県内における NaI(Tl) 検出器 (日立製作所製 TCS-172B) を用いた地上測定値⁴³⁾ との比較を行った。なお、本比較には福島原子力発電所から半径 80 km 圏内に位置する地上測定値のみ (4,840 点) を用いた。本手法を適用する前後の第 17 次モニタリングの空間線量率マップの比較結果を Fig. 7-5 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低くなる傾向が見られた。本手法を適用する前後の第 17 次モニタリングにおける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として Fig. 7-6 に示す。散布図より、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 91 % (全 4,840 点中 4,399 点) であったのに対し、地形補正手法では 92 % (全 4,840 点中 4,448 点) であり、僅かながら地上測定値との整合性が改善された。相対誤差は、地上測定値 (D_{GND}) に対する D_{GND} と航空機モニタリングによる空間線量率 (D_{ARM}) の差の比 ($(D_{\text{ARM}} - D_{\text{GND}}) / D_{\text{GND}}$) を取って算出した。相対誤差のヒストグラムより、従来の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 0.52 であったのに対し、地形補正手法では 0.49 となった。同様に、平均値については 0.25 から 0.13 に、中央値については 0.14 から 0.03 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) を比較したところ、地上測定値との誤差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34%であり、顕著な差異ではないものの、確実に標準的解析手法よりも地上測定値の再現性が改善された。今後、本解析手法の更なる改良を目指し、式[17]で示した CD の補正方法について、特に S 及び S_{FLT} のより適切な設定方法に着目した検討及び計算速度の高速化に資する改良を加える予定である。

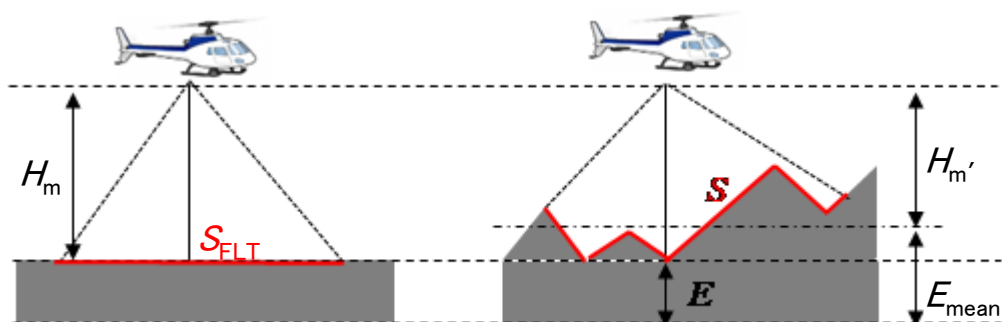


Fig. 7-4 地形の起伏による影響を補正する場合に考慮すべき点

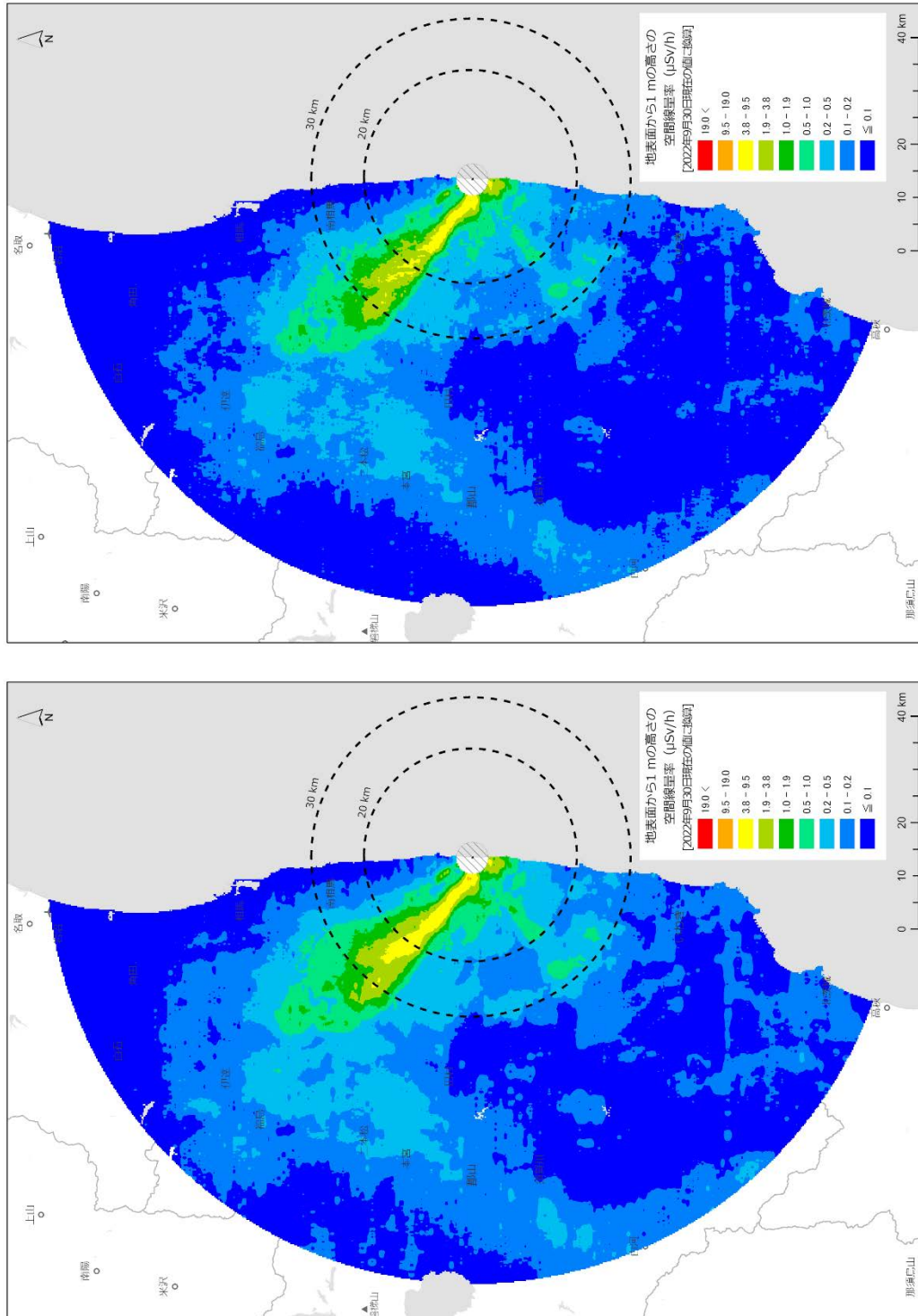


Fig. 7-5 第17次モニタリングの空間線量率マップの比較
(左：標準的解析手法を用いた場合、右：地形補正手法を用いた場合)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

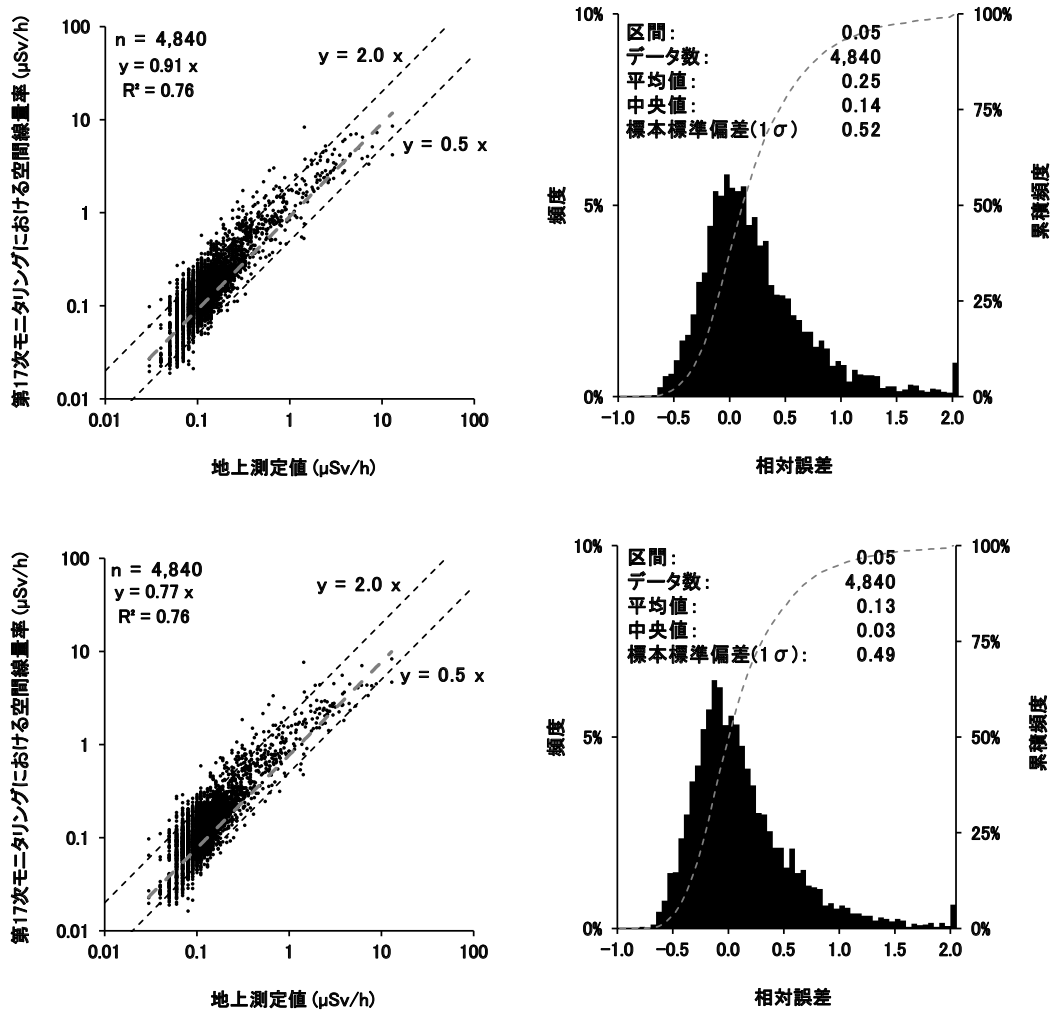


Fig. 7-6 第17次モニタリング結果と地上測定値との比較
(上段：標準的解析手法を用いた場合、下段：地形補正手法を用いた場合)
(それぞれ、左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

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変遷系列には、気体であるラドンが存在し、ラドンの一部は大気中に散逸する。Fig. 8-1 に主な天然の放射性変遷系列であるウラン系列とトリウム系列について示す。大気中に散逸したラドンは、Po、Pb 及び Bi などのラドン子孫核種に変遷し、大気中の微粒子に吸着して大気中を浮遊する。航空機モニタリングによる測定高度である対地 300 m 付近において、ラドン子孫核種濃度が測定された例がほとんどないものの、地上におけるラドン濃度は広く測定されており、日本の屋外における濃度レベルは 6 Bq/m³程度となっている⁵⁷⁾。このラドンの濃度レベルは比較的低いものの、航空機モニタリングにおいてはヘリコプターの周辺に存在するような場合、測定される計数率に一定の影響があると考えられる。また、日単位や季節単位で濃度が変動することが知られており、航空機モニタリングの測定データに及ぼす影響も常に一定とは限らないと推察される⁵⁸⁾。

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

ウラン (^{238}U) 系列

U-238
4.468 x 10^9 y



Ra-226
1.6 x 10^3 y

Rn-222
3.824 d

Po-218
3.10 m

Pb-214
26.8 m

Bi-214
19.9 m

トリウム (^{232}Th) 系列

Th-232
1.405 x 10^{10} y



Ra-224
3.66 d

Rn-220
55.6 s

Po-216
0.145 s

Pb-212
10.64 h

Bi-212
60.55 m

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. ラドン弁別手法の理論

前述したように、ラドン子孫核種は大気中だけでなく地表面及び地殻にも存在し、その γ 線エネルギー領域が広範である。よって、航空機モニタリングで取得される全計数率から、ラドン子孫核種に起因する γ 線計数率のみをスペクトル分析によって弁別することは一般に難しい。航空機モニタリングにおいて空气中ラドン子孫核種に起因する γ 線計数率を推定する方法として、全計数率を取得する検出器に加え、空气中のラドン子孫核種から放出される γ 線を測定するための検出器を使用し、両者の計数率とそれらを基にして算出される換算パラメータを用いる方法の例が示されている⁴⁵⁾。原子力機構では当該手法を参考にして、空气中のラドン子孫核種に起因する γ 線を測定する検出器に LaBr_3 検出器を採用してラドン弁別手法を実施するための測定体系の構築を行い、 NaI(Tl) 検出器と LaBr_3 検出器の γ 線計数率を基にした換算パラメータの設定方法について検討と改良を重ねてきた¹⁹⁾⁻³¹⁾。本節では、ラドン弁別手法の概略を示す。

LaBr_3 検出器をヘリコプター内に搭載した状況を Fig. 8-2 に示す。地表面の放射性核種から放出される γ 線なるべく遮蔽し、空气中ラドン子孫核種の γ 線のみを測定できるようにするために、 LaBr_3 検出器は NaI(Tl) 検出器の上方に配置した。Fig. 8-3 にヘリコプター機内の検出器と γ 線放出核種の位置関係のイメージを示す。 NaI(Tl) 検出器と LaBr_3 検出器の位置関係から地表面の放射性核種が存在する場合及び存在しない場合の LaBr_3 検出器の計数率に対する NaI(Tl) 検出器の計数率の比をそれぞれ「グラウンドインデックス」及び「ラドンインデックス」とし、その差からラドン子孫核種由来の γ 線計数率を弁別するものである。

- ・ラドンインデックス (以下、 RI) : 地表面の放射性核種から放出される γ 線による影響がないと考えられる海上で取得したデータにおける LaBr_3 検出器の計数率($C_{\text{LaBr,a}}$)に対する NaI(Tl) 検出器の計数率($C_{\text{NaI,a}}$)の比($C_{\text{NaI,a}} / C_{\text{LaBr,a}}$)。ラドン子孫核種由来の γ 線は等方的に飛来することから、 NaI(Tl) 検出器による遮蔽の影響を受けにくく、 LaBr_3 検出器の計数率にさほど影響を及ぼさないと考えられる。
- ・グラウンドインデックス (以下、 GI) : 地表面の放射性核種から放出される γ 線による影響が支配的な陸地で取得したデータにおける LaBr_3 検出器の計数率($C_{\text{LaBr,g}}$)に対する NaI(Tl) 検出器の計数率($C_{\text{NaI,g}}$)の比($C_{\text{NaI,g}} / C_{\text{LaBr,g}}$)。ラドン子孫核種由来の γ 線はヘリコプター下方から飛来することから、 NaI(Tl) 検出器に遮蔽されて LaBr_3 検出器では比較的計数されにくい。 GI は、 RI よりも大きくなると推察される。

これら 2 つのパラメータを利用して式 [19] より $C_{\text{NaI,g}}$ を求め、これを空間線量率に換算してマッピングする。

$$C_{\text{NaI,g}} = \frac{GI(C_{\text{NaI,all}} - RI \cdot C_{\text{LaBr,all}})}{GI - RI} \quad [19]$$

ここで、

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

$C_{\text{LaBr,all}}$: LaBr_3 検出器における全計数率 (50 keV~700 keV) (s^{-1})

である。

ヘリコプターの機種または機体によって γ 線の遮蔽効果が異なるのに付随して、*RI* 及び *GI* もヘリコプターの機種または機体に依存すると考えられることから、使用するヘリコプターごとに海上及び陸地で実際に取得したデータを基に *RI* 及び *GI* を設定することとしている。*RI* 及び *GI* を決定するために取得したデータと両パラメータの算出結果については 8.3 節に詳述する。

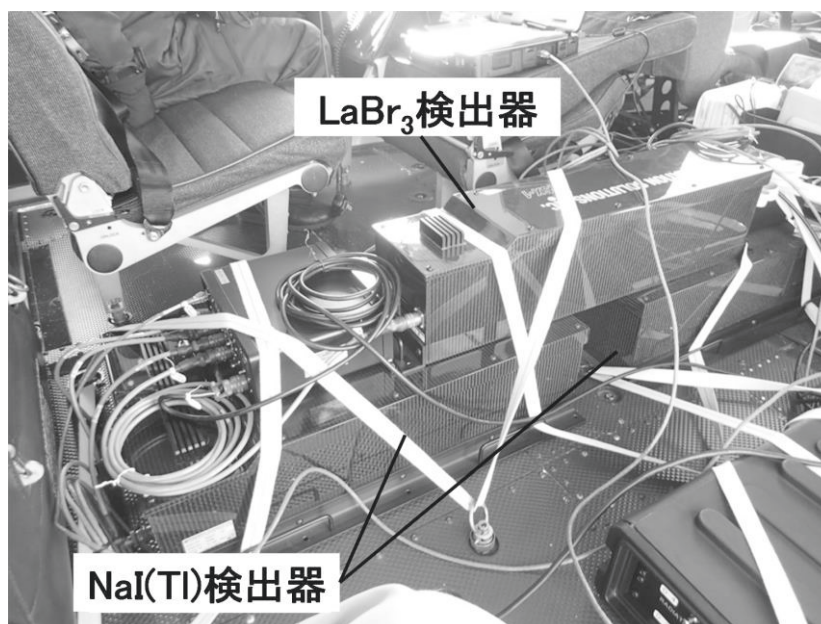


Fig. 8-2 空气中ラドン子孫核種測定用の検出器とヘリコプターへの搭載状況

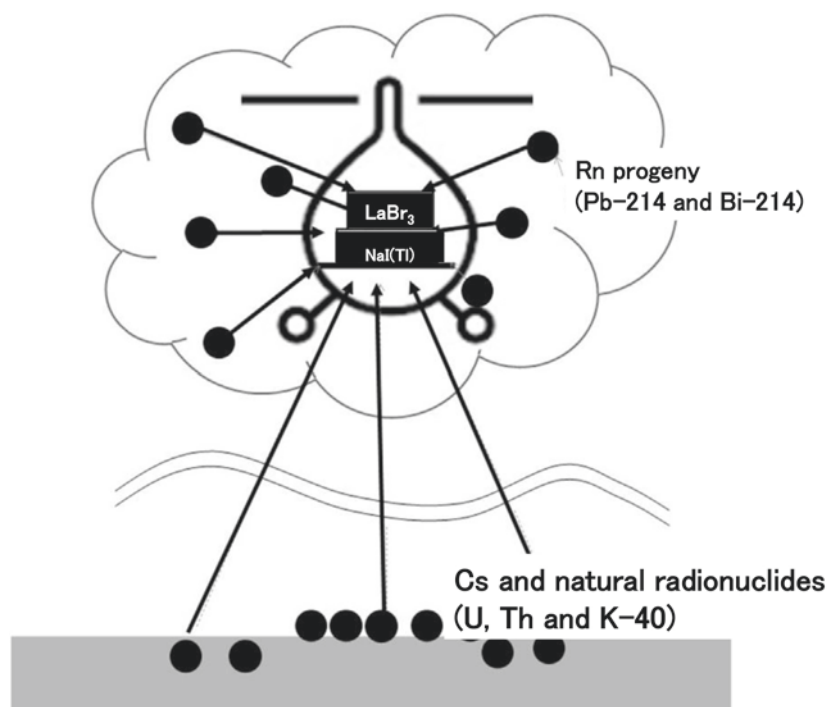


Fig. 8-3 空气中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ

8.3. パラメータ (RI 及び GI) の決定

式 [19] に記載したように、ラドン弁別法の信頼性は RI と GI の設定精度に依存する。ヘリコプターの遮蔽による γ 線計数率の変化に付随して、これらのパラメータも変化すると考えられるため、東日本第 13 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 13 次モニタリングで使用したヘリコプターは Bell412 (JA6928 及び JA412N)、Bell430 (JA05TV) であるが、本モニタリングにおいて Bell412 (JA412N) では RI 及び GI の算出に適したデータが十分に得られなかったため、Bell412 (JA6928) と Bell412 (JA412N) のデータを混合して Bell412 に対する代表的な RI 及び GI を決定することとした。

計数率の変動による影響をなるべく低減するために、東日本第 13 次モニタリングにおいて取得した計数率データ及び GPS データ (緯度、経度及び飛行高度) を 40 秒平均し、全計数率から宇宙線及びヘリコプター機体に起因する γ 線計数率の寄与をバックグラウンドとして減算したうえで 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 $300\text{ m} \pm 150\text{ m}$ (実際のフライト海拔高度が $150\text{ m} \sim 450\text{ m}$) で取得したデータのみを抽出し、 GI については陸上で取得したデータの内、対地高度が 300 m 前後 (実際のフライト対地高度が $290\text{ m} \sim 320\text{ m}$) 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。しかしながら、データ数が少ない、或いはばらつきが比較的大きく外れ値が含まれるデータに対して最小二乗法による線形回帰を実施した場合、回帰係数に悪影響を及ぼすケースが過去に見られた²⁹⁾。最小二乗法では実測値と予測値との二乗誤差を最小にする回帰係数を決定するため、外れ値が生じた場合の影響が大きく、回帰係数が外れ値側に偏った値に近似されてしまうためである。そこで、外れ値を含むデータに対しても適切な回帰係数を得ることを目的として、ロバスト回帰を試行的に導入することを検討した。本報告では、ロバスト回帰の中でも比較的単純で導入が容易な最小絶対値法を用いることとした。最小絶対値法では実測値と予測値との絶対値誤差を最小にする回帰係数を決定するため外れ値の影響を比較的受けにくいことが知られている。一方で、データに外れ値が含まれない (実測値と予測値の誤差が正規分布に従う) 場合には、最小二乗法の方が最小絶対値法よりも信頼度の高い回帰係数を与える⁵⁹⁾。以上のことを勘案すると、 RI 及び GI の算出に際しては、最小二乗法及び最小絶対値法による回帰係数を取得し、それぞれの数値がほとんど同一である場合には最小二乗法による回帰係数を用い、明らかに異なる場合には最小絶対値法による回帰係数を用いるのがより適切と思われる。

RI 及び GI の算出に係る NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr_3 検出器の計数率の関係を Fig. 8-4 及び Fig. 8-5 に示す。両図には最小二乗法及び最小絶対値法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。ここで、Fig. 8-4 については海上で取得したデータであることから、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。Bell412 (JA6928 及び JA412N) のケース (Fig. 8-4 (右)) に注目してみると、最小二乗法の場合では NaI(Tl)検出器の計数率の大きな領域のデータによる影響を受けて傾きが大きくなっているのに対し、最小絶対値法の場合では当該データの影響を緩和して傾きの増加を抑

えることができている。また、Fig. 8-5 の *GI* の場合はデータ数が多く、かつ外れ値が生じていないため、最小二乗法と最小絶対値法とで回帰係数にほとんど違いは生じなかった。なお、上記したように、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。

Fig. 8-4 における Bell412 (JA6928 及び JA412N) のケースで外れ値の影響をうまく緩和して回帰係数を算出でき、それ以外では最小二乗法と最小絶対値法とで回帰係数がほとんど同一であった。本報告では簡単のため、以降の解析に使用する *RI* 及び *GI* は、いずれのヘリコプターに対しても、最小絶対値法により得られた数値に統一した。なお、当該パラメータを用いた場合の解析結果と最小二乗法に基づく *RI* 及び *GI* を用いた場合の解析結果との比較は 8.5 節において、地上測定値を指標として行う。

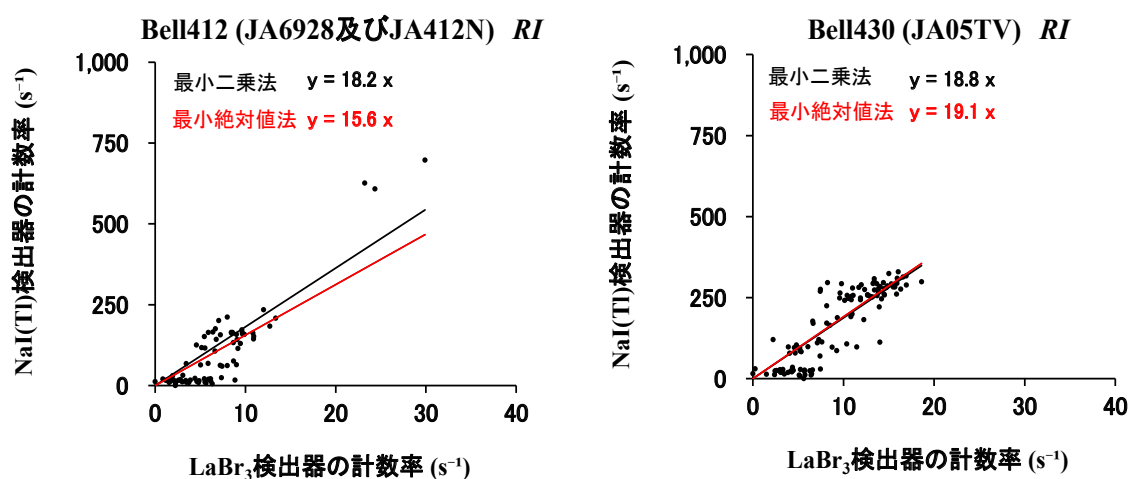


Fig. 8-4 海上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr₃ 検出器の計数率の関係 (回帰係数を *RI* と定義する。本報告では、最小絶対値法による回帰係数を用いた。)

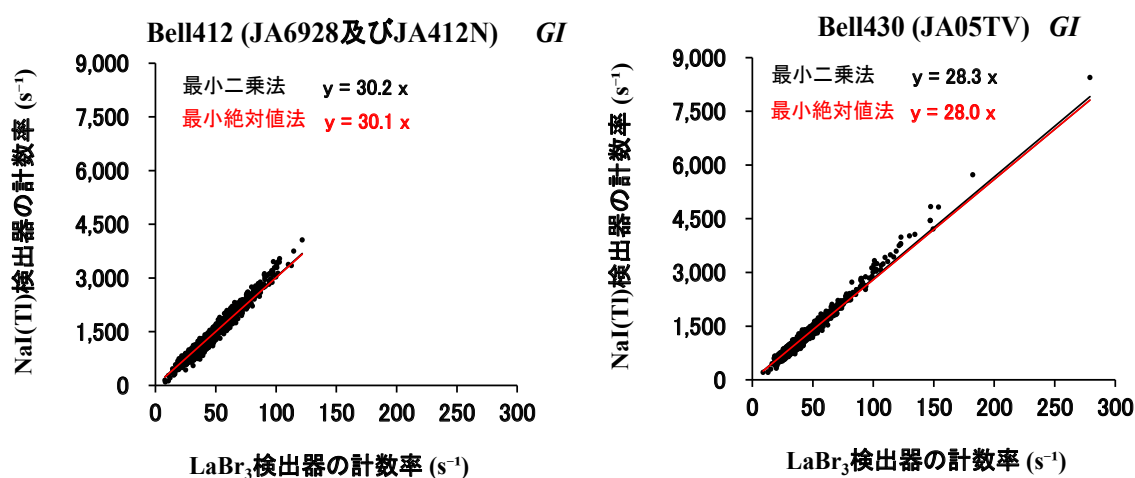


Fig. 8-5 陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr₃ 検出器の計数率の関係 (回帰係数を *GI* と定義する。本報告では、最小絶対値法による回帰係数を用いた。)

8.4. GI の高度補正方法

GI については、2015 年度(平成 27 年度)に実施した予備的な調査により、対地高度に依存して数値が変化することが分かっている。しかしながら、実環境中ではラドン子孫核種の寄与がないデータを取得することは不可能である。そこで、2017 年度(平成 29 年度)に計算シミュレーションにより実際の測定体系を模擬し、 GI の高度補正手法について検討した²⁰⁾。以下では、その検討内容について簡単に記述する。

当該シミュレーションに用いた計算コードは、モンテカルロ計算コードの一種である電磁カスケードモンテカルロコード EGS5³⁸⁾であり、ヘリコプター内の検出器の体系が簡易的に Fig. 8-6 のように模擬された。計算体系の妥当性については、正面及び横の周辺からの点線源を模擬した場合の検出器のレスポンス計算値と、実際に有人のヘリコプターに NaI(Tl)検出器を搭載した状態で、点線源(Cs-137)を照射することによって求めた検出器のレスポンス計算値の比較結果がベンチマークとなった(Fig. 8-7)。一部値が外れている部分は、計算体系で考慮していない局所的な構造物が影響していると考えられるが、全体として構築した体系は検出器のレスポンスを再現するのに十分な精度を有すると思われる。当該計算体系に対し、地上の無限平板線源を模擬し、距離を変化させることにより GI と測定高度(300 m、450 m 及び 600 m) との関係が計算により評価された。線源の模擬体系には、以下の条件が設定された。なお、土壌中の天然放射性核種濃度は全国の地上測定結果の平均値⁶⁰⁾が採用された。

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

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

本報告において、Fig. 8-8 に示した回帰直線の傾きを(0.0333) を GI の高度補正係数として採用し、式 [20] に基づいて各測定高度で取得したデータに対して高度補正を施した GI を用いた。

$$GI_{\text{corr}} = 0.0333 \times (H_m - H_{\text{std}}) + GI \quad [20]$$

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

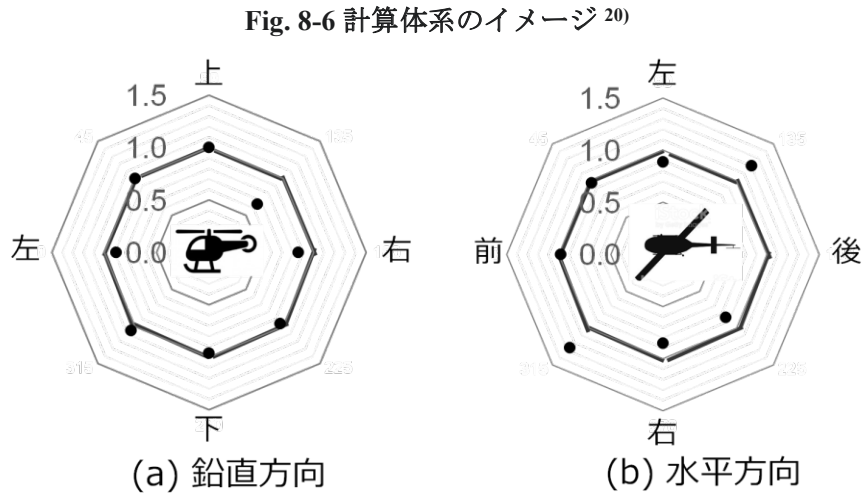
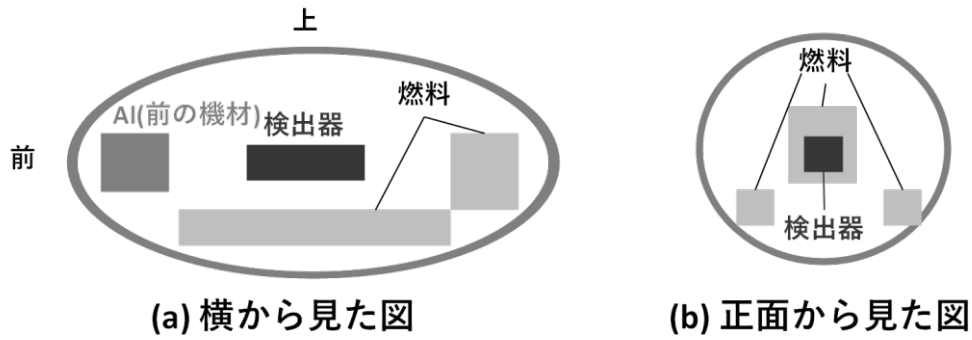


Fig. 8-7 計算体系のベンチマーク 20)
(計算結果と実測結果の比)

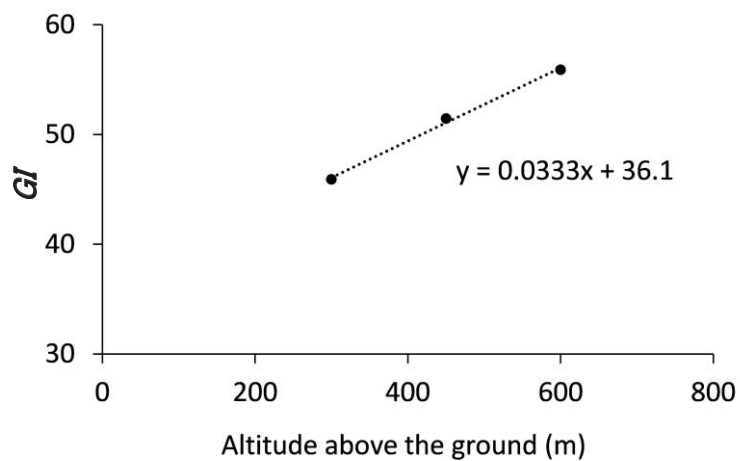


Fig. 8-8 シミュレーションによる測定高度と GI の関係 20)

8.5. 東日本第 13 次モニタリングのデータへの適用

ラドン弁別手法は、大気中のラドン子孫核種の計数率と地上からの計数率が拮抗している場所に効果的であり、放射性 Cs の影響が大きな地域では大気中のラドン子孫核種の影響はほとんど無視できる。よって、本手法は放射性 Cs の影響が大きい福島原子力発電所から 80 km 圏内を測定する第 17 次モニタリングには適用せず、東日本第 13 次モニタリングにのみ適用した。なお、今までの経験則から 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、空間線量率の計算値が地上測定値とよく整合するという知見が得られている。これに再現性があるかを検証するために、Fig. 8-5 に示した最小絶対値法に基づく 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 及び JA412N) では 30.1、Bell430 (JA05TV) では 28.0 を GI の基準値とし、それぞれの GI を 29.1 及び 28.1、27.0 及び 26.0 とした場合についても解析し、それぞれの場合で空間線量率マップを作成した。空間線量率の換算値を地上測定値 300 点と比較し、その妥当性を検証した。なお、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、上記した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計算値についても、地上測定値と比較した。

Fig. 8-9 にラドン弁別手法を適用した東日本第 13 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. 5-5 で示したものと同一である) も示した。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り、また、ラドン弁別手法による空間線量率の計算値は GI を基準値から減じるほど全体的に大きくなる傾向にあった。

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、空気中のラドン子孫核種由来の計数率のマップを作成した (Fig. 8-10)。本マップはラドン弁別手法の過程で計算した NaI(Tl)検出器における空気中ラドン子孫核種由来の計数率をマッピングしたものである。この計数率は NaI(Tl)検出器における全計数率から、式 [19] 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、空気中ラドン子孫核種由来の計数率は離散的である。ラドン子孫核種由来の計数率が高く算出されたのは、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陆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⁶¹⁾。一方、東日本第 13 次モニタリングの測定時期は 9 月 13 日～10 月 21 日であったことから、中国大陆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思われ、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⁶²⁾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。

ラドン弁別手法で作成した空間線量率マップの妥当性を評価するために、地上測定値 300 点との比較を行った。最小絶対値法に基づく RI 及び GI を用いた場合の比較結果を Fig. 8-11 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 1.08、ラドン弁別手法では 1.22~1.27 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. 8-9 で見られた通り、 GI を減じることで航空機モニタリングによる空間線量率の計算値が上昇することに起因すると思われる。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 93 % (全 300 点中 279 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 93 % (全 300 点中 278 点)、 GI を基準値から 1 減じた場合で 93 % (全 300 点中 279 点)、 GI を 2 減じた場合で 94 % (全 300 点中 281 点) と僅かながら増加する傾向が見られた。相対誤差の平均値及び中央値については、標準的解析手法が最も 0 に近く、一見するとラドン弁別手法よりも地上測定値の再現性が良いように思われる。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航空機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、0.15~0.20 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 1.2 倍程度過大評価する傾向が見られた。

次に、 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計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. 8-12 に示す。散布図については最小絶対値法の場合に比較して回帰直線の傾きが 1.00 に近く、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及び GI を基準値から 1 減じた場合で 94 % (全 300 点中 282 点)、 GI を 2 減じた場合で 94 % (全 300 点中 281 点) となり、絶対最小値法の場合よりも全体的に収まりが僅かながら良い。相対誤差のヒストグラムについては、 GI を基準値より 1 減じたときに平均値及び中央値が最も 0 に近くなり、最小絶対値法の場合よりも僅かながら相対誤差が小さくなった。

以上をまとめると、ラドン弁別手法において従来用いてきた最小二乗法に基づいて算出した RI 及び GI による解析を行った場合、 GI を基準値から 1 減じたときに地上測定値との相対誤差が最小化されやすい傾向にあるという結果は、今までの経験則と同様であった。一方で、最小絶対値法に基づく RI 及び GI を用いた場合は、 GI を基準値とした場合に地上測定値との相対誤差が最小となった。このことから、外れ値が生じた場合には、最小絶対値法のようなロバストな回帰手法により、外れ値の影響を緩和して算出される RI 及び GI を用いれば、 GI を人為的に変化させる必要なく、ラドン弁別手法における空間線量率のより良い計算値が得られる見込みが得られつつある。現状では、ラドン弁別手法による空間線量率の計算値と地上測定値との相対誤差のピークが 0.20 前後であることから、地上測定値に対してやや過大評価する傾向にある。この過大評価傾向を解消するため、ラドン弁別手法においては RI 及び GI の算出方法について、今後も知見を蓄積し、更なる改良に向けた検討を行っていく必要がある。例えば、最小絶対値法や最小二乗法

では縦軸データまたは横軸データ (本報告ではそれぞれ、 NaI(Tl) 検出器の計数率または LaBr_3 検出器の計数率) のどちらか一方にのみ誤差が含まれるという仮定の下に回帰係数を求めるため、 RI 及び GI を求めるには適切な回帰アルゴリズムであるとは言い難い。そこで、縦軸データ及び横軸データの両方に誤差が含まれることを考慮した回帰アルゴリズムである最小距離二乗法を取り入れ、これとロバスト回帰とを組み合わせることで、 RI 及び GI の算出方法の改良を検討したい。

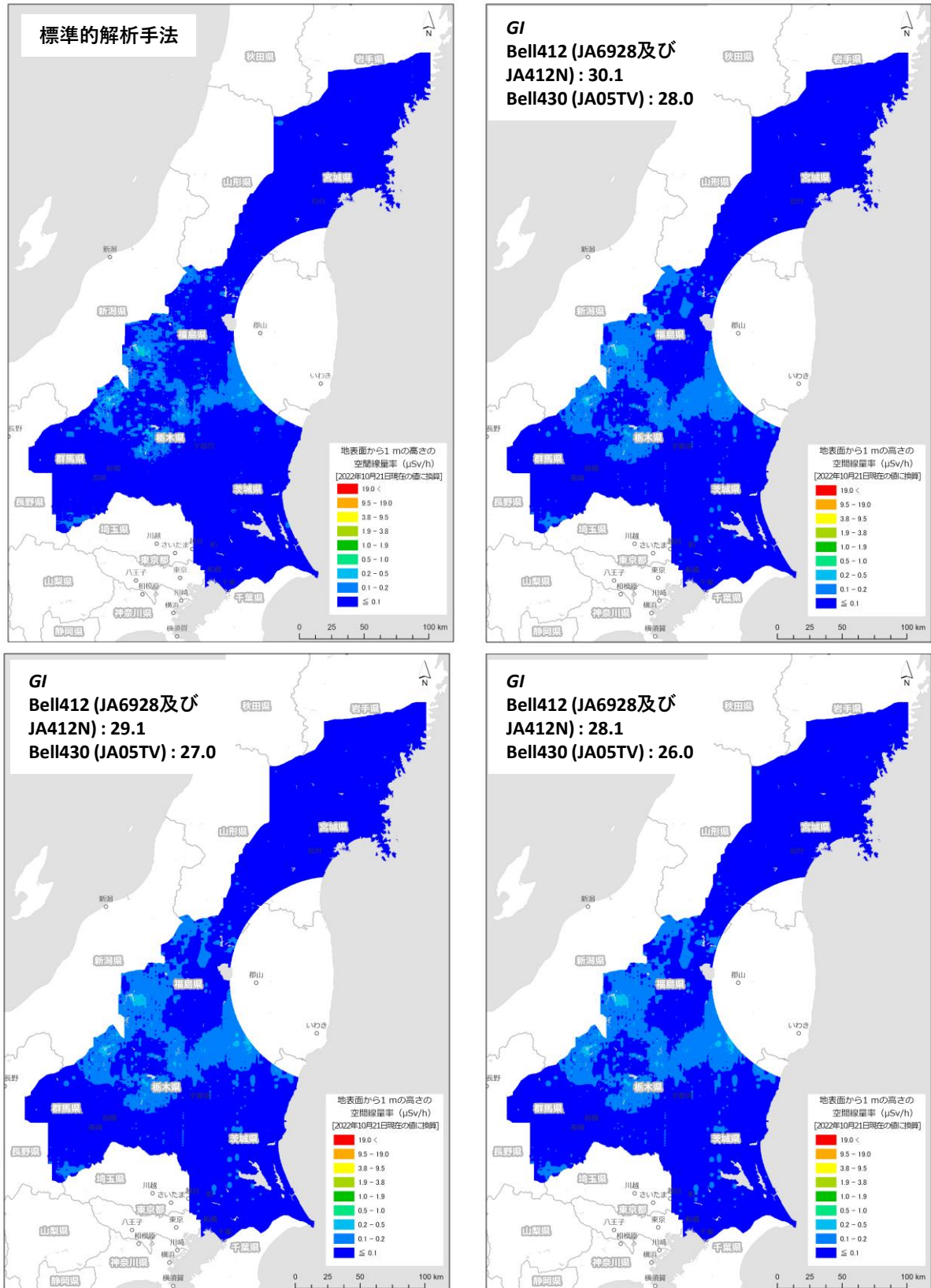


Fig. 8-9 ラドン弁別手法適用前後の東日本第13次モニタリングの空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

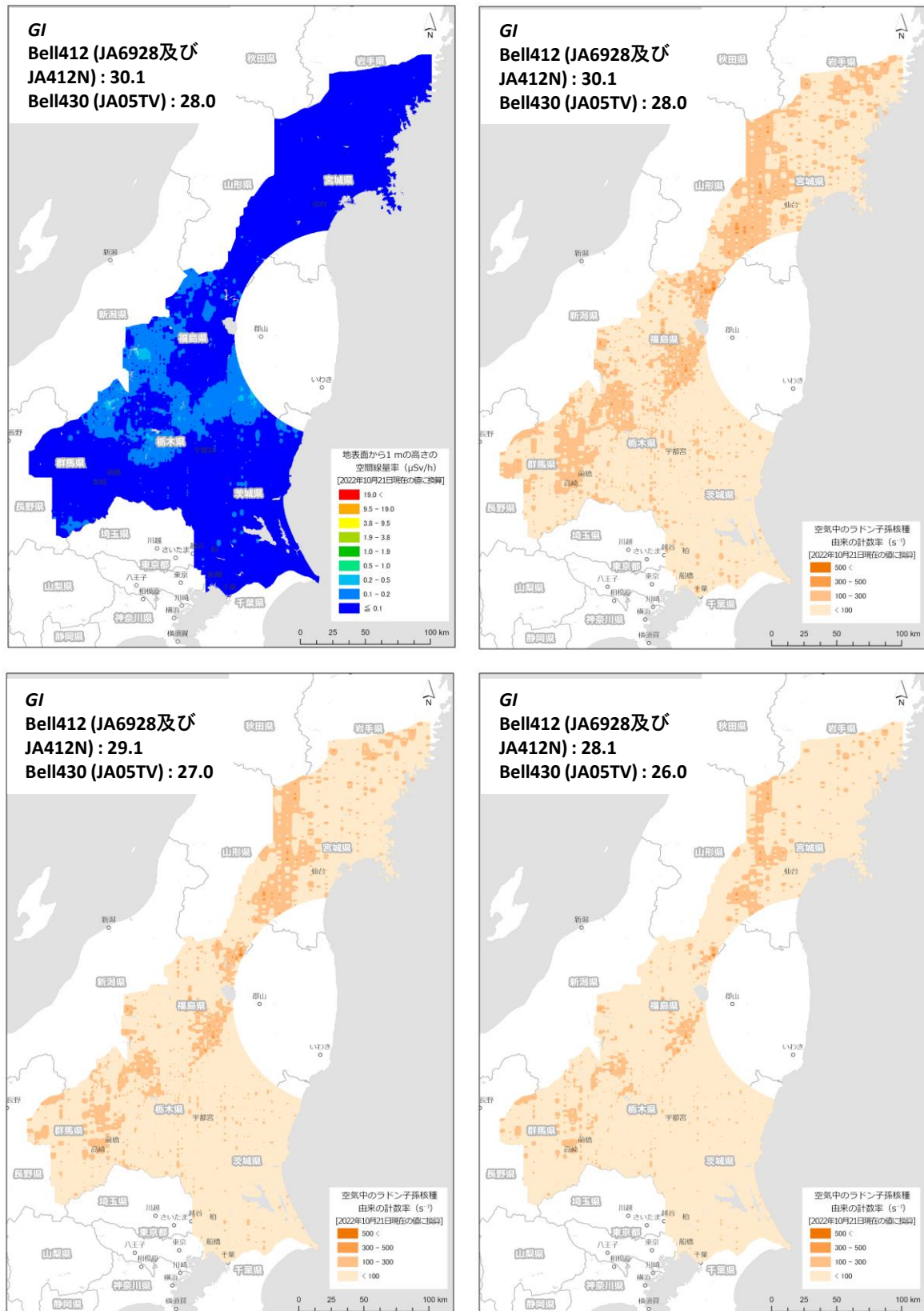


Fig. 8-10 東日本第 13 次モニタリングの測定結果から計算した空气中ラドン子孫核種の計数率マップ

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

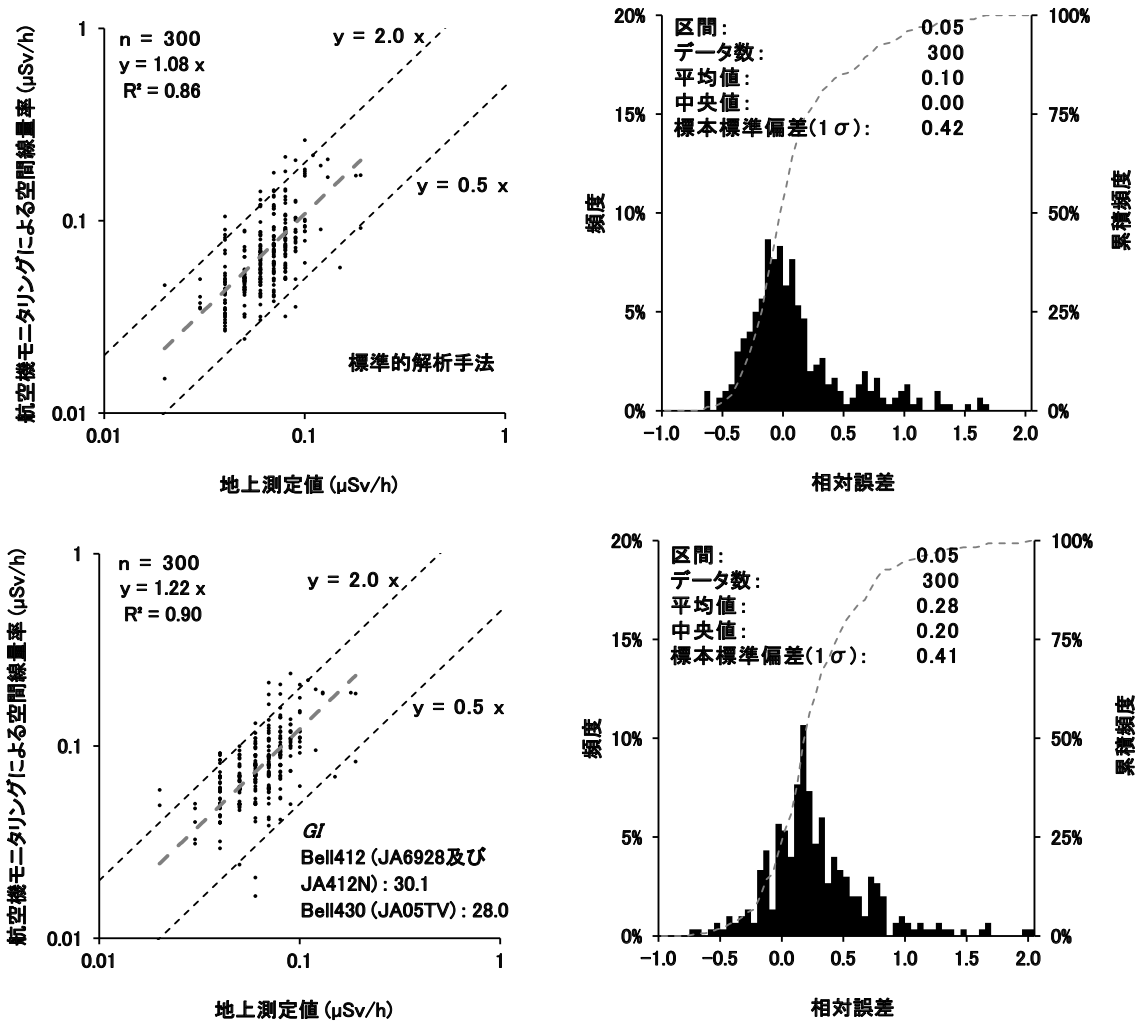


Fig. 8-11 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率と地上測定値との比較
(最小絶対値法による RI 及び GI を用いた場合)
(左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

(1/2)

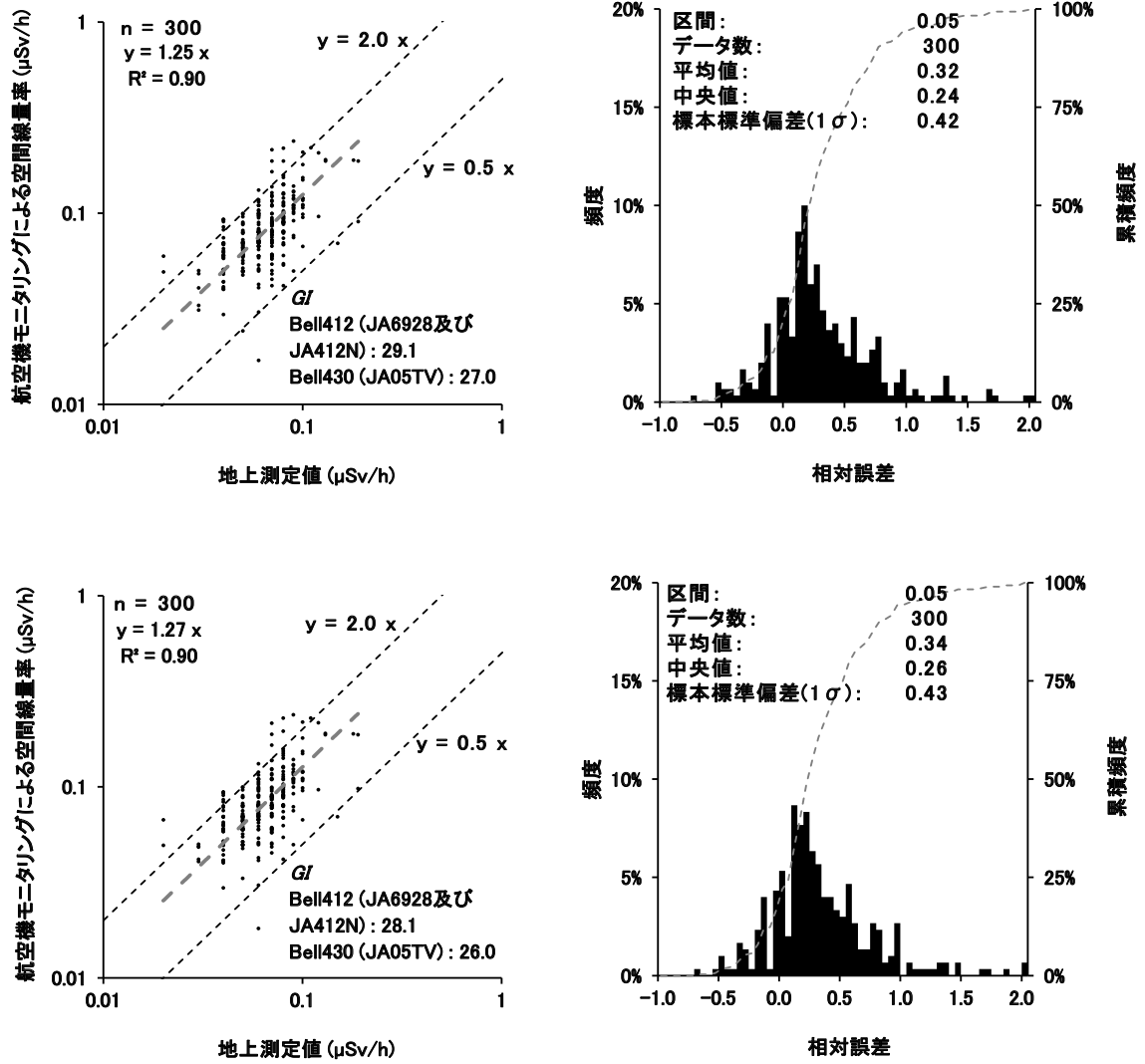


Fig. 8-11 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率と地上測定値との比較
(最小絶対値法による RI 及び GI を用いた場合)
(左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

(2/2)

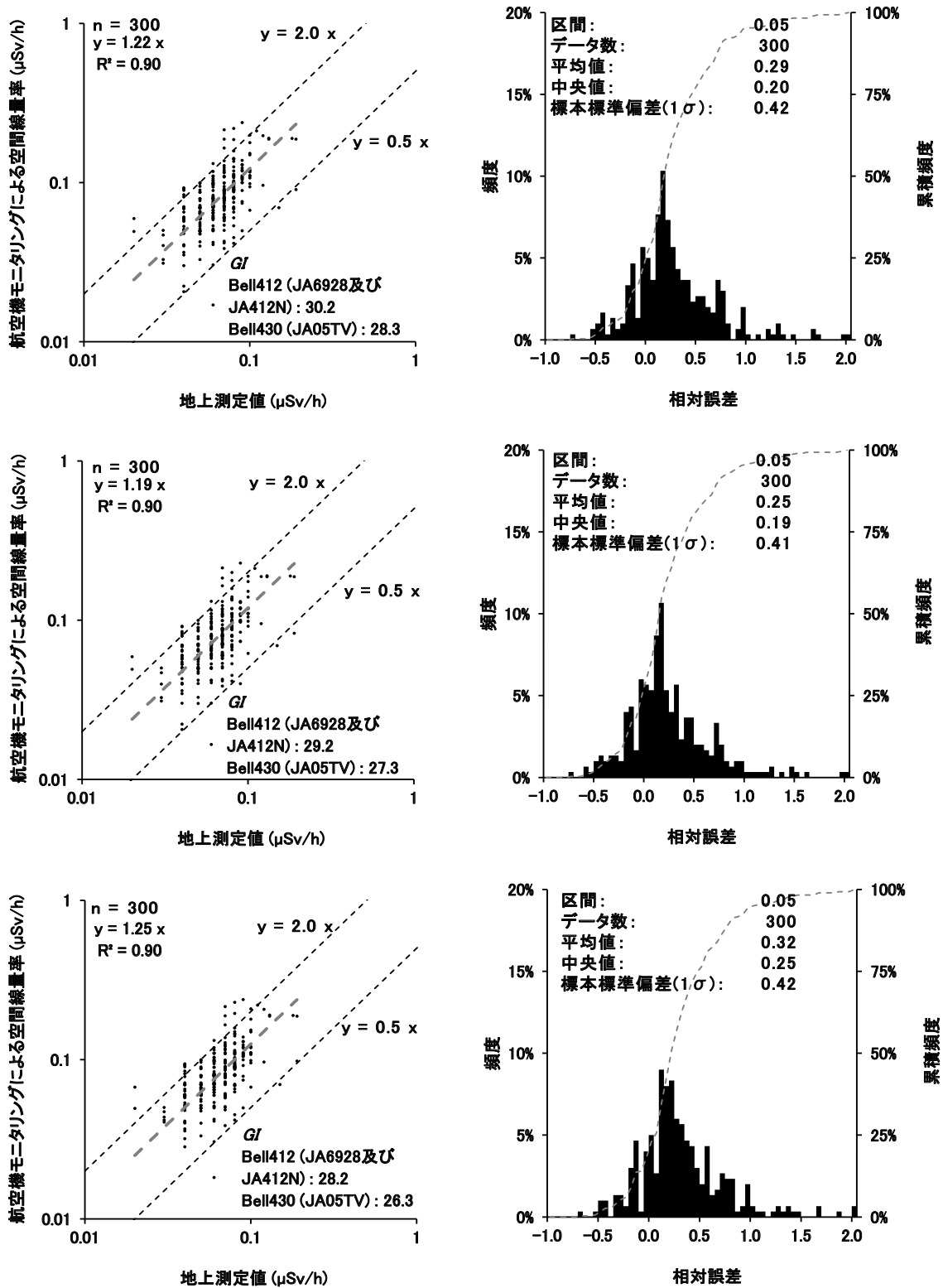


Fig. 8-12 ラドン弁別手法適用後の空間線量率と地上測定値との比較
(最小二乗法による RI 及び GI を用いた場合)
(左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

8.6. バックグラウンド計数率の比較

Fig. 4-14 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思われる。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. 8-13 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、福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs が存在しないと考えられる関西電力美浜発電所並びに日本原子力発電敦賀発電所及び四国電力伊方発電所周辺で、2022 年度に実施した航空機モニタリング (美浜・敦賀 BG 及び伊方 BG 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。東日本第 13 次モニタリングにおいては、いずれのヘリコプター機体についても、標準的解析手法で用いたバックグラウンド計数率よりもラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率の方が低くなる傾向にあった。例えば、Bell412 (JA6928 及び JA412N) では約 0.7 倍、Bell430 (JA02AX) では約 0.9 倍程度であった。このことから、Fig. 8-11 で見られたように、ラドン弁別手法ではバックグラウンド減算がやや不十分であり、従って標準的解析手法よりも空間線量率が高く算出される傾向にあったことが解される。しかしながら、空間線量率マップの色合いが顕著に異なる程の差異に繋がるわけではない。それとは逆に、美浜・敦賀 BG で使用した Bell430 (JA02AX) 及び伊方 BG で使用した Bell412 (JA9616) については、ラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率の方が 1.7 倍及び 1.3 倍程度高くなった。このように、東日本第 13 次モニタリングと美浜・敦賀 BG 及び伊方 BG とで、ラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率と標準的解析手法で用いたバックグラウンド計数率における多寡の関係がほとんど真逆であった。ラドン弁別手法で求まるバックグラウンド計数率の多寡には、地域や季節といった要素が関与することが示唆される。

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、上記した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資するものと考えられる。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。

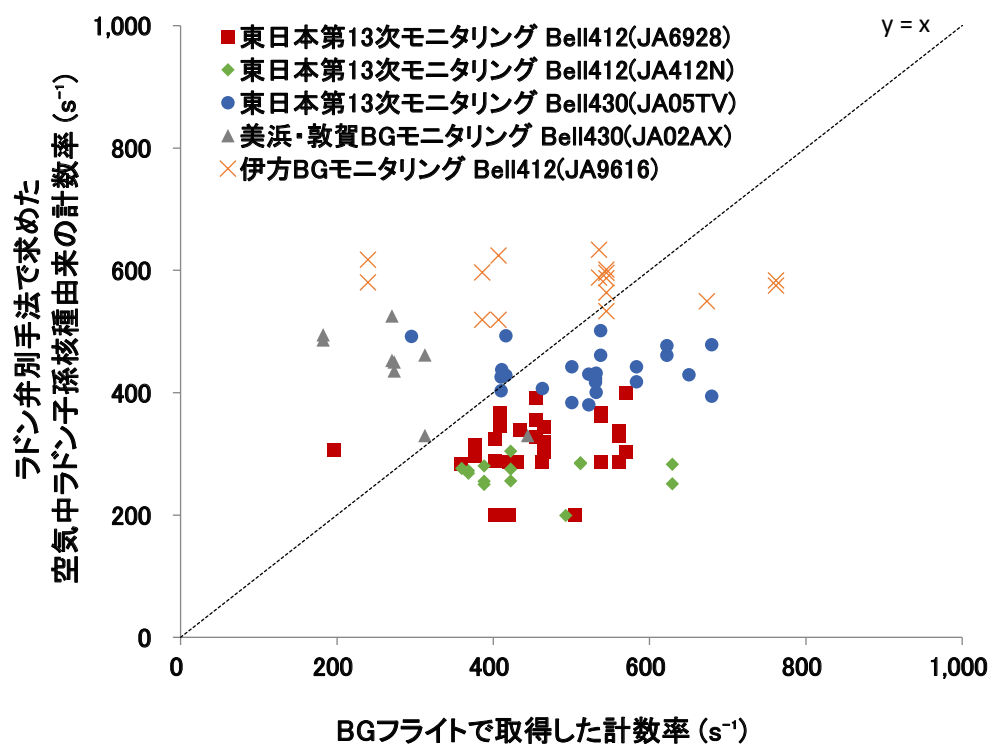


Fig. 8-13 BG フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子孫核種由来の計数率の比較

9. 本年度の成果と今後の課題

本章では、2022 年度の航空機モニタリングシステムの保守点検と運用の実績及び航空機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示す。

・RSI システム及び高精度 GPS システムの保守方法について

RSI システムを導入してから 12 年目となり、軽微な異常が何件か発生している。例えば、GPS のエラーによるデータの未取得や RSI システムのバグ等である。RSI システムの保守・運用についても、時間が経つにつれて必要性が増すため、メーカーを含めた保守体制作りが必要と考える。また、検出器に使用されている NaI(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、検出器は購入から 12 年が経過したものもあり、現在は運用を停止しているものの、このような古い検出器の特性の変化を注視したうえで更新のタイミングを計画していく必要がある。また NaI(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、波高値及び分解能が変化する可能性もある。さらに、現在用いているデータ収集装置 (RS-701) の後継品 (RS-705) が RSI から発売されており、将来的に RS-701 に対するサポートが終了する懸念があることから、2022 年度に RS-705 を 1 台購入した。RS-705 の機械的な特性を把握しつつ、航空機モニタリングに使用するにあたって問題がないことを確認した上で、必要台数が揃った後に RS-701 と交換し運用を開始する予定である。今後も航空機モニタリングを継続していく上で、RSI の最新情報を入手するよう努めるとともに、トラブルの予防保全のために計画的に航空機モニタリングシステムを更新する必要がある。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)の購入から 12 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望ましい。さらに、RSI システムの GPS 測位データでなく、高精度 GPS システムの測位データをメインに使用して空間線量率マッピング等を実施することも検討する必要がある。参考として、RSI システムの運用を開始した 2011 年度から 2022 年度までの RSI システムの保守及び運用実績を Table 9-1 に示す。

・空間線量率マップや放射性 Cs 沈着量マップについて

様々なヘリコプターと RSI システムの組み合わせごとの解析パラメータの蓄積が行われ、信頼性の高い数値の選択が可能になってきたと判断し、各解析パラメータに固定パラメータを用いた。航空機モニタリングで初めて使用することとなった Bell412 (JA412N) については、当該機体のトラブルによりキャリブレーションフライトの一部が実施できなかったため、やむを得ず Bell412 に対する固定パラメータを適用した。結果として、空間線量率マップは地上測定値ともよく整合

し、今後も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ことが望ましい。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、航空機モニタリングにおいて、測定範囲全域で重量緩衝深度 $\beta = 1.0$ (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 の設定値について検討するなどし、Cs-137沈着量の計算精度の向上に取り組む必要がある。また、Cs-134とK-40のピークを弁別して作成した天然放射性核種由来の放射線量率マップは、可搬型Ge検出器による測定で評価した天然放射性核種由来の放射線量率とよく一致した。このことから、上記の二つの放射性核種の複合ピークを仮定した関数適合法によって、Cs-134が有意に存在するような地域においても、天然放射性核種の影響の度合いを推定できることが示された。

- ・地形の起伏を考慮した空間線量率の補正手法について

航空機モニタリング解析システムに組み込んだ、地形の起伏を考慮する解析手法を2022年度の航空機モニタリング結果に適用し、地上測定値を指標として、地形を平坦と仮定している従来手法と比較を行うことで、空間線量率の計算精度向上効果について定量的評価を行った。地形の起伏を考慮した場合、空間線量率は従来手法に比べ全体的に低く評価される傾向にあった。空間線量率の計算結果について地上測定値との相対誤差ヒストグラムに着目した場合、従来手法に比べて本手法では平均値及び中央値が0に近づく等、相対誤差を小さくできることが分かった。今後は空間線量率が特に小さく評価される傾向にある地形の特徴を明らかにし、本手法に組み込まれている空間線量率の補正式のブラッシュアップに繋げる等、詳細な分析を進めていきたい。

- ・空气中ラドン子孫核種の弁別手法について

第13次東日本モニタリングのデータにラドン弁別手法を適用した。地上測定値と比較した結果から、当該手法はBGフライトを行ってバックグラウンドを減算する従来手法についても精度的に劣るものでないことが分かった。ラドン弁別手法では、測定地点ごとに大気中ラドン子孫核種の影響が除去できることから、本手法の高度化を継続していくメリットは大きい。今後も従来手法と比較しつつデータを蓄積し、本手法で独自に使用するパラメータであるRI及びGIを算出する回帰手法のブラッシュアップを検討していく予定である。

Table 9-1 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	
RSI 1	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)													RS-705が 計4台購入 でき次第、 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	運用継続 修理1台
	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	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)													購入予定	
	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	運用継続 修理1台
	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	
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

10. まとめ

2022 年度 (令和 4 年度) に予定された、福島原子力発電所から半径 80 km 圏内の航空機モニタリング 1 回及び 80 km 圏外の航空機モニタリング 1 回を実施した。福島原子力発電所事故から航空機モニタリングが日本で実施されて 12 年目となった。福島原子力発電所事故当時には定まっていなかった航空機モニタリングの測定及びデータ解析手法が円熟してきており、RSI システムの定期的な保守及び軽微なトラブルへの対応経験並びに測定データ解析手法のノウハウが蓄積されてきている。今回のモニタリング結果を過去の結果と比較し、福島原子力発電所事故の影響があったエリアの空間線量率及び放射性 Cs の地表面沈着量の全体的な減少傾向を把握することができた。

また、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開発を行ってきた。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計算手法を第 17 次モニタリングのデータに適用し、空間線量率マップの作成を行った。地形を平坦と仮定する従来手法によるものと比較したところ、地形の起伏を考慮に入れた場合、全体的に空間線量率が低く算出されることが明らかとなった。地上測定値を指標として、それぞれの手法の計算精度について評価したところ、地形の起伏を考慮に入れた計算手法の方がより地上測定値に近づいたことから、当該手法が空間線量率の計算精度の向上をもたらすことが示された。また、東日本第 13 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 倍前後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。上記した過大評価を解消するために、本手法の精度に関わるパラメータである *RI* 及び *GI* の算出方法の改善を図っていく予定である。

これまで Python2 系で動作していた標準的な航空機モニタリング解析システム及び応用的データ解析システムを Python3 系で動作するよう更新し、解析手順や注意すべき点、プログラムで自動化が困難であり解析者判断が求められる事項とその判断基準等をマニュアルとして取りまとめた。本解析システムの利便化及び解析作業の更なる効率化を図るため、GUI 化を今後検討したい。

謝辞

本調査研究は、「令和 4 年度原子力施設等防災対策等委託費及び放射性物質測定調査委託費(80km 圏内外における航空機モニタリング) 事業」による知見をとりまとめたものである。原子力機構、株式会社静環検査センター、株式会社 JDRONE の 30 余名が、ヘリコプターに搭乗しての測定、地上での空間線量率測定、さらにデータ解析とそのマップ化に取り組んだ。航空機の運航は中日本航空株式会社、朝日航洋株式会社が行った。ここに本モニタリングに参加された皆様に謹んで謝意を表します。

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 Beers, R. H., 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) Scott, E. M. et al., 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, 平成 20 年 3 月, 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(ATOMOS), 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) 原子力規制庁, 航空機モニタリング結果, <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/191/list-1.html> (2024 年 2 月 21 日閲覧).
- 14) IAEA, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -(Second Report), 2011.
- 15) Inomata, Y., Aoyama, M., Hirose, K., Sanada, Y., Torii, T., Tsubono, T., Tsumune, D. and Yamada, M., Distribution of radionuclides in surface seawater obtained by an aerial radiological survey, J. Nucl. Sci. Tech., 51(9), 2014, pp.1059-1063.
- 16) 原子力規制庁, 文部科学省航空機モニタリング行動計画, 2011, <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/6000/5274/view.html> (2024 年 2 月 21 日閲覧).
- 17) 眞田幸尚, 西澤幸康, 卜部嘉, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 平山弘克, 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.
- 18) 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 年度福島原子力第一発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2015-006, 2015, 81p.
- 19) 眞田幸尚, 宗像雅広, 森愛理, 石崎梓, 嶋田和真, 廣内淳, 西澤幸康, 卜部嘉, 中西千佳, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 佐々木美雪, 平山弘克, 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.
- 20) 眞田幸尚, 森愛理, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一郎, 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.
- 21) 眞田幸尚, 森愛理, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一郎, 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 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2017-035, 2018, 69p.
- 22) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 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.
- 23) 普天間章, 眞田幸尚, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一郎, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 工藤保, 平成 29 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2018-016, 2019, 98p.
- 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, 古宮友和, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 萩野谷仁, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成 30 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-017, 2019, 95p.
- 26) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 廣内淳, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和元年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-018, 2021, 121p.
- 27) 普天間章, 眞田幸尚, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 石崎梓, 廣内淳, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和元年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-019, 2021, 128p.
- 28) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 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.
- 29) 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, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹,

- 菊池陽, ト部嘉, 工藤保, 令和 2 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2021-020, 2021, 138p.
- 30) 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, ト部嘉, 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.
- 31) 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, 外間智規, 平岡大和, ト部嘉, 工藤保, 令和 3 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2022-028, 2023, 127p.
- 32) 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, ト部嘉, 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.
- 33) Sanada, Y., Sugita, T., Nishizawa, Y., Kondo, A., and Torii, T., The aerial radiation monitoring in Japan after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Prog. Nuc. Sci. Tech., 4, 2014, pp.76-80.
- 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}I 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 ^{131}I 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, pp.892_1-892_12.
- 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) 国土地理院, 国土地理院基盤地図情報ダウンロードサービス,
<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> (2023 年 3 月 1 日閲覧).
- 40) 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, 150p.
- 41) ICRU, Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU Report 53, 1994, 84p.
- 42) 原子力規制委員会, 令和 3 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, 2022,
<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/646/list-1.html> (2023 年 3 月 1 日閲覧).
- 43) 私信.
- 44) Knoll, G. F. 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.
- 45) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, 173p.

- 46) 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, GIS-理論と応用, 13(1), 2004, pp.33-41.
- 47) Nishizawa, Y., Sugita, T., Sanada, Y. and Torii, T., Analytical method for distribution of natural radionuclides after the FDNPP accident by aerial monitoring, Proceedings of the Twenty-First EGS Users' Meeting in Japan, KEK Tsukuba, 2014, pp.62-71.
- 48) 原子力規制委員会, 緊急時におけるゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトル解析法, 放射能測定法シリーズ 29, 2018, 225p.
- 49) ICRP, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, 1996, 179p.
- 50) 森内茂, 堤正博, 斎藤公明, 自然放射線における空気吸収線量から実効線量当量への換算係数の評価, 保健物理, 25(2), 1990, pp.121-128.
- 51) 環境省, 追加被ばく線量年間 1 ミリシーベルトの考え,
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/18437.pdf> (2023 年 3 月 1 日閲覧).
- 52) 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 (2023 年 3 月 27 日閲覧).
- 53) 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.
- 54) 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.
- 55) 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> (2023 年 3 月 1 日閲覧).
- 56) 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.
- 57) Oikawa, S., Kanno, 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.
- 58) 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.
- 59) 末吉俊幸, 最小絶対値法による回帰分析, 日本オペレーションズ・リサーチ学会論文 40(2), 1997, pp.261-275.
- 60) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 海と陸の地球化学図,
<https://gbank.gsj.jp/geochemmap/> (2023 年 3 月 1 日閲覧).
- 61) 永井英志, 山澤弘実, 森泉純, 平尾茂一, 冬季日本海側における高空間線量率事象の解析, 保健物理, 53(4), 2018, pp.219-229.
- 62) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 20 万分の 1 日本シームレス地質図 2015 年 5 月 29 日版, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (2023 年 3 月 1 日閲覧).

