

令和5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
報告書

令和6年3月

国立研究開発法人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
防災研究開発ディビジョン 航空機モニタリンググループ

本報告書は原子力規制庁による「令和 5 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」の成果を取りまとめたものである。

目次

1. はじめに	1
2. 東電福島原子力発電所事故に係る航空機モニタリングの経緯	3
3. 測定システムとヘリコプター	13
3.1. 測定システム	13
3.1.1. 有人ヘリコプター	13
3.1.2. 無人ヘリコプター	15
3.2. ヘリコプター	17
3.2.1. 有人ヘリコプター	17
3.2.2. 無人ヘリコプター	20
3.3. 有人ヘリコプター機体による γ 線遮へい効果	21
3.4. 測定システムの保守	23
3.4.1. RSI システムの保守	23
3.4.2. 無人ヘリモニタリングシステムの保守	26
4. データ取得及び解析方法	27
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	27
4.2. 有人ヘリ及び無人モニタリングモニタリングの方法	31
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	35
4.3.1. 有人ヘリコプター	35
4.3.2. 無人ヘリコプター	42
4.4. 解析のフロー	43
4.5. 空間線量率への換算方法	44
4.5.1. バックグラウンド減算(宇宙線及びその他)	45
4.5.2. 対地高度補正	48
4.5.3. 空間線量率への換算	53
4.6. 放射性 Cs の沈着量への換算方法	64
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	64
4.6.2. 空間線量率－放射能換算係数	66
4.7. 減衰補正	68
4.8. 検出限界値	69
4.8.1. 空間線量率の検出限界値	70
4.8.2. 放射性 Cs の沈着量の検出限界値	70
4.9. 不確かさ	72
4.10. 補間方法	73
4.11. 地上測定値との比較	74
4.12. 有人ヘリモニタリングにおける天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの作成	80
5. 有人ヘリ及び無人ヘリモニタリング結果	87

5.1.ヘリコプターによるフライトの実績.....	87
5.1.1. 有人ヘリコプター.....	87
5.1.2. 無人ヘリコプター.....	89
5.2.第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリング.....	90
5.3.東日本第 14 次モニタリング.....	95
6. 有人ヘリ及び無人ヘリモニタリング結果の考察.....	109
6.1.過去の有人ヘリモニタリング結果との比較.....	109
6.2.実効半減期の算出.....	121
6.3.土地利用区分による空間線量率の変化傾向の違い.....	123
7. 地形の起伏による影響と補正方法.....	134
7.1.背景.....	134
7.2.地形の起伏による測定への影響.....	134
7.3.地形の起伏による影響の補正.....	138
8. ラドン弁別手法を適用した空間線量率マップの作成.....	145
8.1.ラドン子孫核種.....	145
8.2.ラドン弁別手法の理論.....	147
8.3.パラメータ (<i>RI</i> 及び <i>GI</i>) の決定.....	149
8.4. <i>GI</i> の高度補正方法.....	152
8.5.東日本第 14 次モニタリングのデータへの適用.....	152
8.6.バックグラウンド計数率の比較.....	160
9. 無人航空機を用いたフライト試験.....	162
9.1.背景.....	162
9.1.1. 原子力災害時に運用する無人航空機の必要性能.....	164
9.1.2. 選定した機種のパフォーマンス.....	166
9.2.フライト試験概要及び結果及び結果.....	169
9.2.1. フライト試験概要.....	169
9.2.2. 機体の基本性能及び信頼性の確認及び評価結果.....	173
9.2.3. 夜間フライトに必要となる機能及び運用体制の確認評価結果.....	194
9.2.4. 放射線測定システムの評価結果.....	196
9.3.機体の性能条件の評価結果.....	208
10. 本年度の成果と今後の課題.....	217
11. まとめ.....	221
謝辞.....	223
参考文献.....	224

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.....	12
Table 3-1 搭載した RSI システムと有人ヘリコプターの組み合わせ.....	18
Table 3-2 Cs-137 線源によるヘリコプター機体の遮へい効果の比較.....	22
Table 4-1 キャリブレーションフライトの概略.....	37
Table 4-2 RSI システムと有人ヘリの組み合わせごとのバックグラウンド計数率及び <i>CR-Index</i>	46
Table 4-3 使用した空気減弱係数 <i>AF</i> のまとめ.....	51
Table 4-4 2023 年度に取得した有人ヘリモニタリングの空気減弱係数 <i>AF</i> データ一覧.....	52
Table 4-5 使用した空間線量率換算係数 <i>CD</i> のまとめ.....	55
Table 4-6 2023 年度に取得した <i>CD</i> データ一覧 (Bell412).....	55
Table 4-7 2023 年度に取得した <i>CD</i> データ一覧 (Bell430).....	56
Table 4-8 2023 年度に取得した <i>CD</i> データ一覧 (S-76).....	56
Table 4-9 <i>BG-Index</i> 一覧.....	66
Table 4-10 RSI システムの検出下限値.....	71
Table 4-11 使用した空気減弱係数 <i>AF</i> (m^{-1}) のまとめ.....	84
Table 5-1 第 18 次モニタリング及び東日本第 14 次モニタリングにおけるフライト実績.....	88
Table 5-2 浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングにおけるフライト実績.....	89
Table 6-1 東電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.....	114
Table 6-2 指数関数近似から求めた実効半減期.....	122
Table 6-3 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版) に基づく).....	131
Table 6-4 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版) に基づく).....	131
Table 6-5 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版) に基づく).....	132
Table 6-6 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (令和 3 年度公開版) に基づく).....	132
Table 6-7 森林部及び市街地部における空間線量率のモニタリング種別ごとの相対変化率の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (令和 3 年度公開版) に基づく).....	133
Table 8-1 ラドン子孫核種の放出する γ 線.....	146
Table 9-1 Penguin C のカタログスペック.....	168
Table 9-2 Edge Autonomy における MTBF 計算時の事故分類.....	169
Table 9-3 試験日及び試験内容一覧.....	171
Table 9-4 各フライト試験の詳細情報.....	172
Table 9-5 フライト No.2023-01 の作業情報詳細.....	174
Table 9-6 フライト No.2023-02 の作業情報詳細.....	176

Table 9-7 フライト No.2023-03 の作業情報詳細	178
Table 9-8 フライト No.2023-04 の作業情報詳細	180
Table 9-9 フライト No.2023-05 の作業情報詳細	182
Table 9-10 フライト No.2023-06 の作業情報詳細	184
Table 9-11 フライト No.2023-07 の作業情報詳細	186
Table 9-12 フライト No.2023-08 の作業情報詳細	188
Table 9-13 フライト No.2023-09 の作業情報詳細	190
Table 9-14 フライト No.2023-10 の作業情報詳細	192
Table 9-15 10回フライト試験で修理交換した部品一覧	194
Table 9-16 無人航空機測定試験で得られた空気減弱係数 AF と空間線量率換算係数 CD	204
Table 9-17 UAV IP Data Link 仕様	212
Table 9-18 ドローン等での使用が想定される主な無線通信システム	213
Table 10-1 RSI システムの保守及び運用実績	220

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.....	14
Fig. 3-2 RSI システムの外観.....	14
Fig. 3-3 無人ヘリモニタリングシステムの検出器の構成.....	15
Fig. 3-4 無人ヘリモニタリングシステムのブロック図.....	16
Fig. 3-5 機底に燃料タンクのないヘリコプター機種一覧.....	17
Fig. 3-6 無人ヘリモニタリングシステムを搭載した FAZER RG2.....	20
Fig. 3-7 線源試験イメージ.....	22
Fig. 3-8 RSI システムのエネルギー分解能及び Gain の変動 (RSI 1).....	24
Fig. 3-9 RSI システムのエネルギー分解能及び Gain の変動 (RSI 2).....	25
Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係.....	28
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.....	29
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.....	29
Fig. 4-4 航空機モニタリングによる上空からの測定イメージ.....	30
Fig. 4-5 航空機モニタリングのフライトイメージ.....	32
Fig. 4-6 航空機モニタリングにおけるフライトの測線.....	33
Fig. 4-7 浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおけるフライトの測線の詳細.....	34
Fig. 4-8 テストラインフライトのイメージ.....	38
Fig. 4-9 テストラインの場所.....	38
Fig. 4-10 テストポイントフライトのイメージ.....	39
Fig. 4-11 テストポイントの場所.....	40
Fig. 4-12 宇宙線フライトのイメージ.....	41
Fig. 4-13 Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージ.....	41
Fig. 4-14 天然核種フライトの測線とオーバーラップフライトの測線.....	41
Fig. 4-15 解析のフロー.....	43
Fig. 4-16 RSI システムによる海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例.....	46
Fig. 4-17 RSI システムにより BG フライトで取得した陸上と海上での γ 線スペクトル例.....	47
Fig. 4-18 無人ヘリモニタリングシステムにおける $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の自己汚染による γ 線スペクトル例.....	47
Fig. 4-19 対地高度と計数率の関係例.....	50
Fig. 4-20 地上測定データ (TestPoint 1).....	57
Fig. 4-21 地上測定データ (TestPoint 3).....	58
Fig. 4-22 地上測定データ (TestPoint 4).....	59
Fig. 4-23 地上測定データ (TestPoint 5).....	60
Fig. 4-24 地上測定データ (TestPoint D).....	61
Fig. 4-25 地上測定データ (TestPoint E).....	62

Fig. 4-26 オーバーラップフライトにおけるヘリコプター機種または機体ごとの <i>CR-Index</i> ・ <i>HF</i> 補正計数率の関係	63
Fig. 4-27 放射性 Cs に起因する計数率の算出イメージ	65
Fig. 4-28 <i>BG-Index</i> の算出例	65
Fig. 4-29 重量緩衝深度 β と空間線量率-放射能換算係数 <i>CF</i> の関係	67
Fig. 4-30 IDW に入力するパラメータとマップの関係	74
Fig. 4-31 測線近傍における地上測定値と有人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較	76
Fig. 4-32 ランダムな位置における地上測定値と有人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較	77
Fig. 4-33 ランダムな位置における地上測定値と浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較	77
Fig. 4-34 ランダムな位置における地上測定値と第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較	78
Fig. 4-35 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と有人ヘリモニタリングによる Cs-137 沈着量の比較	78
Fig. 4-36 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と浜通り第 1 次無人モニタリングによる Cs-137 沈着量の比較	79
Fig. 4-37 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と第 15 回 5 km 圏内次無人モニタリングによる Cs-137 沈着量の比較	79
Fig. 4-38 関数適合法を用いた Cs-134 と K-40 の弁別	83
Fig. 4-39 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (<i>CD</i>) の関係 (Bell412)	85
Fig. 4-40 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (<i>CD</i>) の関係 (Bell430)	85
Fig. 4-41 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (<i>CD</i>) の関係 (S-76)	85
Fig. 4-42 東電福島原子力発電所周辺における天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの作成例	86
Fig. 4-43 可搬型 Ge 検出器による測定で評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率と有人ヘリモニタリングで評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率との比較	86
Fig. 5-1 住民周知用のチラシのサンプル (檜葉町の例)	89
Fig. 5-2 第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける空間線量率マップ	91
Fig. 5-3 第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ	92
Fig. 5-4 第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ	93
Fig. 5-5 第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ	94
Fig. 5-6 東日本第 14 次モニタリングにおける空間線量率マップ	96
Fig. 5-7 東日本第 14 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ	97
Fig. 5-8 東日本第 14 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ	98
Fig. 5-9 東日本第 14 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ	99
Fig. 5-10 第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタ	

リングと東日本第 14 次モニタリングにおける空間線量率マップ	100
Fig. 5-11 第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングと東日本第 14 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	101
Fig. 5-12 第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングと東日本第 14 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ	102
Fig. 5-13 第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングと東日本第 14 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ	103
Fig. 5-14 第 18 次モニタリング及び東日本第 14 次モニタリングにおける天然放射性核種由来の自然放射線量率マップ	104
Fig. 5-15 各測定年度における天然放射性核種由来の空間放射線量率マップの比較	105
Fig. 6-1 東電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	111
Fig. 6-2 第 4 次モニタリング及び 2023 年度の有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングによる空間線量率算出結果の比較	115
Fig. 6-3 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	116
Fig. 6-4 旧避難指示区域における第 4 次モニタリングと第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの空間線量率算出結果の比較	119
Fig. 6-5 旧避難指示区域における第 4 次モニタリングと第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの Cs-137 沈着量算出結果の比較	120
Fig. 6-6 測定値の指数関数近似	122
Fig. 6-7 東電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)	125
Fig. 6-8 東電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)	126
Fig. 6-9 東電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)	127
Fig. 6-10 東電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 (令和 3 年度公開版 国土地理院土地利用調査データより)	128
Fig. 6-11 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 18 次モニタリングの相対変化率)	129
Fig. 6-12 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浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングの相対変化率)	129
Fig. 6-13 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浜通り第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの相対変化率)	130
Fig. 7-1 無作為に抽出した評価点の位置	136
Fig. 7-2 数値標高マップから三角ポリゴンへの変換例	137
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	137
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	140
Fig. 7-5 東電福島原子力発電所から 80 km 圏内における空間線量率マップの比較	141

Fig. 7-6 第 18 次モニタリング結果と地上測定値との比較.....	142
Fig. 7-7 浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング結果と地上測定値との比較.....	143
Fig. 7-8 第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリング結果と地上測定値との比較.....	144
Fig. 8-1 ウラン系列及びトリウム系列.....	146
Fig. 8-2 空气中ラドン子孫核種測定用の検出器と有人ヘリへの搭載状況.....	148
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.....	148
Fig. 8-4 海上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr ₃ (Ce)検出器の計数率の関係.....	151
Fig. 8-5 陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr ₃ (Ce)検出器の計数率の関係.....	151
Fig. 8-6 ラドン弁別手法適用前後の東日本第 14 次モニタリングの空間線量率マップ.....	155
Fig. 8-7 東日本第 14 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.....	156
Fig. 8-8 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率と地上測定値との比較 (直交距離回帰による <i>RI</i> 及び <i>GI</i> を用いた場合).....	157
Fig. 8-9 ラドン弁別手法適用後の空間線量率と地上測定値との比較 (最小二乗法による <i>RI</i> 及び <i>GI</i> を用いた場合).....	159
Fig. 8-10 BG フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空气中ラドン子孫核種由来の計数率の比較.....	161
Fig. 9-1 原子力災害時に備えるべき無人航空機システムのイメージ.....	163
Fig. 9-2 原子力発電所事故を例にした対応シミュレーション.....	164
Fig. 9-3 国内外の無人航空機.....	166
Fig. 9-4 Penguin C 外観写真.....	167
Fig. 9-5 フライト試験の工程.....	173
Fig. 9-6 フライト No.2023-01 の飛行軌跡.....	175
Fig. 9-7 フライト No.2023-02 の飛行軌跡.....	177
Fig. 9-8 フライト No.2023-03 の飛行軌跡.....	179
Fig. 9-9 フライト No.2023-04 の飛行軌跡.....	181
Fig. 9-10 フライト No.2023-05 の飛行軌跡.....	183
Fig. 9-11 フライト No.2023-06 の飛行軌跡.....	185
Fig. 9-12 フライト No.2023-07 の飛行軌跡.....	187
Fig. 9-13 フライト No.2023-08 の飛行軌跡.....	189
Fig. 9-14 フライト No.2023-09 の飛行軌跡.....	191
Fig. 9-15 フライト No.2023-10 の飛行軌跡.....	193
Fig. 9-16 LED ライトを装着した状態で行った対地高度 200 m でのフライトの様子.....	196
Fig. 9-17 日中に撮影したフライト時の赤外線カメラ画像.....	196
Fig. 9-18 試験でを使用した放射線測定システム.....	198
Fig. 9-19 システム A 外観図.....	198
Fig. 9-20 システム B 外観及び画面表示例.....	199
Fig. 9-21 システム C 画面例.....	199
Fig. 9-22 キャリブレーションフライトで得られた対地高度と計数率の関係.....	201

Fig. 9-23 歩行サーベイによる地上 1 m 空間線量率測定結果 (2023 年 7 月 11 日実施).....	202
Fig. 9-24 歩行サーベイによる地上 1 m 空間線量率測定結果 (2023 年 12 月 21 日実施).....	203
Fig. 9-25 無人航空機測定による空間線量率マッピング結果 (2023 年 7 月 11 日測定).....	205
Fig. 9-26 無人航空機測定による空間線量率マッピング結果 (2023 年 7 月 14 日測定).....	206
Fig. 9-27 地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値の比較結果 (2023 年 7 月 11 日).....	207
Fig. 9-28 地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値の比較結果 (2023 年 7 月 14 日).....	208
Fig. 9-29 カタパルトに対する打ち上げ時の風向.....	209

1. はじめに

短時間で広域のモニタリングを実施する方法の一つとして、有人ヘリコプターを用いた航空機モニタリング (Aerial Radiation Monitoring: ARM) が挙げられる。航空機モニタリングによる放射線の測定及びマッピングは、1979年に発生したスリーマイル島原子力発電所事故や1986年に発生したチェルノブイリ原子力発電所事故を契機とし、環境中の地表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、チェルノブイ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、東電福島原子力発電所) 事故当時、我が国において、航空機モニタリングは環境放射線モニタリング指針⁹⁾で原子力防災時に実施するように位置づけられてはいたものの、広範囲の測定に対応できるデータ取得方法やデータ解析方法について、ルーチンベースで整備されていたとは言い難かった。

2011年 (平成23年) 3月11日の東北地方太平洋沖地震に起因して、東電福島原子力発電所事故が発生し、周辺環境に放射性物質が広く拡散したため、その影響を評価することが急務となり、航空機モニタリングが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米国エネルギー省 (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の手法をベースに東電福島原子力発電所事故の状況や急峻な地形が多いという日本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⁾。当時作成した東電福島原子力発電所周辺における空間線量率マップや地表面における放射性セシウム (以下、放射性

Cs) の沈着量マップは、避難指示区域設定の基礎資料となった他、様々なメディアや研究に活用された¹⁴⁾。また、事故直後に実施された東電福島原子力発電所周辺の海上における航空機モニタリングデータを再解析し、事故直後の海上における I-131 や放射性 Cs の降下量マップを再構築し、シミュレーションと比較した例も報告されている¹⁵⁾。いずれの例も、東電福島原子力発電所事故後における航空機モニタリング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、2023 年度 (令和 5 年度) に行った東電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。80 km 圏内については有人ヘリコプター (以下、有人ヘリ) を主軸とし、東電福島原子力発電所の近傍では無人ヘリコプター (以下、無人ヘリ) を用いてモニタリングを行った。80 km 圏外については有人ヘリのみでモニタリングを行った。2023 年度 (令和 5 年度) における東電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内、有人ヘリによるモニタリングを「第 18 次モニタリング」、福島県浜通り地域における無人ヘリによるモニタリングを「浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング」、東電福島原子力発電所から 5 km 圏内における無人ヘリによるモニタリングを「第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリング」、80 km 圏外における有人ヘリモニタリングを「東日本第 14 次モニタリング」と呼称する。なお、第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングは「令和 5 年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費 (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」(本事業とは別事業) の一環として行われたものである。また、有人ヘリモニタリングによる空間線量率の評価の更なる高度化を目的とし、地形の起伏を考慮した場合に空間線量率の計算結果に及ぼす影響について、東電福島原子力発電所から 80 km 圏内の測定データ (第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリング) 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、80 km 圏外の測定データ (東日本第 14 次モニタリング) 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。加えて、国内の原子力発電所周辺のモニタリングに適用することを見据え、無人航空機を用いたフライト試験及び無人航空機用の放射線測定システムの測定精度評価を福島ロボットテストフィールドで実施した。当試験を通じて、無人航空機によるモニタリングにおける課題を抽出した。

2. 東電福島原子力発電所事故に係る航空機モニタリングの経緯

東電福島原子力発電所事故発生後に実施された航空機モニタリングの一連のスケジュールと実績について Table 2-1 及び Fig. 2-1 に示す。本報告では、これら一連の東電福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングを「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」として東電福島原子力発電所から80 km 圏内における有人ヘリモニタリングを開始した。また、同年5月18日から「第2次モニタリング」として東電福島原子力発電所から80 km~100 km 圏を有人ヘリによりモニタリングした。その後、同年5月31日に開始された「第3次モニタリング」からは原子力機構が加わって、東電福島原子力発電所から80 km 圏内の有人ヘリモニタリングを実施した。さらに、東電福島原子力発電所から100 km 圏外にも放射性物質が拡散していることが予想されたため、同年6月22日から福島周辺県の宮城県、栃木県、茨城県を対象に有人ヘリによるモニタリングを実施した後、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有人ヘリモニタリング「東日本第1次モニタリング」を実施した。その後、東電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」として有人ヘリにより実施した。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有人ヘリモニタリング「西日本・北海道モニタリング」を実施した。同年2月6日からは、「警戒区域及び計画的避難区域における有人ヘリモニタリング(第4.5次)」として実施した。

2012年度(平成24年度)は、それまでのデータに基づき、東電福島原子力発電所事故の影響が見られる地域に限定し、有人ヘリモニタリングを継続した。空間線量率の比較的高い場所(0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 以上)で東電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、有人ヘリモニタリングが継続された。東電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)で東電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、東電福島原子力発電所から80 km 圏内について2014(平成26年)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日より東電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、東電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日から東電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有人ヘリ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、東電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日から東電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有人ヘリ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、東電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日から東電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有人ヘリ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、東電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日から東電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有人ヘリ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、東電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日から東電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有人ヘリ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、東電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日から東電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有人ヘリ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、東電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日から東電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有人ヘリ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。

2022年度(令和4年度)については、東電福島原子力発電所から80 km圏内について2022年(令和4年)9月1日から「第17次モニタリング」を実施した。また、同年9月13日から東電福島原子力発電所から80 km圏外を対象に「東日本第13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、関西電力美浜発電所並びに日本原子力発電敦賀発電所周辺及び四国電力伊方原子力発電所の有人ヘリ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(2024)^{32),33)}に詳しく報告されている。

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

また、これらの継続的な有人ヘリモニタリングと並行して、関連する技術開発を実施してきた。Table 2-2 に有人ヘリモニタリングに関連する技術開発の経緯について示す。2011年度(平成23年度)は基本的な有人ヘリ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^{34),35)}。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定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、東電福島原子力発電所から80 km圏内の谷や山地地形等の特徴的な地形の上空で有人ヘリモニタリングデータを取得し、地形が有人ヘリ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^{36),37)}はDOEが事故直後に実施した有人ヘリ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、有人ヘリモニタリングで用いる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、有人ヘリモニタリングで計測される、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 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション式検出器(以下、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 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、東電福島原子力発電所から80 km圏外の航空機モニタリングデータに適用した。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¹⁹⁾、積雪による放射線の減衰係数を評価した²⁷⁾。この手法により、事故直後に積雪があり放射線が遮へい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)を用いて有人ヘリ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、測位精度が有人ヘリ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)³⁹⁾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有人ヘリ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有人ヘリモニタリング結果に適用し、地上測定値を指標として標準的な解析手法と比較することにより、空間線量率の換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有人ヘリモニタリング解析システムに組み込むとともに東電福島原子力発電所から80 km圏内の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標準的な解析手法と比較することにより、空間線量率の換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系で動作していた有人ヘリ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。

2023年度(令和5年度)には、東電福島原子力発電所から80 km圏内においては、有人ヘリモニタリングに加え、福島県浜通り地域及び東電福島原子力発電所から5 km圏内において無人ヘリによるモニタリングを実施した。これらの異なる手法によるモニタリングデータを統合して空間線量率及び地表面の放射性Csの沈着量をマッピングする手法を構築した。

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯

(1/2)

モニタリング名	測定場所	測定実施機関	解析実施機関	測定実施日	結果公表日
第1次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	DOE 60 km圏内	DOE	2011/04/06 ~04/29	2011/05/06
		NUSTEC 60 km~80 km圏内			
第2次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km~100 km圏内	NUSTEC	NUSTEC	2011/05/18 ~05/26	2011/06/16
第3次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA, NUSTEC 40 km圏内	JAEA NUSTEC	2011/05/31 ~07/02	2011/07/08
		NUSTEC 40 km~80 km圏内			
東日本第1次 モニタリング	青森~福井までの東日本 (2次, 3次実施部分除く)	JAEA NUSTEC OYO	JAEA NUSTEC OYO	2011/06/22 ~10/20	随時公表
第4次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA, NUSTEC 40 km圏内	JAEA NUSTEC	2011/10/22 ~11/05	2011/12/16
		NUSTEC 40 km~80 km圏内			
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	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JCAC	JCAC	2012/06/22 ~06/28	2012/09/28
		OYO	NUSTEC		
第6次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JCAC	JCAC	2012/10/31 ~11/16	2013/03/01
		OYO	NUSTEC		
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 (6.5次)	警戒区域及び 避難指示区域	JCAC NUSTEC	JCAC NUSTEC	2013/03/04 ~03/11	2013/05/13
第7次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2013/08/27 ~09/28	2013/12/25
東日本第4次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 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	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA	JAEA	2013/11/02 ~11/19	2014/03/07
		OYO	OYO		
第9次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2014/09/01 ~09/20	2015/02/13
東日本第5次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 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	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA	JAEA	2015/09/12 ~09/30	2016/02/02
		OYO	OYO		
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	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA	JAEA	2016/09/14 ~10/15	2017/02/13
		OYO	OYO		
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	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2017/09/09 ~09/25	2018/02/20
東日本第8次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA OYO	JAEA OYO	2017/09/29 ~11/16	2018/02/20
H29_BGモニタリング(3)	玄海原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2017/11/28 ~12/05	-
H30_BGモニタリング(1)	島根原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2018/07/20 ~07/27	-
第13次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2018/09/06 ~10/16	2019/03/08
東日本第9次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA OYO	JAEA OYO	2018/10/08 ~11/15	2019/03/08
H30_BGモニタリング(2)	浜岡原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA	2018/11/27 ~12/09	-
R1_BGモニタリング(1)	東通原子力発電所並びに六ヶ 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	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2019/08/29 ~09/18	2020/02/13
東日本第10次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/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	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA OYO	JAEA OYO	2020/08/25 ~10/02	2021/02/15
東日本第11次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/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	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA JDRONE	2021/08/31 ~10/03	2022/03/04
東日本第12次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/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	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA JDRONE	2022/09/01 ~09/30	2023/03/10
東日本第13次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/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	-
R5_BGモニタリング(前期)	川内原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2023/07/25 ~07/28	-
第18次モニタリング	東電福島原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA JDRONE	2023/09/07 ~09/29	2024/02/22
浜通り第1次 無人ヘリモニタリング	福島県浜通り地域	JAEA JDRONE	JAEA JDRONE	2023/11/13 ~11/27	2024/02/22
第15回5 km圏内 無人ヘリモニタリング	東電福島原子力発電所から 5 km圏内	JAEA JDRONE	JAEA JDRONE	2023/6/21 ~10/22	2024/02/22
東日本第14次 モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA SIC	JAEA JDRONE	2023/09/20 ~10/18	2024/02/22
R5_BGモニタリング(後期)	川内原子力発電所から 80 km圏内	JAEA SIC	JAEA	2023/11/12 ~11/15	-

※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			
	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4次モニタリング (10/22~11/05) 				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) 				第9次モニタリング (09/01~09/20) 			
東電福島原子力発電所事故 (03/11)				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) 												
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

(1/3)

年	2016				2017				2018				2019				2020			
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11次モニタリング (09/14~10/15)				 第12次モニタリング (09/09~09/25)				 第13次モニタリング (09/06~10/16)				 第14次モニタリング (08/29~09/18)				 第15次モニタリング (08/25~10/02)			
80 km 圏外	川内BG (02/01~02/07)	伊方BG (11/29~12/11)			泊BG (07/24~08/02)	玄海BG (11/28~12/05)			浜岡BG(11/27~12/09)				志賀BG(11/21~11/29)				近大炉・京大炉BG (11/12~11/19)			
																				
	高浜・大飯BG (07/20~08/01)				柏崎刈羽BG (07/26~08/10)				島根BG(07/20~07/27)				東通・六ヶ所BG (06/26~07/10)				美浜・敦賀BG (07/22~08/10)			
																				
	東日本第7次モニタリング (10/15~11/18)				東日本第8次モニタリング (09/29~11/16)				東日本第9次モニタリング (10/08~11/15)				東日本第10次モニタリング (09/18~11/02)				東日本第11次モニタリング (09/22~10/30)			

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績

(2/3)

年	2021				2022				2023			
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
80 km 圏内	 第16次モニタリング (08/31~10/03)				 第17次モニタリング (09/01~09/30)				 第15回5 km 圏内 無人ヘリモニタリング (06/21~10/22)  第18次モニタリング (09/07~09/29)  浜通り第1次 無人ヘリモニタリング (11/13~11/27)			
80 km 圏外	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) 				川内BG(後期) (11/12~11/15)  川内BG(前期) (07/25~07/28)  東日本第14次モニタリング (09/20~10/18) 			

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績

(3/3)

Table 2-2 航空機モニタリングに関わる技術開発の経緯

年度(和暦)	技術開発項目	開発成果
2011 (H23)	基本的な航空機モニタリング解析手法の確立	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。
	DEMデータ抽出ツールの開発	航空機モニタリングにおける測定範囲の標高データを抽出できるツールを開発した。これにより、測定範囲内における地形勾配が評価可能となった。
2013 (H25)	地形の影響調査	谷や山地形等の特徴的な地形の上空で航空機モニタリングデータを取得し、DEMデータ抽出ツールを用いて航空機モニタリングデータに与える影響に関する知見を取得した。
	I-131の地表面における沈着量の評価手法の開発	東電福島原子力発電所事故直後に取得した航空機モニタリングデータの γ 線スペクトルをコベル法により再解析し、I-131のピーク面積からモンテカルロ計算コードにより地表面の沈着量に換算する手法を開発した。
2014 (H26)	人工放射性核種と天然放射性核種の弁別評価手法の開発	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)	空气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 (Ce)検出器を導入してデータを取得し、航空機モニタリングデータから空气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後で取得し、積雪による放射線の減衰係数を評価した。
2016 (H28)	空气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	空气中ラドン子孫核種に起因する γ 線計数率の減算システムを構築し、航空機モニタリングの解析システムに組み込むとともに、東電福島原子力発電所から80 km圏外の航空機モニタリングデータに適用した。
	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) ³⁹⁾ 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航空機モニタリング解析システムに組み込むとともに、東電福島原子力発電所から80 km圏内のデータに適用した。
2022 (R4)	航空機モニタリング解析システムの更新	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。
2023 (R5)	有人ヘリコプターと無人ヘリコプターの測定データを統合し、マッピングする手法の構築	有人ヘリコプターと無人ヘリコプターを併用して東電福島原子力発電所から80 km圏内の航空機モニタリングを実施するようになったのに伴い、両者のデータを統合した上で空間線量率マッピングを行う手法を構築した。

3. 測定システムとヘリコプター

3.1. 測定システム

3.1.1. 有人ヘリコプター

有人ヘリモニタリングシステムには、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、東電福島原子力発電所事故当時に DOE により行われた航空機モニタリングで用いられたシステムと同一であり、ヘリコプター機内に搭載するタイプである。RSI システムのブロック図を Fig. 3-1 に示し、外観を Fig. 3-2 に示す。検出部には、2"× 4"× 16"の NaI(Tl)検出器 3 本を組み込んだ検出器のユニット (RSX-3) を 2 台使用している (検出部容量合計: 12.6 L)。なお、NaI(Tl)検出器の上部に設置してある LaBr₃(Ce)検出器 (RSX-1) は空気中のラドン子孫核種に起因する γ 線計数率の弁別 (8 章に詳述する) に使用する。検出器で計測した 1,024 ch (0 ch~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。

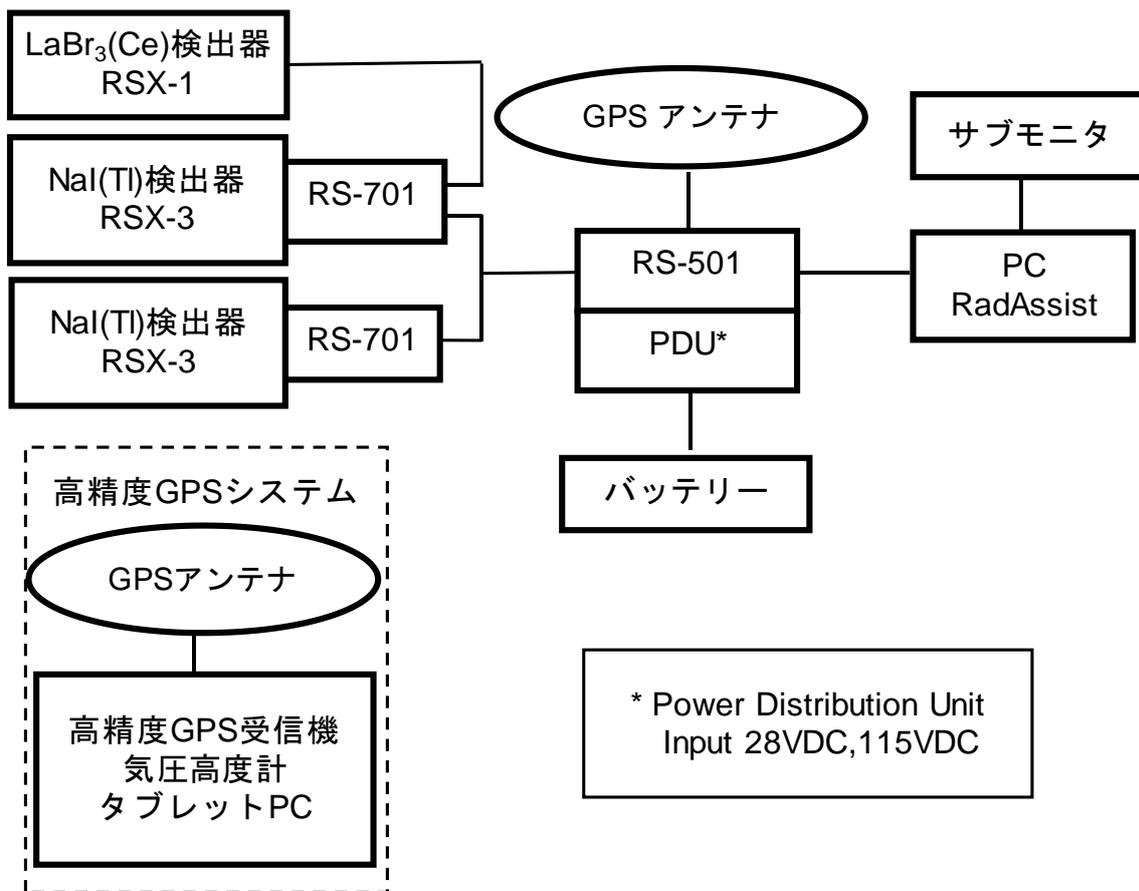


Fig. 3-1 RSI システムのブロック図

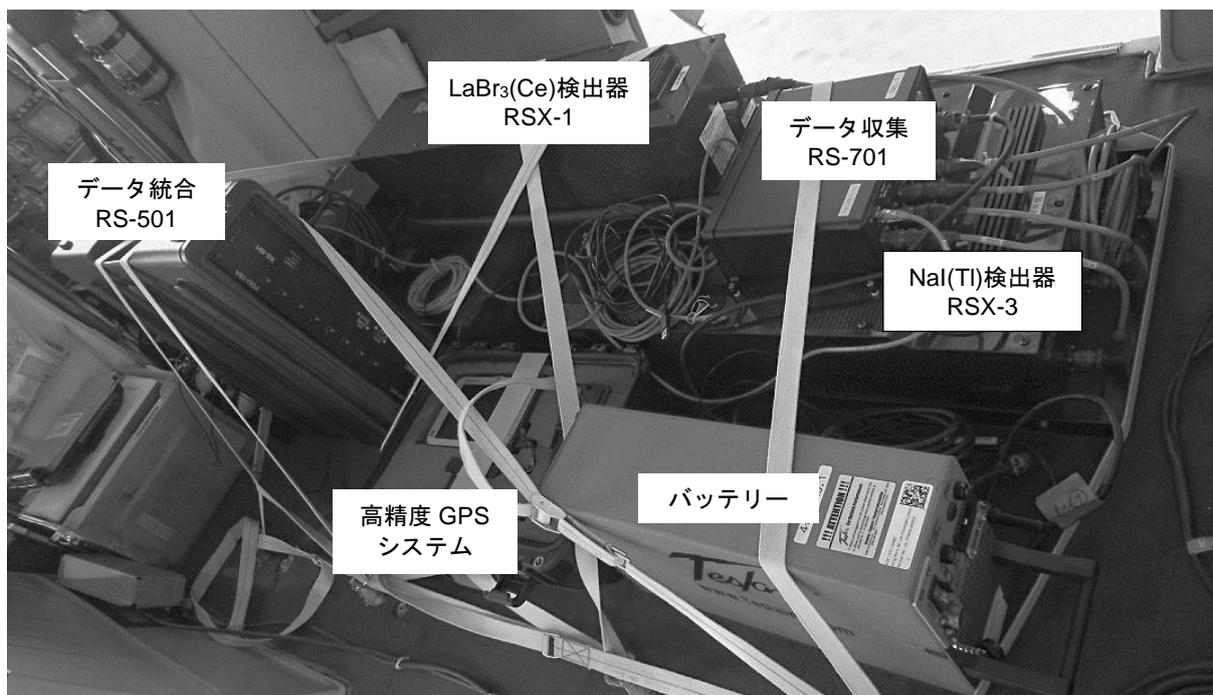
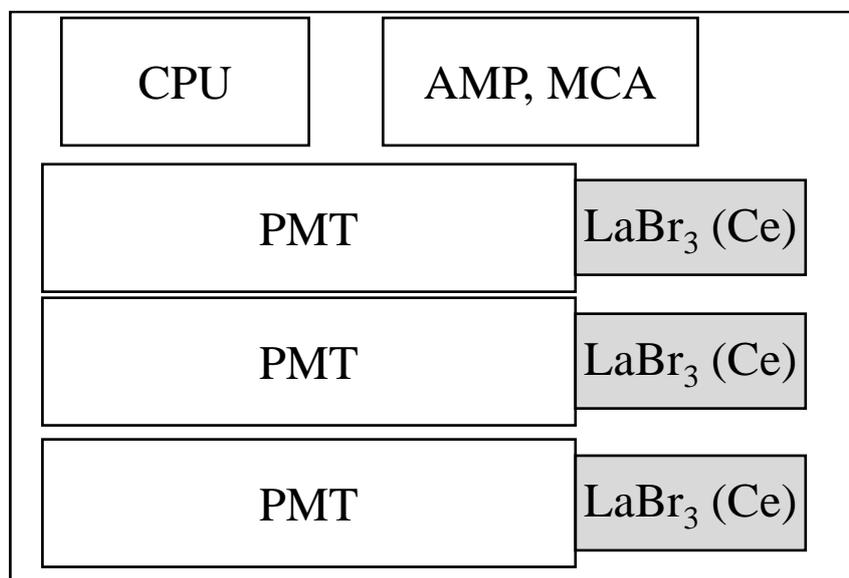


Fig. 3-2 RSI システムの外観

3.1.2.無人ヘリコプター

無人ヘリモニタリングシステムの検出器の構成及び本システムのブロック図をそれぞれ、Fig. 3-3 及び Fig. 3-4 に示す。本システムでは γ 線測定のため、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器 (結晶サイズ: $1.5''\phi \times 1.5'' \text{H}$) を 3 本 (検出部容量合計: 0.13 L) 使用しており、位置情報の取得には、単独測位よりも測位精度に優れている相対測位方式に対応した Differential GPS (以下、DGPS) を用いている。 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器で取得した γ 線スペクトル 1,024 ch (0 ch~1023 ch) 及び計数率は DGPS による位置情報と紐付けられ、本システムに備えられているメモリに 1 秒ごとに保存される。メモリに保存されたデータは USB メモリで CSV ファイルとして回収できる。また、本システムは無人ヘリのバッテリーで駆動している。全計数率のデータと DGPS の位置情報はリアルタイムに基地局のパソコンに衛星通信により伝送した。



$\text{LaBr}_3(\text{Ce}): 1.5''\phi \times 1.5'' \text{H} \times 3 \text{ set} = 0.13\text{L}$

Fig. 3-3 無人ヘリモニタリングシステムの検出器の構成

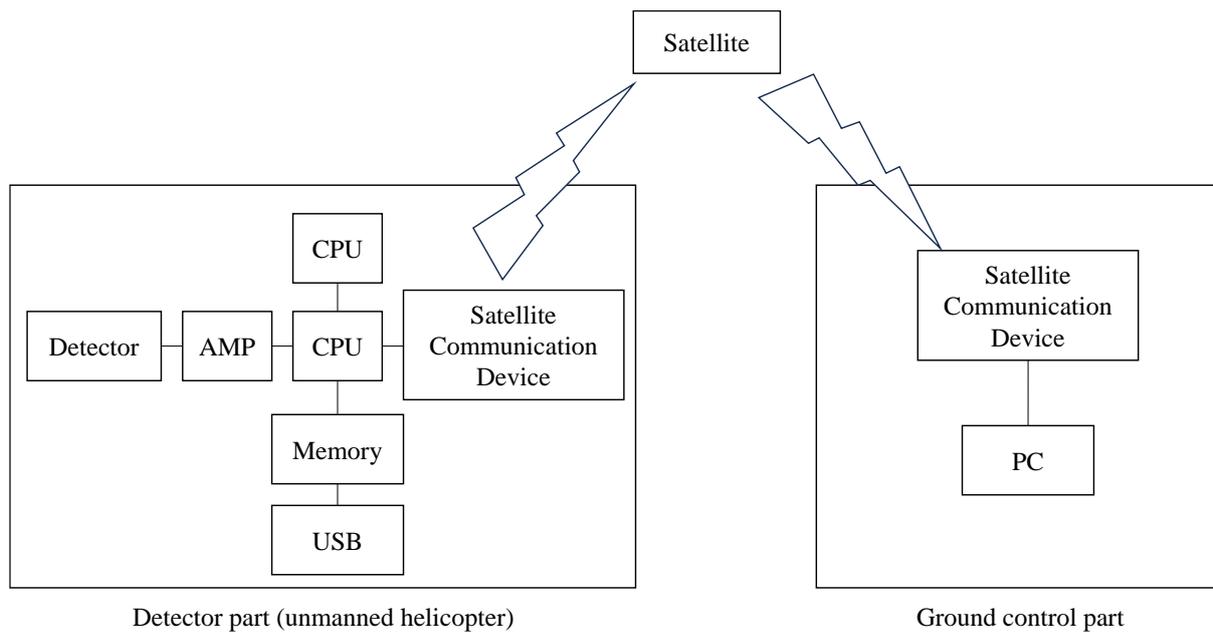


Fig. 3-4 無人ヘリモニタリングシステムのブロック図

3.2. ヘリコプター

3.2.1. 有人ヘリコプター

RSI システムは有人ヘリコプター機内に搭載するタイプであるため、ヘリコプターの機底に燃料タンクがある場合、燃料タンクの材料及び燃料による γ 線の遮へい効果を考慮する必要がある。そこで、 γ 線の測定値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. 3-5 に示す。また、2012 年以降の航空機モニタリングで使用した機種 (機体番号) と RSI システムの組み合わせを Table 3-1 に示す。2023 年度 (令和 5 年度) は機体繰りの都合から、Bell412 (JA412N)、Bell430 (JA05TV 及び JA02AX) 及び S-76 (JA6901) を使用した。



Bell430
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



Bell412
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



AS332
アエロスパシアル社製



S-76
シコルスキー・エアクラフト社製

Fig. 3-5 機底に燃料タンクのないヘリコプター機種一覧

Table 3-1 搭載した RSI システムと有人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システムと有人ヘリコプター機種(機体番号)の組み合わせ			
			RSI 1	RSI 2	RSI 3	RSI 4
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 (JA6767) NNK	Bell412 (JA6928) AAC Bell430 (JA05TV) NNK		
	東日本第4次モニタリング	2013/09/03 ～11/04	Bell430 (JA6900) AAC Bell412 (JA6767) NNK	Bell430 (JA05TV) NNK		
	第8次モニタリング	2013/11/02 ～11/19	Bell430 (JA6900) AAC	Bell430 (JA05TV) NNK		
2014	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		
	伊方発電所BGモニタリング	2016/11/29 ～12/11			Bell430 (JA05TV) NNK	
2017	泊発電所BGモニタリング	2017/07/24 ～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 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 システムと有人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システムと有人ヘリコプター機種(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)	NNK	Bell412 (JA6767)	NNK
			S-76 (JA8655)	AAC	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 (JA6928)	AAC
			Bell412 (JA6767)	NNK		
	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)	
			Bell412 (JA6767)	NNK		
	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
2023	川内BGモニタリング(前期)	2023/07/25 ~07/28			Bell430 (JA02AX)	AAC
	第18次モニタリング	2022/09/07 ~09/29	Bell430 (JA05TV)	NNK	S-76 (JA6901)	AAC
	東日本第14次モニタリング	2023/09/20 ~10/18	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell430 (JA02AX)	AAC
					Bell412 (JA412N)	NNK
	川内BGモニタリング(後期)	2023/11/12 ~11/15			Bell412 (JA6929)	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

3.2.2.無人ヘリコプター

浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5km圏内無人ヘリモニタリングでは、3.1.2項に示した無人ヘリモニタリングシステムを搭載したヤマハ発動機(株)自動航行型無人ヘリFAZER R G2を使用した(Fig. 3-6)。

原子力機構では、東電福島原子力発電所事故直後から無人ヘリを用いた放射線分布の測定手法についての研究開発を行っている。原子力機構による無人ヘリを用いた空間線量率測定の結果としては、除染前後のモニタリング⁴⁰⁾、東電福島原子力発電所周辺のモニタリング⁴¹⁾及び河川敷のモニタリング⁴²⁾などが挙げられる。このように、国内において放射線分布の測定での運用実績が豊富であり、いずれの例でも事故がなく信頼性が高い機体である。



Fig. 3-6 無人ヘリモニタリングシステムを搭載した FAZER R G2

3.3. 有人ヘリコプター機体による γ 線遮へい効果

有人ヘリは機底に燃料タンクのない機種を選定しているが、機種による機底の材質や構造の差異により、 γ 線の遮へいの程度は異なると考えられる。本節では、 γ 線遮へい効果を把握するために点線源 (Cs-137：約 9.3 MBq) を用いて RSI システム検出器で測定した計数率を比較した。地上における空間線量率等への換算パラメータを設定する際に、有人ヘリ機種ごとにキャリブレーション (校正) を実施するため、この遮へい効果の違いを単独でパラメータとして扱う必要はないが、使用する有人ヘリが γ 線計数率にどのような影響を及ぼし、それが有人ヘリ機種ごとに設定する換算パラメータにどのような差異を生むのかを把握するのに参考となる情報である。

有人ヘリ機体の遮へい効果の比較結果を 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、S-76 (JA6901) 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 まで話すことができなかつたため、点線源と検出器の距離を 16 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. 3-7 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 S-76 (JA6901) における計数率 (No.2 と表記)、Bell430 (JA02AX) 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 61%、No.3 の計数率は約 7%、No.4 の計数率は約 11% 高かった。No.2 は点線源と RSI システム検出器の距離が 50 cm でなく 16 cm であるため、計数率が顕著に高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.3、No.4 で見られた差異には、Bell430 と Bell412 の機体底部の構造の違いに起因する γ 線遮へい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.1 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へい効果の比較
 (検出器から 50 cm または 16 cm 下方に線源を配置)

No.	Date	System	有人ヘリコプター (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	2023/09/05	RSI 1	Bell430 (JA05TV) (NNK)	50	$(3.211 \pm 0.006) \times 10^5$	1.00
2	2023/09/05	RSI 2	S-76 (JA6901) (AAC)	16	$(5.158 \pm 0.007) \times 10^5$	1.61
3	2023/09/23	RSI 2	Bell430 (JA02AX) (AAC)	50	$(3.422 \pm 0.006) \times 10^5$	1.07
4	2023/09/28	RSI 2	Bell412 (JA412N) (NNK)	50	$(3.572 \pm 0.006) \times 10^5$	1.11

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社
 ※計数率は小数点4桁目で四捨五入し、小数点3桁で表記した。
 ※計数率は自然放射性核種による寄与を差し引いたものである。

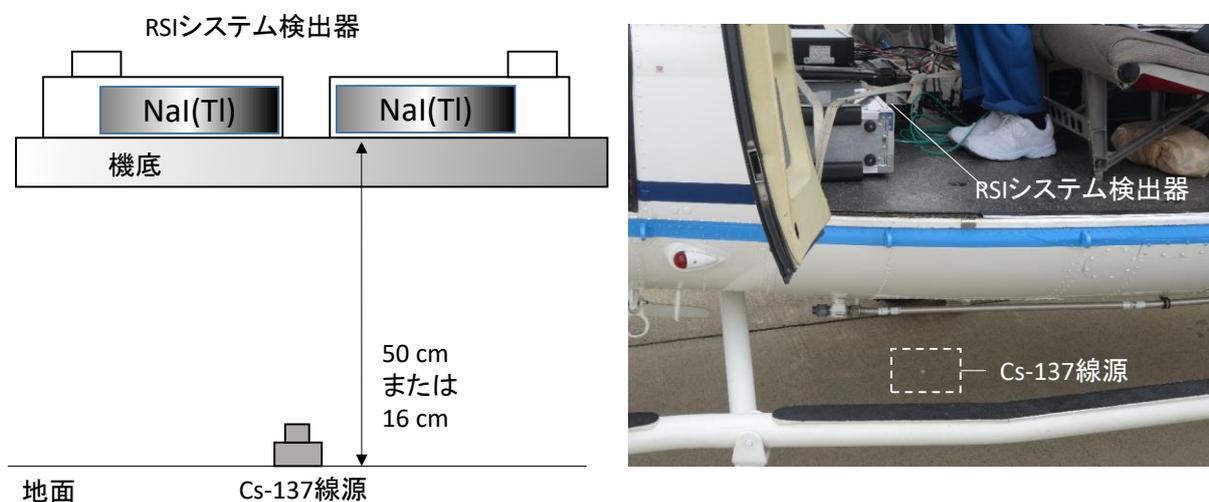


Fig. 3-7 線源試験イメージ

3.4. 測定システムの保守

3.4.1.RSI システムの保守

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

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

2,614 keV のピークに対するエネルギー分解能については、メーカーから 6%以下という保守の推奨値が示されている。日常の点検で数値を確認し、この推奨値を超えた場合には高圧電源の電圧を変更するなど再調整を実施する。また、アンプのゲインについては、同様にメーカーから示されている推奨値である 0.8 を下回る場合に高圧電源の電圧の再調整を行う。第 18 次モニタリング及び東日本第 14 次モニタリングの実施期間における RSI システム検出器のエネルギー分解能とアンプのゲインの推移について Fig. 3-8 及び Fig. 3-9 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、測定日が夏期から秋期に移り変わり、周囲の気温が低下するにつれて RSI システム自体の温度上昇も鈍くなることで、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。

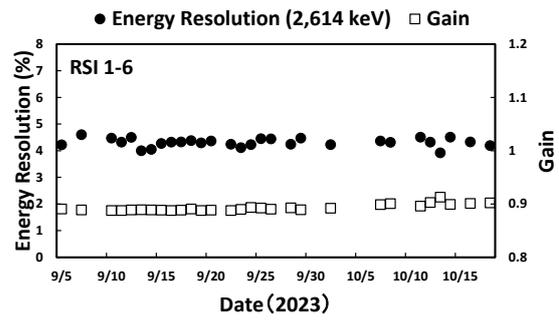
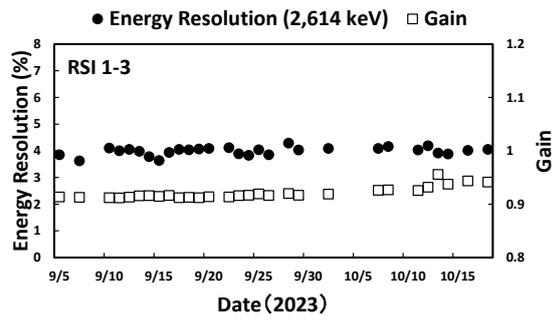
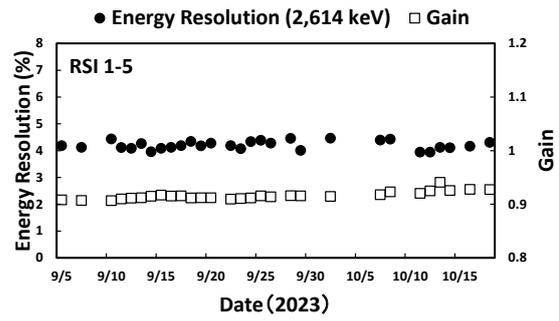
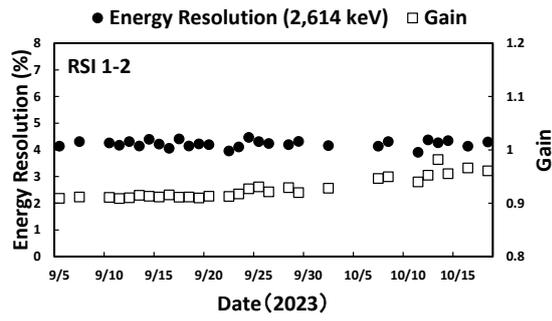
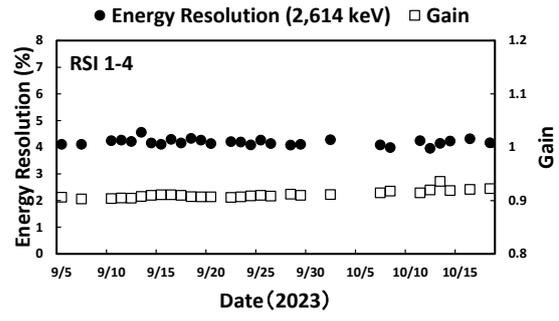
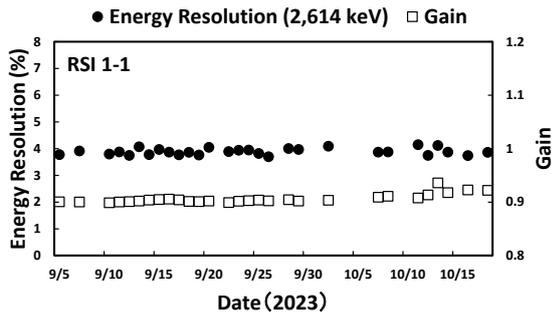


Fig. 3-8 RSI システムのエネルギー分解能及び Gain の変動 (RSI 1)

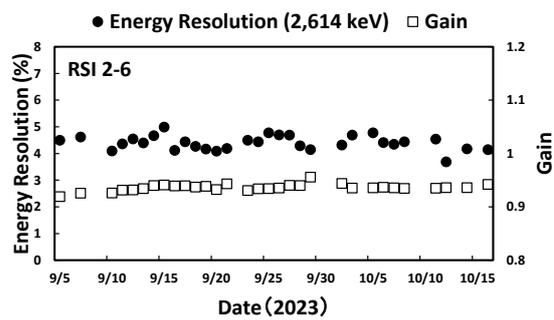
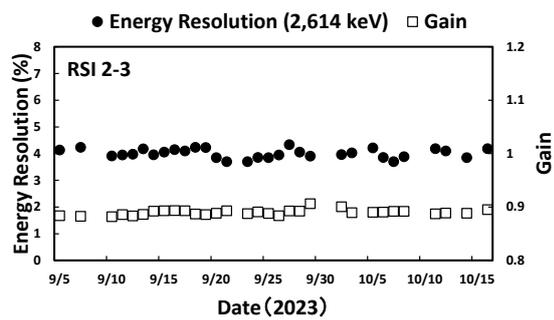
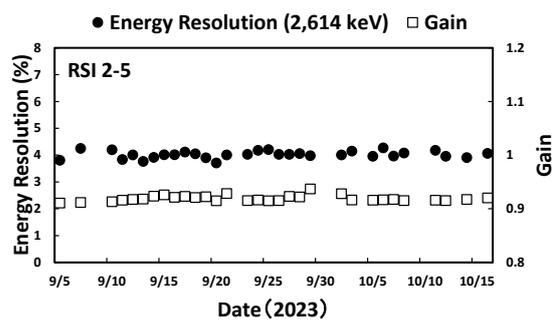
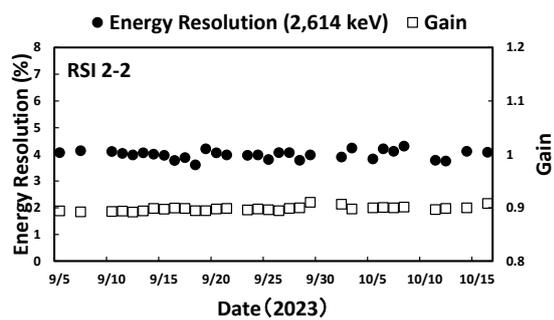
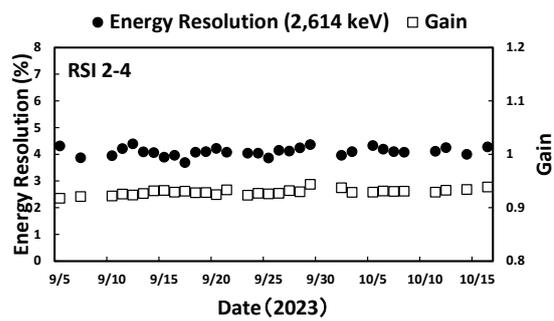
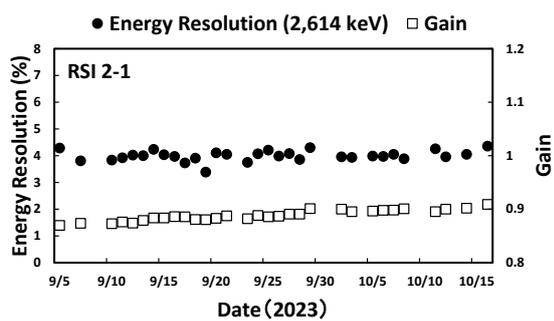


Fig. 3-9 RSI システムのエネルギー分解能及び Gain の変動 (RSI 2)

3.4.2.無人ヘリモニタリングシステムの保守

無人ヘリモニタリングシステムの健全性をチェックするため、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングの期間中、1日1回、以下の事項を確認した。

- ・外観点検：目視による外観点検、触診によるネジの緩み、ケーブル及びコネクタの接続状況の確認を行い、検出器に傷、凹み及び汚れがないこと、ネジに緩みが無いこと、ケーブル及びコネクタの接続状態に異常が無いこと。
- ・基本動作確認：測定データがメモリに正常な状態で保管されること、DGPS 測位情報に明らかな異常がないこと、データがダウンリンクされ、基地局のディスプレイに表示されること。
- ・検出器の特性確認：解析システムにより、取得したスペクトルを確認し、Cs-137 光電ピークエネルギー (662 keV) の位置に変動がないこと。

また、定期保守の一環で1年に1回以下の事項を確認した。

- ・検出器の特性確認：試験用標準線源 (Cs-137) を基に、正味の計数率とエネルギー分解能を昨年度の結果と比較評価し、顕著な変化がないこと。

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 線の遮へい計算に広く用いられている点減衰核積分コード QAD-CGGP2R を用いてシミュレーションが行われた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 EGS5⁴⁴⁾ (Electron Gamma Shower Version 5) が使用され、RSI システムの検出器がモデル化³⁴⁾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、有人ヘリモニタリングの基準高度である 300 m から計測した場合、線源の概ね半径 300 m の円内の放射線の計数が 80% 以上の割合を占めることが分かる。また、検出器の位置から同軸上の線源位置を中心として、100 m ごとのドーナツ状の面積で分割し、その部分の放射線が検出器で計数された割合を Fig. 4-3 に示す。線源からの距離は 100 m、300 m、500 m の場合で比較され、高度 300 m の場合を見ると、100 m ~ 200 m の位置が 30% で最も割合が大きく、0 m ~ 100 m 及び 200 m ~ 300 m は 20% 程度であった。この割合の違いは計数効率を考慮すると小さくなく、対地高度 300 m から測定されるのは、地上の半径 300 m 円内における γ 線計数率の平均値と考えられる。一方、検出器と線源の距離が 50 m の場合は 80% を占める線源半径は 120 m、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。無人ヘリモニタリングでも同様に、基準高度である 80 m から計測した場合、線源の概ね半径 80 m の円内の放射線の計数が大部分を占めることが分かっている⁴⁰⁾。

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

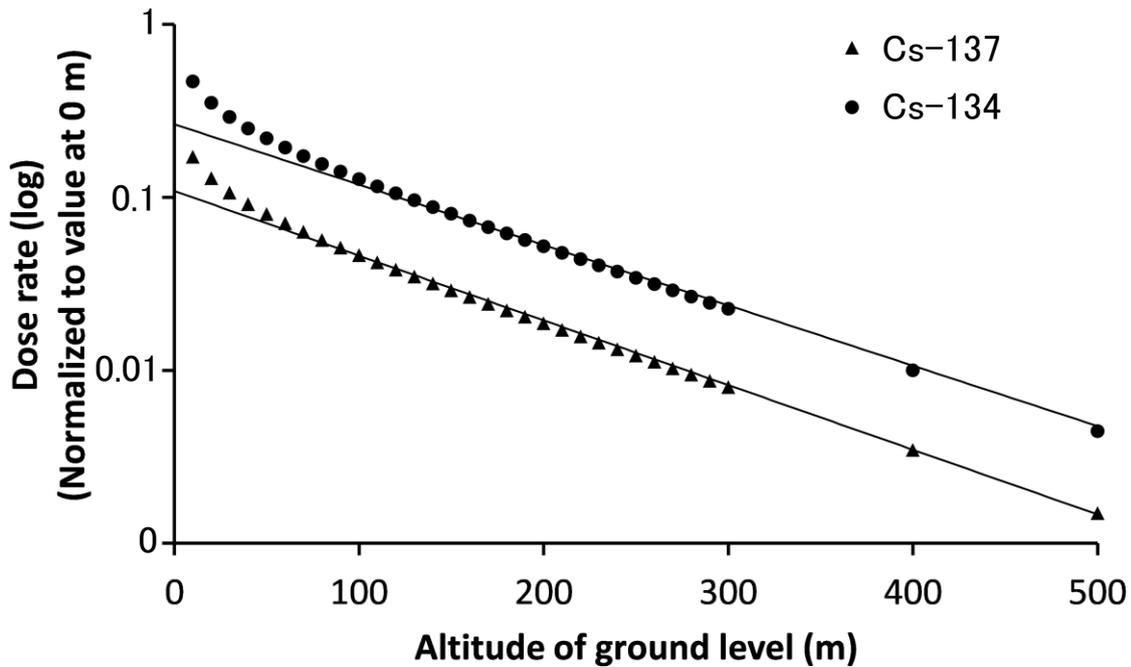


Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係¹⁷⁾

(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。)

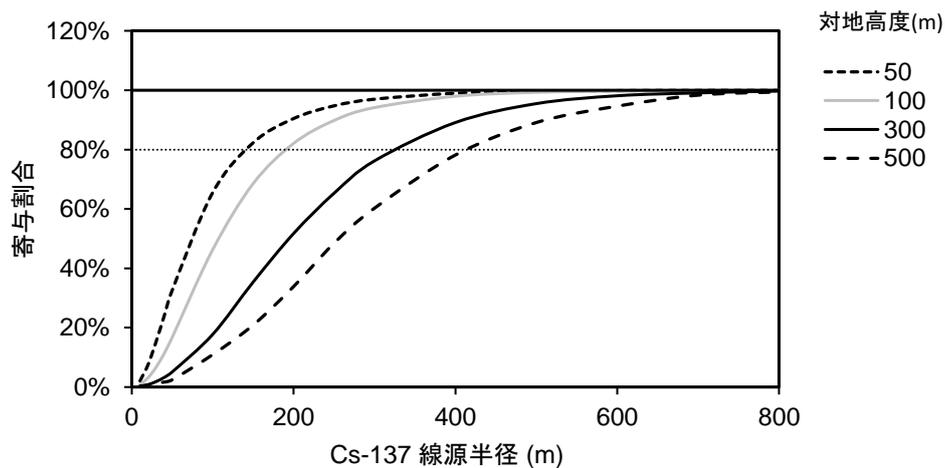


Fig. 4-2 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の積算計数に対する線源位置の関係¹⁷⁾
 (上空での検出器の計数率を100%に規格化し、線源半径由来の計数率の割合を積算)

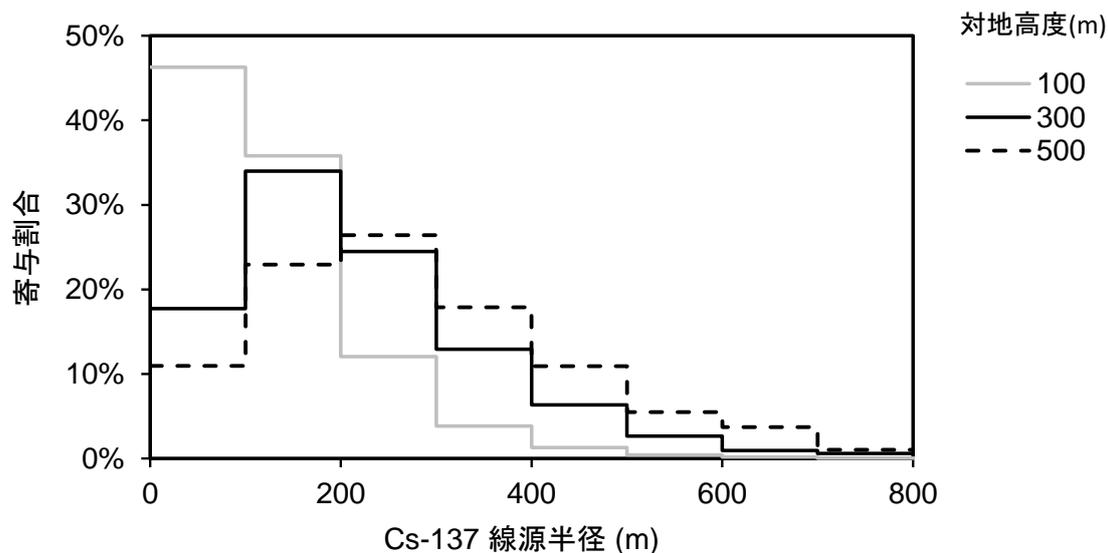


Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の線源位置ごとの計数の割合¹⁷⁾
 (上空での検出器の計数率を100%に規格化し、100 m ごとのドーナツ状部分由来の計数率の割合)

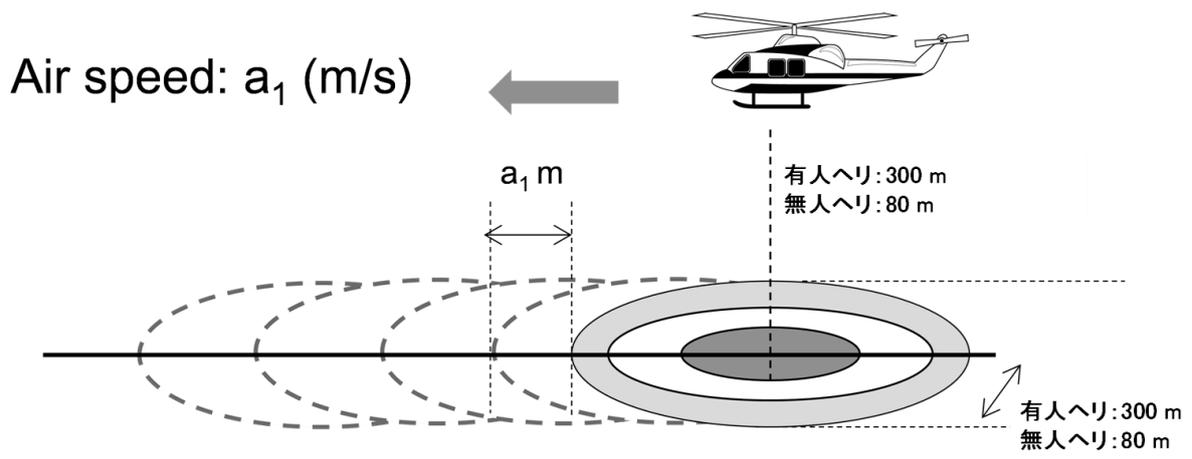


Fig. 4-4 航空機モニタリングによる上空からの測定イメージ

4.2. 有人ヘリ及び無人モニタリング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。以下に有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングによるデータ取得方法の詳細について記述する。

有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングによるデータは、下記のようなフライト条件で取得した。なお、条件は、気象条件や地形の高度勾配によって若干変化する。フライトイメージを Fig. 4-5 に示す。また、測定データは1秒ごとに、有人ヘリモニタリングではGPSの位置情報とNaI(Tl)検出器の γ 線のスペクトル、無人ヘリモニタリングではDGPSの位置情報とLaBr₃(Ce)検出器の γ 線のスペクトルをそれぞれ記録し、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、有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングの全体図を Fig. 4-6、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングの詳細を Fig. 4-7 にそれぞれ示す。測線の方向は有人ヘリ第18次モニタリングについては東西方向、東日本第14次モニタリングについては南北方向、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングについては測定エリアを網羅するようなくし形とした。

[フライト条件]

▶ 有人ヘリモニタリング

- 速度：160 km/hを基準とし、130 km/h～180 km/hの範囲
- 基準対地高度：300 m (= 1,000 ft)
- 対地高度の許容範囲：0 m～約500 m (= 1,750 ft)
- 測線間隔
 - 第18次モニタリング(東電福島原子力発電所から半径5 km以内及び海上を除く)
 - 0.9 km：2018年(平成30年)11月15日時点で0.2 μ Sv/h(約1.0 mSv/年 相当、5.2節に詳述する。)以上であった地域
 - 1.8 km：その他の地域
 - 東日本第14次モニタリング
 - 3.0 km：2018年(平成30年)11月15日時点で0.2 μ Sv/h以上であった地域
 - 6.0 km：その他の地域

▶ 無人ヘリモニタリング

- 速度：8 m/s (= 28.8 km/h)を基準とし、25 km/h～40 km/hの範囲
- 基準対地高度：80 m (= 260 ft)
- 対地高度の許容範囲：0 m～約150 m (= 490 ft)
- 測線間隔
 - 浜通り第1次無人ヘリモニタリング
 - 0.6 km：全域
 - 第15回5 km圏内無人ヘリモニタリング
 - 0.08 km：全域

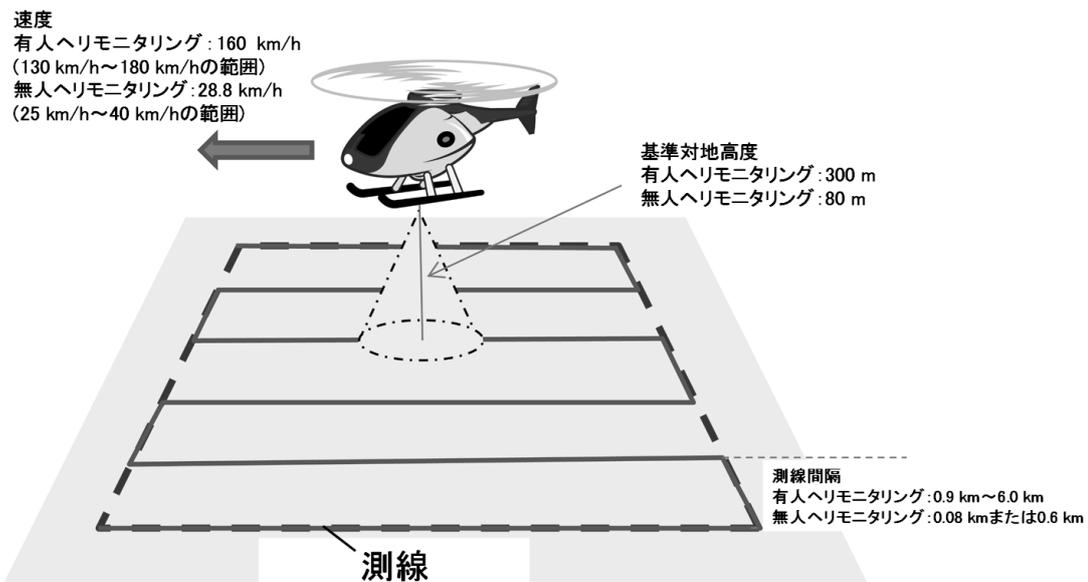


Fig. 4-5 航空機モニタリングのフライトイメージ

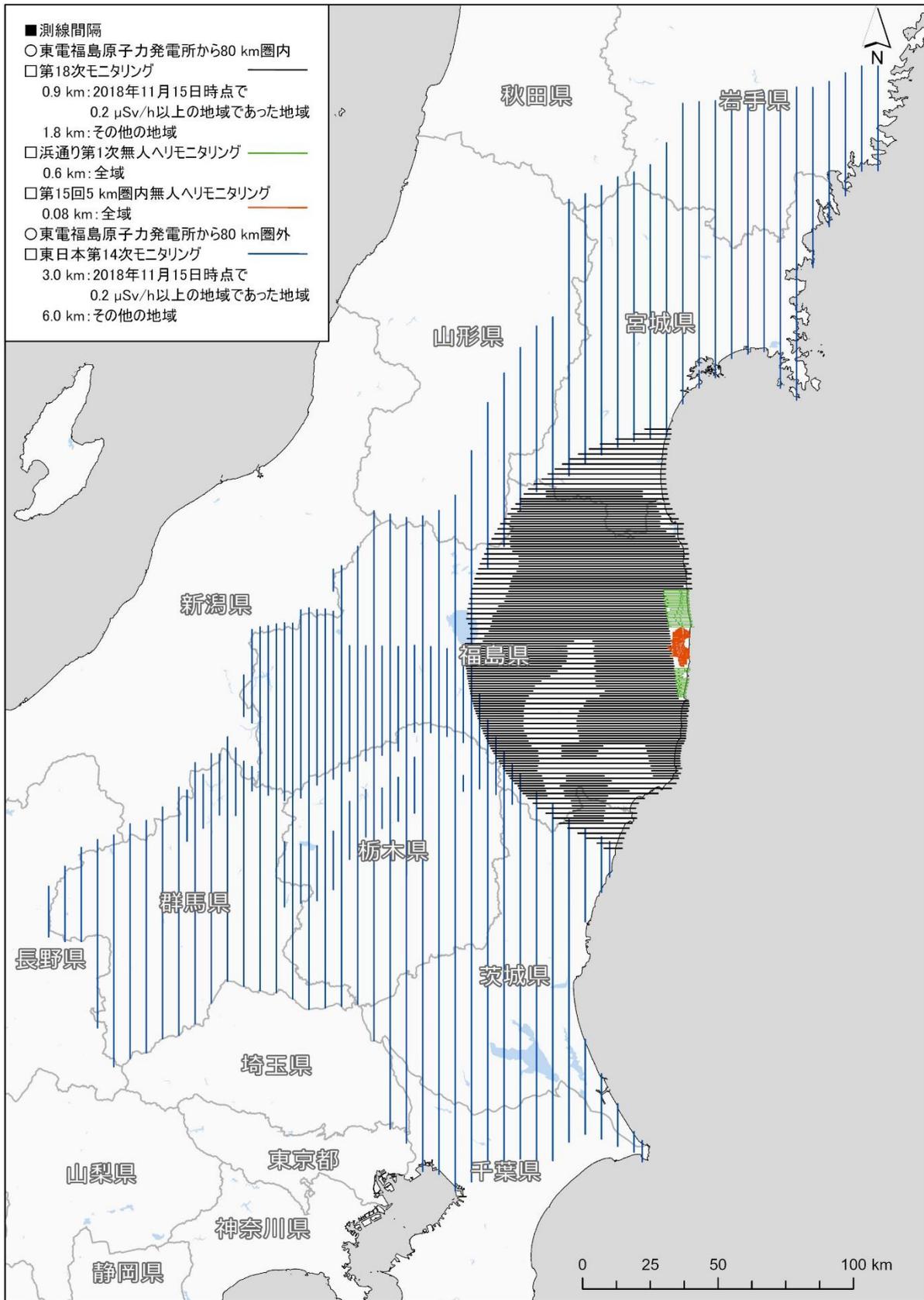


Fig. 4-6 航空機モニタリングにおけるフライトの測線
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

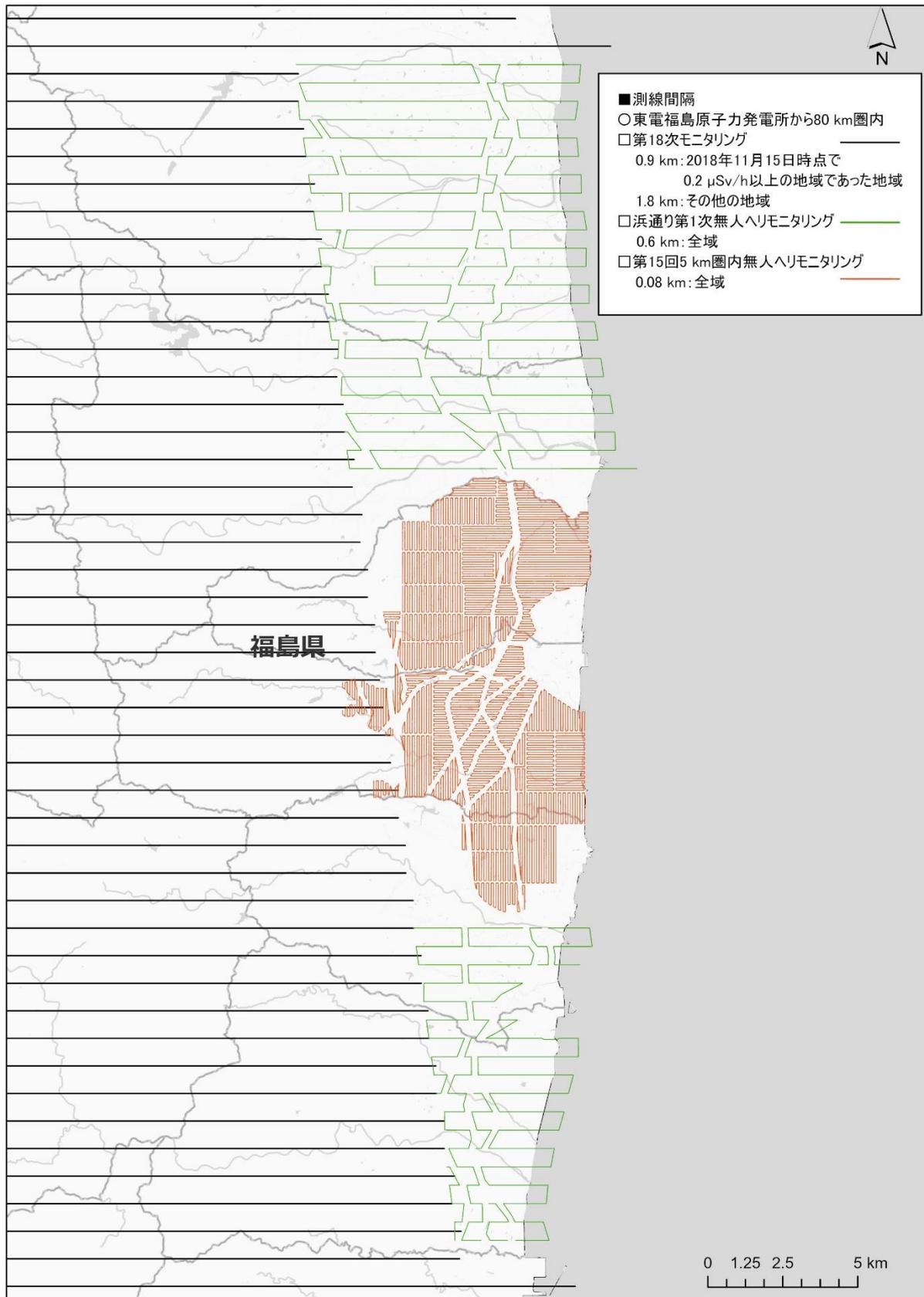


Fig. 4-7 浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおけるフライトの測線の詳細

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

4.3.1. 有人ヘリコプター

有人ヘリモニタリングにより上空で取得した γ 線計数率を、地表面から1 mの高さの空間線量率や地表面の放射性Csの沈着量に換算するためのパラメータは、ヘリコプター機種または機体ごとに数値を設定している。Bell412、Bell430 (JA02AXを除く)及びS-76については2014年度(平成26年度)までに取得したキャリブレーションフライトのデータを基に設定されている。ただし、Bell430 (JA02AX)については、2021年度(令和3年度)に東電福島原子力発電所から80 km圏内外における有人ヘリモニタリングに初めて使用され、当時取得されたパラメータが他のBell430とは異なる数値を示す傾向にあった³⁰⁾ことから、他のBell430とは独立したパラメータを設定している。今年度はBell412、Bell430及びS-76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。

- ・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. 4-8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. 4-9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(以下、テストポイント)を選定し、テストポイントから半径1,000 mの範囲内において、対地高度300 mを維持して3分間ホバリングして γ 線計数率を取得するものである。また、テストポイントの中心点から半径1,000 mの範囲内で60地点を目安にNaI(Tl)検出器(日立製作所製TCS-172B)を用いて地表面から1 mの高さの空間線量率の測定(以下、地上測定)を行う。なお、地上測定は、NaI(Tl)検出器の時定数を10秒とし、各測定地点にて地面に対して水平方向にプローブを30秒間保持してから開始した。およそ5秒間隔でサーベイメータに表示されるデジタル値を5回記録し、その平均値に校正乗数を乗じた値を小数点以下3桁目で四捨五入して小数点以下2桁とし、その地点における地上測定値として取り扱った。本フライトとテストポイントにおける地上測定値を相互比較することにより、基準対地高度(300 m)における γ 線計数率を地表面から1 mの高さの空間線量率に換算するための係数(空間線量率換算係数; Conversion factor of Dose-rate: CD ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$))が求まる。Fig. 4-10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. 4-11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. 4-12 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. 4-13 に示す。

- 天然核種フライト

東電福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs による影響のないと考えられる場所において対地高度約300 mをフライト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。なお、本年度に使用した有人ヘリ機体は、いずれも過去に使用実績があるため、本フライトは実施しなかった。天然核種フライトの場所を Fig. 4-14 (左) に示す。

- オーバーラップフライト

各ヘリコプター機種または機体に設定される換算パラメータの妥当性評価を行うために、RSI システムとヘリコプター機種または機体の組み合わせの変更が生じる前後で、同一の場所をフライトして取得した γ 線計数率データを比較するものである。本フライトは、他のキャリブレーションとは異なり、換算パラメータの取得が目的でなく、実際に解析に用いる換算パラメータの妥当性を検証することを目的としている。オーバーラップフライトの場所を Fig. 4-14 (中央及び右) に示す。

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	東電福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs による影響のないと考えられる場所でフライト	過去に有人ヘリ機体の使用実績がなければ 1 回
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	有人ヘリ機種または機体と RSI システムの組み合わせの変更が生じる前後で 1 回ずつ

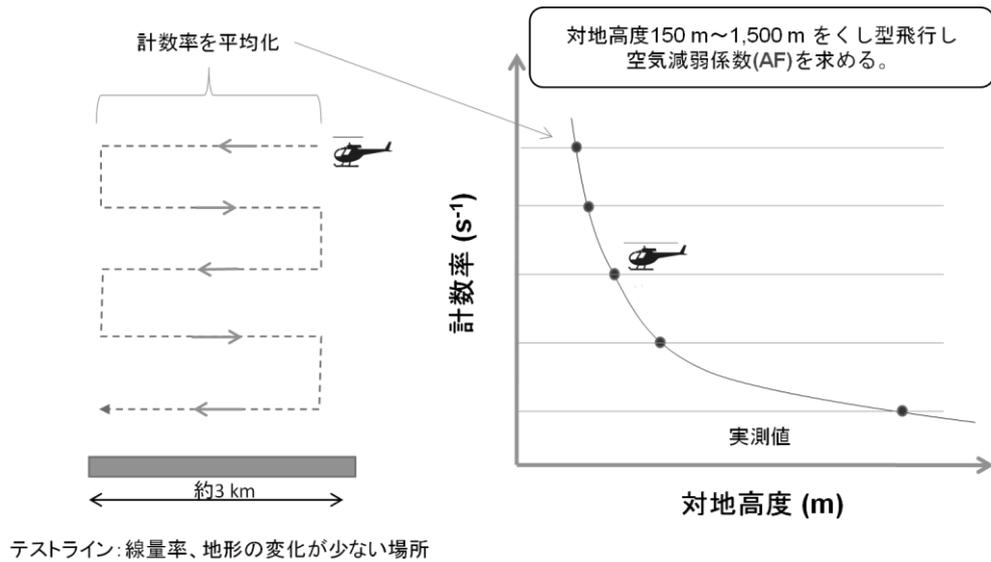


Fig. 4-8 テストラインフライトのイメージ

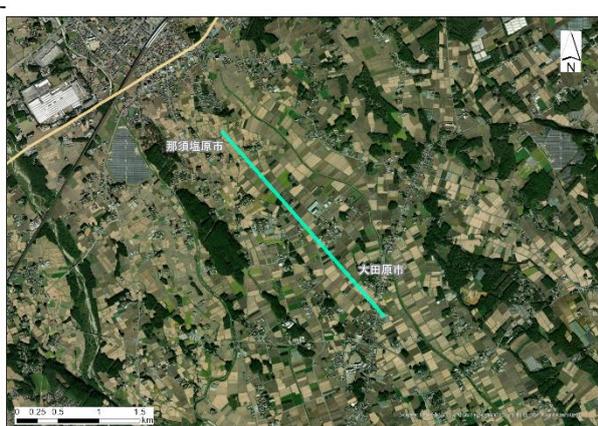
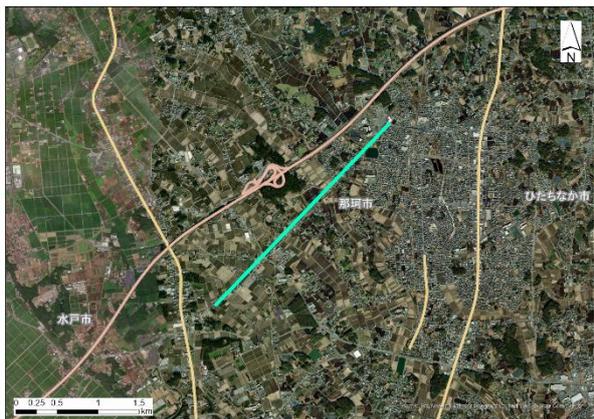
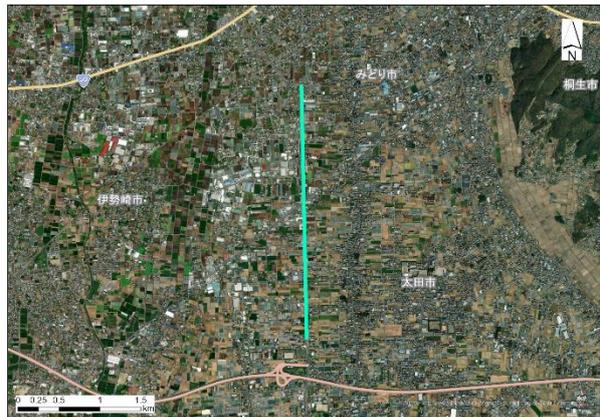


Fig. 4-9 テストラインの場所

(1/2)

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

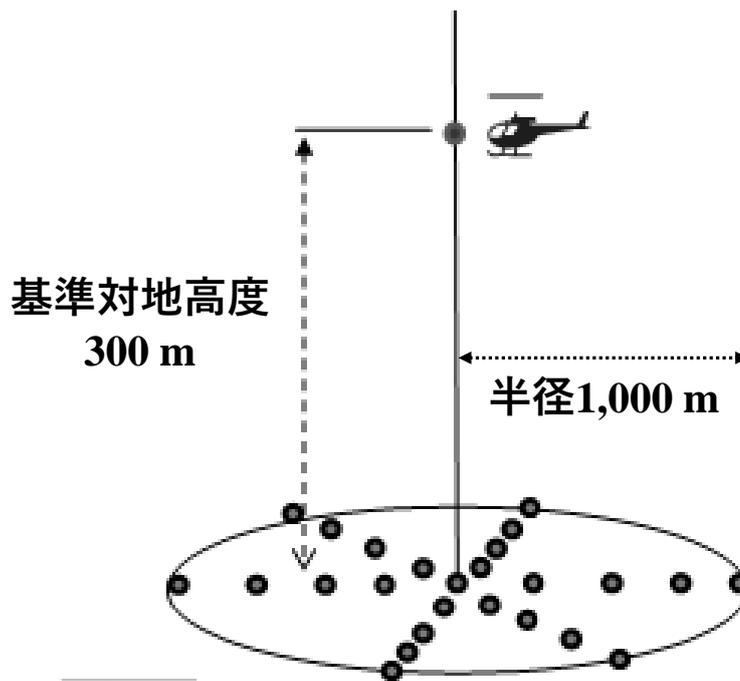


TestLine A (福島県須賀川市)

Fig. 4-9 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。)



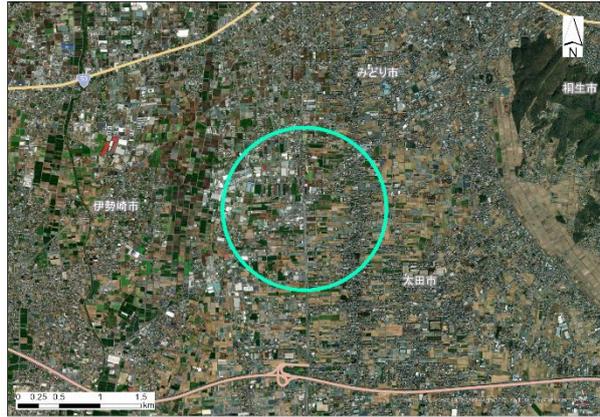
60地点を目安に地表面から1 mの高さの空間線量率($\mu\text{Sv/h}$)を測定する。

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. 4-10 テストポイントフライトのイメージ



TestPoint 1 (岩手県奥州市)



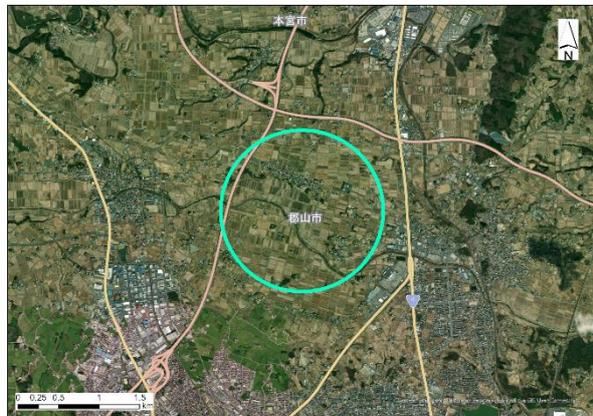
TestPoint 3 (群馬県みどり市)



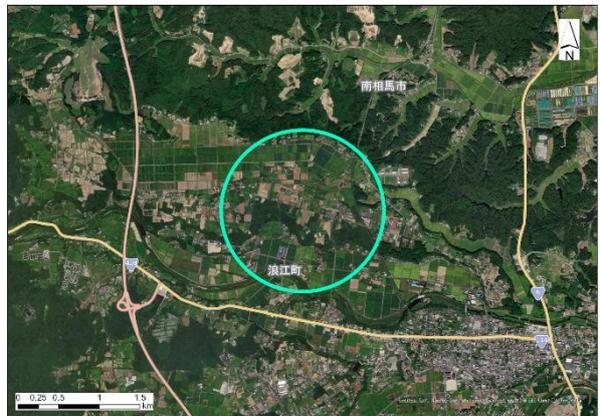
TestPoint 4 (茨城県那珂市)



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. 4-11 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。)

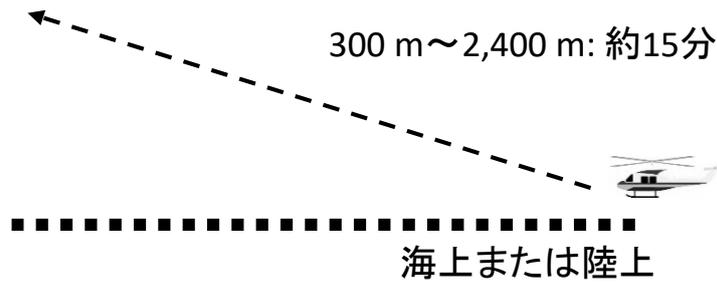


Fig. 4-12 宇宙線フライトのイメージ

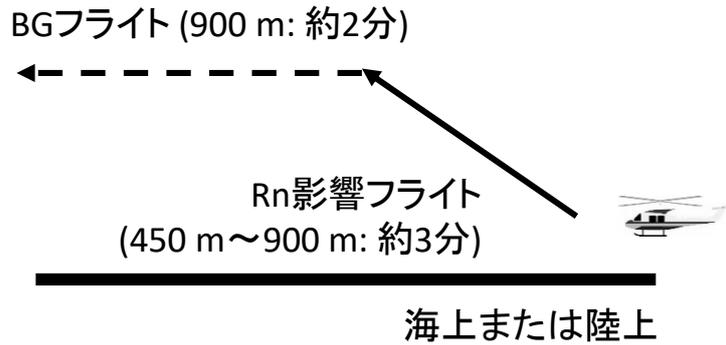
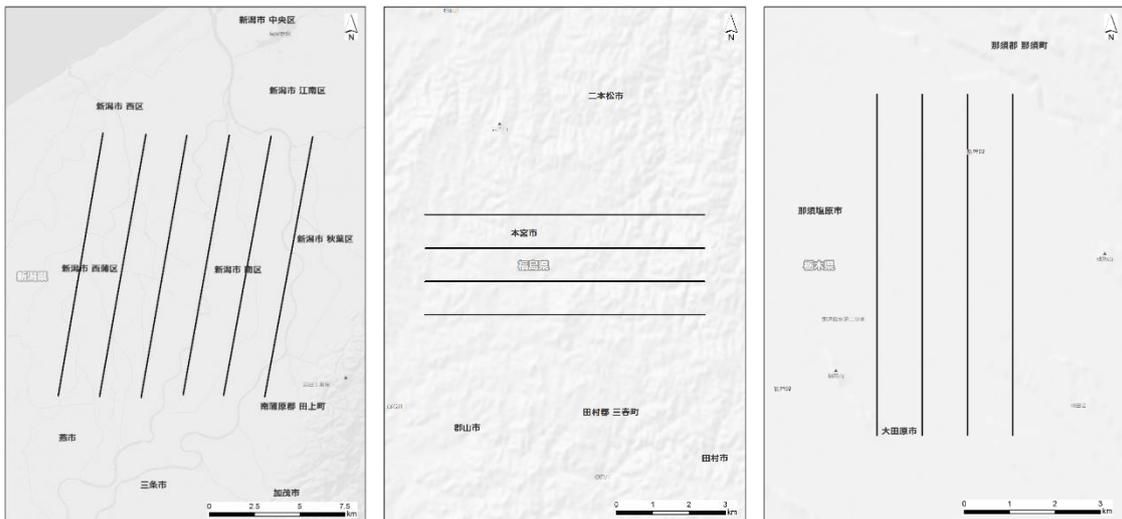


Fig. 4-13 Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージ



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

4.3.2.無人ヘリコプター

無人ヘリモニタリングにより上空で取得した γ 線計数率を、地表面から1 mの高さの空間線量率や地表面の放射性Csの沈着量に換算するためのパラメータについては、東電福島原子力発電所から第15回5 km圏内無人ヘリモニタリング(本事業とは別事業)において、2018年度(平成30年度)から2019年度(令和元年度)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決定する方針としている。しかしながら、一連のキャリブレーションフライトデータを取得した上記のエリアと浜通り第1次無人ヘリモニタリングの測定対象エリアとでは空間線量率が大きく異なるため、換算パラメータを流用するのは適切でない可能性がある。そこで、換算パラメータの設定値の妥当性を検証するために、浜通り第1次無人ヘリモニタリングのエリア内でキャリブレーションフライトを行った。キャリブレーションフライトは、空間線量率の勾配が小さく、かつ地形の平坦な半径100 mの区域内(以下、テストサイト)で実施した。無人ヘリモニタリングにおけるキャリブレーションフライトの詳細を以下に示す。ただし、無人ヘリモニタリングでは宇宙線に起因する2,800 keV以上の γ 線はほとんど計数されないため、宇宙線による影響は無視できるものと見なし、宇宙線フライトはキャリブレーションフライトから除外した。なお、近年では除染等の影響で空間線量率の分布が一様な場所が少なくなったことにより、テストサイトの選定に難航しており、テストサイトの選定条件の見直しを検討することが望ましい。

- ・テストサイトプルアップ

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

- ・テストサイトホバリング

有人ヘリモニタリングと同様の目的で空間線量率換算係数 CD を取得するために実施する。まず、テストサイト内で予め歩行型放射線量自動計測システム⁴⁵⁾(以下、KURAMA-II)を用いて、地表面から1 mの高さの空間線量率を取得する。この内、ホバリング地点の中心座標から半径80 m内の空間線量率の平均値を算出した。対地高度1 mの推定計数率を空間線量率の平均値で除することで CD ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$)を算出する。

4.4. 解析のフロー

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

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

第18次モニタリング、東日本第14次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5km圏内無人ヘリモニタリングでは、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。ただし、4.3.2項で記載した通り、無人ヘリモニタリングでは②は無視できる。これらを考慮した解析のフローをFig. 4-15に示す。本報告では、本フロー図に則った解析方法を「標準的解析手法」と呼称する。なお、本節以降の空間線量率とは、周辺線量当量率(1cm線量当量率)を意味する。

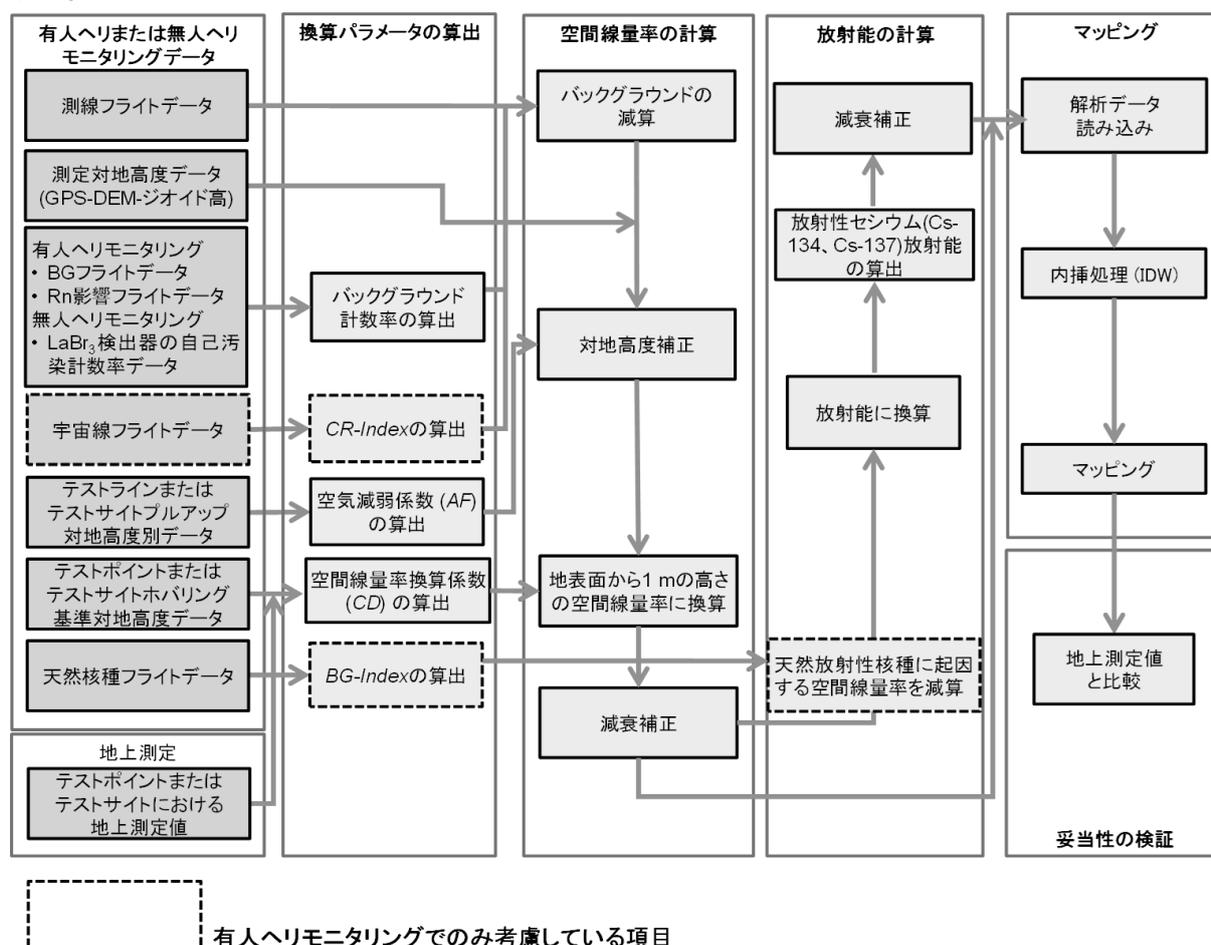


Fig. 4-15 解析のフロー

4.5. 空間線量率への換算方法

航空機モニタリングにより上空で取得した γ 線計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率 (D) へ換算する手順は、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、前節で挙げたバックグラウンドの内、天然放射性核種からの γ 線計数率 (C_{nat})、宇宙線及びその他 (有人ヘリモニタリングの場合は空气中ラドン子孫核種や有人ヘリ機体に起因するバックグラウンド計数率、無人ヘリモニタリングの場合は $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の自己汚染に起因する計数率を含む。) に起因する計数率 (C_{cos} 及び C_{self}) を減算する。
- ② 対地高度補正：実際のフライト高度と基準高度とのずれにより生じる、 γ 線計数率の多寡を高度補正係数 (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。

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

ここで、

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

C_{all} : 全計数率 (s^{-1})

C_{nat} : 天然放射性核種からの γ 線 (s^{-1})

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

C_{self} :

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

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

HF : 対地高度補正係数 (m^{-1})

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

である。

C_{nat} の算出方法については次節に記す「放射性 Cs の沈着量への換算方法」と密接な関係にあるため、4.6.1 項に詳述する。有人ヘリモニタリングにおける C_{cos} 、 C_{self} 、 HF 及び CD は 4.3.1 項に記した宇宙線フライト、BG フライト、テストラインフライト及びテストポイントフライトで取得したデータを基に求められる。無人ヘリモニタリングにおける HF 及び CD は 4.3.2 項に記したテストサイトプルアップ及びテストサイトホバリングで取得したデータを基に求められる。なお、無人ヘリモニタリングにおける C_{self} は海上において海拔高度 50 m～140 m のデータを取得することによって求めた。これら空間線量率の算出に関わる項や係数の詳細について以下に述べる。

4.5.1.バックグラウンド減算 (宇宙線及びその他)

有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングにおいて、天然放射性核種からの γ 線、宇宙線 (有人ヘリモニタリングでのみ考慮) 及びその他 (有人ヘリモニタリングの場合は空气中ラドン子孫核種、有人ヘリ機体のバックグラウンド計数率、無人ヘリモニタリングの場合は $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の自己汚染に起因する計数率を含む。) 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、有人ヘリモニタリングについては海拔高度が上昇すると宇宙線起因の計数率が上昇することが分かっている。宇宙線起因の γ 線は、RSI システムが測定している全エネルギー範囲 (30 keV~3,000 keV) で計数されており、TI-208 が放出する 2,614 keV の γ 線及びその散乱線の影響により、2,614 keV 以下の計数から宇宙線による計数を弁別することは一般に難しい。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. 4-16 に海拔高度と宇宙線の計数率の関係例³⁴⁾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、有人ヘリ機体のバックグラウンド計数率の減算については、BG フライト (地上からの放射線が届かないと考えられる対地高度約 900 m をフライト) を実施して得られた γ 線計数率を用いる。BG フライトによって陸地及び海上で取得したスペクトルの例を Fig. 4-17 に示す。このように、BG フライトで得られるスペクトルには陸地と海上とで顕著な差異はなく、対地高度を十分に取れば陸地で得られたデータでもバックグラウンドの減算に用いることが可能である。また、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_{self} の代表値として取り扱い、全計数率 C_{all} の減算に用いた。しかしながら、空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。

無人ヘリモニタリングシステムに用いられている $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器は、Cs-137 の放出する γ 線の光電ピーク (662 keV) に対し、半値幅が 1.8 keV~2.0 keV とエネルギー分解能に優れている。しかしながら、自己汚染があることが知られ、Ac-227 の子孫核種、La の放射性同位元素である La-138 が主な成分となる。Ac-227 の子孫核種は、Pb-211 および Tl-207 の β 壊変により 1,400 keV

以下の β 線が放出され、Th-227、Ra-223、Rn-219、Po-215 及び Bi-211 から α 線が放出される⁴³⁾。LaBr₃(Ce)検出器のバックグラウンドスペクトルを Fig. 4-18 に示す。2020 年 (令和 2 年) 及び 2022 年 (令和 4 年) に海上で取得したバックグラウンドスペクトルを利用して、LaBr₃(Ce)検出器の自己汚染に由来する計数率は 118.09 s⁻¹ と算出した。これは地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するうえで妨害成分となるため、浜通り第 1 次モニタリングで取得した全計数率から 118.09 s⁻¹ を差し引いた上で、空間線量率の評価に用いる方針とした。

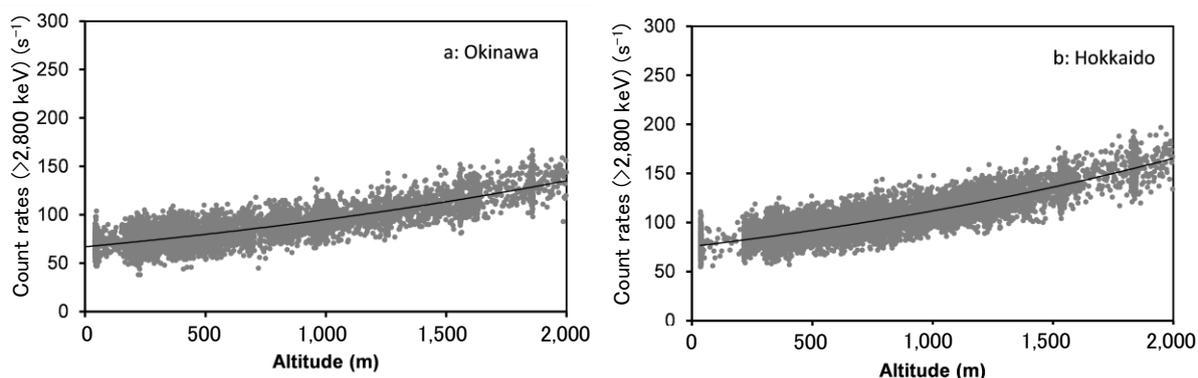


Fig. 4-16 RSI システムによる海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例³⁴⁾

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

RSI System	ヘリコプター機種 (機体番号)	運航会社	CR-Index	バックグラウンド計数率(s ⁻¹)
RSI 1	Bell430 (JA05TV)	NNK	2.93	454
	Bell412 (JA412N)	NNK	2.97	455
RSI 2	Bell430 (JA02AX)	AAC	3.82	327
	S-76 (JA6901)	AAC	3.83	390

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

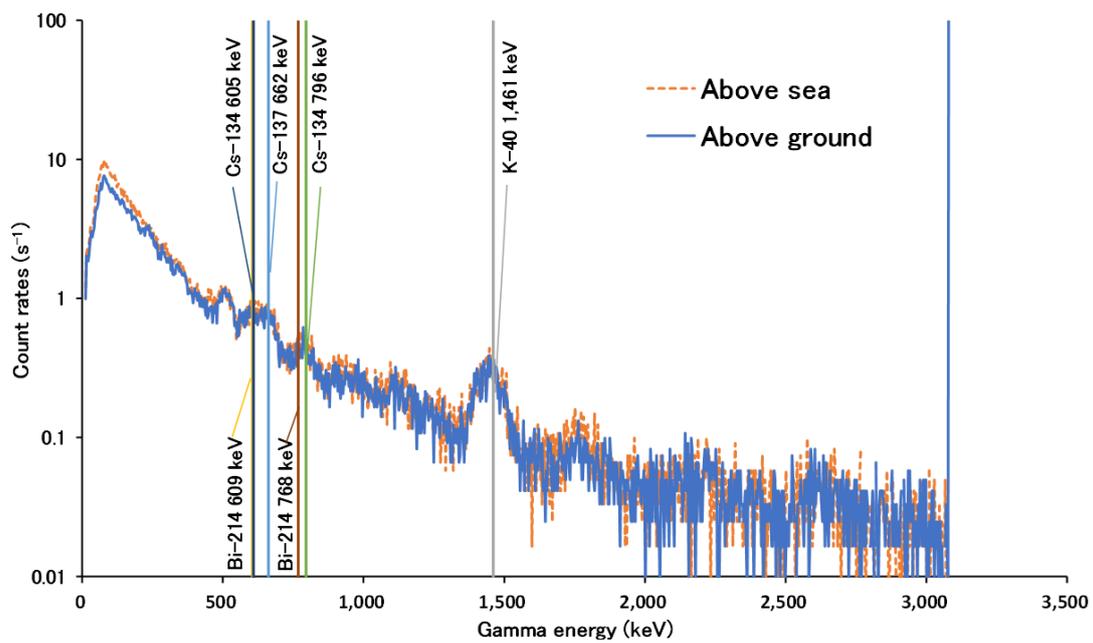


Fig. 4-17 RSI システムにより BG フライトで取得した陸上と海上での γ 線スペクトル例

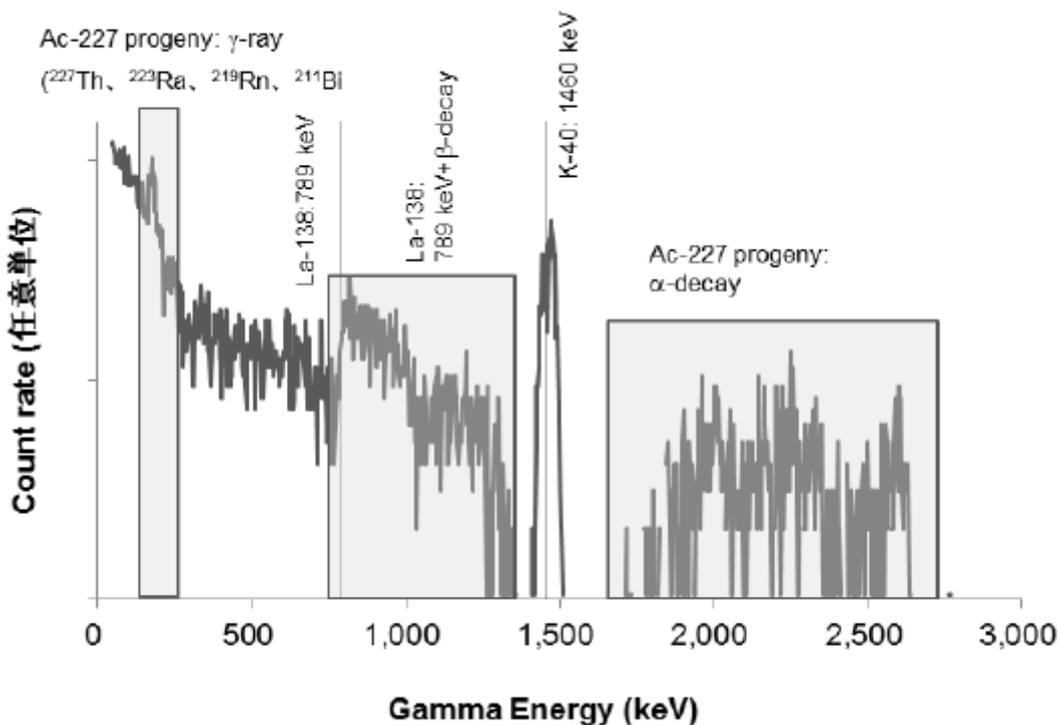


Fig. 4-18 無人ヘリモニタリングシステムにおける $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の自己汚染による γ 線スペクトル例⁴⁰⁾

(海上において海拔高度 100 m を飛行して取得したデータ)

4.5.2.対地高度補正

各測定点における対地高度と基準対地高度とのずれによって生じる γ 線計数率の多寡を補正するために、テストライン(有人ヘリモニタリング)またはテストサイトプルアップ(無人ヘリモニタリング)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、有人ヘリモニタリングについては2022年度より解析システムを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た。

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

ここで、

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

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

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

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

である。

対地高度はGPSまたはDGPS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)⁴⁶⁾及びジオイド高⁴⁶⁾を差し引いて求めた*1。

有人ヘリモニタリングにおける対地高度と計数率の関係の例³²⁾をFig. 4-19に示す。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. 4-19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. 4-19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3年度)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有人ヘリ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とその標本標準偏差(1σ)についてTable 4-3に示す。有人ヘリモニタリングに関しては4.3.1項の冒頭に述べたように、Bell412、Bell430(JA02AXを除く)及びS-76については2012年から2014年(第6次モニタリングから第9次モニ

*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。

タリング及び東日本第3次モニタリングから東日本第5次モニタリング)で取得した数値の算術平均を取って決定された。Bell430 (JA02AX)については、2021年度(令和3年度)に取得された数値の内、最も信頼性が高いと判断されたものである。今までに実施してきた東電福島原子力発電所周辺の空間線量率の評価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)。浜通り第1次無人ヘリモニタリングについては、2018年度(平成30年度)から2019年度(令和元年度)までの「放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業」(本事業とは別事業)で取得した数値と本事業で取得した数値の算術平均値を用いることとした。以上で述べた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。

有人ヘリモニタリングについて、RSIシステムの健全性及び固定パラメータを用いることの妥当性を確認するために、2023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。Table 4-3に示した固定パラメータの 1σ から外れる程に大きく算出された AF は、Bell412 (JA412N)については10月3日にTestLine 3、10月12日にTestLine 4で取得したものの、Bell430 (JA05TV)については9月12日にTestLine Aで取得したものであった。Bell430 (JA02AX)及びS-76 (JA6901)については固定パラメータと概ね同様の値であった。今年度は、今までに実施してきた東電福島原子力発電所周辺の空間線量率の評価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。浜通り第1次無人ヘリモニタリングについて、前述の別事業で取得した数値(45データ)及び本事業で取得した数値(2データ)について、テストサイトプルアップで取得した各対地高度と γ 線計数率をMicrosoft Excel®の指数近似機能によって回帰した。これらの中、回帰式の決定係数が0.99以上のデータを抽出した上で、それらの傾きの算術平均値を算出し、解析に用いる AF (-0.00733 m^{-1})とした。なお、第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングに用いる AF は「令和5年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費(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」⁴⁷⁾と同一($-0.00706 \text{ (m}^{-1}\text{)}$)とした。

以上を踏まえ、有人ヘリモニタリングについて、RSIシステムの健全性が確認でき、第18次モニタリング及び東日本第14次モニタリングで使用した全ての有人ヘリ機体に対して、固定パラメータの AF を用いることは、現状では妥当であるとした。ただし、現行の固定パラメータを過信することなく、継続して用いるか否かを都度、検討することが必要である。無人ヘリモニタリングについては、浜通り第1次無人ヘリモニタリングと第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングの AF に顕著な差異はなく、妥当な数値が得られたと思われる。

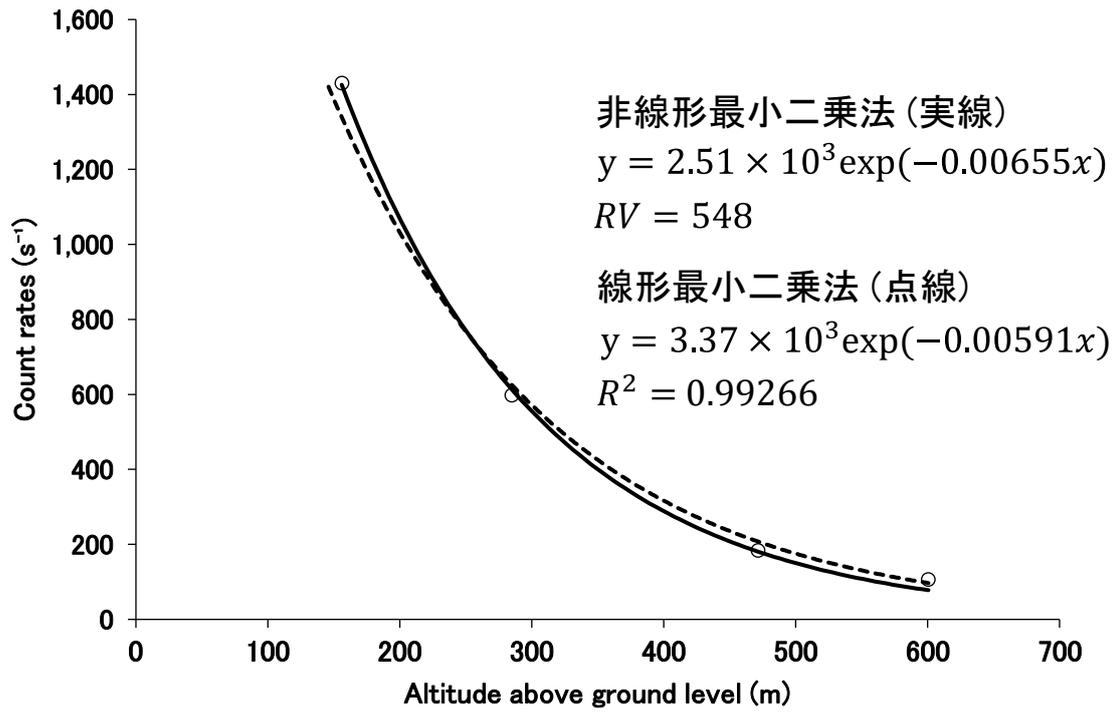


Fig. 4-19 対地高度と計数率の関係例³²⁾
 (Bell412 (JA6928)、2022年9月14日、TestLine 4にて実施)

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。)

有人ヘリモニタリング	Bell412 (JA412N)			Bell430 (JA05TV)			Bell430 (JA02AX)	S-76 (JA6901)		
	Value	SD(1σ)	Number of Data	Value	SD(1σ)	Number of Data	Value	Value	SD(1σ)	Number of Data
AF (m^{-1})	-0.00720	± 0.00042	21	-0.00720	± 0.00040	35	-0.00692	-0.00720	± 0.00052	2

※SD: 標本標準偏差

Table 4-4 2023 年度に取得した有人ヘリモニタリングの空気減弱係数 AF データ一覧

モニタリング	ヘリコプター機種 (機体番号) (運航会社)	RSIシステム	実施年日	テストライン名	非線形最小二乗法による 指数関数回帰の結果	
					AF (m ⁻¹)	RV
東日本第14次 モニタリング	Bell412 (JA412N) (NNK)	RSI 2	2023/10/03	TestLine 3	-0.00602	96
			2023/10/12	TestLine 4	-0.00633	59
			2023/10/16	TestLine 5	-0.00761	314
Average					-0.00665	
モニタリング	ヘリコプター機種 (機体番号) (運航会社)	RSIシステム	実施年日	テストライン名	非線形最小二乗法による 指数関数回帰の結果	
					AF (m ⁻¹)	RV
第18次 モニタリング	Bell430 (JA05TV) (NNK)	RSI 1	2023/09/13	TestLine A	-0.00630	7,000
			2023/09/26	TestLine A	-0.00749	1,071
東日本第14次 モニタリング			2023/10/07	TestLine 4	-0.00723	342
			2023/10/11	TestLine A	-0.00720	125
			2023/10/13	TestLine 1	-0.00716	77
Average					-0.00708	
モニタリング	ヘリコプター機種 (機体番号) (運航会社)	RSIシステム	実施年日	テストライン名	非線形最小二乗法による 指数関数回帰の結果	
					AF (m ⁻¹)	RV
東日本第14次 モニタリング	Bell430 (JA02AX) (AAC)	RSI 2	2023/09/20	TestLine 4	-0.00649	531
モニタリング	ヘリコプター機種 (機体番号) (運航会社)	RSIシステム	実施年日	テストライン名	非線形最小二乗法による 指数関数回帰の結果	
					AF (m ⁻¹)	RV
第18次 モニタリング	S-76 (JA6901) (AAC)	RSI 2	2023/09/12	TestLine A	-0.00690	767

※NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

※RV: 指数関数回帰における残差分散

4.5.3.空間線量率への換算

RSI システムは有人ヘリの機内に搭載するため、有人ヘリの機底の遮へい効果に依存して、 γ 線計数率を地表面から1 mの高さの空間線量率に換算するための係数(CD)は変化すると考えられることから、機種または機体ごとに設定が必要である。AFと同様の理由で、CDも固定パラメータを用いることを基本方針としている。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。有人ヘリモニタリングに関して、Bell412、Bell430(JA02AXを除く)については2012年から2014年(第6次モニタリングから第9次モニタリング及び東日本第3次モニタリングから東日本第5次モニタリング)で取得した数値の算術平均値とその標本標準偏差(1σ)である。S-76については、2016年度(平成28年度)に実施した第11次モニタリングにおいて、Bell430の固定パラメータをベースに、Bell430とS-76とのオーバーラップフライトの比較結果を基に設定されたものである。また、Bell430(JA02AX)については、2021年度(令和3年度)に取得された数値の内、最も信頼性が高いと判断されたものである。無人ヘリモニタリングに関して、浜通り第1次無人ヘリモニタリングについては、2018年度(平成30年度)から2023年度(令和5年度)までの「放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策等委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業」(本事業とは別事業)で取得した数値と本事業で取得した数値の算術平均値を用いた。

有人ヘリモニタリングにおいてはRSIシステムの健全性及びこれら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、2023年度(令和5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。無人ヘリモニタリングについても2023年度(令和5年度)におけるテストサイトホバリングデータを取得した。CDを算出するのに必要となる地上測定値はテストサイトにおいてKURAMA-IIにより、地表面から1 mの高さの空間線量率を取得した。

有人ヘリモニタリングにおけるCDは、テストポイントにおける地上測定値の平均値とテストポイント周辺で対地高度300 mを3分間ホバリングして得られた計数率の平均値との比から求めた。地上測定値として、3分間のホバリング中の緯度及び経度の平均値を求め、その地点から半径500 m円内における平均値を用いた。取得したデータをTable 4-6~Table 4-8に示す。また、テストポイントにおける地上測定値について、Fig. 4-20~Fig. 4-25に示す。なお、地上測定値は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にはばらつきがみられ、Bell412(JA412N)とS-76(JA6901)のCDについては、いずれもTable 4-5で示した固定パラメータに対する 1σ の範囲外であった。この内、Bell412(JA412N)のCDの平均値を取ると、固定パラメータとの差異は10%程度となった。S-76(JA6901)における固定パラメータCDについては上述した通り、Bell430のパラメータをベースにオーバーラップフライトの結果から決定されたものである。そのため、S-76によるテストポイントフライトで実際に取得されるCDとは、やや乖離する傾向にあると推察される。Bell430(JA05TV)のCDについては、9月13日と9月26日にTestPoint Eで、10月7日にTestPoint 4で取得したCDを除けば、Table 4-5で示した 1σ 以内であり、本年度に取得したCDの全データの平均値は固定パラメータと5%以内で一致し

た。Bell430 (JA02AX) の CD については本年度に取得したのは1データのみであるが、固定パラメータとほとんど同一であった。

次に、有人ヘリモニタリングにおける固定パラメータの妥当性を検証するために、Fig. 4-14 (中央及び右) に示した測線において Bell412 (JA412N)、Bell430 (JA05TV 及び JA02AX) 及び S-76 (JA6901) によって対地高度 300 m でオーバーラップフライトを実施し、得られた γ 線計数率の比較を行った。当該フライトで得た全計数率に対して、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. 4-26)。本図中に示した回帰直線式の傾きが各ヘリコプター機体同士の $CR\text{-}Index \cdot HF$ 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、Bell430 (JA05TV) / Bell412 \approx 0.846、Bell430 (JA02AX) / Bell412 \approx 0.909、Bell430 (JA05TV) / Bell430 (JA02AX) \approx 0.931、Bell430 (JA05TV) / S-76 \approx 0.962 及び Bell430 (JA02AX) / S-76 \approx 1.015 がそれぞれの理想値である。この比が回帰直線の傾きと大きく異なる場合、いずれかの機体の CD に対し、当該回帰直線における傾きと一致するように補正を施すことを検討する。Fig. 4-26 より、Bell412 / Bell430 (JA05TV) \approx 0.990、Bell412 / Bell430 (JA02AX) \approx 0.873、Bell430 (JA02AX) / Bell430 (JA05TV) \approx 0.880、Bell430 (JA05TV) / S-76 \approx 1.058、Bell430 (JA02AX) / S-76 \approx 1.200 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。

浜通り第1次無人ヘリモニタリングの CD については、前述の別事業で取得した数値 (45 データ) 及び本事業で取得した数値 (2 データ) の算術平均値 (3,903 ($[s^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$)) とした。なお、第15回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングに用いる CD は「令和5年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費(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」⁴⁷⁾ と同一 (4,020 ($[s^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$)) とした。

以上を踏まえ、RSI システムの健全性が確認でき、第18次モニタリング及び東日本第14次モニタリングで使用した全ての有人ヘリ機体に対して、固定パラメータの CD を用いることは、現状では妥当であるとした。無人ヘリモニタリングについては、浜通り第1次無人ヘリモニタリングと第15回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの CD に顕著な差異はなく、妥当な数値が得られたと思われる。

Table 4-5 使用した空間線量率換算係数 CD のまとめ

有人ヘリモニタリング	Bell412 (JA412N)			Bell430 (JA05TV)			Bell430 (JA02AX)	S-76 (JA6901)
	Value	SD(1 σ)	Number of Data	Value	SD(1 σ)	Number of Data	Value	Value
CD ([s ⁻¹]/[μ Sv/h])	11,000	± 2,100	42	13,000	± 2,800	65	12,100	14,300

※SD: 標本標準偏差

※S-76のCDに関しては、第11次モニタリングにおいてBell430とのオーバーラップフライトの結果を基に設定された。

Table 4-6 2023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) (運航会社)	RSIシステム	実施年月日	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 /[μ Sv/h])
					空間線量率 (μ Sv/h)	標本標準偏差 (2 σ)	相対標準偏差 (%)	計数率 (s ⁻¹)	標本標準偏差 (2 σ)	対地高度 (ft)	標本標準偏差 (2 σ)	
東日本第14次 モニタリング	Bell412 (JA412N) (NNK)	RSI 2	2023/10/03	TestPoint 3	0.05	0.02	34	1,404	108	1,030	27	15,300
			2023/10/12	TestPoint 4	0.06	0.02	35	1,026	124	1,139	54	7,300
			2023/10/16	TestPoint 5	0.08	0.02	30	1,957	135	975	72	14,700

Average 12,400

※NNK: 中日本航空株式会社

Table 4-7 2023 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)	標本標準偏差 (2σ)	相対標準偏差 (%)	計数率 (s ⁻¹)	標本標準偏差 (2σ)	対地高度 (ft)	標本標準偏差 (2σ)	
第18次 モニタリング	Bell430 (JA05TV) (NNK)	RSI 1	2023/09/13	TestPoint D	0.23	0.11	48	4,550	946	883	76	12,900
			2023/09/13	TestPoint E	0.57	0.47	82	9,834	1,845	1,074	32	18,800
			2023/09/26	TestPoint D	0.23	0.12	54	4,325	455	918	37	12,700
2023/09/26			TestPoint E	0.38	0.26	68	8,431	1,343	922	78	17,100	
東日本第14次 モニタリング			2023/10/07	TestPoint 4	0.06	0.02	41	1,405	206	894	157	9,600
			2023/10/11	TestPoint D	0.23	0.12	50	3,366	464	1,019	37	11,900
	2023/10/13	TestPoint 1	0.05	0.01	24	1,377	302	1,012	206	11,400		
Average											13,500	
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	TestPoint 名	地上測定値			TestPoint フライトデータ				CD (s ⁻¹ /[μSv/h])
					空間線量率 (μSv/h)	標本標準偏差 (2σ)	相対標準偏差 (%)	計数率 (s ⁻¹)	標本標準偏差 (2σ)	対地高度 (ft)	標本標準偏差 (2σ)	
東日本第14次 モニタリング	Bell430 (JA02AX) (AAC)	RSI 2	2023/09/20	TestPoint 4	0.06	0.02	35	1,327	136	1,000	86	11,900

※NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

Table 4-8 2023 年度に取得した CD データ一覧 (S-76)

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)	標本標準偏差 (2σ)	相対標準偏差 (%)	計数率 (s ⁻¹)	標本標準偏差 (2σ)	対地高度 (ft)	標本標準偏差 (2σ)	
第18次 モニタリング	S-76 (JA6901) (AAC)	RSI 2	2023/09/12	TestPoint D	0.23	0.12	52	3,991	1,057	1,086	44	17,600
			2023/09/12	TestPoint E	0.43	0.30	70	7,144	465	1,062	28	17,300
Average											17,500	
											AAC: 朝日航洋株式会社	

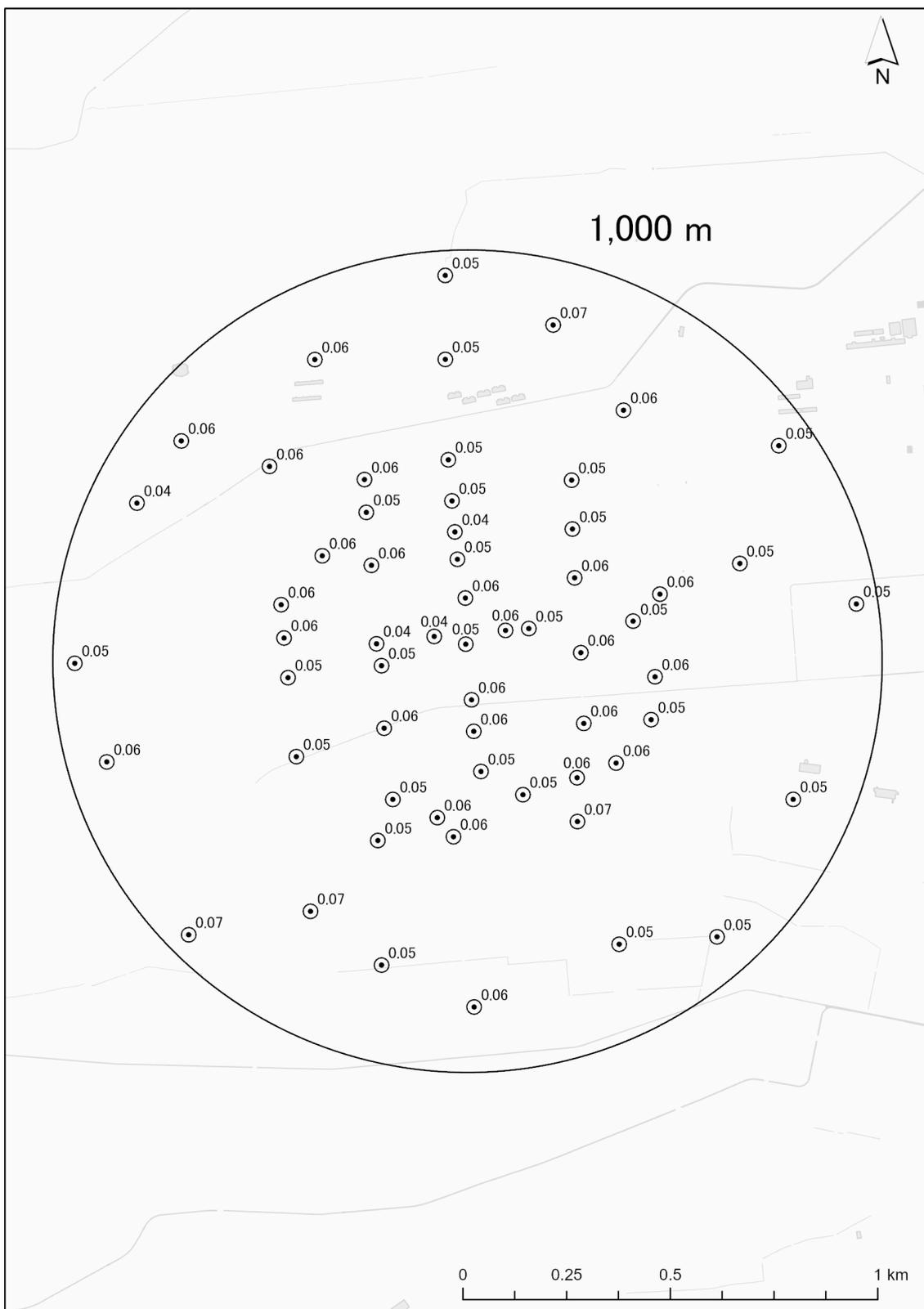


Fig. 4-20 地上測定データ (TestPoint 1)

(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。)

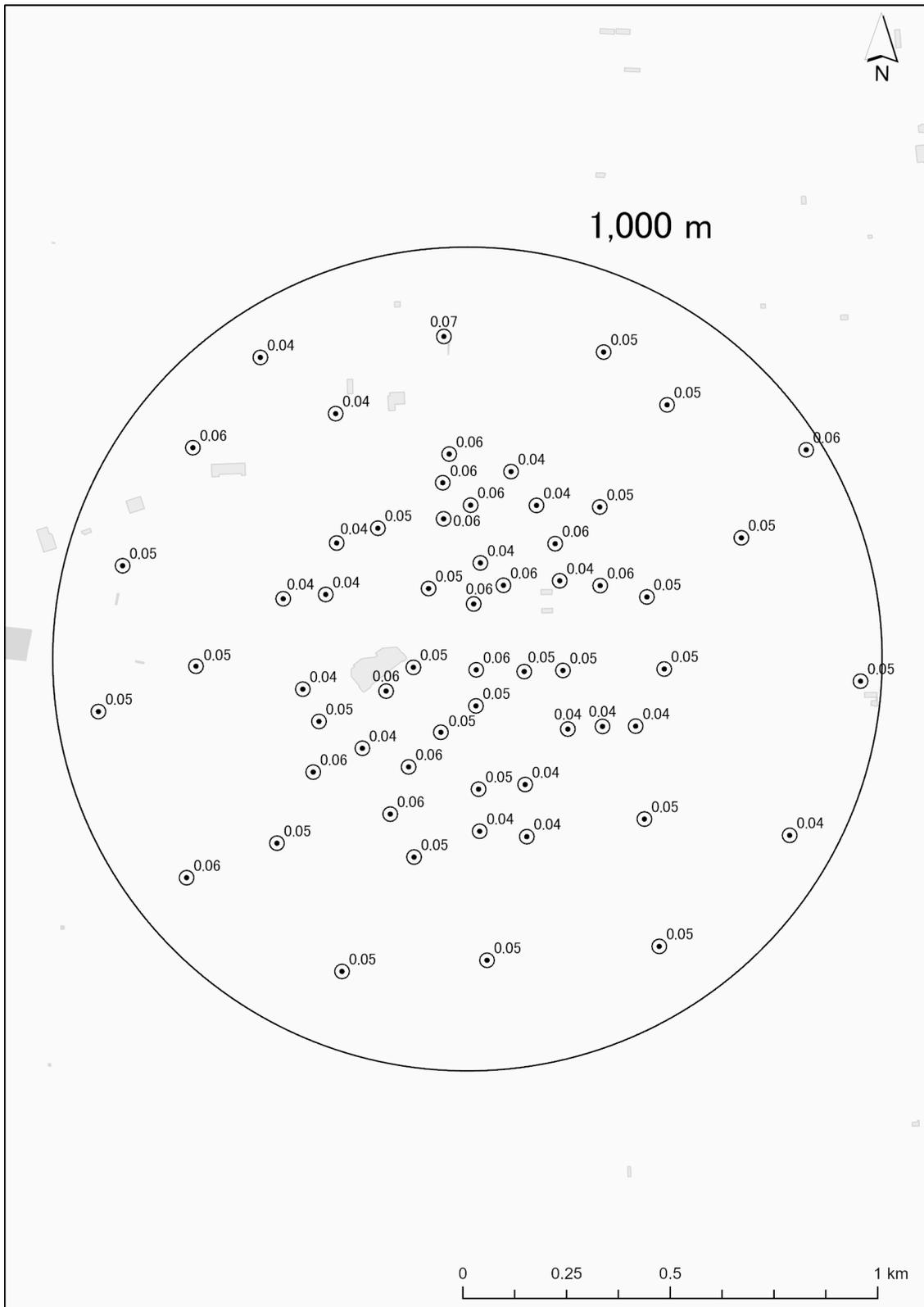


Fig. 4-21 地上測定データ (TestPoint 3)

(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。)

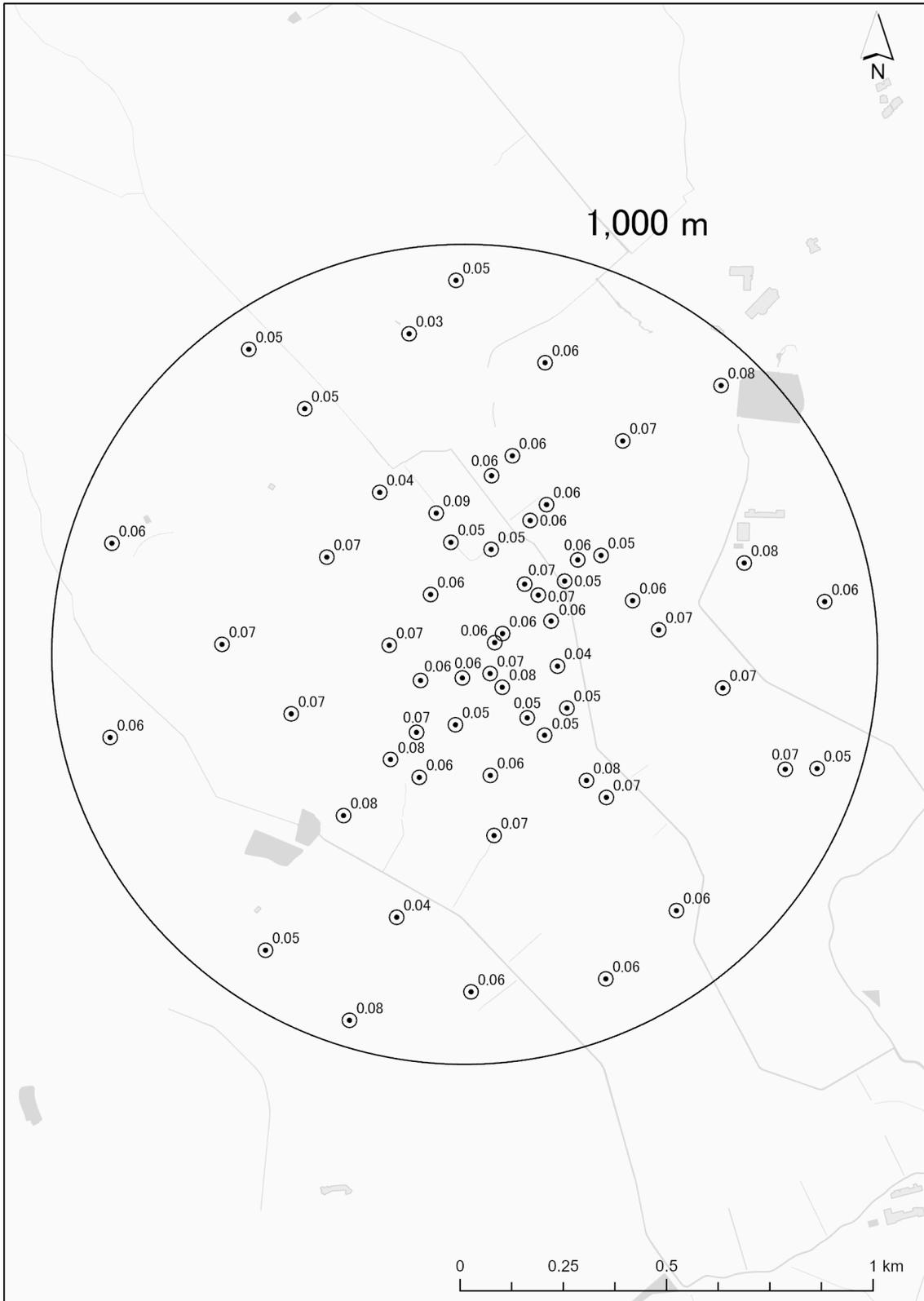


Fig. 4-22 地上測定データ (TestPoint 4)

(空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、天然放射性核種による寄与を含む。)

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

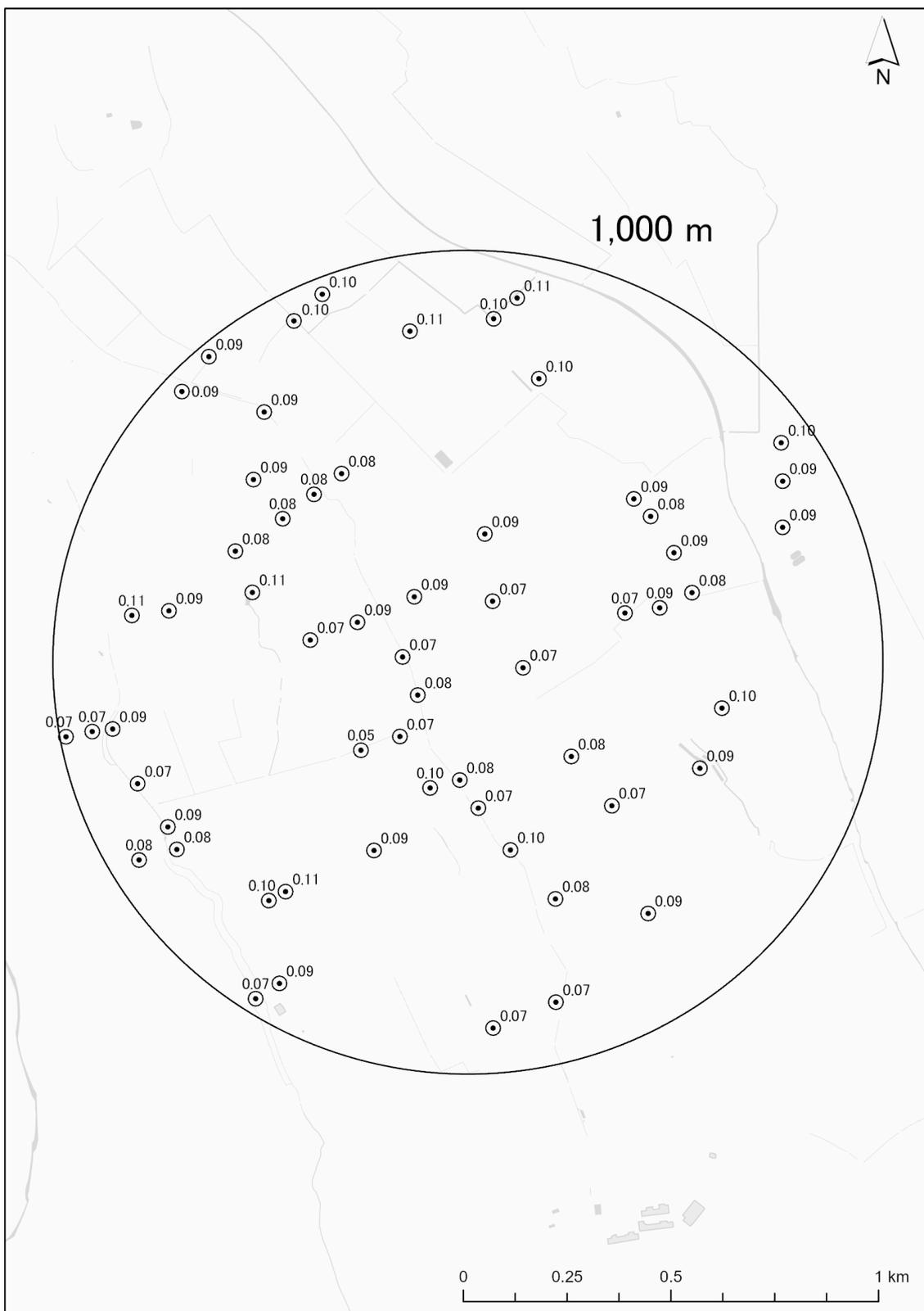


Fig. 4-23 地上測定データ (TestPoint 5)

(空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、天然放射性核種による寄与を含む。)

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

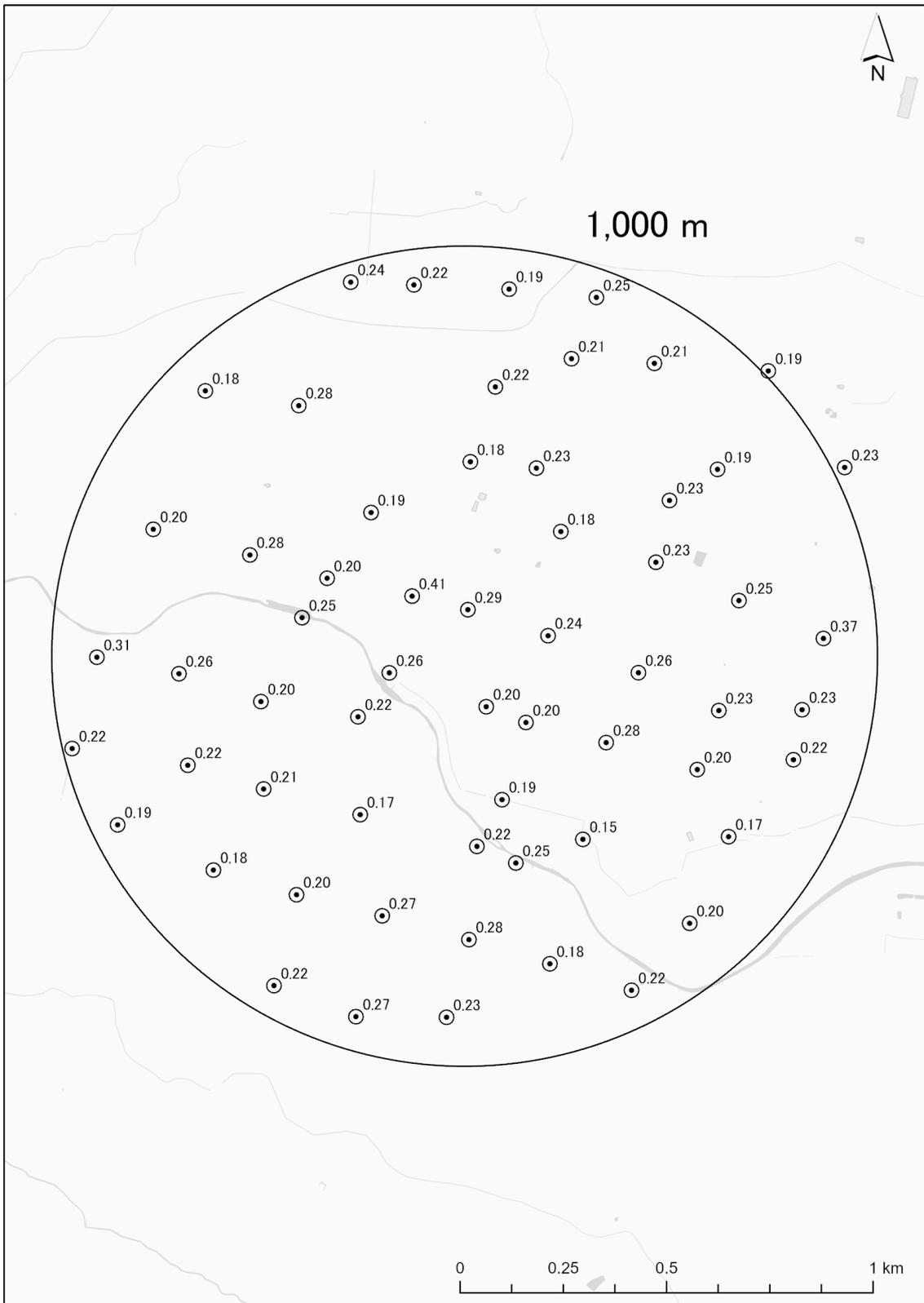


Fig. 4-24 地上測定データ (TestPoint D)

(空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、天然放射性核種による寄与を含む。)

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

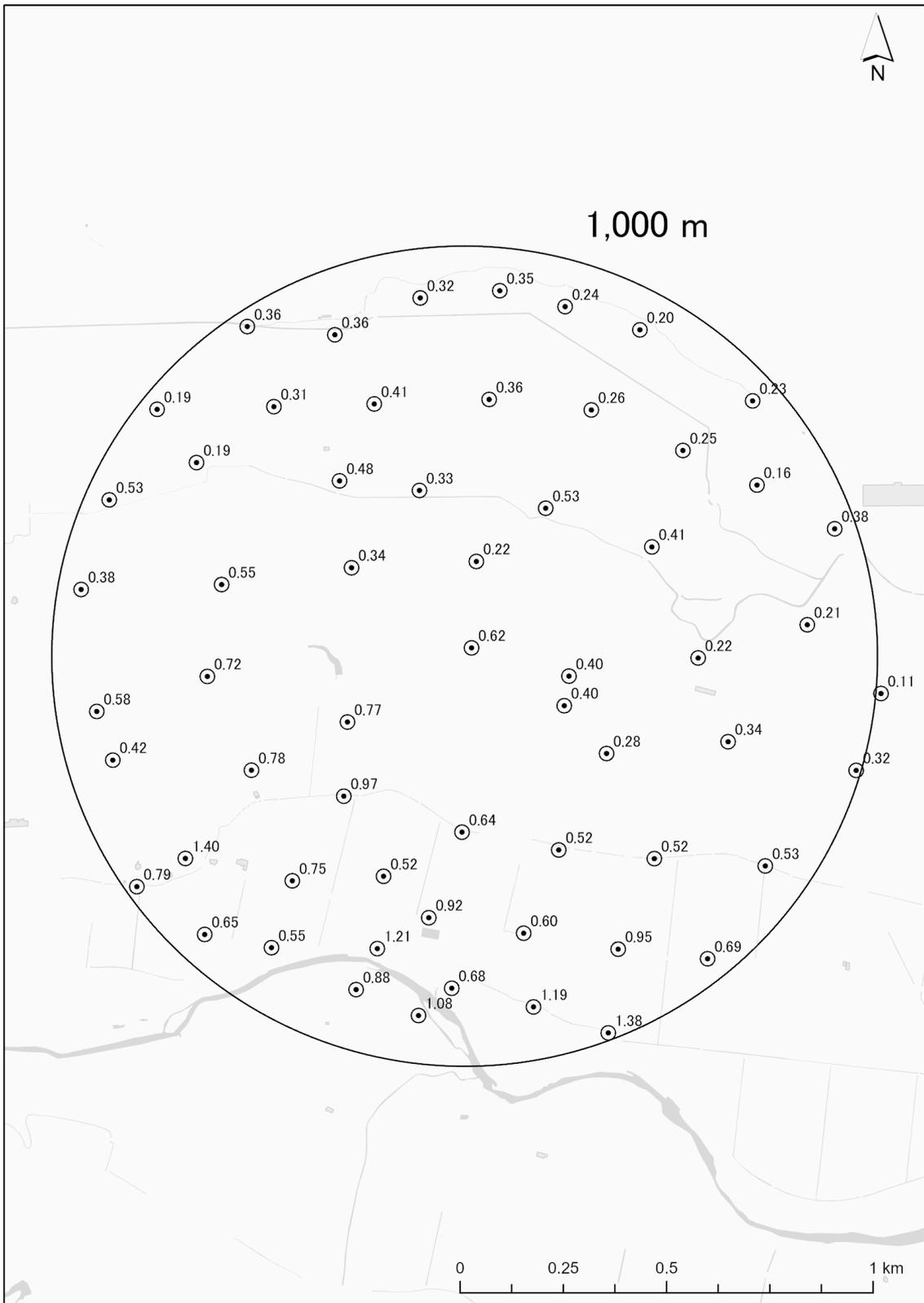


Fig. 4-25 地上測定データ (TestPoint E)

(空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)、天然放射性核種による寄与を含む。)

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

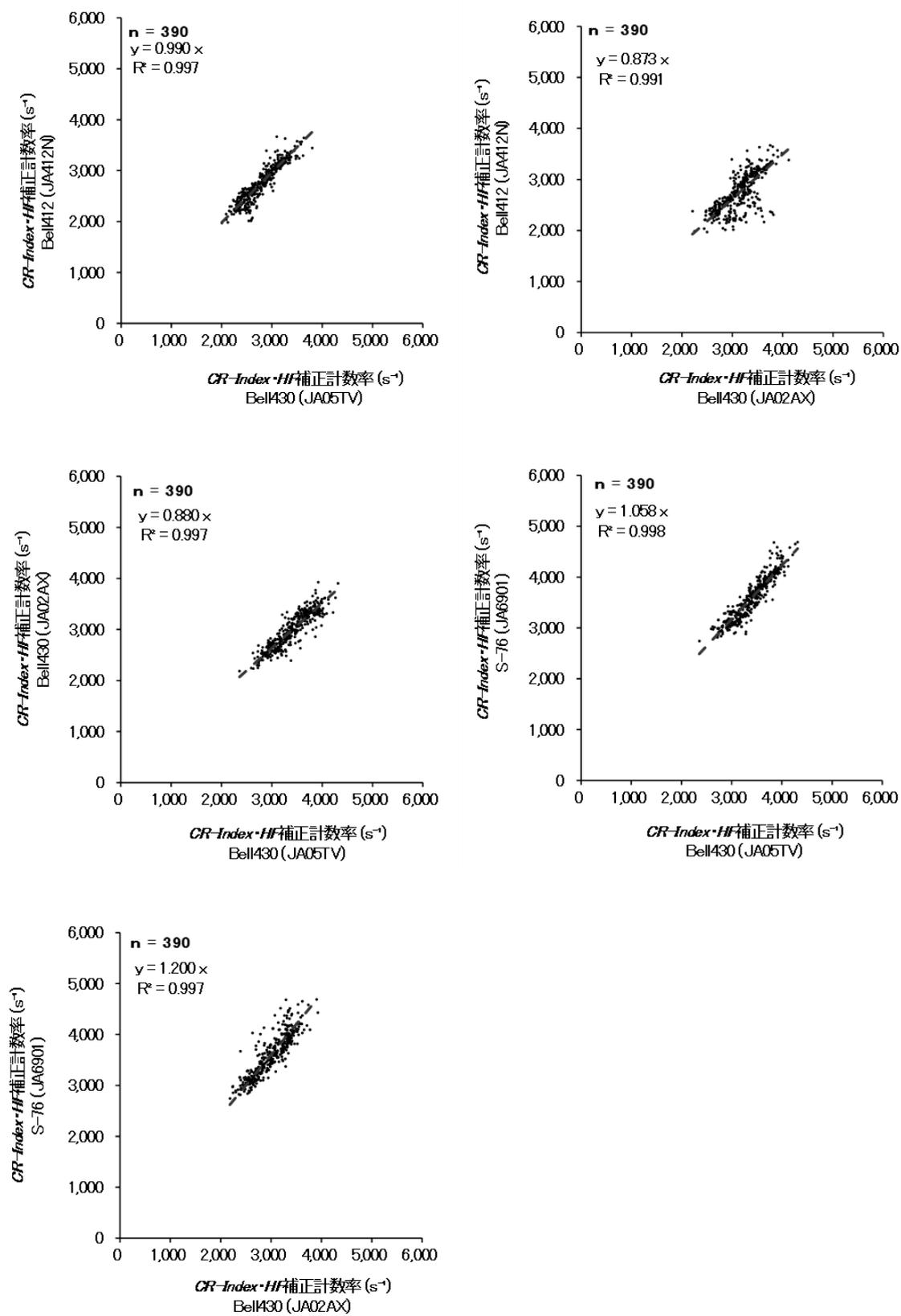


Fig. 4-26 オーバーラップフライトにおけるヘリコプター機種または機体ごとの $CR-Index \cdot HF$ 補正計数率の関係

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、有人ヘリモニタリングの機種または機体と RSI システムの組み合わせごとに東電福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs による影響がない地域をフライトして得られたデータを基に *BG-Index* を算出する。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上で地表面の放射性 Cs の沈着量に換算する。*BG-Index* 算出に用いるスペクトルの ROI (Region of Interest) のイメージを Fig. 4-27 に示す。また、*BG-Index* の算出例を Fig. 4-28 に示す。本図に示したデータは、2011 年度に関西地方において、有人ヘリにより 1 秒ごとに測定した γ 線スペクトルから *BG-Index* を求め、その頻度を示したものである。このようにばらつきはあるものの、正規分布に近い形を示す。第 18 次モニタリング及び東日本第 14 次モニタリングで使用した有人ヘリ機種 (機体番号) と RSI システムの組み合わせごとに設定した *BG-Index* について Table 4-9 に示す。これらの数値を地表面の放射性 Cs の沈着量に換算するためのパラメータとして適用した。なお、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおける放射性 Cs 沈着量の換算方法は、「令和 5 年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費(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」⁴⁾ の手法に従った。

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 $C_{all} - C_{nat} - C_{cos} - C_{self}$ 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、

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

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

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

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。

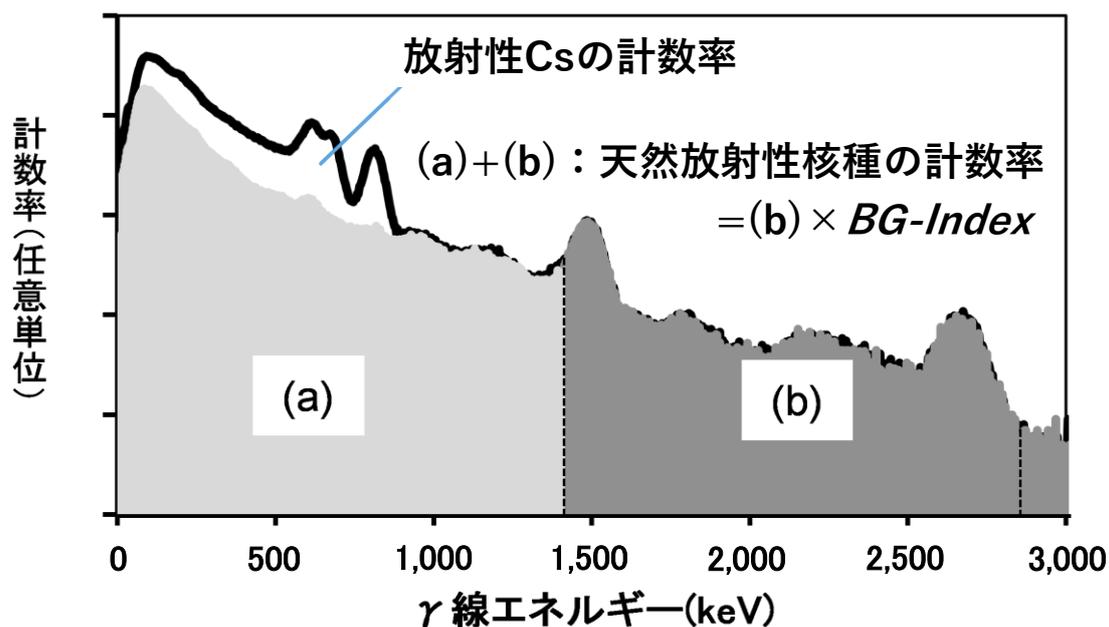


Fig. 4-27 放射性 Cs に起因する計数率の算出イメージ

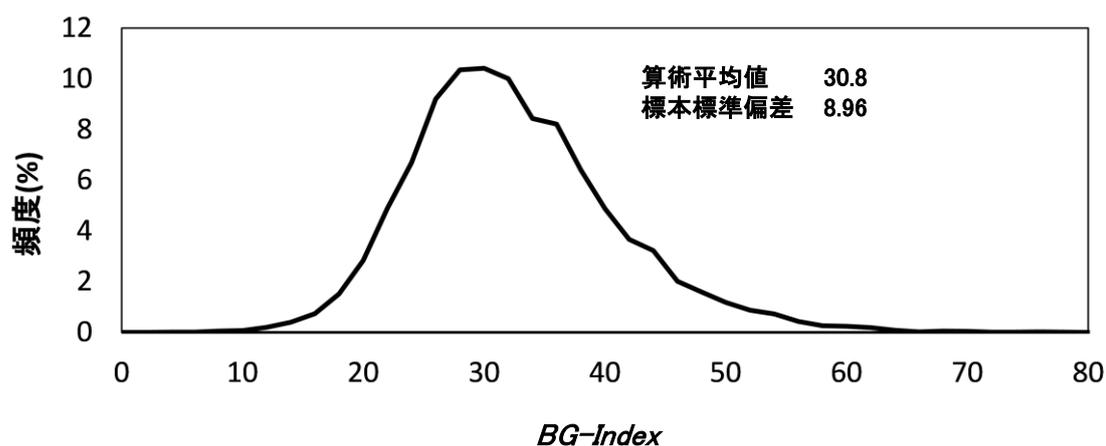


Fig. 4-28 $BG\text{-Index}$ の算出例

(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 $BG\text{-Index}$ と頻度の関係、全 16,000 データ : Bell430 (JA05TV) で取得したデータの一部)

Table 4-9 BG-Index 一覧

Helicopter (Body No.)	RSI System	Operation Company	BG-Index
Bell430 (JA05TV)	RSI 1	NNK	33.7
Bell412 (JA412N)		NNK	30.3
Bell430 (JA02AX)	RSI 2	AAC	31.2
S-76 (JA6901)		AAC	27.6

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

4.6.2.空間線量率－放射能換算係数

有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングでは、地上の放射性 Cs の沈着量に換算する場合に、文献^{48),49)}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⁴⁸⁾。これまで、東電福島原子力発電所から 80 km 圏内外の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^{47),50)}から、東電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、東電福島原子力発電所から 80 km 圏内外の有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングの対象は森林のような人間活動が希少な場所から住宅地や農地のような人間活動がある程度活発な場所まで多様な土地を含んでいる。さらに、その土地の利用の方法や程度は年々変わってゆく。このような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. 4-29 に文献^{48),49)}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 の設定を行って有人ヘリ及び無人ヘリ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。本報告における第 18 次モニタリング、東日本第 14 次モニタリング及び浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングの基本的な解析方針として、Fig. 4-29 に示した β の設定値が及ぼす放射性 Cs 沈着量換算係数への影響は参考情報に留め、過去との比較を考慮して緩衝深度 $\beta = 1.0$ (g/cm^2) の場合の換算係数^{48),49)}を適用した。ただし、第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングに関しては、これまでに実施してきた「原子力施設等防災対策等委託費及び放射性物質測定調査委託費 (東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約) 事業」(本事業とは別事業)における解析結果との一貫性を持たせるため、当モニタリングデータの解析を実施した時点で入手できた 2022 年度 (令和 4 年度) の $\beta = 4.31$ (g/cm^2)⁵⁰⁾ の場合の換算係数を適用した。

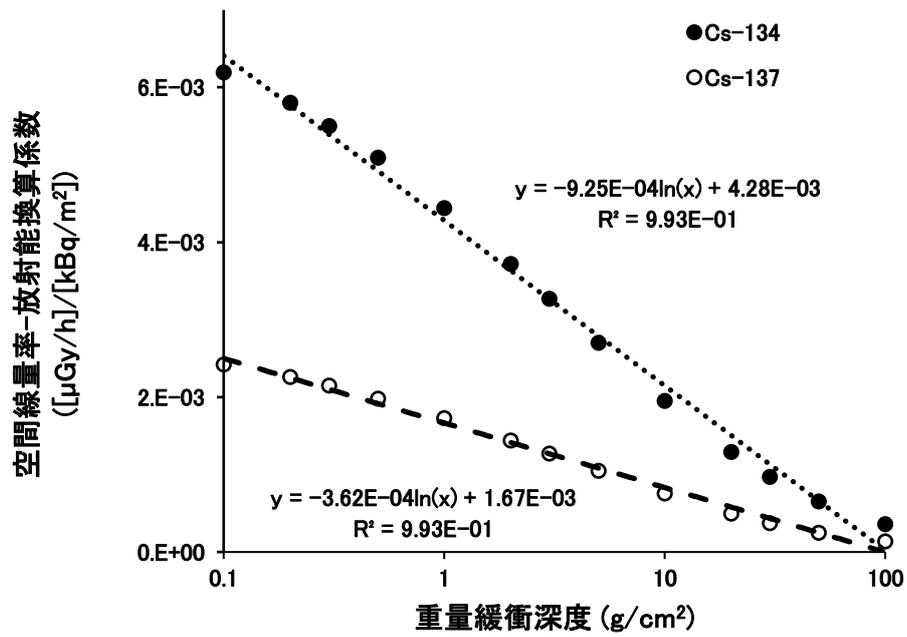


Fig. 4-29 重量緩衝深度 β と空間線量率-放射能換算係数 CF の関係
(文献^{48),49})のデータを基に対数による近似曲線を表示)

4.7. 減衰補正

東電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、予め求めておいたCs-134/Cs-137濃度比を用いて、地表面から1mの高さの空間線量率から地表面におけるCs-134及びCs-137の放射性物質濃度に換算した。Cs-134/Cs-137濃度比は同年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] に有人ヘリ及び無人ヘリ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。

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

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

ここで、式 [7] については、

D : 全空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

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})

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

C_{self} :

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

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

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 (有人ヘリモニタリング : 300 m、無人ヘリモニタリング : 80 m)

H_{m} : 測定対地高度 (m)

であり、さらに式 [8] については、

Rd_{134} : 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 ($[\mu\text{Sv/h}]/[\text{Bq/m}^2]$)^{48),49)}

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

DC_{134} : 減衰補正係数

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

である。

4.8.1.空間線量率の検出限界値

有人ヘリモニタリングにより算出される空間線量率は BG_{self} と BG_{cos} に影響を受ける。なお、無人ヘリモニタリングでは 4.3.2 項で述べたように、 BG_{cos} の影響は無視できる。これまでの有人ヘリモニタリングの測定結果^{17)-20),22),24),26),28),30),32)}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_{self} は海上の測定データから宇宙線成分を減算することにより算出した結果、約 400 s^{-1} であったことから、バックグラウンド計数率 (N_B) を $N_B = C_{cos} + C_{self} = 900\text{ s}^{-1}$ として検出下限値の評価を行った。

一般的に、検出下限値を求める際には、バックグラウンド計数率 (N_B) の標本標準偏差 (σ) を式 [9] に示した Currie の式⁵¹⁾に当てはめ、検出下限値 (N_D) を算出する。

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

有人ヘリモニタリングの場合、 N_B を 900 s^{-1} とすると、 N_D は 142 s^{-1} となる。これに、RSI システムの標準的な CD ($13,000\text{ [s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$) から RSI システムによる空間線量率の検出限界値を計算すると、約 $0.01\text{ }\mu\text{Sv/h}$ となる。無人ヘリモニタリングの場合も同様に計算した結果、空間線量率の検出下限値は約 $0.04\text{ }\mu\text{Sv/h}$ と求まっている⁵²⁾。これら空間線量率の検出下限値は後出の Table 4-10 にまとめた。

4.8.2.放射性 Cs の沈着量の検出限界値

放射性 Cs の沈着量は、 γ 線スペクトルのデータからバックグラウンド (有人ヘリモニタリングの場合は宇宙線、空気中ラドン子孫核種、有人ヘリ機体のバックグラウンド計数率、無人ヘリモニタリングの場合は $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の自己汚染に起因する計数率を含む。) を差し引き求めている。放射性 Cs の沈着量の検出限界値を求める上で、実際の測定データから、差し引くバックグラウンドを考慮し、各々の計数誤差の 3σ を計算した。これを計数率の検出下限とし、例えば有人ヘリモニタリングの場合、RSI システムの標準的な CD ($13,000\text{ [s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$) 及び $\beta = 1.00$ (g/cm^2) の場合の CF で空間線量率に換算する。実際のバックグラウンドの計数率の値は、空間線量率の場合に用いた BG_{self} と BG_{cos} 以外に BG_{nat} が含まれる。有人ヘリモニタリングの場合では、バックグラウンド計数率を標準的な $3,000\text{ s}^{-1}$ 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 ($13,000\text{ [s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$) 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、本報告で行ったモニタリングが完了した年月日である 2023 年 (令和 5 年) 11 月 27 日における 0.020 とし、 $\beta = 1.00$ における CF (Cs-134 : $5.33 \times 10^{-3}\text{ }[\mu\text{Sv/h}]/[\text{kBq/m}^2]$, Cs-137 : $2.08 \times 10^{-3}\text{ }[\mu\text{Sv/h}]/[\text{kBq/m}^2]$) 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。無人ヘリモニタリングの場合も同様に計算した結果、放射性 Cs の沈着量の検出下限値は約 4 kBq/m^2 と評価された⁴⁰⁾。これら放射性 Cs の沈着量の検出下限値は Table 4-10 にまとめた。

ここで参考情報として、第 18 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 $\beta = 4.41^{47)}$ を適用した場合を考える。Fig. 4-29 に示した近似曲線式に β を代入し、 $[(\mu\text{Sv/h})/(\text{kBq/m}^2)]$ に換算して得られる CF は、Cs-134 : $3.51 \times 10^{-3} [(\mu\text{Sv/h})/(\text{kBq/m}^2)]$ 、Cs-137 : $1.37 \times 10^{-3} [(\mu\text{Sv/h})/(\text{kBq/m}^2)]$ である。これら CF を基に、上記と同様な仮定の下で算出される放射性 Cs の沈着量の検出限界値は、例えば有人ヘリモニタリングでは約 42 kBq/m^2 となり、 $\beta = 1.00$ 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 4-10 RSI システムの検出下限値

System (On-board aircraft)	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 (Manned Helicopter)	0.01	27
LaBr ₃ (Ce) (Unmanned Helicopter)	0.04	4

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

Evaluated value on 27, Nov. 2023

4.9. 不確かさ

有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングにより算出される空間線量率における不確かさの要因としては、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：有人ヘリモニタリングの場合、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きている。
- 高度補正係数 *HF* の選択：*CD* と同様に、テストラインフライトまたはテストサイトブルアップデータ測定得状況により 5%前後の不確かさが生じる。
- 高度情報に係る誤差：海拔高度は GPS または DGPS で測位しているが、衛星の位置等の測位状況によっては、海拔高度に最大 30 m 程度の誤差が生じる。本誤差を低減する手法について検討できておらず、今後の課題である。
- ラドン子孫核種の影響：日本においては、特に冬場に大陸由来のラドン子孫核種の影響が比較的大きいことが知られている。有人ヘリモニタリングでは空气中ラドン子孫核種の影響を示唆するデータが取得されており、その詳細については 8 章に述べる。

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⁵³⁾。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⁵⁴⁾。

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

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

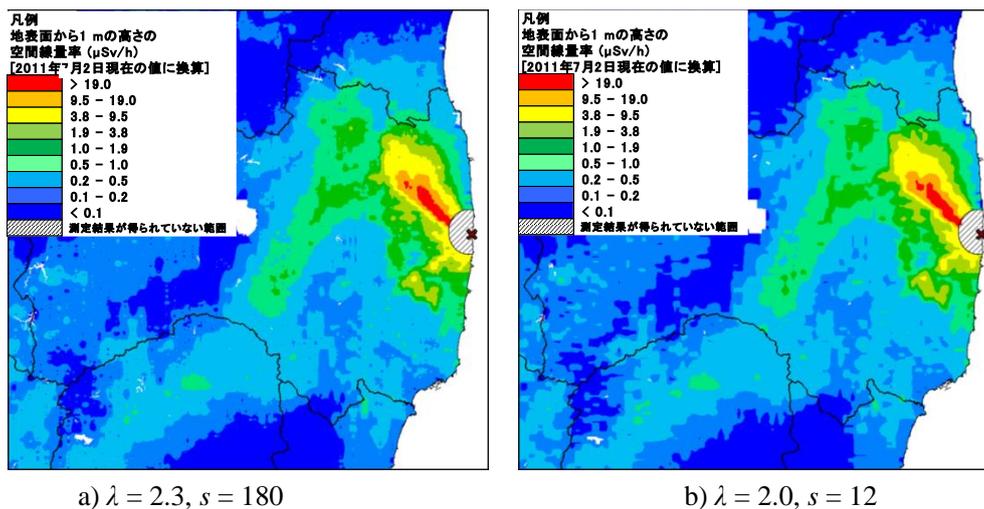
z_i : 各サンプル点を持つ実測値

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り、最低値より小さくなることはない。また、IDW には複雑なパラメータ設定が不要である。必要となるのは、補間地点とサンプル点間の距離に応じて影響度を制御する乗数 λ と内挿処理の対象となるサンプル点数 s の2つである。IDW では λ と s の設定によって結果が異なってくるが、最良の値を決定するための基準が存在していない。 λ が大きいほど、補間地点近傍データの影響力が相対的に大きくなり、一般的に2がよく用いられるが、必ずしも2が最良であるとは限らない。本報告では、今まで積み上げてきた経験から、有人ヘリモニタリング及び無人ヘリモニタリングともに、 λ として2.3、 s として180を適用した。ちなみに、有人ヘリモニタリングにおける第3次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. 4-30 にパラメータ設定の異なる場合の空間線量率マップを示す。 λ を2.3、 s を400とした Fig. 4-30 a) と λ を2.0、 s を12とした Fig. 4-30 b) を比べると、両者とも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。

Fig. 4-4 に示した通り、有人ヘリモニタリングでは対地高度約300 m、無人ヘリモニタリングでは対地高度約80 m から測定を実施する。それぞれ、ヘリ直下の地上を中心とする半径約300 m、半径約80 m 円内における放射線量の平均値が測定される。空間線量率等のマッピングにおいては、有人ヘリによる測定範囲が広く、これを基準として考えるのが妥当と思われること、地域基準メッシュ (1 km) 内に収めることを考慮して、メッシュサイズを250 m とした。



*第3次モニタリングの結果を使用

Fig. 4-30 IDW に入力するパラメータとマップの関係

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

4.11.地上測定値との比較

有人ヘリモニタリング結果の妥当性を検証するために、測定対象区域から地形的に平坦な場所であつた有人ヘリモニタリング測線近傍の地点を選定し、全 300 地点 (80 km 圏内 : 51 地点、80 km 圏外 : 249 地点) において地上測定を行った。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. 4-31 に有人ヘリモニタリングによる空間線量率と地上測定値との比較を示す。比較は散布図 (左) 及び相対誤差 ((有人ヘリモニタリングによる空間線量率 - 地上測定値) / 地上測定値) のヒストグラム (右) で行った。ここで、相対誤差が 0 であれば有人ヘリモニタリングによる空間線量率と地上測定値が一致し、正であれば有人ヘリモニタリングによる空間線量率の方が大きく、負 (ただし、-1.0 が最低値である。) であれば有人ヘリモニタリングによる空間線量率の方が小さく評価されたことを意味する。散布図を見ると、92% (全 300 点中 277 点) のプロットがファクター2に収まり、地上測定値と非常に良く整合した。相対誤差のヒストグラムは -0.5 ~ 0.5 に主要な分布がある一方で、0.5 以上の領域にも別の分布があり、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大部分が東日本第 14 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 (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、有人ヘリ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⁴⁷⁾を用いて、Fig. 4-31 と同様にして有人ヘリモニタリング及び無人ヘリモニタリングによる換算結果と比較した。なお、

可搬型 Ge 検出器による測定値から地表面の放射性 Cs 沈着量に換算する際に用いる重量緩衝深度 (β) として 4.41 (g/cm²) が設定されている⁴⁷⁾。空間線量率の比較及び放射性 Cs の沈着量の比較について、有人ヘリモニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング、第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの順に Fig. 4-32～Fig. 4-34 及び Fig. 4-35～Fig. 4-37 にそれぞれ示す。散布図においてファクター 2 を指標とすると、空間線量率について、有人ヘリモニタリングでは 90% (全 4,776 点中 4,309 点)、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングでは 93% (全 149 点中 138 点)、第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングでは 69% (全 80 点中 55 点) が収まった。Cs-137 沈着量について、有人ヘリモニタリングでは 49% (全 231 点中 113 点)、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングでは 60% (全 10 点中 6 点)、第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングでは 25% (全 4 点中 1 点) が収まった。空間線量率に関しては有人ヘリモニタリング及び無人ヘリモニタリングとも、換算値は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、有人ヘリモニタリングによる換算値がファクター 2 を逸脱するプロットが特に多い。このことから、有人ヘリモニタリングによる Cs-137 の沈着量の換算値は 100 kBq/m² 以下の領域において、妥当性にやや乏しいと思われる。なお、無人ヘリモニタリングについては、Cs-137 沈着量の比較点数が極めて限られており、本結果から一般的な傾向を把握することは難しい。次に相対誤差のヒストグラムを詳細に見ると、空間線量率について、有人ヘリモニタリングでは、ピークは 0 付近に位置しているように見えるが、-1.0 から 0.0 までの累積頻度は約 30% であり、0 以上の領域に頻度分布がやや偏った。また平均値は 0.33、中央値は 0.20 であったことから、正規分布からはやや逸脱した分布であることが窺われ、有人ヘリモニタリングによる空間線量率の方が地上測定値よりも 20% から 30% 程度は大きくなる傾向にあった。浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングについては、平均値は 0.20、中央値は 0.09 であり、正規分布からはやや逸脱した分布であることが窺われ、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングによる空間線量率の方が地上測定値よりも 10% から 20% 程度は大きくなる傾向にあった。第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングについては、平均値は 0.56、中央値は 0.32 と地上測定値よりも大きい側に偏ったが、これらの大きい側に偏ったデータは、NaI(Tl)検出器による地上測定値が 1 μ Sv/h 以下の比較的 low 線量率の地点のものがほとんどであった。また、有人ヘリモニタリングによる Cs-137 沈着量については相対誤差が広く分布しており、2.0 を上回る領域 (有人ヘリモニタリングの方が 3 倍以上過大評価) に 20% 程度の頻度が認められた。加えて、平均値は 2.00 であるのに対し中央値が 0.09 であり、有人ヘリモニタリングによる Cs-137 沈着量の換算値の方が明らかに大きく偏る傾向が示された。浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングについては上述した通り、比較点数が極めて限られており、一般的な傾向を把握することは難しい。

以上をまとめると、空間線量率及び Cs-137 の沈着量の地上測定値に対して、有人ヘリモニタリング及び無人ヘリモニタリングの換算値はやや過大評価する傾向が見られた。これには、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一因として考えられる。有人ヘリ及び無人ヘリ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空間線量率及び Cs-137 の沈着量をだまかに算出することから、その値には種々の不確かさが伴う。一方、NaI(Tl)検出器や可搬型 Ge 検出器による地上測定では局所

域を測定対象としている点で有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングとは異なる。また、有人ヘリモニタリング及び浜通り第1次無人ヘリモニタリングでは、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推察される。さらに、第15回5 km 圏内無人ヘリモニタリングのように、環境中での放射性 Cs の動態観測結果に基づいた β を適用したとしても、それにより可搬型 Ge 検出器による地上測定値をどれほど精度よく再現できるようになるかは不透明である。以上のような現状から、可搬型 Ge 検出器の地上測定による Cs-137 の沈着量を、有人ヘリ及び無人ヘリ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 の設定値及びその他の考慮すべき因子について検討し、Cs-137 沈着量の換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。実際に測定される範囲は、有人ヘリモニタリングでは地上の半径 300 m 円内、無人ヘリモニタリングでは地上の半径 80 m 円内における放射線量の平均値となる。一方、地上測定による測定範囲は半径 30 m 程度の円の放射線量の平均値となる。よって、地上の放射線分布が一様な場所では整合しやすいが、地上の空間線量率の分布が均一でない場所では、測定結果が整合しにくいと考えられる。
- ② 周辺からの影響：地上の測定場所の近傍に大きな建物や森林等がある場合には、建物や樹木に沈着している放射性物質が地上測定に影響する可能性がある。また、上空で測定する場合においては、建物や森林等が地表面からの放射線を遮へいするため、単純に比較できない場所がある。本章において、比較用に取得した地上測定値は比較的地形が平坦な場所が多く、条件がよい場所を選定しているが、上記した影響を免れない場所も一部含まれている。

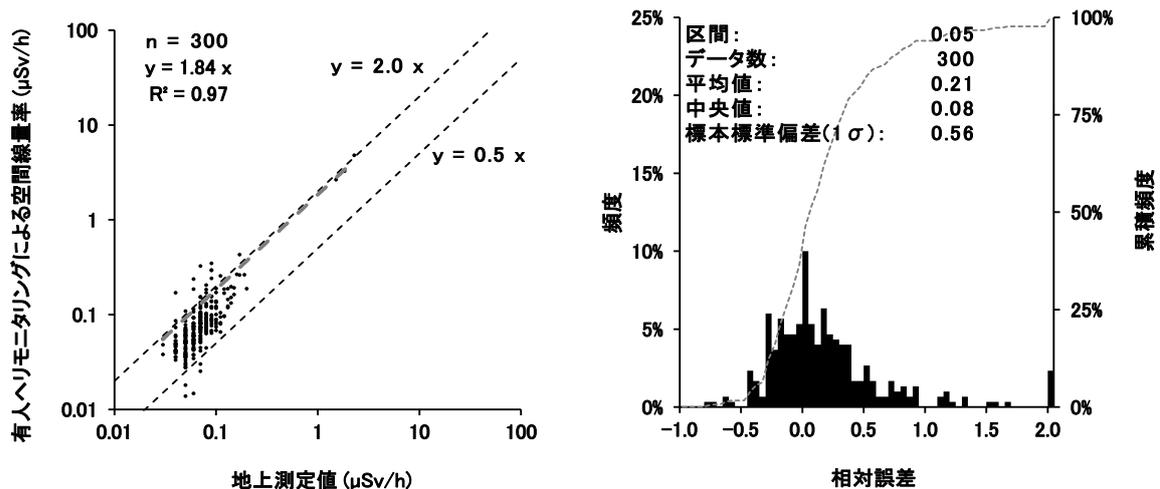


Fig. 4-31 測線近傍における地上測定値と有人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較
(左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

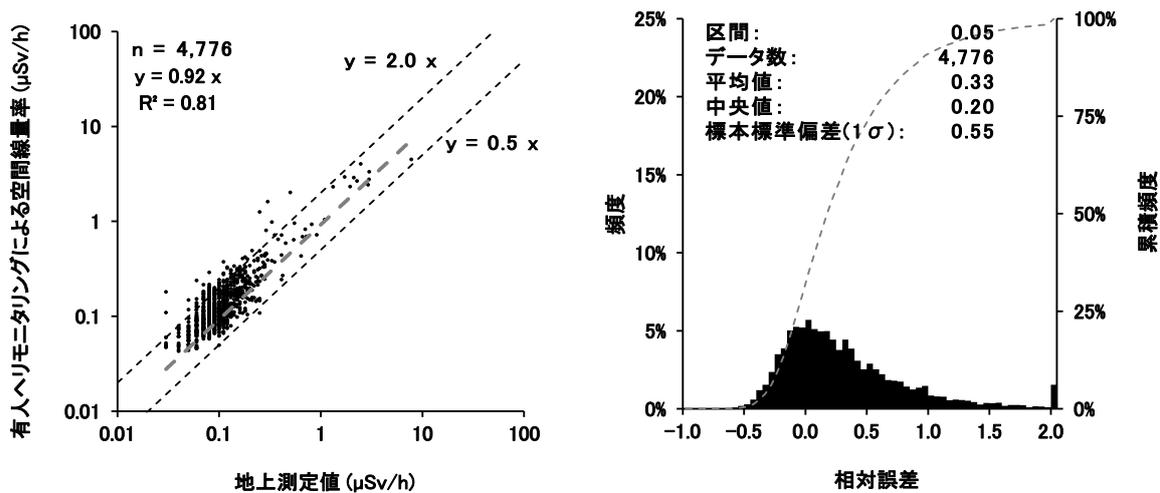


Fig. 4-32 ランダムな位置における地上測定値と有人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較 (地上測定値は原子力規制庁事業⁴⁷⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

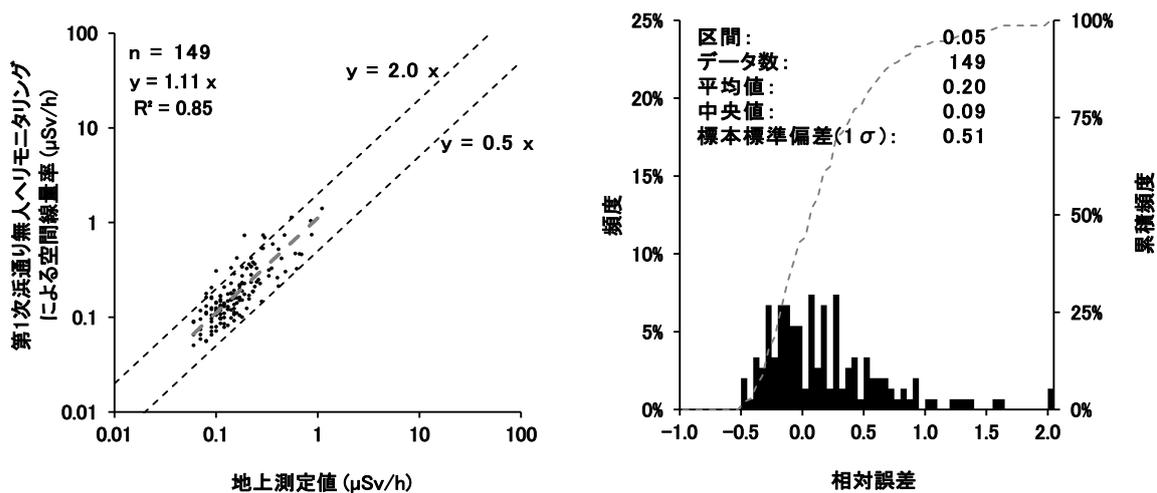


Fig. 4-33 ランダムな位置における地上測定値と浜通り第1次無人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較 (地上測定値は原子力規制庁事業⁴⁷⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

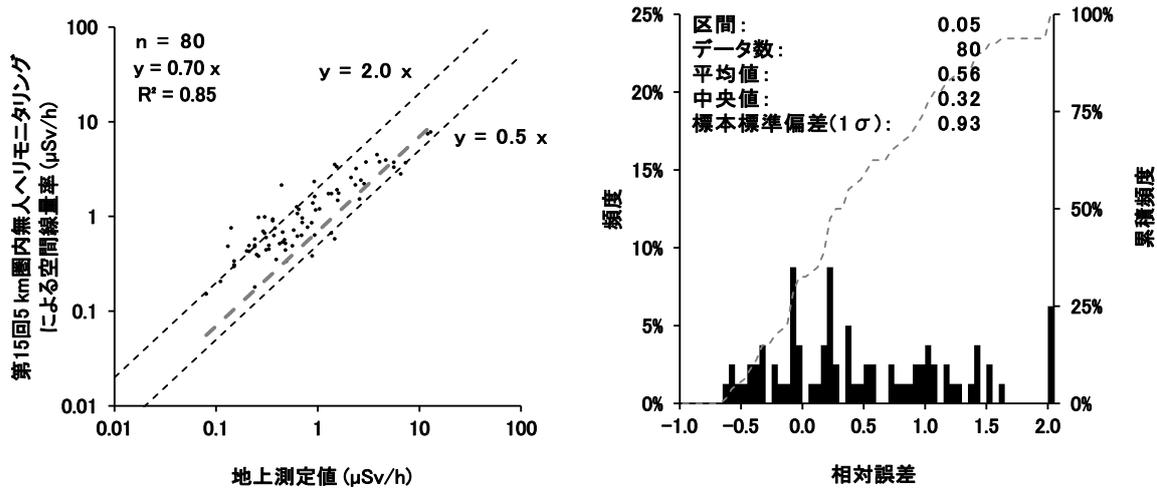


Fig. 4-34 ランダムな位置における地上測定値と第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングによる空間線量率の比較
(地上測定値は原子力規制庁事業⁴⁷⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

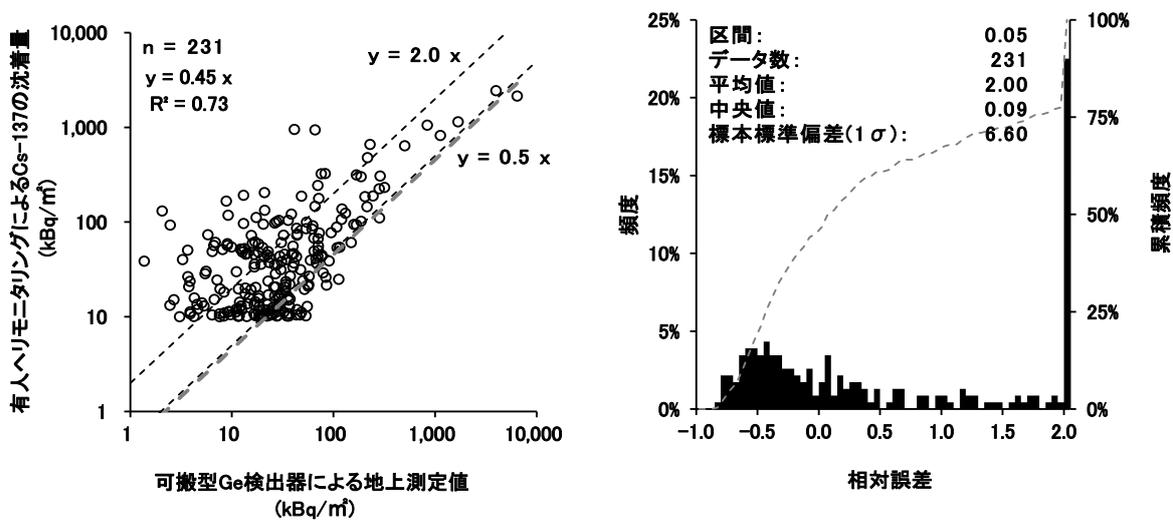


Fig. 4-35 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と有人ヘリモニタリングによる Cs-137 沈着量の比較
(地上測定値は原子力規制庁事業⁴⁷⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

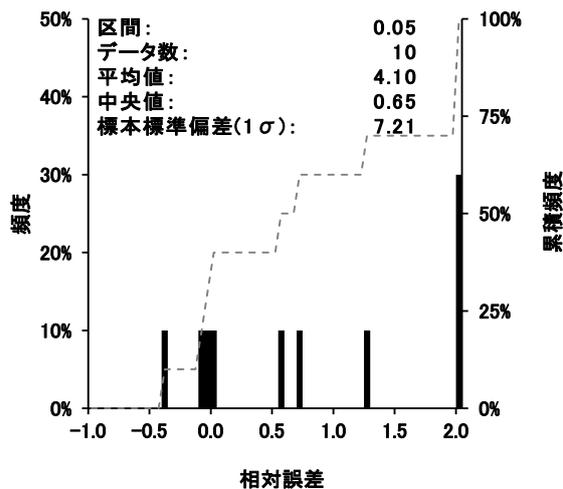
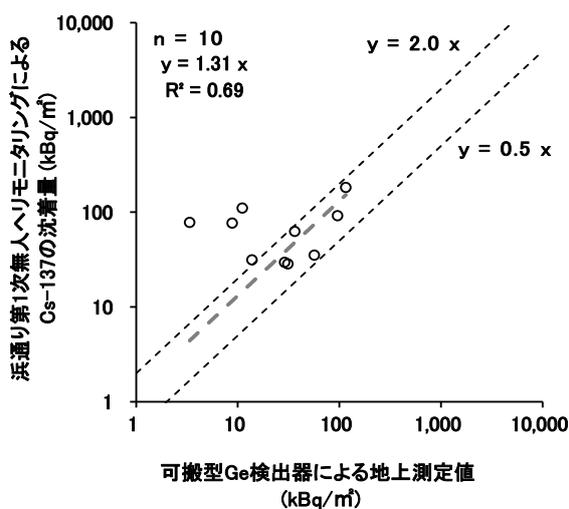


Fig. 4-36 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と浜通り第 1 次無人モニタリングによる Cs-137 沈着量の比較

(地上測定値は原子力規制庁事業⁴⁷⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

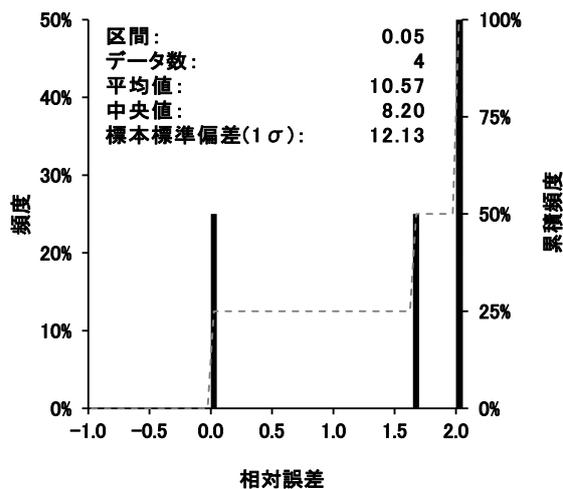
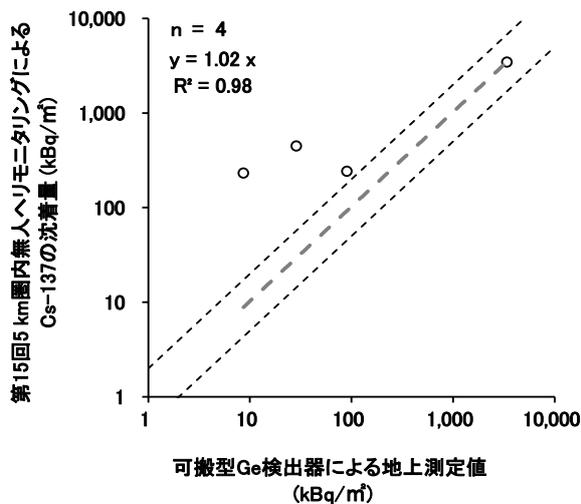


Fig. 4-37 可搬型 Ge 検出器による地上測定値と第 15 回 5 km 圏内次無人モニタリングによる Cs-137 沈着量の比較

(地上測定値は原子力規制庁事業⁴⁷⁾による。左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

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

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),55)}。有人ヘリモニタリングで使用している RSI システムは γ 線の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⁵⁶⁾を第 18 次モニタリング及び東日本第 14 次モニタリングデータに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。なお、無人ヘリモニタリングに使用している LaBr₃(Ce)検出器に対して、後述するパラメータの算定が難しいため、浜通りに第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングには本手法は適用できないのが現状である。

有人ヘリ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. 4-38 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⁵⁶⁾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. 4-38 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、

$S(i, j)$: 複合ピークを形成する核種 i, j の計数率 (s^{-1})

$a + bE$: ベースライン計数率 (s^{-1})

E : 核種 i, j のピークエネルギーを最適化するための変数 (γ 線エネルギー (keV))

E_i, E_j : 核種 i, j のピークエネルギー (keV)

σ_i^2, σ_j^2 : 核種 i, j のピークの分散 (keV^2)

c_i, c_j : 核種 i, j の正味のピーク計数率 (s^{-1})

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、Cs-134 (1,365 keV) が 1,400 keV 以上のエネルギーへ与える寄与割合を 0.134 とし、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。有人ヘリモニタリング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、

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

C_{1400} : 1,400 keV~2,800 keV の積算計数率 (s^{-1})

BG_{1400} : 宇宙線由来の 1,400 keV~2,800 keV の積算計数率 (s^{-1})

Cs_{1400} : ラドン壊変生成物及び有人ヘリ機体に起因する 1,400 keV~2,800 keV の積算計数率 (s^{-1})

$BG\text{-Index}$: 東電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} : 1,400 keV~2,800 keV の積算計数率に対する高度補正係数

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

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。有人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 ($50 \text{ m/s} \times 21 \text{ s} \doteq 1,000 \text{ m}$) 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 4-11 に示す。本表には、通常の有人ヘリ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、使用した有人ヘリ機種 (Bell412、Bell430 及び S-76) 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地上測定値と算出した CD の関係について空間線量率依存性が特に認められなかった (Fig. 4-39 (Bell412)、Fig. 4-40 (Bell430) 及び Fig. 4-41 (S-76)) 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。

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⁵⁷⁾や自然放射線の実測から算出した例⁵⁸⁾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。

東電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. 4-42 に示す。Fig. 4-42 (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. 4-42 (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⁴⁷⁾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. 4-43 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. 4-43 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 77 地点は測定時に降雨があったため⁴⁷⁾、比較対象外とした。また、比較対象とした 306 点の内 14 点は有人ヘリ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、292 点のデータを比較に用いた。散布図 (Fig. 4-43 (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 91% (全 292 点中 265 点) が収まった。相対誤差は ((有人ヘリモニタリングで評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率 - 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. 4-43 (右)) については 0.0 以上 (有人ヘリ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 0.13 及び 0.07 であった。つまり、有人ヘリ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 10% 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。

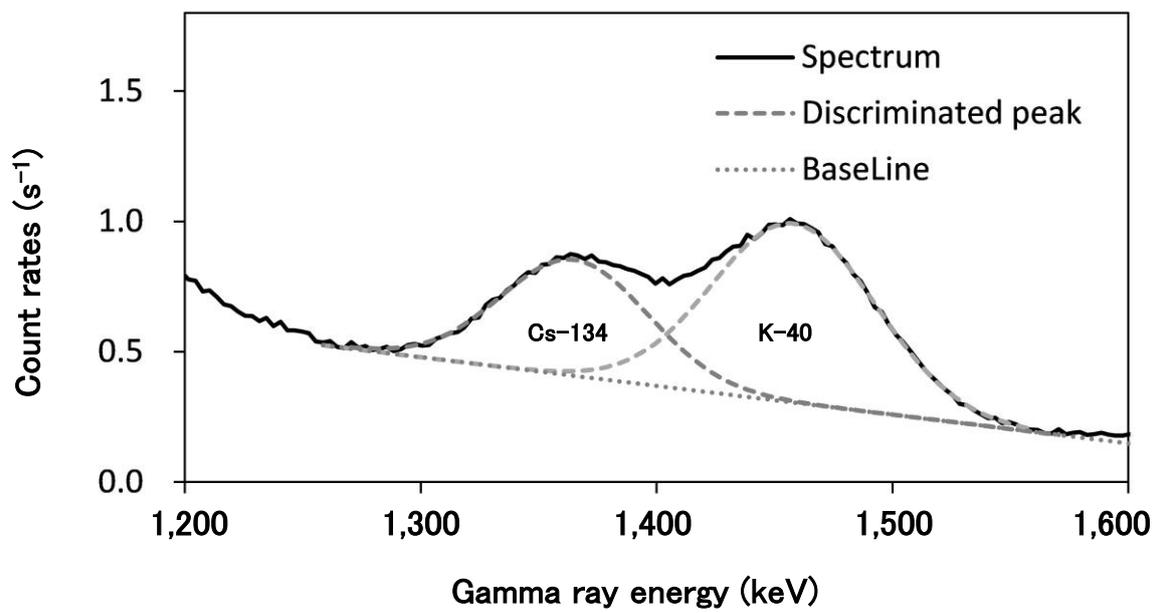


Fig. 4-38 関数適合法を用いた Cs-134 と K-40 の弁別

Table 4-11 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 (JA412N)		Bell430 (JA05TV)		Bell430 (JA02AX)		S-76 (JA6901)	
	Value \pm SD(1σ)	Number	Value \pm SD(1σ)	Number	Value \pm SD(1σ)	Number	Value	Number
1,400 keV – 2,800 keV	-0.00580 \pm 0.00080	11	-0.00600 \pm 0.00102	8	-0.00550 \pm 0.00072	4	-0.00591	2
30 keV – 2,800 keV	-0.00720 \pm 0.00042	21	-0.00720 \pm 0.00040	35	-0.00692	-	-0.00720	2

※SD: 標本標準偏差

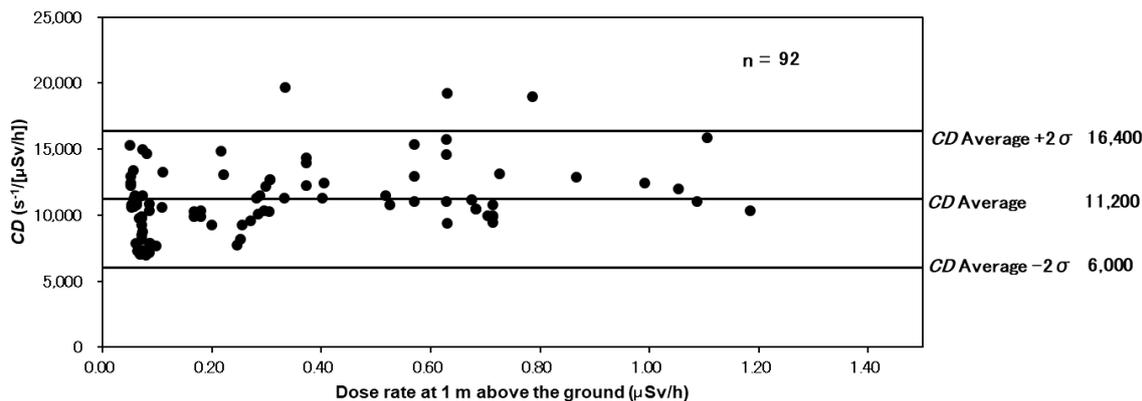


Fig. 4-39 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell412)
(本図中の σ は CD に対する標本標準偏差である。)

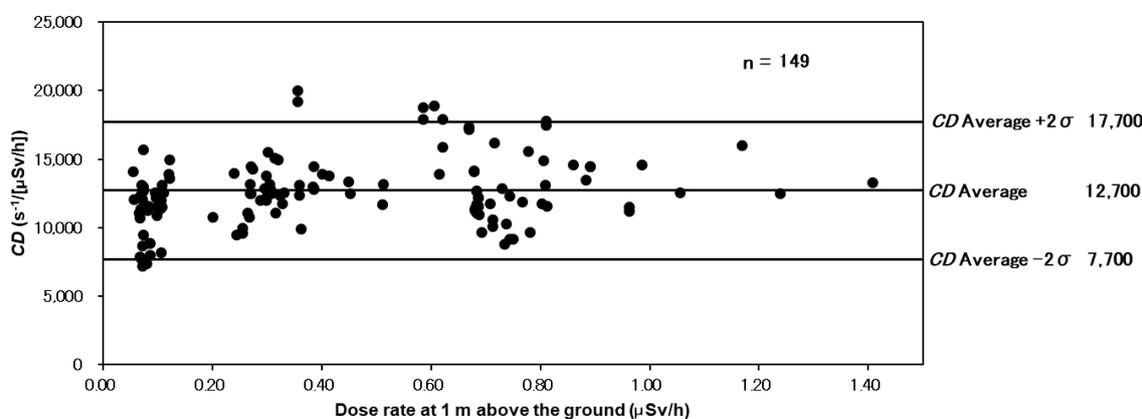


Fig. 4-40 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell430)
(本図中の σ は CD に対する標本標準偏差である。)

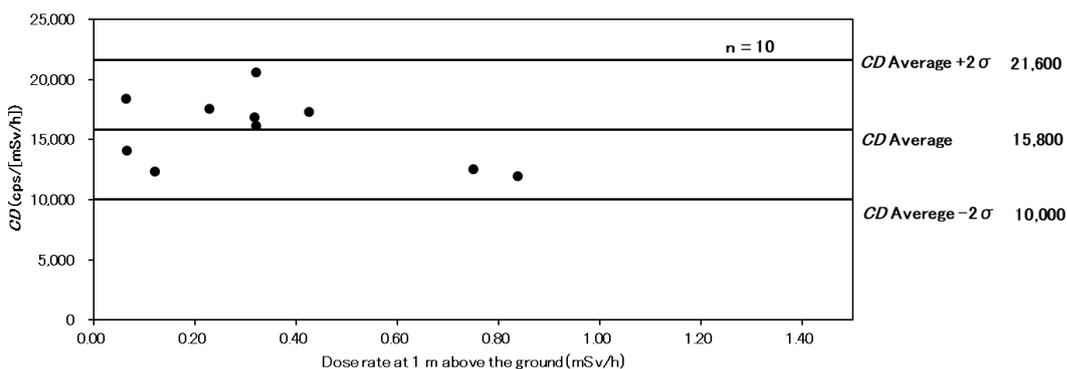
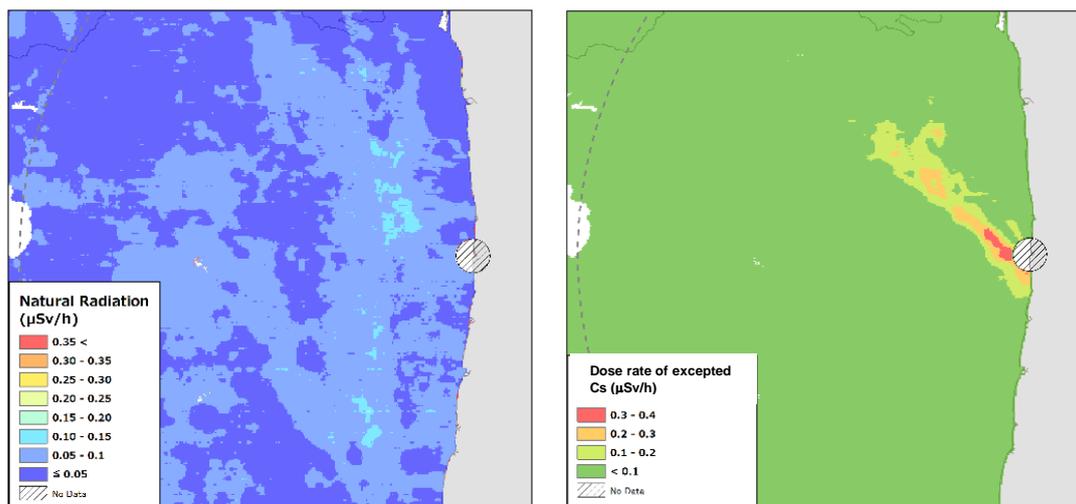


Fig. 4-41 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (S-76)
(本図中の σ は CD に対する標本標準偏差である。)



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

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

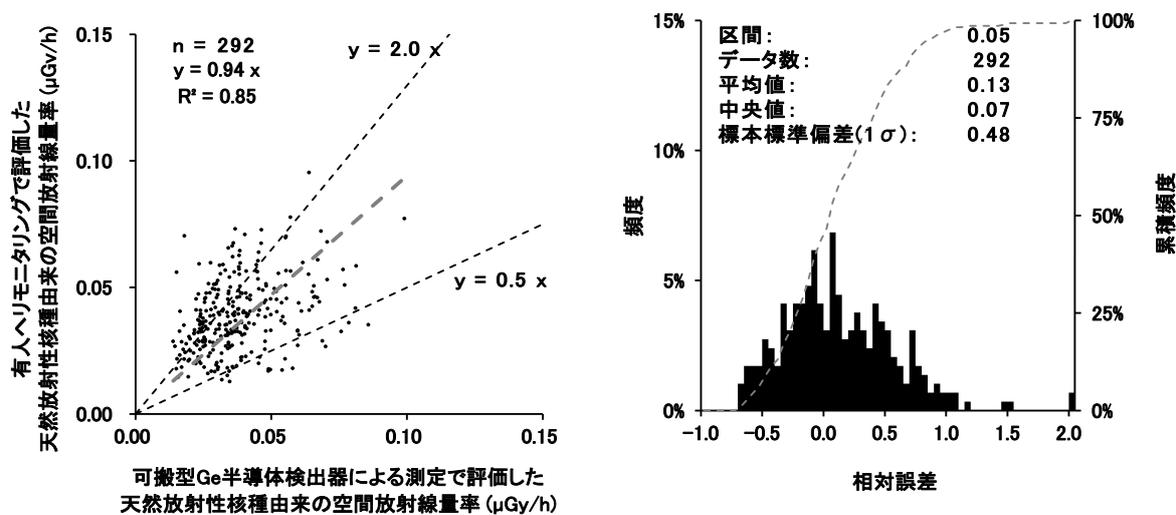


Fig. 4-43 可搬型 Ge 検出器による測定で評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率と有人ヘリモニタリングで評価した天然放射性核種由来の空間放射線量率との比較
 (左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

5. 有人ヘリ及び無人ヘリモニタリング結果

5.1. ヘリコプターによるフライトの実績

5.1.1. 有人ヘリコプター

第 18 次モニタリングでは Bell430 (JA05TV) 及び S-76 (JA6901)、東日本第 14 次モニタリングでは Bell412 (JA412N) 及び Bell430 (JA05TV 及び JA02AX) を使用した。第 18 次モニタリングでは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、S-76 (JA6901) で南側を測定した。また、東日本第 14 次モニタリングでは東電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(福島県西部) 及び南側の一部(栃木県北西部、茨城県東部) を測定し、Bell430 (JA02AX) で南側 の一部(茨城県南部、千葉県北部) を測定し、Bell412 (JA412N) で中央の一部(福島県中央部)、西側(栃木県と群馬県の一帯) 及び南側(茨城県西部、埼玉県東部) を測定した。第 18 次モニタリング及び東日本第 14 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 18 次モニタリング：2023 年(令和 5 年)9 月 7 日～9 月 29 日(延べ 42 フライト)
- ・ 東日本第 14 次モニタリング：同年 9 月 20 日～10 月 18 日(延べ 47 フライト)

また、有人ヘリごとにフライトした距離や平均フライト速度、回数等をまとめた表を Table 5-1 に示す。測線上をフライトしたときに取得した GPS データを基に、ヘリコプターの飛行平均速度を算出したところ、全ての有人ヘリにおいて 4.2 節で示した速度の範囲内であった。東日本第 14 次モニタリングにおいて Bell412 (JA412N) 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 18 次モニタリングの期間中、9 月 11 日に S-76 (JA6901) にエンジンの点火不良が発生したためモニタリングを一時中断したものの、同日中に部品交換を行い翌日にはモニタリングを再開した。東日本第 14 次モニタリングの期間中、10 月 2 日に Bell412 (JA412N) が離陸した直後に、エンジン系統の異常を示すランプが点灯したため、モニタリングを中断した。エンジンオイルに不純物が混入したことが疑われたため、エンジンオイルタンクの洗浄及びエンジンオイルの交換を同日中に実施し、翌日にはモニタリングを再開した。また、10 月 2 日午前中のモニタリング中に Bell430 (JA05TV) でエンジン温度センサー異常が見られたため、モニタリングを一時中断した。部品交換等のメンテナンス作業を行い、10 月 7 日からモニタリングを再開した。10 月 17 日に同機体でテールロータのベアリング不良が検知されたためモニタリングを中断したものの、同日中に部品交換を行い、翌日にはモニタリングを再開した。

Table 5-1 第18次モニタリング及び東日本第14次モニタリングにおけるフライト実績

モニタリング名	実績					
	測線フライト距離 (km)	総飛行距離※ (km)	平均速度 (km/h)			
			Bell430 (JA05TV)	S-76 (JA6901)	Bell430 (JA02AX)	Bell412 (JA412N)
第18次モニタリング	8,395	16,770	153	152	142	
東日本第14次モニタリング	7,660	17,554	152		145	137

※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)		
	測定開始	測定終了	フライト回数
第18次モニタリング	2023年9月7日	2023年9月29日	24
東日本第14次モニタリング	2023年9月28日	2023年10月18日	18

モニタリング名	S-76 (JA6901)		
	測定開始	測定終了	フライト回数
第18次モニタリング	2023年9月7日	2023年9月19日	17
東日本第14次モニタリング			

モニタリング名	Bell430 (JA02AX)		
	測定開始	測定終了	フライト回数
第18次モニタリング	2023年9月20日	2023年9月20日	1
東日本第14次モニタリング	2023年9月20日	2023年9月25日	5

モニタリング名	Bell412 (JA412N)		
	測定開始	測定終了	フライト回数
第18次モニタリング			
東日本第14次モニタリング	2023年9月25日	2023年10月16日	24

モニタリング名	延べ フライト回数
第18次モニタリング	42
東日本第14次モニタリング	47

5.1.2.無人ヘリコプター

浜通り第1次無人ヘリモニタリングでは、東電福島原子力発電所を中心に測定エリアを北側(南相馬市、浪江町上空)と南側(富岡町、楡葉町上空)に分割し測定を行った。浜通り第1次無人ヘリモニタリングに要した期間は以下の通りである。また、詳細をTable 5-2に示す。第15回無人5km圏内無人ヘリモニタリングの詳細は、令和5年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策委託費(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⁴⁷⁾(本事業とは別事業)の報告書に記載されている。

[フライトに要した時間]

2023年(令和5年)11月13日～11月27日(内7日間)

無人航空機を運用する上で、第三者の上空を飛行させることは禁止されている。各自治体への事前説明と、各市町の広報誌に無人ヘリモニタリングの実施に関するチラシを同封し、住民周知を実施することで対応した。チラシのサンプル(楡葉町の例)をFig. 5-1に示す。

Table 5-2 浜通り第1次無人ヘリモニタリングにおけるフライト実績

日付	内容	場所
2023年11月13日	キャリブレーションフライト	北側(浪江町)
2023年11月14日	測線フライト	南側(楡葉町)
2023年11月16日	測線フライト	南側(富岡町、楡葉町)
2023年11月21日	測線フライト	北側(南相馬市、浪江町)
2023年11月22日	測線フライト	北側(南相馬市、浪江町)
2023年11月23日	測線フライト キャリブレーションフライト	北側(南相馬市、浪江町)
2023年11月27日	測線フライト	南側(富岡町、楡葉町)



Fig. 5-1 住民周知用のチラシのサンプル(楡葉町の例)

5.2. 第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリング

第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの結果を基に、地表面から 1 m の高さの空間線量率の分布状況を示した「空間線量率マップ」を Fig. 5-2 に示す。また、放射性 Cs の沈着量 (Cs-137 及び Cs-134 の合計量) の状況を示した「放射性 Cs 沈着量マップ」を Fig. 5-3 に示す。また Cs-137 及び Cs-134 の沈着量マップを Fig. 5-4 及び Fig. 5-5 にそれぞれ示す。放射性 Cs の沈着量マップについては前述したように、第 18 次モニタリングと浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングでは $\beta = 1.0$ (g/cm²) としたときの換算係数を使用したため、誤差を多分に含む可能性があることに留意する必要がある。なお、空間線量率及び放射性 Cs の沈着量は、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングを実施した最終日である 2023 年 (令和 5 年) 11 月 27 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⁵⁹⁾を参考に、除染基準である空間線量率 0.23 μ 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 μ Sv/h = 約 100 mSv/年 相当
- ・ 9.5 μ Sv/h = 約 50 mSv/年 相当
- ・ 1.9 μ Sv/h = 約 10 mSv/年 相当
- ・ 1.0 μ Sv/h = 約 5.0 mSv/年 相当
- ・ 0.5 μ Sv/h = 約 2.5 mSv/年 相当
- ・ 0.2 μ Sv/h = 約 1.0 mSv/年 相当
- ・ 0.1 μ 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⁶⁰⁾。この濃度の放射能が 5 cm までに沈着している水田の土壌を面積 10,000 cm²、深さ 15 cm まで採取し、攪拌した場合の濃度を計算すると、約 1,000 kBq/m²となる。この時、深さ 15 cm までの土壌の体積は密度 1.3 kg/L とした ($150 \text{ L/m}^2 \times 1.3 \text{ kg/L} \times 5,000 \text{ Bq/kg} = 975,000 \text{ Bq/m}^2 \approx 1,000 \text{ kBq/m}^2$)。

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

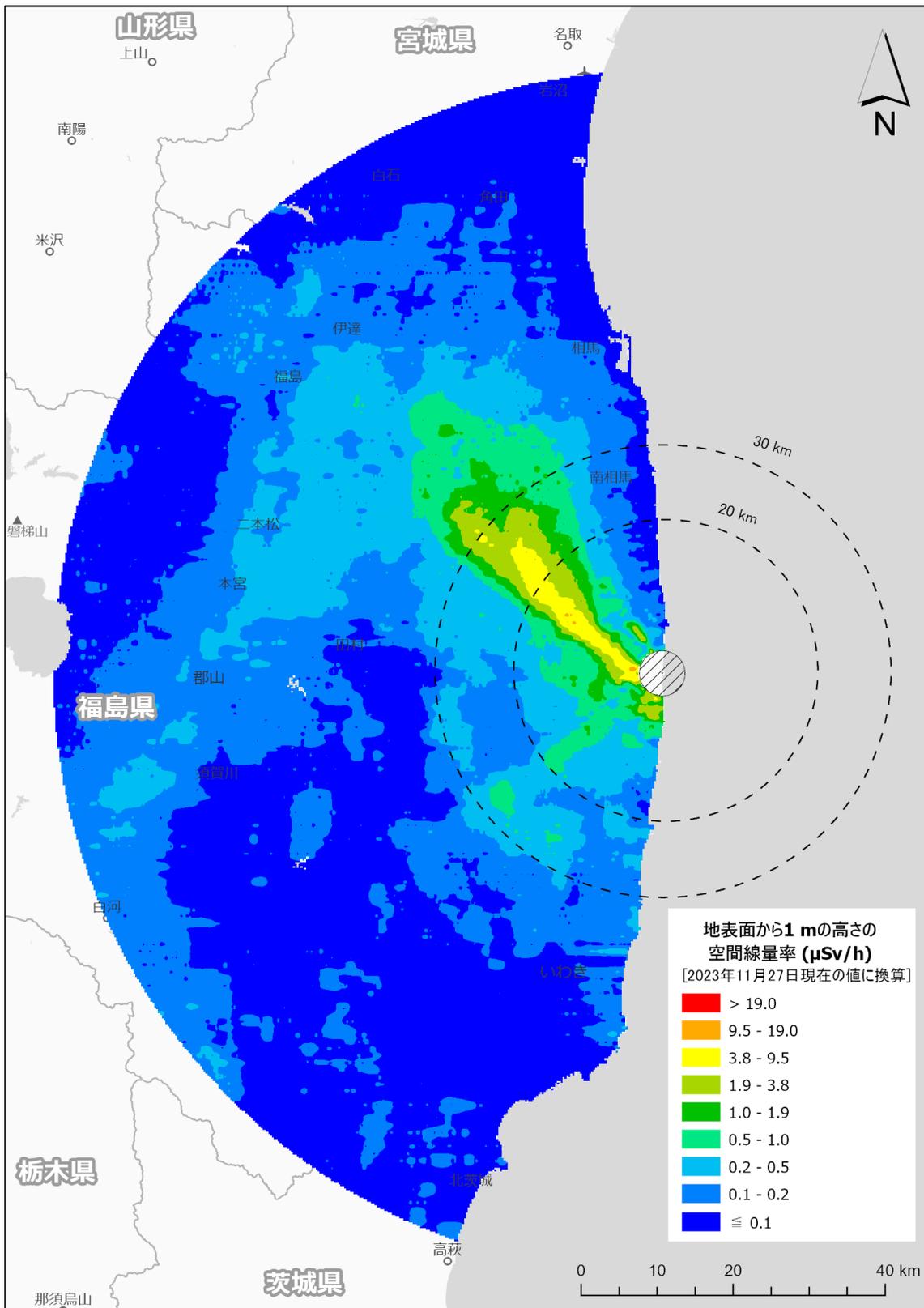


Fig. 5-2 第18次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングにおける空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

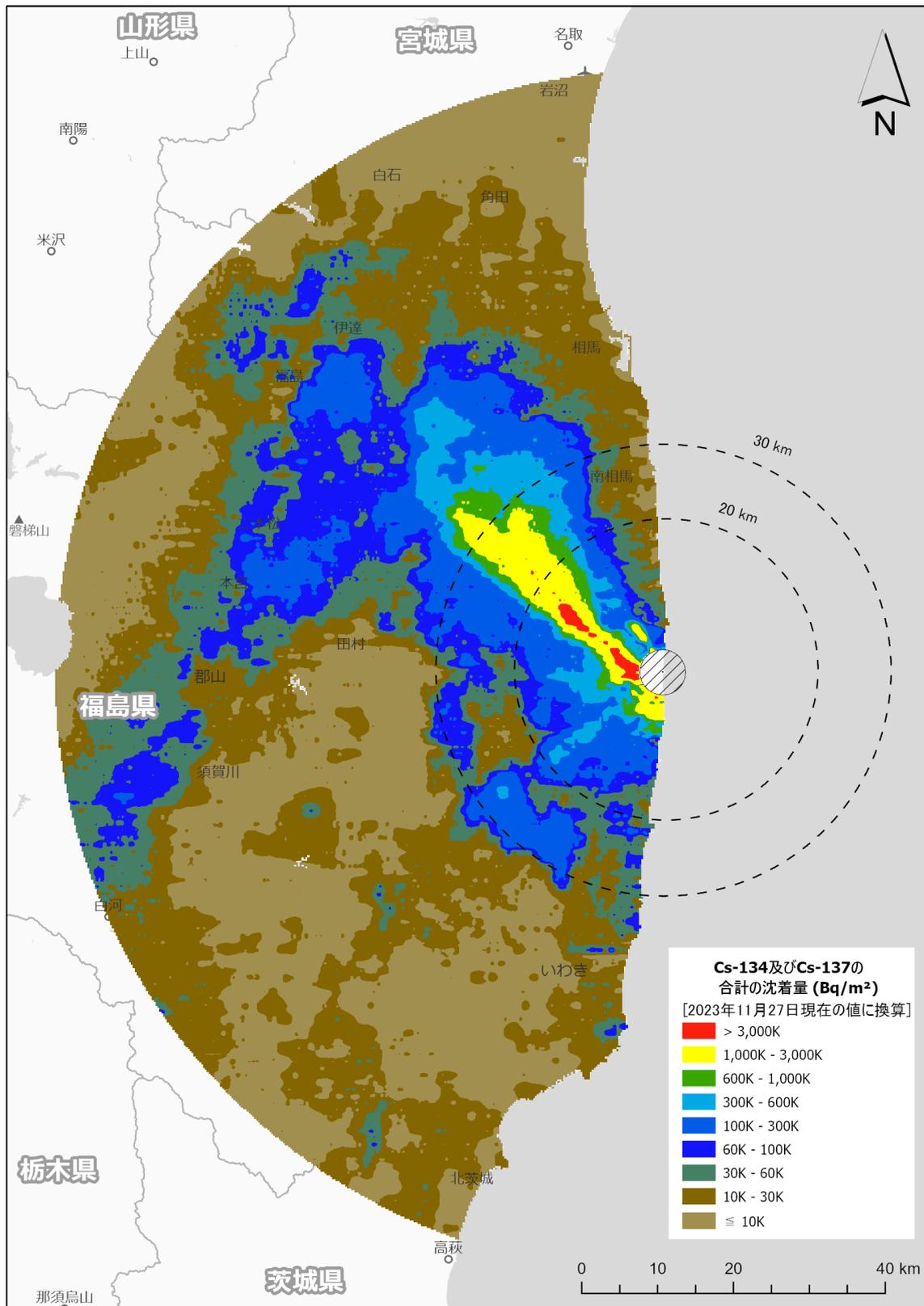


Fig. 5-3 第18次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングにおける放射性Cs沈着量マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

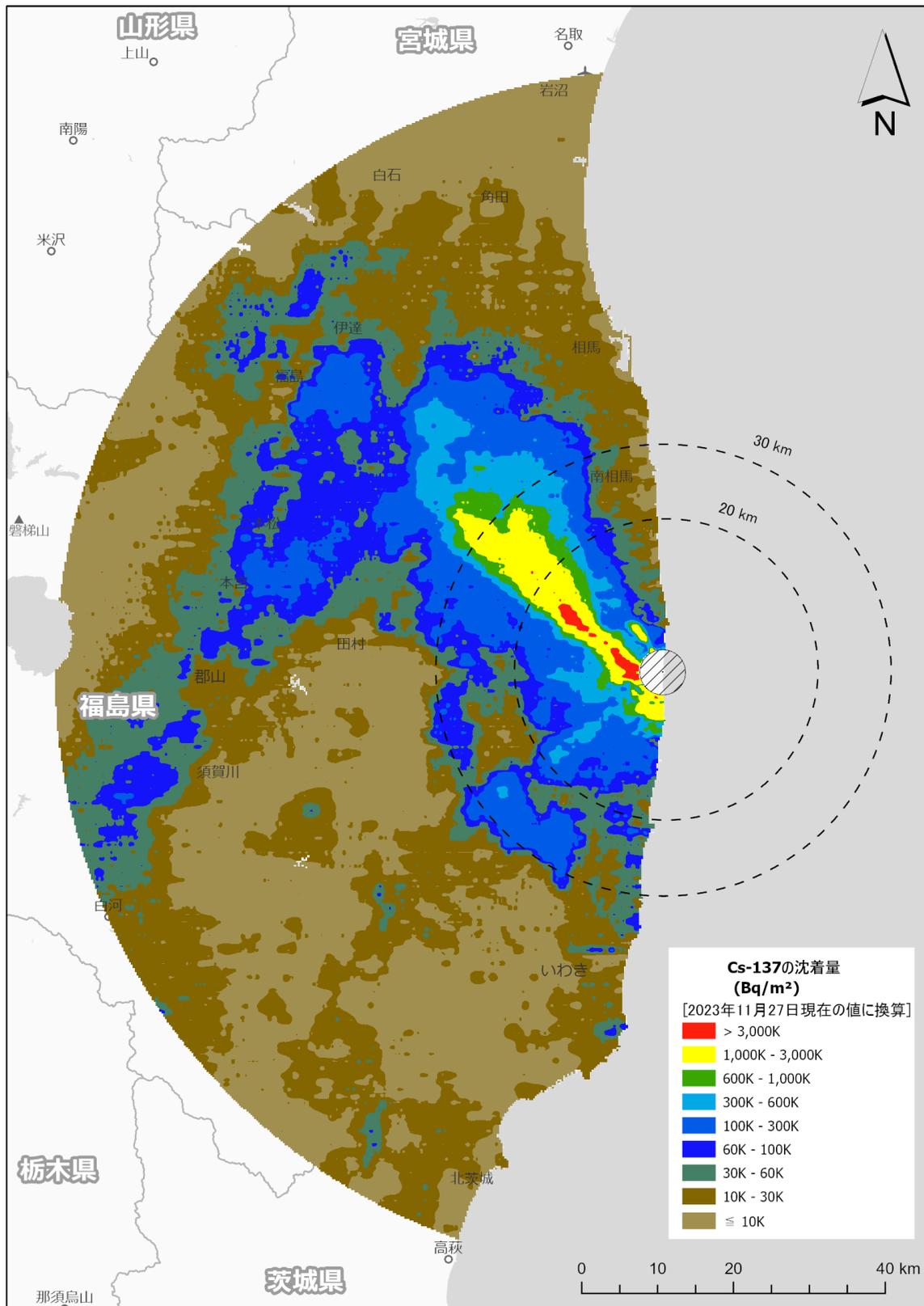


Fig. 5-4 第18次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングにおけるCs-137沈着量マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

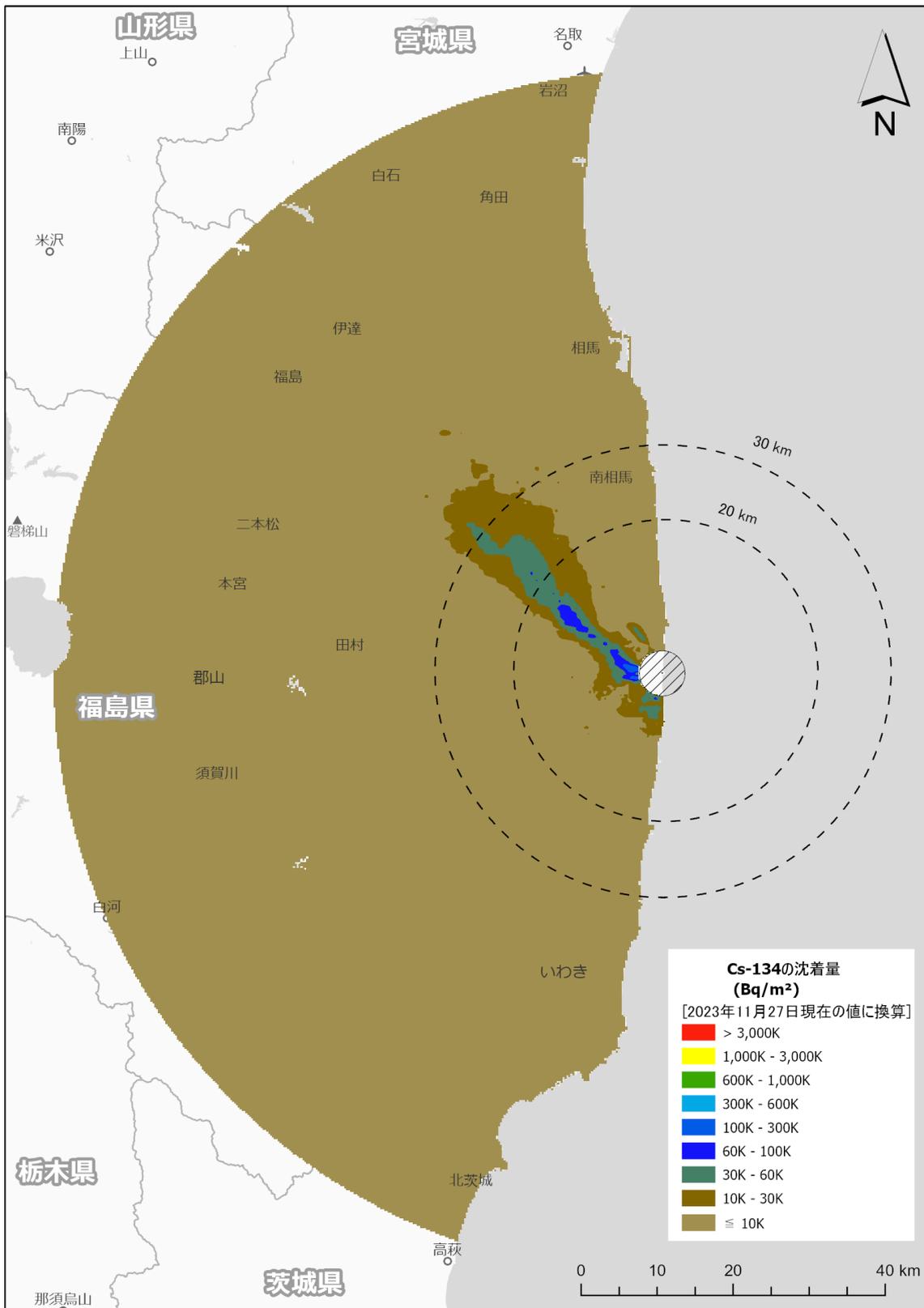


Fig. 5-5 第18次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングにおけるCs-134沈着量マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

5.3. 東日本第 14 次モニタリング

東日本第 14 次モニタリングの結果を基に、地表面から 1 m の高さの空間線量率の分布状況を示した「空間線量率マップ」を Fig. 5-6 に示す。また、放射性 Cs の沈着量 (Cs-137 及び Cs-134 の合計量) の状況を示した「放射性 Cs 沈着量マップ」を Fig. 5-7 に示す。また、Cs-137 及び Cs-134 の沈着量マップを Fig. 5-8 及び Fig. 5-9 にそれぞれ示す。空間線量率及び放射性 Cs の沈着量は、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング実施した最終日である 2023 年 (令和 5 年) 11 月 27 日現在の値に減衰補正した。

また、東電福島原子力発電所から 80 km 圏内のモニタリングデータとの整合性を確認するために、第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングと東日本第 14 次モニタリングで取得した全データを統合し、同年 11 月 27 日現在の値に減衰補正しマッピングした。全モニタリングデータを統合した「空間線量率マップ」及び「放射性 Cs 沈着量マップ」を Fig. 5-10 及び Fig. 5-11 にそれぞれ示す。また、Cs-137 及び Cs-134 の沈着量マップを Fig. 5-12 及び Fig. 5-13 にそれぞれ示す。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. 5-14 に示す。空間放射線量率の分布を見ると新潟県と福島県の県境に天然の放射線量が高い場所が存在する。ここは、帝釈山地という花崗岩の分布地帯として知られた場所であり、過去に日本全国の空間線量率を航空機モニタリングにより計測した結果⁵⁹⁾でも、この近辺の空間放射線量率は比較的高いことが見出されている。天然放射性核種由来の空間放射線量率は、地すべり等の大きな地形の変化がなければ測定年度ごとに変化しないと考えられ、過去のデータと比較して同様な結果が得られていることを確認することは解析結果の妥当性を表すものと考えられる。そこで、天然放射性核種起源の空間放射線量率の解析手法が導入された 2014 年 (平成 26 年) から 2022 年 (令和 4 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. 5-15 に示す。このように、各年度で天然放射性核種由来の空間放射線量率マップが顕著に異なることはなく、本手法により全計数率から放射性 Cs に起因する計数率が適切に除外できていることが示唆される。

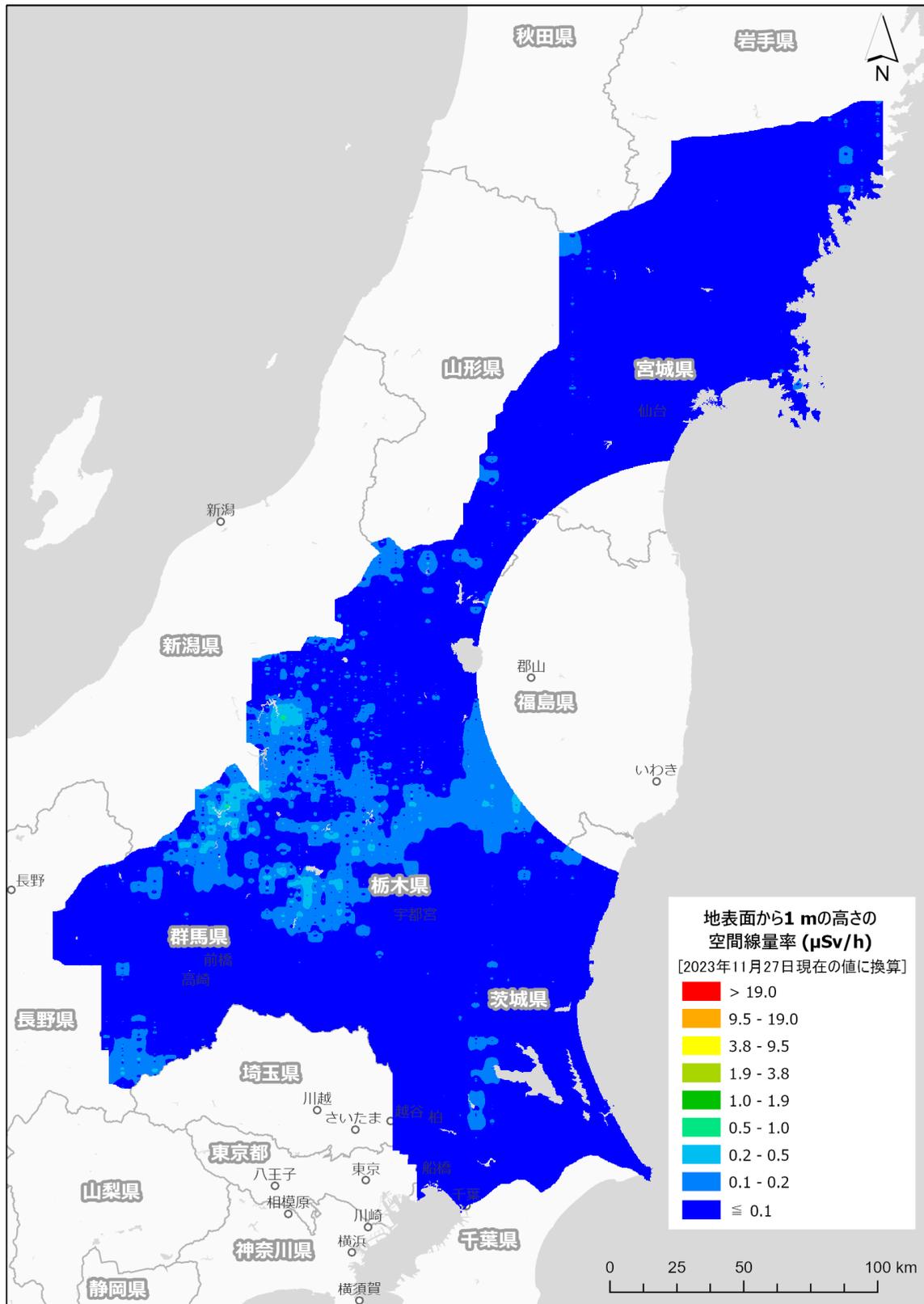


Fig. 5-6 東日本第14次モニタリングにおける空間線量率マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。

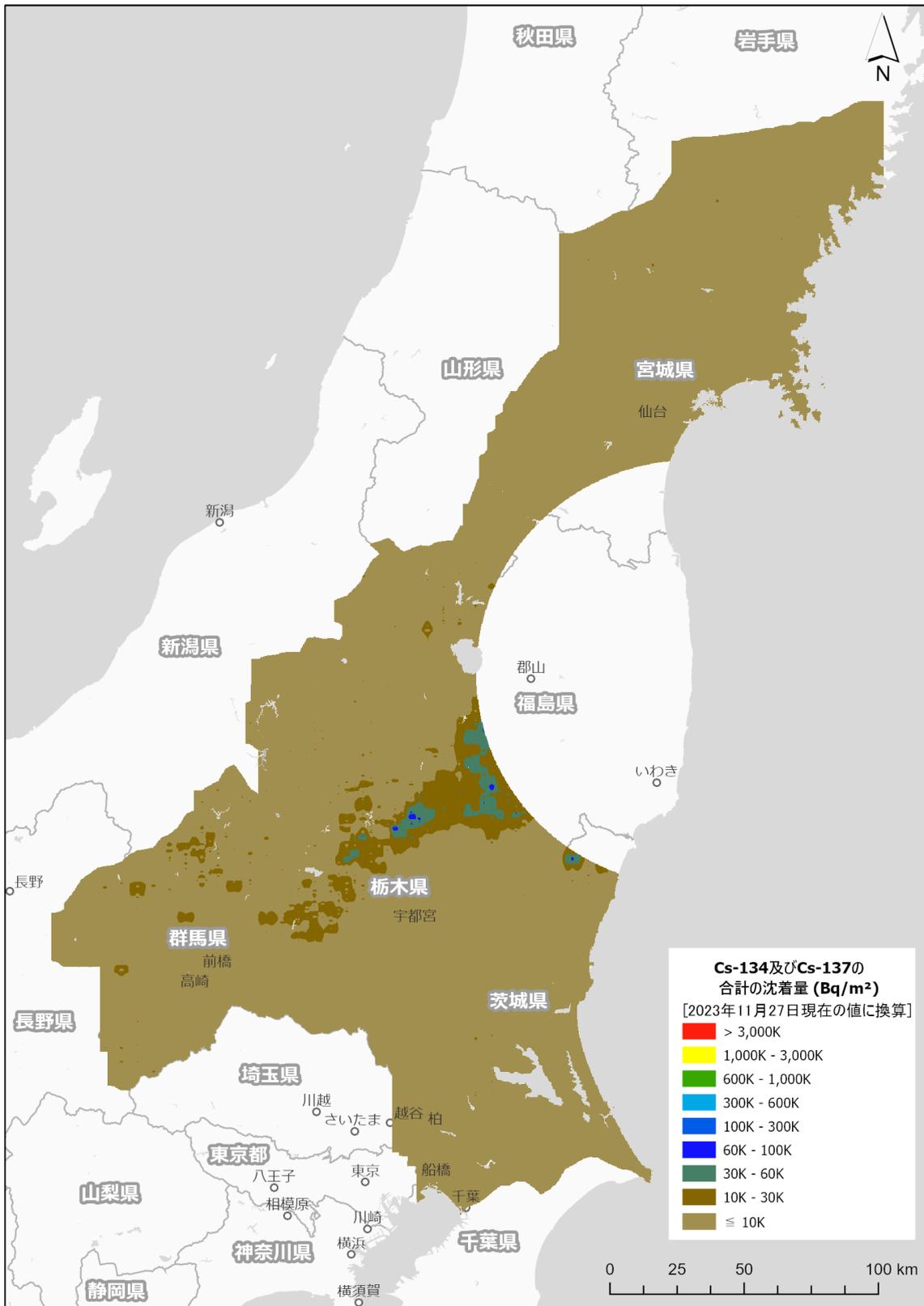


Fig. 5-7 東日本第14次モニタリングにおける放射性Cs沈着量マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

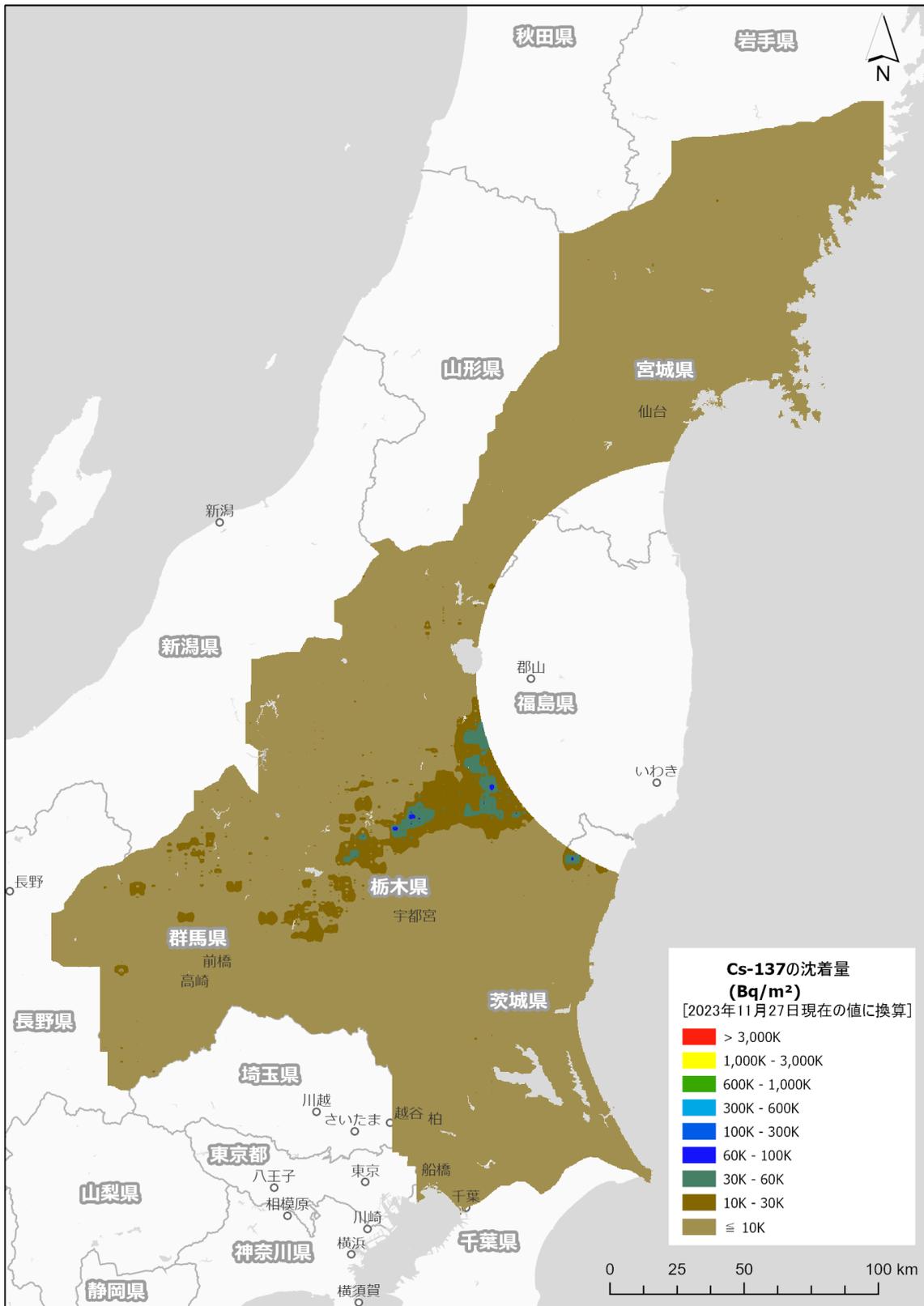


Fig. 5-8 東日本第14次モニタリングにおけるCs-137沈着量マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

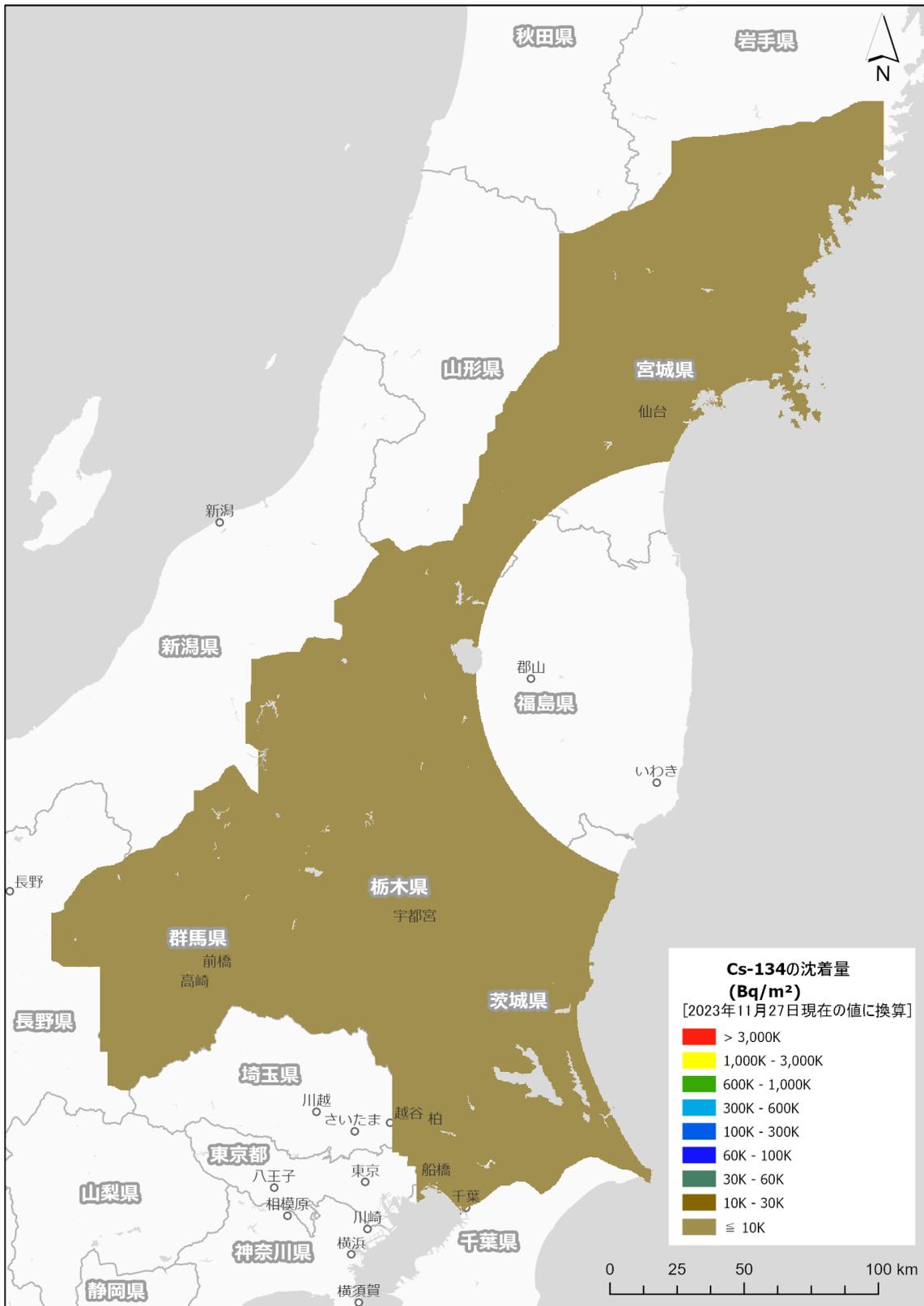


Fig. 5-9 東日本第14次モニタリングにおけるCs-134沈着量マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

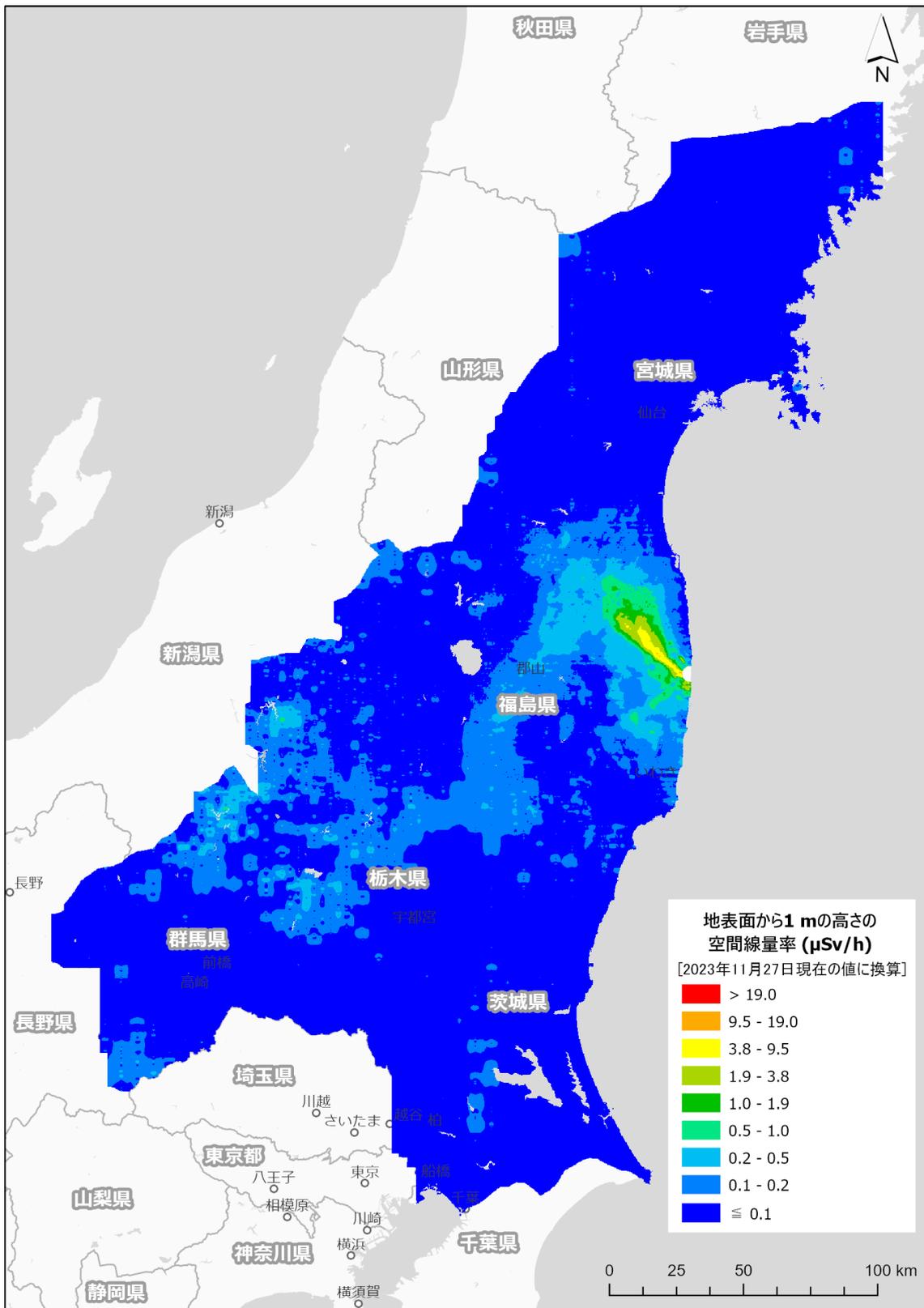


Fig. 5-10 第18次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km 圏内無人ヘリモニタリングと東日本第14次モニタリングにおける空間線量率マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

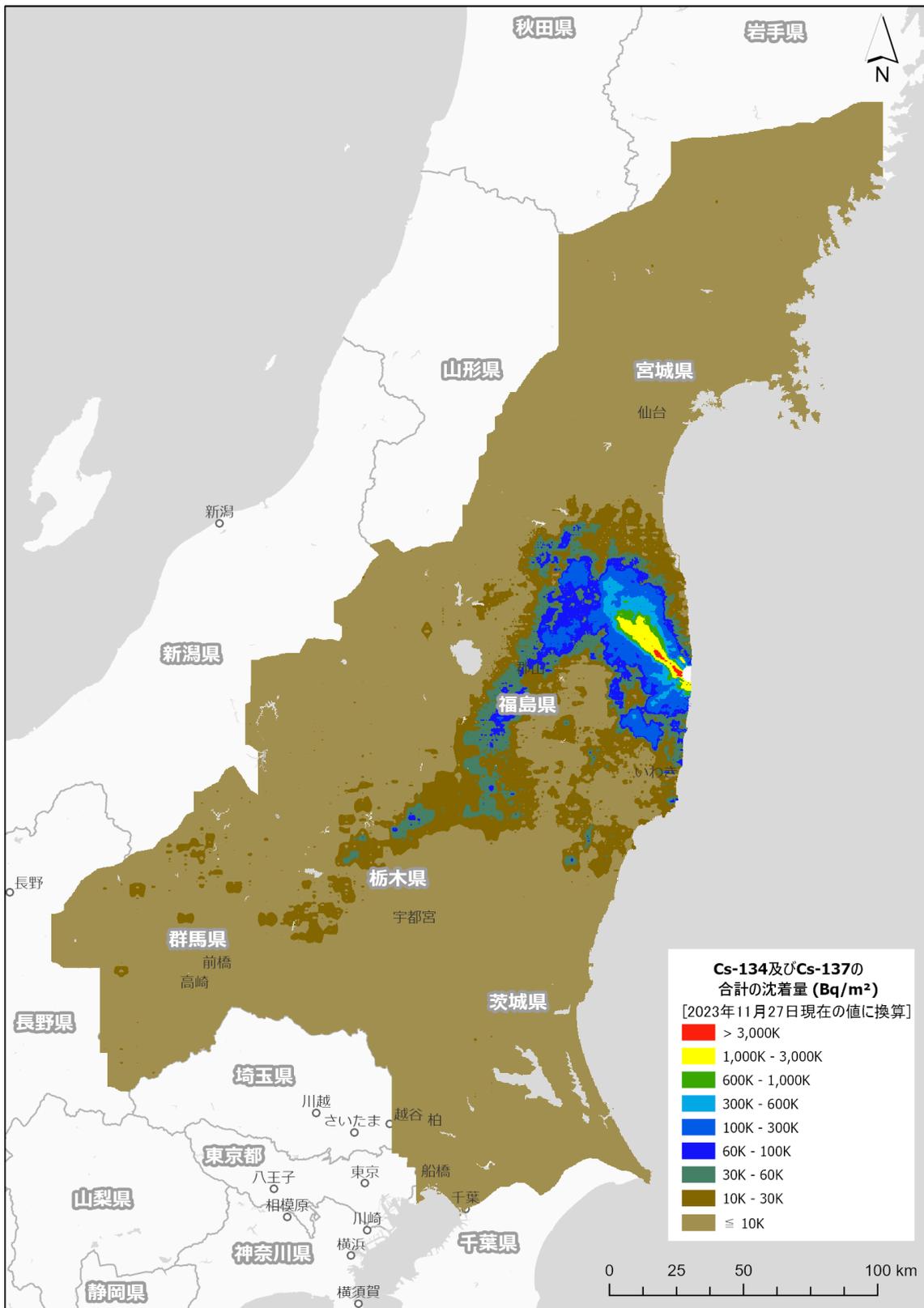


Fig. 5-11 第18次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km 圏内無人ヘリモニタリングと東日本第14次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

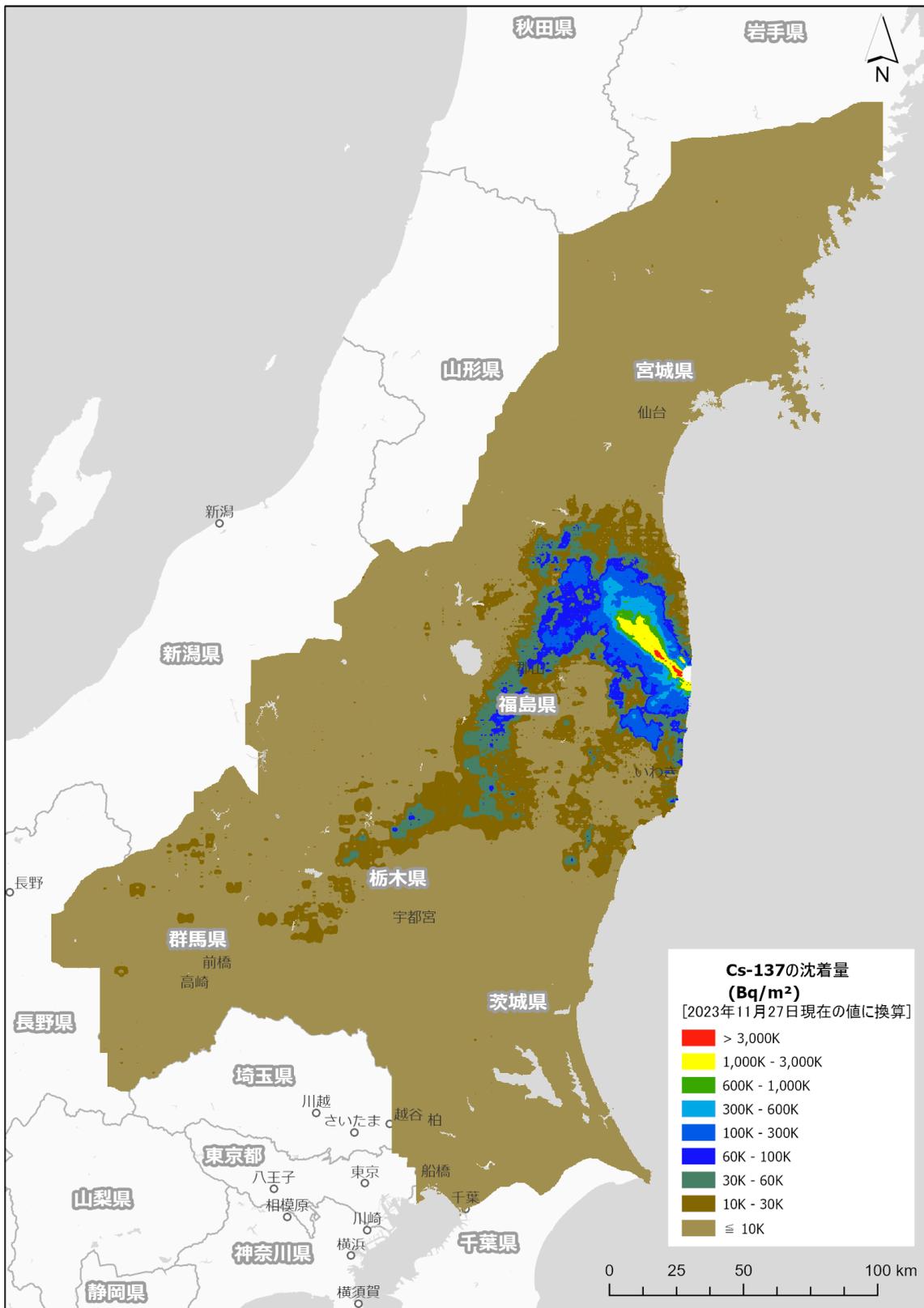


Fig. 5-12 第18次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km 圏内無人ヘリモニタリングと東日本第14次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

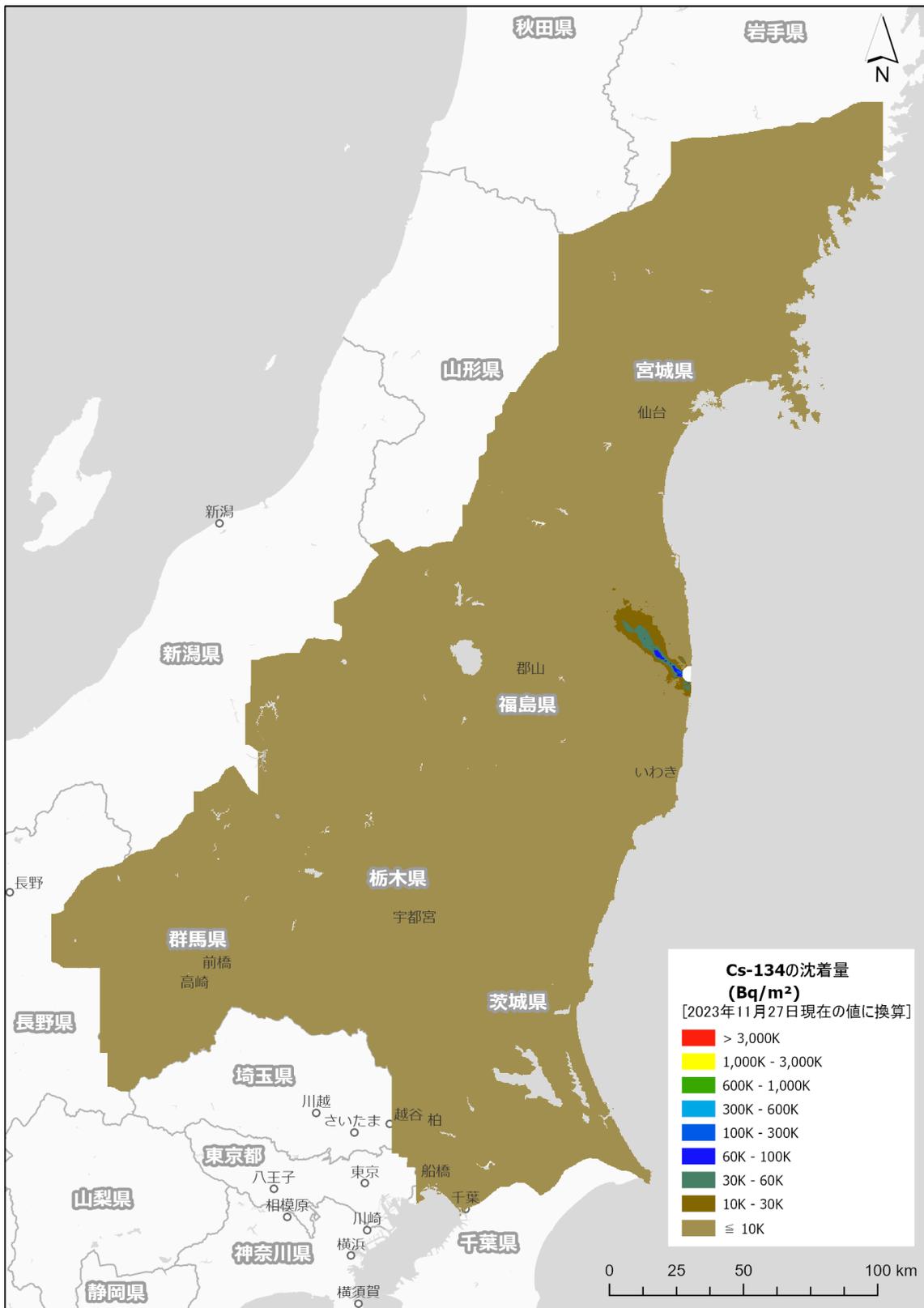


Fig. 5-13 第18次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km 圏内無人ヘリモニタリングと東日本第14次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

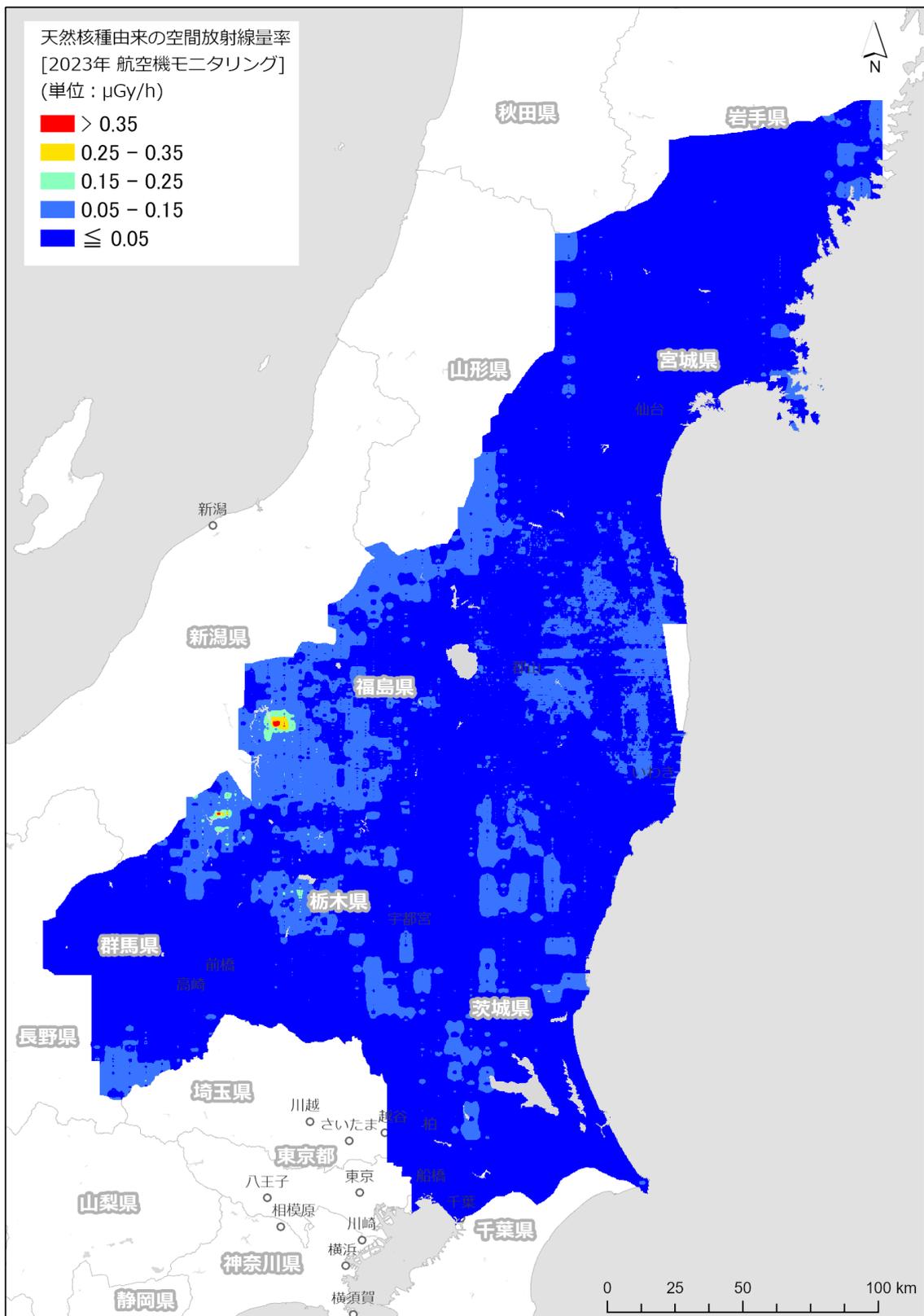
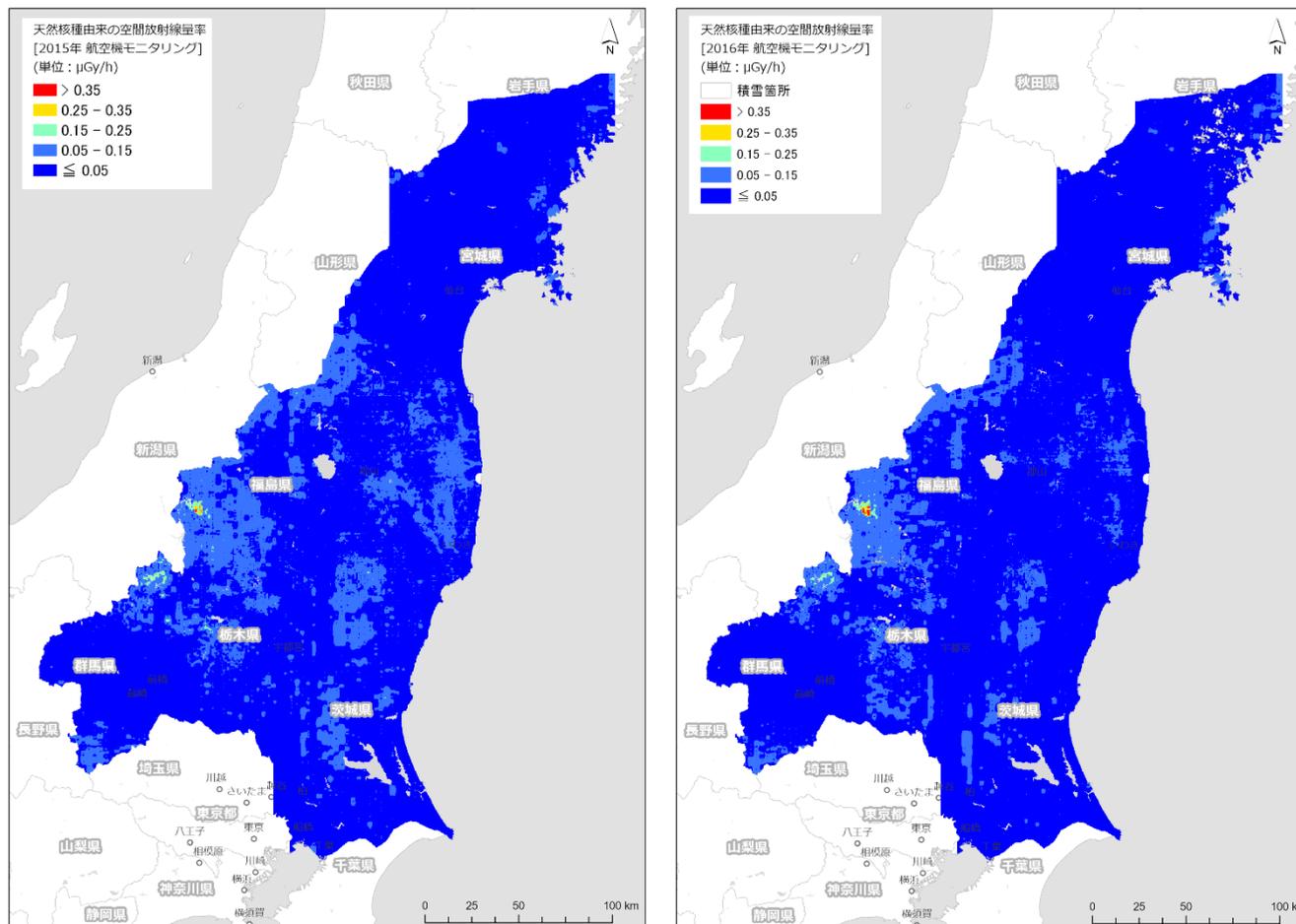


Fig. 5-14 第 18 次モニタリング及び東日本第 14 次モニタリングにおける天然放射性核種由来の自然放射線量率マップ

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



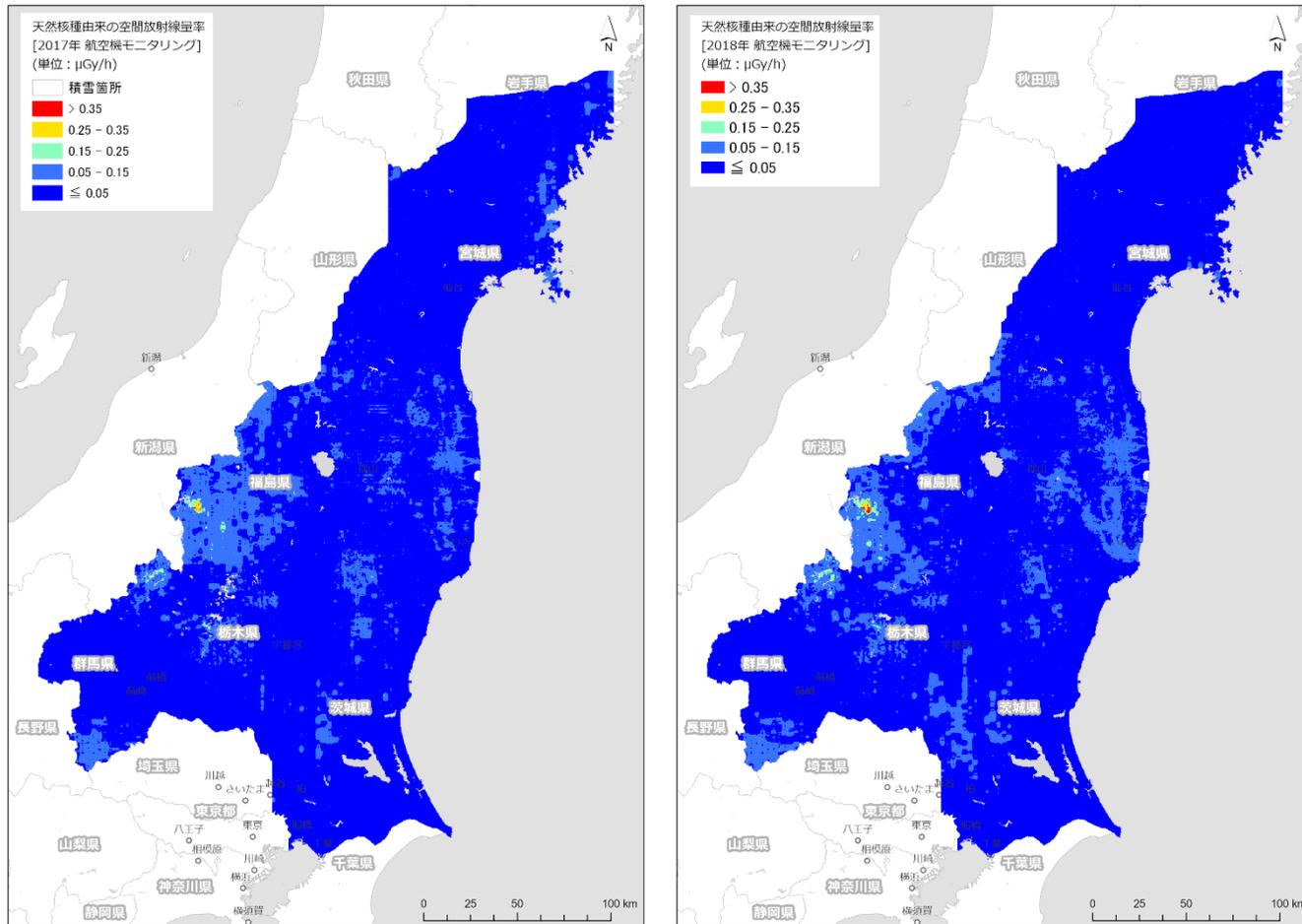
2015 年度

2016 年度

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

(1/4)

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



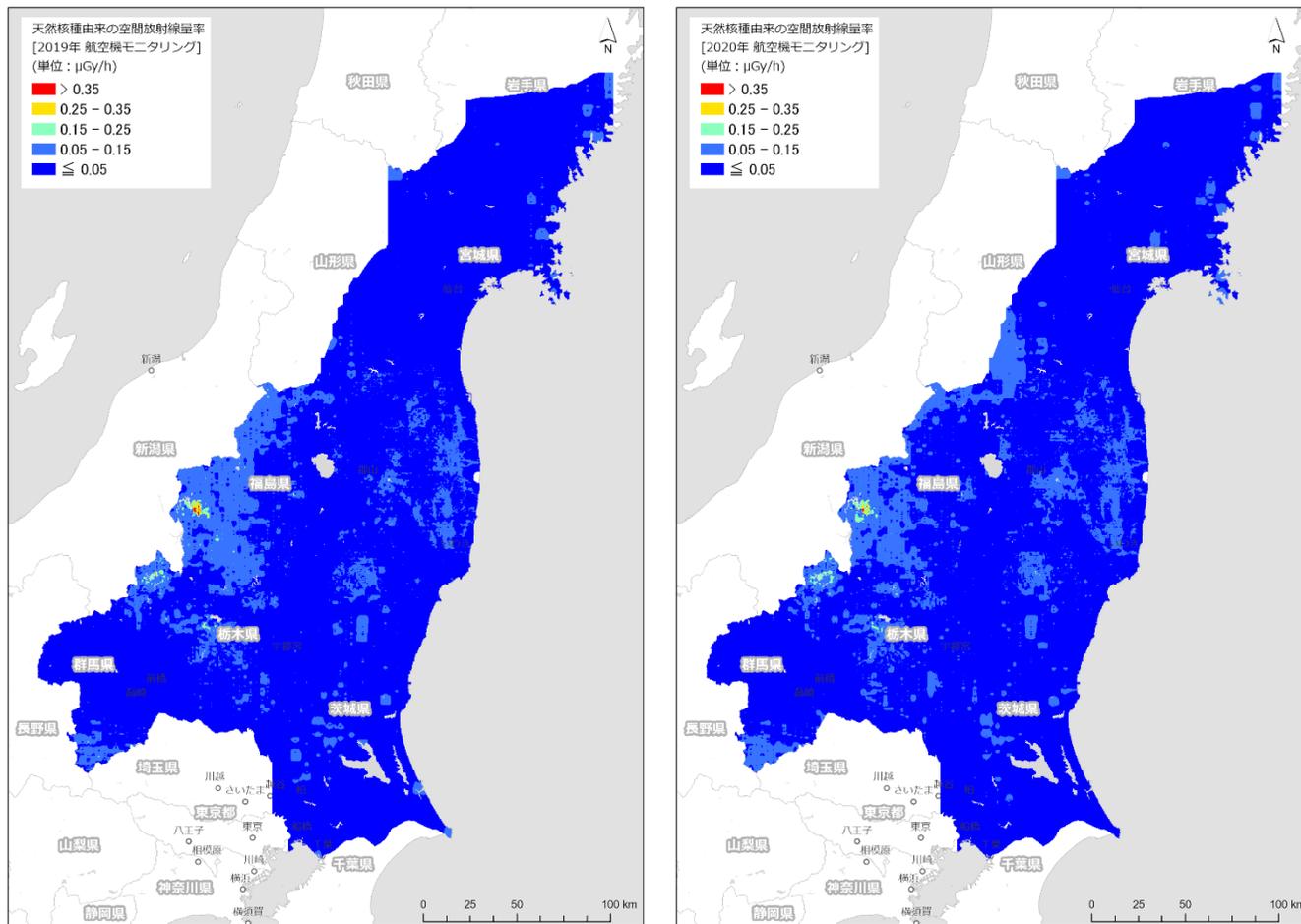
2017年度

2018年度

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

(2/4)

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



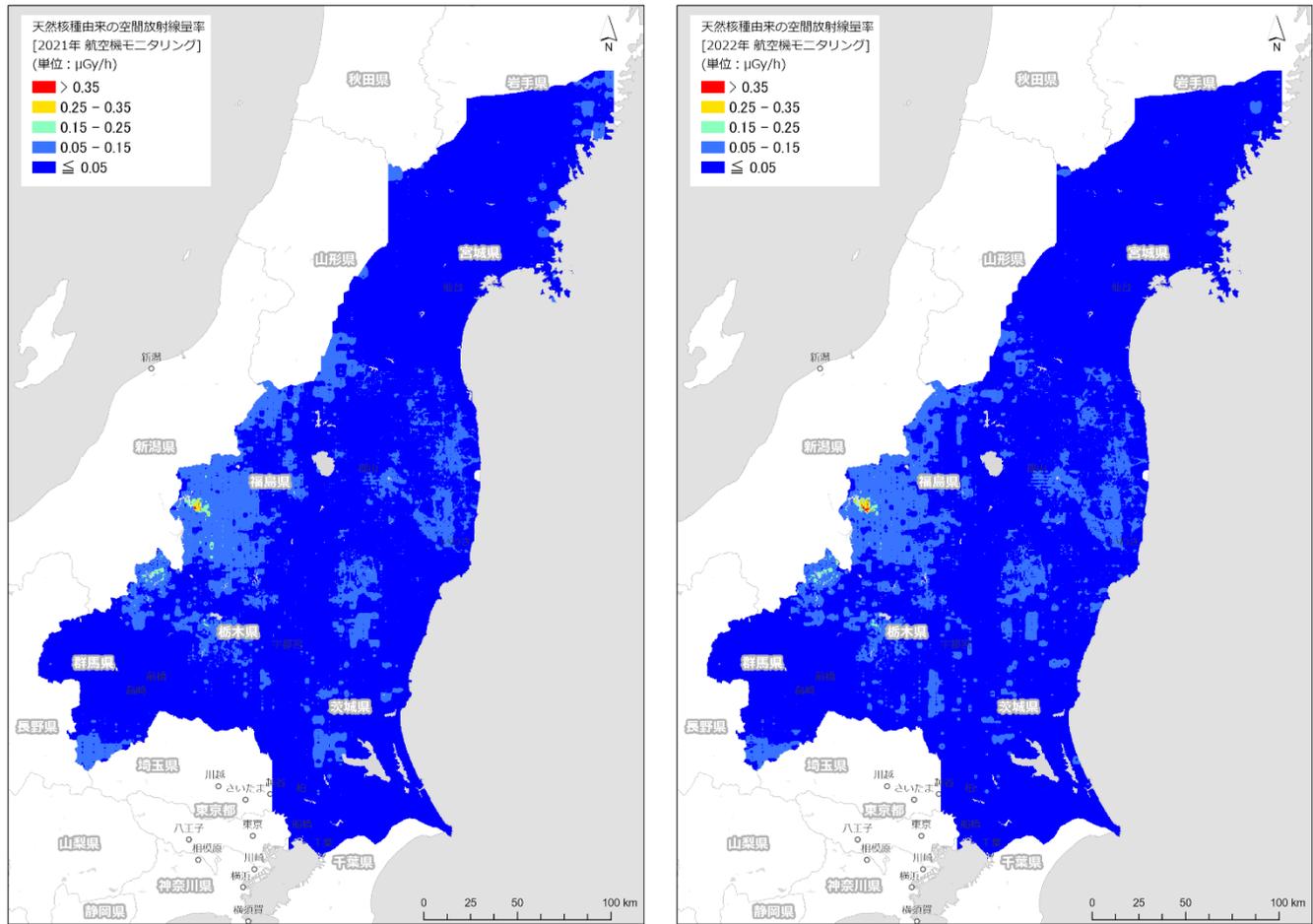
2019年度

2020年度

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

(3/4)

(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 年度

2022 年度

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

(4/4)

6. 有人ヘリ及び無人ヘリモニタリング結果の考察

6.1. 過去の有人ヘリモニタリング結果との比較

これまでの東電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 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリング時点では 24.1%まで減少した。第 17 次モニタリング時点から 0.2 $\mu\text{Sv/h}$ ~0.5 $\mu\text{Sv/h}$ の面積が 1%程度増加しているが、これは第 18 次モニタリングの範囲で見られた。2023 年度(令和 5 年度)より、東電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に無人ヘリモニタリングを導入したことに伴い、有人ヘリモニタリングの経路が一部変更された。この変更により、従前には飛行していなかった領域で測定データが取得されたことに起因し、第 17 次モニタリング時点から空間線量率が見かけ上増加した可能性が高い。なお、2023 年度(令和 5 年度)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北西端の極一部と南端、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、二本松市の中央部一帯、福島市の中央部及び南東部、南相馬市の北西部から南西部の一帯、本宮市の中央部以東及び西端の極一部、伊達郡川俣町のほとんど全域、伊達郡国見町の西部、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及び西部の極一部、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、双葉郡大熊町のほとんど全域、双葉郡富岡町のほとんど全域、双葉郡浪江町の東端部を除くほとんど全域、双葉郡檜葉町の北部一帯と南西部及び南部中央、双葉郡広野町の中央部以外、双葉郡双葉町のほとんど全域、安達郡大玉村の東端部、岩瀬郡天栄村の東部、西白河郡西郷村の東端部の極一部、双葉郡飯舘村の全域、双葉郡葛尾村の全域及び双葉郡川内村の中央部以外が含まれる。

次に、第 4 次モニタリングと 2023 年度(令和 5 年度)に実施した東電福島原子力発電所から 80 km 圏内における有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングを統合した全データとの比較結果を散布図として Fig. 6-2 に示す。本図に示した回帰直線の傾きを、東電福島原子力発電所から 80 km 圏内における空間線量率の全体平均的な減少傾向として捉えることができる。また、本図中には重量

緩衝深度 (β) を 1.0 g/cm^2 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。このように有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングの測定結果は、物理的半減期に基づく理論値よりも大きく減少する傾向を示す。一方、東電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 $0.2 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ 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。そこで、2011 年 9 月 30 日時点の避難指示区域 (以下、旧避難指示区域) における有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングの結果を抽出し、空間線量率が比較的高い領域のデータを用いて比較を行うこととした。旧避難指示区域における、これまでのモニタリング結果について Fig. 6-3 に示す。次に、旧避難指示区域における空間線量率の減少傾向を定量的に把握するため、各モニタリングにおける空間線量率マップのメッシュ中心点の比を算出することで比較を行った。ここで、最小二乗法による近似は数値の大きな結果に影響を受けやすいため、より適切に変化率を評価できる方法として、空間線量率の相対減少率をヒストグラムとして表示した。Fig. 6-3 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 (例えば、(第 18 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 4 次モニタリングと第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングとの空間線量率の比較を Fig. 6-4 に、同様に 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 の散布図において、第 4 次モニタリングによる Cs-137 の沈着量が 100 kBq/m^2 であった領域の前後で、第 18 次モニタリング及び浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングによる Cs-137 の沈着量が急激に減少するような傾向が見られた。

第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングについては、第 4 次モニタリングによる Cs-137 の沈着量が $1,000 \text{ kBq/m}^2$ であった領域の前後で同様の傾向が見られた。これは、空間線量率は全計数率から宇宙線、空気中ラドン子孫核等に起因するバックグラウンド計数率を差し引いてから換算しているのに対し、Cs-137 の沈着量はこれらに加えて天然放射性核種由来のバックグラウンド計数率を差し引いてから換算しているため、計数誤差が相対的に大きくなることが一因として考えられるが、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、有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングで Cs-137 の沈着量を正確に評価するのは困難であることが示唆される。しかしながら、両者のヒストグラムとも平均値と中央値がほとんど同値であり、正規分布に近いといえる。各ヒストグラムの相対変化率の平均値を指標とすると、第 4 次モニタリングが行われた 2011 年 (平成 23 年) 11 月から、空間線量率については相対変化率が約 $80\% \sim 90\%$ 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 $50\% \sim 70\%$ と評価されたが、第 18 次モニタリング及び浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングでは、東電福島原子力発電所事故からの経過日数に伴う β の変化と土地利用区分による β の違いを考慮せずに $1.0 \text{ (g/cm}^2)$ として一律に固定しているため、本節で示した相対変化率には、ある程度の不確かさが伴うことに留意する必要がある。

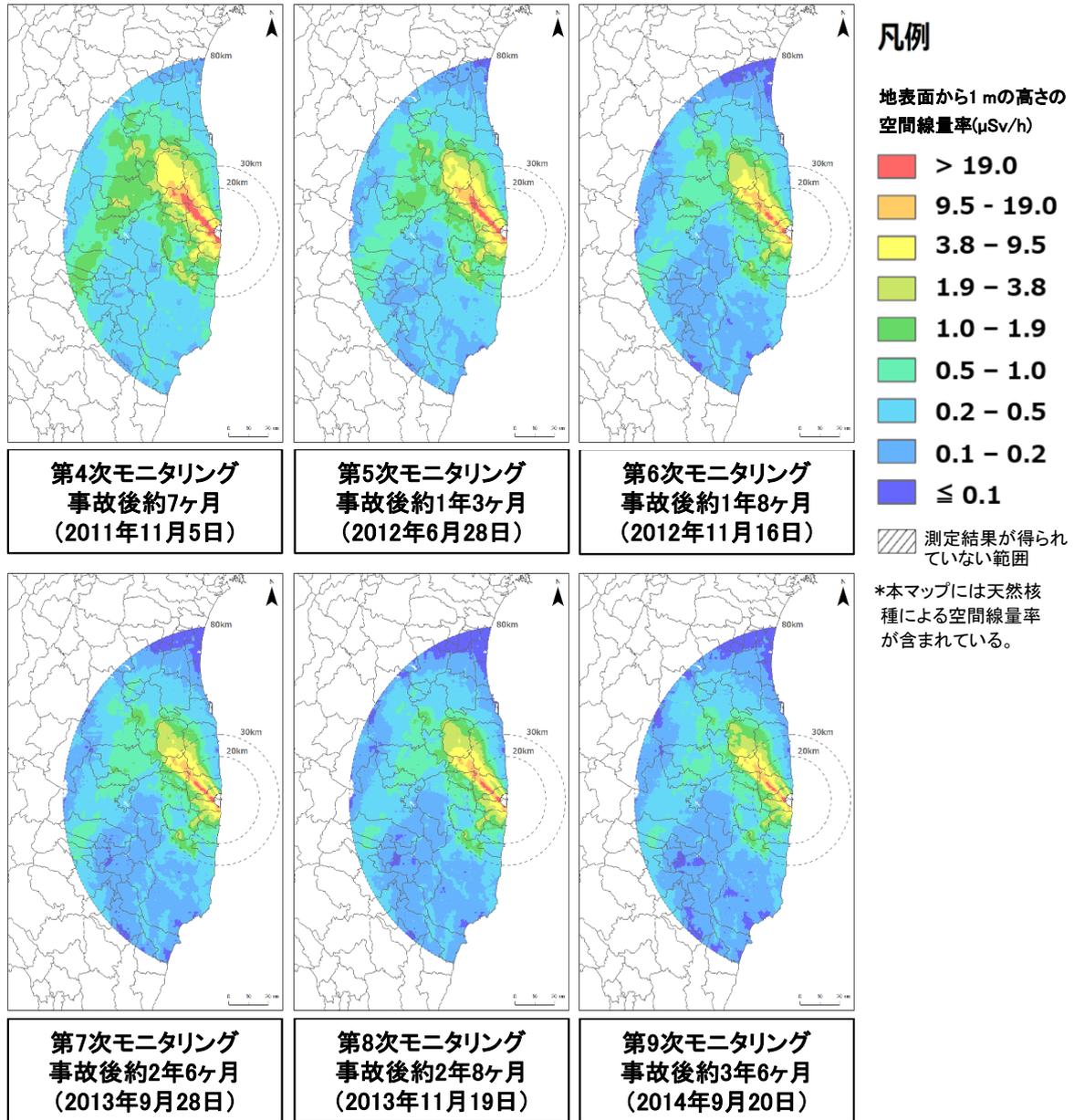


Fig. 6-1 東電福島原子力発電所から 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較

(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。)

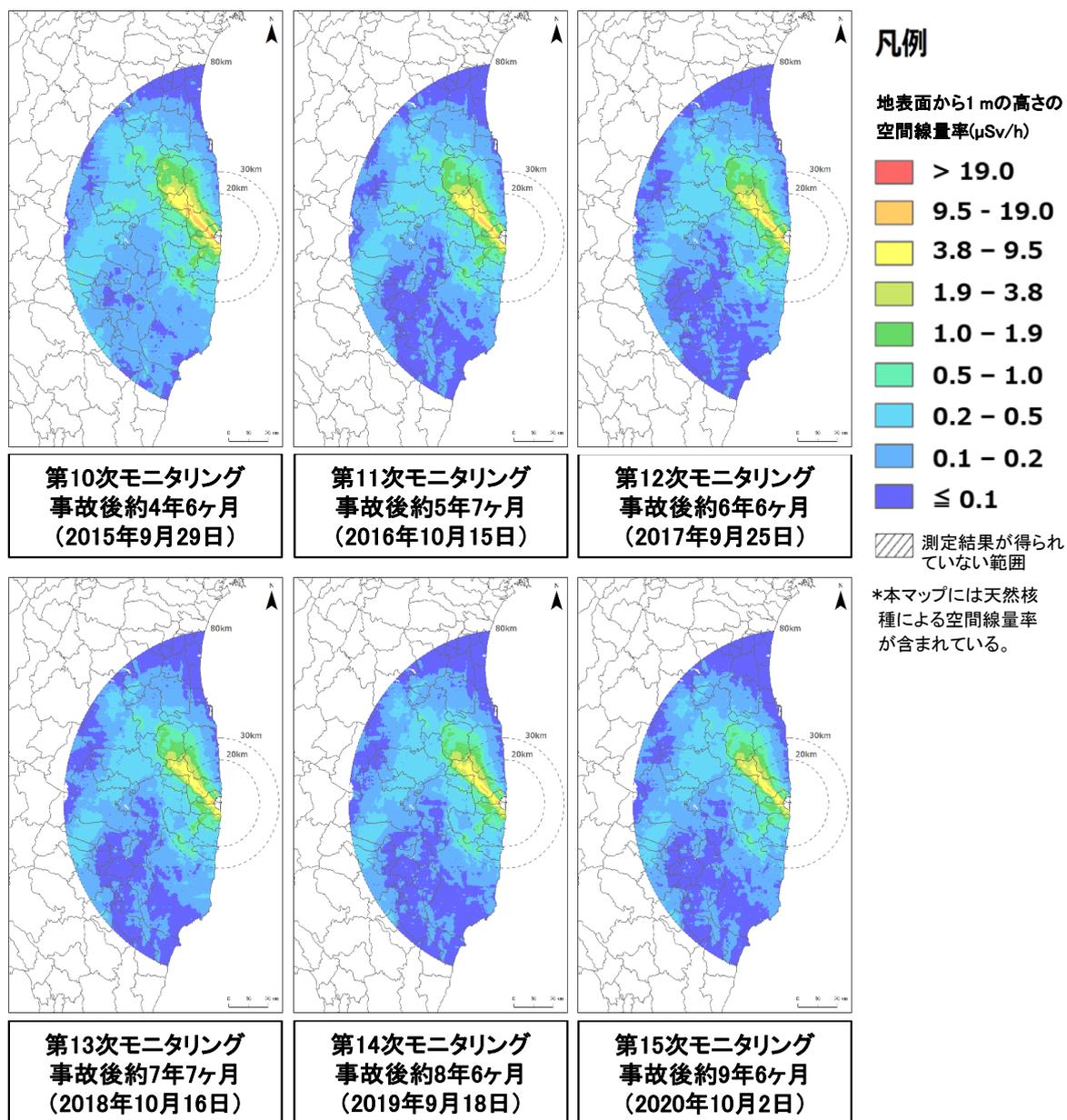


Fig. 6-1 東電福島原子力発電所から 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較

(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。)

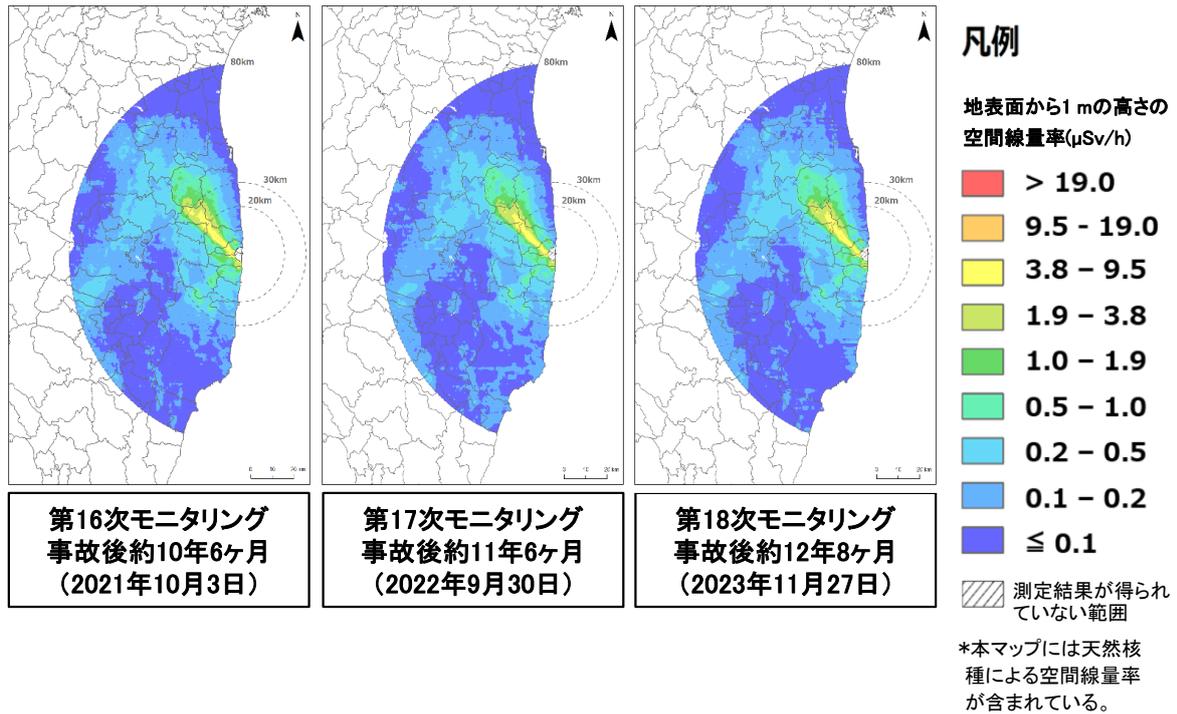


Fig. 6-1 東電福島原子力発電所から 80 km 圏内における過去の空間線量率マップの比較

(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 東電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6ヶ月	第15次モニタリング 事故後約9年6ヶ月	第16次モニタリング 事故後約10年6ヶ月	第17次モニタリング 事故後約11年6ヶ月	第18次モニタリング 浜通り第1次無人ヘリモニタリング 第15回5 km圏内無人ヘリモニタリング 事故後約12年8ヶ月
> 19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9.5 - 19	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	
3.8 - 9.5	1.2	1.1	1.0	0.8	0.8	0.6	0.6	
1.9 - 3.8	1.7	1.6	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	
1.0 - 1.9	3.0	2.6	2.2	2.1	1.9	1.6	1.6	
0.5 - 1.0	5.6	5.0	5.0	4.7	4.5	4.2	4.2	
0.2 - 0.5	24.5	23.3	22.3	21.2	18.1	15.4	16.3	
0.1 - 0.2	34.9	36.7	35.4	38.3	32.5	37.2	34.3	
≤ 0.1	28.9	29.5	32.4	31.4	40.8	39.7	41.6	
合計	100	100	100	100	100	100	100	
0.2を上回る割合	36.2	33.7	32.2	30.3	26.8	23.1	24.1	

※面積の合計値は約8,923 km²である。

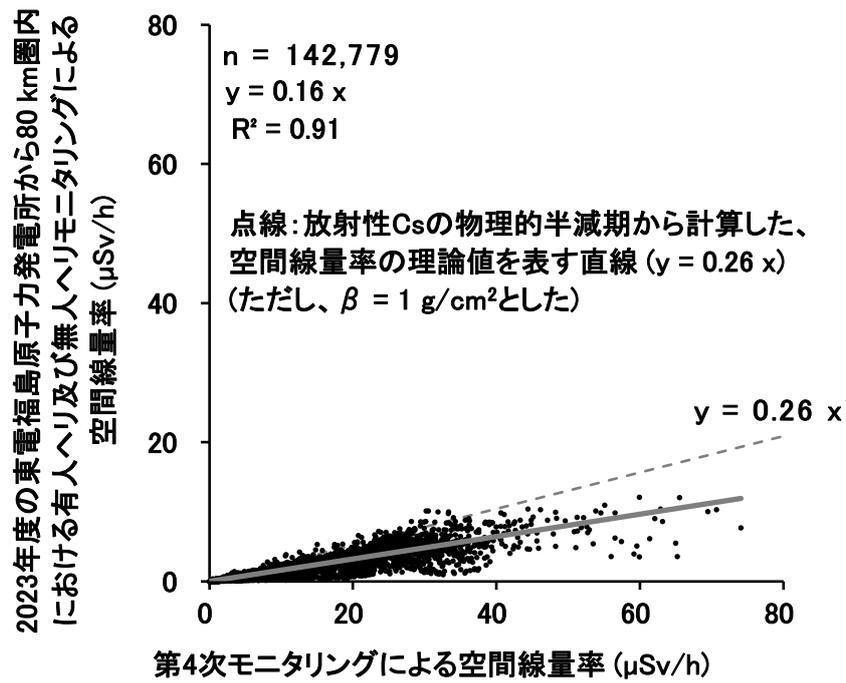


Fig. 6-2 第4次モニタリング及び2023年度の有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングによる空間線量率算出結果の比較

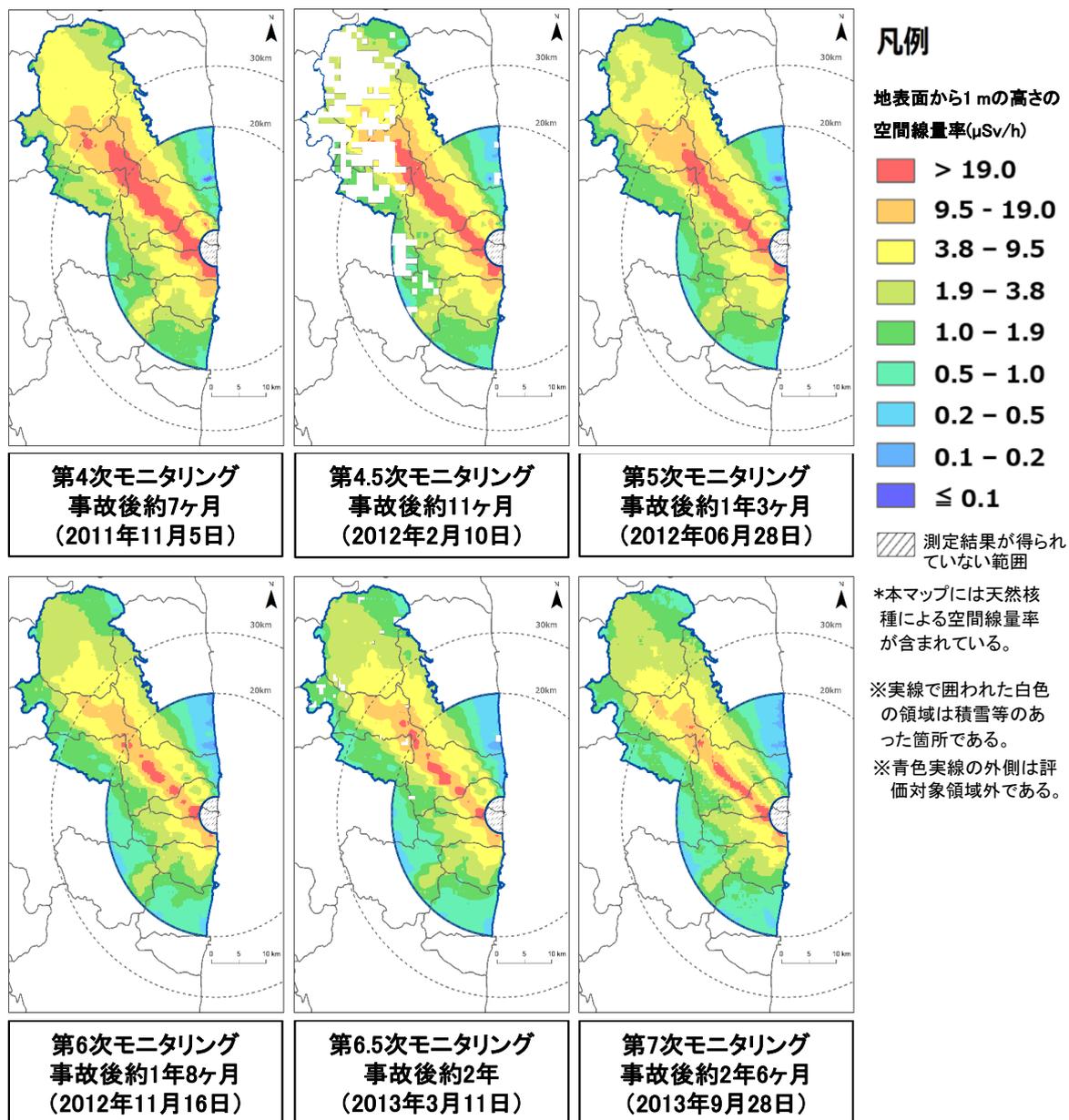


Fig. 6-3 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(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。)

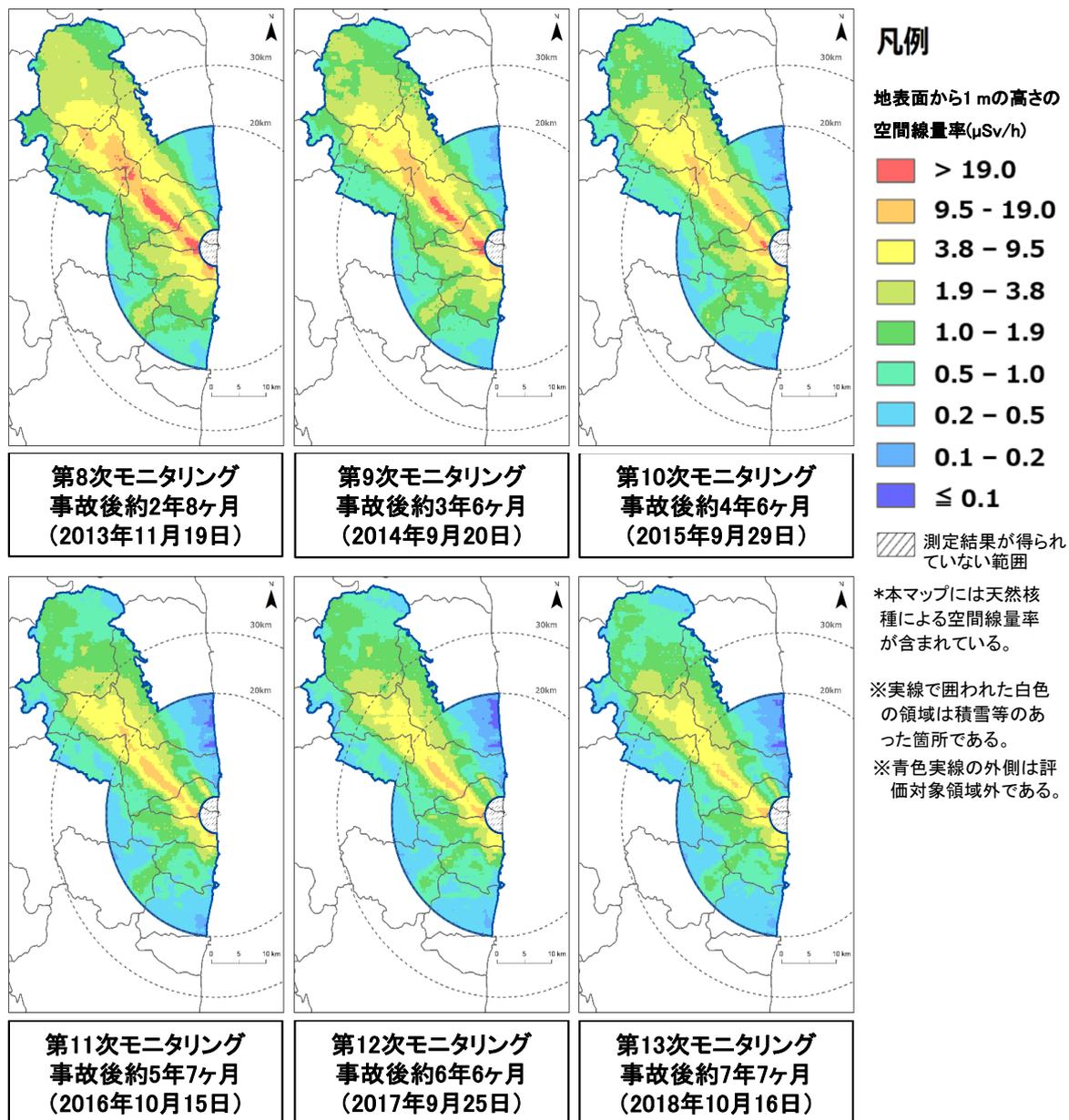


Fig.6-3 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(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。)

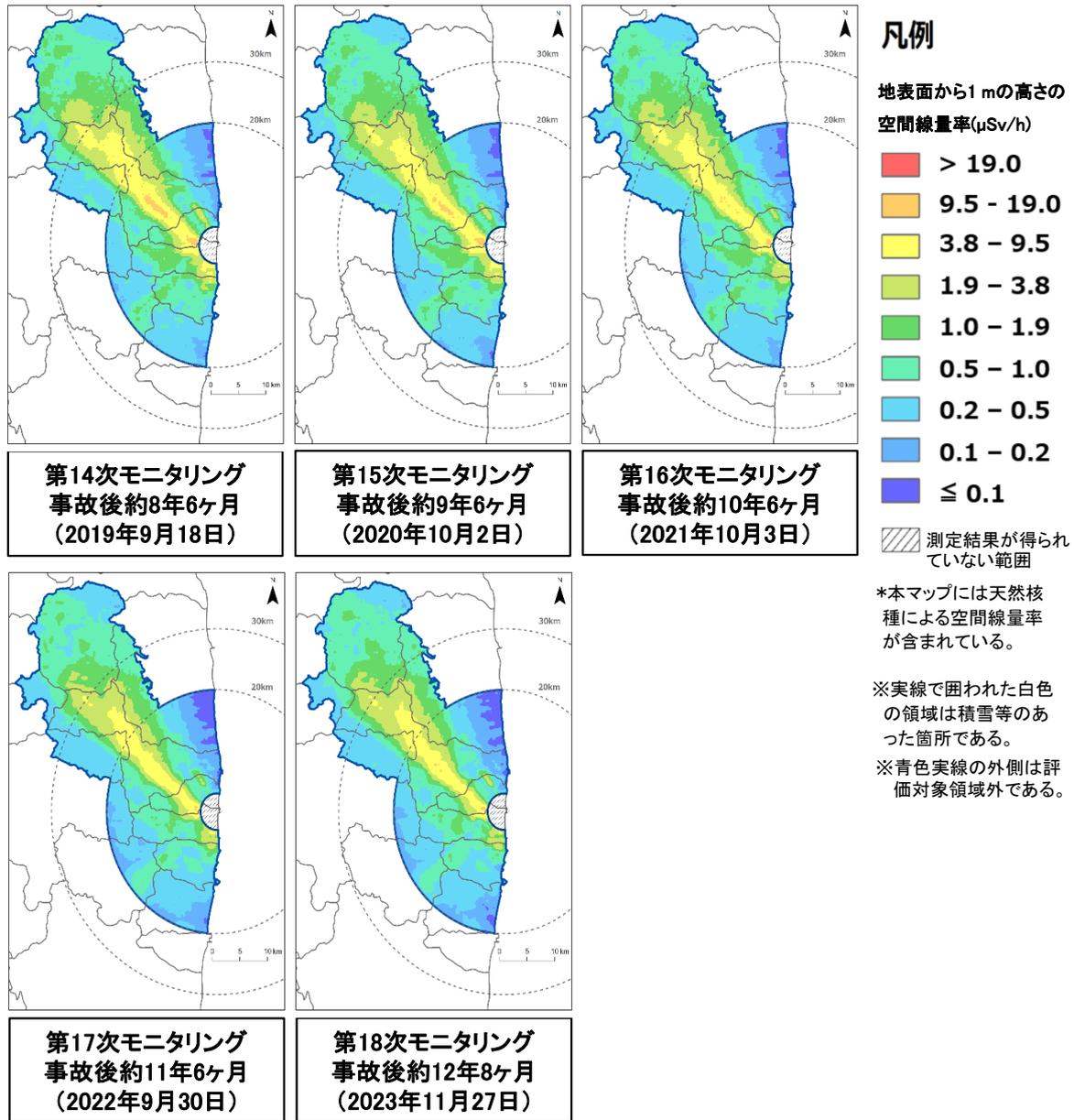


Fig.6-3 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(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。)

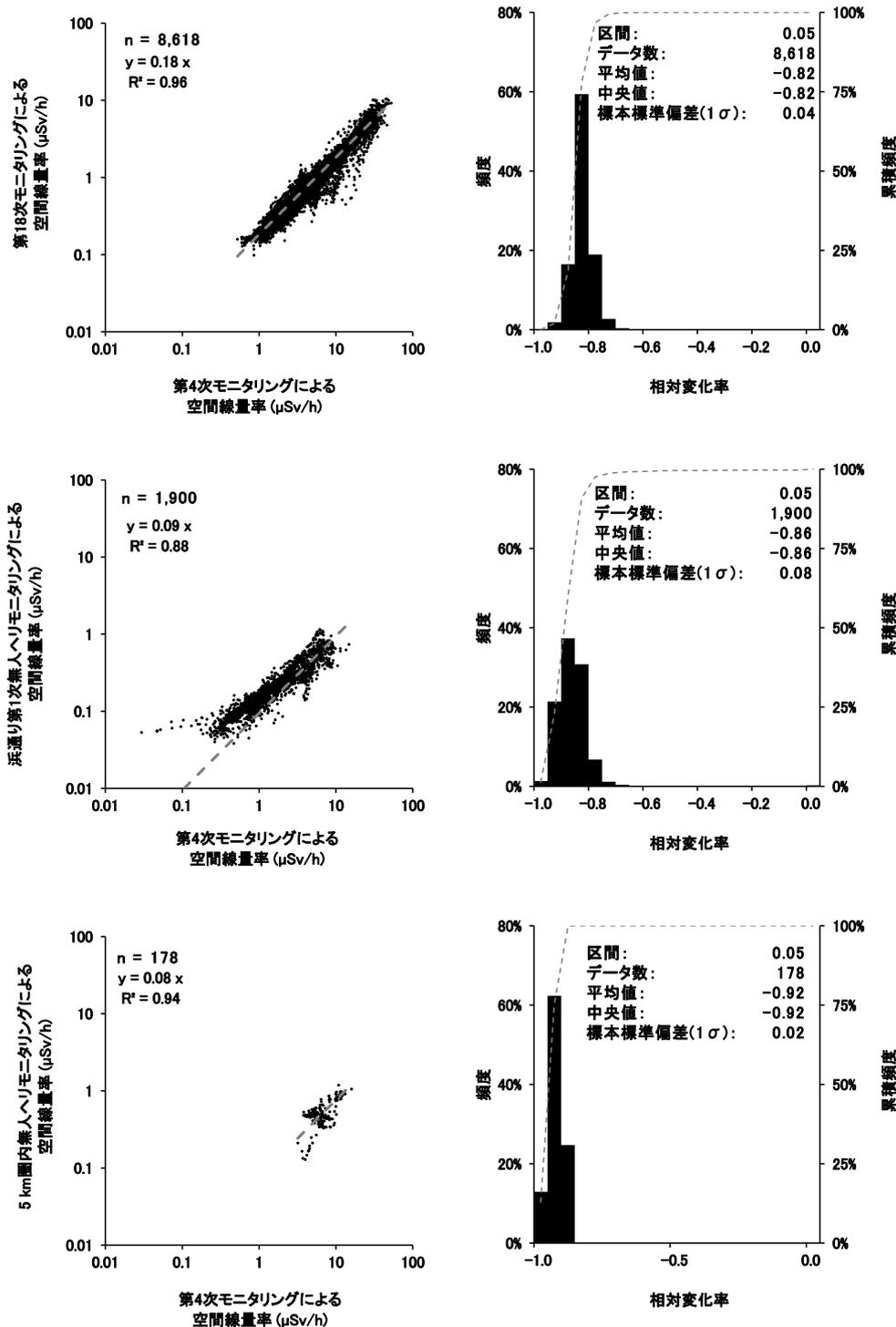


Fig. 6-4 旧避難指示区域における第4次モニタリングと第18次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングの空間線量率算出結果の比較

(左：散布図、右：相対変化率のヒストグラム)

(上段：第18次モニタリング、中段：浜通り第1次無人ヘリモニタリング、下段：第15回5 km圏内無人ヘリモニタリング)

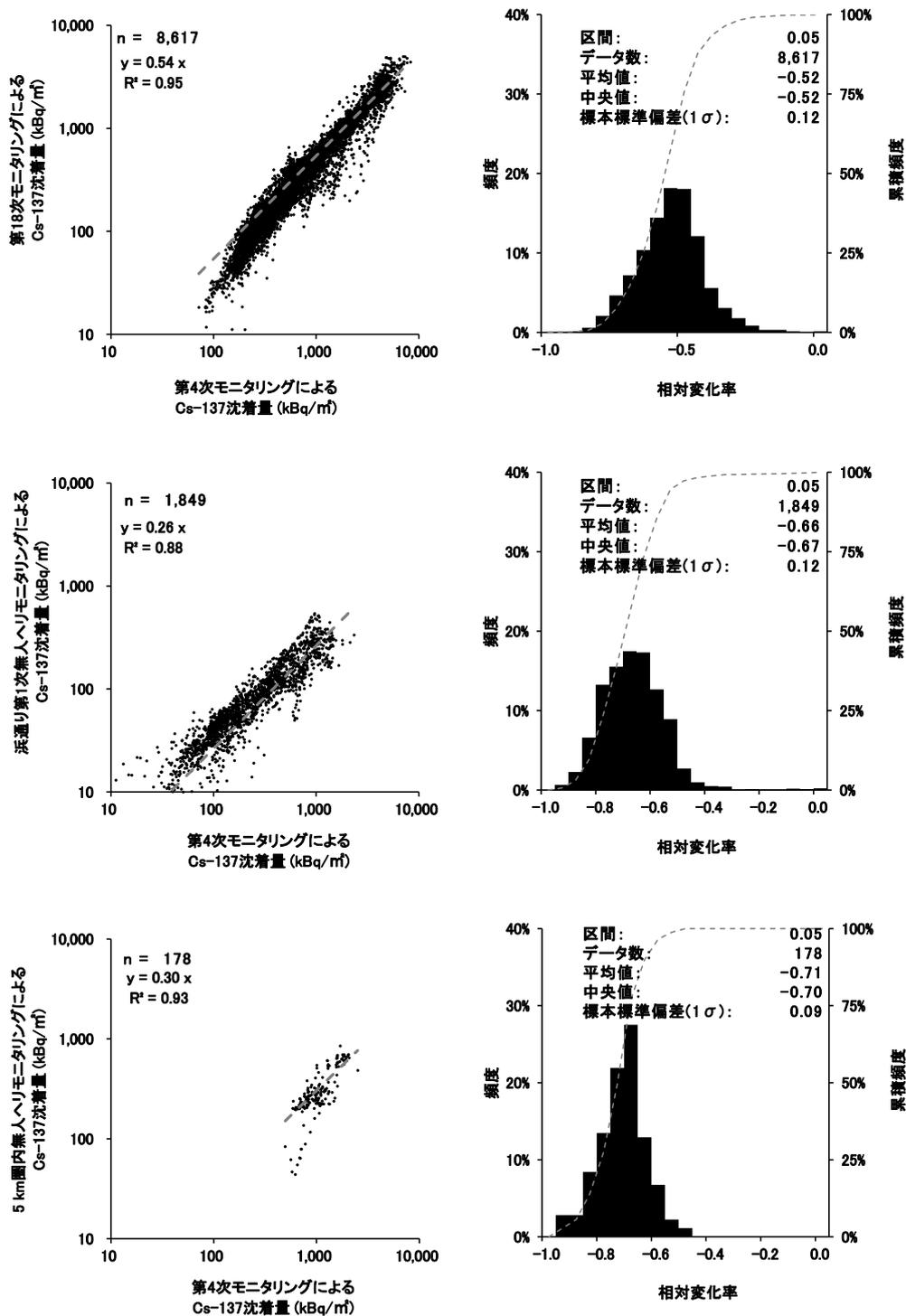


Fig. 6-5 旧避難指示区域における第4次モニタリングと第18次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングのCs-137沈着量算出結果の比較

(左：散布図、右：相対変化率のヒストグラム)

(上段：第18次モニタリング、中段：浜通り第1次無人ヘリモニタリング、下段：第15回5 km圏内無人ヘリモニタリング)

6.2. 実効半減期の算出

東電福島原子力発電所事故から約 13 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)⁵²⁾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、空間線量率の適切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。東電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、2011 年度 (平成 23 年度) の第一次モニタリングの結果が 0.5 μSv/h 以上であった 4,939 メッシュを評価対象とした。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)⁶¹⁾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。

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

ここで、

D: 全空間線量率 (μSv/h)

a: 減衰が速い成分の空間線量率 (μSv/h)

t_{short}: 減衰が速い成分の実効半減期 (年)

b: 減衰が遅い成分の空間線量率 (μSv/h)

t_{long}: 減衰が遅い成分の実効半減期 (年)

t: 東電福島原子力発電所事故からの経過時間 (年)

C: 減衰の速い及び遅い成分に含まれない空間線量率 (μSv/h)

である。

なお、**a + b + C**は東電福島原子力発電所事故直後の空間線量率を意味する。定数**C**は 0 を初期

値として反復計算を行い、 t_{short} 等のパラメータの近似解が通常取り得る信頼区間内で収束せず、その標本標準偏差が近似解の2倍以上になった場合には別途、初期値を与えて再計算して求めた。近似曲線については最小二乗法により95%の信頼区間を計算するとともに、実効半減期についても95%の信頼区間を計算した。

Fig. 6-6 に東電福島原子力発電所から80 km圏内における有人ヘリモニタリング結果に指数関数近似を適用した結果を示す。本図におけるプロットは、有人ヘリ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。東電福島原子力発電所事故から2年目までは減衰の速い成分による影響が顕著であり、2年目以降は減衰の遅い成分が支配的であることが分かる。指数関数近似の結果を基にして、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0.46年(95%信頼区間:0.34年~0.58年)となり、東電福島原子力発電所事故の初期においては全空間線量率への寄与割合が比較的大きいものの、事故から概ね半減期の4倍強で空間線量率への寄与が実質的に無くなった成分であることが示唆される。減衰の遅い成分については、有効数字2桁で表記すると、2.3年(95%信頼区間:1.9年~2.7年)となり、東電福島原子力発電所事故から約13年経過した現在、半減期の約5倍強を経過し空間線量率に寄与し続けている成分であることが示唆される。両成分ともに95%信頼区間が平均値 $\pm 30\%$ 以内で実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られる。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。

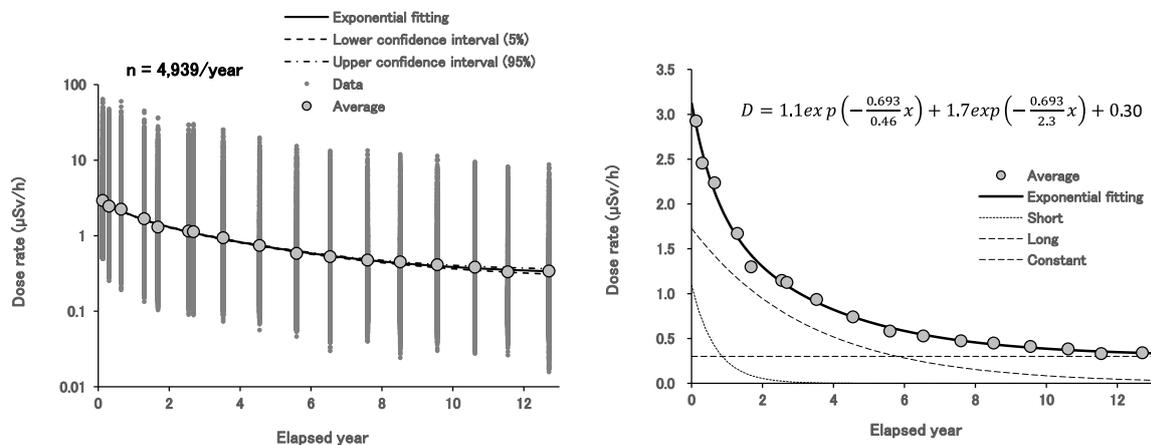


Fig. 6-6 測定値の指数関数近似

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)
0.46	0.34~0.58	2.3	1.9~2.7

6.3. 土地利用区分による空間線量率の変化傾向の違い

東電福島原子力発電所周辺における土地利用区分による空間線量率の減少率の違いを考察するため、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」⁶²⁾ (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) から第 15 次モニタリング (2020 年、令和 2 年) に対しては平成 28 年度公開版、第 16 次モニタリング以降に対しては令和 3 年度公開版 (2024 年 3 月、令和 5 年度末現在の最新版) とした。東電福島原子力発電所から 80 km 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)、Fig. 6-9 (平成 28 年度公開版) 及び Fig. 6-10 (令和 3 年度公開版) に示す。これらの土地利用区分の内、人為的活動等により空間線量率に最も違いが現れると考えられる市街地部及び東電福島原子力発電所周辺において大部分を占める森林部について、過去の 80 km 圏内の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. 6-10 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. 6-10 の凡例中、建物用地、道路、鉄道、その他用地を指す。

空間線量率の比較は、6.1 節に示したように、測定範囲を 250 m × 250 m メッシュに区切り、同一メッシュ上における第 4 次モニタリングを基準とした空間線量率の相対変化率 (例えば、(第 18 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 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリ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. 6-11、Fig. 6-12 及び Fig. 6-13 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 6-7 に示す。2023 年度 (令和 5 年度) 以降については、東電福島原子力発電所から 80 km 圏内のモニタリングに無人ヘリモニタリングを導入したことに伴い、Table 6-7 に示した通り、モニタリング種別に切り分けて比較することとした。第 4 次モニタリングに対する第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの相対減少率は、それぞれ平均値で市街地部では約 77%、約 88%及び約 93%であり、森林部では約 77%、約 85%及び約 87%であった。東電福島原子力発電所の比較的近傍を測定した浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの方が、第 18 次モニタリングよりも相対変化率が高い傾向にあった。また、市街地部と森林部の相対変化率については、第 18 次モ

ニタリングでは同一であったが、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングでは市街地の方が3%~6%程度大きかった。第17次モニタリング以前の相対変化率の計算結果では、森林部よりも市街地の方が2%~7%相対変化率が大きく、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、東電福島原子力発電所事故から約13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. 6-10の凡例に示した全エリアの相対変化率と森林部のみの相対変化率は概ね同様であった。これは、東電福島原子力発電所から80 km圏内の土地利用区分の65%が森林であることに起因するとと思われる。規制庁による東電福島原子力発電所近傍の車両モニタリングや人手による空間線量率測定結果から解析した結果⁵⁰⁾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、有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングによる空間線量率の位置分解能と地上測定の位置分解能の差に起因すると考えられる。

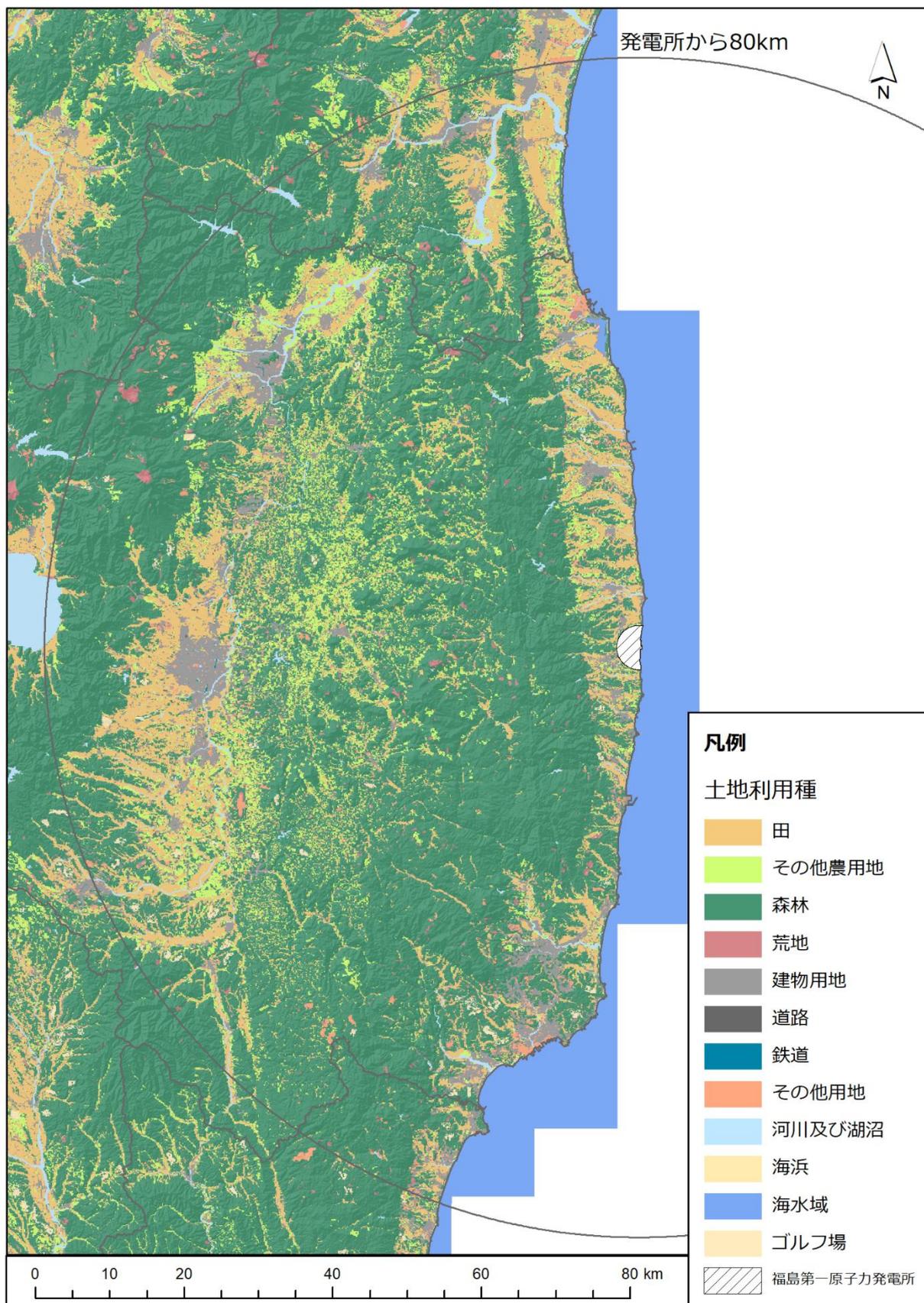


Fig. 6-7 東電福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ⁶²⁾より)

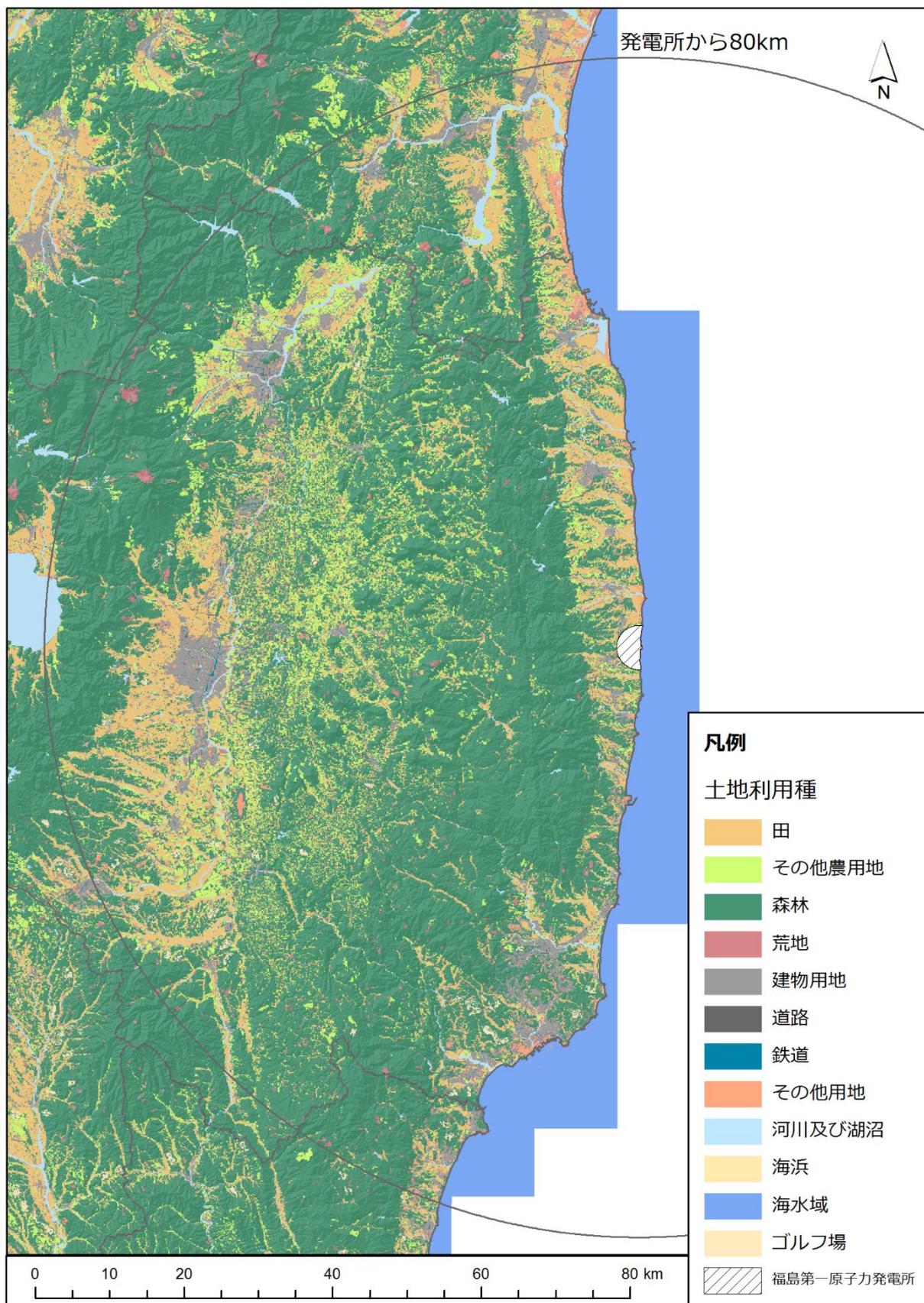


Fig. 6-8 東電福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ⁶²⁾より)

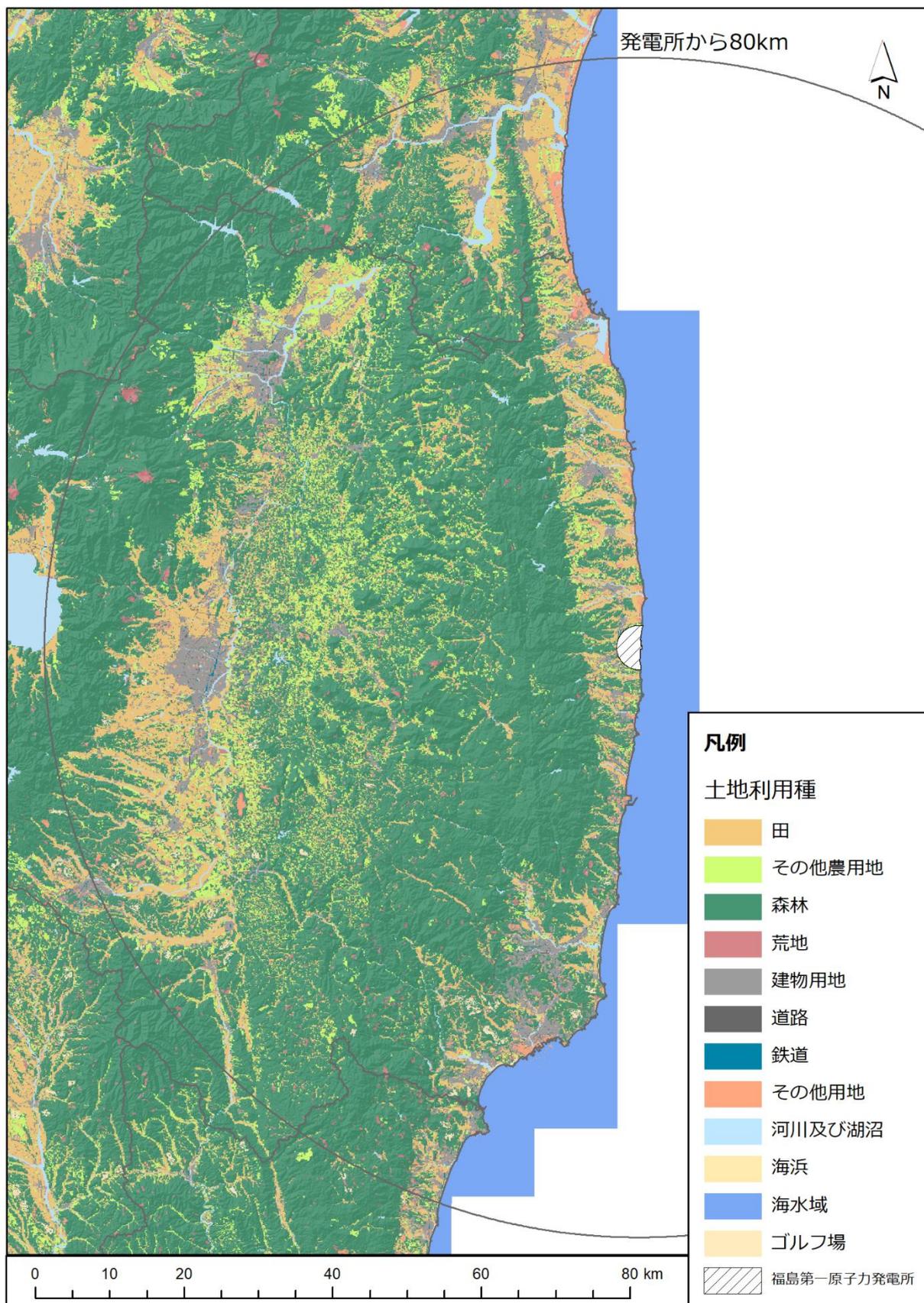


Fig. 6-9 東電福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ⁶²⁾より)

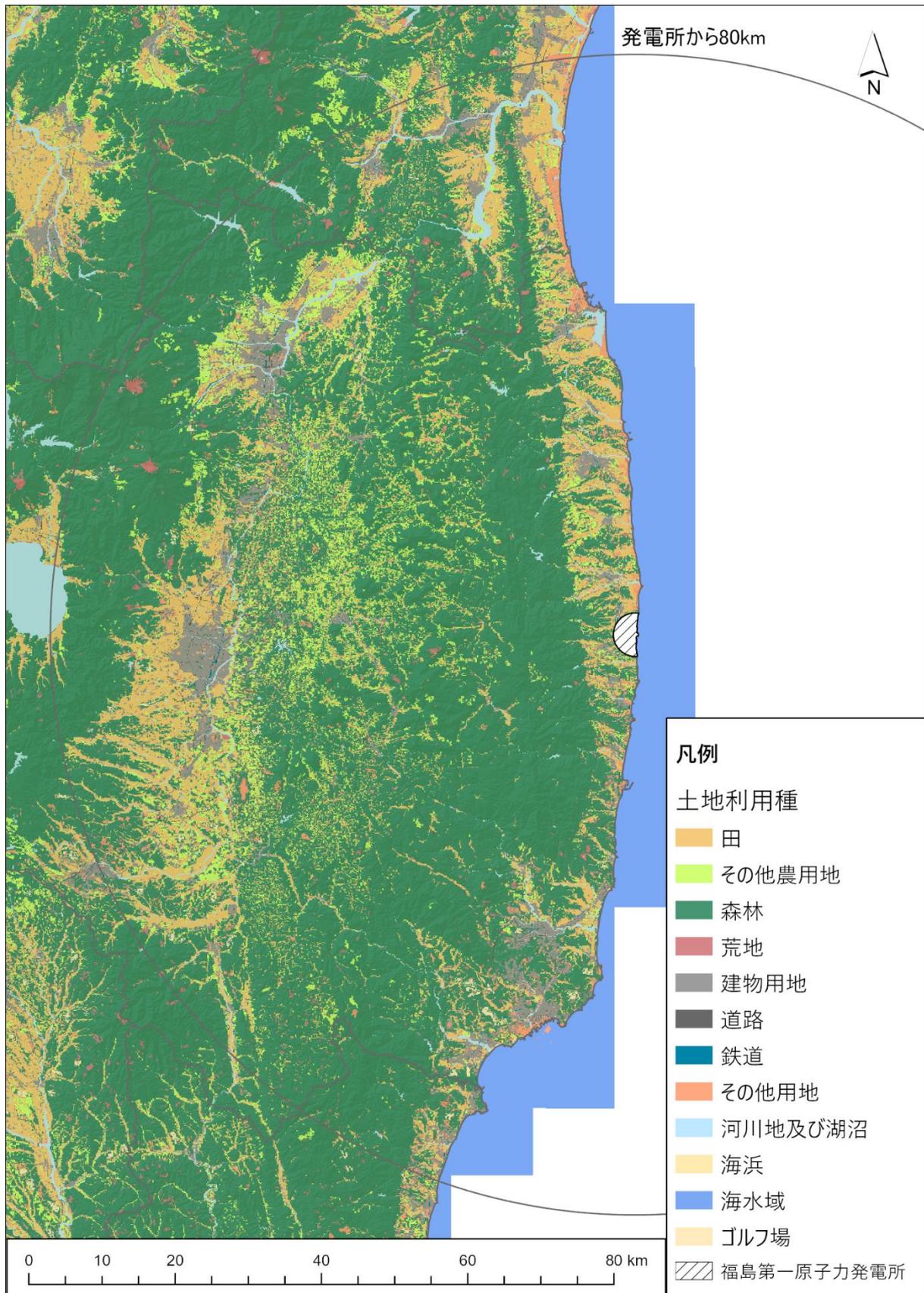


Fig. 6-10 東電福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (令和 3 年度公開版 国土地理院土地利用調査データ⁶²⁾より)

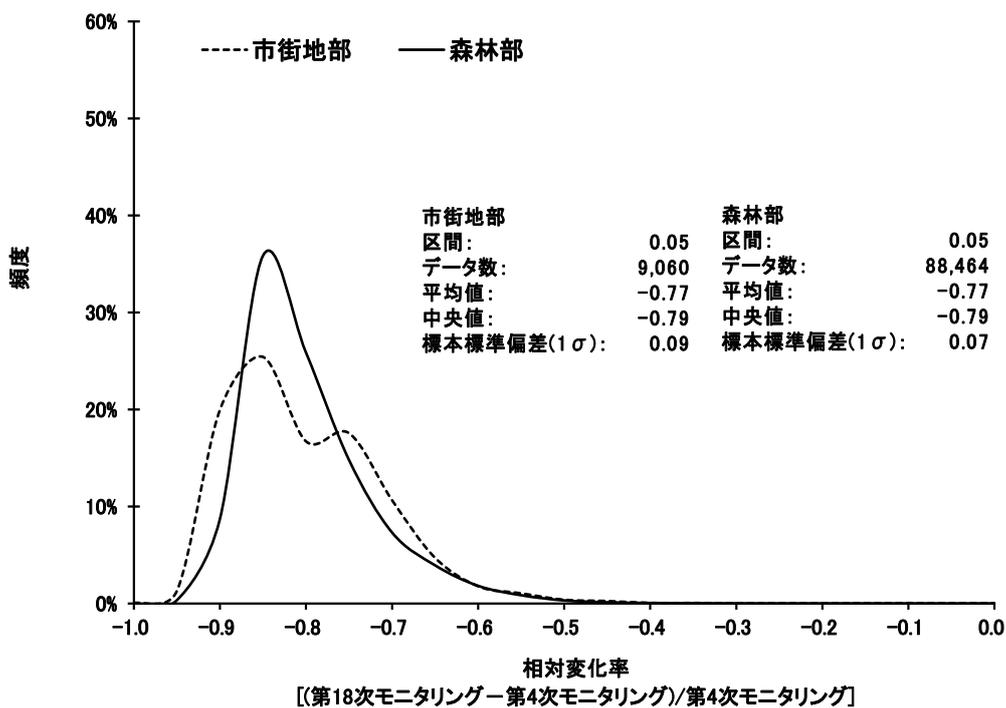


Fig. 6-11 森林部及び市街地における地表面から1mの高さの空間線量率の算出結果の比較
 (第4次モニタリングに対する第18次モニタリングの相対変化率)

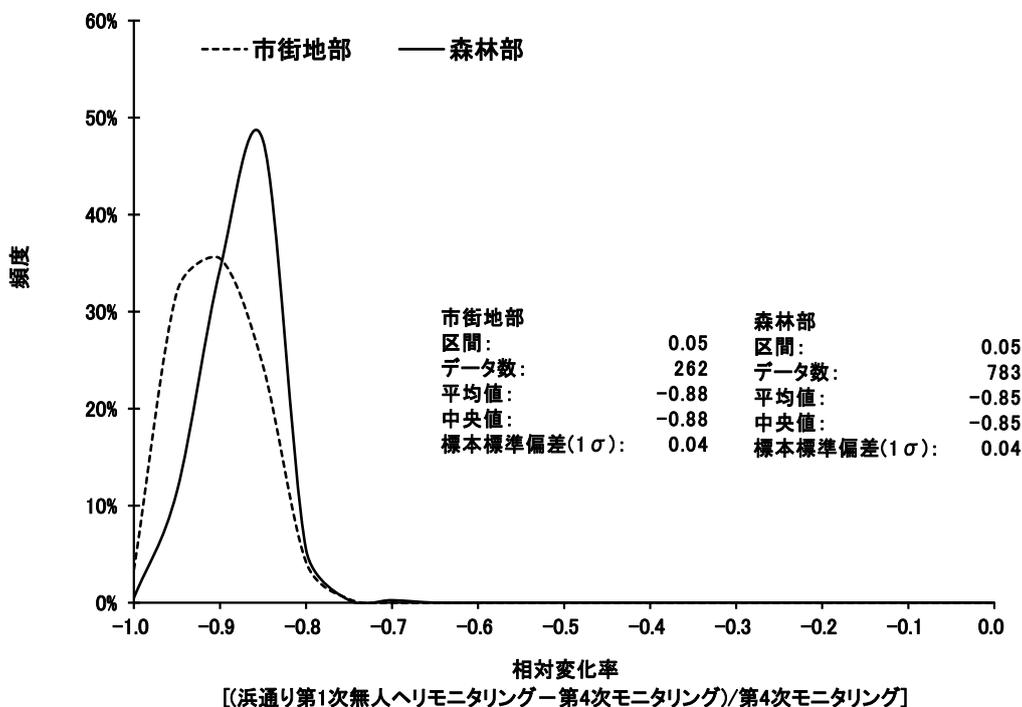


Fig. 6-12 森林部及び市街地における地表面から1mの高さの空間線量率の算出結果の比較
 (第4次モニタリングに対する浜通り第1次無人ヘリモニタリングの相対変化率)

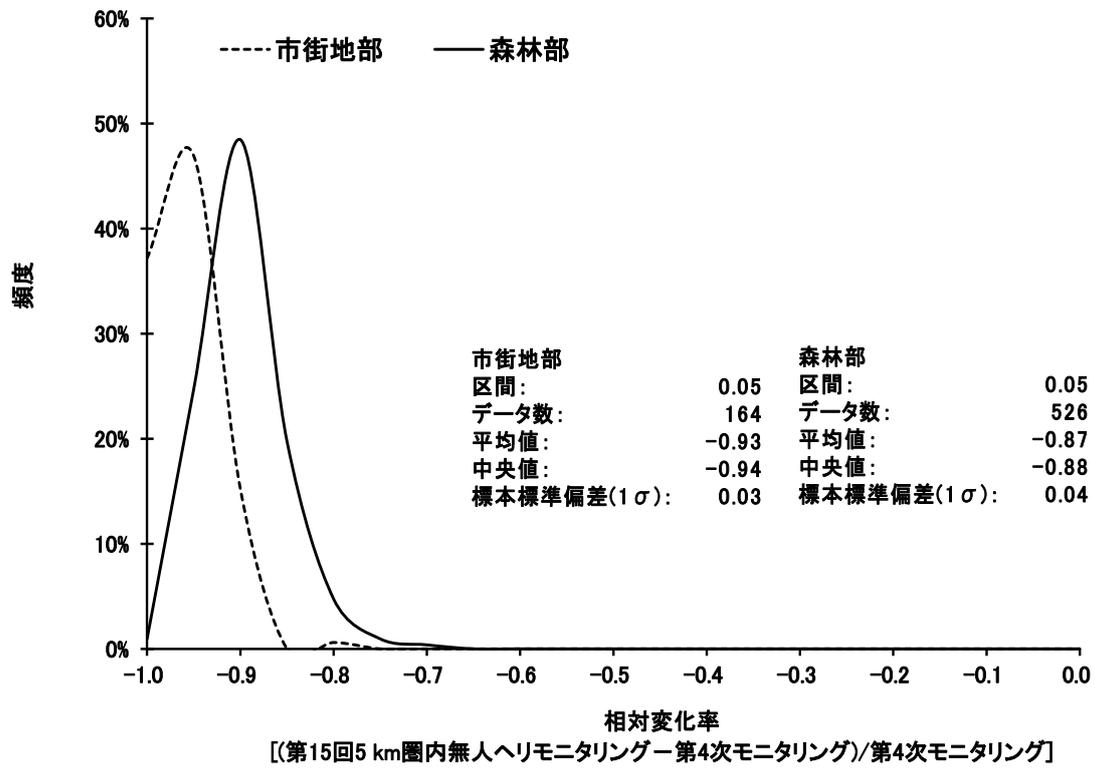


Fig. 6-13 森林部及び市街地における地表面から 1 m の高さの空間線量率の算出結果の比較
 (第 4 次モニタリングに対する浜通り第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの相対変化率)

Table 6-3 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較
 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(平成21年度公開版)⁶²⁾に基づく)

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

※Ave.: 平均値、SD: 標準偏差

Table 6-4 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較
 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(平成26年度公開版)⁶²⁾に基づく)

エリア	面積 (km ²)	相対変化率					
		(第9次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング			(第10次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング		
		Ave.	SD(1σ)		Ave.	SD(1σ)	
市街地部	791	-0.59	±	0.09	-0.66	±	0.09
森林部	5,771	-0.56	±	0.09	-0.62	±	0.09
全域	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変化率の比較
 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(平成28年度公開版)⁶²⁾に基づく)

エリア	面積 (km ²)	相対変化率									
		(第11次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング		(第12次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング		(第13次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング		(第14次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング		(第15次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング	
		Ave.	SD(1σ)								
市街地部	836	-0.73	± 0.07	-0.73	± 0.08	-0.74	± 0.10	-0.76	± 0.08	-0.76	± 0.10
森林部	5,843	-0.70	± 0.06	-0.71	± 0.07	-0.72	± 0.08	-0.74	± 0.08	-0.74	± 0.08
全域	8,923	-0.70	± 0.07	-0.72	± 0.08	-0.73	± 0.08	-0.74	± 0.08	-0.75	± 0.08

※Ave.: 平均値、SD:標本標準偏差

Table 6-6 森林部及び市街地部における空間線量率の相対変化率の比較
 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(令和3年度公開版)⁶²⁾に基づく)

エリア	面積 (km ²)	相対変化率			
		(16次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング		(第17次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング	
		Ave.	SD(1σ)	Ave.	SD(1σ)
市街地部	858	-0.78	± 0.08	-0.78	± 0.11
森林部	5,882	-0.76	± 0.07	-0.77	± 0.08
全域	8,923	-0.77	± 0.07	-0.77	± 0.09

※Ave.: 平均値、SD:標本標準偏差

Table 6-7 森林部及び市街地部における空間線量率のモニタリング種別ごとの相対変化率の比較
 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ(令和3年度公開版)⁶²に基づく)

エリア	面積 (km ²)	相対変化率		
		(第18次モニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング		
		Ave.		SD(1σ)
市街地部	811	-0.77	±	0.09
森林部	5,789	-0.77	±	0.07
全域	8,682	-0.77	±	0.08

エリア	面積 (km ²)	相対変化率		
		(浜通り第1次無人ヘリモニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング		
		Ave.		SD(1σ)
市街地部	32	-0.88	±	0.04
森林部	56	-0.85	±	0.04
全域	156	-0.86	±	0.08

エリア	面積 (km ²)	相対変化率		
		(第15回5 km圏内無人ヘリモニタリング-第4次モニタリング) /第4次モニタリング		
		Ave.		SD(1σ)
市街地部	15	-0.93	±	0.03
森林部	37	-0.87	±	0.04
全域	85	-0.89	±	0.06

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。有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングにおいては、測定される γ 線計数率に対して高度補正係数や空間線量率換算係数による補正を施して、地表面から 1 m の高さの空間線量率の計算を行っている。これは測定対象となる地表面が平坦であると仮定した単純な補正方法であり、このような仮定に基づいて計算を行った場合、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 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングのデータに適用した。その計算結果と地上測定値を比較し、地形の起伏を考慮した解析手法による空間線量率換算値の精度向上効果を評価した。

7.2. 地形の起伏による測定への影響

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] で示した通り、空間線量率換算係数 (CD) で除することによって空間線量率へ変換される。 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、有人ヘリモニタリングでは 300 m、無人ヘリモニタリングでは 80 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 ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$) は、以下のように示される。

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

一方、起伏のある地形上の空間線量率換算係数 CD_t ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$) は、以下のように示される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 ($\mu Sv/h$) とその上空、有人ヘリモニタリングでは 300 m、無人ヘリモニタリングでは 80 m において測定される γ 線計数率 (s^{-1}) 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に計数率

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、東電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、有人ヘリ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)⁶³⁾ 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)⁴⁶⁾ 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⁾。本結果から、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。

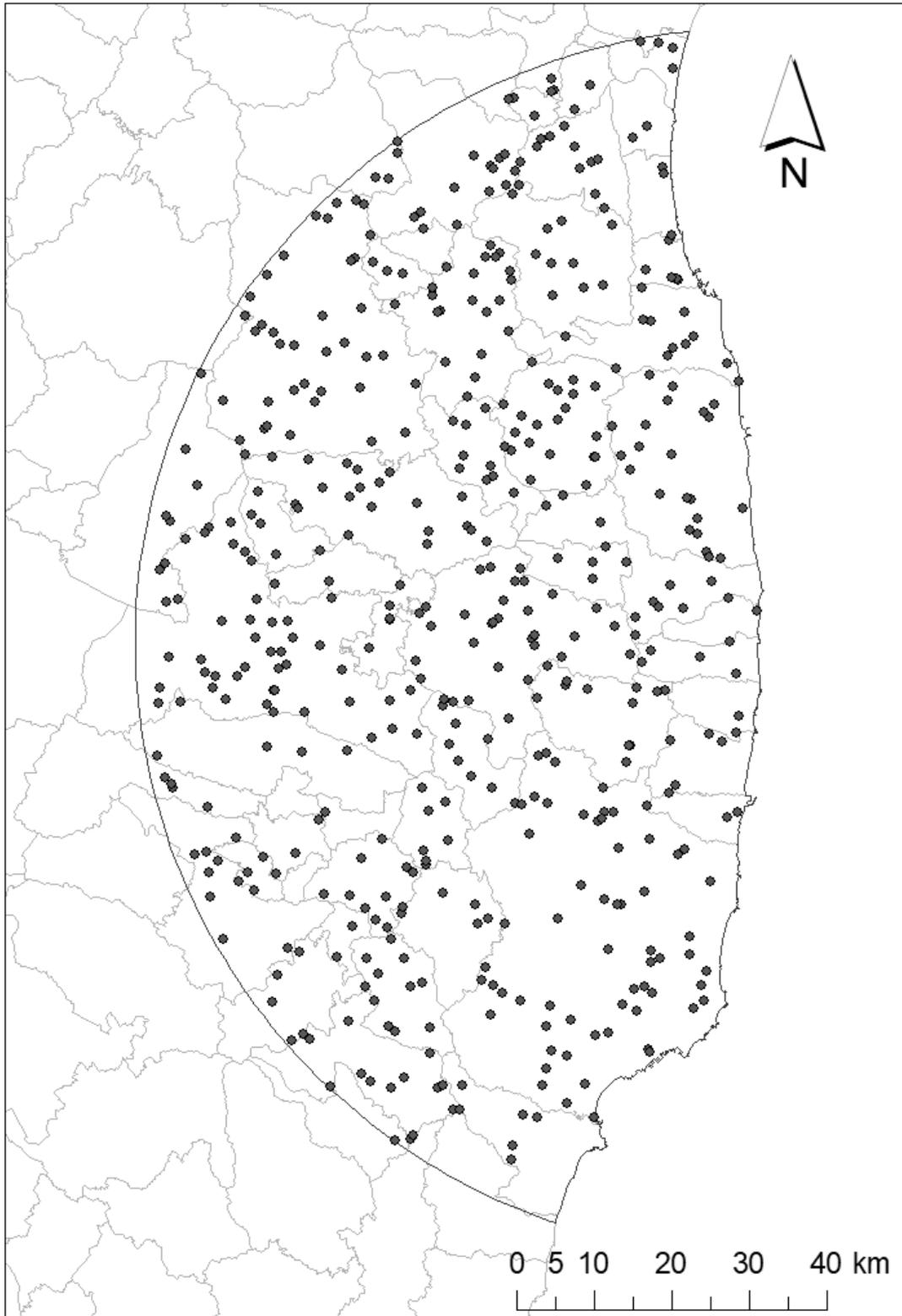


Fig. 7-1 無作為に抽出した評価点の位置²⁴⁾

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

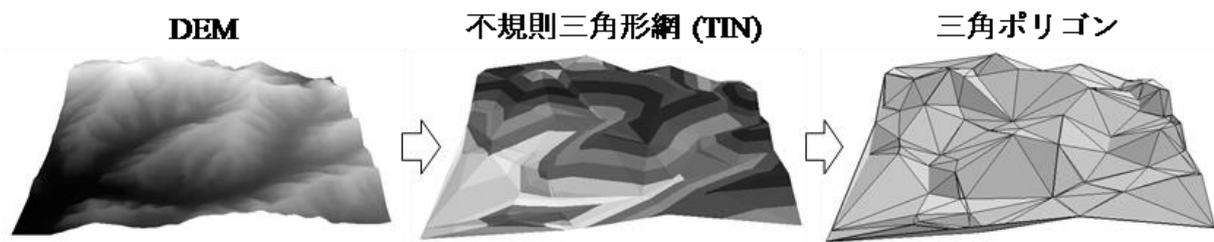


Fig. 7-2 数値標高マップから三角ポリゴンへの変換例 ²⁴⁾

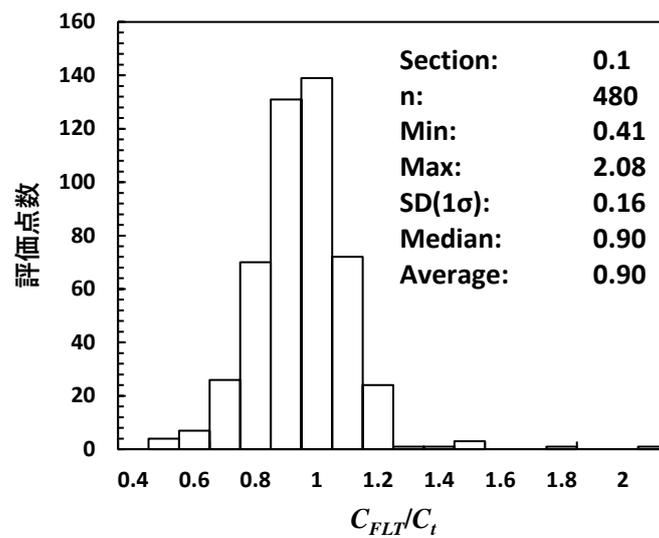


Fig. 7-3 平坦な地形と起伏のある地形における対地高度 300 m での計数率比の頻度分布 ²⁴⁾

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} (有人ヘリモニタリング：300 m、無人ヘリモニタリング：80 m) で飛行しながら測定した場合、4.1 節で触れた通り、測定点直下において H_{std} と概ね同一の半径内における γ 線計数率を測定していることになる。つまり、有人ヘリモニタリングの場合は直線距離で約 425 m、無人ヘリモニタリングの場合は約 115 m の範囲内で見込める領域 (S_{FLT}) から飛来する γ 線が測定できていることになる。

一方、地形の起伏がある場合、基準高度 H_{std} (有人ヘリモニタリング：300 m、無人ヘリモニタリング：80 m) 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、線源と検出器の平均距離はより近くなる。さらに、有人ヘリモニタリングでは検出器から直線距離 425 m、無人ヘリモニタリングでは検出器から直線距離 115 m で見込める面積 (S) が大きくなるとともに、起伏によって線源表面積が増加し、 γ 線計数率 (C) も大きくなる。以上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。なお、2023 年度 (令和 5 年度) より、地形補正を行う計算プログラムを無人ヘリモニタリングにも適用できるよう、計算アルゴリズムを組み込んだ。

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

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。

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

地形補正手法を用いて、第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの解析を行い、規制庁と原子力機構が行っている、福島県内における NaI(Tl)検出器 (日立製作所製 TCS-172B) を用いた地上測定値⁴⁷⁾との比較を行った。なお、本比較には東電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 (全 4,843 点) を用いた。本手法を適用する前後の東電福島原子力発電所から 80 km 圏内における空間線量率マップの比較を 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やや低くなる傾向が見られた。しかしながら、第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングにおいて、東電福島原子力発電所の近傍西方に、空間線量率が 19.0 $\mu\text{Sv/h}$ を上回る場所が見られるなど、不自然な線量率の分布が極一部で認められた。本手法を適用する前後の空間線量率の換算値と地上測定値との比較結果を散布図及び相対誤差のヒストグラムについて、第 18 次モニタリング、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの順に Fig. 7-6～Fig. 7-8 に示す。なお、相対誤差は、地上測定値 (D_{GND}) に対する D_{GND} と

有人ヘリまたは無人ヘリモニタリングによる空間線量率 (D_{ARM}) の差の比 ($(D_{ARM} - D_{GND}) / D_{GND}$) を取って算出した。散布図より、第 18 次モニタリングについては、ファクター2 に収まったプロットの割合は、標準的解析手法では 90% (全 4,618 点中 4,145 点) であったのに対し、地形補正手法では 91% (全 4,618 点中 4,219 点) であった。浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングについては、ファクター2 に収まったプロットの割合は、標準的解析手法では 91% (全 147 点中 134 点) であったのに対し、地形補正手法では 88% (全 147 点中 130 点) であった。第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングについては、ファクター2 に収まったプロットの割合は、標準的解析手法では 65% (全 78 点中 51 点) であったのに対し、地形補正手法では 70% (全 78 点中 54 点) であった。これらの結果より、第 18 モニタリング及び第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングでは、地形補正手法の適用により、地上測定値との整合性がやや改善された一方で、浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングではやや悪化した。次に、相対誤差のヒストグラムより、第 18 次モニタリングについては、標準的解析手法に比べて地形補正手法では 0 付近に頻度分布が多くなり、理想的な分布に近づいた。標本標準偏差については標準的解析手法では 0.55 であったのに対し、地形補正手法では 0.52 となった。同様に、平均値については 0.34 から 0.21 に、中央値については 0.21 から 0.09 となった。浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングについては、標準的解析手法に比べて地形補正手法では 0 以下の領域の頻度分布が僅かに増加した。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 0.60 となった。同様に、平均値については 0.21 から 0.23 に、中央値については 0.12 から 0.08 となった。第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングについては、標準的解析手法と地形補正手法とで頻度分布の概形はさほど変化せず、不連続な分布が認められた。標本標準偏差については標準的解析手法と地形補正手法の両方で 0.97 であった。平均値についても 0.58 で同一であり、中央値については標準的解析手法で 0.37、地形補正手法で 0.34 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、第 18 次モニタリングでは、標準的解析手法では約 43% であったのに対し、地形補正手法では約 37% であった。浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングについては、標準的解析手法では約 37% であったのに対し、地形補正手法では約 43% であった。第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングについては、標準的解析手法では約 75% であったのに対し、地形補正手法では約 76% であった。いずれの場合も顕著な差異はないものの、有人ヘリモニタリングでは地形補正手法を適用すると標準的解析手法よりも地上測定値の再現性が改善される傾向にあった。一方で、無人ヘリモニタリングでは地形補正手法による空間線量率の換算精度の向上の傾向が見られなかった。また、第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングでは平均絶対パーセント誤差が他よりも大きく、地上測定値の再現性が比較的低いことが推察される。

今後、本解析手法の更なる改善を目指し、式 [17] で示した CD 補正方法に焦点を当て、特に S 及び S_{FLT} のより適切な設定方法に着目した検討を行う予定である。また、無人ヘリモニタリングへのより適切な適用を目指して、計算アルゴリズムの再構築も検討する予定である。

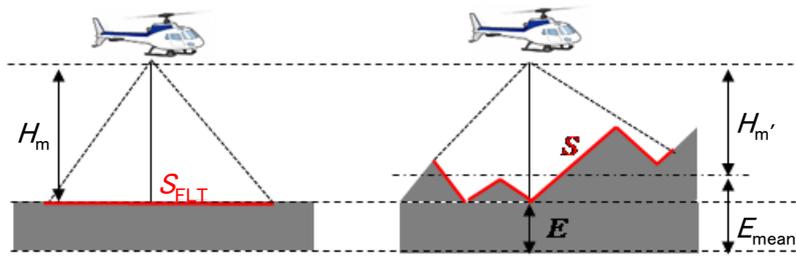


Fig. 7-4 地形の起伏による影響を補正する場合に考慮すべき点

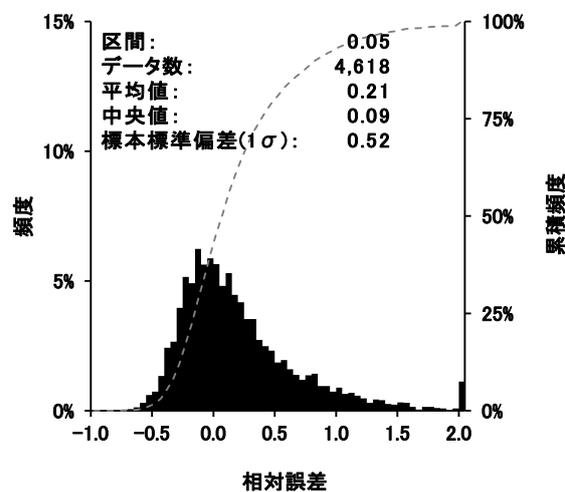
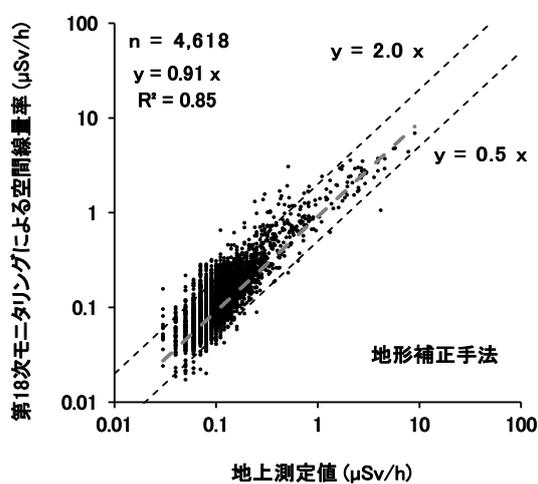
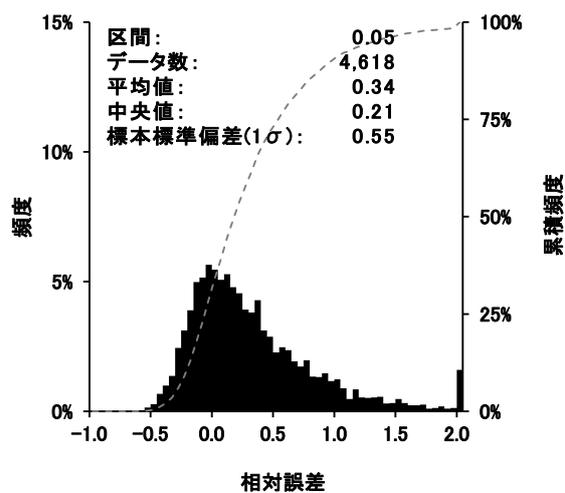
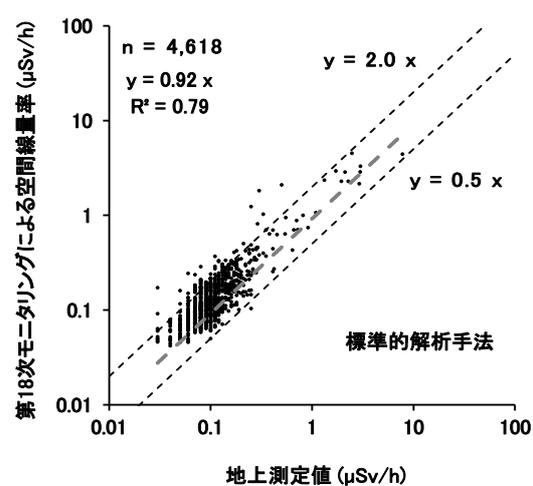


Fig. 7-6 第18次モニタリング結果と地上測定値との比較
 (上段: 標準的解析手法を用いた場合、下段: 地形補正手法を用いた場合)
 (それぞれ、左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

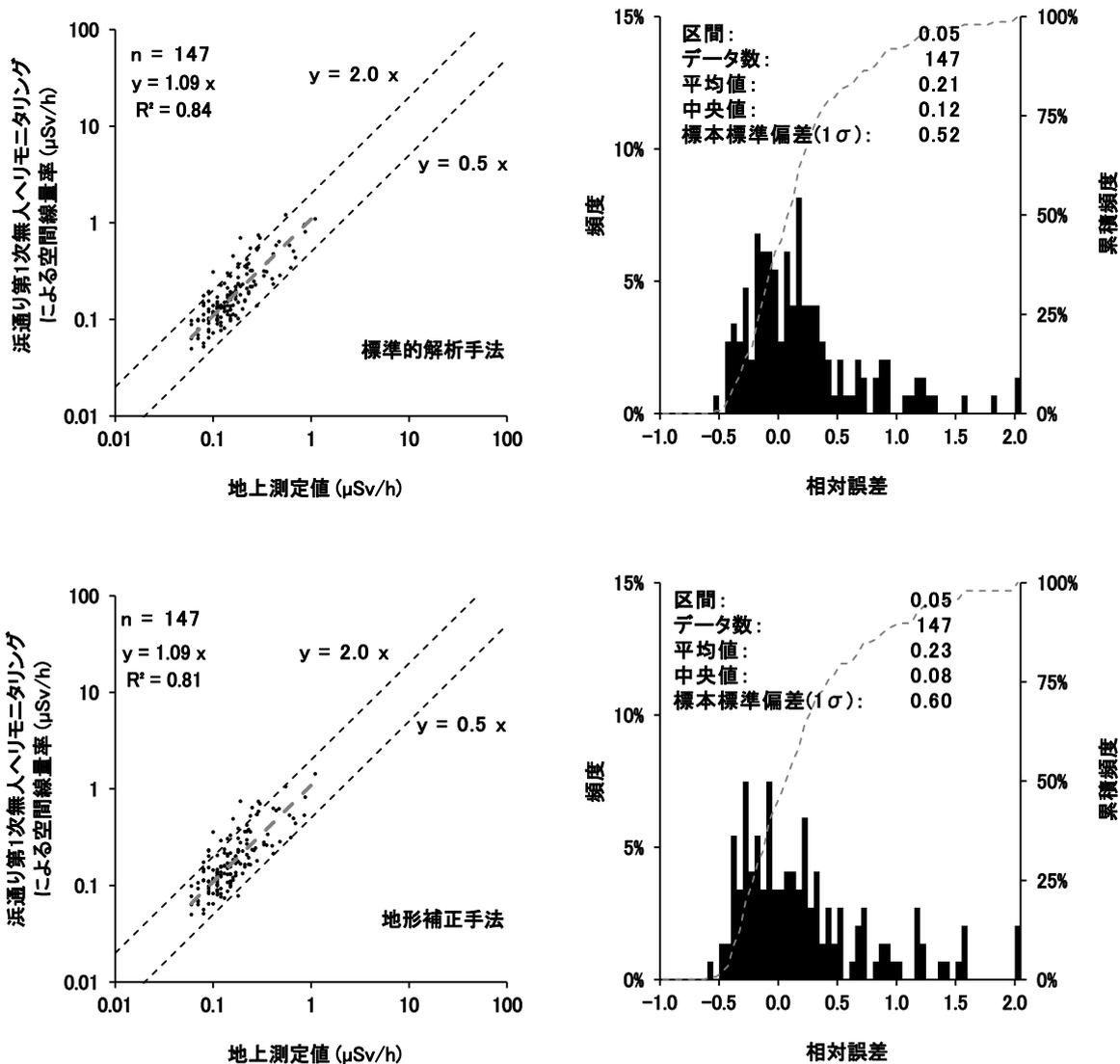


Fig. 7-7 浜通り第1次無人ヘリモニタリング結果と地上測定値との比較
(上段：標準的解析手法を用いた場合、下段：地形補正手法を用いた場合)
(それぞれ、左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

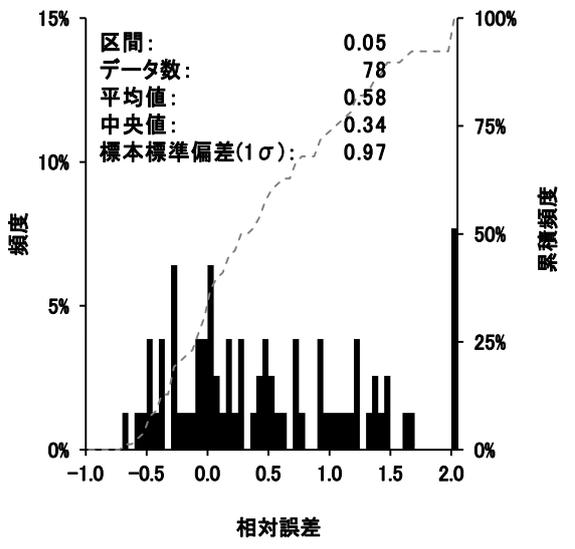
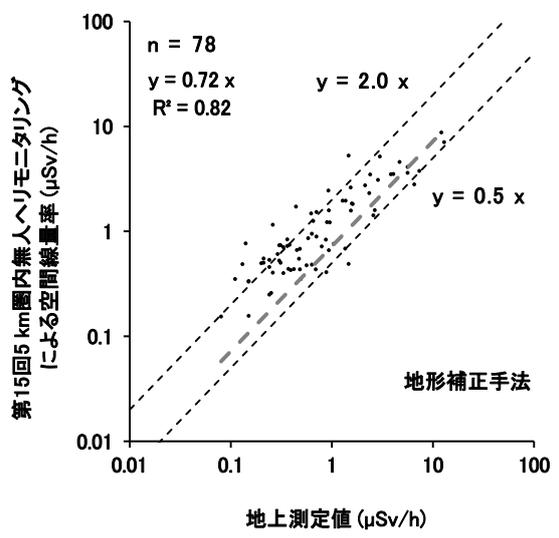
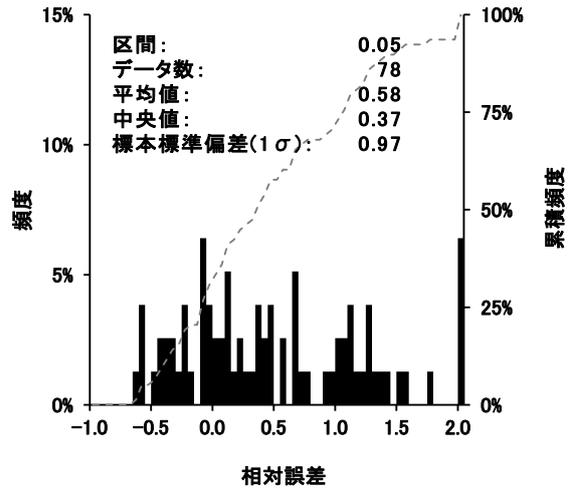
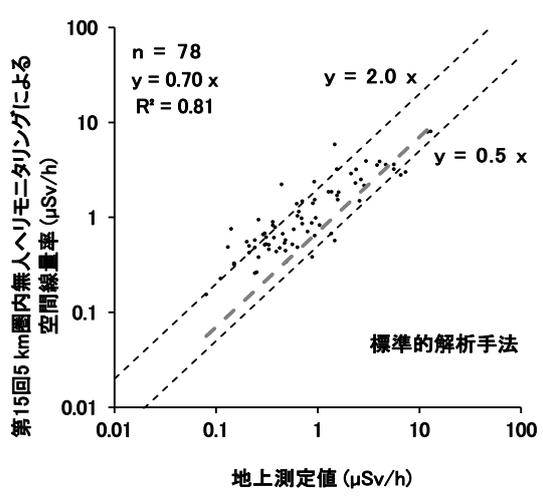


Fig. 7-8 第15回5 km圏内無人ヘリモニタリング結果と地上測定値との比較
 (上段：標準的解析手法を用いた場合、下段：地形補正手法を用いた場合)
 (それぞれ、左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)

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壊変系列には、気体であるラドンが存在し、ラドンの一部は大気中に散逸する。Fig. 8-1 に主な天然の放射性壊変系列であるウラン系列とトリウム系列について示す。大気中に散逸したラドンは、Po、Pb 及び Bi などのラドン子孫核種に壊変し、大気中の微粒子に吸着して大気中を浮遊する。有人ヘリ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⁶⁴⁾。このラドンの濃度レベルは比較的低いものの、有人ヘリモニタリングにおいては有人ヘリ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⁶⁵⁾。

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、現在用いている有人ヘリモニタリングシステムの NaI(Tl)検出器では、東電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、有人ヘリ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有人ヘリ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

トリウム (^{232}Th) 系列

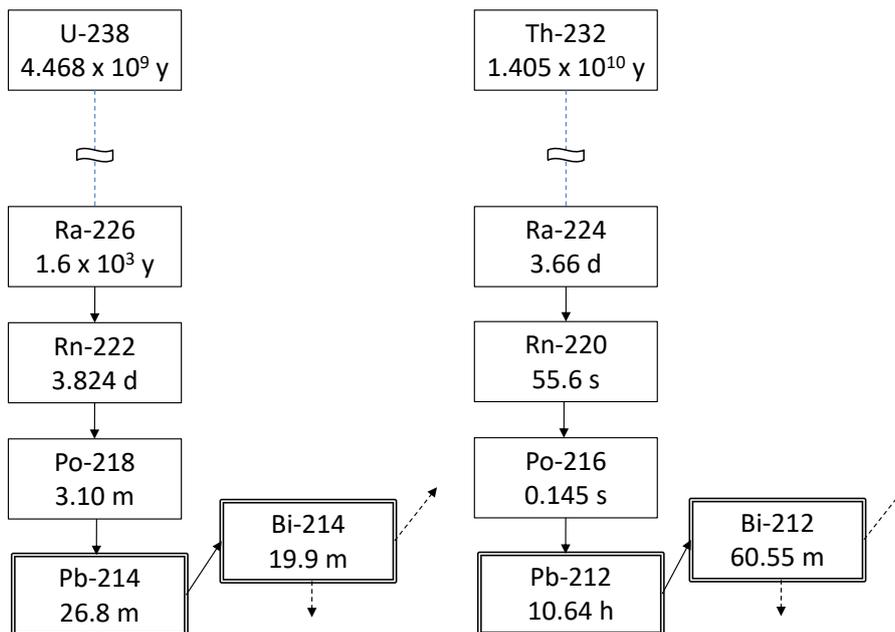


Fig. 8-1 ウラン系列及びトリウム系列
(核種名の下の数値は半減期を表す。)

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、有人ヘリ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、空气中的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⁵³⁾。原子力機構では当該手法を参考にして、空气中的ラドン子孫核種に起因する γ 線を測定する検出器に $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器を採用してラドン弁別手法を実施するための測定体系の構築を行い、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器と $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の γ 線計数率を基にした換算パラメータの設定方法について検討と改良を重ねてきた¹⁹⁾³¹⁾。本節では、ラドン弁別手法の概略を示す。

$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器を有人ヘリ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 線をなるべく遮へいし、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、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器は $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の上方に配置した。Fig. 8-3 に有人ヘリ機内の検出器と γ 線放出核種の位置関係のイメージを示す。 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器と $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の位置関係から地表面の放射性核種が存在する場合及び存在しない場合の $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率に対する $\text{NaI}(\text{Tl})$ 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 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率($C_{\text{LaBr},a}$)に対する $\text{NaI}(\text{Tl})$ 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、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器による遮へいの影響を受けにくく、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率にさほど影響を及ぼさないと考えられる。
- ・グラウンドインデックス (以下、 GI) : 地表面の放射性核種から放出される γ 線による影響が支配的な陸地で取得したデータにおける $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率($C_{\text{LaBr},g}$)に対する $\text{NaI}(\text{Tl})$ 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 線は有人ヘリ下方から飛来することから、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器に遮へいされて $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器では比較的計数されにくい。 GI は、 RI よりも大きくなると推察される。

これら 2 つのパラメータを利用して式 [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。

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

ここで、

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

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

である。

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

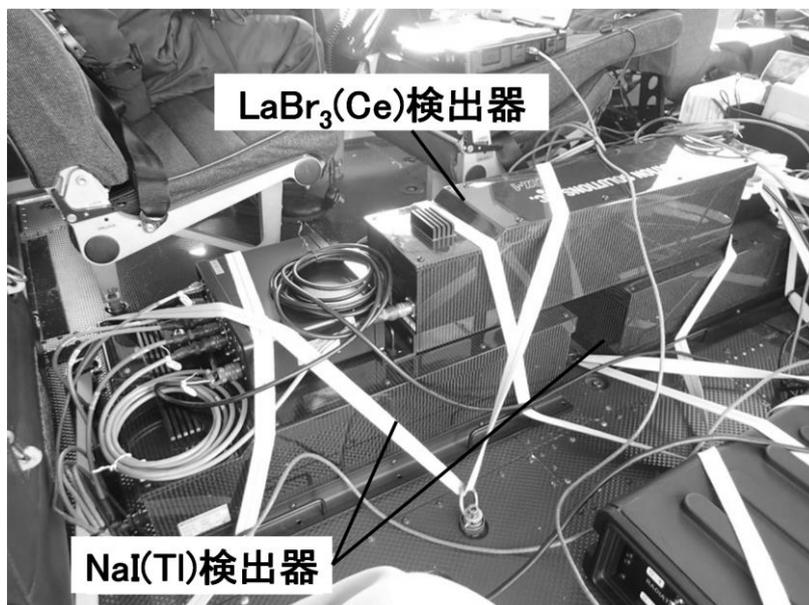


Fig. 8-2 空气中ラドン子孫核種測定用の検出器と有人ヘリへの搭載状況

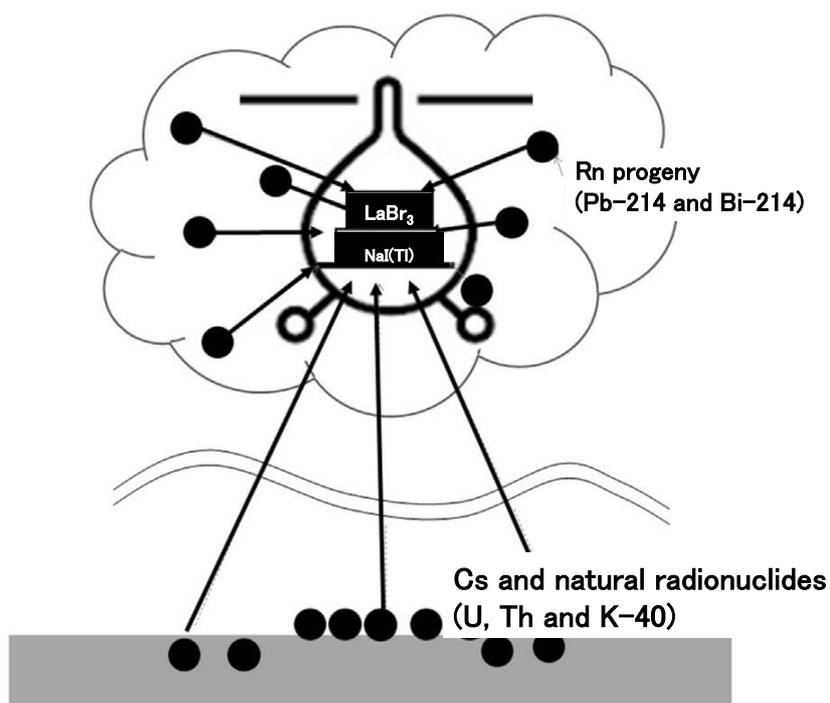


Fig. 8-3 空气中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ

8.3. パラメータ (*RI* 及び *GI*) の決定

式 [19] を用いたラドン弁別法の信頼性はグラウンドインデックス *GI* とラドンインデックス *RI* の設定精度に依存する。有人ヘリの遮へいによる γ 線計数率の変化に付随して、これらのパラメータも変化すると考えられるため、東日本第 14 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 14 次モニタリングで使用した有人ヘリ機種(機体番号)は Bell412 (JA412N)、Bell430 (JA05TV 及び JA02AX) である。

計数率の変動による影響をなるべく低減するために、東日本第 14 次モニタリングにおいて取得した計数率データ及び GPS データ(緯度、経度及び飛行高度)を 40 秒平均し、全計数率から宇宙線及び有人ヘリ機体に起因する γ 線計数率の寄与をバックグラウンドとして減算した上で *RI* 及び *GI* の算出に用いた。このとき、*RI* については海上でフライトしたデータの内、海拔高度が $300\text{ m} \pm 150\text{ m}$ (実際のフライト海拔高度が $150\text{ m} \sim 450\text{ m}$) で取得したデータを抽出対象とし、*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対象とした。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⁾。外れ値の影響を緩和した上で回帰係数を得るため、最小絶対値法によるロバストな線形回帰を導入したものの、外れ値が生じない場合には効果を発揮せず、当該手法は汎用性に乏しいという知見が得られた³³⁾。ここで、上記したいずれの手法も x 軸 ($\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率) または y 軸 ($\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の計数率) のいずれか一方にのみ有意な誤差が含まれるという仮定の下に線形回帰が行われる。この仮定が *RI* 及び *GI* の算出に悪影響を及ぼす可能性があると考え、本報告では x 軸及び y 軸の両方向の誤差を考慮に入れた回帰手法である直交距離回帰⁶⁶⁾の導入を検討した。直交距離回帰は測定データ点と回帰直線の直交距離の二乗和を最小とする回帰アルゴリズムであり、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器及び $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の計数率の両者に含まれる誤差を考慮した上で回帰係数が求めることが可能である。

RI 及び *GI* の算出に係る $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の計数率と $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率の関係を Fig. 8-4 及び Fig. 8-5 に示す。両図には最小二乗法及び直交距離回帰による線形回帰で得られた近似直線と回帰式を併記した。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 (JA412N) 及び Bell430 (JA02AX) のケース (Fig. 8-4 (左及び中央)) では、直交距離回帰、最小二乗法の両者ともに $\text{NaI}(\text{Tl})$ 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おり、直交距離回帰ではその影響が比較的大きいように思われる。また、Fig. 8-5 の *GI* の場合はデータ数が多く、ばらつきも比較的小さいため、直交距離回帰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。

本報告では、*RI* 及び *GI* は直交距離回帰による回帰係数をメインとして解析に使用することとし、最小二乗法による回帰係数を用いた場合の解析結果との比較は 8.5 節にて地上測定値を指標として行う。

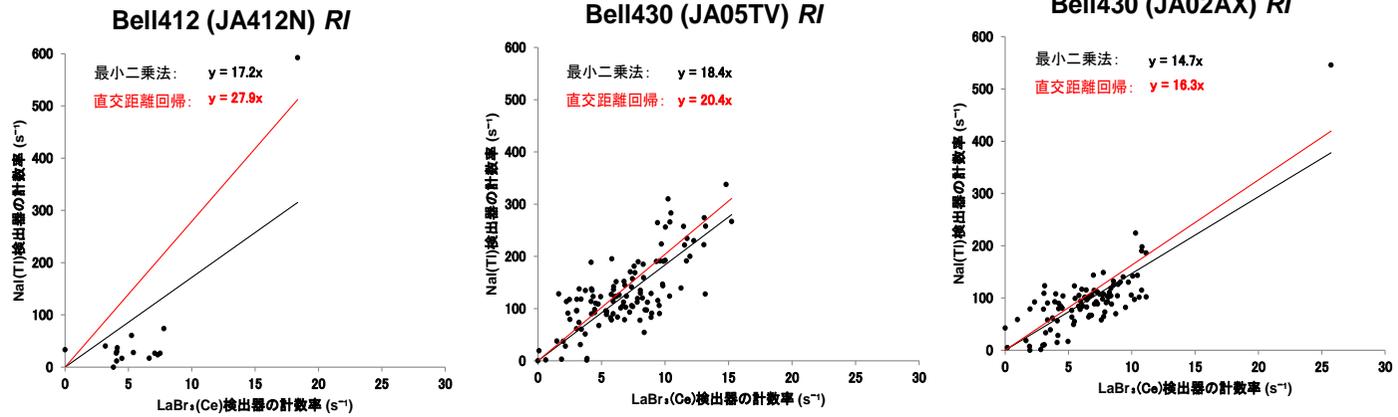


Fig. 8-4 海上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr₃(Ce)検出器の計数率の関係
 (回帰係数を RI と定義する。本報告では、直交距離回帰による回帰係数を用いた。)

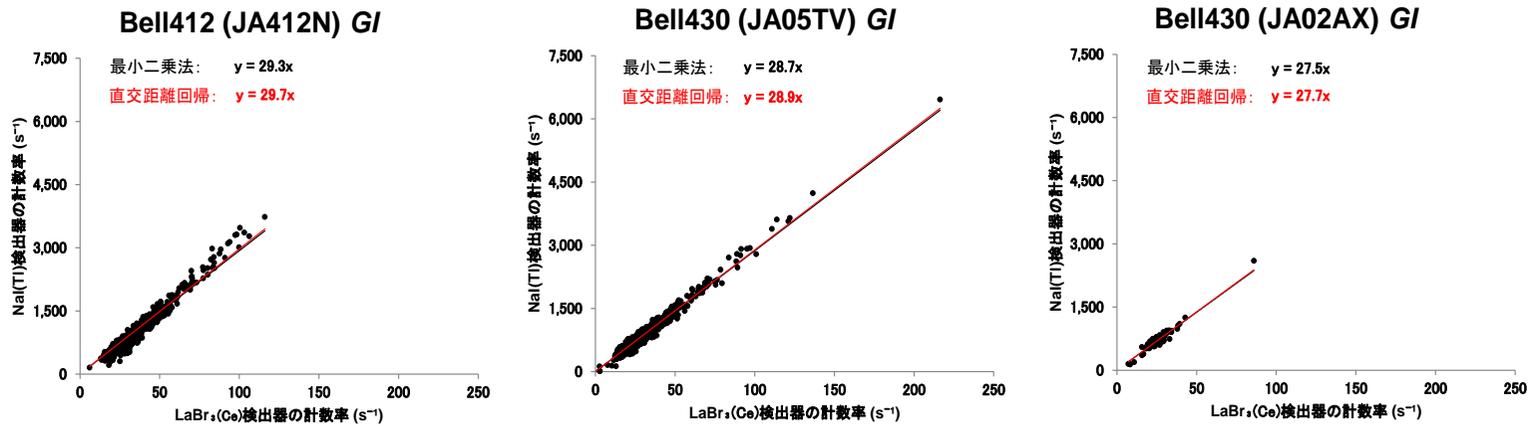


Fig. 8-5 陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr₃(Ce)検出器の計数率の関係
 (回帰係数を GI と定義する。本報告では、直交距離回帰による回帰係数を用いた。)

8.4. GIの高度補正方法

GI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⁾。その結果、式[24]に示す関係にあることが見出された。本報告において、式[24]に基づいて、GIの高度補正を行った。

$$GI_{\text{corr}} = 0.0333 \times (H_m - H_{\text{std}}) + GI \quad [24]$$

ここで、

GI_{corr} : 高度補正後のGI

H_m : 測定時における対地高度(m)

H_{std} : 有人ヘリモニタリングにおける基準対地高度(300 m)

GI: 高度補正前のGI

である。

8.5. 東日本第14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の影響が比較的大きい東電福島原子力発電所から80 km圏内を測定した第18次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5 km圏内無人ヘリモニタリングには適用せず、東日本第14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、空間線量率の換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に示した直交距離回帰に基づくGIを基準値とし、この基準値から1及び2を減じた場合についても解析を実施した。すなわち、Bell412 (JA412N)では29.7、Bell430 (JA05TV)では28.9、Bell430 (JA02AX)27.7をGIの基準値とし、それぞれのGIを28.7及び27.7、27.9及び26.9、26.7及び25.7とした場合についても解析した。

(1) 空間線量率マップ及び空气中ラドン子孫核種由来のγ線計数率マップ

GIを上記のように設定して空間線量率マップ及びラドン子孫核種由来のγ線計数率マップを作成した。Fig. 8-6にラドン弁別手法を適用した東日本第14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. 5-6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 μSv/h~0.2 μSv/hの分布面積が小さくなり、また、ラドン弁別手法による空間線量率の換算値はGIを基準値から減じるほど全体的に大きくなる傾向にあった。

ここで、ラドン子孫核種の影響の大きい地域について考察するために、空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. 8-7)。本マップはラドン弁別手法の過程で計算した NaI(Tl)検出器における空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陸からの大気輸送と測定地近傍における地殻からの放出が考えられ、前者の影響は特に日本海側の冬季に大きくなる傾向にある⁶⁷⁾。一方、東日本第 14 次モニタリングの測定時期は 9 月 20 日～10 月 18 日であったことから、中国大陸からの大気輸送による影響は冬季に見られるレベルに比して小さいと思われ、測定地近傍における地殻由来のも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⁶⁸⁾と矛盾しない。なお、標準的解析手法では、BG フライトにより得られた計数率をバックグラウンドとして減算しているが、その中にはラドン子孫核種由来の計数率も含まれており、ある程度正確にラドン子孫核種の影響が差し引かれていると思われる。BG フライトで取得したデータを用いた場合とラドン弁別手法を用いた場合とで、全計数率から減算されるバックグラウンド計数率の値がどのように異なるかについては次節で比較する。

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

ラドン弁別手法で作成した空間線量率マップの妥当性を評価するために、地上測定値 249 点との比較を行った。ここで、東電福島原子力発電所から 80 km 圏外で行った地上測定の全 250 地点の内 1 点は 80 km 圏内の領域に位置していたため、比較対象から除外した。なお、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換算値についても、地上測定値と比較した。直交距離回帰に基づく RI 及び GI を用いた場合の比較結果を Fig. 8-8 に示す。散布図においては回帰直線の傾きが標準的解析手法で 1.19、ラドン弁別手法では 0.96～1.09 となった。また、ラドン弁別手法においては GI を減じるほどに回帰直線の傾きが大きくなった。これは Fig. 8-6 で見られた通り、GI を減じることで有人ヘリモニタリングによる空間線量率の換算値が上昇することに起因すると思われる。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 249 点中 231 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 92% (全 249 点中 229 点)、GI を基準値から 1 減じた場合で 93% (全 249 点中 232 点)、GI を 2 減じた場合で 91% (全 249 点中 227 点) とラドン弁別手法の適用前後でほとんど同一であった。相対誤差の平均値及び中央値については、ラドン弁別手法を適用した場合の方が 0 に近く、一見すると地上測定値の再現性が改善されたように思われる。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有人ヘリモニタリングデータと地上測定値が整合せず、弱いながらも多峰性が見られた。一方、ラドン弁別手法については、0.05 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 5%～10% 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換算値に及ぼす影響を見るため、最小二乗法に基づく *RI* 及び *GI* を用いた場合の比較結果を Fig. 8-9 に示す。散布図については直交距離回帰の場合に比較して回帰直線の傾きが大きくなる傾向にあり、ファクター 2 に収まるプロットの数については、*GI* を基準値とした場合で 94% (全 249 点中 234 点)、*GI* を基準値から 1 減じた場合で 95% (全 249 点中 236 点)、*GI* を 2 減じた場合で 95% (全 249 点中 237 点) となり、直交距離回帰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* を基準値としたときに平均値及び中央値が最も 0 に近くなり、直交距離回帰の場合よりも相対誤差の平均値は大きくなる傾向にあったものの、中央値と標本標準偏差はほとんど同一であった。

以上をまとめると、ラドン弁別手法を用いると標準的解析手法よりも地上測定値の再現性が改善される傾向にあった。また、ラドン弁別手法において従来用いてい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 または 2 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のは、今までの経験則と同様であった。この傾向は最小絶対値法でも同様であり、最小二乗法と直交距離回帰との間に、地上測定値の再現性の改善の度合いに顕著な差は認められなかった。現状ではいずれの回帰方法にも、Fig. 8-4 に見られたように、*RI* の算出に用いるデータに外れ値が生じた場合、その影響を緩和した上で、回帰係数を求めるロバストなアルゴリズムを持たせていない。外れ値が生じた場合にはロバストな回帰アルゴリズムにより、外れ値の影響を緩和して算出される *RI* を用いると、*GI* を人為的に変化させる必要なく、ラドン弁別手法において空間線量率の換算結果がより良くなる見込みが得られた³²⁾。今後は最小二乗法及び直交距離回帰にロバスト性を持たせ、*RI* の算出方法の更なる改良を検討したい。具体的には、実測値と回帰による予測値との誤差を全データで等分散とするのではなく、データが持つ重みを考慮して外れ値の影響を緩和できるような回帰アルゴリズムを組み込む予定である。

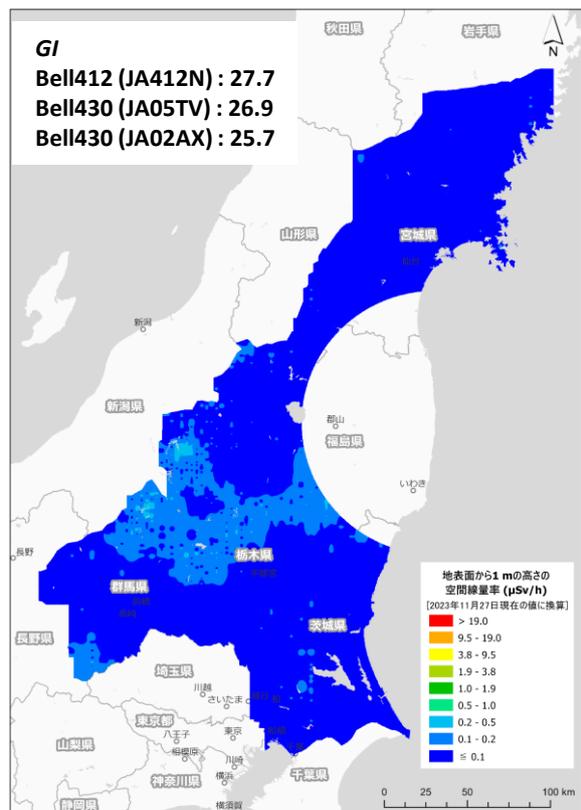
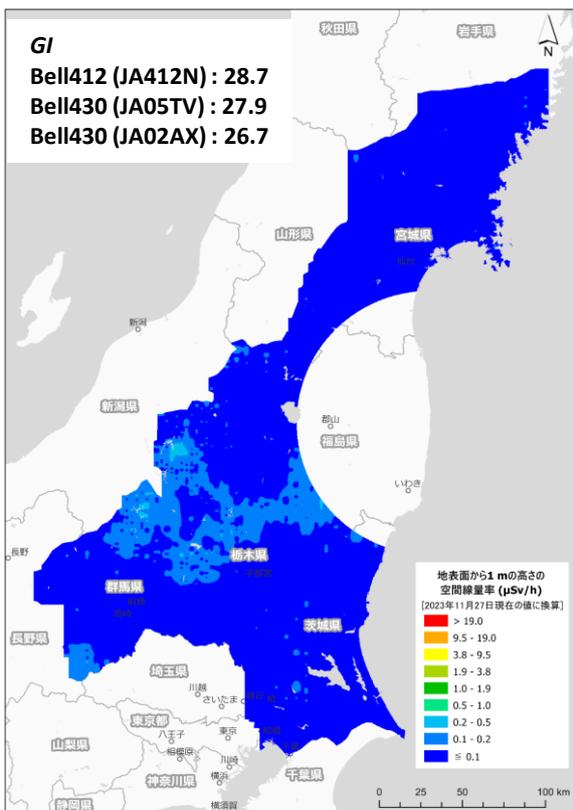
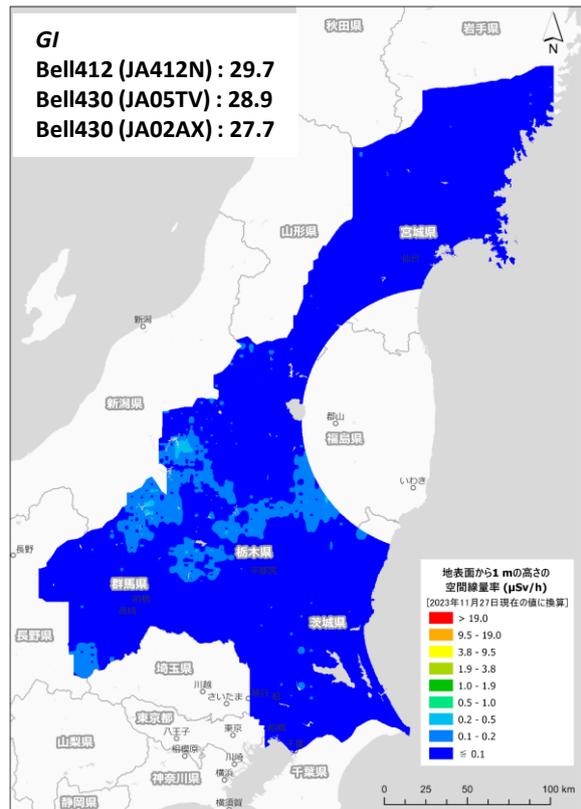
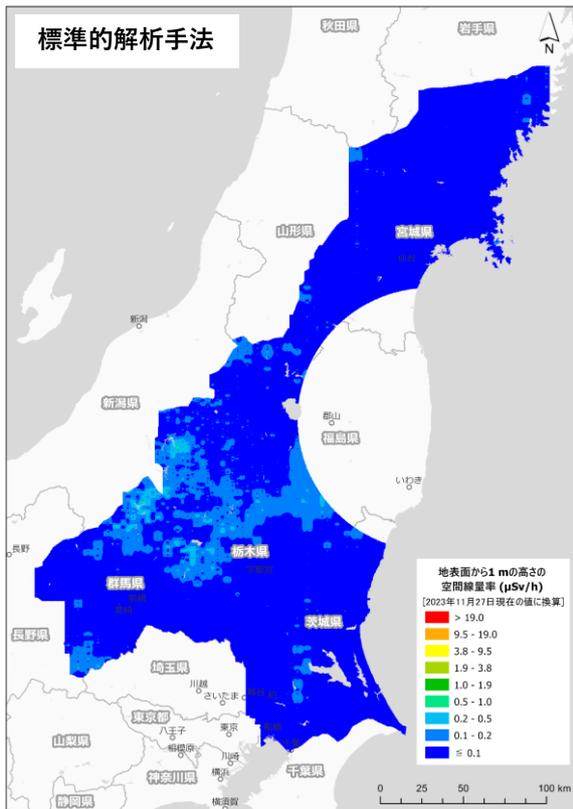


Fig. 8-6 ラドン弁別手法適用前後の東日本第14次モニタリングの空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

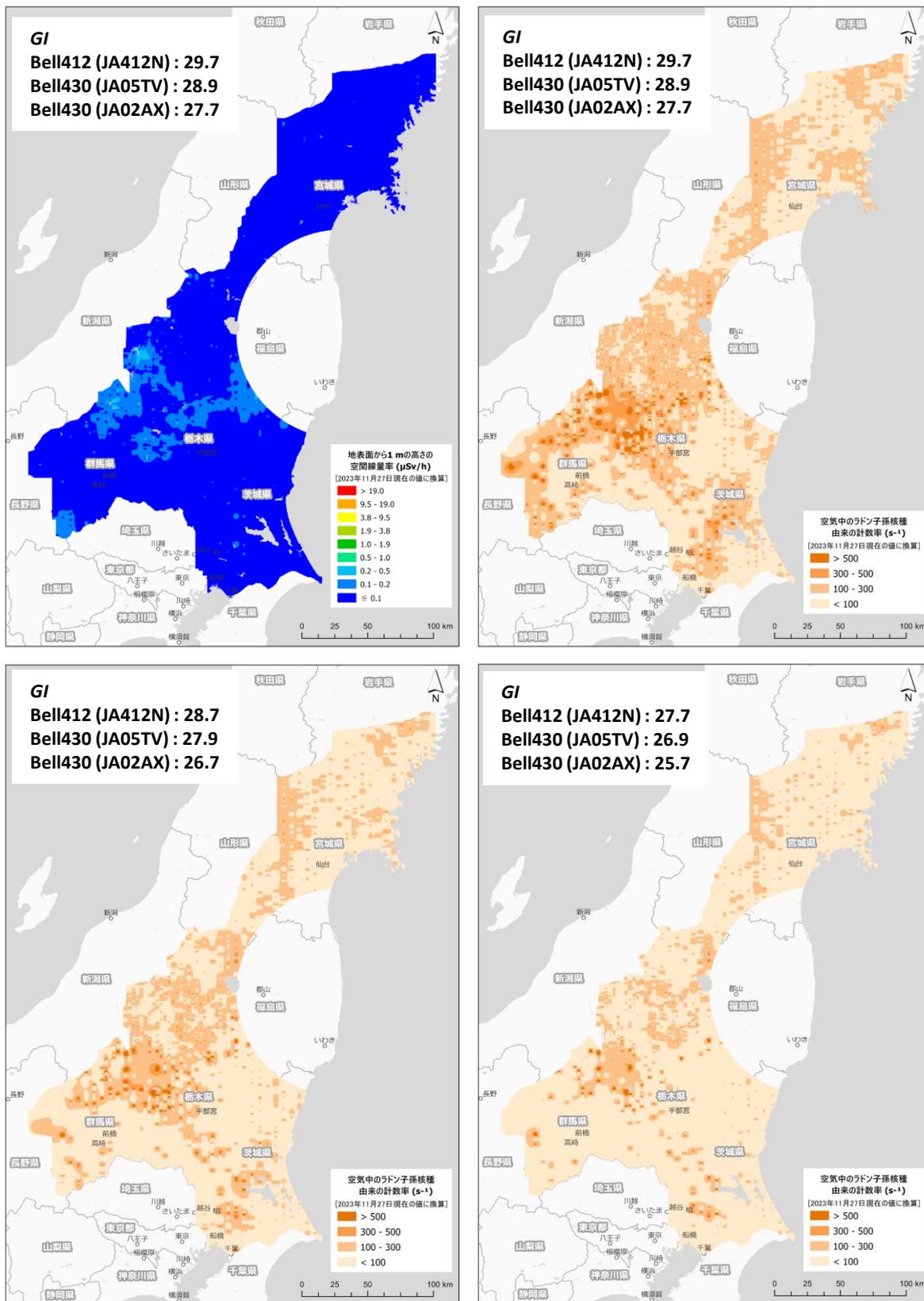


Fig. 8-7 東日本第 14 次モニタリングの測定結果から計算した空気中ラドン子孫核種の計数率マップ

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

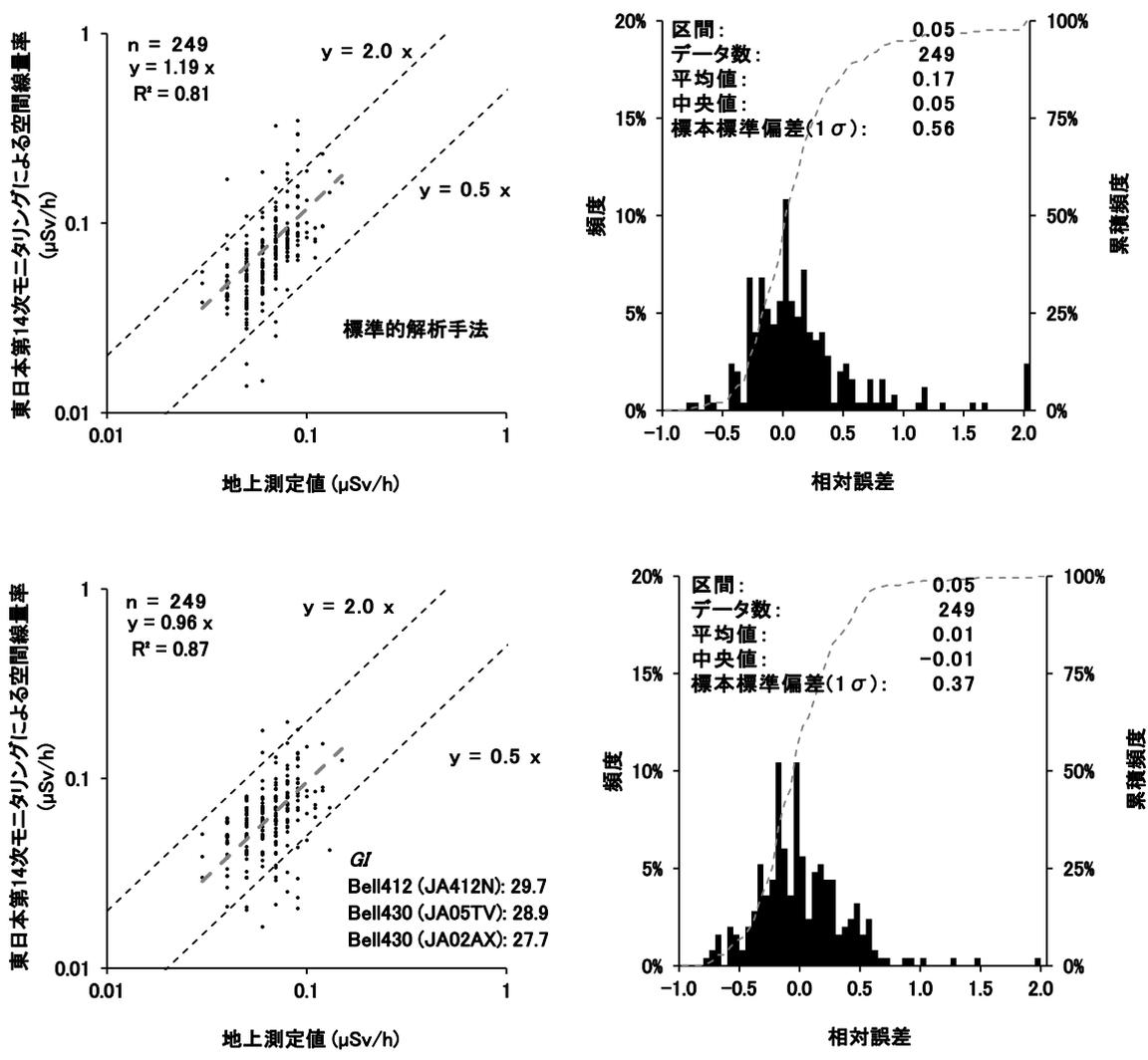


Fig. 8-8 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率と地上測定値との比較
(直交距離回帰による RI 及び GI を用いた場合)
(左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

(1/2)

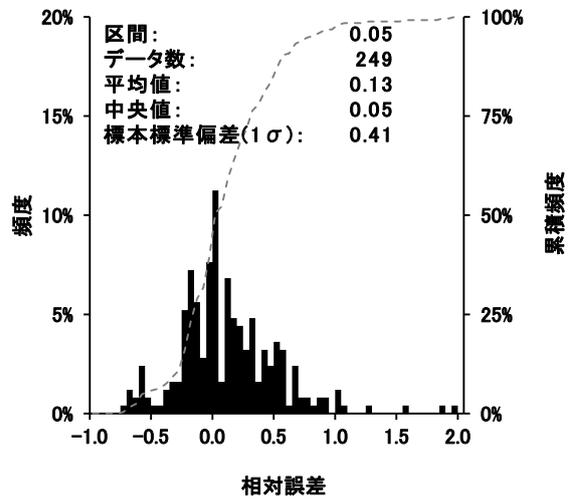
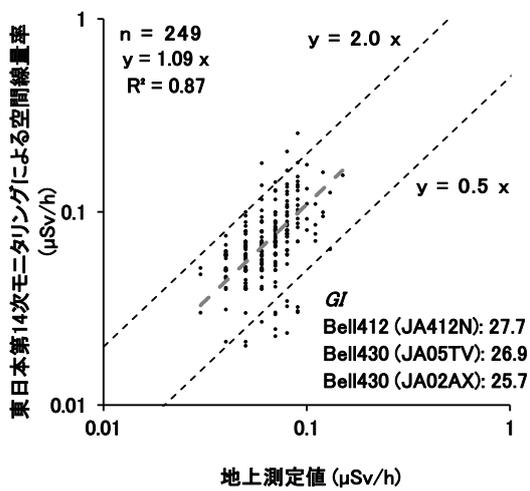
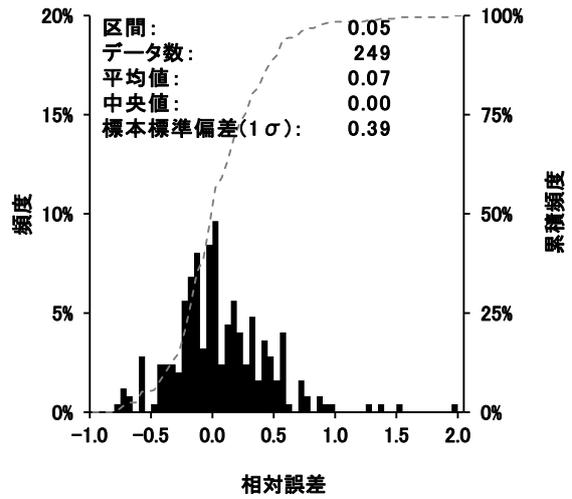
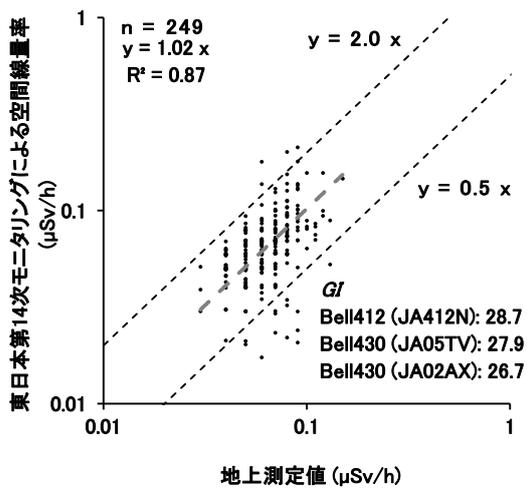


Fig. 8-8 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率と地上測定値との比較
(直交距離回帰による *RI* 及び *GI* を用いた場合)
(左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

(2/2)

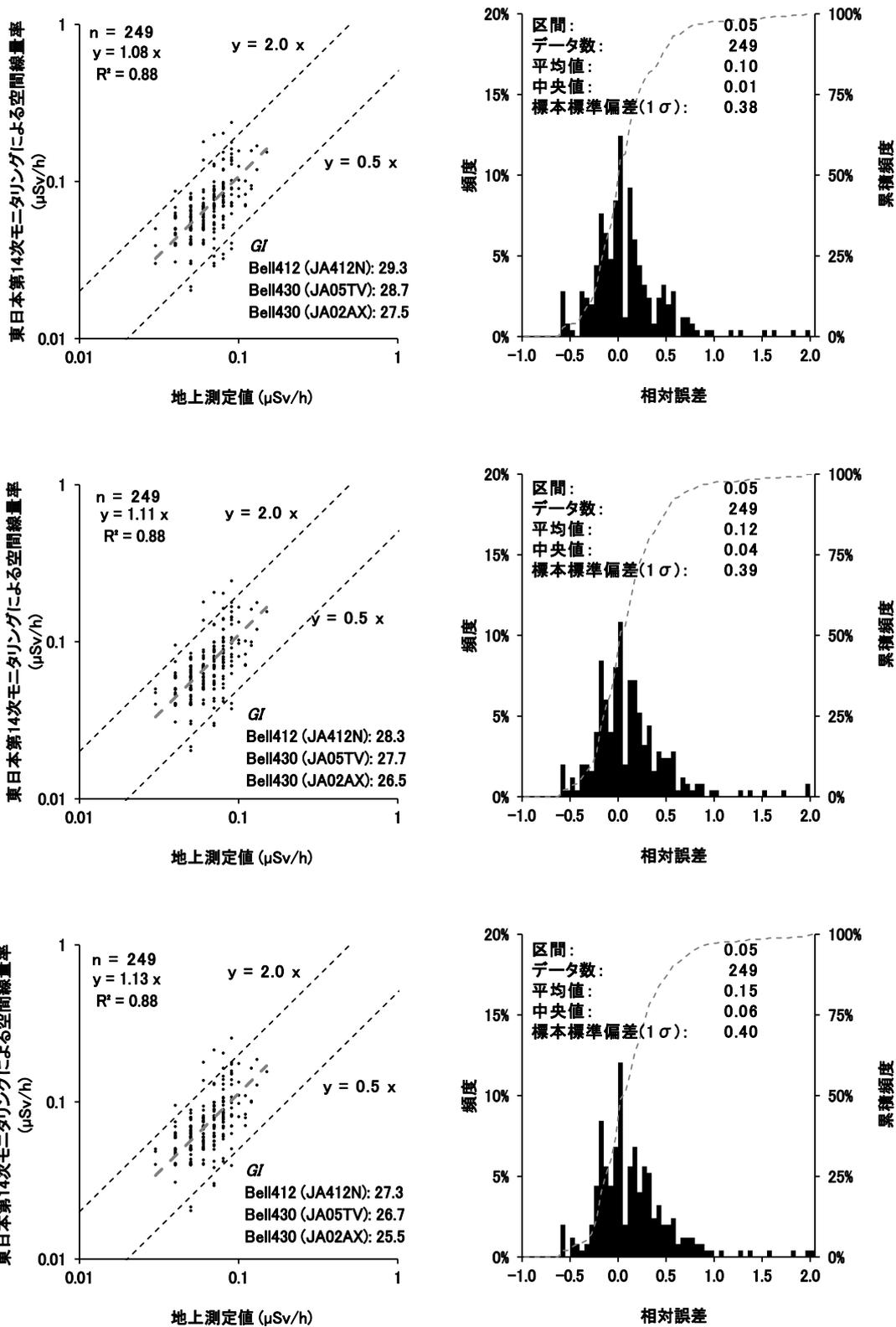


Fig. 8-9 ラドン弁別手法適用後の空間線量率と地上測定値との比較
 (最小二乗法による *RI* 及び *GI* を用いた場合)
 (左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

8.6. バックグラウンド計数率の比較

Fig. 4-15 のフロー図に則った標準的解析手法においては、BG フライトとして対地高度約 900 m に機体を保ち約 2 分のフライトを継続して得られたデータをバックグラウンド計数率として減算しており、ある程度正確にラドン子孫核種由来の計数率を差し引くことができていると思われる。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. 8-10 に示す。いずれも、標準的解析手法における BG フライトを実施した時刻及び場所で取得した計数率データを基に算出したものである。本図には比較のため、東電福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs が存在しないと考えられる九州電力川内発電所周辺で、2023 年度 (令和 5 年度) に実施したモニタリング (川内 BG モニタリング (前期) 及び川内 BG モニタリング (後期) と表記) において、標準的解析手法に用いたバックグラウンド計数率とラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率もプロットした。東日本第 14 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高くなる傾向にあった。例えば、Bell412 (JA412N) では約 1.8 倍、Bell430 (JA02AX) 及び Bell430 (JA02AX) では約 1.2 倍程度であった。このことから、Fig. 8-8 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過剰であり、従って標準的解析手法よりも空間線量率が低く算出される傾向にあ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。また、川内 BG (前期) 及び川内 BG (後期) で使用した Bell430 (JA02AX) 及び 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両者とも 1.3 倍程度高くなった。このように、東日本第 14 次モニタリングと川内 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同様であった。

標準的解析手法では BG フライトにより得られた計数率を、その日の測定エリア全体におけるバックグラウンド計数率の代表値として扱うことから、特に、測定エリア近傍における地殻から放出されるラドン子孫核種由来の計数率を適切に除去できない可能性が高い。一方、ラドン弁別手法では、各測定点における全計数率から、空気中のラドン子孫核種 (遠方からの輸送及び近傍の地殻から放出されたものを含む) に起因する計数率を切り出して除去できる点に強みがあり、上記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。

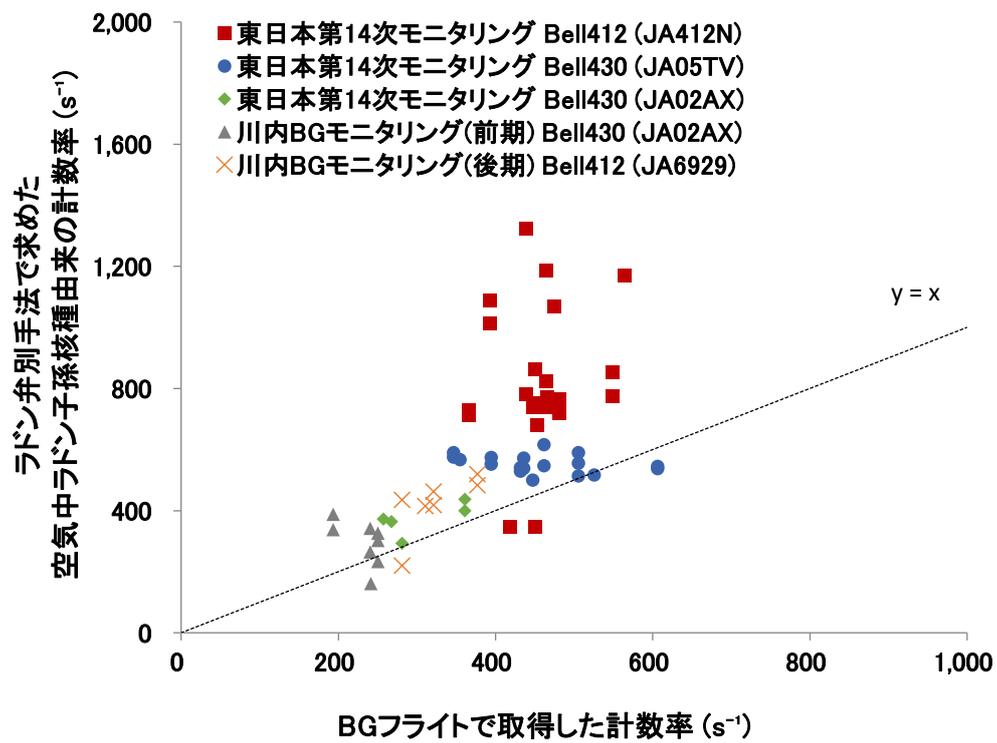


Fig. 8-10 BG フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子孫核種由来の計数率の比較

9. 無人航空機を用いたフライト試験

9.1. 背景

東電福島原子力発電所事故後、「原子力災害対策マニュアル⁶⁹⁾」が改定され、原子力災害時における事故後の対応について大幅な改定が行われた。事故後初期段階における緊急時モニタリングは、オフサイトセンター内に設置される緊急時モニタリングセンターが実施することとなっている。運用上の介入レベル (Operational Intervention Level、以下、OIL) の区域設定やスクリーニングの重要性分類のための放射線モニタリング (緊急時モニタリング) は、迅速かつタイムリーに行われる必要がある。東電福島原子力発電所事故後の対応において、発電所周辺の空間線量率分布把握のために無人ヘリコプター等の無人航空機が活用されている^{40),41)}。また、無人航空機を用いた放射性プルームの計測技術について要素技術開発が行われている⁷⁰⁾⁻⁷²⁾。無人航空機によるモニタリングは車両や人手によるモニタリングと比較して、モニタリング要員の被ばく低減が可能のほか、陸路を用いないため住民の避難との干渉を防ぐことができ、またモニタリングポストのような点での測定と比較して面的な放射線分布の評価が可能である等の特長がある。しかしながら、現状として、無人航空機によるモニタリング技術は原子力災害時における緊急時モニタリングにすぐ運用できる状況にはなく、上記の「原子力災害対策マニュアル」の枠組みを考慮し、活用シーンに合わせた要素技術開発が必要である。

原子力施設敷地外に放射性物質が放出された場合、数時間以内に緊急時防護措置を準備する区域 (Urgent Protective action planning Zone : 原子力施設から概ね 5 km~30 km 圏内、以下、UPZ) の OIL1 区域の住民は避難もしくは屋内退避が必要になる。OIL1 区域の特定のためモニタリング要員が安全に無人機を運用するためには、少なくとも UPZ 外からの遠隔操縦が必要になる (Fig. 9-1)。また、時系列な対応課題の抽出も重要である。Fig. 9-2 に原子力発電所事故時の対応を時系列でシミュレーションした例を示す。Fig. 9-2 では、理想的な無人航空機システムによる運用の想定、また現行の無人航空機システム (福島第一原子力発電所周辺の放射線モニタリングで現在運用されているヤマハ発動機社製の無人ヘリコプターを用いた場合を想定) での対応可能な部分と対応が難しい部分を示した。Fig. 9-2 で示すように現行の無人航空機システムは緊急時のモニタリングに即座に対応できる機能及び体制が構築されておらず、いくつかの課題がある。まず現行のシステムは、機器の動作状況や測定情報をリアルタイムで監視する機能がない。よって、機器に問題が生じた際の即時かつ適切な対応が難しく、また機体が地上に戻るまで測定データを取得することができないという制約がある。さらに、上空で取得した測定データは、地表面から 1 m の高さの空間線量率への換算やマッピングが必要であり、これらの処理は専門技術者が専用ソフトなどを使用して各自のコンピュータで行っている。このように現行のシステムでは測定、解析、評価の工程で手間と時間がかかり、緊急時モニタリングに対応したシステムの効率化が不十分である。また現行の無人ヘリコプターではフライトの時間が最大 2 時間と短いことや通常の通信システムでは長距離通信 (数十キロメートル以上) による運用が難しいなど、ハード的な課題も挙げられる。

本報告では、原子力災害時における緊急時モニタリングでの運用を想定し、商用化された無人

航空機の中でも稼働時間の長い Edge Autonomy 製 (ラトビア) の Penguin C を用いた基礎性能評価試験を実施した。また本試験を通して、無人航空機運用技術の慣熟を図るとともに、無人航空機を原子力災害時の緊急時モニタリングにおいて運用する際に、必要となる機能等について検討を行った。

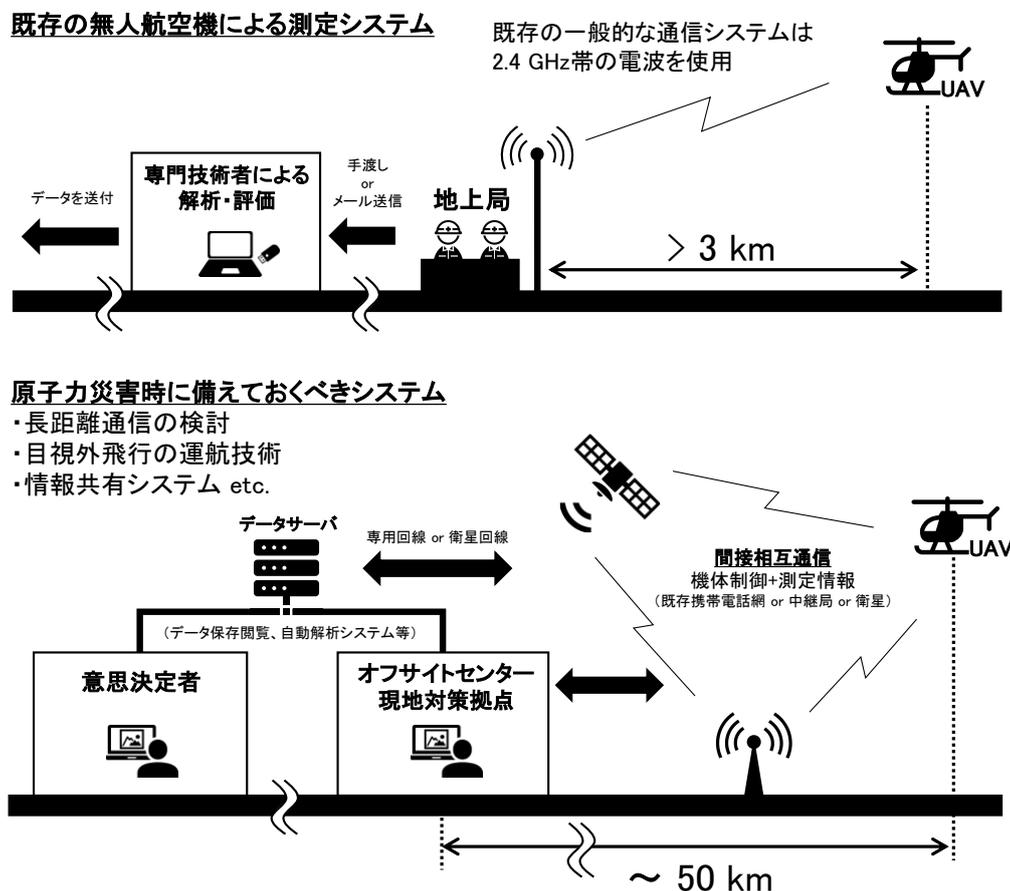
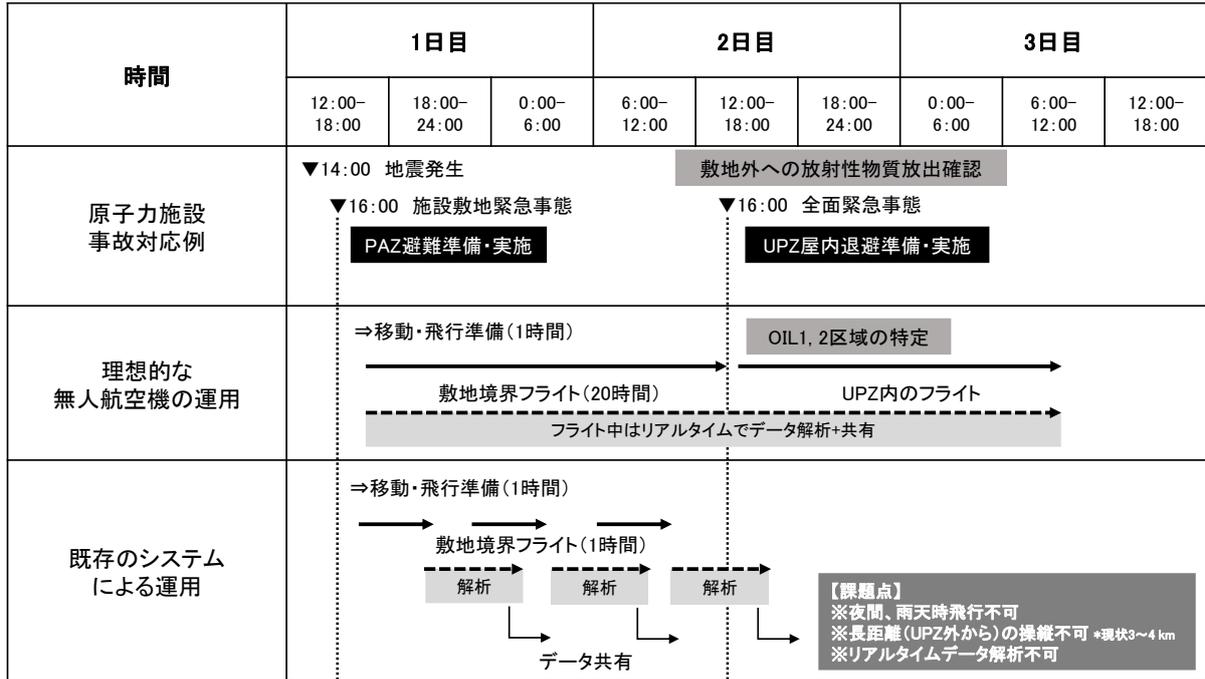


Fig. 9-1 原子力災害時に備えるべき無人航空機システムのイメージ



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

Fig. 9-2 原子力発電所事故を例にした対応シミュレーション

9.1.1.原子力災害時に運用する無人航空機の必要性能

近年、無人航空機の技術革新は目覚ましく、国内外で様々な製品が開発されている。原子力災害時に緊急時モニタリングを行うという観点から無人航空機に求められる必要最低限の性能は以下の項目が挙げられる。

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

これらの性能に近い国内外の代表的な無人航空機の例を Fig. 9-3 に示す。無人航空機の種類は、固定翼機(飛行機タイプ)と回転翼機(ヘリコプタータイプ)に分けられる。両タイプの一般的な利点・欠点は以下の通りである。

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

- ・ 回転翼機

利点：ホバリングできるため、固定点での長時間測定等が可能。

欠点：固定翼機に比べると燃費が悪い。

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

回転翼機では、既に東電福島原子力発電所事故後の環境放射線モニタリング等に利用されているヤマハ発動機社の無人ヘリコプター (FAZER R G2) が挙げられる。航続距離は、固定翼機に及ばないものの、約 90 分の連続フライトが可能であり、最大積載量は 30 kg と、既存のバッテリー駆動のドローンと比べると様々なミッションに適用可能である。またヤマハ発動機社の無人ヘリコプターは、全国の農薬散布業務に国内で 1,000 台以上が運用されていること、操縦者の免許制度や保守及びメンテナンスの工場が全国に配備されていることなど、実運用面で優位な点が多い。FAZER R G2 はヤマハ発動機社が独自に、10 年以上前から開発を重ねてきたものであり、製品としての完成度が高く、東電福島原子力発電所事故後の環境放射線モニタリングにおいて 100 時間以上のフライトを行っているが、人的ミス以外の事故がなく信頼性が高いことも魅力である。

本試験では、現状、原子力防災時における緊急時モニタリングに求められる必要性能を最も満たす機種として、Edge Autonomy 製の Penguin C を選定した。Penguin C は固定翼機であり、最大 20 時間の連続航行が可能である。また、中東を中心とした国外に数多くの納入実績を持ち、オプションとして衛星通信を使えることやカタパルト方式の離陸が可能な製品である。今回、国内外の無人航空機で最も原子力災害時における緊急時モニタリングに運用可能な性能を有すると考えられる Penguin C について、実際に飛行試験などを通じて性能評価を試みるとともに、国内での運用の課題について抽出を行った。



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

Fig. 9-3 国内外の無人航空機

9.1.2.選定した機種のパフォーマンス

選定した Penguin C の外観及びカタログ性能について、それぞれ Fig. 9-4 及び Table 9-1 に示す。翼長は 3.3 m、機長は 2.3 m の大きさで、専用ケースに収納可能である。燃料として、ガソリンとオイル (Edge Autonomy 社製、2 ストロークエンジンオイル) の混合燃料が用いられる。飛行時間はペイロードや気象条件にもよるが、カタログでは最大 20 時間以上とされている。ペイロードスペースにカメラ等の機器搭載が可能であり、最大積載重量は 5 kg である。また、機体は防水仕様となっており、5 mm/h 程度の雨天時でも運用可能である。離陸には空圧のカタパルトを使用し、着陸にはパラシュートを利用する。機体制御には専用のソフトウェアを用いており、離発着を含めてマニュアルの操縦は必須ではない。

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

- (1) 長時間 (20 時間以上) のフライトが可能であること。

Penguin C は特製の燃料噴射式エンジンを備えており、20 時間以上の連続フライトが可能とされている。Edge Autonomy 社によると、同機種のこれまでの最長飛行時間は 21 時間である。ただし同実績は、ペイロード等のバッテリーを余分に消費する機器を搭載せず燃料を満杯にし、最適な気象条件の下で得られたものである。

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

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

- (3) 離陸のための滑走路を要しないこと。

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

- (4) 予め設定したプログラムにより自律飛行が可能であること。

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

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

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

- (6) 風速 10 m/s 以下でのフライトが可能であること。

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

- (7) 雨天時のフライトが可能であること。

5 mm/h 程度までならば雨天時でもオペレーションは可能とされている。



Fig. 9-4 Penguin C 外観写真

Table 9-1 Penguin C のカタログスペック ⁷³⁾

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

Table 9-2 Edge Autonomy における MTBF 計算時の事故分類⁷⁴⁾

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

9.2. フライト試験概要及び結果及び結果

9.2.1. フライト試験概要

Penguin C を用いた試験について、実施日および各試験内容を Table 9-3 に示す。試験では以下の項目を重点的に評価するために、各種フライト試験を実施した。

- (1) 機体基本性能及び信頼性の確認及び評価
- (2) 夜間フライトに必要な機能及び運用体制の確認評価
- (3) 放射線測定システムの評価

フライト試験では、1 時間飛行を 6 回、夜間想定フライト試験 1 時間飛行を 3 回、6 時間飛行を 1 回、合計 10 回の試験を実施した。各フライトの詳細情報を Table 9-4 に示す。フライト No.2023-02、No.2023-05、No.2023-10 では、キャリブレーションフライトを実施した。キャリブレーションフライトでは、各対地高度で円を描くフライトを実施し、地表面からの距離に伴う計数率の減衰率を取得した。併せて、歩行式サーベイメータ (ホットスポットファインダー：株式会社 日本遮蔽技研製、CsI(Tl) : 38 × 38 × 25 mm) により地表面から 1 m の高さの空間線量率を測定し、Penguin C による測定値を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するためのパラメータを取得した。

フライト試験の工程を Fig. 9-5 に示す。フライト前の機体の健全性確認は Penguin C 用の「機体健全性確認の点検手順書」に従って実施した。この点検手順書はメーカーのマニュアルを基に原子力機構が独自に作成したものであり、機材の更新履歴やフライト試験で得られた知見を反映し、常に最新版となるようアップデートしている。健全性確認では点検手順書に従い、カタパルト、トラッキングアンテナ、地上局及び機体の組み立てとエンジン動作確認までを行い、部品の脱落や摩耗がないか、各機器との通信に異常は見られないかどうかを確認する。点検はフライト実施予定の前週などフライトまでに余裕をもって行った。点検の結果、必要があれば部品の交換

を実施し、該当箇所に係る点検工程を再度実施して問題なく作動することを確認し、フライト試験を実施した。なお、フライト直前にもプリフライトチェックにて機体の状態確認は実施するが、プリフライトチェックは機体の詳細な点検等を事前に完了していることを前提とした飛行前の最終確認という位置付けである。

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

Table 9-3 試験日及び試験内容一覧

試験日 (2023年)		実施場所	試験内容	フライト No.
6月12日	(月)	福島ロボット テストフィールド (福島県南相馬市)	飛行試験 1回 1時間フライト (測定フライト)	2023-01
7月10日	(月)		飛行試験 1回 1時間フライト (キャリブレーションフライト)	2023-02
7月11日	(火)		飛行試験 1回 1時間フライト (測定フライト)	2023-03
7月12日	(水)		飛行試験 1回 夜間想定フライト	2023-04
7月13日	(木)		飛行試験 1回 1時間フライト (キャリブレーションフライト)	2023-05
7月14日	(金)		飛行試験 1回 1時間フライト (測定フライト)	2023-06
9月5日	(火)		飛行試験 1回 1時間フライト (測定フライト)	2023-07
12月19日	(火)		飛行試験 1回 夜間想定フライト	2023-08
12月20日	(水)		飛行試験 1回 夜間想定フライト	2023-09
12月21日	(木)		飛行試験 1回 6時間フライト (キャリブレーションフライト)	2023-10

Table 9-4 各フライト試験の詳細情報

項目	各フライト情報									
	2023/06/12	2023/07/10	2023/07/11	2023/07/12	2023/07/13	2023/07/14	2023/09/05	2023/12/19	2023/12/20	2023/12/21
フライト番号	2023-01	2023-02	2023-03	2023-04	2023-05	2023-06	2023-07	2023-08	2023-09	2023-10
試験地	RTF ^{*1}	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF
天候	曇り	曇り	曇り	晴れ	晴れ	曇り	曇り	曇り	晴れ	曇り(曇)
外気温 (°C)	22	28	28	30	31	27	29	6	7	5
風速/離陸 (m/s)	2.5	0	0	5	2.5	2.7	1	1.6	3.5	3.4
風速/着陸 (m/s)	3	3	1.2	3	3	2	3	0.5	2.7	1.5
風向/離陸 (度) ^{*2}	19	-	-	160	75	120	80	359	40	10
風向着陸 (度) ^{*2}	60	130	20	200	100	150	100	208	36	357
気圧 (hPa)	1,008	1,004	1,003	1,005	1,002	1,005	1,006	1,014	1,001	1,001
離陸時間	11:45	11:17	14:18	10:37	10:55	10:47	11:09	13:51	11:12	09:26
着陸時間	12:50	12:24	15:31	11:48	12:08	11:54	12:16	14:56	12:27	15:31
飛行時間	1 時間 5 分	1 時間 7 分	1 時間 13 分	1 時間 11 分	1 時間 13 分	1 時間 7 分	1 時間 7 分	1 時間 5 分	1 時間 15 分	6 時間 5 分
機体番号	PNC0056	PNC0056	PNC0056	PNC0094	PNC0056	PNC0056	PNC0056	PNC0094	PNC0094	PNC0056
エンジン番号	EFI-1	EFI-1	EFI-1	1044	EFI-1	EFI-1	EFI-1	1044	1044	EFI-1
ペイロード	放射線検出器	放射線検出器	放射線検出器	カメラ パイロットランプ	放射線検出器	放射線検出器	放射線検出器	カメラ パイロットランプ	カメラ パイロットランプ	放射線検出器
離陸重量 (kg)	19.79	19.79	19.94	19.95	19.84	19.84	19.79	19.59	19.59	21.06
搭載燃料 (kg)	2	2	2.1	2	2	2	2	2	2	3.12
消費燃料 (kg)	0.46	0.42	0.46	0.48	0.56	0.36	0.46	0.42	0.5	2.38
最大エンジン回転数 (rpm)	6,180	6,240	6,313	6,294	6,217	6,153	6,256	6,384	6,353	6,238

*1RTF : 福島ロボットテストフィールド

*2北を 0 度、東を 90 度とする。



Fig. 9-5 フライト試験の工程

9.2.2.機体の基本性能及び信頼性の確認及び評価結果

Penguin C 機体の基本性能及び信頼性の確認を行うため、計 10 回のフライト試験を行い、フライト中の飛行位置、機体姿勢、エンジン、機体システム等の情報を記録した。各フライト試験の作業情報詳細を Table 9-5～Table 9-14 に、各フライトの飛行軌跡を Fig. 9-6～Fig. 9-15 に示す。フライト試験の結果、どの試験においてもフライト中の機体の動作異常やシステム異常等は見られなかった。ただし、機体の離陸に使用するカタパルトの部品交換や機体の部品交換及び修理を途中、何度か行った。Table 9-15 に交換及び修理した部品一覧を示す。Penguin C はラトビア製の機体であり、部品の購入は海外から輸入する必要がある。よって部品の調達には数ヶ月を要する場合もあった。海外からの輸入機体を運用する場合には各予備パーツを予め保持しておくことで、スムーズな運用が可能となる。

Table 9-5 フライト No.2023-01 の作業情報詳細

フライトNo	2023-01	風速/離陸 (m/s)	2.5	離陸重量 (kg)	19.79
日時	2023/6/12	風速/着陸 (m/s)	3	搭載燃料 (kg)	2
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	19	消費燃料 (kg)	0.46
ペイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	60	内容	1時間フライト
天候	曇り	離陸時間	11:45	機体番号	PNC0056
気温 (°C)	22	着陸時間	12:50	エンジン番号	EFI-1
気圧 (hPa)	1008	飛行時間	1時間5分	最大エンジン回転数 (rpm)	6180
プリフライトチェック					
<p>関連機器一式設置完了後、10時30分頃よりプリフライトチェックを開始した。現場でのプリフライトチェックにおいて基地局からのコマンドによる舵面コントロールを異常無く、実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>気象状況は北の風、風速2.5~3m/sであり、福島ロボットテストフィールド（以下、RTFという）カタパルトを北東に向け離陸できると判断し、11時45分に離陸した。上昇飛行及びロイター飛行に至るまで機体は既定速度を保って安定して飛行しており、異常が認められないことを目視及び基地局にて確認後、ミッション飛行へと移行した。</p>					
ミッション					
<p>ミッションフライトは、RTF敷地外農地上空に1点のウェイポイントを置き、旋回する方式とした。本ミッションにおける高度設定は250mの1高度とし、旋回フライトを行った。オートパイロットによる対気速度は23~24m/sにて一定しており、テレメトリーも異常無く順調にフライトした。</p>					
着陸					
<p>気象状況は北東の風と着陸に適していない風向だが、風速2.5~3m/sと弱く、北からRTFに進入し、着陸できると判断をした。フライト時間が1時間を越えた為、着陸コマンド送信、エンジンストップ、パラシュートおよびエアバッグ開傘まで支障なくシステムが作動し、12時50分にRTF敷地内滑走路付近へ着陸した。総飛行時間は1時間5分だった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はRTF内の泥地であり、着陸の際、機体を損傷させる突起物等は無かったため、機体やパラシュートに目立った損傷は発生しなかったが、エアバッグに2cm程度の損傷を確認した。右翼と右尾翼の可動部分に泥が入ったので、コンプレッサーで泥を落とし、動作確認を行った。確認したところ、異音やサーボに負荷がかかっていないことを確認した。</p>					



Fig. 9-6 フライト No.2023-01 の飛行軌跡

(赤線で示した枠内は立入制限監視区域である。)

(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び立入制限監視区域を追記して掲載)

Table 9-6 フライト No.2023-02 の作業情報詳細

フライトNo	2023-02	風速/離陸 (m/s)	0	離陸重量 (kg)	19.79
日時	2023/7/10	風速/着陸 (m/s)	3	搭載燃料 (kg)	2
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	-	消費燃料 (kg)	0.42
パイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	130	内容	1時間フライト
天候	曇り	離陸時間	11:17	機体番号	PNC0056
気温 (°C)	28	着陸時間	12:24	エンジン番号	EFI-1
気圧 (hPa)	1004	飛行時間	1時間7分	最大エンジン回転数 (rpm)	6240
プリフライトチェック					
<p>関連機器一式設置完了後、10時30分頃よりプリフライトチェックを開始した。現場でのプリフライトチェックにおいて基地局からのコマンドによる舵面コントロールを異常無く、実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>風速0m/sの風はない気象条件下で福島ロボットテストフィールド（以下、RTFという）滑走路からカタパルトを北向きで11時17分に離陸した。風力の助けを得ない状況であったものの上昇フェーズからロイター飛行に至るまで機体は既定速度・角度を保って安定して飛行しており、高度を安定させるためのロイター飛行を数分維持した後、異常が認められないことを目視及び地上局にて再度確認し、ミッション飛行へと移行した。</p>					
ミッション					
<p>ミッションフライトは、RTF敷地外農地上空に1点のウェイポイントを置き、巡回する方式とした。本ミッションにおける高度設定は175m、200m、225m、250m、275m、325mのオートパイロットによる対気速度は23～24m/sにて一定しており、テレメトリーも異常無く順調にフライトした。</p>					
着陸					
<p>気象状況は南東の風、風速3m/sで北からRTFに進入し着陸可能であると判断をした。フライト時間が1時間を超えた為、着陸コマンド送信後、エンジンストップ、パラシュートおよびエアバック開傘まで支障なくシステムが作動し、12時24分にRTF敷地内滑走路付近へ着陸した。総飛行時間は1時間7分だった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はRTF内の砂地であり、機体を損傷させる突起物等は無かったが、エアバックに1cmほどに損傷を確認した。JDRONE南相馬サービススペースにてエアバックの修復作業を行うこととした。機体やパラシュートに目立った損傷は発生しなかったため、継続して使用可能な状態であることを確認した。</p>					



Fig. 9-7 フライト No.2023-02 の飛行軌跡

(赤線で示した枠内は立入制限監視区域である。)

(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び立入制限監視区域を追記して掲載)

Table 9-7 フライト No.2023-03 の作業情報詳細

フライトNo	2023-03	風速/離陸 (m/s)	0	離陸重量 (kg)	19.94
日時	2023/7/11	風速/着陸 (m/s)	1.2	搭載燃料 (kg)	2.1
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	-	消費燃料 (kg)	0.46
パイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	20	内容	1時間フライト
天候	曇り	離陸時間	14:18	機体番号	PNC0056
気温 (°C)	28	着陸時間	15:31	エンジン番号	EFI-1
気圧 (hPa)	1003	飛行時間	1時間13分	最大エンジン回転数 (rpm)	6313
プリフライトチェック					
<p>離陸場所と基地局をRTFから北西にある上浜佐市有地に変更した。関連機器一式設置完了後、13時30分頃よりプリフライトチェックを開始した。現場でのプリフライトチェックにおいて基地局からのコマンドによる舵面コントロールを異常無く、実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>風速0m/sの風はない気象条件下で14時18分に離陸した。離陸からウェイポイント0に向かう途中一時的に機体が制限区域から出てしまうものの、機体の制御状態、通信状態が共に正常であり完全なコントロール下にあるため、フライトを続行した。ウェイポイント1でロイター飛行を数分維持した後、異常が認められないことを目視及び地上局にて再度確認し、ミッション飛行へと移行した。</p>					
ミッション					
<p>ミッションフライトは、RTF敷地外農地上空に1点のウェイポイントを置き、5分おきウェイポイント移動する方式とした。本ミッションにおける高度設定は200m、250m、オートパイロットによる対気速度は23~24m/sにて一定しており、テレメトリーも異常無く順調にフライトした。</p>					
着陸					
<p>気象状況は北の風、風速1~1.5m/sで北からRTFに進入し着陸可能であると判断をした。着陸エリアに向かう途中一時的に機体が制限区域から出てしまうものの、機体の制御状態、通信状態が共に正常であり完全なコントロール下にあるため、北からRTF敷地に進入し、着陸コマンド送信後、エンジンストップ、パラシュートおよびエアバック開傘まで支障なくシステムが作動し、15時31分にRTF敷地内滑走路付近へ着陸した。総飛行時間は1時間13分だった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はRTF内の草むらであり、機体を損傷させる突起物等は無かった。機体やパラシュート、エアバックが目立った損傷は発生しなかったため、継続して使用可能な状態であることを確認した。</p>					



Fig. 9-8 フライト No.2023-03 の飛行軌跡

(赤線で示した枠内は立入制限監視区域である。)

(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び立入制限監視区域を追記して掲載)

Table 9-8 フライト No.2023-04 の作業情報詳細

フライトNo	2023-04	風速/離陸 (m/s)	5	離陸重量 (kg)	19.95
日時	2023/7/12	風速/着陸 (m/s)	3	搭載燃料 (kg)	2
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	160	消費燃料 (kg)	0.48
ペイロード	カメラ パイロットランプ	風向/着陸 (度)	200	内容	夜間想定フライト
天候	晴れ	離陸時間	10:37	機体番号	PNC0094
気温 (°C)	30	着陸時間	11:48	エンジン番号	1044
気圧 (hPa)	1005	飛行時間	1時間11分	最大エンジン回転数 (rpm)	6294
プリフライトチェック					
<p>夜間フライトを想定しており、前日に機体の両翼、胴体にパイロットランプを取り付け、カメラへの換装作業後、動作確認をした。南風の成分が強いため、離陸場所と基地局をRTFから北西にある上渋佐市有地に変更した。関連機器一式設置完了後、10時頃よりプリフライトチェックを開始した。事前に南相馬サービスベースで行った動作確認においても異常はなく、現場でのプリフライトチェックにおいても問題無く終了した。</p>					
離陸					
<p>気象状況は南の風、風速5m/sであり、上渋佐市有地からカタパルトを南東の向きで離陸できると判断し、10時37分に離陸した。上昇飛行及びロイター飛行に至るまで機体は既定速度を保持して安定して飛行しており、異常が認められないことを目視及び基地局にて確認後、ミッション飛行へと移行した。</p>					
ミッション					
<p>ミッションフライトは、RTF敷地外農地上空に1点のウェイポイントを置き、巡回する方式とした。本ミッションにおける高度設定は225m、250m、オートパイロットによる対気速度は23~24m/sにて一定しており、テレメトリーも異常無く順調にフライトした。</p>					
着陸					
<p>気象状況は南の風、風速3m/sで北からRTFに進入し着陸可能であると判断をした。フライト時間が1時間を越えた為、着陸コマンド送信後、エンジンストップ、パラシュートおよびエアバッグ開傘まで支障なくシステムが作動し、11時48分にRTF敷地内滑走路付近へ着陸した。総飛行時間は1時間11分だった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はRTF内の調整池付近であり、機体を損傷させる突起物等は無かった。機体やパラシュート、エアバッグに目立った損傷は発生しなかったため、継続して使用可能な状態であることを確認した。</p>					



Fig. 9-9 フライト No.2023-04 の飛行軌跡

(赤線で示した枠内は立入制限監視区域である。)

(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び立入制限監視区域を追記して掲載)

Table 9-9 フライト No.2023-05 の作業情報詳細

フライトNo	2023-05	風速/離陸 (m/s)	2.5	離陸重量 (kg)	19.84
日時	2023/7/13	風速/着陸 (m/s)	3	搭載燃料 (kg)	2
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	75	消費燃料 (kg)	0.56
ペイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	100	内容	1時間フライト
天候	晴れ	離陸時間	10:55	機体番号	PNC0056
気温 (°C)	31	着陸時間	12:08	エンジン番号	EFI-1
気圧 (hPa)	1002	飛行時間	1時間13分	最大エンジン回転数 (rpm)	6217
プリフライトチェック					
<p>関連機器一式設置完了後、10時頃よりプリフライトチェックを開始した。現場でのプリフライトチェックにおいて基地局からのコマンドによる舵面コントロールを異常無く、実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>気象状況は東の風、風速2.5m/sであり、RTFから離陸すると横風成分が多くなるが、カタパルトを北東に向け離陸できると判断し、10時55分に離陸した。上昇飛行及びロイター飛行に至るまで機体は既定速度を保って安定して飛行しており、異常が認められないことを目視及び基地局にて確認後、ミッション飛行へと移行した。</p>					
ミッション					
<p>ミッションフライトは、RTF敷地外農地上空に1点のウェイポイントを置き、巡回する方式とした。本ミッションにおける高度設定は175m~275mの25mずつ高度変化を行った、オートパイロットによる対気速度は23~24m/sにて一定しており、テレメトリーも異常無く順調にフライトした。</p>					
着陸					
<p>気象状況は東の風、風速3m/sで北からRTFに進入し着陸可能であると判断をした。フライト時間が1時間を越えた為、着陸コマンド送信後、エンジンストップ、パラシュートおよびエアバッグ開傘まで支障なくシステムが作動し、12時08分にRTF敷地内滑走路付近へ着陸した。総飛行時間は1時間13分だった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はRTF滑走路内であり、機体を損傷させる突起物等は無かった。機体やパラシュート、エアバックに目立った損傷は発生しなかったため、継続して使用可能な状態であることを確認した。</p>					



Fig. 9-10 フライト No.2023-05 の飛行軌跡

(赤線で示した枠内は立入制限監視区域である。)

(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び立入制限監視区域を追記して掲載)

Table 9-10 フライト No.2023-06 の作業情報詳細

フライトNo	2023-06	風速/離陸 (m/s)	2.7	離陸重量 (kg)	19.84
日時	2023/7/14	風速/着陸 (m/s)	2	搭載燃料 (kg)	2
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	120	消費燃料 (kg)	0.36
ペイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	150	内容	1時間フライト
天候	曇り	離陸時間	10:47	機体番号	PNC0056
気温 (°C)	27	着陸時間	11:54	エンジン番号	EFI-1
気圧 (hPa)	1005	飛行時間	1時間7分	最大エンジン回転数 (rpm)	6153
プリフライトチェック					
<p>関連機器一式設置完了後、9時30分頃よりプリフライトチェックを開始した。現場でのプリフライトチェックにおいて基地局からのコマンドによる舵面コントロールを異常無く、実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>気象状況は南東の風、風速2.5~3m/sであり、RTFからカタパルトを北東に向け離陸できると判断し、10時47分に離陸した。上昇飛行及びロイター飛行に至るまで機体は既定速度を保って安定して飛行しており、異常が認められないことを目視及び基地局にて確認後、ミッション飛行へと移行した。</p>					
ミッション					
<p>ミッションフライトは、RTF敷地外農地上空に1点のウェイポイントを5分おきウェイポイント移動する方式とした。本ミッションにおける高度設定は175m、オートパイロットによる対気速度は23~24m/sにて一定しており、テレメトリーも異常無く順調にフライトした。</p>					
着陸					
<p>気象状況は南東の風、風速2m/sで北からRTFに進入し着陸可能であると判断をした。フライト時間が1時間を超えた為、着陸コマンド送信後、エンジンストップ、パラシュートおよびエアバッグ開傘まで支障なくシステムが作動し、11時54分にRTF敷地内滑走路付近へ着陸した。総飛行時間は1時間17分だった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はRTF内の砂地であり、機体を損傷させる突起物等は無かった。機体やパラシュート、エアバックに目立った損傷は発生しなかったため、継続して使用可能な状態であることを確認した。</p>					



Fig. 9-11 フライト No.2023-06 の飛行軌跡

(赤線で示した枠内は立入制限監視区域である。)

(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵⁾に Penguin C のフライト軌跡及び立入制限監視区域を追記して掲載)

Table 9-11 フライト No.2023-07 の作業情報詳細

フライトNo	2023-07	風速/離陸 (m/s)	1	離陸重量 (kg)	19.79
日時	2023/9/5	風速/着陸 (m/s)	3	搭載燃料 (kg)	2
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	80	消費燃料 (kg)	0.46
ペイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	100	内容	1時間フライト
天候	曇り	離陸時間	11:09	機体番号	PNC0056
気温 (°C)	29	着陸時間	12:16	エンジン番号	EFI-1
気圧 (hPa)	1006	飛行時間	1時間7分	最大エンジン回転数 (rpm)	6256
プリフライトチェック					
<p>関連機器一式設置完了後、10時頃よりプリフライトチェックを開始した。現場でのプリフライトチェックにおいて基地局からのコマンドによる舵面コントロールを異常無く、実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>気象状況は東の風、風速1m/sであり、福島ロボットテストフィールド（以下、RTFという）滑走路から離陸すると横風成分が多くなるが、カタパルトを北東に向け離陸できると判断し、11時09分に離陸した。上昇飛行及びロイター飛行に至るまで機体は既定速度を保って安定して飛行しており、異常が認められないことを目視及び基地局にて確認後、ミッション飛行へと移行した。</p>					
ミッション					
<p>ミッションフライトは、RTF敷地外農地上空に1点のウェイポイントを置き、巡回する方式とした。本ミッションにおける高度設定は225mのオートパイロットによる対気速度は23~24m/sにて一定しており、テレメトリーも異常無く順調にフライトした。</p>					
着陸					
<p>気象状況は東の風、風速3m/sで北からRTFに進入し着陸可能であると判断をした。フライト時間が1時間を越えた為、着陸コマンド送信後、エンジンストップ、パラシュートおよびエアバッグ開傘まで支障なくシステムが作動し、12時16分にRTF敷地内滑走路付近へ着陸した。総飛行時間は1時間7分だった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はRTF内の砂地であり、機体を損傷させる突起物等は無かった。機体やパラシュート、エアバックに目立った損傷は発生しなかったため、継続して使用可能な状態であることを確認した。</p>					



Fig. 9-12 フライト No.2023-07 の飛行軌跡

(赤線で示した枠内は立入制限監視区域である。)

(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び立入制限監視区域を追記して掲載)

Table 9-12 フライト No.2023-08 の作業情報詳細

フライトNo	2023-08	風速/離陸 (m/s)	1.6	離陸重量 (kg)	19.59
日時	2023/12/19	風速/着陸 (m/s)	0.5	搭載燃料 (kg)	2
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	359	消費燃料 (kg)	0.42
ペイロード	カメラ パイロットランプ	風向/着陸 (度)	208	内容	夜間想定フライト
天候	曇り	離陸時間	13:51	機体番号	PNC0094
気温 (°C)	6	着陸時間	14:56	エンジン番号	1044
気圧 (hPa)	1014	飛行時間	1時間5分	最大エンジン回転数 (rpm)	6384
プリフライトチェック					
<p>夜間フライトを想定しており、前日に機体の両翼、胴体にパイロットランプを取り付け、カメラへの換装作業後、動作確認をした。関連機器一式設置完了後、13時頃よりプリフライトチェックを開始した。事前に南相馬サービスベースで行った動作確認においても異常はなく、現場でのプリフライトチェックにおいても基地局からのコマンドによる舵面コントロールを異常なく実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>気象状況は北風、風速1.5~2m/sであり、RTF滑走路からカタパルトを北向きで離陸できると判断し、13時51分に離陸した。上昇飛行及びロイター飛行に至るまで機体は既定速度を保って安定して飛行しており、異常が認められないことを目視及び基地局にて確認後、ミッション飛行へと移行した。</p>					
ミッション					
<p>ミッションフライトは、RTF敷地外農地上空に1点のウェイポイントを置き、反時計回りに旋回する方式とした。本ミッションにおける高度設定は200m、オートパイロットによる対気速度は23~24m/sにて一定しており、テレメトリーも異常無く順調にフライトした。</p>					
着陸					
<p>気象状況は南西の風、風速0.5~1m/sと弱く、RTFから北からの着陸進入で可能と判断した。飛行時間が1時間を超えた為、着陸コマンド送信後、エンジンストップ、パラシュートおよびエアバッグ開傘まで支障なくシステムが作動し、14時56分にRTF敷地内滑走路付近へ着陸した。総飛行時間は1時間5分だった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はRTF内の砂地であり、機体を損傷させる突起物等はなかった。機体やパラシュート、エアバックに目立った損傷は発生しなかったため、継続して使用可能な状態であることを確認した。</p>					



Fig. 9-13 フライト No.2023-08 の飛行軌跡

(赤線で示した枠内は立入制限監視区域である。)

(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び立入制限監視区域を追記して掲載)

Table 9-13 フライト No.2023-09 の作業情報詳細

フライトNo	2023-09	風速/離陸 (m/s)	3.5	離陸重量 (kg)	19.59
日時	2023/12/20	風速/着陸 (m/s)	2.7	搭載燃料 (kg)	2
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	40	消費燃料 (kg)	0.5
ペイロード	カメラ パイロットランプ	風向/着陸 (度)	36	内容	夜間想定フライト
天候	晴れ	離陸時間	11:12	機体番号	PNC0094
気温 (°C)	7	着陸時間	12:27	エンジン番号	1044
気圧 (hPa)	1001	飛行時間	1時間15分	最大エンジン回転数 (rpm)	6353
プリフライトチェック					
<p>前日同様、夜間想定フライトなので、機体の両翼、胴体にパイロットランプを取り付けた。機体の準備完了後、10時30分頃よりプリフライトチェックを開始した。現場でのプリフライトチェックにおいても基地局からのコマンドによる舵面コントロールを異常なく実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>気象状況は北東の風、風速3~3.5m/sであり、RTF滑走路からカタバルトを北向きで離陸できると判断し、11時12分に離陸した。上昇飛行及びロイター飛行に至るまで機体は既定速度を保って安定して飛行しており、異常が認められないことを目視及び基地局にて確認後、ミッション飛行へと移行した。</p>					
ミッション					
<p>ミッションフライトは、RTF敷地外農地上空に2点のウェイポイントを置き、反時計回りに旋回する方式とした。本ミッションにおける高度設定は200m、225mの2高度。オートパイロットによる対気速度は23~24m/sにて一定しており、テレメトリーも異常無く順調にフライトした。</p>					
着陸					
<p>気象状況は風速2.5~3m/s、風向が北風のため着陸時、RTF敷地外に出てしまう可能性があるためと判断したため、上渋佐寺崎農地を着陸エリアとした。着陸エリアに向かうロイター飛行時に一時的に機体が制限区域から出てしまうものの、機体の制御状態、通信状態が共に正常であり完全なコントロール下にあるため南東からRTF敷地外北側農地に進出し、上渋佐寺崎農地に安全に着陸できると判断した。フライト時間が1時間を越えた為、着陸コマンド送信後、機体の制御状態は正常であったため機体投棄措置は取らずに、そのまま着陸シーケンスを行い、エンジンストップ、パラシュートおよびエアバッグ開傘まで支障なくシステムが作動し、12時27分にRTF上渋佐寺崎農地へ着陸した。総飛行時間は1時間15分だった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点は上渋佐寺崎農地であり、機体を損傷させる突起物等は無かった。機体やパラシュート、エアバックに目立った損傷は発生しなかったため、継続して使用可能な状態であることを確認した。</p>					



Fig. 9-14 フライト No.2023-09 の飛行軌跡

(赤線で示した枠内は立入制限監視区域である。)

(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び立入制限監視区域を追記して掲載)

Table 9-14 フライト No.2023-10 の作業情報詳細

フライトNo	2023-10	風速/離陸 (m/s)	3.4	離陸重量 (kg)	21.06
日時	2023/12/21	風速/着陸 (m/s)	1.5	搭載燃料 (kg)	3.12
場所	福島県南相馬市	風向/離陸 (度)	10	消費燃料 (kg)	2.38
ペイロード	放射線検出器	風向/着陸 (度)	357	内容	6時間フライト
天候	曇り (曇)	離陸時間	9:26	機体番号	PNC0056
気温 (°C)	5	着陸時間	15:31	エンジン番号	EFI-1
気圧 (hPa)	1001	飛行時間	6時間 5分	最大エンジン回転数 (rpm)	6238
プリフライトチェック					
<p>関連機器一式設置完了後、8時30分頃よりプリフライトチェックを開始した。現場でのプリフライトチェックにおいて基地局からのコマンドによる舵面コントロールを異常無く、実施できていることを確認した。</p>					
離陸					
<p>気象状況は北風、風速3～3.5m/sであり、RTF滑走路からカタパルトを北向きで離陸できると判断し、9時26分に離陸した。上昇飛行及びロイター飛行に至るまで機体は既定速度を保って安定して飛行しており、異常が認められないことを目視及び基地局にて確認後、ミッション飛行へと移行した。</p>					
ミッション					
<p>ミッションフライトは、前回同様RTF敷地外農地上空に1点のウェイポイントを置き、旋回する方式とした。本ミッションにおける高度設定は150m～250mの25mごと上昇と300mの高度であった。オートパイロットによる対気速度は23～24m/sにて一定しており、テレメトリーも異常無く順調にフライトした。</p>					
着陸					
<p>気象状況は北風とRTF敷地内への着陸に適していない風向であったが、風速1～1.5m/sと弱いため、RTFへは北からの着陸進入が可能と判断した。飛行時間が6時間を越えた為、着陸コマンド送信後、エンジンストップ、パラシュートおよびエアバック開傘まで支障なくシステムが作動し、15時31分にRTF敷地内滑走路付近へ着陸した。総飛行時間は6時間5分だった。</p>					
ポストフライトチェック					
<p>着陸地点はRTF内の砂地であり、機体を損傷させる突起物等は無かった。機体やパラシュート、エアバックに目立った損傷は発生しなかったため、継続して使用可能な状態であることを確認した。</p>					



Fig. 9-15 フライト No.2023-10 の飛行軌跡

(赤線で示した枠内は立入制限監視区域である。)

(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び立入制限監視区域を追記して掲載)

Table 9-15 10回フライト試験で修理交換した部品一覧

対応	部品名	
交換	スパークプラグ	PNC0094
交換	ヒンジテープ	TL-2
一部補修	翼関係	WC-4, WR-4, TB-1, TB-3, TR-1, TV-2, TL-2
補修	エアバック	A-6
補修	エアバック	A-1
補修	パラシュートカバー	CC-1
補修	エアバックカバー	CA-1
補修	レフトウィング	WL-4
交換	パラシュートブライドル	O-リング

9.2.3.夜間フライトに必要となる機能及び運用体制の確認評価結果

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

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

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

<p>無人航空機飛行マニュアル (空港等周辺・150m以上・DID・夜間・目視外・30m・催し・危険物・物件投下) 場所を特定した申請について適用 国土交通省航空局標準マニュアル① 令和4年12月5日版</p> <p>3-7 夜間飛行を行う際の体制</p> <p>(1) 夜間飛行においては、目視外飛行は実施せず、機体の向きを視認できる灯火が装備された機体を使用し、機体の灯火が容易に認識できる範囲内での飛行に限定する。</p> <p>(2) 飛行高度と同じ距離の半径の範囲内に第三者が存在しない状況でのみ飛行を実施する。</p> <p>(3) 操縦者は、夜間飛行の訓練を修了した者に限る。</p> <p>(4) 補助者についても、飛行させている無人航空機の特徴を十分理解させておくこと。3-1(5)に示す第三者の立入管理措置を行う場合には、補助者の配置に代えることができる。 夜間の離発着場所において車のヘッドライトや撮影用照明機材等で機体離発着場所に十分な照明を確保する。</p>
--

以上の内容より、夜間飛行時は「機体の向きを視認できる灯火」装備が必要である。

夜間フライト想定試験では、灯火機能として LED ライトを機体の両翼裏面に装着させ、フライト時における地上からのライト視認性確認を行った。LED ライトは航空機と同様に、左翼に赤いライト、右翼に緑のライトとした。Fig. 9-16 に試験時の機体の様子を示す。試験を行った結果、日中の明るい中、対地高度 300 m で飛行している最中でも LED の発光及び機体の向きを視認できた。よって LED ライトを両翼裏面に装着させることで、夜間飛行時に必要となる視認性の確保は可能である。

また、夜間でも周囲の状況を確認できる暗視カメラ (Epsilon140: Edge Autonomy 社製) を機体に搭載した場合においてもフライト試験を実施した。Fig. 9-17 は暗視カメラで日中に撮影した赤外線 (IR) 画像である。夜間フライト時は、暗視カメラを搭載することで、フライトの安全性をさらに向上させることができると考えられる。

運用体制については、操縦者の夜間飛行に対する技能向上、また夜間における周囲監視の方法や、機体特性の再確認が必要である。2024 年 (令和 6 年) 2 月の現時点において、日本での Penguin C による夜間フライトの実績はなく、「航空局標準マニュアル」に則った夜間フライトの

運用体制は整えられていない。今後、海外や国内のテストフィールド等において、夜間フライトの経験を積むことで、運用体制の基盤構築が可能である。



Fig. 9-16 LED ライトを装着した状態で行った対地高度 200 m でのフライトの様子



Fig. 9-17 日中に撮影したフライト時の赤外線カメラ画像

9.2.4.放射線測定システムの評価結果

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

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

システム A は Penguin C 機体本体に搭載される。システム A の外観を Fig. 9-19 に示す。システム A には放射線検出器モジュール (日本放射線エンジニアリング株式会社製)、前方カメラ (Uniview 社製 IPC312SB-ADF28K-IO)、写真撮影用カメラ (The Imaging Source 社製

DFM36AX296-ML)、GNSS センサー (u-blox 社製 GlobalSat BU-353W10: M8M)、気圧温湿度計 (OMRON 社製 2JCIE-BU01) が搭載されており、それらのデータはデータロガーPCによって USB メモリに保存されると同時に、機体通信を用いて地上基地局にあるシステム B にデータが送信される。併せて、システム A はシステム B からの信号を受信して遠隔操作が可能となっている。データは全て、GNSS から得られた時刻情報で関連付けされており、1 秒ごとに日時情報、緯度、経度、高度情報、気圧、温湿度情報、 β 線及び γ 線計数率、 γ 線スペクトル情報が得られる。放射線検出器にはゲルマニウム酸ビスマス (以下、BGO) とプラスチックシンチレータを用いたホスウィッチ型検出器を使用した。ホスウィッチ型検出器とは、複数の異なるシンチレータを用いることで、放射線の種別 (γ 線と β 線) ごとに得られるパルス形状に変化を与えることで、それぞれを弁別できる検出器である。試験で使用した検出器は、表面に遮光用のアルミ蒸着マイラ膜、次にプラスチックシンチレータ (25 mm ϕ \times 1 mm H)、そして BGO (25 mm ϕ \times 25 mm H) といった積層構造になっている。 β 線はプラスチックシンチレータで、 γ 線は BGO で検出するシステムとなっている。原子力災害時における緊急時モニタリングにおいて、放射線測定時の機体の自己汚染をどのようにして把握するのかが一つの課題である。本システムでは、ホスウィッチ型検出器を用いることで機体表面の汚染状況を β 線のカウントで把握できるようにしている。

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

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

これらの測定システムを Penguin C のフライト試験で運用した結果、迅速なデータ収集が可能となり、リアルタイムでの監視と遠隔操作を実現することができた。また統合された運用管理により、作業の効率化と作業員の負担の軽減が図られ、安全性と効率性が向上した。なお本試験では、システム A-B 間は機体の無線通信、システム B-C 間は有線ケーブルによる直接通信を用いて、システム運用試験を行った。実際に緊急時モニタリングで Penguin C を長距離運用する場合は、通信手段の更なる検討及び運用の最適化が必要である。長距離通信が必要である場合、システム A とシステム B の間の通信には衛星通信や携帯回線を利用し、遠隔地でも確実な通信を確立する必要があり、またシステム B 及びシステム C が外部サーバと通信する際には、インターネット接続や VPN を介したセキュアな通信手段が求められる。遠隔地や非常時でもシステム間

の連携を確保し、迅速かつ効果的な対応を可能とする通信体制を構築する必要がある。

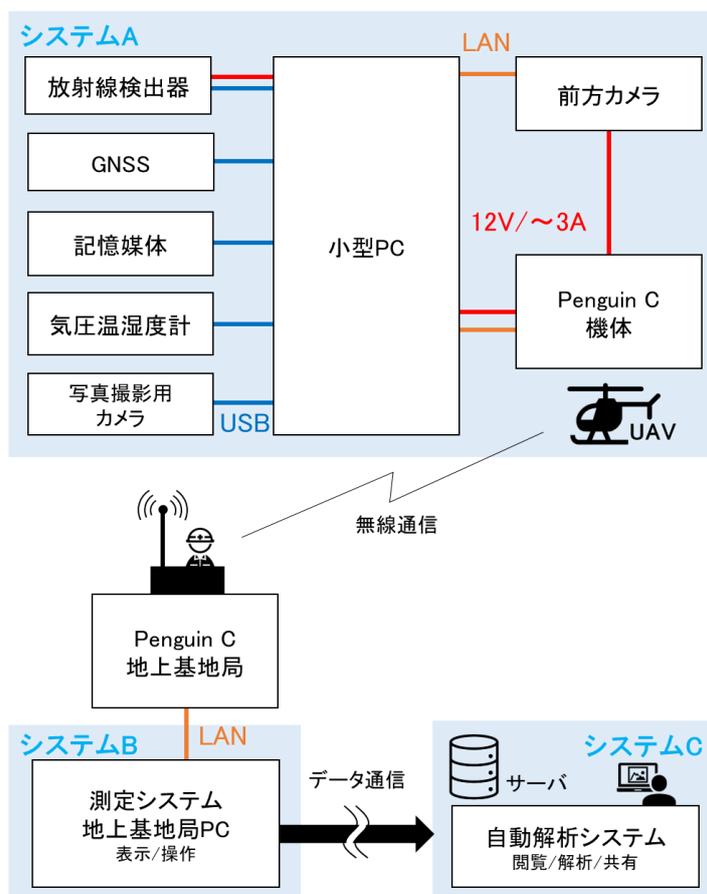


Fig. 9-18 試験で使用した放射線測定システム



Fig. 9-19 システム A 外観図



Fig. 9-20 システム B 外観及び画面表示例

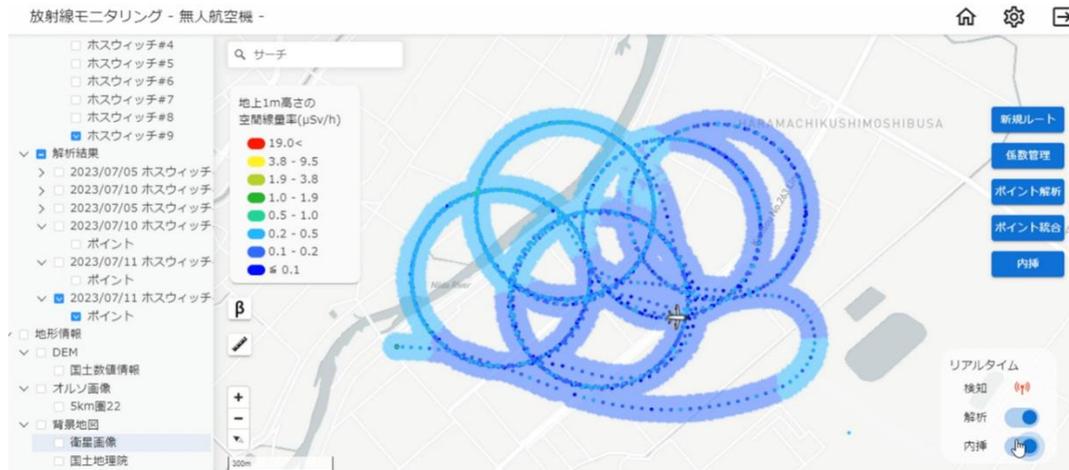


Fig. 9-21 システム C 画面例

次に、測定システムでキャリブレーションフライトを行った結果について述べる。4.5.2 項で示した方法と同様にして、キャリブレーションフライトで得られた対地高度と計数率の関係に対して Microsoft Excel®により指数近似を行った結果を Fig. 9-22 に示す。なお、フライト No.2023-02 のキャリブレーションフライトでは対地高度は約 160 m、180 m、200 m、250 m 及び 300 m とし、フライト No.2023-05 のキャリブレーションフライトでは対地高度は約 160 m、190 m、220 m、250 m 及び 280 m とし、フライト No.2023-10 のキャリブレーションフライトでは対地高度は約 160 m、180 m、200 m、220 m 及び 280 m とした。フライト前に離陸地点で測定した計数率を対地高度 1 m のデータとし、併せて指数近似を行った。Fig. 9-22 の空気減弱係数 AF (m^{-1}) は、各フライトでおおよそ同じ傾向を示した。

Fig. 9-23 及び Fig. 9-24 に歩行サーベイによる地表面から 1 m の高さの空間線量率マップを示す。これらの測定は 2023 年 (令和 5 年) 7 月 11 日及び同年 12 月 21 日に実施し、平均空間線量率はそれぞれ、 $0.084 \mu\text{Sv/h}$ 及び $0.085 \mu\text{Sv/h}$ であった。

キャリブレーションフライト及び歩行サーベイの結果から算出した空間線量率換算係数 CD 、また空気減弱係数 AF の一覧を Table 9-16 に示す。 AF は、各フライトでおおよそ同じ傾向を示したが、フライト No.2023-10 の CD は他に比べて小さな値となった。歩行サーベイの空間線量率は各測定で大きく変わらなかったのに対し、Fig. 9-22 を見ると No.2023-10 の計数率が他に比べて小さいことが分かる。No.2023-02 と No.2023-10 の計数率をそれぞれ比較した結果、No.2023-10 の計数率は No.2023-02 の計数率から約 15%～30%減少していたことが分かった。両測定の間隔 (164 日) から算出した物理的半減期による線量の減少 (約 2%) を考慮しても、ここで見られた減少は顕著である。この計数率の違いの要因は、フライトエリアの地上環境の変化が影響していると考えられる。フライトエリアは三つの測定共に同じ場所ではあるが、フライト No.2023-02 及び No.2023-05 は 7 月に、フライト No.2023-10 は 12 月に測定を行っている。フライトエリアの大半は田んぼが占めており、7 月の測定時には水が張られていた。一方で 12 月の測定の際には、田んぼに水は張られておらず、水の有無により地表面からの放射線の遮へい状況が異なり、このような違いが見られたと推察される。

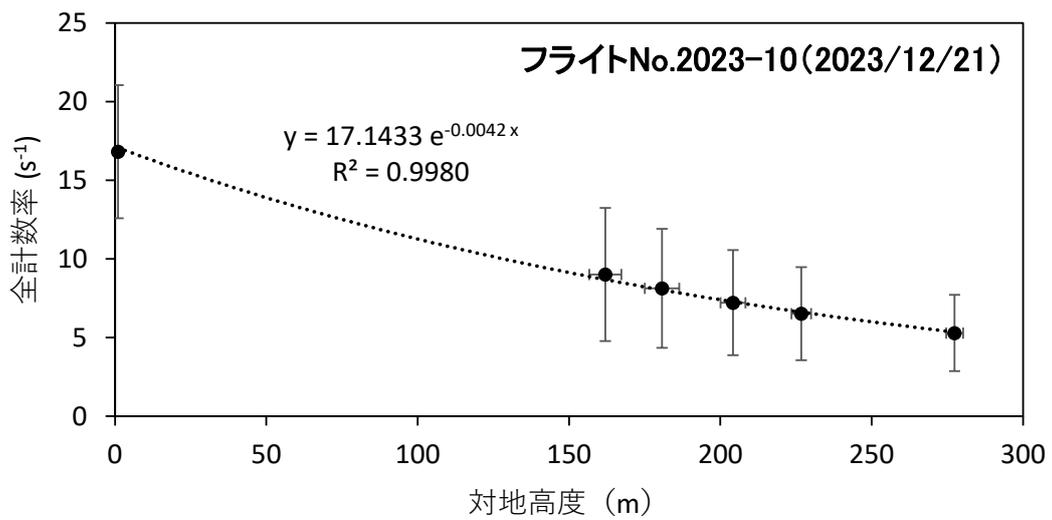
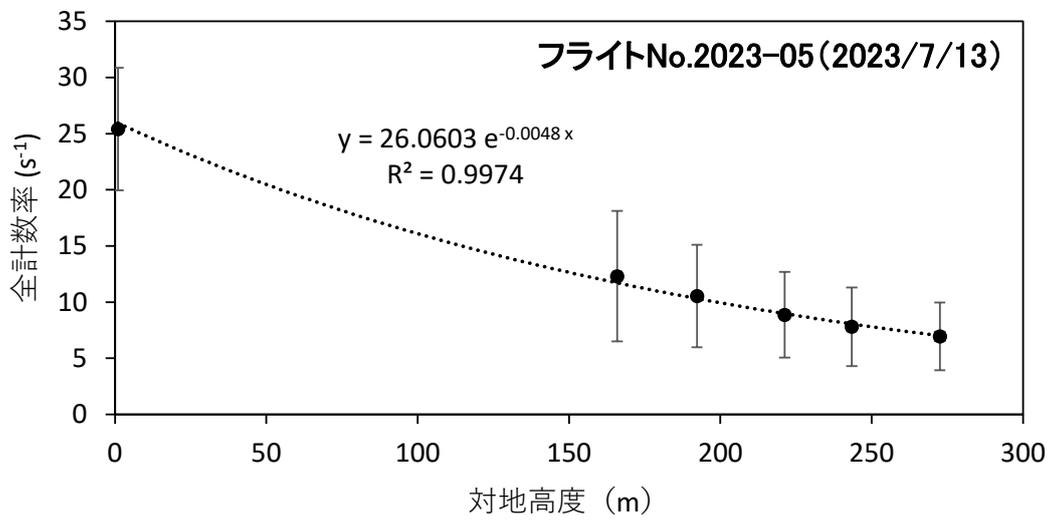
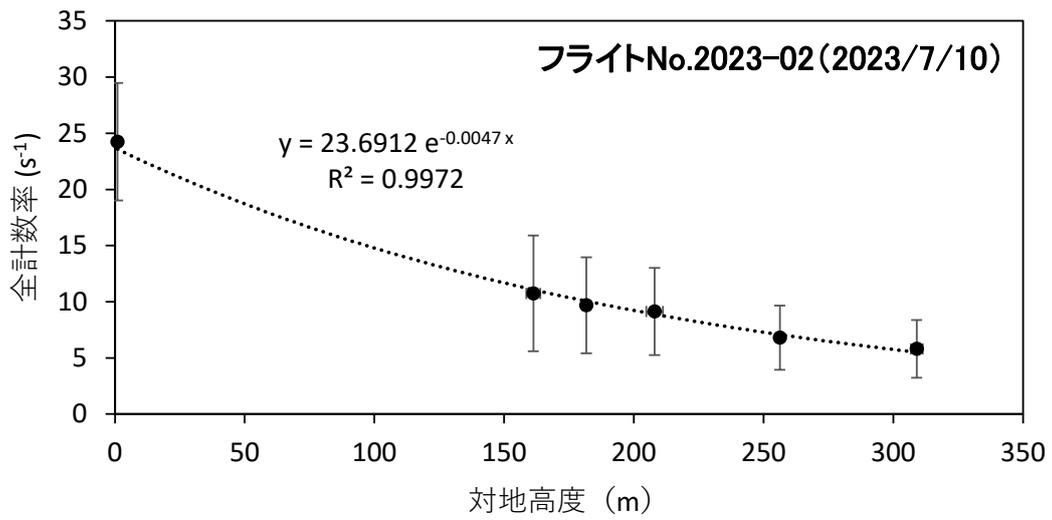


Fig. 9-22 キャリブレーションフライトで得られた対地高度と計数率の関係

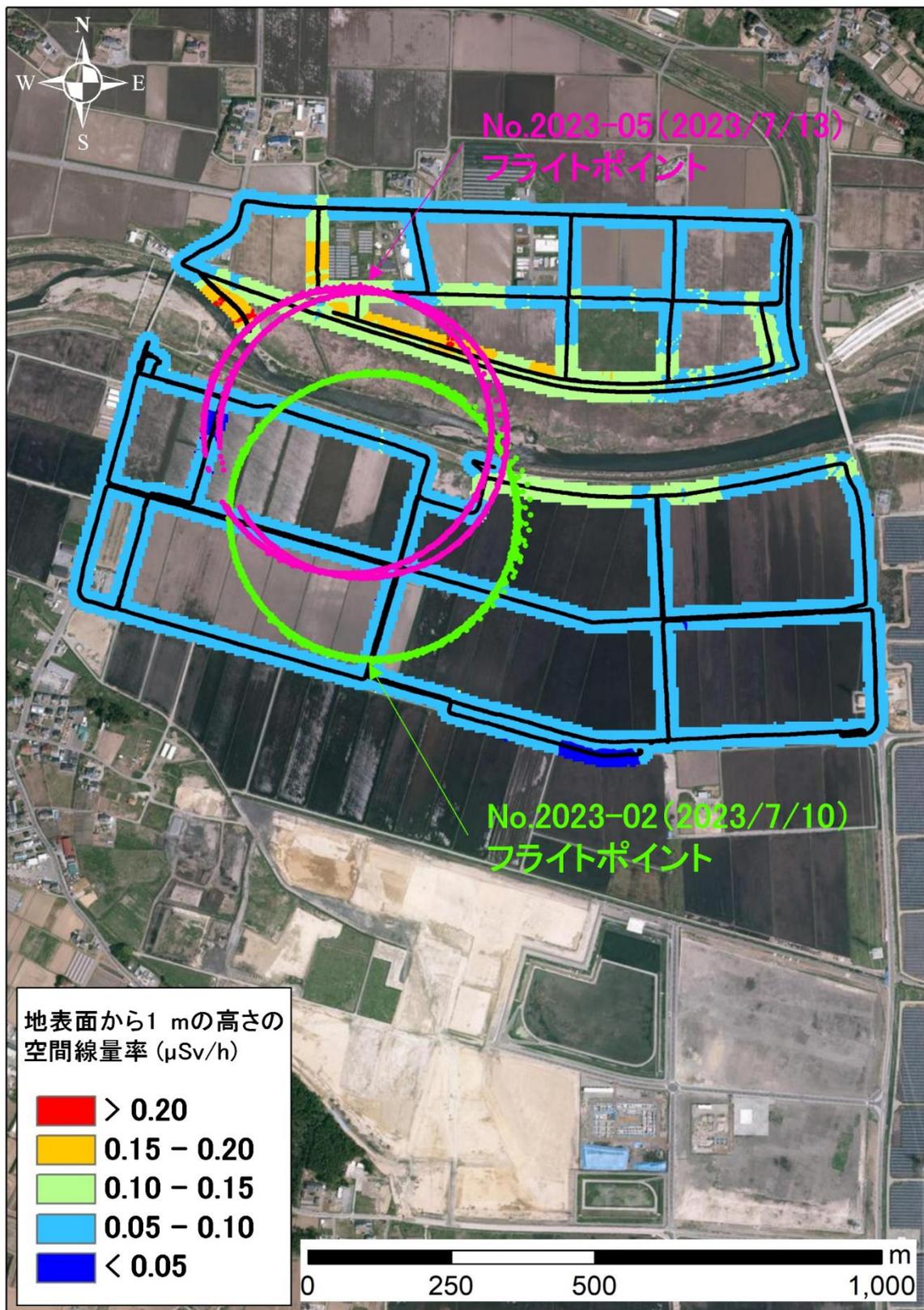


Fig. 9-23 歩行サーベイによる地上1 m 空間線量率測定結果 (2023年7月11日実施)
(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び歩行式サーベイメータで得られた地表面から1 mの高さの空間線量率を追記して掲載)

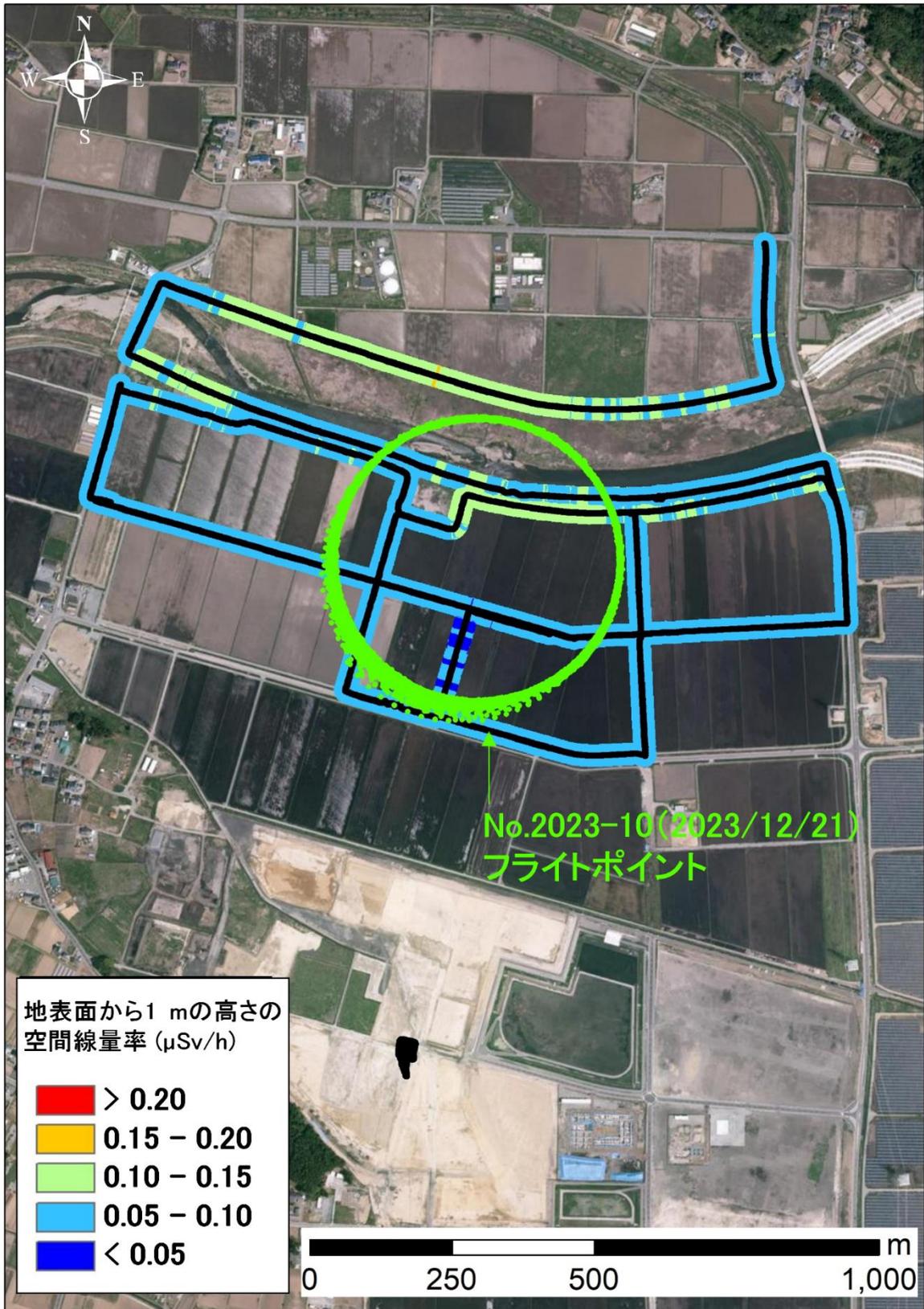


Fig. 9-24 歩行サーベイによる地上1 m 空間線量率測定結果 (2023年12月21日実施)
(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び歩行式サーベイメータで得られた地表面から1 mの高さの空間線量率を追記して掲載)

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

No.	フライト日	空気減弱係数 AF (m^{-1})	空間線量率 換算係数 CD ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$)	地表面から 1 m の高さの空間線 量率の平均値* ¹ ($\mu Sv/h$)	場所* ²
2023-02	2023/07/10	-0.00472	271	0.087	RTF 田んぼ (水あり)
2023-05	2023/07/13	-0.00482	296	0.088	RTF 田んぼ (水あり)
2023-10	2023/12/21	-0.00420	211	0.085	RTF 田んぼ (水なし)

*¹ 測定システムの測定ポイントから 300 m 範囲内の測定値の平均

*² 福島ロボットテストフィールド(福島県南相馬市)

次に、測定システムで測定フライトを行い地上測定結果と比較した結果について述べる。

4.5.2 項で示した解析方法及び Table 9-16 の換算パラメータを用いて、測定フライトデータから地表面から 1 m の高さの空間線量率マップを作成した結果を Fig. 9-25 及び Fig. 9-26 に示す。Fig. 9-25 はフライト No.2023-03 の測定結果であり、解析には Table 9-16 の No.2023-02 のパラメータを使用した。Fig. 9-26 はフライト No.2023-06 の測定結果であり、解析には Table 9-16 の No.2023-05 のパラメータを使用した。

Fig. 9-27 及び Fig. 9-28 に、それぞれにおける地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と 2023 年(令和 5 年) 7 月 11 日の地上測定値を比較した結果を示す。比較の際には、各マッピングデータ値を 50 m 四方のメッシュに平均化し、同じメッシュ同士で地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値を比較した。各データの上空測定換算値と地上測定値を比較した散布図を見るとおおよそ $y = x$ に則っていたものの、地上測定値が 0.15 $\mu Sv/h$ 前後の領域で $y = x$ の直線から逸脱するプロットが散見された。これは、地上測定において局所的に空間線量率が高いエリア(主に河川敷)があり、上空からの測定ではその局所的な線量勾配を検知できなかったためと考えられる。相対誤差のヒストグラムを見ると、中央値はおおよそ 0 を示し、標準偏差は約 0.2 であった。ばらつきはあるものの、地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値は地上測定値と良く整合した。

なお本試験では機体の基本性能試験も並行しており、約 1 km×1 km 四方のエリアを 1 時間程度かけて測定を行った。実際のモニタリング時の測定密度は本試験よりも低く、従って精度も低下すると推察される。併せて、本試験の測定エリアは限定的であり、広いレンジでの空間線量率の測定を実施できていない。今後、東電福島原子力発電所周辺のエリアでフライト測定試験を行い、広い空間線量率レンジで取得した測定データを基にして測定システムの精度評価を行い、実運用時の空間線量率の換算精度の信頼性を高めることが可能である。

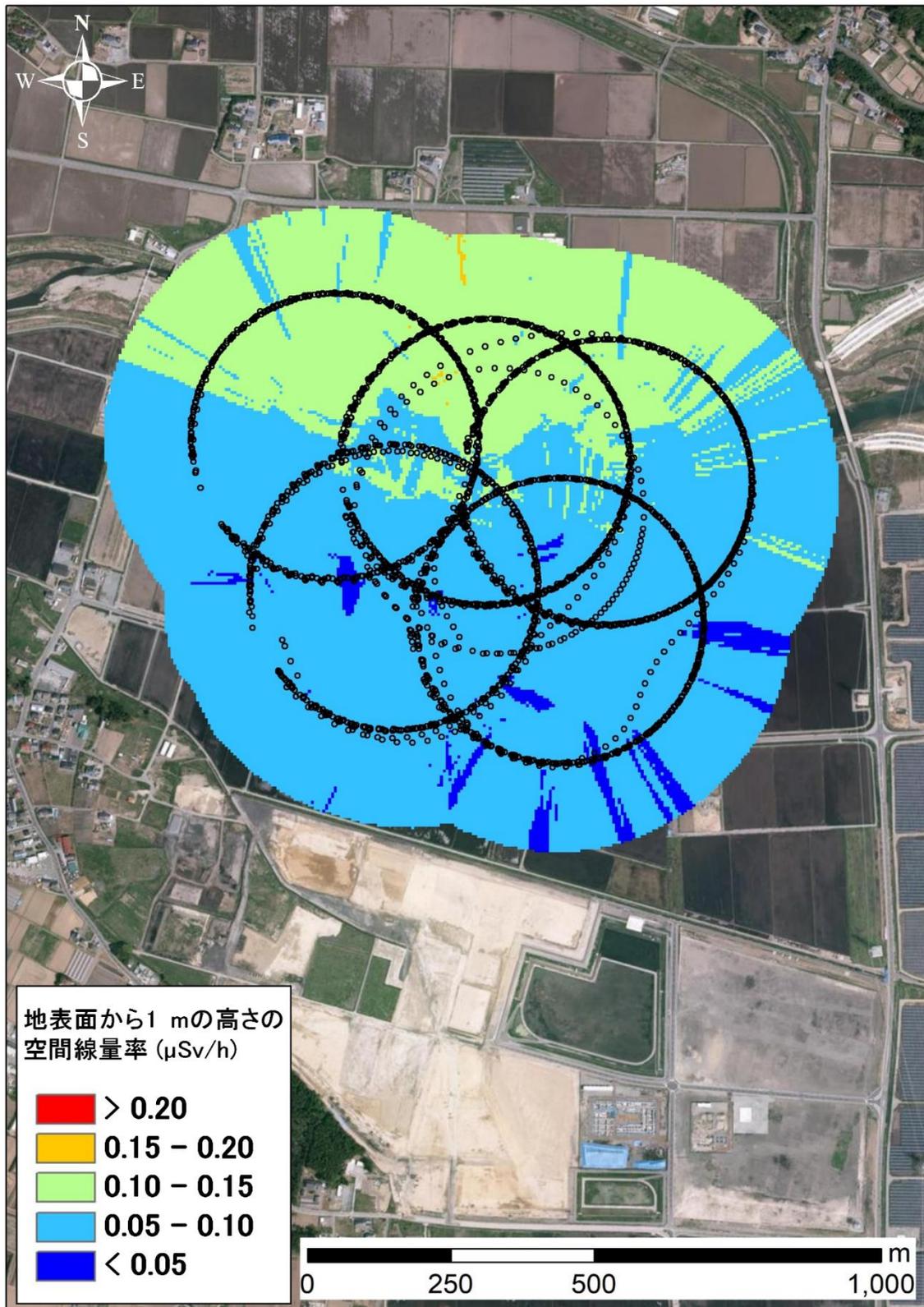


Fig. 9-25 無人航空機測定による空間線量率マッピング結果 (2023年7月11日測定)
(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び地表面から1 mの高さの空間線量率を追記して掲載)

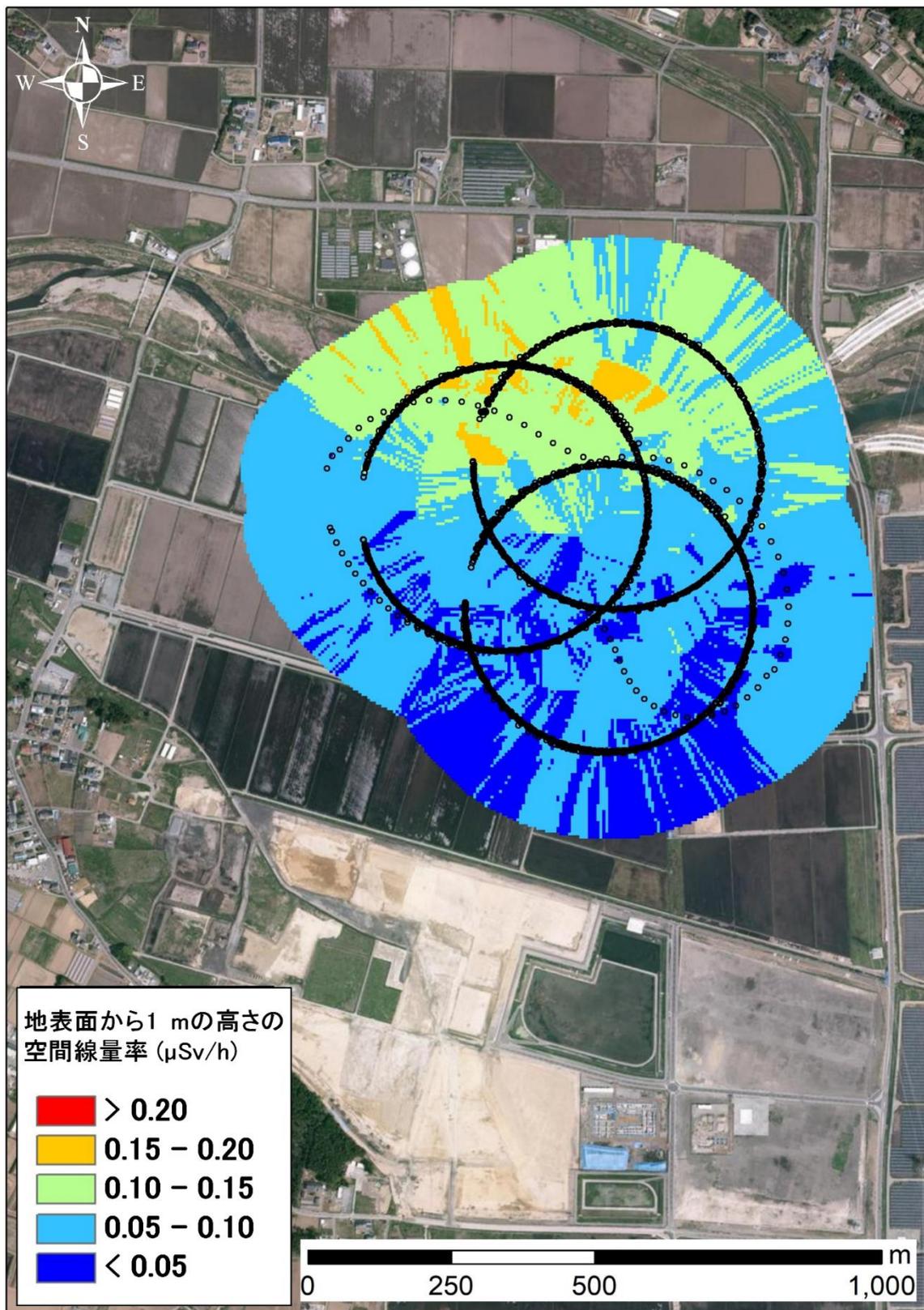


Fig. 9-26 無人航空機測定による空間線量率マッピング結果 (2023年7月14日測定)
(背景地図は、地理院地図 Vector⁷⁵)に Penguin C のフライト軌跡及び地表面から1 mの高さの空間線量率を追記して掲載)

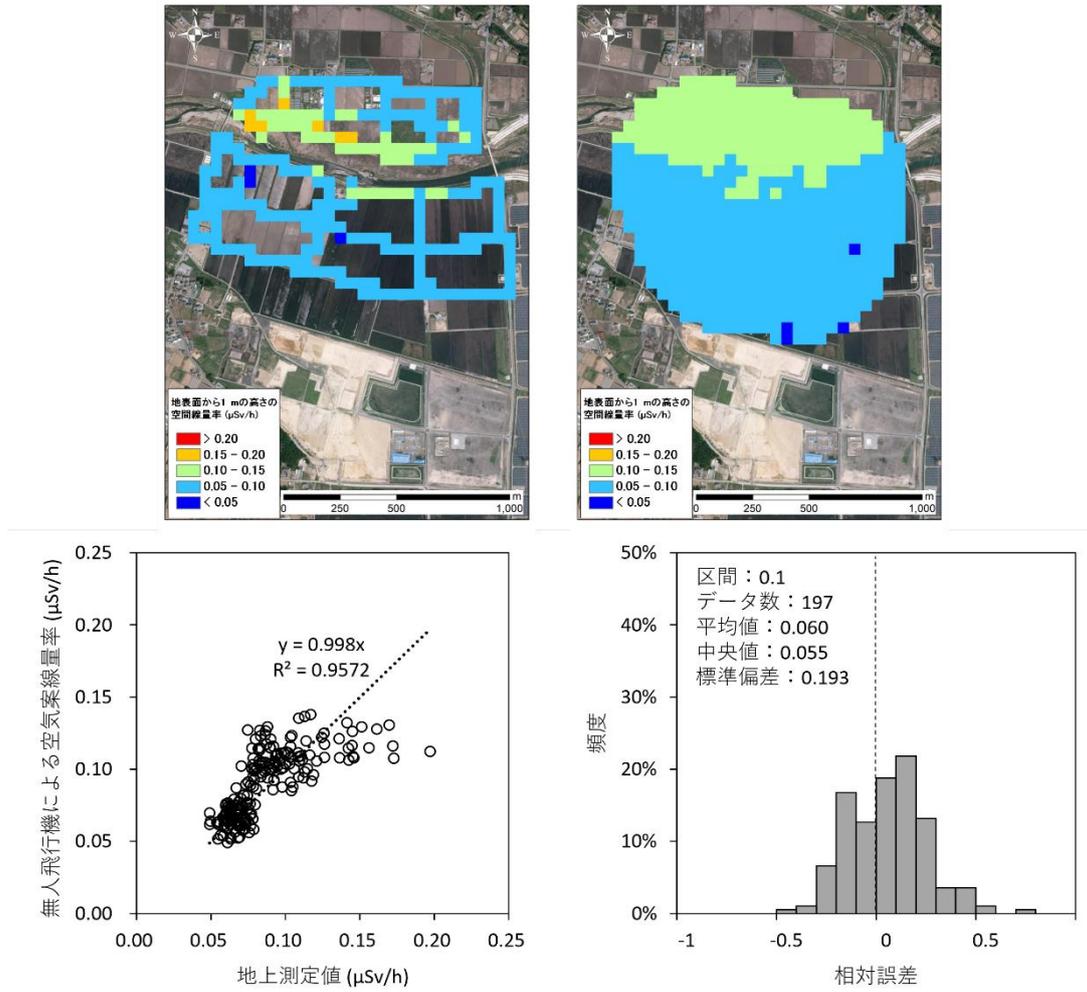


Fig. 9-27 地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値の比較結果 (2023 年 7 月 11 日)
 (上段左: 地上測定値 50 m メッシュマップ、上段右: 地表面から 1 m の高さの空間線量率換算
 値 50 m メッシュマップ、下段左: 散布図、下段右: 相対誤差のヒストグラム)

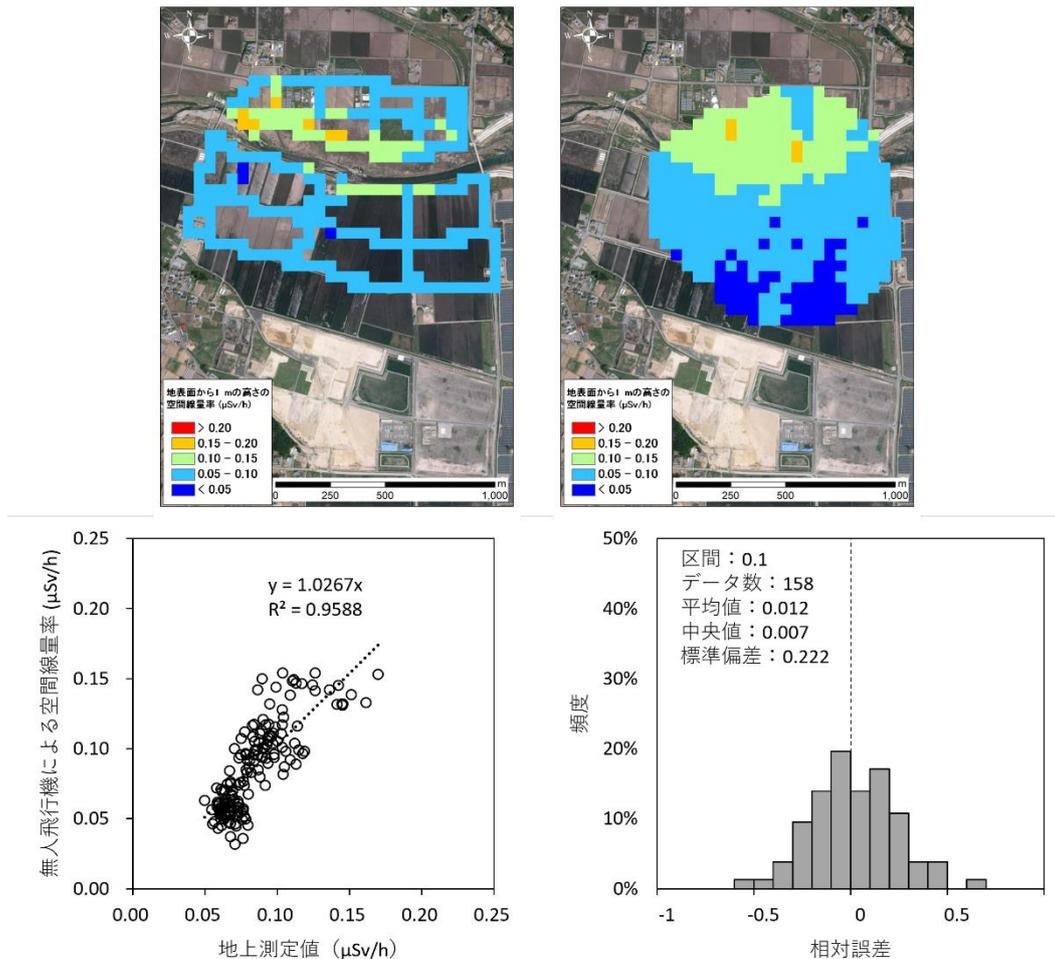


Fig. 9-28 地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値と地上測定値の比較結果 (2023 年 7 月 14 日)
 (上段左：地上測定値 50 m メッシュマップ、上段右：地表面から 1 m の高さの空間線量率換算値 50 m メッシュマップ、下段左：散布図、下段右：相対誤差のヒストグラム)

9.3. 機体の性能条件の評価結果

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

- (1) 長時間 (20 時間以上) のフライトが可能であること。

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

を実現する性能を持つ。

今年度のフライト試験 No.2023-10 において、6 時間フライトを実施した際の燃料消費率は 0.39 kg/h であった。最大搭載燃料 5 kg の燃料を搭載した場合、約 12 時間の連続フライトが可能である。なお運用事業者 (株式会社 JDRONE) から、過去、夏季に 6 時間フライトを行った際には燃料消費率が 0.28 kg/h であったという情報が得られている。本報告の 6 時間フライトは冬に試験を行っており、気温が低いため燃料消費率が夏季より悪くなったと考えられる。搭載重量、フライトプランや気温など、各要因が燃料消費率にどのように影響を与えるのか、今後検証が必要である。

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

Penguin C の最大離陸重量は 23 kg であり、機体自体の重さは 15.64 kg である。よって搭載可能な重量は、燃料と搭載機器合わせて、7.46 kg である。燃料搭載量を 2 kg とした場合に、5 kg 程度のペイロード搭載が可能である。なお搭載燃料搭載量を 2 kg とした場合、夏季で約 7 時間、冬季で約 5 時間のフライトが可能である。

- (3) 離陸のための滑走路を要しないこと。

Penguin C の離陸には可搬型空気圧式カタパルトを使用するため、滑走路は必要としない。ただし、アンカーペグによりカタパルトを地面に固定できる場所が必要となる。また、カタパルトからの離陸方向に障害物がないこと、Fig. 9-29 に示した緑の方向からの風向きである必要がある。なお風速 0 m/s (無風) の場合は、離陸方向にある障害物との距離を 200 m 以上確保することができれば、方向に制限はない。

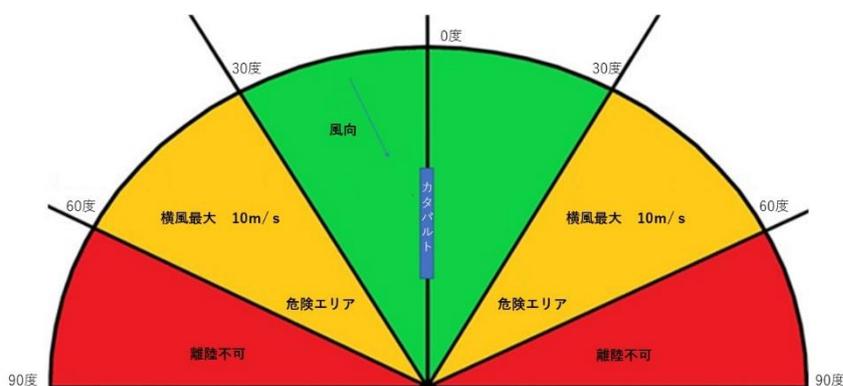


Fig. 9-29 カタパルトに対する打ち上げ時の風向

- (4) 予め設定したプログラムにより飛行可能であること。

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

ただし飛行高度に対して対地高度が最低高度を下回らないことと、最高高度を超えないことを事前に確認する必要がある。本年度のフライト試験結果より、機体は飛行中に目標

高度から最大 10 m 程度上下することが分かった。よって、最低及び最高高度から 10 m 以上余裕を持たせて飛行経路や高度を設定する必要がある。なお、100 m 以下の高度になると、機体のパラシュートが開く設定となっているため、100 m 以下でのフライトはできない。

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

メーカー公表値で Penguin C のテストフライト実績は 13,000 時間を超え、様々な環境下におけるフライト試験を通じて、機体の耐久性及び堅牢性が実証されている。実際に、本年度及び運用事業者 (株式会社 JDRONE) が持つ過去の実績含め、延べ約 70 時間のフライト試験を行っているが墜落事故及び墜落事故に至るような機器異常は確認されていない。また、MTBF については、メーカー内にて一定の基準を設け、各事象に対する評価が行われている。実際の数値については公表されていないが、事故分類基準については Table 9-2 に示した通りである。

- (6) 風速 10 m/s 以下でのフライトが可能であること。

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

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

- (7) 雨天時のフライトが可能であること。

Penguin C のカタログスペック上、5 mm/h 程度の雨量までフライト可能である。雨や霧等湿度の高い環境における機体の耐久性を高めるため、機体には静圧ポートを覆うプロテクターが導入されている。

- (8) 事故発生から 1 時間以内に離陸が可能であること。

Penguin C は地上局及びトラッキングアンテナを含め機器一式の組立から離陸まで短時間で完了できるよう設計されている。大型の機器であるトラッキングアンテナ及びカタパルトが予め組立済みであれば、準備開始から概ね 1 時間程度で離陸準備が可能である。なおフライト No.2023-08、No.2023-09、No.2023-10 では、アンテナの三脚を現地に設置済みの状態で、フライト準備には基地局設営 3 人、カタパルト及び機体設営 3 人の合計 6 人で作業を行い、1 時間以内に設営を完了している。

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

フライト中、機体と地上局は常時相互通信可能な状態にある。地上局では、フライトコントロールシステムを通して機体位置情報とエンジン等のステータス情報をリアルタイムに確認することができる。また、パイロードとしてカメラを搭載した場合には、上空でカメラが撮影している映像も同時に地上局にて受信及び確認できることを、フライト No.2023-04、No.2023-08 で確認している。

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

現状、Penguin C の無線通信システムの最大通信距離は約 1 km であり、UPZ の外側から

のデータ通信は難しい。Penguin C のアンテナにはオムニダイレクショナルアンテナとダイレクショナルアンテナが取り付けられており、機体までの距離に応じて自動的に切り替わる仕組みになっている。オムニアンテナを使用した試験での最大通信距離は約 1 km であり、ダイレクショナルアンテナを使用することでさらに通信距離を延ばすことができるが、現状、ダイレクショナルアンテナの使用は、電波法に基づいた総務省の使用許可を取得できていないため、使用することができない。アンテナ設置高度を上げ、高出力電波の無線通信機を使用することで長距離通信が可能となるが、現在の通信システム (2.4 GHz 帯の電波通信) を高出力にして運用することは、現状の日本では難しいという課題がある。

その他の通信方法として衛星通信があるが、現在、日本で使用可能な (技術基準適合証明等が得られている) 衛星通信機材で最も小型のものは、株式会社日本デジコム製 AVIATOR UAV200 がある。同通信機は、重量が約 1.5 kg あり、サイズは 24 cm×16 cm×6 cm 程度で、Penguin C への搭載は難しく、通信機を搭載できたとしても、放射線モニタリングに必要な機材等を搭載するスペースが非常に小さくなるという課題がある。海外の小型衛星通信機ではあるが、Gotonomi 製 Velaris 200 は、高さ 8 cm×直径 14.5 cm、重量 430 g と非常にコンパクトな作りとなっており、今後、日本で技術基準適合証明等が得られた場合には、小型無人航空機での幅広い衛星通信の活用が期待される。

またその他の無線通信機として、近年、ドローン用の SIM を用いることで、上空での LTE 利用が可能となっている (NTT docomo, LTE 上空利用プラン)。しかし LTE 通信は山間部等の電波が届かない場所では使用できないという課題があり、また高高度 (80 m~100 m 以上) では LET の電波を受信できないという事例も報告されている。また、衛星通信や LTE による通信システムは、Penguin C で対応していないため、適用する場合はメーカーに改造発注をしなければならない。

現状、原子力災害時における無人航空機の運用課題として、長距離無線技術が最も大きい。今後、現無線システムだけではなく、衛星通信や LTE 通信等の様々な無線通信を用いた試験を通して、日本での運用における最適な通信システムを構築する必要がある。

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

Penguin C に航空灯及び暗視カメラを機体に搭載することで、夜間にフライトするための機能を保持させることができる。

夜間フライト想定試験においては、無人航空機用 LED ライトを両翼の裏面に取り付けてフライトを実施し、機体に強い物理的衝撃が加わる離着陸時においても機材が落下しないこと、また機体が対地高度 300 m を飛行している際にもライトの点滅を目視できることを確認している。また、エルロンのサーボを利用した LED ライトの取り付け方法についてもメーカーが情報提供をしており、使用目的に応じていずれかの方法を選択することが可能である。

機体前方のペイロードベイにはユーザーの用途に応じたペイロードを搭載することができ、本試験ではメーカー推奨の Octopus ISR Systems 社製 UAV 用カメラ Epsilon を搭載したフライトを行っている (フライト No.2023-04、No.2023-08)。同機はカラーカメラと赤外線カメラを備えており、夜間のフライトにおいても赤外線カメラを利用した対象物の確認等が

可能である。ただし、同機材を機体に搭載すると、放射線モニタリングに必要となる機器が搭載できなくなる。放射線モニタリングに必要となる機材と暗視カメラを併用する場合、両者を一体化させる必要がある。

(12) 国内での規定基準類に準拠していること。

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

① 電波法

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

Penguin C については、地上局と機体の通信に UAV IP Data link を使用している。同器は Microhard Systems Inc.製 pMDDL2450 無線モデムを利用しており、同モデムが技術基準適合証明を受けている。同モデムの仕様を Table 9-17 に示す。同モデムは Table 9-18 に示す携帯局に該当する。なお、本報告で使用した地上局及び機体は、無線局免許状を申請し、免許を付与されている。

Table 9-17 UAV IP Data Link 仕様

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

Table 9-18 ドローン等での使用が想定される主な無線通信システム

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

*太文字：Penguin C 該当箇所

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

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

※3：変調方式や占有周波数帯幅によって出力の上限は異なる。

※4：運用に際しては、運用調整を行うこと。

※5：地上から電波発射を行う無線局の場合は最大 1W。

※6：携帯電話事業者の包括免許により運用。

※7：基地局によって制御される。

引用元：総務省電波利用ホームページ <https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/>

② 高圧ガス保安法

機体離陸の際に使用する可搬型空気圧式カタパルトはエアーコンプレッサーを備えており、最大発射圧力が 1.15 MPa に達する。これは高圧ガス保安法第二条第一項に規定される「高圧ガス」に該当しているが、後述する同法及び関連法規に規定される適用除外項目に該当するため、カタパルト使用にあたり同法に則る許可取得等は現時点では不要である。

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

上記の高圧ガス保安法に関しては、本機器のカタパルトは標準大気（災害の発生のおそれがない高圧ガス）を使用するため、本項に該当する。

高圧ガス保安法施行令
（適用除外）
第二条
5 法第三条第一項第八号の政令で定める高圧ガスは、次のとおりとする。
一 圧縮装置（空気分離装置に用いられているものを除く。次号において同じ。）内における圧縮空気であつて、温度三十五度において圧力（ゲージ圧力をいう。以下同じ。）五メガパスカル以下のもの

上記の通り、高圧ガス保安法施工例を参照すると、本機器のカタパルトで使用されるのはエアークンプレッサーで生成された圧縮空気であり、最大発射圧力は 1.15 MPa であるため、本項に該当する。

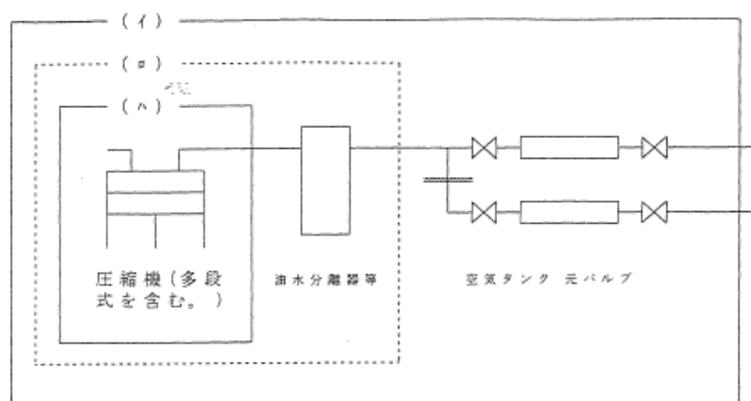
高圧ガス保安法及び関係政省令等の運用及び解釈について（内規）

20200715保局第1号

II.政令関係

第2条関係（適用除外）

（2）第3項第1号中「圧縮装置」とは、圧縮機、空気タンク（設備の配置等からみて一体として管理されるものとして設計されたものに限る。）、配管、油分離器等（位置は任意）から構成されるもの又は空気タンク等を有しない圧縮機をいい、次図の例に示す（イ）、（ロ）又は（ハ）の範囲内の装置とする。また、この圧縮装置には、圧縮機と同様の圧縮機構（往復動や遠心式等）で空気を圧縮すると同時に圧縮装置内で加工・成形する機器類を含むものとする。
（略）



なお、上記圧縮装置から排出された圧縮空気については、以下のとおり運用することとする。（略）

①法の適用を受ける場合

容器等への充填行為等高压ガスの製造をするとき

（略）

②法の適用を受けない場合

気密試験用等消費をするとき

本機体のカタパルトはエアータンク、コンプレッサー、バルブが一体として管理されている装置である。また、エアータンクから放出された圧縮空気は大気中に放たれて消費される。以上のことから、法の適用を受けない場合に該当する。

(13) 少人数(2~3名)での運用が可能であること。

Penguin Cは離陸地点までの機器一式(機体、アンテナ、地上局及びカタパルトを指す)の運搬、機器組立、離陸、ミッションフライト並びに着陸までの一連の作業を最小人数2名で遂行することが可能である。しかしながら、災害時の迅速な対応を最優先事項とすると、運搬から離陸までの過程は人手を増やすことで時間短縮が可能となることから、2名以上の

作業員を配置することが望ましい。また、少人数での運用をする場合、使用している機材は重量物も多く、安全性と効率を考慮して、機材積み降ろし用のリフターを備えた運搬車を準備しておくことが望ましい。

10. 本年度の成果と今後の課題

本章では、2023 年度 (令和 5 年度) の有人ヘリモニタリングシステムの保守点検と運用の実績と有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングにより得られた成果をまとめ、今後の課題について示す。

・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 13 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、空气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 13 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 (令和 4 年度) に RS-705 を 1 台購入した。当該機器は有人ヘリモニタリングに問題なく使用可能な事を確認できており、必要台数 (3 台) が入手でき次第、RS-701 と交換し運用を開始する予定である。今後も有人ヘリモニタリングを継続していく上で、RSI の最新情報を入手するよう努めるとともに、トラブルの予防保全のために計画的に有人ヘリモニタリングシステムを更新する必要がある。バッテリーについては、駆動時間等のパフォーマンスを一定レベルに維持するため、セル等の部品を定期的に新品に交換している。一方で、保有するバッテリー (全 6 台) の購入から 13 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 2023 年度 (令和 5 年度) までの RSI システムの保守及び運用実績を Table 10-1 に示す。

・空間線量率マップや放射性 Cs 沈着量マップについて

2023 年度 (令和 5 年度) より、東電福島原子力発電所から 80 km 圏内のモニタリングの一部に無人ヘリモニタリングを導入した。空間線量率や放射性 Cs 沈着量マップの作成にあたっては、有人ヘリ及び無人ヘリモニタリングのデータを統合した上でマッピングできるよう、解析システムを一部再構成した。有人ヘリモニタリングについては、様々なヘリコプターと RSI システムの組み合わせごとの解析パラメータの蓄積が行われ、信頼性の高い数値の選択が可能になってき

たと判断し、各解析パラメータに固定パラメータを用いた。結果として、空間線量率マップは地上測定値ともよく整合し、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。キャリア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、第 18 次モニタリング及び浜通り第 1 次無人ヘリモニタリングにおいて、測定範囲全域で重量緩衝深度 $\beta = 1.0$ (g/cm²) を一律に適用していることが原因の一つと考えられることから、土地利用区分に応じて、より適切な β の設定値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

地形の起伏を考慮する解析手法を有人ヘリモニタリングだけでなく、無人ヘリモニタリングにも適用できるよう、解析プログラムにアルゴリズムを組み込み、2023 年度(令和 5 年度)の東電福島原子力発電所から 80 km 圏内の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標準的解析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、空間線量率は標準的解析手法に比べ全体的に低く評価される傾向にあった。しかしながら、第 15 回 5 km 圏内無人ヘリモニタリングの範囲において、空間線量率が 19.0 μ Sv/h を超える領域が見られた。無人ヘリモニタリングに対して、本手法が正常に機能しない場合があることが示唆される。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、標準的解析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とともに、無人ヘリモニタリングへのより適切な適用を目指して、計算アルゴリズムの再構築も検討する予定である。

- ・空気中ラドン子孫核種の弁別手法について

第 14 次東日本モニタリングのデータにラドン弁別手法を適用した。地上測定値と比較した結果から、当該手法は BG フライトを行ってバックグラウンドを減算する標準的解析手法についても精度的に劣るものでないことが分かった。ラドン弁別手法では、測定地点ごとに大気中ラドン子孫核種の影響が除去できることから、本手法の高度化を継続していくメリットは大きい。今後も標準的解析手法と比較しつつデータを蓄積し、本手法で独自に使用するパラメータである *RI* 及び *GI* を算出する回帰手法にロバスト性を付与するアルゴリズムを組み込むなど、ブラッシュアップを検討していく予定である。

- ・無人航空機を用いたフライト試験について

原子力災害時等の緊急時モニタリングにおける、有人ヘリモニタリングの代替技術として期待

されている無人航空機について運用技術開発を進めた。Penguin C について福島ロボットテストフィールドにて、計 10 回のフライト試験 (総フライト時間約 870 分) を実施した。本試験には 6 時間に渡る長時間のフライト試験及び夜間想定フライトを含めた。全試験を予定通り完遂でき、システムの異常などは確認されなかった。以上のことより、Penguin C のフライト性能に対する信頼性は高いものと考えられる。また、Penguin C 専用の放射線測定システムの測定精度を評価するため、当システム搭載して福島ロボットテストフィールドをフライトし、地表面から 1 m の高さの空間線量率のマッピングを行った結果と歩行式サーベイメータによる地上測定値を比較した。その結果、両者は概ね 1 : 1 の関係にあることが見出され、当システムは一定の精度有していることが確認できた。ただし、今回のフライト試験は空間線量率が概ね 0.20 $\mu\text{Sv/h}$ 以下のエリアで実施したものであり、空間線量率のレンジがある程度限定的であった。今後、東電福島原子力発電所周辺のエリアでフライト測定試験を行い、広い空間線量率レンジで取得した測定データを基にして、当システムの精度評価を行うことで、実運用時の空間線量率の換算精度の信頼性を高めることが可能であると考えられる。

Table 10-1 RSI システムの保守及び運用実績

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

11. まとめ

2023年度(令和5年度)に予定された、東電福島原子力発電所から半径80km圏内の有人ヘリ及び無人ヘリモニタリング各1回並びに80km圏外の有人ヘリモニタリングそれぞれ1回を実施した。東電福島原子力発電所事故から航空機モニタリングが日本で実施されて13年目となった。東電福島原子力発電所事故当時には定まっていなかった有人ヘリモニタリングの測定及びデータ解析手法が円熟してきており、RSIシステムの定期的な保守及び軽微なトラブルへの対応経験並びに測定データ解析手法のノウハウが蓄積されてきている。また今年度より、東電福島原子力発電所から半径80km圏内のモニタリングに、有人ヘリモニタリングと無人ヘリモニタリングを組み合わせることとなった。これに伴い、両者のデータを統合した上で空間線量率及び放射性Csの沈着量マップを構築できるよう、解析システムを改修した。この解析システムの改修により、有人モニタリングと無人ヘリモニタリングの結果を切り分けた上で過去の結果と比較し、東電福島原子力発電所事故の影響があったエリアの空間線量率及び放射性Csの地表面沈着量の全体的な減少傾向を把握することができた。

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18次モニタリング、浜通り第1次無人ヘリモニタリング及び第15回5km圏内無人ヘリモニタリングのデータに適用し、空間線量率マップの作成を行った。地形を平坦と仮定する標準的解析手法によるものと比較したところ、地形の起伏を考慮に入れた場合、全体的に空間線量率が低く算出される傾向にあった。しかしながら、これとは逆に、第15回5km圏内無人ヘリモニタリングの範囲においては、空間線量率が19.0µSv/hを超える程にまで、空間線量率が高く算出される場合もあった。地上測定値を指標として、それぞれの手法の換算精度について評価したところ、地形の起伏を考慮に入れた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14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1mの高さの空間線量率と地上測定値とを比較した。標準的解析手法については山間部における空間線量率が地上測定値に対して2.0倍近く過大に評価される場合が見られたが、ラドン弁別手法では測定場所にほとんど依らず、過大評価する度合いも1.2倍以下に抑えることができた。ラドン弁別手法は各測定場所における測定データに基づいてバックグラウンドを減算できる点で、標準的解析手法よりも優れた手法であることが示唆された。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。

無人航空機Penguin Cについて福島ロボットテストフィールドにて、システムの異常等無く、計10回のフライト試験(総フライト時間約870分)を完遂した。東電福島原子力発電所から80km圏内外のモニタリングにPenguin Cによるモニタリングを導入することも見据えて、次年度以降も引き続き本機体の運用を慣熟する試験及び放射線測定システムの測定精度の向上に資する

試験を継続していく必要がある。

謝辞

本調査研究は、「令和 5 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、有人ヘリコプターに搭乗しての測定、地上での空間線量率測定、さらにデータ解析とそのマップ化に取り組んだ。有人ヘリコプターの運航は中日本航空株式会社、朝日航洋株式会社が行った。また、無人ヘリコプターによるモニタリング及び無人航空機を用いたフライト試験には、株式会社 JDRONE から多大な協力を頂いた。ここに本モニタリングに参加された皆様に謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 飯田義正, 伊藤洋昭, 笹尾英嗣, 鶴田忠彦, 永島礼二, 三谷稔, 小林孝男, 海外ウラン資源探査 -探査技術取りまとめ-, JNC TN7410 2001-007, 2001, 330p.
- 2) Barasch G. E. and Richard H. B., Aerial radiological measuring surveys of the nuclear fuel services plant, west valley, New York, 1968 and 1969, AEC Report No. ARMS-68.6.9, 1972, 39p.
- 3) Hendricks, T. J. and Riedhauser, S. R., An aerial radiological survey of the Nevada test site., DOE/NV/11718-324, 1999, 67p.
- 4) Sanderson D.C.W., Cresswell A.J., Lang J.J. eds. An International Comparison of Airborne and Ground Based Gamma Ray Spectrometry. Results of the ECCOMAGS 2002 Exercise held 24th May to 4th June 2002, Dumfries and Galloway, Scotland. University of Glasgow, Glasgow. ISBN 0 85261 783 6., 2003, 387p.
- 5) 長岡鋭, 森内茂, 航空機 γ 線サーベイシステム ARSAS, 保健物理, 25 (4), 1990, pp.391-398.
- 6) 森内茂, 長岡鋭, 坂本隆一, 堤正博, 斎藤公明, 天野光, 松永武, 柳瀬信之, 笠井篤, 緊急時における航空機サーベイ法確立とシステム実用化に関する検討, JAERI-M 89-017, 1989, 82p.
- 7) Saito, K. and Moriuchi, S., Conversion factors for estimating release rate of gaseous radioactivity by an aerial survey, JAERI-M 88-016, 1988, 84p.
- 8) 大西亮一, 無人ヘリコプターを活用した空中放射線測定システムについて, 航空と宇宙, 671, 2009, pp.8-14.
- 9) 原子力安全委員会, 環境放射線モニタリング指針, 2008.
- 10) 鳥居建男, 眞田幸尚, 杉田武志, 田中圭, 航空機モニタリングによる東日本全域の空間線量率と放射性物質の沈着量調査, 日本原子力学会誌(ATOMOΣ), 54(3), 2012, pp.160-165.
- 11) 眞田幸尚, 近藤敦也, 杉田武志, 鳥居建男, 航空機モニタリングによる放射性セシウムの汚染分布, 放射線, 38 (3), 2012, pp.137-140.
- 12) 眞田幸尚, 日本全域における航空機モニタリング, FB news, 432, 2012, pp.7-11.
- 13) 原子力規制庁, 航空機モニタリング結果, <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/191/list-1.html> (2024年3月1日閲覧).
- 14) IAEA, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -(Second Report), 2011.
- 15) Inomata, Y., Aoyama, M., Hirose, K., Sanada, Y., Torii, T., Tsubono, T., Tsumune, D. and Yamada, M., Distribution of radionuclides in surface seawater obtained by an aerial radiological survey, J. Nucl. Sci. Tech., 51(9), 2014, pp.1059-1063.
- 16) 原子力規制庁, 文部科学省航空機モニタリング行動計画, 2011, <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/6000/5274/view.html> (2024年3月1日閲覧).
- 17) 眞田幸尚, 西澤幸康, 卜部嘉, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 平山弘克, 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, 卜部嘉, 工藤保, 令和 2 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2021-020, 2021, 138p.
- 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, 坏雄一郎, 卜部嘉, 工藤保, 令和 3 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2022-027, 2023, 148p.
- 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, 坏雄一郎, 外間智規, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和 3 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2022-028, 2023, 127p.
- 32) 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, 坏雄一郎, 新井仁規, 卜部嘉, 扇柳仁, 工藤保, 令和 4 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2023-027, 2024, 146p.
- 33) 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, 坏雄一郎, 新井仁規, 外間智規, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和 4 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング及び無人航空機による放射線モニタリングに係る技術開発(受託研究), JAEA-Technology 2023-026, 2024, 160p.
- 34) 鳥居建男, 眞田幸尚, 杉田武志, 近藤敦哉, 志風義明, 高橋昌樹, 石田睦司, 西澤幸康, 卜部嘉, 広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査, JAEA-Technology 2012-036, 2012, 182p.
- 35) Sanada, Y., Sugita, T., Nishizawa, Y., Kondo, A., and Torii, T., The aerial radiation monitoring in Japan after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, Prog. Nuc. Sci. Tech., 4, pp.76-80, 2014.
- 36) 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.
- 37) 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.
- 38) Ishizaki, A., Sanada, Y., Mori, A., Imura, M., Ishida, M. and Munakata, M., Investigation of snow cover effects and attenuation correction of gamma ray in aerial radiation monitoring, Remote Sens., 8(11), 2016, p.892.
- 39) 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.
- 40) 眞田幸尚, 西澤幸康, 山田勉, 池田和隆, 松井雅士, 土田清文, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 石田睦司, 卜部嘉, 志風義明, 杉田武志, 近藤敦哉, 鳥居建男, 原子力発電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定, JAEA-Research 2013-049, 2014, 129p.
- 41) Sanada, Y. and Torii, T., Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter, J. Environ. Radioact., 139, 2015, pp.294-299.
- 42) Sanada, Y., Kondo, A., Sugita, T., Nishizawa, Y., Yuuki, Y., Ikeda, K., Radiation monitoring using an

- unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Explor. Geophys.*, 45, 2014, pp.3-7.
- 43) Nicolini R., Camera F., Blasi N., Brambilla S., Bassini R., Boiano C., Bracco A., Crespi F.C.L., Wieland O., Benzoni G., Leoni S., Million B., Montanari D. and Zalite A., Investigation of the properties of a 1''× 1'' LaBr₃:Ce scintillator, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res.*, A582, 2007, pp.554-561.
 - 44) 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.
 - 45) Tanigaki, M., Okumura, R., Takamiya, K., Sato, N., Yoshino, H., Yhinaga, H., Kobayashi, Y., Uebara, A., Yamana, H., Development of KURAMA-II and its operation in Fukushima, *Nucl., Instrum., Methods Phys. Res. A*, 781, 2015, pp.57-64.
 - 46) 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> (2024年3月1日閲覧).
 - 47) 私信.
 - 48) 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.
 - 49) ICRU, Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU report 53, 1994, 84p.
 - 50) 原子力規制委員会, 令和4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, 2023, <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/651/list-1.html> (2024年3月1日閲覧).
 - 51) G. F. KNOLL, 神野郁夫, 木村逸郎, 阪井英次 (訳), 放射線計測ハンドブック (第4版), 日刊工業新聞社, 2013, 70p.
 - 52) 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.
 - 53) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, 173p.
 - 54) 塩出志乃, 逆距離加重法によるネットワーク空間上での点補間に関する研究, *Theory and Applications of GIS*, 13(1), 2004, pp.33-41.
 - 55) 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.
 - 56) 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.
 - 57) ICRP, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, 1996, 179p.
 - 58) 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.
 - 59) 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> (2024年3月1日閲覧).
- 60) 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 (2024年3月1日閲覧).
- 61) 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.
- 62) 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> (2024年3月1日閲覧).
- 63) 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.
- 64) Oikawa, S., Nakano, N., Sanada, T., Ohashi, N., Uesugi, M., Sato, K., Abukawa, J. and Higuchi, H., A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan, J. Environ. Radioact., 65(2), 2003, pp.203-213.
- 65) 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.
- 66) 永島弘文, 大館孝幸, 荒井太紀夫, 最小距離 2 乗法による回帰直線の求め方, J. Extra Corpor. Technol., 12(1), 1986, pp.51-54.
- 67) 永井英志, 山澤弘実, 森泉純, 平尾茂一, 冬季日本海側における高空間線量率事象の解析, Jpn. J. Health Phys., 53(4), 2018, pp.219-229.
- 68) 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 2023 年 5 月 10 日版, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (2024年3月1日閲覧).
- 69) 原子力防災会議幹事会, 原子力災害対策マニュアル, 平成 24 年 10 月 19 日制定 (令和 4 年 9 月 2 日一部改訂).
- 70) 石崎梓, 眞田幸尚, 西澤幸康, 普天間章, 宗像 雅広, 平成 28 年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立, JAEA-Research 2017-012, 2018, 58p.
- 71) 眞田幸尚, 西澤幸康, 越智康太郎, 結城洋一, 石崎梓, 長田直之, 平成 29 年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立, JAEA-Research 2018-009, 2019, 48p.
- 72) 眞田幸尚, 越智康太郎, 石崎梓, 平成 30 年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立, JAEA-Research 2020-006, 2020, 60p.
- 73) UAV Factory Ltd., Penguin C Operator's Handbook V1.13, 2020.
- 74) UAV Factory Ltd., MEAN TIME BETWEEN FAILURES DATA COLLECTION, 2020.
- 75) 国土地理院, 地理院地図 Vector, <https://maps.gsi.go.jp/vector/> (2024年3月1日閲覧).

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。