

令和 6 年度原子力施設等防災対策等委託費
(航空機モニタリング運用技術の確立等)事業
報告書

令和 7 年 3 月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

原子力安全・防災研究所

原子力緊急時支援・研修センター

航空機モニタリンググループ

本報告書は、「令和6年度原子力施設等防災対策等委託費(航空機モニタリング運用技術の確立等)事業」の成果を取りまとめたものである。

目次

1.	はじめに	9
2.	有人ヘリコプターのモニタリングシステム	14
2.1.	航空機モニタリングシステム	14
2.2.	ヘリコプターの選定	16
2.3.	RSI システムの保守	18
3.	データ取得及び解析方法	21
3.1.	航空機モニタリング及び地上測定の方法	21
3.2.	キャリブレーションフライト方法	24
3.3.	解析のフロー	30
3.4.	空間線量率への換算方法	32
3.4.1.	空气中核種及び宇宙線由来の γ 線計数率	32
3.4.2.	対地高度補正係数 HF の算出方法	34
3.4.3.	空間線量率への換算係数 CD の算出方法	34
3.4.4.	空間線量率への換算方法	35
3.5.	検出限界値	37
3.6.	不確かさ	38
3.7.	補間方法	39
3.8.	空气中ラドン子孫核種の弁別手法	41
3.8.1.	ラドン子孫核種	41
3.8.2.	ラドン弁別手法の概略	43
3.8.3.	GI の高度補正方法	45
3.9.	天然放射性核種の濃度換算手法	46
4.	モニタリング結果と考察	48
4.1.	ヘリコプターによるフライト及び地上測定の実績	48
4.2.	換算パラメータ	49
4.3.	空間線量率マップ	55
4.4.	空間線量率マップと地質情報の比較考察	59
4.5.	地上測定値との比較	67
4.6.	天然放射性核種の濃度	72
4.7.	ラドン弁別手法の適用	81
4.7.1.	パラメータ (RI 及び GI) の決定	81
4.7.2.	ラドン弁別手法の適用結果及び標準的解析手法との比較	85
4.8.	放射性セシウムの沈着量	96
5.	原子力防災訓練における緊急時航空機モニタリング及び無人機の訓練フライト	98

5.1.	原子力総合防災訓練等に係る航空機モニタリングの経緯	98
5.2.	令和6年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングの全体概要	100
5.2.1.	無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンによる訓練フライト	100
5.2.2.	自衛隊の有人ヘリコプターによる緊急時航空機モニタリング	109
5.3.	訓練から得られた緊急時航空機モニタリングの課題と課題に対する取り組み ..	118
5.3.1.	無人機の訓練フライトについて	118
5.3.2.	緊急時航空機モニタリングについて	119
6.	無人機データ収集システムの整備	121
6.1.	無人機データ収集システムについて	122
6.1.1.	システム概要	122
6.1.2.	解析システムについて	124
6.1.3.	マルチコプターを用いた測定システムについて	128
6.1.4.	無人ヘリコプターを用いた測定システムについて	131
6.1.5.	固定翼型無人航空機を用いた測定システムについて	134
6.2.	無人機データ収集システム整備における課題と対応策	137
7.	マルチコプター型モニタリングシステムの整備及び技能講習	140
7.1.	システム整備状況及び点検結果	140
7.1.1.	マルチコプター機材の点検結果	140
7.1.2.	放射線検出器機材の点検結果	141
7.2.	運用技術講習について	142
7.3.	システムの現場運用課題について	146
8.	関係各国との意見交換及び合同環境放射線モニタリングの実施	148
8.1.	意見交換及び合同環境放射線モニタリングの全体概要	148
8.2.	情報交換で収集した情報の詳細	152
8.2.1.	航空機モニタリングの実施方法	152
8.2.2.	各国における原子力防災体制	155
8.2.3.	緊急時モニタリング体制全般	159
8.3.	合同環境放射線モニタリングの実施	164
8.3.1.	定点サーベイ	167
8.3.2.	歩行サーベイ	168
8.3.3.	自動車による走行サーベイ	169
8.3.4.	無人ヘリコプターによるモニタリング	170
8.4.	合同環境放射線モニタリングから得られた知見と課題	171
9.	まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理	173
	謝辞	176

参考文献	177
------------	-----

Table list

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL (一部抜粋).....	13
Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧	26
Table 3-2 ラドン子孫核種の放出する γ 線.....	42
Table 4-1 ヘリコプターのフライト距離及び速度とフライト回数.....	48
Table 4-2 機体とシステムの組み合わせと空气中核種由来の平均的な計数率及び採用した CR- Index	51
Table 4-3 島根 (前期及び後期) で取得した空気減弱係数 AF データの一覧.....	53
Table 4-4 島根 (前期及び後期) で取得した空間線量率換算係数 CD データの一覧	53
Table 4-5 解析に用いた換算パラメータのまとめ	54
Table 4-6 天然放射性核種濃度への換算パラメーター一覧.....	74
Table 4-7 ラドン弁別手法に用いた RI 及び GI の一覧.....	84
Table 5-1 原子力総合防災訓練等における航空機モニタリング実施状況	99
Table 5-2 無人航空機、無人ヘリコプター及びマルチコプターによる訓練フライトのタイムテ ーブル	102
Table 5-3 令和 6 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングに係るタイムテ ーブル (2025 年 2 月 15 日).....	110
Table 5-4 UH-60 に対する換算パラメータの一覧.....	111
Table 6-1 無人機データ収集システムに対応している機器一覧.....	123
Table 7-1 マルチコプター型モニタリングシステム整備状況.....	140
Table 7-2 マルチコプター点検項目	141
Table 7-3 マルチコプター搭載用放射線検出器点検項目	141
Table 8-1 発表者及び発表タイトル.....	149
Table 8-2 各放射性核種由来の空間線量率と沈着量の比較結果.....	168

Figure list

Fig. 2-1 RSI システムのブロック図.....	15
Fig. 2-2 RSI システムの外観.....	15
Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧.....	16
Fig. 2-4 島根 (前期) の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell412 (JA6928))	17
Fig. 2-5 島根 (後期) の航空機モニタリングに使用した機体 (S-76 (JA6901))	17
Fig. 2-6 システムのエネルギー分解能及びゲインの推移 (島根 (前期)).....	19
Fig. 2-7 システムのエネルギー分解能及びゲインの推移 (島根 (後期)).....	20
Fig. 3-1 予定したフライトの測線及び地上測定地点 (島根 (前期及び後期)).....	23
Fig. 3-2 航空機モニタリングデータ取得のイメージ	24
Fig. 3-3 航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージ.....	24
Fig. 3-4 テストラインフライトのイメージ	27
Fig. 3-5 島根 (前期及び後期) におけるテストライン及びテストポイントの場所 (島根県出雲市).....	27
Fig. 3-6 テストポイントフライトのイメージ	28
Fig. 3-7 宇宙線フライトのイメージ.....	28
Fig. 3-8 空気中核種フライトのイメージ	28
Fig. 3-9 オーバーラップフライトに用いた測線 (島根県出雲市).....	29
Fig. 3-10 解析のフロー	31
Fig. 3-11 空気中核種フライトで取得した陸上と海上での γ 線スペクトル例 ¹⁷⁾	33
Fig. 3-12 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例.....	33
Fig. 3-13 IDW に入力するパラメータとマップの関係	40
Fig. 3-14 ウラン系列及びトリウム系列.....	42
Fig. 3-15 空気中ラドン子孫核種測定用の検出器とヘリコプターへの搭載状況.....	44
Fig. 3-16 空気中ラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ	45
Fig. 3-17 航空機モニタリングで取得できる γ 線スペクトル例.....	47
Fig. 3-18 天然放射性核種ごとの対地高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション結果).....	47
Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例.....	51
Fig. 4-2 島根(前期及び後期) のテストポイントにおける地上測定値.....	52
Fig. 4-3 オーバーラップフライトによるヘリコプター間の <i>CR-Index</i> ・ <i>HF</i> 補正計数率の比較.....	54
Fig. 4-4 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果.....	56
Fig. 4-5 島根における空間線量率マップ	57
Fig. 4-6 島根における空間線量率マップの比較	58
Fig. 4-7 地質情報の比較考察の対象としたエリア	66

Fig. 4-8 島根 (前期及び後期) の測線近傍における地上測定値	69
Fig. 4-9 島根における航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較	70
Fig. 4-10 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較 (2015 年度から 2020 年度 までの全データ)	71
Fig. 4-11 島根の K-40 濃度マップ	75
Fig. 4-12 島根の U 系列濃度マップ	76
Fig. 4-13 島根の Th 系列濃度マップ	77
Fig. 4-14 島根の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (K-40)	78
Fig. 4-15 島根の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (U 系列)	79
Fig. 4-16 島根の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (Th 系列)	80
Fig. 4-17 海上及び陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr ₃ (Ce)検出器の計数率の関係	83
Fig. 4-18 島根におけるラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ	90
Fig. 4-19 島根における空気中のラドン子孫核種由来の計数率マップ	91
Fig. 4-20 島根における標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地 上測定値との比較 (重み付き直交距離回帰による <i>RI</i> 及び <i>GI</i> を用いた場合)	92
Fig. 4-21 島根におけるラドン弁別手法による空間線量率の計算結果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)	94
Fig. 4-22 空气中核種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	95
Fig. 4-23 島根における放射性セシウム沈着量マップ	97
Fig. 5-1 無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンの飛行範囲と飛行予定経路	103
Fig. 5-2 モニタリングに用いた機体及び放射線検出器	104
Fig. 5-3 訓練フライトに用いたシステムの構成	105
Fig. 5-4 2 月 14 日時点の各検出器の測定データのダウンリンク結果	106
Fig. 5-5 関係機関による訓練フライト視察の様子 (2025 年 2 月 15 日)	107
Fig. 5-6 令和 6 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングのフライトプ ラ ン	112
Fig. 5-7 令和 6 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングに使用したヘ リ コプター (UH-60)	113
Fig. 5-8 航空機モニタリングシステムの搭載状況	113
Fig. 5-9 令和 6 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングのヘリコプター 内での測定状況 (訓練)	114
Fig. 5-10 リアルタイムデータ通信システムにより電子地図上に表示された航空機モニタ リ ングデータ	115
Fig. 5-11 令和 6 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングによる空間線 量 率分布マップ	116

Fig. 5-12 緊急時航空機モニタリング中の対地高度の推移.....	117
Fig. 6-1 測定システムの概要	121
Fig. 6-2 無人機データ収集システムの概要	122
Fig. 6-3 無人機データ収集システムのトップページ	123
Fig. 6-4 リアルタイム解析の例.....	125
Fig. 6-5 後処理解析に使用するパラメータの設定例	125
Fig. 6-6 後処理解析に使用するデータ範囲の指定例	126
Fig. 6-7 後処理解析におけるスペクトルのレンジ設定例.....	126
Fig. 6-8 後処理解析における内挿補間処理の設定例	127
Fig. 6-9 後処理解析で得られたマップ例	127
Fig. 6-10 マルチコプターを用いた空間線量率測定システムの概要	129
Fig. 6-11 マルチコプター情報及び外観.....	129
Fig. 6-12 マルチコプター搭載用放射線検出器情報及び外観.....	130
Fig. 6-13 マルチコプター着陸時の空間線量率換算値と NaI(Tl)検出器による地表面から 1 m の 高さの空間線量率測値の比較結果.....	130
Fig. 6-14 無人ヘリコプターを用いた測定システムの概要.....	132
Fig. 6-15 無人ヘリコプターを用いた放射線測定システムの機器フロー図.....	132
Fig. 6-16 無人ヘリコプター詳細情報及び外観	133
Fig. 6-17 無人ヘリコプター搭載用放射線検出器の情報及び外観	133
Fig. 6-18 固定翼型無人航空機を用いた測定システムの概要.....	135
Fig. 6-19 固定翼型無人航空機を用いた放射線測定システムの詳細	135
Fig. 6-20 固定翼型無人航空機詳細情報及び外観	136
Fig. 6-21 固定翼型無人航空機搭載用放射線検出器情報及び外観	136
Fig. 7-1 座学講習の様子	144
Fig. 7-2 実技講習の様子	145
Fig. 7-3 他機体の運用例 (MATRICE 300 を使用).....	147
Fig. 8-1 全体会合の様子 (2024 年 11 月 11 日).....	150
Fig. 8-2 現場での意見交換や議論の様子 (2024 年 11 月 12 から 11 月 14 日).....	150
Fig. 8-3 議論の様子 (2024 年 11 月 15 日).....	151
Fig. 8-4 合同環境放射線モニタリングの実施場所の概略図.....	165
Fig. 8-5 定点サーベイに用いた放射線検出器の詳細情報.....	165
Fig. 8-6 歩行サーベイに用いた放射線検出器の詳細情報.....	166
Fig. 8-7 自動車による走行サーベイに用いた放射線検出器の詳細情報	166
Fig. 8-8 無人ヘリコプターによるモニタリングに用いた放射線検出器の詳細情報	167
Fig. 8-9 定点モニタリングの様子	168
Fig. 8-10 歩行サーベイの様子.....	169

Fig. 8-11 BMA における歩行サーベイの結果	169
Fig. 8-12 車両を用いた走行サーベイに用いた放射線検出器の搭載状況	170
Fig. 8-13 BMA 周辺の走行サーベイの結果.....	170
Fig. 8-14 BMA 周辺の無人ヘリコプターによるモニタリング結果	171

1. はじめに

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)では、2011年(平成23年)3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に起因した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)事故以降、周辺環境における放射性物質の分布調査を目的に、有人のヘリコプターを用いた航空機モニタリング技術の開発を進めてきた。事故から約14年にわたり、航空機モニタリングの継続実施とともに手法の改善及び体制整備が行われてきた¹⁾⁻²³⁾。原子力防災の一環として航空機モニタリングを有効に機能させるには、事故時における具体的な運用方法、機器の恒久的な管理体制の維持、技術の継承等の課題が挙げられる。このような課題と東電福島原子力発電所事故の教訓に基づき、事故後に整備された「原子力災害対策マニュアル」²⁴⁾には、航空機モニタリングに関する方針が次のように定められている。

原子力災害対策マニュアル

第2 関係省庁における対応要領

第1編 事態ごとの組織・応急対策業務等

第4章 全面緊急事態

第2節 応急対策業務

13 緊急時モニタリング結果等の情報の収集及び共有 <放射線班>(規制庁等)

(1) 緊急時モニタリングの実施業務

② 緊急時モニタリングの実施・支援

ERC チーム放射線班は、原子力事業所周辺以外の広範囲にわたって事故の影響が懸念される場合には、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と連携して航空機モニタリングを実施するとともに、必要に応じてモニタリングカーによる測定や環境放射能水準調査の結果等を活用して、汚染の状況を把握する。自衛隊等の関係機関は、航空機モニタリングに対して ERC チーム放射線班からの調整があった場合には、必要に応じて、対応可能な範囲内で、航空機によるモニタリング支援を行う。

原子力機構は、原子力災害時における迅速かつ広範囲なモニタリング体制の確立を目的とした事業を原子力規制庁(以下、規制庁)から受託している。この受託事業は、原子力災害対策マニュアルに基づき、航空機モニタリングの運用方法、緊急時対応体制の整備、技術の維持及び継承を行うものである。同マニュアルでは、航空機モニタリングを放射性物質の分布状況を広範囲かつ迅速に把握するための重要な手段として位置づけており、特に原子力発電所から概ね半径5 km から 30 km 圏内の「緊急防護措置を準備する区域」(Urgent Protective action Zone、以下、UPZ) 外では、モニタリングポスト等の常設観測装置の数が限られるため、航空機モニタリングが主要なデータ収集手段となる。さ

らに、航空機モニタリングは、原子力災害対策指針²⁵⁾に定められた防護措置の実施判断基準 (Operational Intervention Level、以下、OIL) に基づき、空間線量率 500 $\mu\text{Sv/h}$ を超える地域 (OIL1)、20 $\mu\text{Sv/h}$ を超える地域 (OIL2) や及び 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ を超える地域 (飲食物に係るスクリーニング基準) の特定にも活用される。Table 1-1 に原子力災害対策指針における OIL の詳細を示す。また、原子力災害時に航空機モニタリングを機能的かつ効率的に実施するには、事前に想定地域でフライト訓練を行い、地域の特性 (飛行場から原子力発電所までの距離、地形の影響、フライト開始までの最短時間評価等) を把握しておくことが重要である。さらに、測定データを解析して情報を公表するまでの時間についてシミュレーションしておくことにより、航空機モニタリングによる迅速なデータ取得と共有が可能となる。原子力災害時における緊急時モニタリングにおいて航空機モニタリングを適切に活用するためには、平常時から航空機モニタリングを実施することにより、測定及びデータ解析の経験を蓄積し技術維持及び品質向上に努めることも重要である。

東電福島原子力発電所事故後に同原子力発電所周辺で行われている航空機モニタリング²²⁾等では、周辺環境に沈着した放射性セシウムから放出される γ 線を測定している。放射性セシウムの影響が天然放射性核種からの影響に比べて比較的高い場所を測定する場合には、天然放射性核種の影響は無視できるが、東電福島原子力発電所事故よりも比較的小さな事故を想定した場合は、天然放射性核種の影響を考慮しなければならない。バックグラウンドの影響を除いた空間線量率を算出するには、 γ 線エネルギースペクトルからバックグラウンド計数率を減算する手法が考えられるが、スペクトル弁別には計数を一定程度蓄積する必要がある、一般的に時間がかかる。原子力災害時等の緊急時にモニタリング対象となることが想定される地域のバックグラウンドを事前に調査しておく、緊急時に迅速かつ正確にバックグラウンドを減算したうえで空間線量率の評価が可能となる。また、事故が発生する前にフライトすることによって、地域特有の航空管制の情報、測定拠点として用いることのできる空港等の特徴や利用方法及び山間部等のフライト上の危険個所の抽出等、緊急時における迅速かつ確実な航空機モニタリングの実施に資する情報を予め整備できる。このため、規制庁からの受託事業として2015年度 (平成27年度) から国内の原子力発電所周辺において航空機によりバックグラウンドの測定を目的としたモニタリング (以下「バックグラウンドモニタリング」という。) を実施してきた^{7),9),11),13),15),17),19),21),23)}。

東電福島原子力発電所事故後、無人航空機 (Unmanned aerial vehicle: UAV) を活用した放射線測定技術の開発が進められている。原子力機構では、同原子力発電所周辺のモニタリングや河川敷のモニタリングにヤマハ発動機社製の自律型無人ヘリコプターを活用している²⁶⁾⁻²⁸⁾。また、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (以下、JAXA) と共同で燃費効率の良い飛行機型 UAV を用いた放射線モニタリングシステム (Unmanned Airplane Radiation Monitoring System : UARMS) を開発した²⁹⁾⁻³¹⁾。UARMS は既に試作機まで開発されており、実用化のための基礎データを東電福島原子力発電所周辺で取得することに

より実用機開発が進められている²⁹⁾。UAV は遠隔地からの放射線測定が可能であり、有人ヘリコプターを用いる従来技術の代替として期待されているとともに、原子力防災への適用も見据えた技術としての発展が見込まれる。また、UAV による放射線計測は、測定作業者の被ばく線量を低減することが可能である。原子力災害対応に UAV を適用することを念頭に、規制庁からの受託事業として 2019 年度 (令和元年度) から UAV の開発及び運用試験を開始し、無人航空機 Penguin C (Edge Autonomy 社製) について性能評価を行うとともに、国内での運用に当たっての課題を抽出しその解決を図ってきた^{15),17),19),21),23)}。この技術的検討がベースとなり、政府の緊急時対応計画の一環として、原子力災害対策指針補足参考資料³²⁾に緊急時モニタリングにおける無人機を用いた航空機モニタリングに関する記載が追加された。

これまで規制庁からの受託事業として実施した原子力発電所周辺における航空機によるバックグラウンドモニタリング及び無人航空機の運用方法の開発に関する概要及び経緯は以下の通りである。

2015 年度 (平成 27 年度) には、鹿児島県にある九州電力川内原子力発電所 (以下、川内) 周辺の 3 km～80 km 圏内について航空機を用いたバックグラウンドモニタリングを実施し、フライト時の地域特性を踏まえた注意点を抽出した。また、天然放射性核種の放射能濃度マップの作成手法を整備した⁷⁾。

2016 年度 (平成 28 年度) には、福井県にある関西電力大飯発電所並びに高浜発電所 (以下、大飯・高浜) 及び愛媛県にある四国電力伊方発電所 (以下、伊方) 周辺 3 km～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した⁹⁾。

2017 年度 (平成 29 年度) には、北海道にある北海道電力泊発電所 (以下、泊)、新潟県にある東京電力柏崎刈羽原子力発電所及び佐賀県にある九州電力玄海原子力発電所 (以下、玄海) 周辺 3 km～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した¹¹⁾。

2018 年度 (平成 30 年度) には、島根県にある中国電力島根原子力発電所 (以下、島根) 及び静岡県にある中部電力浜岡原子力発電所周辺 3 km～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した¹³⁾。

2019 年度 (令和元年度) には、青森県にある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石川県にある北陸電力志賀原子力発電所周辺 3 km～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した。また、当年度より、無人航空機を用いた原子力防災への運用技術開発に着手し、機器の選定及び仕様の確認のためのフライト試験を実施した¹⁵⁾。

2020 年度 (令和 2 年度) には、福井県にある関西電力美浜発電所並びに日本原子力発電敦賀発電所 (以下、美浜・敦賀) 及び大阪府にある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 (以下、近大炉・京大炉) 周辺 3 km～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した。ただし、美浜・敦賀及び近大炉・京大炉の測定範囲は 2016 年度 (平成 28 年度) の大飯・高浜の測定範囲と重複する領

域を除いた。また、無人航空機 Penguin C の原子力防災への運用技術開発の一環として、機体の運用を慣熟することを目的としたフライト試験を実施するとともに機体に搭載する放射線検出器や通信システム等を試作し、本試作機を搭載したフライトを実施して得られたデータ及び原子力防災への運用に際しての今後の技術開発課題等を取りまとめた¹⁷⁾。

2021 年度 (令和 3 年度) には、2016 年度 (平成 28 年度) 以来、2 回目となる大飯・高浜周辺 3 km～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した。また、Penguin C の運用技術開発を進め、フライト試験を引き続き実施するとともに、機体に搭載する放射線検出器や通信システム等の基本設計及び製作を行った。本システムを搭載してフライトを実施することで得られたデータ及び緊急時モニタリングへの運用に際しての更なる課題等についてとりまとめた¹⁹⁾。

2022 年度 (令和 4 年度) には、美浜・敦賀及び伊方の周辺 3 km～80 km 圏内においてバックグラウンドモニタリングを実施した。なお、美浜・敦賀及び伊方での測定はそれぞれ 2020 年度 (令和 2 年度) 及び 2016 年度 (平成 28 年度) 以来 2 回目となる。また、原子力災害時の緊急時モニタリングにおける無人航空機 Penguin C の運用技術開発の一環として、2021 年度 (令和 3 年度) に引き続き、フライト試験による慣熟訓練を実施するとともに、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際に必要となる機能等について検討した²¹⁾。

2023 年度 (令和 5 年度) には、2015 年度 (平成 27 年度) 以来、2 回目となる川内周辺 3 km～80 km 圏内においてバックグラウンドモニタリングを実施した。また、無人航空機 Penguin C に搭載する放射線検出器の開発、Cs-137 点線源を用いた放射線応答試験、地上での運転試験による緊急時モニタリングへの適合性について調査した。さらに、緊急時モニタリングで活用できる無人航空機の調査を実施し、基本的な飛行動作試験と放射線モニタリングの結果から運用上の課題を抽出した。また、内閣府主導の原子力防災訓練における緊急時航空機モニタリングの実施を通して課題を抽出した。この訓練には、有人ヘリコプターの緊急時モニタリング訓練に加え、国内で初となる無人航空機や無人ヘリコプター、ドローンによる訓練フライトも含まれる²³⁾。

2024 年度 (令和 6 年度) の規制庁受託事業では、島根の周辺 3 km～80 km 圏内においてバックグラウンドモニタリングを実施した。本モニタリングは 6 月中旬と 8 月下旬から 9 月初旬の 2 回に分けて行われ、必要に応じて「島根 (前期)」と「島根 (後期)」とそれぞれ表記する。また、内閣府主導の原子力防災訓練における緊急時航空機モニタリング訓練を通じて課題の抽出を行った。この訓練には、有人ヘリコプターの緊急時モニタリング訓練に加え、マルチコプター、無人ヘリコプター及び固定翼無人航空機による訓練フライトも実施された。さらに、原子力災害時における無人機を活用したモニタリング技術の開発として、これら無人機を用いた測定データの逐次解析を行い、関係者間で共有可能なシステムの構築を進めた。また、無人機によるデータ収集システムの整備に加

え、マルチコプター型モニタリング機器の整備及び技能講習を実施し、運用体制の強化を図った。さらに、関係各国との意見交換や合同環境放射線モニタリングを通じて、国際的な協力体制の構築にも取り組んだ。本報告書では、第 2 章で有人ヘリコプターのモニタリングシステムについて概説し、第 3 章でデータの取得及び解析方法を示す。第 4 章では島根周辺のバックグラウンドモニタリング結果を報告し、第 5 章では緊急時航空機モニタリング訓練の成果及び課題を整理する。第 6 章では、無人機データ収集システムの整備状況を取りまとめ、第 7 章でマルチコプター型モニタリング機器の整備及び技能講習の実施結果を報告する。第 8 章では関係各国との連携強化に向けた取り組みと合同環境放射線モニタリングの成果について述べる。

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL²⁵⁾ (一部抜粋)

	基準の種類	基準の概要	初期設定値		
緊急防護措置	OIL1	地表面からの放射線、再浮遊した放射性物質の吸入、不注意な経口摂取による被ばく影響を防止するため、住民等を数時間内に避難や屋内退避等させるための基準	500 μ Sv/h (地上1 mで計測した場合の空間放射線量率)		
	OIL4	不注意な経口摂取、皮膚汚染からの外部被ばくを防止するため、除染を講ずるための基準	β 線: 40,000 cpm (皮膚から数cmでの検出器の計数率)		
			β 線: 13,000 cpm【1か月後の値】 (皮膚から数cmでの検出器の計数率)		
早期防護措置	OIL2	地表面からの放射線、再浮遊した放射性物質の吸入、不注意な経口摂取による被ばく影響を防止するため、地域生産物を制限するとともに、住民を1週間程度内に一時移転させるための基準	20 μ Sv/h (地上1 mで計測した場合の空間放射線量率)		
飲食物摂取制限	飲食物に係るスクリーニング基準	OIL6による食物摂取制限を判断する準備として飲食物中の放射性核種濃度測定を実施すべき地域を特定する際の基準	0.5 μ Sv/h (地上1 mで計測した場合の空間放射線量率)		
	OIL6	経口摂取による被ばく影響を防止するため、飲食物の摂取を制限する際の基準	核種	飲料水 牛乳・乳製品	野菜類、穀類、肉、 卵、魚、その他
			放射性ヨウ素	300 Bq/kg	2,000 Bq/kg
			放射性セシウム	200 Bq/kg	500 Bq/kg
			プルトニウム及び 超ウラン元素のアルファ核種	1 Bq/kg	10 Bq/kg
			ウラン	20 Bq/kg	100 Bq/kg

2. 有人ヘリコプターのモニタリングシステム

2.1. 航空機モニタリングシステム

一般的に、航空機モニタリングシステム (Aerial Radiation Monitoring System: ARMS) には、大型の NaI(Tl)シンチレーション式検出器(以下、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、機内に装着するタイプである。RSI システムのブロック図を Fig. 2-1 に示し、外観を Fig. 2-2 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を 2 台使用している (合計: 12.6 L)。なお、NaI(Tl)検出器の上部に設置してある LaBr₃(Ce)シンチレーション式検出器 (3"×3"、以下、LaBr₃(Ce)検出器) は空気中ラドンの子孫核種に起因する γ 線計数率の弁別 (3.8 節に詳述する) に使用する。検出器で計測した 1,024 ch (0 ch～1,023 ch) の γ 線のスペクトルは 1 秒毎に同期する 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。検出器 2 台のデータは RS-501 という装置で統合される。RS-501 は PC と接続でき、PC にインストールされている専用のソフトウェア (RadAssist) を使用することによって GPS による位置情報や 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 5 時間の稼働が可能である。現在、航空機モニタリングで用いられている機器は複数あり、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²²⁾で主に使われている 2 システム (RSI 1 及び RSI 2) と区別するため、本報告書では RSI 3 と表記する。

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位を行うことができる。令和 5 年度 (2023 年度) に実施した川内周辺のバックグラウンドモニタリングにおいて、RSI システムの GPS の測位誤差が大きくなり、その影響で空間線量率マップの値が顕著に高くなる現象が確認された²³⁾。令和 6 年度 (2024 年度) 以降は、この現象を未然に防ぐため、測定された γ 線計数率とその位置情報との紐付けは高精度 GPS システムで取得された緯度及び経度を基に行うこととした。

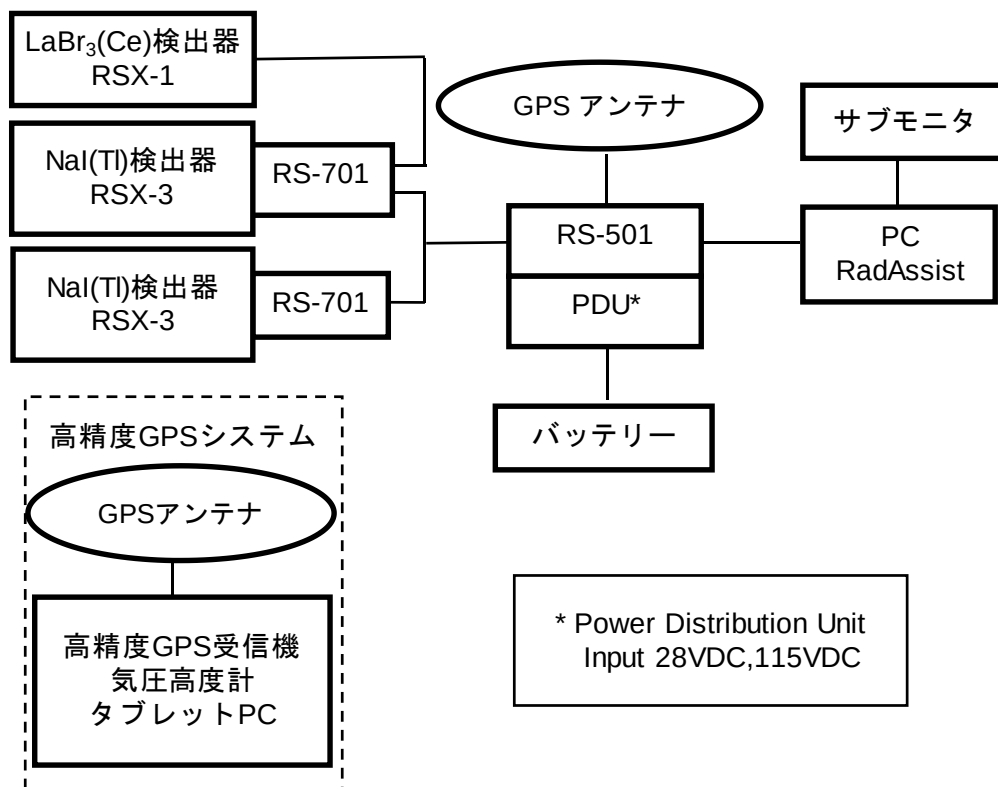


Fig. 2-1 RSI システムのブロック図

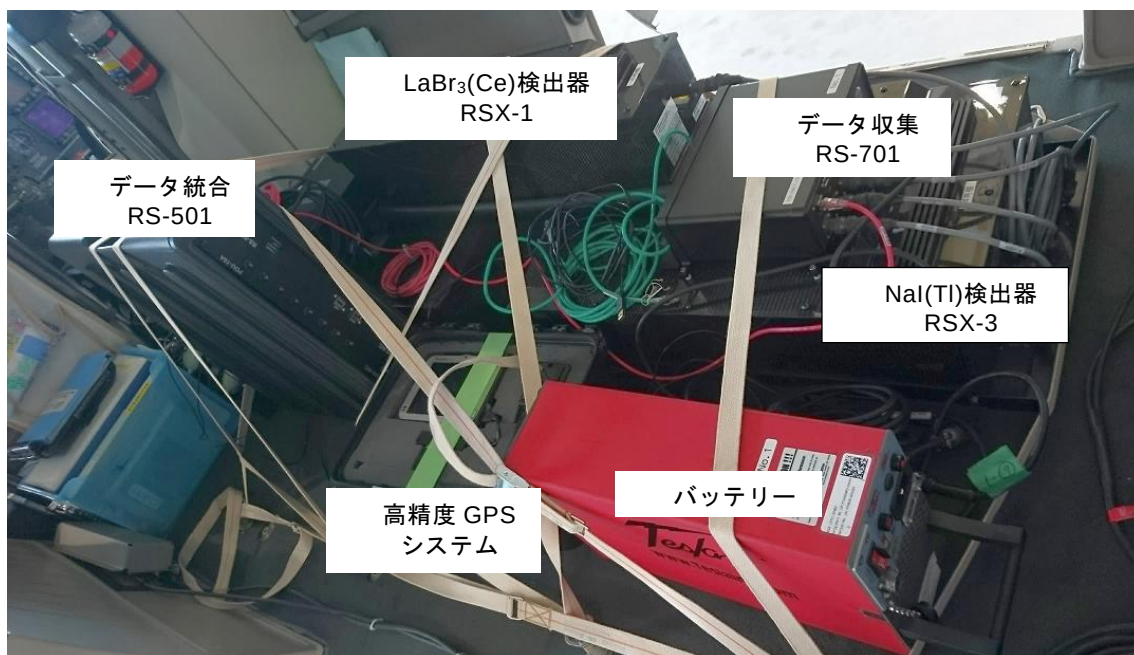


Fig. 2-2 RSI システムの外観

2.2. ヘリコプターの選定

RSI システムはヘリコプター機内に搭載するタイプであるため、ヘリコプターの機底に燃料タンクがある場合、燃料タンクの材料及び燃料による γ 線の遮へい効果を考慮する必要がある。そこで、 γ 線測定値の誤差を低減するため、ヘリコプター機体は機底に燃料タンクのないものに限定した。航空機モニタリングに使用できる機底に燃料タンクのない機種のを Fig. 2-3 に示す。2024 年度 (令和 6 年度) に使用したヘリコプター機種 (機体番号) は、機体繰りの都合から、島根 (前期) では Bell412 (JA6928)、島根 (後期) では S-76 (JA6901) とした。これら使用機体を Fig. 2-4、Fig. 2-5 に示す。



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. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧



Fig. 2-4 島根 (前期) の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell412 (JA6928))



Fig. 2-5 島根 (後期) の航空機モニタリングに使用した機体 (S-76 (JA6901))

2.3. RSI システムの保守

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

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

2,614 keV のピークに対するエネルギー分解能については、メーカーから 6%以下という保守の推奨値が示されている。日常の点検で常に数値を確認し、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も同様にメーカーから示されている推奨値である 0.8 を下回る場合に再調整を行うこととしている。島根 (前期) 及び島根 (後期) の測定期間におけるエネルギー分解能とアンプのゲインの推移について Fig. 2-6 及び Fig. 2-7 に示す。なお、Fig. 2-7 の 8 月 25 日から 9 月 2 日の間に見られる空白は、島根県への台風接近に伴い当該期間中はモニタリングを中断し、チェックプログラムを動作できなかったために生じたものである。また、図中の RSI 3 以降の枝番は配置してある検出器の番号である。島根 (前期及び後期) のモニタリング期間を通じて、エネルギー分解能は安定しており、ゲインの再調整を行う必要性は生じなかった。今までの経験から、気温が低下した場合にゲインが若干上昇する傾向にあることが分かっている。これは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。このことから、気温の低い時期のモニタリングの際には注意が必要であり、ヘリコプター機内はなるべく気温が下がらないように対策を講じる必要がある。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自動で補正可能である。

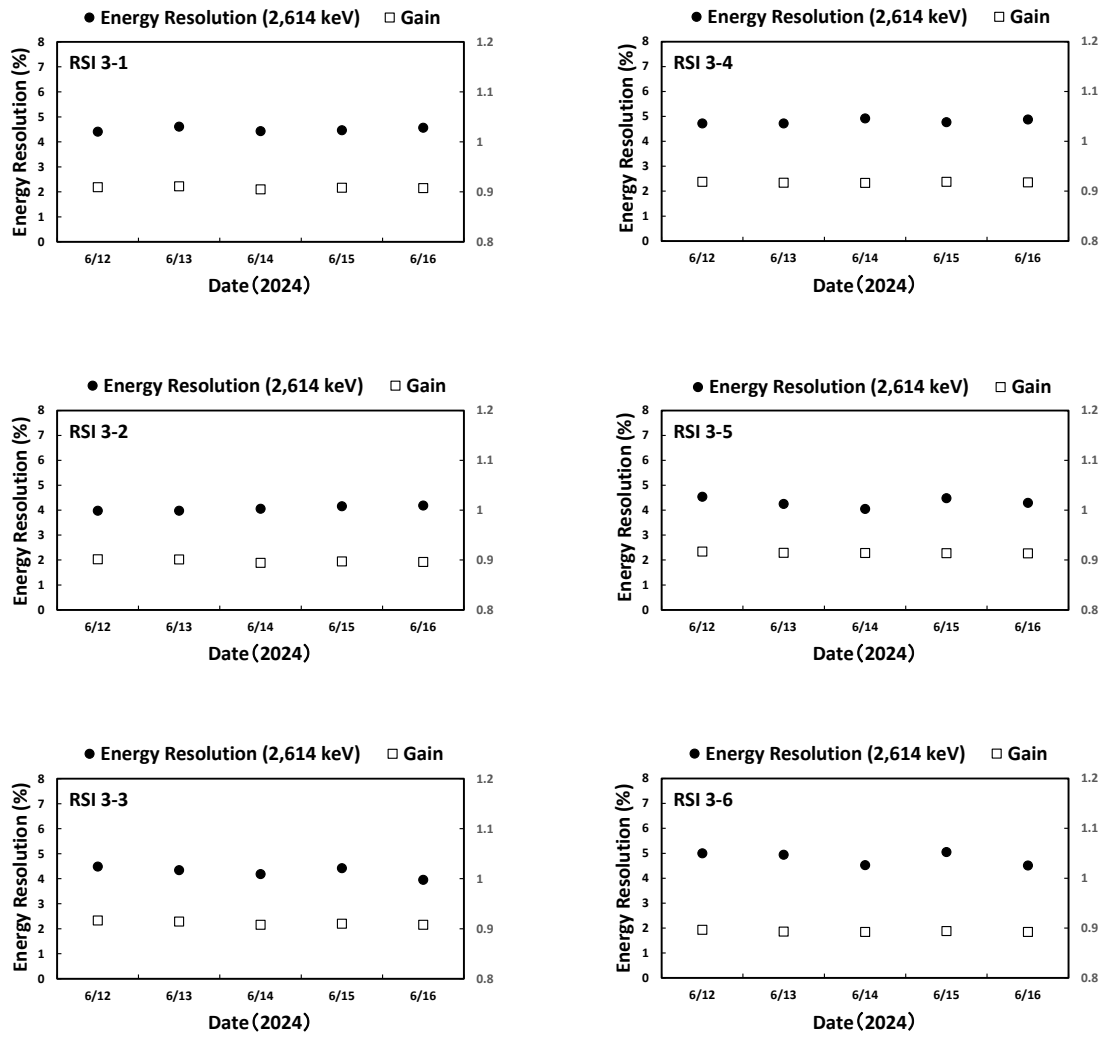


Fig. 2-6 システムのエネルギー分解能及びゲインの推移 (島根 (前期))

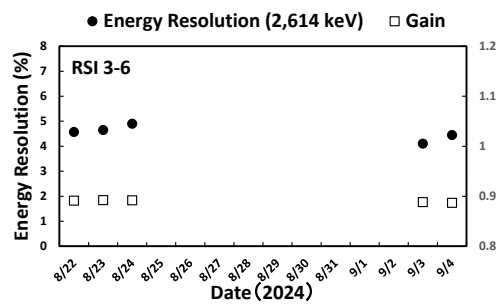
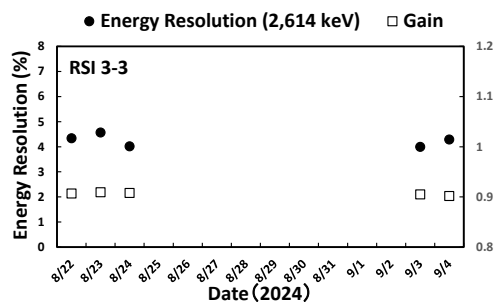
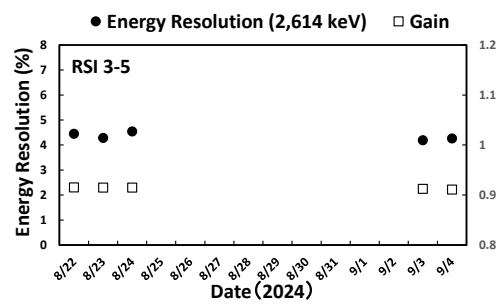
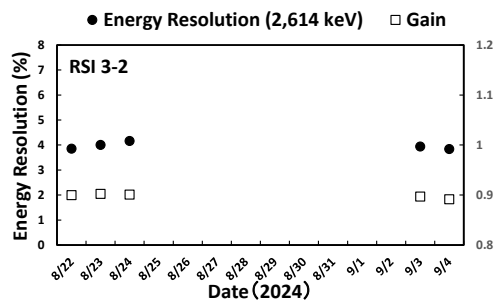
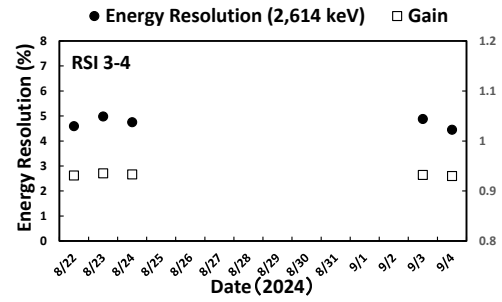
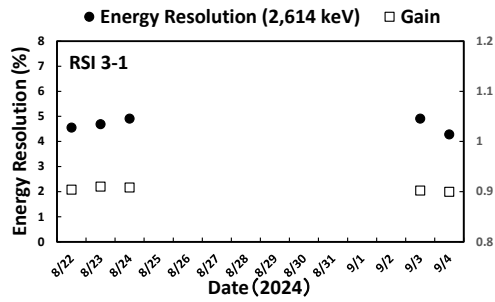


Fig. 2-7 システムのエネルギー分解能及びゲインの推移 (島根 (後期))

3. データ取得及び解析方法

3.1. 航空機モニタリング及び地上測定の方法

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

航空機モニタリングによる測定データは下記のようなフライト条件で取得した。なお、これらの条件は気象状況や地形の高度勾配によって若干変化する。

[フライト条件]

- 速度：160 km/h を基準とし、130 km/h～180 km/h の範囲
- 基準対地高度：300 m (=1,000 ft)
- 対地高度の許容範囲：0 m～約 500 m (= 1,750 ft)
- 測線間隔：5 km

測定データは1秒ごとにGPSによる位置情報と検出器の γ 線の計数率を記録し、上記した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多く含まれるため、空間線量率等の算出には用いないこととした。Fig. 3-1 に島根（前期及び後期）における予定測線を東西方向の実線で示す。本測線は2018年度（平成30年度）に実施した島根バックグラウンドモニタリングから、島根県隠岐の島町全域に空間線量率マッピングが可能となるように調整したもので、測線間隔は基本的に5 kmである。航空機モニタリングの拠点として出雲空港を使用した。なお、航空機モニタリングによる測定は以下のような仮定に基づいている。

[航空機モニタリングにおける仮定]

- 航空機モニタリングで計測される計数率は、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表面範囲における平均値とする。
- 測定対象となる地表面は、平坦かつ放射線の分布は一様とする。

Fig. 3-2 に航空機モニタリングデータ取得のイメージを示し、Fig. 3-3 に航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージについて示す。また、航空機モニタリングにより評価する空間線量率の妥当性を検証するため、Fig. 3-1 に示した測線の近傍（黄色及び水色丸点）の30地点において、NaI(Tl)検出器（アロカ株式会社製 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）を行った。地上測定地点には周囲に建物等の遮へい物がなく地形的に平坦な場所を選定し、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第 3 桁で四捨五入して小数点第 2 桁とし、その地点における地上測定値とした。

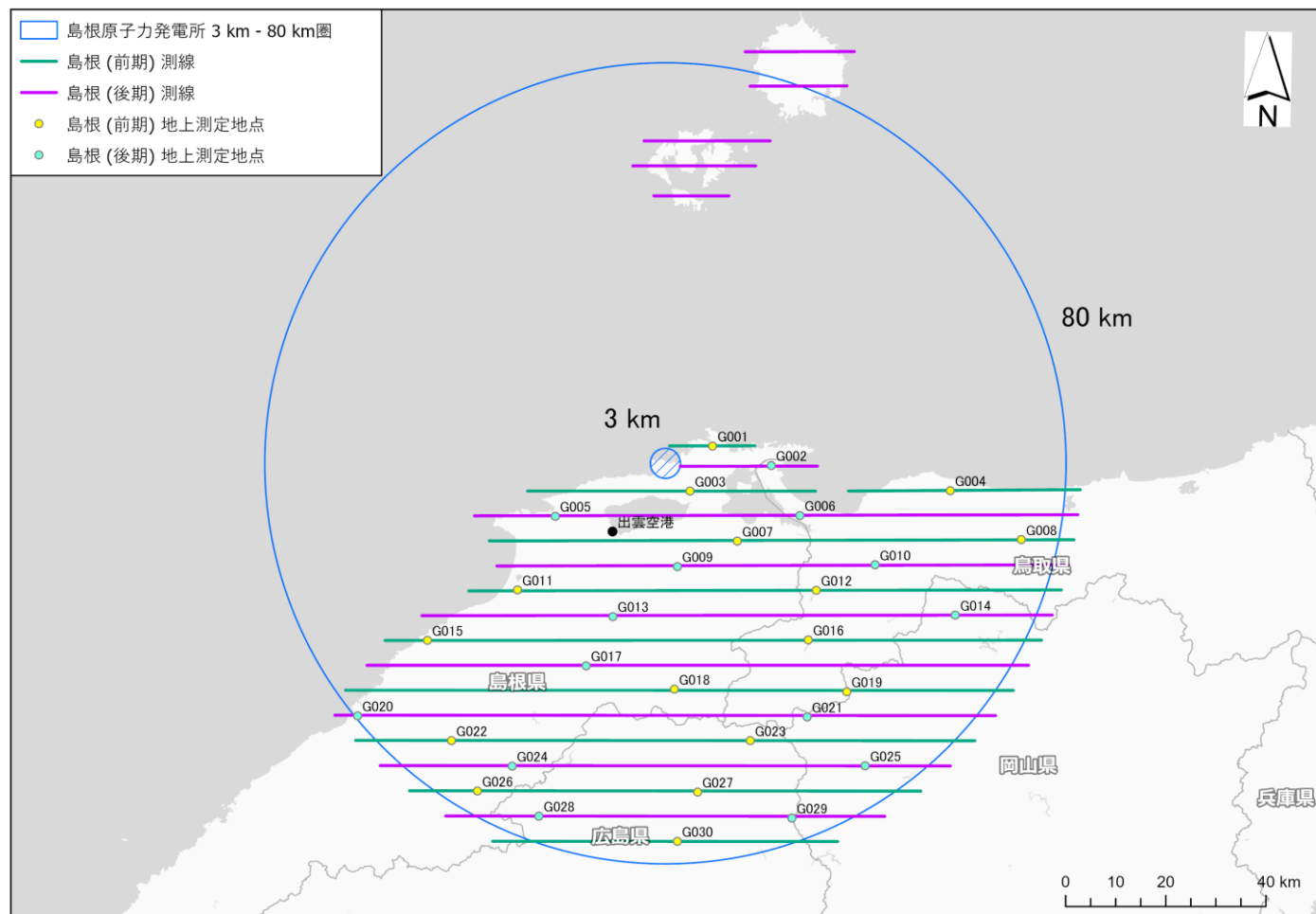


Fig. 3-1 予定したフライトの測線及び地上測定地点 (島根 (前期及び後期))
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

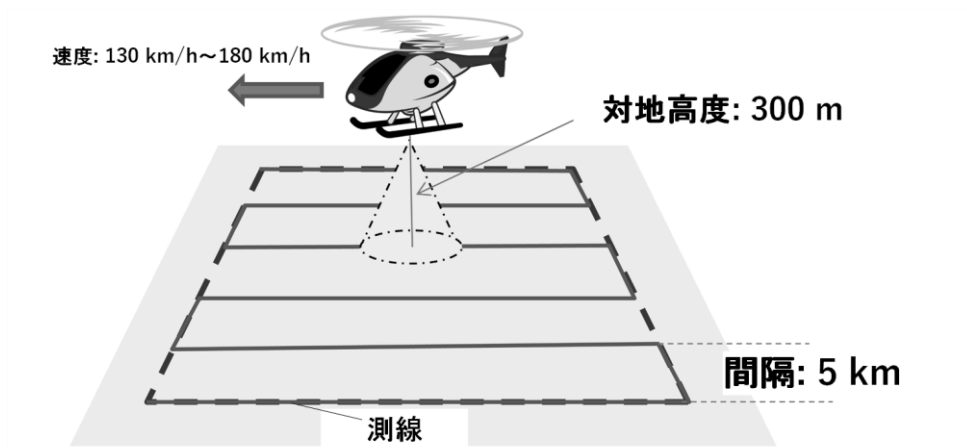


Fig. 3-2 航空機モニタリングデータ取得のイメージ

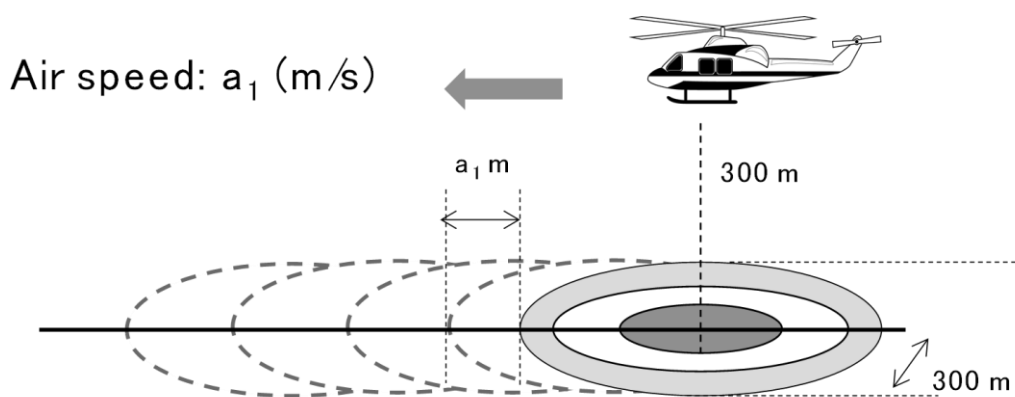


Fig. 3-3 航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージ

3.2. キャリブレーションフライト方法

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や地表面の放射性セシウムの沈着量に換算するためのパラメータを求めるため、各種キャリブレーションフライトを実施する。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 3-1 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

実際のフライトでの対地高度と基準対地高度 (300 m) とのずれによって生じる γ 線計数率の多少を補正するための実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor: $AF (m^{-1})$) を求めるフライトである。本フライトは、線量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 (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. 3-4 に示す。本報告において、テストラインフライトの実施場所は島根県出雲市の周辺とした。また、テストラインとして選定した具体的な場所について Fig. 3-5 に直線で示す。

- テストポイントフライト

空間線量率の勾配が小さく、かつ地形の平坦な地点 (テストポイント) を選定し、テストポイントの中心点から半径 500 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 500 m の範囲内で 30 地点を目安に NaI(Tl)検出器を用いて地上測定を行う。本フライトとテストポイントにおける地上測定値を相互比較することにより、基準対地高度 (300 m) における γ 線計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するための係数 (Conversion factor of Dose-rate: $CD ([s^{-1}]/[\mu Sv/h])$) が求まる。本報告において、テストポイントフライトの実施場所はテストラインフライトと同様とした。テストポイントとして選定した具体的な場所を Fig. 3-5 に半径 500 m の円で示す。テストポイントフライトのイメージを Fig. 3-6 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。宇宙線フライトにより取得される γ 線計数率は海拔高度の上昇に伴って増加し、その上昇の度合いは測定エリアにはほとんど依存せず、概ね一定であることが見出されている⁴⁾。一方で、測定時期や使用するヘリコプター機種の違いが宇宙線フライトにおける γ 線計数率の上昇の度合いに及ぼす影響に関する知見はやや不十分である。そこで、本知見を拡充するため、各測定エリアで航空機モニタリングを実施する度に宇宙線フライトを実施することとしている。宇宙線フライトのイメージを Fig. 3-7 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、天候等を見ながら海上の適当な位置で実施する。なお、本報告において宇宙線フライトは島根県西方向または北西方向の日本海上で実施した。

- 空気中核種フライト

地上からの放射線の影響が極めて少ないと考えられる対地高度 (海上の場合は海拔高度) 約 900 m に保ち、約 3 分間のフライトを継続し、ヘリコプター機体及びその周辺の空気中に存在する放射性核種由来の γ 線計数率を取得する。空気中核種フライトの

イメージを Fig. 3-8 に示す。本報告において、空气中核種フライトは宇宙線フライトと同様に、島根県西方向または北西方向の日本海上で実施した。

・オーバーラップフライト

換算パラメータの内、各ヘリコプター機体に設定する CD の妥当性評価を行うために、各ヘリコプター機体で同一の測線 (距離 7 km、間隔 1 km、本数 4 本) 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フライトとは異なり、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。本報告におけるオーバーラップフライトに用いた測線を Fig. 3-9 に示す。なお、オーバーラップフライトは島根 (前期) の終期 (令和 5 年 6 月 17 日) と島根 (後期) の始期 (同年 8 月 23 日) にそれぞれ実施した。

Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧

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	テストライン上で対地高度を変化 (300 m、450 m、600 m、750 m、900 m、及び 1,500 m)させてフライト	測定期間中に少なくとも 2 回
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	測定期間中に少なくとも 2 回
宇宙線フライト	宇宙線の影響を調査	海上を海拔高度 300 m ～2,400 m まで上昇	測定期間中に少なくとも 2 回
空气中核種フライト	ヘリコプター機体及びその周辺の空气中に存在する放射性核種の影響を調査	対地高度 (または海拔高度) 900 m を 3 分間フライト	毎日
オーバーラップフライト	空間線量率換算係数の妥当性確認	特定の測線を対地高度 300 m でフライト	1 つのエリアで測定を前期、後期の 2 回に分けて行うとき、前期の終期と後期の始期でそれぞれ 1 回

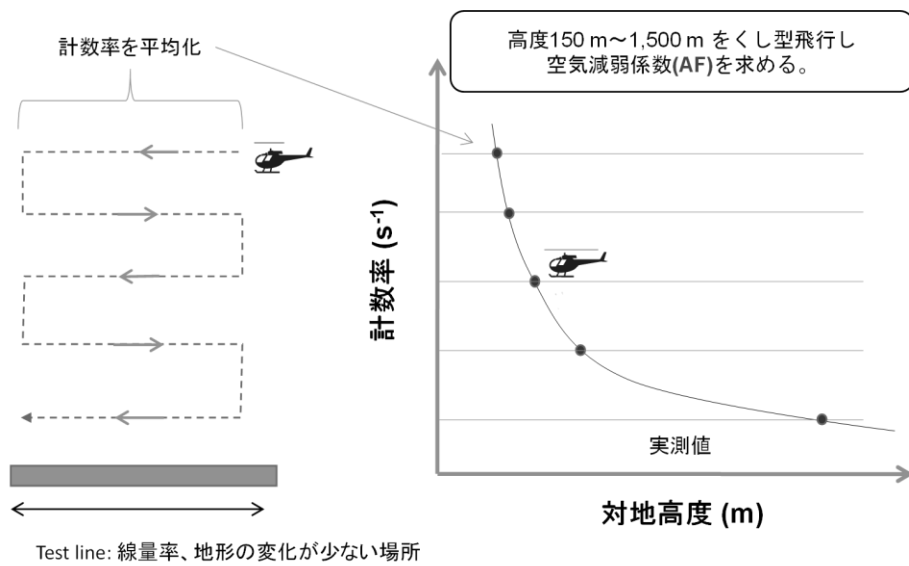
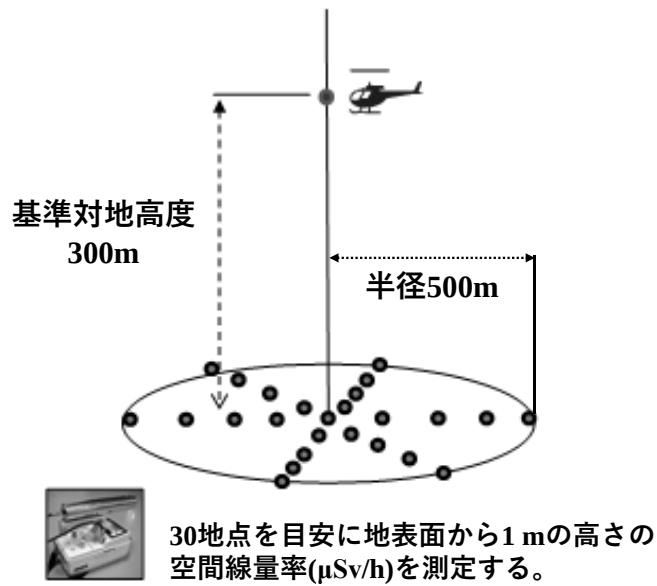


Fig. 3-4 テストラインフライトのイメージ



Fig. 3-5 島根 (前期及び後期) におけるテストライン及びテストポイントの場所
(島根県出雲市)

(背景地図は、ESRI, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community を使用。)



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

Fig. 3-6 テストポイントフライトのイメージ

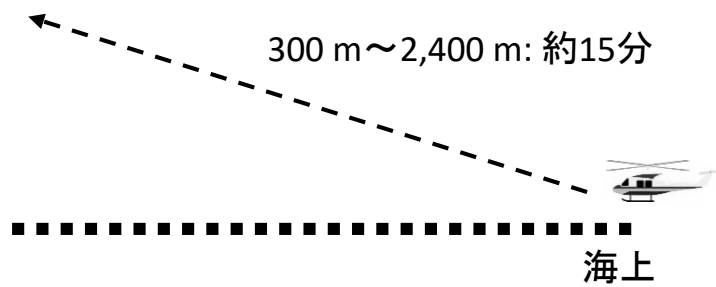


Fig. 3-7 宇宙線フライトのイメージ

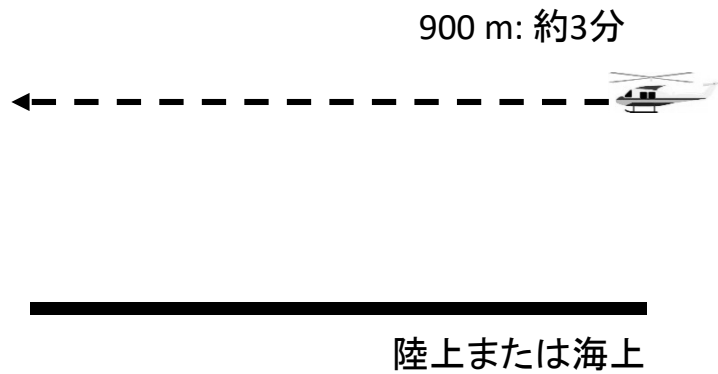


Fig. 3-8 空気中核種フライトのイメージ

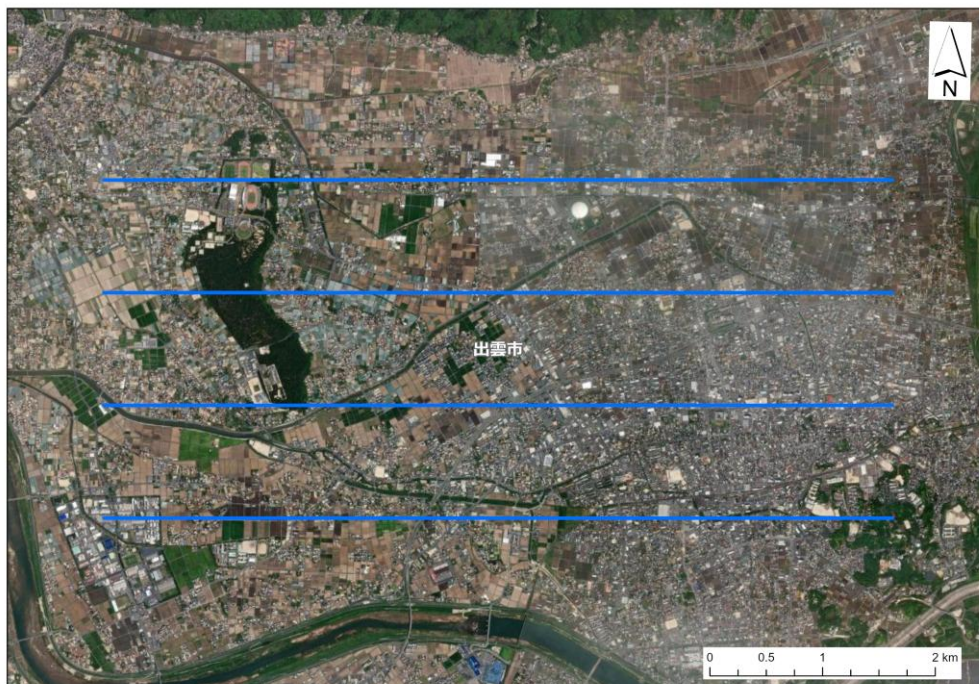


Fig. 3-9 オーバーラップフライトに用いた測線 (島根県出雲市)
(背景地図は、ESRI, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community を使用。)

3.3. 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 地表面からの γ 線
- ② 空气中核種からの γ 線
- ③ 宇宙線
- ④ 放射性セシウムの γ 線

本報告で測定した島根周辺においては④の影響は非常に小さく無視できる。そのため、主目的である①を評価するためには、全計数率から②及び③起源の計数率を減算し、さらに対地高度の補正や空間線量率への換算を行う必要がある。これらを考慮した解析のフローを Fig. 3-10 に示す。本報告では、このフロー図に則った標準的な解析方法を「標準的解析手法」と呼称する。なお、本章以降の空間線量率とは、周辺線量当量率 (1 cm 線量当量率) を意味する。

解析の具体的な手順は次の通りである。3.4 節では、主目的である①の評価方法及びこれを空間線量率に換算する方法について述べる。3.4.1 項で、全計数率から②及び③を減算する方法を説明する。3.4.2 項では、対地高度補正係数 HF の算出方法を示す。これは、対地高度の変化による計数率の変動を補正するためのものである。3.4.3 項では、空間線量率への換算係数 CD の算出方法を示す。これは、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である。3.4.4 項では、上記のパラメータを用いて計数率を空間線量率に換算する具体的な方法を示す。

この解析手法により、バックグラウンドとなる空間線量率を評価することが可能となる。なお、 $CR\text{-}Index$ 、 AF 、 CD といった全計数率から空間線量率に換算するための各種係数を総称して「換算パラメータ」と呼ぶ。

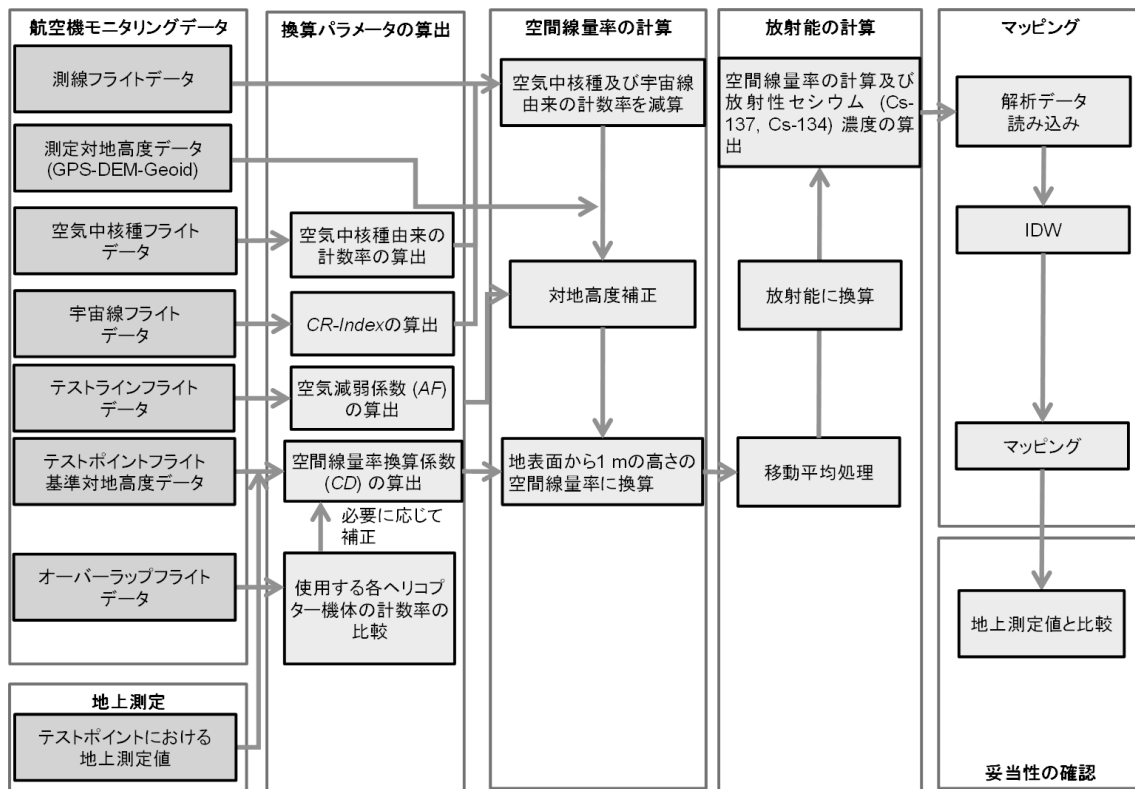


Fig. 3-10 解析のフロー

3.4. 空間線量率への換算方法

大地にはカリウム 40 (K-40)、ウラン系列核種、トリウム系列核種等の天然放射性核種が含まれており、これらから放出される γ 線が空間線量率に寄与している。本報告における航空機モニタリングでは、これらの γ 線を測定し、地表面からの放射線分布を評価することを主目的としている。そのため、全計数率から空气中核種及び宇宙線由来の計数率を減算し、さらに対地高度の補正や空間線量率への換算を行う必要がある。本節では、これらの解析手法について詳述する。

3.4.1. 空气中核種及び宇宙線由来の γ 線計数率

航空機モニタリングにおいて、全 γ 線計数率から空气中核種及び宇宙線由来の計数率を減算し天然放射性核種からの γ 線を評価する。本項では、これら計数率の減算方法について示す。

空气中核種由来の γ 線計数率については、空气中核種フライト(地上からの放射線がほとんど届かないと考えられる対地高度(または海拔高度) 900 m 以上) で取得したデータを用いる。本報告においては、島根県の西方または北西方向の日本海上で空气中核種フライトのデータを取得した。ここで、空气中核種フライトによって陸上及び海上で取得したスペクトルの例¹⁷⁾を Fig. 3-11 に示す。このように、空气中核種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空气中核種からの γ 線計数率の減算に用いることが可能である。なお、空气中核種フライトのデータを用いることなく、空气中ラドン子孫核種による計数率を減算する手法(ラドン弁別手法)については 3.8 節に詳述する。

これまでの経験⁵⁾⁻²³⁾から海拔高度の上昇に伴い宇宙線由来の計数率が上昇することが分かっている。宇宙線由来の γ 線は RSI システムが測定している全エネルギー範囲 (30 keV $\sim$ 3,000 keV) で計数されており、TI-208 が放出する 2,614 keV の γ 線及びその散乱線の影響により、2,614 keV 以下の計数から宇宙線による計数を弁別することは難しい。そこで、宇宙線だけを計数していると考えられる 2,800 keV 以上の計数に着目した。Fig. 3-12 に海拔高度と宇宙線の計数率の関係例を示す。この例は、沖縄と北海道での海上において、海拔高度 50 m $\sim$ 2,000 m 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。宇宙線由来の計数率を推定するため、宇宙線フライトで取得したデータを用いて *CR-Index* を設定した。*CR-Index* は、2,800 keV を超える γ 線の計数率と 2,800 keV 以下の γ 線の計数率の比として算出される。*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* を乗じることによって全エネルギーにおける宇宙線由来の計数率を推定し、全計数率から差し引く。具体的な減算方法は 3.4.4 項に示す。

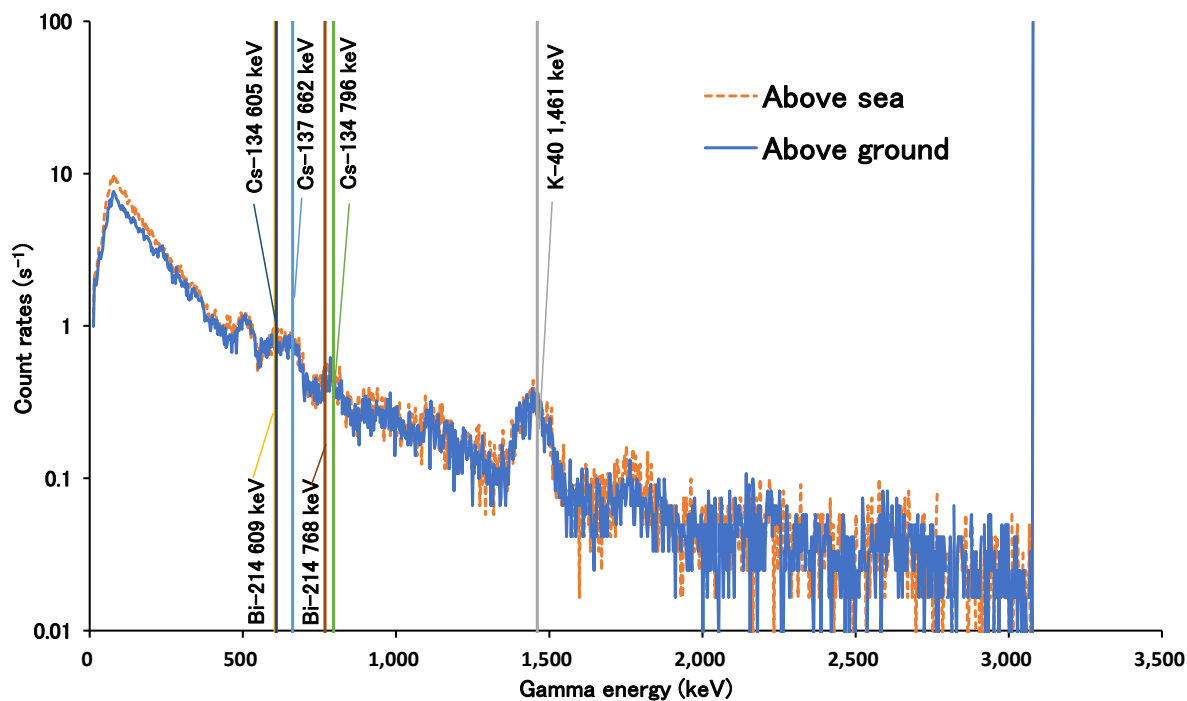


Fig. 3-11 空气中核種フライトで取得した陸上と海上での γ 線スペクトル例¹⁷⁾

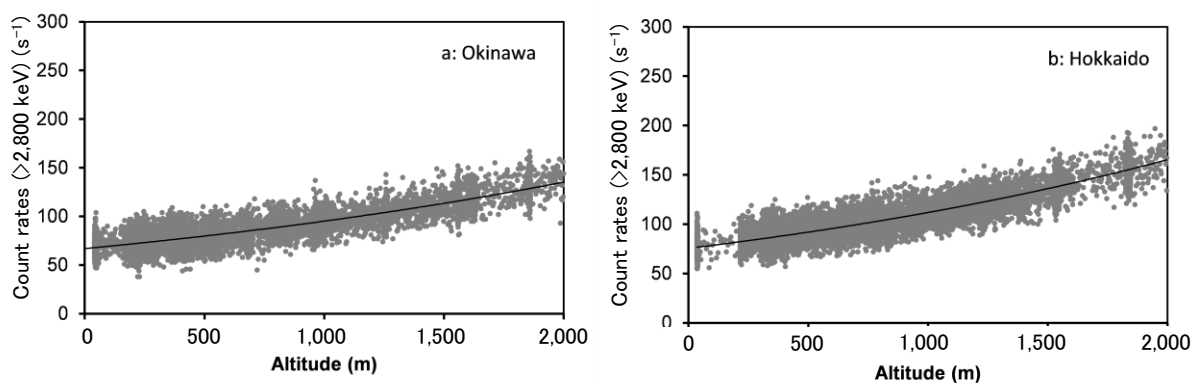


Fig. 3-12 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例⁴⁾

(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。)

3.4.2. 対地高度補正係数 HF の算出方法

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 線計数率の多少を補正するために、テストラインで取得したデータを基に、以下に示す方法で空気減弱係数 AF を求め、計算式 [1] から対地高度補正係数 HF を算出した。なお、 AF は非線形最小二乗法により算出した。

$$HF = \exp[AF (H_{\text{std}} - H_m)] \quad [1]$$

ここで、

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

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

H_{std} : 基準対地高度 (300 m)

H_m : 対地高度 (楕円対地高度 - DEM - ジオイド高)

である。

対地高度の算出には、GPS で記録した楕円対地高度から、10 m メッシュの数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM)³³⁾ 及びジオイド高³³⁾を差し引いて求めた*1。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、Python3 を用い非線形最小二乗法による指数関数回帰を実施し、最適化された曲線の傾きから AF を得た。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。実際に使用した換算パラメータについては、4.2 節に詳述する。

3.4.3. 空間線量率への換算係数 CD の算出方法

航空機モニタリングによる 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換算係数 CD ($[\text{s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$) は、テストポイントにおける地上測定値の平均値とテストポイントの対地高度 300 m を 3 分間ホバリングして得られた計数率の平均値との比から求めた。地上測定値として、3 分間のホバリング中の緯度及び経度の平均値を求め、その地点から半径 500 m 円内における平均値を用いた。テストポイントにおける地

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

上測定値及び算出した CD については 4.2 節に詳述する。

3.4.4. 空間線量率への換算方法

上記のパラメータを用いて計数率を空間線量率に換算する方法について以下に示す。
また、計算式を式 [2] 及び式 [3] に示す。

- ① 測定で得られた γ 線スペクトルから以下のエネルギー領域の計数率を計算する。
 - (1) 全計数率 (C_{all})
 - (2) 2,800 keV を超えるエネルギーの計数率 ($C_{>2,800 \text{ keV}}$)
- ② 式 [2] で用いられる、 C_{net} を算出するために、 $C_{>2,800 \text{ keV}}$ に $CR\text{-}Index$ を乗じて全エネルギー領域に対する宇宙線由来の計数率 (C_{cos}) を推定する。
- ③ 空気中核種フライトで取得したデータを空気中核種由来の計数率 (C_{air}) とする。
- ④ C_{all} から C_{cos} と C_{air} を差し引いた計数率を地表面由来の計数率 C_{net} とし、 CD 及び HF を用いて地表面から 1 m の高さの空間線量率 D を算出する。

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

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_{net} : 地表面由来の計数率(s^{-1}) ($= C_{all} - C_{cos} - C_{air}$ (ただし、 C_{cos}
 $= C_{>2,800 \text{ keV}} CR\text{-}Index$))

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。

式 [1] を式 [2] に代入すると、測定で得られた γ 線スペクトルから地表面 1 m の高さの空間線量率 D に換算する式 [3] が得られる。

$$D = \frac{C_{net} \exp[AF (H_{std} - H_m)]}{CD} \quad [3]$$

定義した各記号の凡例を改めて以下に示す。

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

C_{net} : 正味の計数率(s^{-1}) ($= C_{all} - C_{cos} - C_{air}$ (ただし、 $C_{cos} = C_{>2,800 \text{ keV}} CR\text{-}Index$))

AF : 空気減弱係数 (m^{-1})

H_{std} : 基準対地高度 (300 m)

H_{m} : 対地高度 (m)

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

以下では、 $CR\text{-}Index$ 、 AF や CD といった、全計数率から空間線量率に換算するための換算係数等を総称し「換算パラメータ」と呼ぶ。

3.5. 検出限界値

検出限界 (Limit of Detection) と信頼性について評価を行った。まず、式 [3] に示した航空機モニタリングにおける空間線量率への換算方法の評価式を基に、検出限界値を計算する。式 [3] に示したように、航空機モニタリングにより算出される空間線量率 D は正味の計数率 $C_{\text{net}} (= C_{\text{all}} - C_{\text{cos}} - C_{\text{air}})$ を用いて求められ、その検出限界値は C_{air} と C_{cos} の影響を受ける。 C_{cos} はこれまでの測定結果⁵⁾⁻²³⁾を見ると $200 \text{ s}^{-1} \sim 500 \text{ s}^{-1}$ の範囲となり、 C_{air} は約 400 s^{-1} であることから、ここでは、標準的な検出下限値を求めることを目的とし、 $C_{\text{air}} + C_{\text{cos}} = 900 \text{ s}^{-1}$ として評価を行った。

一般的に、検出限界値を求める際には、バックグラウンド計数率 (N_B) の標準偏差 (σ) を式 [4] に示した Currie の式³⁴⁾に当てはめ、検出限界値 (N_D) を算出する。

$$N_D = 4.653\sigma_{N_B} + 2.706 \quad [4]$$

ここで、 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空間線量率換算係数 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下限値を計算すると、約 $0.01 \mu\text{Sv/h}$ となった。

3.6. 不確かさ

航空機モニタリングの手法において、不確かさの要因としては、式 [1] 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：キャリブレーションのためのデータ取得には、測定条件により 20 %程度の誤差が生じる。本測定の実験を重ねてきた現在では、その不確かさは小さくなってきている。
- 高度補正係数の選択：*CD* と同様に、キャリブレーションのためのデータ取得の状況により係数の選択時の不確かさが生じる。
- 高度情報に係る誤差：航空機モニタリングにおいて海拔高度は GPS で測位しているが、衛星の位置等の測位状況によっては、海拔高度に最大 30 m 程度の誤差が生じる。本誤差の低減は今後の課題である。

3.7. 補間方法

航空機モニタリングにより得られる測定データは、GPS で記録した位置における値であり、これらのデータだけでは連続的な放射線分布を把握することが難しい。測定エリア全域全体の空間線量率の分布を連続的に示すマッピングを行うため、測定データが未知の地点における値を推定するための補間が必要となる。空間線量率や放射性物質沈着量のマッピングについては、国際原子力機関 (IAEA) から標準的な方法が示されている³⁵⁾。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。東電福島原子力発電所周辺の航空機モニタリングでは、2011 年 (平成 23 年) 4 月 6 日～29 日にかけて実施された第 1 次の解析を担当した米国エネルギー省が用いた IDW を踏襲している。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 による補間点における推定値は以下の式 [5] で表される³⁶⁾。

$$\hat{z}_0 = \frac{\sum_{i=1}^s d_{NT}(p_0, p_i)^{-\lambda} z_i}{\sum_{i=1}^s d_{NT}(p_0, p_i)^{-\lambda}} \quad [5]$$

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

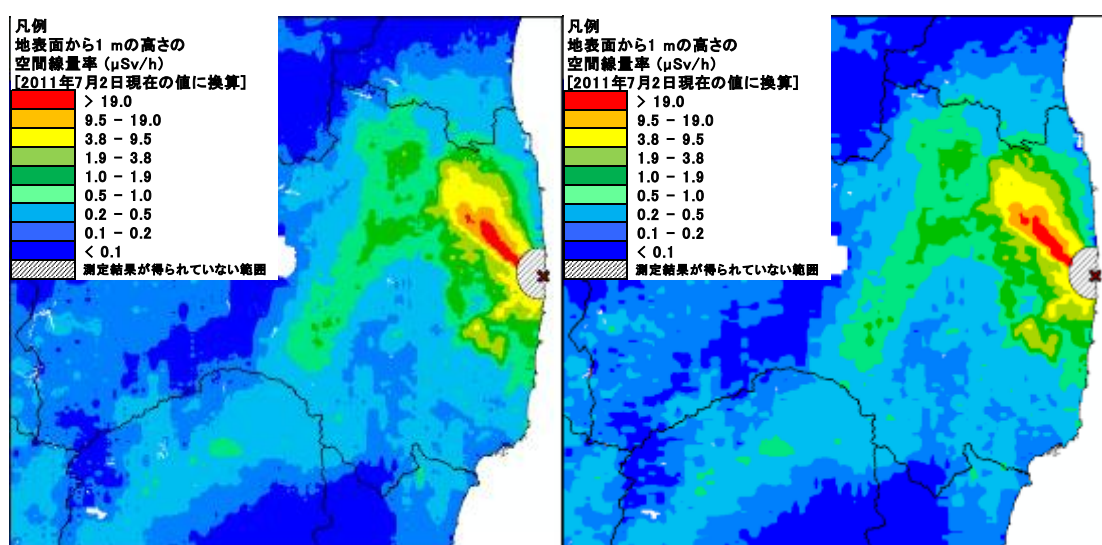
s : 補間地点から近傍のサンプル点数

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 点の最高値より小さくならず、最低値より小さくなることはない。また、IDW には複雑なパラメータ設定が不要である。必要となるのは、補間地点とサンプル点間の距離に応じて影響度を制御すべき乗数 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る。 λ として一般的に 2 がよく用いられるが、必ずしも 2 が最良であるとは限らない。本報告では、今まで積み上げてきた経験から、 λ として 2.3、 s として 400 を採用した。Fig. 3-13 にパラメータ設定の異なる 2 パターンの空間線量率マップを示す。 λ を 2.3、 s を 400 とした Fig. 3-13 a)

と λ を2.0、 s を12とした Fig. 3-13 b) を比べると、両者の分布傾向は概ね一致しているが、a)の方が線量のレンジの境界がなめらかになっていることが分かる。

航空機モニタリングにおいては、前述した通り 300 m 上空からの測定を実施するため、測定される範囲は、ヘリコプター直下の地上半径 300 m 円内における放射線量の平均値となる。空間線量率等のマッピングにおいては、地域基準メッシュ (1 km) 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。



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

b) $\lambda = 2.0, s = 12$

*東電福島原子力発電所周辺の航空機モニタリング結果 (2011 年 5 月～7 月) を使用。

Fig. 3-13 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。)

3.8. 空气中ラドン子孫核種の弁別手法

3.8.1. ラドン子孫核種

地殻中に存在するウランやトリウムの壊変系列には、Fig. 3-14 に示すようにラドンが含まれ、気体であるラドンの一部は大気中に散逸する。Table 3-2 にラドン子孫核種が放出する γ 線エネルギーについて示す。地殻中から大気中に散逸したラドン (Rn-222 : ラドン、 Rn-220 : トロン) は、Po、Pb、Bi などのラドン子孫核種に壊変し、大気中の微粒子に吸着して大気中を浮遊する。航空機モニタリングにおける基準測定高度である対地高度約 300 m 付近における空气中ラドン子孫核種濃度の測定例はほとんど無いものの、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/m^3 程度とされている³⁷⁾。このラドンの濃度レベルは比較的低いものの、航空機モニタリングにおいてはヘリコプターの周辺に存在するような場合、測定される計数率に一定の影響があると考えられる。また、日単位や季節単位で空气中における空气中ラドン子孫核種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³⁸⁾。これまでの航空機モニタリングにおいても、空气中ラドン子孫核種の影響により、航空機モニタリングによる 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した際に過大評価となる例が報告されている⁵⁴⁾。そのため、航空機モニタリングによる空間線量率を適切に算出する観点から、空气中ラドン子孫核種由来の γ 線計数率を除去する必要がある。

これまでの航空機モニタリングにおいては、空气中ラドン子孫核種の影響を除去するため、2015年度(平成27年度)に空間線量率の計算高度化のための検討を実施し⁷⁾、2016年度(平成28年度)には大量のデータに適用できるように既存の航空機モニタリング解析システムに開発した手法を組み込んだ⁸⁾。また、組み込んだ解析プログラムを使用して2016年度(平成28年度)から2023年度(令和5年度)に実施した原子力施設周辺におけるモニタリングデータを解析し、大気中のラドン子孫核種の影響について考察した^{9),11),13),15),17),19),21),23)}。2024年度(令和6年度)も引き続き島根周辺の航空機モニタリングデータに本手法を適用した。以下、空气中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。

ウラン系列 (U-238)

トリウム系列 (Th-232)

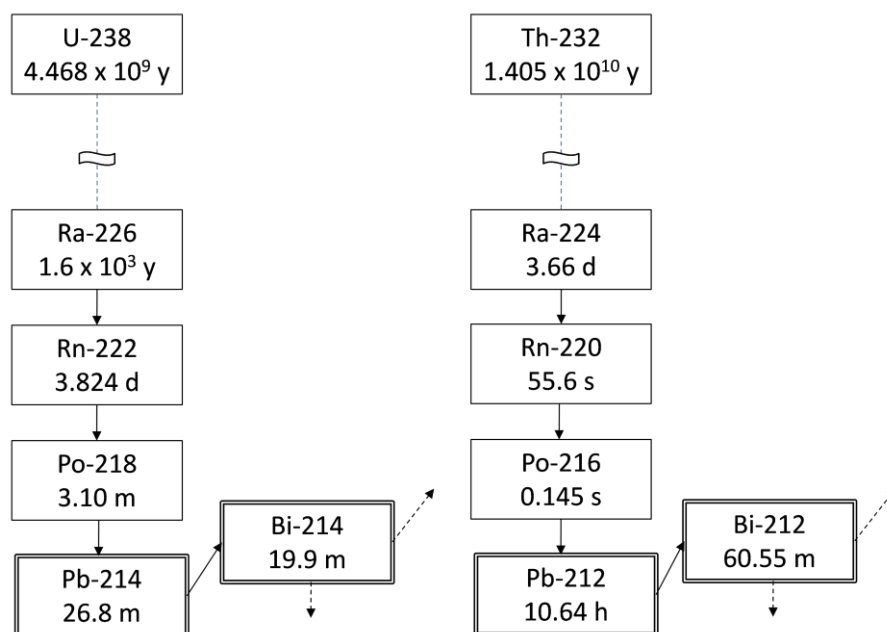


Fig. 3-14 ウラン系列及びトリウム系列
(核種名の下の数値は半減期を表す。)

Table 3-2 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	

3.8.2. ラドン弁別手法の概略

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 線エネルギー領域は広範である。よって、航空機モニタリングで取得される全計数率から、空气中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が示されている³⁵⁾。原子力機構では当該手法を参考にして、空气中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⁷⁾⁻²³⁾。本項では、これまでの研究から得られたラドン弁別手法の概略を示す。

$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器をヘリコプター内に搭載した状況を Fig. 3-15 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由来の 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. 3-16 にヘリコプター機内の検出器と γ 線放出核種の位置関係のイメージを示す。 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 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 線はヘリコプター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 [6] より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 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の計数率 $C_{\text{NaI,g}}$ を求め、空气中ラドン子孫核種由来の計数率を減算した後の地表面由来の計数率とする。これを空間線量率

に換算してマッピングする。

$$C_{\text{NaI,g}} = \frac{GI(C_{\text{NaI,all}} - RI C_{\text{LaBr,all}})}{GI - RI} \quad [6]$$

ここで、

$C_{\text{NaI,all}}$: NaI(Tl)検出器における全計数率 (30 keV～2,800 keV) (s^{-1})

$C_{\text{LaBr,all}}$: LaBr₃(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4.7項に詳述する。

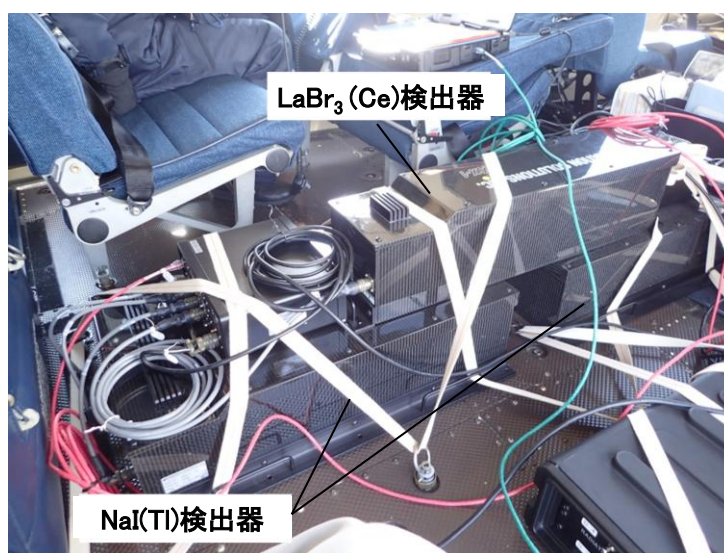


Fig. 3-15 空气中ラドン子孫核種測定用の検出器とヘリコプターへの搭載状況

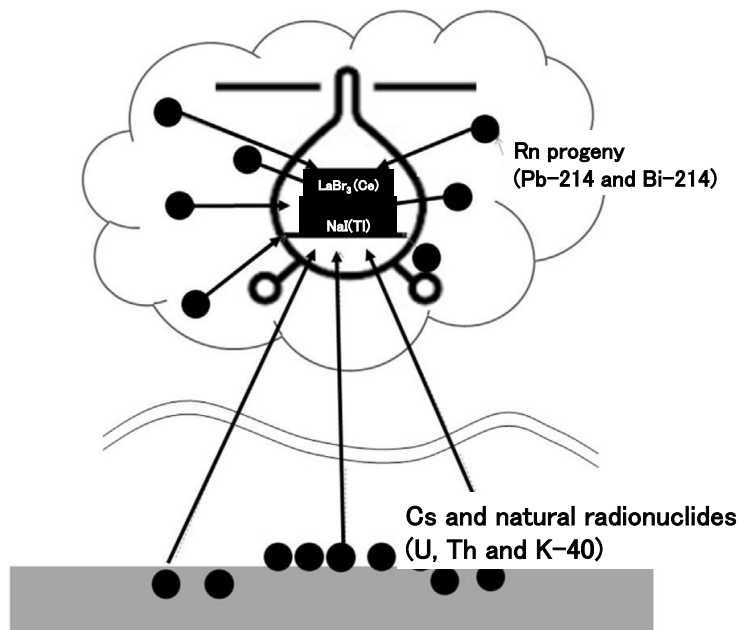


Fig. 3-16 空气中ラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ

3.8.3. GI の高度補正方法

グラウンドインデックス 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た⁷⁾。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 28 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⁹⁾。その結果、式 [7] に示す関係にあることが見出された。本報告において、式 [7] に基づいて、 GI の高度補正を行った。

$$GI_{\text{corr}} = 0.0333 \times (H_m - H_{\text{std}}) + GI \quad [7]$$

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} : 基準対地高度 (300 m)

GI : 高度補正前の GI

である。

3.9. 天然放射性核種の濃度換算手法

一般的に、 γ 線スペクトルを利用して放射性核種を特定し、その放射能を定量化する手法が用いられている。航空機モニタリングにおいても、 γ 線スペクトルが取得できることから、天然放射性核種ごとに放射能の定量化が可能である。Fig. 3-17 に対地高度 300 m で取得できる典型的な γ 線スペクトル例⁷⁾を示す。このように、散乱線の影響の比較的少ない高エネルギー領域において自然放射性核種である K-40 (1,461 keV)、U 系列 (Bi-214: 1,765 keV、2,204 keV) 及び Th 系列 (Tl-208: 2,614 keV) が検出される。1,000 keV 以上の比較的高エネルギーの γ 線は低エネルギー側と比較して検出効率が悪いいため、スペクトルが識別できるまで測定時間をかける必要がある。航空機モニタリングでは、空間線量率の算出にスペクトルの全エネルギーの計数率を利用するため、1 秒ごとに取得したデータを使用しているが、天然放射性核種の濃度換算では計数率の誤差を考慮し、20 秒のデータを積算した γ 線スペクトルを使用して目的のエネルギーにおけるピークの計数率を求めた。

航空機モニタリングの取得データから地上における天然放射性核種濃度を求めるためには、それぞれの核種に対する濃度換算係数と高度補正係数が必要となり、スペクトル解析ではエネルギーピークごとにその数値を決定する必要がある。まず、濃度換算係数 $CC [(s^{-1})/(Bq/kg)]$ を求めるためには、テストポイント内における地上測定値と上空での計数率との比較が必要である。ここでは、Fig. 3-5 で示したテストポイント内の 5 地点において可搬型ゲルマニウム半導体検出器 (以下、可搬型 Ge 検出器) により、地表面から 1 m の高さにおいて 120 分間の測定を行い、K-40、U 系列及び Th 系列の濃度を測定し、その平均値を核種濃度 (Bq/kg) とした。なお、可搬型 Ge 検出器による測定値は測定時期により大きな変動がないと推測されることから島根 (前期) にのみ実施し、ここでの測定値を島根 (後期) の解析にも使用した。テストポイント上における計数率については、島根 (前期) と島根 (後期) それぞれにおいて、基準対地高度である 300 m でホバリングして計数率データ (s^{-1}) を取得し、可搬型 Ge 検出器による核種濃度との比を取って $CC [(s^{-1})/(Bq/kg)]$ を求めた。また、式 [1] に示したように対地高度補正係数の評価に必要な空気減弱係数 (AF) については、EGS5 (Electron Gamma Shower Version 5)³⁹⁾によるシミュレーションの結果⁷⁾を利用した。当該計算には、無限平板を模擬した半径 2,000 m の線源が仮定され、その上空 50 m、100 m、150 m、200 m、300 m、400 m 及び 500 m の計数率が計算された。計算した対地高度と計数率の関係について、上空 50 m で得られた結果を 1 に規格化したものを Fig. 3-18 に示す。このように対地高度と計数率は指数関数の関係となり、Microsoft Excel®の指数近似機能によって得られた傾きをそれぞれの天然放射性核種に対する AF とした。よって、天然放射性核種濃度マップの作成に用いる AF は非線形回帰でなく指数関数の両辺を対数変換して線形回帰して得られたものであることに留意する必要がある。

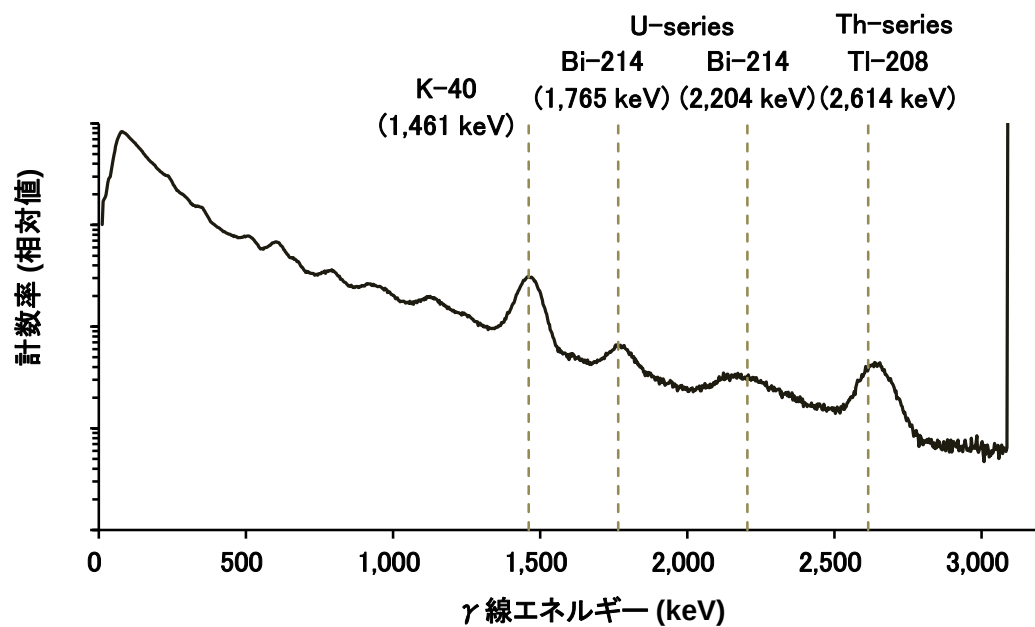


Fig. 3-17 航空機モニタリングで取得できるγ線スペクトル例⁷⁾

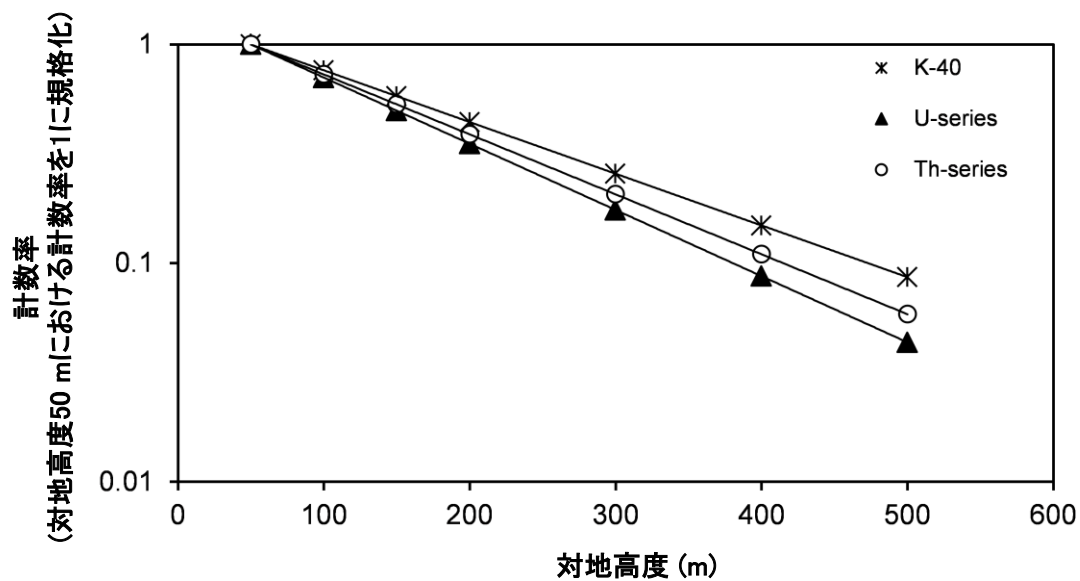


Fig. 3-18 天然放射性核種ごとの対地高度と計数率の関係
(EGS5によるシミュレーション結果⁷⁾)

4. モニタリング結果と考察

4.1. ヘリコプターによるフライト及び地上測定の実績

2.2 節に記した通り、島根 (前期) 及び島根 (後期) の航空機モニタリングでは Bell412 (JA6928) 及び S-76 (JA6901) を使用した。フライトに要した期間は以下の通りである。なお、島根 (後期) の期間中、8 月 25 日から 9 月 3 日の間は、島根県への台風接近のため、モニタリングを中断し、9 月 4 日より再開した。また、ヘリコプターごとにフライトした距離や平均フライト速度、回数等を Table 4-1 にまとめた。測線上をフライトしたときに取得した GPS 測位データを基に、ヘリコプターの飛行平均速度を算出したところ、3.1 節で示した速度の範囲内であった。また、地上測定に要した期間についても以下に示した通り、航空機モニタリングと同時期であった。

[フライト及び地上測定に要した期間]

- 島根 (前期)
 - 航空機モニタリング : 2024 年 (令和 6 年) 6 月 13 日～6 月 17 日 (延べ 8 フライト)
 - 地上測定 : 同年 6 月 14 日～6 月 16 日
- 島根 (後期)
 - 航空機モニタリング : 2024 年 (令和 6 年) 8 月 23 日～9 月 5 日 (延べ 9 フライト)
※台風のため、8 月 25 日から 9 月 3 日はモニタリングを中断した。
 - 地上測定 : 同年 8 月 24 日～8 月 26 日

Table 4-1 ヘリコプターのフライト距離及び速度とフライト回数

モニタリングエリア ヘリコプター機種 (機体番号)	測線フライト距離 (km)	総飛行距離※ (km)	平均速度 (km/h)	測定開始日	測定終了日	延べフライト回数
島根 (前期) Bell412 (JA6928)	915	2,792	148	2024年6月13日	2024年6月17日	8
島根 (後期) S-76 (JA6901)	960	2,720	147	2024年8月23日	2024年9月5日	9

※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。

4.2. 換算パラメータ

3.4.1 項に示した方法により算出した *CR-Index* を Table 4-2 に示す。これらのパラメータを実際の解析に使用し、空气中核種及び宇宙線由来の計数率の減算を行った。

3.4.2 項で示した方法により対地高度補正係数 *HF* を求めた。Fig. 4-1 に対地高度と計数率の関係を例示する。*HF* を求めるために必要な実効的な空気減弱係数 *AF* は、テストラインフライトで取得したデータを基に、非線形最小二乗法による指数関数回帰で求めた (Table 4-3)。また、テストポイントフライトで取得したデータを基に、3.4.3 項で示した方法により 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換算係数 *CD* を求めた (Table 4-4)。*CD* を算出するために用いたテストポイントにおける地上測定値を Fig. 4-2 に示す。なお、本図に示した空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) は NaI(Tl)検出器の指示値である。

以上で求めた *AF* 及び *CD* の内、テストラインフライトデータ及びテストポイントフライト中の γ 線計数率及び対地高度等の一定性を評価し、最も信頼できるパラメータを 1 組選定した。選定したパラメータを Table 4-5 に示す。*AF* については *RV* が最も小さいデータとして島根 (前期) では 6 月 15 日、島根 (後期) では 9 月 4 日に取得した数値を採用した。*CD* については γ 線計数率及び対地高度が最も安定して取得できていたデータとして、島根 (前期) では 6 月 15 日、島根 (後期) では 8 月 23 日に取得した数値を採用した。また本表には参考として、島根で使用した同ヘリコプター機種における、東電福島原子力発電所周辺の航空機モニタリングで使用している換算パラメータを併記した。これら換算パラメータは、2012 年度 (平成 24 年度) から 2014 年度 (平成 26 年度) に東電福島原子力発電所周辺のモニタリングで取得したデータの算術平均値であり、Cs-137 の地表面沈着量が比較的大きな地域で取得したものが多く含まれる。このように、同一のヘリコプター機種を用いたとしても、本報告における *AF* 及び *CD* の値は東電福島原子力発電所周辺の航空機モニタリングで用いている数値と差異が見られた。また、島根 (前期) と島根 (後期) とで同一の場所で *AF* 及び *CD* を取得したが、それぞれに違いが見られた。特に、S-76 (JA6901) の *CD* は、島根 (後期) では $24,400 \text{ (s}^{-1} / [\mu\text{Sv/h}])$ であるのに対し、東電福島原子力発電所では $14,300 \text{ (s}^{-1} / [\mu\text{Sv/h}])$ であり、前者が約 1.7 倍大きい。このことは、式[3]に基づく、島根 (後期) の *CD* を用いたとき、東電福島原子力発電所の *CD* を用いた場合に比べて、地表面から 1 m の高さの空間線量率が約 1.7 倍小さく算出されることを意味する。これらに見られた差異については測定した主要な γ 線エネルギー (K-40 (1,461 keV) または Cs-137 (662 keV)) の違い、ヘリコプター機体底部の γ 線遮へい能力といった要因が複雑に絡み合っており数値が変動するものと推察される。

ここで、島根 (前期及び後期) の航空機モニタリングデータ解析に使用する *CD* の妥当性の確認を行うために、Fig. 3-9 に示した測線において Bell412 (JA6928) で 2024 年 (令和 6 年) 6 月 17 日に、S-76 (JA6901) で同年 8 月 23 日に対地高度 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、同日における空气中核種フライトで取得した計数率及び Table 4-2 に示した *CR-Index* を適用して空气中核種及び宇宙線由来の γ 線計数率を減算した後、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-Index*・*HF* 補正計数率) 比較した (Fig. 4-3)。Fig. 4-3 に示した回帰直線式の傾きがヘリコプター間の *CR-Index*・*HF* 補正計数率の比であると解釈でき、この傾き (1.705) が Table 4-5 に示した *CD* の比と一致することが理想的である。すなわち、S-76 (JA6901) / Bell412 (JA6828) $\simeq 1.906$ が理想値となる。この比が回帰直線の傾きと比べて 20%以上異なる場合、いずれかのヘリコプターの *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。本報告で得られた回帰直線の傾きと理想値との差異は 11%であり、*CD* の補正を施す必要性は無いと判断された。なお、Table 4-4 に示した島根 (前期及び後期) で取得した *CD* の全組み合わせで、オーバーラップフライトで得られた回帰直線の傾きとの差異を算出したところ、以下のようであった。

25% (島根 (前期) の *CD* : $10,800 \text{ (s}^{-1} / [\mu\text{Sv/h}])$ 、島根 (後期) の *CD* : $24,400 \text{ (s}^{-1} / [\mu\text{Sv/h}])$)

20% (島根 (前期) の *CD* : $10,800 \text{ (s}^{-1} / [\mu\text{Sv/h}])$ 、島根 (後期) の *CD* : $15,300 \text{ (s}^{-1} / [\mu\text{Sv/h}])$)

11% (島根 (前期) の *CD* : $12,800 \text{ (s}^{-1} / [\mu\text{Sv/h}])$ 、島根 (後期) の *CD* : $24,400 \text{ (s}^{-1} / [\mu\text{Sv/h}])$)

42% (島根 (前期) の *CD* : $12,800 \text{ (s}^{-1} / [\mu\text{Sv/h}])$ 、島根 (後期) の *CD* : $15,300 \text{ (s}^{-1} / [\mu\text{Sv/h}])$)

以上のことから、Table 4-5 に示した通り、島根 (前期) の *CD* を $12,800 \text{ (s}^{-1} / [\mu\text{Sv/h}])$ とし、島根 (後期) の *CD* を $24,400 \text{ (s}^{-1} / [\mu\text{Sv/h}])$ とすることが最も妥当であると判断される。

Table 4-2 機体とシステムの組み合わせと空气中核種由来の平均的な計数率及び採用した *CR-Index*

測定エリア	RSIシステム	ヘリコプター 機種（機体番号）	運航会社	空气中核種由来の 計数率平均値(s^{-1})	<i>CR-Index</i>
島根（前期）	RSI 3	Bell412（JA6928）	朝日航洋 株式会社	500	3.64
島根（後期）	RSI 3	S-76（JA6901）	朝日航洋 株式会社	375	3.56

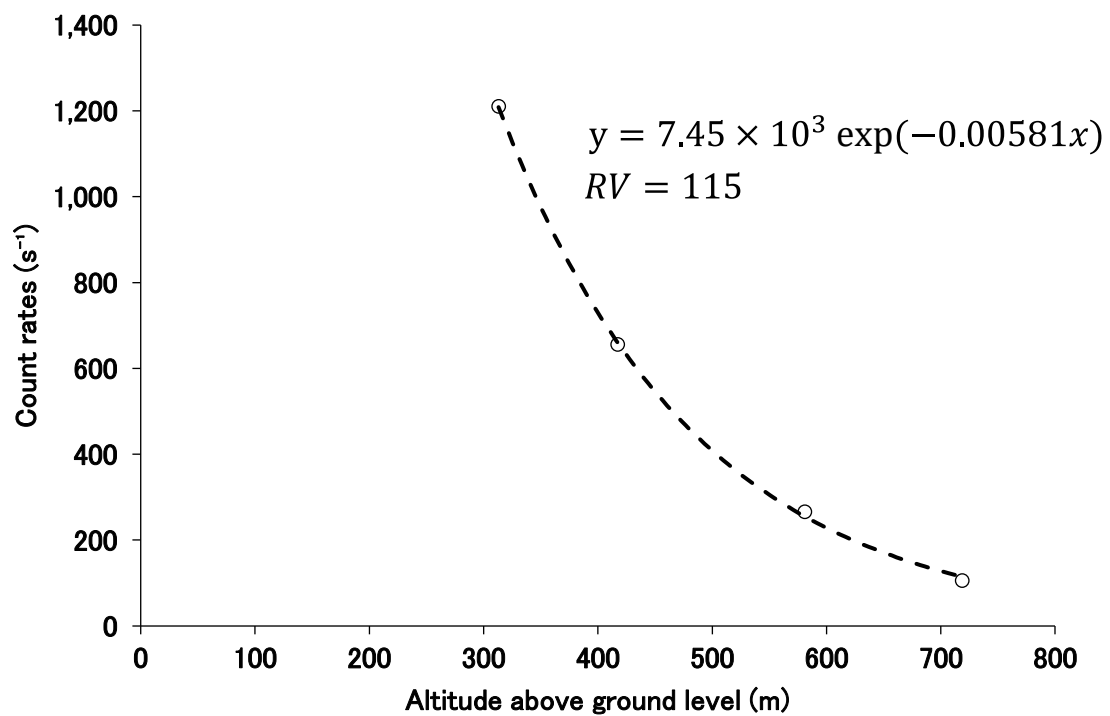


Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例 ¹⁹⁾

(Bell412 (JA9616)、2022 年 11 月 11 日、TestLine (愛媛県東温市) にて実施。本図中の *RV* は指数回帰における残差分散を表す。)

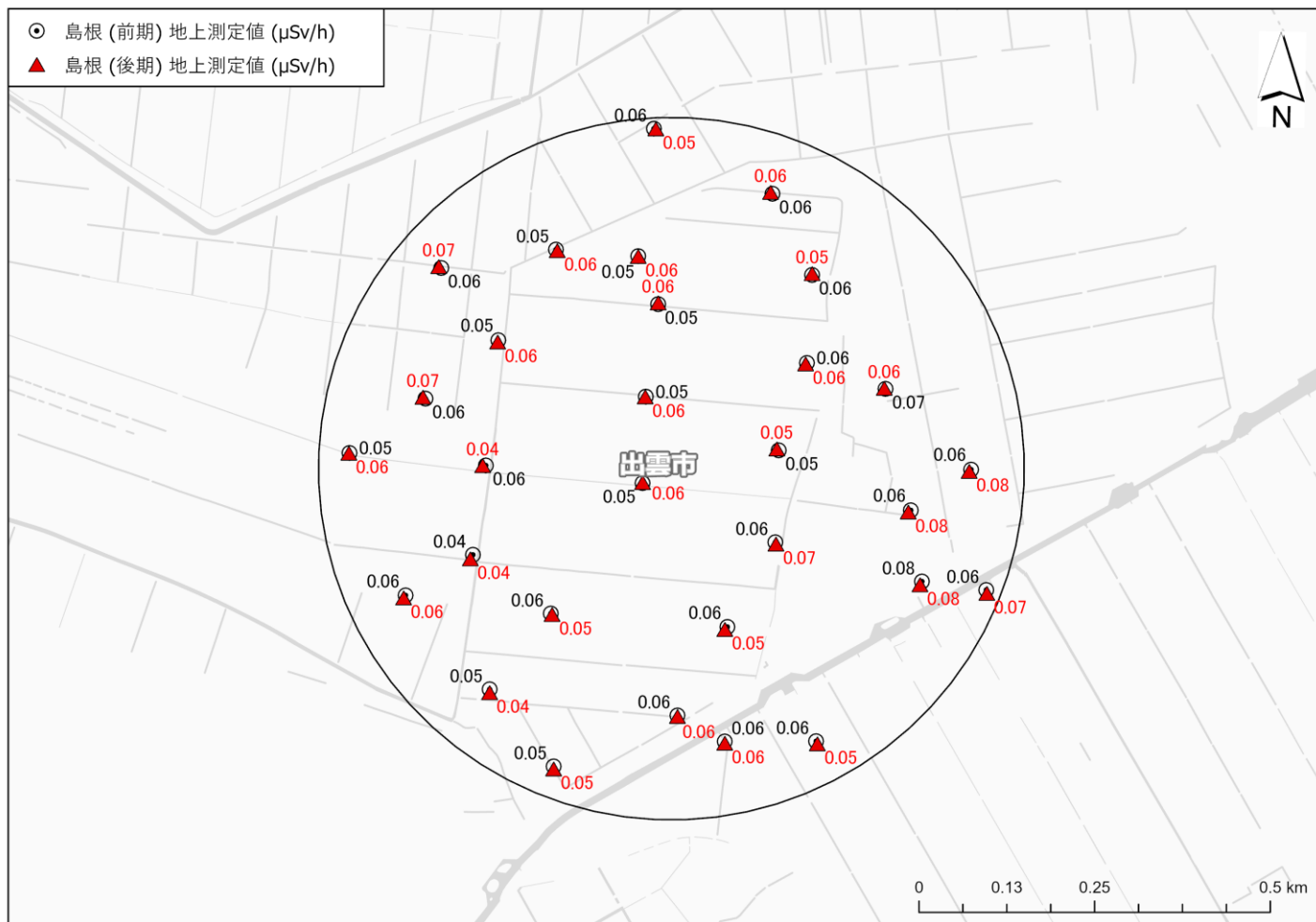


Fig. 4-2 島根(前期及び後期) のテストポイントにおける地上測定値

Table 4-3 島根 (前期及び後期) で取得した空気減弱係数 AF データの一覧

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	AF	
					$\mu(m^{-1})$	RV
島根（前期）	Bell412（JA6928） （AAC）	RSI 3	2024/06/13	出雲	-0.00605	721
			2024/06/15		-0.00444	26
島根（後期）	S-76（JA6901） （AAC）		2024/08/23		-0.00617	142
			2024/09/04		-0.00694	1

※AAC: 朝日航洋株式会社

※RV: 指数関数回帰における残差分散

Table 4-4 島根 (前期及び後期) で取得した空間線量率換算係数 CD データの一覧

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)	
島根（前期）	Bell412（JA6928） （AAC）	RSI 3	2024/06/13	出雲	0.06	0.02	27	1,237	165	1,212	109	10,800
			2024/06/15		0.06	0.01	25	1,522	128	1,089	93	12,800
島根（後期）	S-76（JA6901） （AAC）		2024/08/23		0.06	0.02	32	1439	222	1221	176	24,400
			2024/09/04		0.06	0.02	37	1336	202	1216	199	15,300

※AAC: 朝日航洋株式会社

Table 4-5 解析に用いた換算パラメータのまとめ

モニタリングエリア	ヘリコプター機種 (機体番号)	換算パラメータ	
		$AF (m^{-1})$	$CD (s^{-1}/[\mu Sv/h])$
島根 (前期)	Bell412 (JA6928)	-0.00444	12,800
東電福島 原子力発電所	Bell412 (JA6928)	-0.00720	11,000
島根 (後期)	S-76 (JA6901)	-0.00694	24,400
東電福島 原子力発電所	S-76 (JA6901)	-0.00720	14,300

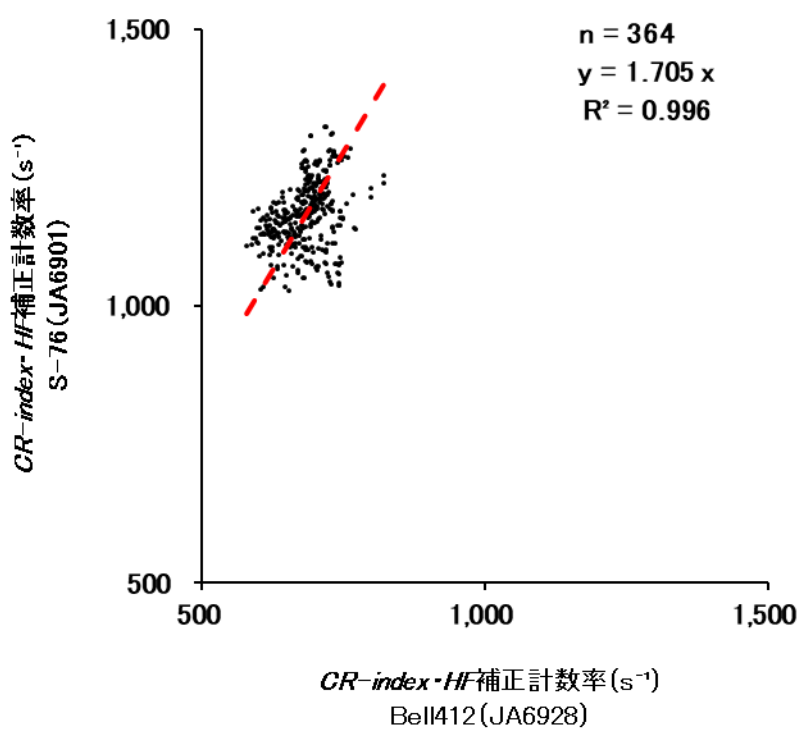


Fig. 4-3 オーバーラップフライトによるヘリコプター間の $CR\text{-}Index \cdot HF$ 補正計数率の比較

4.3. 空間線量率マップ

航空機モニタリングの測定結果を基に、地表面から 1 m の高さのバックグラウンド空間線量率の分布状況を示した「空間線量率マップ」を作成した。島根から半径 3 km 圏内は航空機モニタリングの対象範囲外であるためマッピングしない。また、測定データが取得できなかった一部の諸島や半島部はマッピングの対象外とした。空間線量率マップの色合いについては、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で適用している設定²²⁾に準じた。次に、今年度及び過去の航空機モニタリングによる空間線量率マップと Fig. 4-4 に示す日本地質学会のホームページ⁴⁰⁾に掲載されている、地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果を比較した。このとき、空間線量率の分布傾向を分かりやすく視覚化し、かつ日本地質学会による自然放射線量マップとの比較を容易にするために、航空機モニタリングによる空間線量率の色分け (コンターインターバル) を 0.02 $\mu\text{Sv/h}$ と詳細化し、0.06 $\mu\text{Sv/h}$ 未満～0.16 $\mu\text{Sv/h}$ を超える範囲までの 7 段階に設定した。

なお、日本地質学会のホームページに掲載されている自然放射線量マップは日本各地で採取された河川堆積物試料中の U、Th 及び K の濃度をもとに計算によって求める方法⁴¹⁾で作成されている。この計算手法では、「ベータ線とガンマ線の場合には全身に均等に吸収されたとき 1 Gy = 1 Sv と換算できる」⁴⁰⁾という仮定を採用し、空気吸収線量率 ($\mu\text{Gy/h}$) から実効線量 ($\mu\text{Sv/h}$) に単位変換を行っていることから、当該マップは実効線量として意味づけがなされていると考えられる。3.3 節に記述した通り、航空機モニタリング値は周辺線量当量率 (1 cm 線量当量率) であり、日本地質学会の自然放射線量マップとは必ずしも 1 対 1 で比較できるものではないことに注意を要する。また、日本地質学会の自然放射線量マップ作成に際して計算に使用された試料の採取密度が概ね 10 km $\times$ 10 km に 1 試料であり、それらの試料の各元素濃度の測定結果には 0.5～2.0 倍程度の誤差が伴っていること、核種濃度の測定結果が得られなかった地点については内挿補間で色付けされていることから、自然放射線量の計算値にはある程度の不確かさがあり、その分解能は 10 km 程度である。結果の比較には以上の点を念頭に置く必要がある。

島根バックグラウンドモニタリングの結果得られた空間線量率マップを Fig. 4-5 に示す。航空機モニタリング値の最大値は広島県庄原市の南部で約 0.27 $\mu\text{Sv/h}$ であった。空間線量率の色分けを詳細化し 2018 年度 (平成 30 年度) 測定及び日本地質学会の自然放射線量マップと比較したものを Fig. 4-6 に示す。Fig. 4-6 (中央) から、測定エリア中央部においては 2024 年度 (令和 6 年度) の空間線量率は 0.10 $\mu\text{Sv/h}$ ～0.14 $\mu\text{Sv/h}$ 程度であり、日本地質学会の自然放射線量マップ (Fig. 4-6 (右)) の 0.10 $\mu\text{Gy/h}$ と同程度であった。北西部においては、Fig. 4-6 (左及び中央) から、2018 年度 (平成 30 年度) 及び 2024 年度 (令和 6 年度) の航空機モニタリング値は 0.06 $\mu\text{Sv/h}$ 程度であったのに対し、

日本地質学会の自然放射線量マップでは $0.127 \mu\text{Sv/h}$ を超える領域があり、2 倍程度の差異が認められた。北東部については 2024 年度 (令和 6 年度) の航空機モニタリング値は大部分で $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 程度であり、 $0.10 \mu\text{Sv/h}$ を超えるエリアは局所的であった。これに対して、2018 年度 (平成 30 年度) の航空機モニタリング値は同領域の大部分で $0.10 \mu\text{Sv/h}$ を超えており、日本地質学会のマップでも概ね $0.10 \mu\text{Gy/h}$ 程度であるという点で、2024 年度 (令和 6 年度) の航空機モニタリング値と差異があった。なお、日本地質学会のマップでは島根県の隠岐島に色付けされていないが、これは河川堆積物試料が同エリアで採取されておらず、自然放射線量のマッピングができなかったためと推察される。

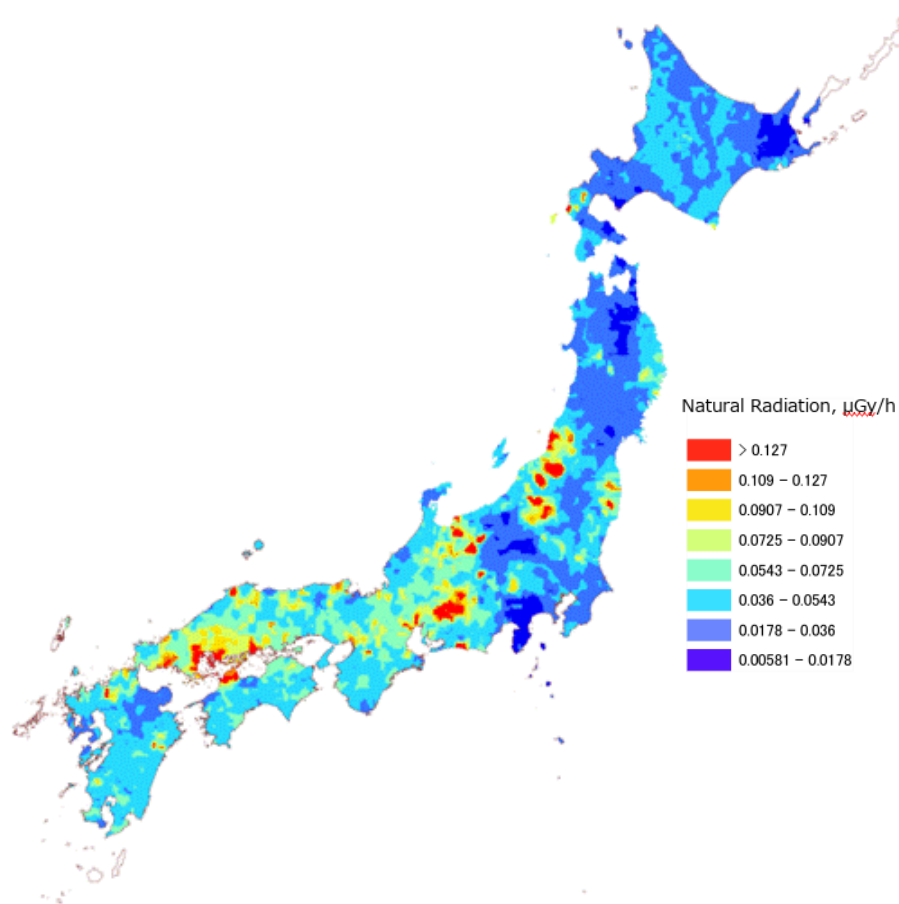


Fig. 4-4 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果
(日本地質学会ホームページ⁴⁰⁾より)

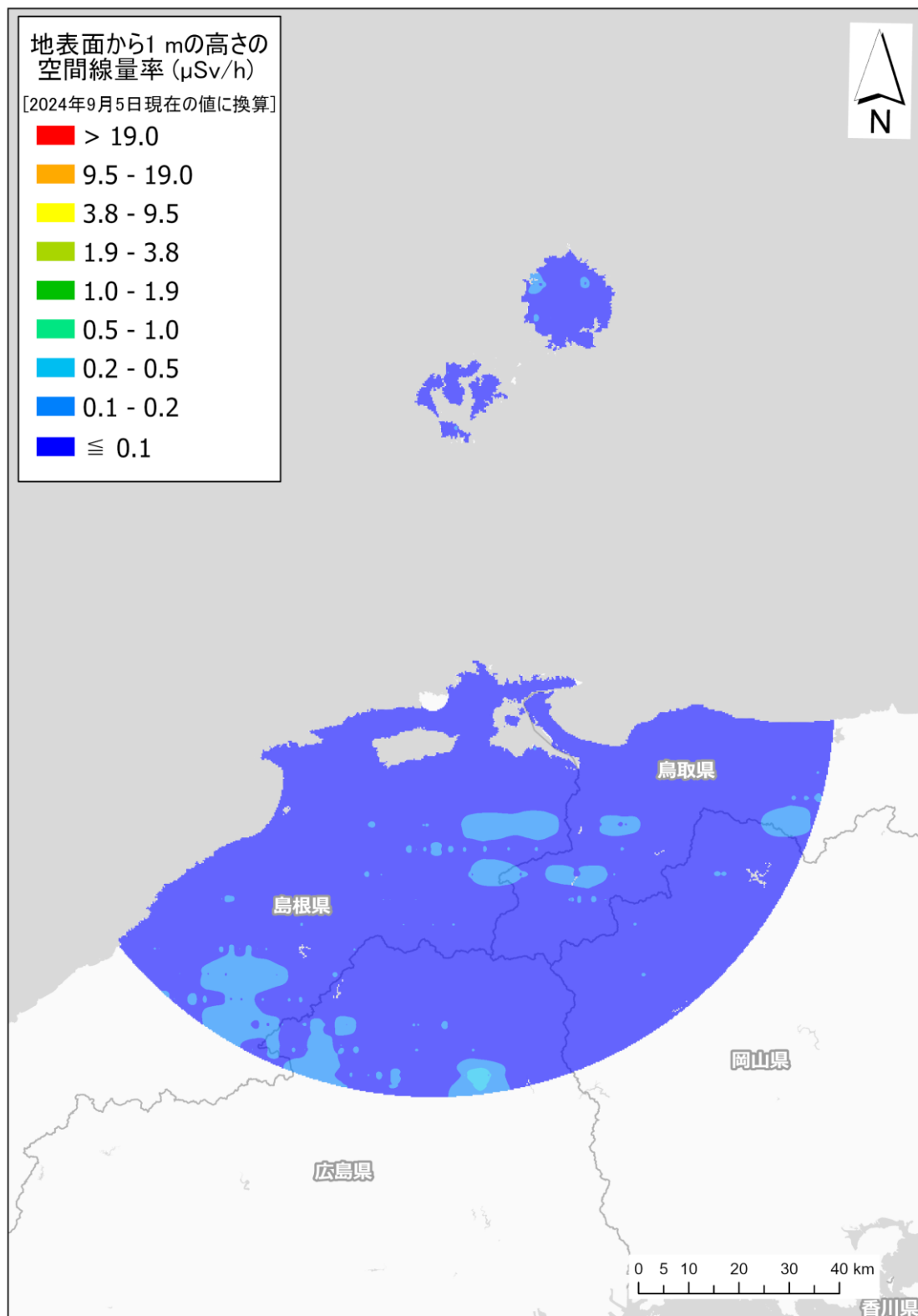


Fig. 4-5 島根における空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

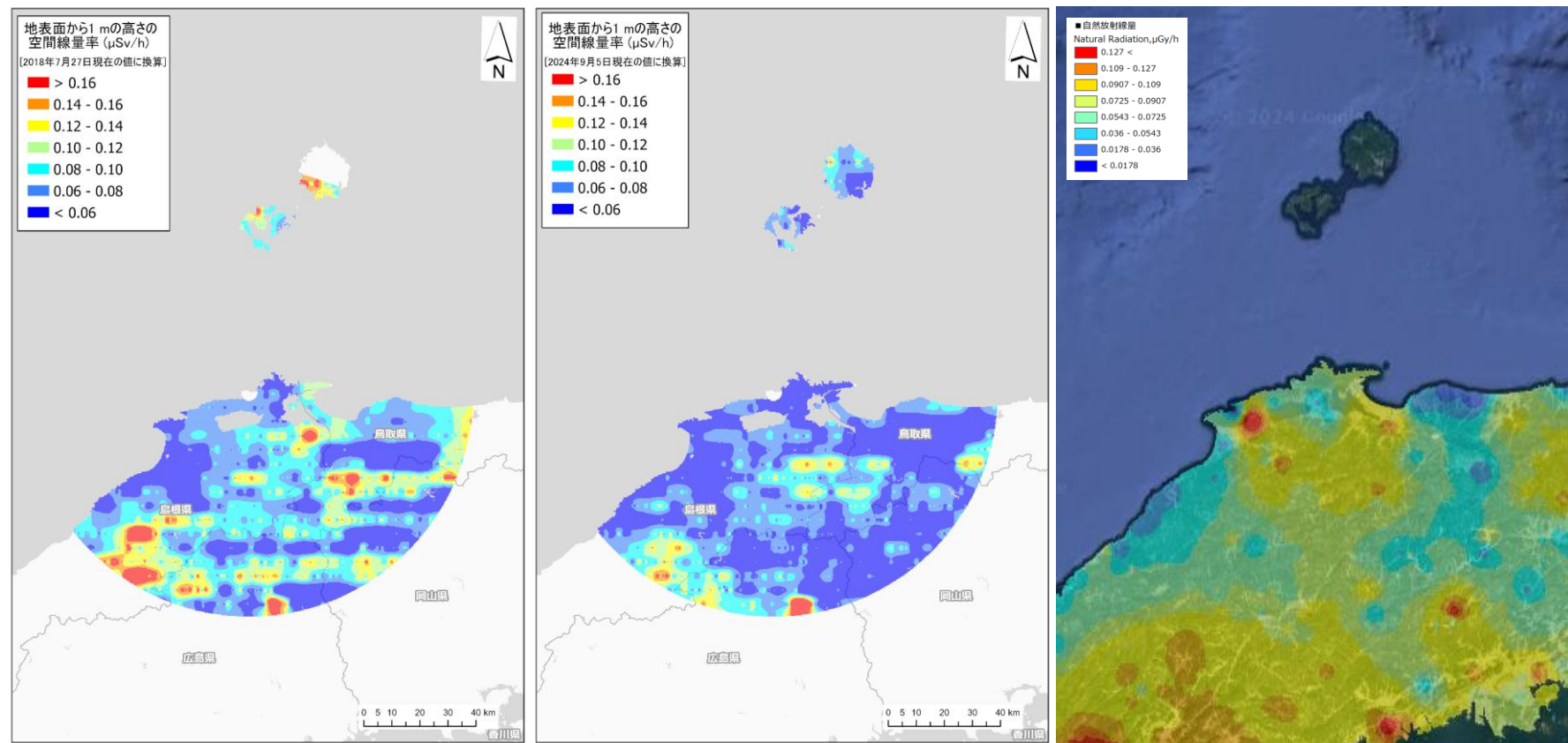


Fig. 4-6 島根における空間線量率マップの比較

(左：2018年度¹³⁾、中央：2025年度、右：日本地質学会による自然放射線量マップ(文献⁴⁰⁾のデータを基に作図した))

(左及び中央：背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用、右：背景地図は、©2022 TerraMetrics を使用)

4.4. 空間線量率マップと地質情報の比較考察

本報告では、2024 年度 (令和 6 年度) の航空機モニタリング値が $0.10 \mu\text{Sv/h}$ を超えるエリアが一定以上広がっていた地域及び 2018 年度 (平成 30 年度) の航空機モニタリング値と相違が見られた地域を対象として、日本シームレス地質図⁴²⁾を基に、空間線量率に影響を与えた要因について考察を行った。本報告において考察対象としたのは、島根県については北側から、隠岐郡隠岐の島町(Sm_01)、隠岐郡西ノ島町 (Sm_02)、松江市の北東端 (Sm_03)、安来市月坂町の付近 (Sm_04)、飯石郡飯南町の北西部 (Sm_05)、雲南市の南東部 (Sm_06) 及び邑智郡美郷町と邑智郡邑南町の境界付近 (Sm_07) の 7 ヶ所である。鳥取県については北側から、境港市 (Tt_01)、米子市中央部及び西伯郡日吉津村 (Tt_02)、西伯郡日大山町と東伯郡日琴浦町 (Tt_03)、倉吉市、東伯郡日湯梨浜町及び東伯郡三朝町の境界付近 (Tt_04)、西伯郡南部町、西伯郡伯耆町及び日野郡日野町の境界付近 (Tt_05)、日野郡江府町の南東部 (Tt_06)、日野郡日南町の南西端部 (Tt_07) 及び日野郡日南町の南東端部 (Tt_08) の 8 ヶ所である。広島県については北側から、庄原市の中央部 (Hr_01)、三次市の北西部 (Hr_02) 及び庄原市の南端 (Hr_03) の 3 ヶ所である。岡山県については北側から、真庭市の北東端部 (Ok_01)、真庭市の北東端部 (Ok_02) 及び新見市の中央部(Ok_03)の 3 ヶ所である。以上の計 21 ヶ所を Fig. 4-7 に示す。なお、島根周辺の航空機モニタリングエリアにおいて、日本シームレス地質図の基盤情報である、詳細な地質調査レポートが現時点で非公開のものがある。このようなエリアについては「20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2」⁴²⁾から得られた地質情報を基に考察を行った。

島根県について

Sm_01：隠岐郡隠岐の島町について⁴³⁾

本地域の空間線量率は西部及び北東部で比較的高く、 $0.08 \mu\text{Sv/h}$ を超える場所が広範囲にわたった。また、局所的に $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を超える場所も認められた。西部についてはアルカリ質火山岩類を主とする地層 (通称：重栖層) が広く分布している。この重栖層の流紋岩溶岩及び貫入岩の分布範囲の近傍で $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を超えた。北東部については葛尾山を中心として火山岩類が主体の地層 (通称：葛尾山層) が分布している。この葛尾山層の流紋岩火砕岩の近傍で $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を超えた。いずれについても、流紋岩が空間線量率の上昇に寄与したと推察される。なお、葛尾山層には細粒黒雲母花崗岩及び文象花崗岩 (通称：島後南谷花崗岩) の断続的な分布が認められるが、有人ヘリはこれらの上空を飛行しなかった。そのため、島後南谷花崗岩に起因する空間線量率は反映できていないと推察される。今年度と 2018 年度 (平成 30 年度) の空間線量率マップとでは、南部における空間線量率が異なっており、前者は大部分で $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 前後であるのに対し、後者では大部分で $0.10 \mu\text{Sv/h}$ を超えている。この地域一帯は前出の

重栖層に含まれる流紋岩が大部分を占めている。しかしながら、今年度は測線の変更に伴い、この流紋岩の近傍を飛行することがなかったため、その影響が空間線量率マップに反映されなかったと推察される。

Sm_02：隠岐郡西ノ島町について⁴⁴⁾

本地域の空間線量率は西部及び北東部で比較的高く、 $0.08\ \mu\text{Sv/h}$ を超える場所が広範囲にわたった。また、局所的に $0.16\ \mu\text{Sv/h}$ を超える場所も認められた。西部については前出の重栖層が広く分布している。重栖層の流紋岩溶岩及び貫入岩の分布範囲の近傍で $0.16\ \mu\text{Sv/h}$ を超えた。北東部については葛尾山を中心として火山岩類が主体の地層（通称：葛尾山層）が分布している。この葛尾山層の流紋岩火砕岩の近傍で $0.16\ \mu\text{Sv/h}$ を超えた。いずれについても、流紋岩が空間線量率の上昇に寄与したと推察される。なお、葛尾山層には細粒黒雲母花崗岩及び文象花崗岩（通称：島後南谷花崗岩）の断続的な分布が認められるが、有人ヘリはこれらの上空を飛行しなかった。そのため、島後南谷花崗岩に起因する空間線量率は反映できていないと推察される。今年度と2018年度（平成30年度）の空間線量率マップとでは、南部における空間線量率が異なっており、前者は大部分で $0.06\ \mu\text{Sv/h}$ 前後であるのに対し、後者では大部分で $0.10\ \mu\text{Sv/h}$ を超えている。この地域一帯は前出の重栖層に含まれる流紋岩が大部分を占めている。今年度、この地域の近傍は S-76 (JA6901) で飛行しており、当機体の CD が大きく評価されたのに伴い、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Sm_03：松江市の北東端について^{45),46)}

美保関町諸喰、福浦及び美保関の近辺において、今年度では $0.06\ \mu\text{Sv/h}$ 未満であったのに対し、2018年度（平成30年度）では $0.10\ \mu\text{Sv/h}$ を超えていた。本地域は砂岩、礫岩、安山岩-デイサイト火砕岩から成る地層（通称：古浦層）が主体である。古浦層には、空間線量率の上昇に寄与する岩石体として、デイサイトに加え、中粒黒雲母花崗岩が少量ながら含まれることが見出されている。この地域も S-76 (JA6901) で飛行しており、CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Sm_04：安来市月坂町の付近について^{47),48)}

本地域の大部分は砂、礫及び泥から成る扇状地であるが、細粒黒雲母花崗岩等から成る花崗岩体（通称：下久野花崗岩）の一部が分布している。2018年度（平成30年度）の空間線量率マップでは、下久野花崗岩の分布範囲と $0.16\ \mu\text{Sv/h}$ を超える領域が概ね重なった。一方で、今年度の空間線量率マップでは $0.08\ \mu\text{Sv/h}$ を超える領域が、下久野花崗岩近辺のごく狭小にしか認められなかった。この地域も S-76 (JA6901) で飛行しており、CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Sm_05：飯石郡飯南町の北西部について⁴⁹⁾

本地域一帯に、細-中粒黒雲母花崗岩等から成る花崗岩体（通称：石見花崗岩）が分布していることから、ある程度空間線量率が高くなることが推察される。2018 年度（平成 30 年度）の空間線量率マップでは、0.10 $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域が大部分を占めており、0.16 $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域も見られた。一方で、今年度の空間線量率マップでは 0.06 $\mu\text{Sv/h}$ 前後がほとんどであり、0.10 $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域がごく狭小にしか認められなかった。この地域も S-76 (JA6901) で飛行しており、CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Sm_06：雲南市の南東部について^{49),50)}

本地域一帯に、前出の下久野花崗岩、細粒黒雲母花崗岩等から成る花崗岩体（通称：梅木花崗岩）や中-粗粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩から成る岩体（通称：赤名花崗閃緑岩）が分布しており、空間線量率がある程度高くなることが推察される。2018 年度（平成 30 年度）の空間線量率マップでは、0.10 $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域が大部分を占めていたのに対し、今年度の空間線量率マップでは 0.06 $\mu\text{Sv/h}$ 前後の領域がほとんどであった。この地域も S-76 (JA6901) で飛行しており、CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Sm_07：邑智郡美郷町と邑智郡邑南町の境界付近について⁵¹⁾

本地域一帯に、中-細粒黒雲母花崗岩等から成る花崗岩体（通称：乙原花崗岩）が分布しており、空間線量率がある程度高くなることが推察される。2018 年度（平成 30 年度）及び今年度の空間線量率マップで、0.16 $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域が認められた。前者のマップでは 0.16 $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域が、乙原花崗岩の分布地帯をはみ出して広がっているのに対し、後者では乙原花崗岩の分布地帯内に収まった。既往の地質情報との対比の観点からは、本地域においては、今年度の空間線量率マップの方が整合性は良いと思われる。

鳥取県について

Tt_01：境港市について^{45),46)}

本地域は砂洲堆積物等から成る沖積層、埋立地や干拓地及び人工改変地が主体である。これらの中に空間線量率の上昇に寄与する岩体の存在は一見認められないが、砂洲堆積物は主に花崗岩質の砂からなることが見出されている。従って、本地域ではある程度空間線量率が高くなる可能性がある。2018 年度（平成 30 年度）の空間線量率マップでは、0.10 $\mu\text{Sv/h}$ 前後の領域がほとんどであった。一方で、今年度の空間線量率マップでは 0.06 $\mu\text{Sv/h}$ 未満の領域がほとんどであった。この地域も S-76 (JA6901) で飛行しており、CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Tt_02：米子市中央部及び西伯郡日吉津村について⁴⁸⁾

本地域は礫、砂及び粘土から成る沖積層が主体である。これらは主に花崗岩質の砂からなることが見出されており、本地域ではある程度空間線量率が高くなる可能性がある。2018年度(平成30年度)の空間線量率マップでは、 $0.10\ \mu\text{Sv/h}$ 前後の領域がほとんどであった。一方で、今年度の空間線量率マップでは $0.06\ \mu\text{Sv/h}$ 前後の領域がほとんどであった。この地域も S-76 (JA6901) で飛行しており、CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Tt_03：西伯郡日大山町と東伯郡日琴浦町について⁵²⁾

本地域は大型の複成火山の大山火山がある山岳地帯である。2018年度(平成30年度)の空間線量率マップでは、勝田ヶ山の付近で $0.12\ \mu\text{Sv/h}$ 前後の領域が認められた。一方で、今年度の空間線量率マップでは $0.06\ \mu\text{Sv/h}$ 未満の領域がほとんどであった。勝田ヶ山は両輝石安山岩が主体であり、当岩体試料の化学成分の分析結果によるとカリウム濃度は2%未満と低い。既往の地質情報に基づくと、本地域において空間線量率の上昇に寄与する岩石類の存在は認められない。2018年度(平成30年度) 当時に、本地域の空間線量率がやや大きく評価された理由は判然としないが、地質的な要因というより、地形的な要因が関与したと推察される。

Tt_04：倉吉市、東伯郡日湯梨浜町及び東伯郡三朝町の境界付近について⁵³⁾

本地域には主に中-粗粒の黒雲母花崗岩からなる花崗岩体(通称：小鴨花崗岩)が広範囲に分布している。従って、本地域では空間線量率が高くなる可能性がある。2018年度(平成30年度)の空間線量率マップでは、 $0.10\ \mu\text{Sv/h}$ を超える領域が広範囲に認められ、 $0.16\ \mu\text{Sv/h}$ を超える領域も局所的に認められた。一方、今年度に S-76 (JA6901) で小鴨花崗岩の上空を飛行した領域の周辺では $0.06\ \mu\text{Sv/h}$ 前後であった。対して、Bell412 (JA6928) で飛行した同領域では $0.10\ \mu\text{Sv/h}$ 前後であった。以上のことから、この地域についても S-76 (JA6901) に設定された CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Tt_05：西伯郡南部町、西伯郡伯耆町及び日野郡日野町の境界付近について⁵⁴⁾

本地域には主に粗粒黒雲母花崗岩等の花崗岩体が広範囲に分布している。従って、本地域では空間線量率が高くなる可能性が十分にある。2018年度(平成30年度)の空間線量率マップでは、 $0.16\ \mu\text{Sv/h}$ を超える領域が広範囲に認められた。一方、今年度に S-76 (JA6901) で小鴨花崗岩の上空を飛行した領域の周辺では $0.07\ \mu\text{Sv/h}$ 前後であった。対して、Bell412 (JA6928) で飛行した同領域では $0.10\ \mu\text{Sv/h}$ 前後であった。以

上のことから、この地域についても S-76 (JA6901) に設定された CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Tt_06：日野郡江府町の南東部について ⁵⁵⁾

本地域には大山火山噴出物とされる火山岩塊や凝灰角礫岩が広く分布しているが、粗-中粒黒雲母花崗岩体の分布も認められる。2018 年度 (平成 30 年度) の空間線量率マップでは、この花崗岩体の周辺で 0.16 $\mu\text{Sv/h}$ を超えた。一方、今年度に S-76 (JA6901) で同花崗岩体の上空を飛行した領域の周辺では 0.10 $\mu\text{Sv/h}$ 未満であった。以上のことから、S-76 (JA6928) に設定された CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Tt_07：日野郡日南町の南西端部について ⁵⁶⁾

本地域には流紋岩ないしデイサイト質火山岩類が広く分布しており、これに斑状粗粒角閃石・黒雲母花崗閃緑岩 (通称：多里-三国山花崗閃緑岩) の侵入が広範囲に認められている。2018 年度 (平成 30 年度) の空間線量率マップでは、この多里-三国山花崗閃緑岩の分布範囲で 0.12 $\mu\text{Sv/h}$ 前後であった。一方、今年度に S-76 (JA6901) で飛行した同範囲の空間線量率は 0.06 $\mu\text{Sv/h}$ 未満であった。多里-三国山花崗閃緑岩試料の化学成分を分析した結果によると、カリウム濃度は約 4% と一般的な花崗岩と同等レベルであり、本地域の空間線量率がある程度高くなる地質的な要因が認められる。この地域についても S-76 (JA6901) に設定された CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Tt_08：日野郡日南町の南東端部について ⁵⁷⁾

本地域には幅数 km に及ぶ巨大な花崗閃緑岩体が確認されている。2018 年度 (平成 30 年度) の空間線量率マップでは、本岩体の分布範囲で 0.10 $\mu\text{Sv/h}$ ～ 0.15 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の領域が広範囲に認められた。一方、今年度の空間線量率は、Bell412 (JA6928) で飛行したが、大部分で 0.08 $\mu\text{Sv/h}$ 未満であった。本地域の花崗閃緑岩体試料の化学成分を分析した結果によると、カリウム濃度は約 3% と一般的な花崗岩と同等レベルであり、本地域の空間線量率がある程度高くなる地質的な要因が認められる。以上のことから、明確な原因は判然としないが、今年度の空間線量率はやや過少に評価されたと推察される。

広島県について

Hr_01：庄原市の中央部について⁴²⁾

日本シームレス地質図によると、本地域はデイサイトや流紋岩が広く分布しており、塊状花崗岩体の分布も随所に認められる。2018 年度（平成 30 年度）の空間線量率マップでは、デイサイトや流紋岩の分布範囲で 0.10 $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域が認められ、特に塊状花崗岩体の近傍では 0.16 $\mu\text{Sv/h}$ を超えた。一方、今年度の空間線量率は、Bell412 (JA6928) で飛行したが、大部分で 0.08 $\mu\text{Sv/h}$ 未満、塊状花崗岩体の近傍では 0.10 $\mu\text{Sv/h}$ 前後であった。

Hr_02：三次市の北西部について⁴²⁾

日本シームレス地質図によると、本地域は庄原市の中央部と同様に、デイサイトや流紋岩が広く分布しており、塊状花崗岩体の分布も随所に認められる。2018 年度（平成 30 年度）の空間線量率マップでは、デイサイトや流紋岩の分布範囲で 0.12 $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域が認められ、特に塊状花崗岩体の近傍では 0.16 $\mu\text{Sv/h}$ を超えた。今年度の空間線量率については、Bell412 (JA6928) で飛行した領域では 2018 年度（平成 30 年度）と概ね同様の分布傾向が見られた。一方、S-76 (JA6901) で飛行した領域については、塊状花崗岩体の近傍でも 0.12 $\mu\text{Sv/h}$ 前後であった。以上のことから、この地域についても S-76 (JA6901) に設定された CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Hr_03：庄原市の南端について⁴²⁾

日本シームレス地質図によると、本地域は砂岩泥岩互層、安山岩及び花崗岩といった地層が複雑に入り組んで分布している。2018 年度（平成 30 年度）の空間線量率マップでは、花崗岩の分布範囲と重なるように 0.16 $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域が広がり、本領域の空間線量率は最大で約 0.23 $\mu\text{Sv/h}$ であった。今年度の空間線量率についても、花崗岩の分布範囲と重なるように 0.16 $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域が広がり、空間線量率は最大で約 0.26 $\mu\text{Sv/h}$ であり、過去の結果とほとんど一致した。

岡山県について

Ok_01：真庭市の北東端部について⁵⁸⁾

本地域の大部分に花崗岩類が分布しており、空間線量率が高くなる地質的な要因は十分に認められる。2018 年度（平成 30 年度）の空間線量率マップでは、本地域のほとんどで 0.16 $\mu\text{Sv/h}$ を超えた。一方、今年度は S-76 (JA6901) で同領域を飛行したが、0.08 $\mu\text{Sv/h}$ 前後であった。以上のことから、この地域についても S-76 (JA6901) に設定された CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

Ok_02：真庭市の北東端部について⁴²⁾

日本シームレス地質図によると、本地域は安山岩、花崗岩及び泥質片岩といった地層が複雑に入り組んで分布している。2018年度（平成30年度）の空間線量率マップでは、花崗岩の分布範囲と重なるように0.10 $\mu\text{Sv/h}$ 前後の領域が広がった。今年度は同領域を Bell412 (JA6928) で飛行したが、ほとんど全領域で0.06 $\mu\text{Sv/h}$ 未満であった。

Ok_03：新見市の中央部について⁴²⁾

日本シームレス地質図によると、本地域はデイサイト、堆積岩、安山岩、花崗岩といった地層が複雑に入り組んで分布している。2018年度（平成30年度）の空間線量率マップでは、デイサイトと花崗岩分布範囲と重なるように0.12 $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域が広がった。今年度は同領域を S-76 (JA6901) で飛行したが、ほとんど全領域で0.06 $\mu\text{Sv/h}$ 未満であった。以上のことから、この地域についても S-76 (JA6901) に設定された CD の影響により、空間線量率がやや小さく評価されたと推察される。

以上のように、地質の分布情報と空間線量率の関係を詳細に分析した。その結果、空間線量率が比較的高く算出された地域では、花崗岩等の地質的な要因が影響していることが多く確認された。一方で、一部の地域では地質的な要因だけでなく、地形的な要因や測線の変更、使用機体の特性に起因する評価のばらつきも影響を与えていると推察される。特に、S-76 (JA6901) で飛行した領域では、CD の影響により空間線量率が過少に評価される傾向が見られた。今後、測定手法やデータ解析の精緻化を進め、より精度の高い空間線量率評価を目指す必要がある。

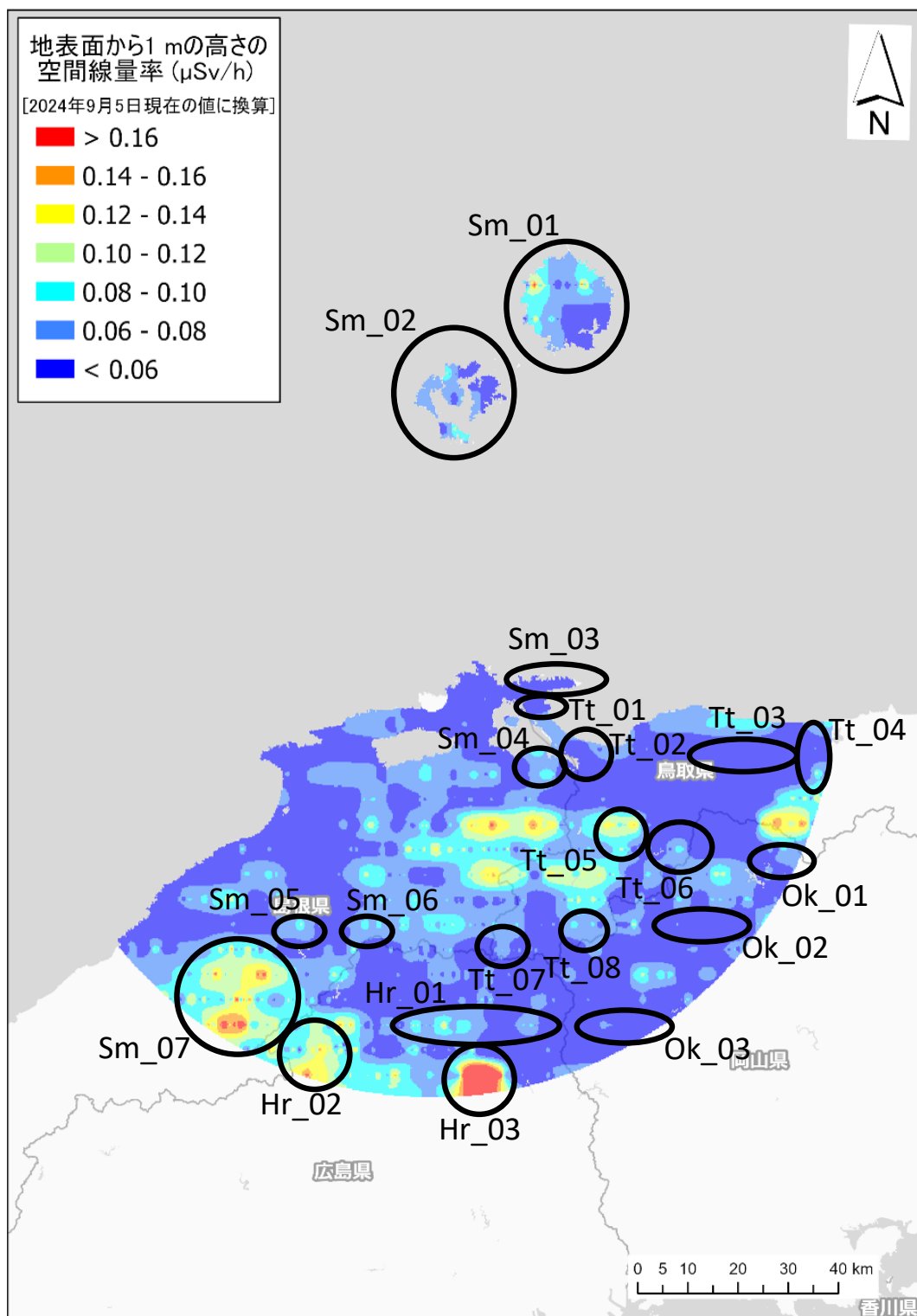


Fig. 4-7 地質情報の比較考察の対象としたエリア

(本図中の黒丸で囲った領域が比較考察の対象としたエリアを意味する。)

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

4.5. 地上測定値との比較

航空機モニタリングによる空間線量率 (以下、航空機モニタリング値) の妥当性を検証するため、Fig. 3-1 に示した 30 地点 (島根 (前期) : 15 点、島根 (後期) : 15 点) において NaI(Tl)検出器により空間線量率の地上測定を実施した。地上測定による空間線量率測定結果 (以下、地上測定値) を Fig. 4-8 に示す。航空機モニタリング値と地上測定値とを散布図及び相対誤差のヒストグラムで比較したものを Fig. 4-9 に示す。Fig. 4-9 には参考として、2018 年度 (平成 30 年度) の島根の比較結果も掲載した。なお、相対誤差は (航空機モニタリング値－地上測定値) / (地上測定値) により算出した。散布図を見ると、航空機モニタリング値が地上測定値のファクター2 に収まっていた割合については、2024 年度 (令和 6 年度) では約 83% (全 30 点中 25 点)、2018 年度 (平成 30 年度) では 80% (全 30 点中 24 点) であった。次に、相対誤差のヒストグラムを見ると、0 以下 (航空機モニタリング値の方が地上測定値よりも小さい) に分布がやや偏る傾向が見られた。平均値及び中央値については、2024 年度 (令和 6 年度) では-0.23 及び-0.30、2018 年度 (平成 30 年度) では 0.07 及び-0.16 であった。2024 年度の島根では、航空機モニタリング値は地上測定値よりも概ね 20%～30%程度、過小評価したことが窺える。2018 年度 (平成 30 年度) の島根については平均値と中央値ともに比較的 0 に近かったことから、2024 年度 (令和 6 年度) の島根の航空機モニタリングと地上測定との整合について、過去の結果と比べるとやや妥当性が低いように考えられる。

さらに、航空機モニタリング値が地上測定値に対して、絶対値としてどの程度乖離しているのかを調査するために、地上測定値に対する航空機モニタリング値の平方根平均二乗誤差 (Root Mean Squared Error: *RMSE*) を以下の式 [8] に従って算出した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_{a,i} - D_{g,i})^2} \quad [8]$$

ここで、

RMSE: 平方根平均二乗誤差 (μSv/h)

n: データ数

D_{a,i}: *i* 番目の航空機モニタリングによる空間線量率 (μSv/h)

D_{g,i}: *i* 番目の地上測定値 (μSv/h)

である。

RMSE は非負であり、0 に近いほど航空機モニタリング値が地上測定値とよく合致することを意味する。原子力施設等周辺におけるバックグラウンド航空機モニタリング

が一巡した 2015 年度 (平成 27 年度) から 2020 年度 (令和 2 年度) までのデータについて、航空機モニタリング値と地上測定値を比較した結果を Fig. 4-10 に示す。散布図を見ると、93% (全 429 点中 399 点) がファクター2 に収まり、相対誤差は 0 付近をピークとした正規分布に近い形をしており、その平均値及び中央値は 0 に近く、*RMSE* は 0.025 $\mu\text{Sv/h}$ であった。これらのことから、今までに評価してきた原子力施設等周辺のバックグラウンド空間線量率は一定の水準で正確性を有するものの、地上測定値に対して 0.03 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の誤差が生じると見込まれる。よって、2024 年度 (令和 6 年度) の測定データから評価した *RMSE* がこれを下回るか否かが航空機モニタリングによる空間線量率の換算結果の妥当性を判断する指標の一つとなると考えられる。

RMSE を過去の結果と比較すると、2024 年度 (令和 6 年度) では約 0.038 $\mu\text{Sv/h}$ 、2018 年度 (平成 30 年度) では約 0.046 $\mu\text{Sv/h}$ であった。異なるデータセット間で一概に比較できるものではないが、2024 年度 (令和 6 年度) の航空機モニタリングによる空間線量率の測定結果は過去の測定結果に比べて *RMSE* が小さかった。2015 年度 (平成 27 年度) から 2020 年度 (令和 2 年度) までのデータから求めた上記の指標 0.03 $\mu\text{Sv/h}$ に照らし合わせると、2024 年度 (令和 6 年度) の島根における空間線量率の算出結果は概ね誤差範囲に収まっており妥当なものであると考えられる。

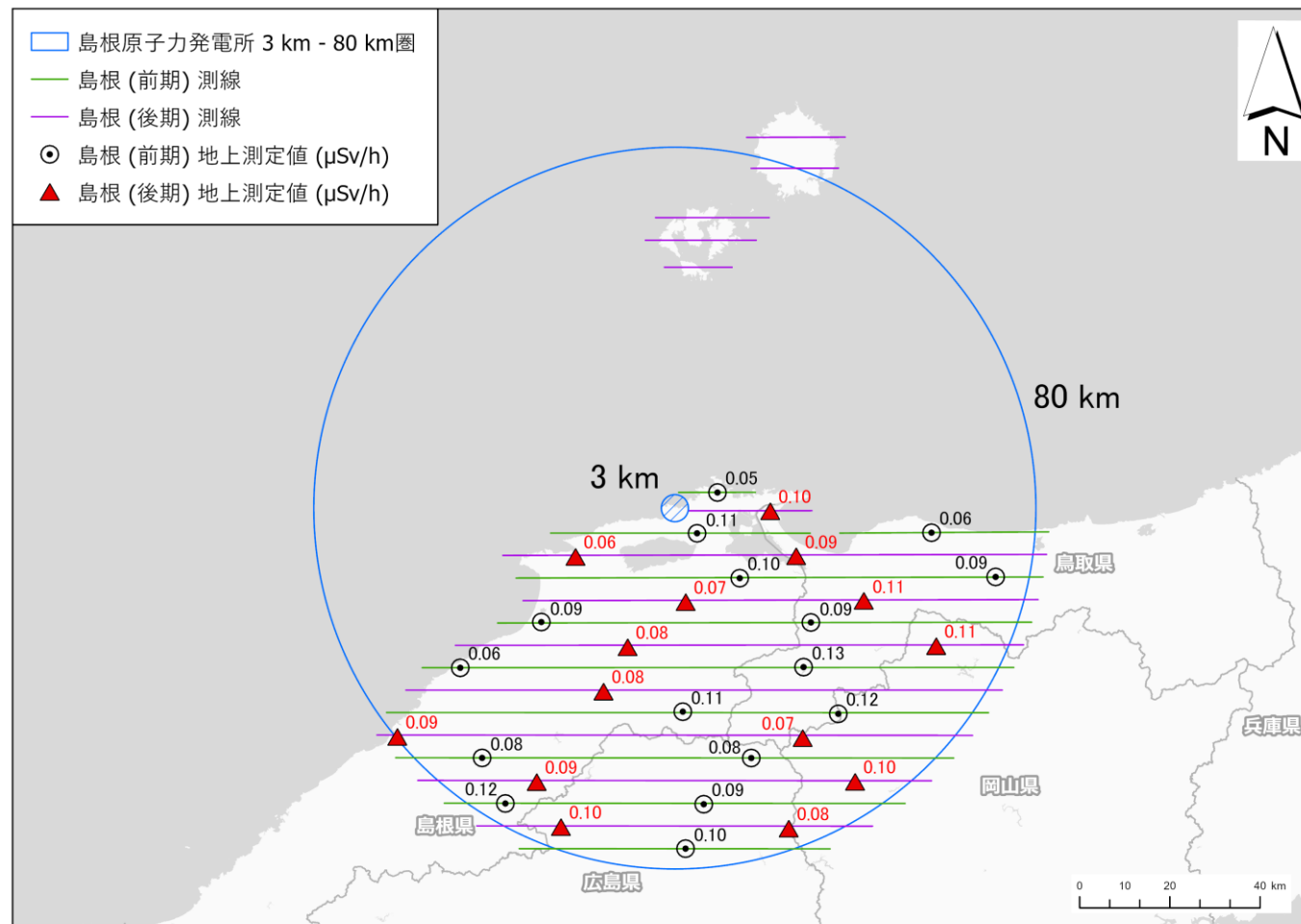


Fig. 4-8 島根 (前期及び後期) の測線近傍における地上測定値
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

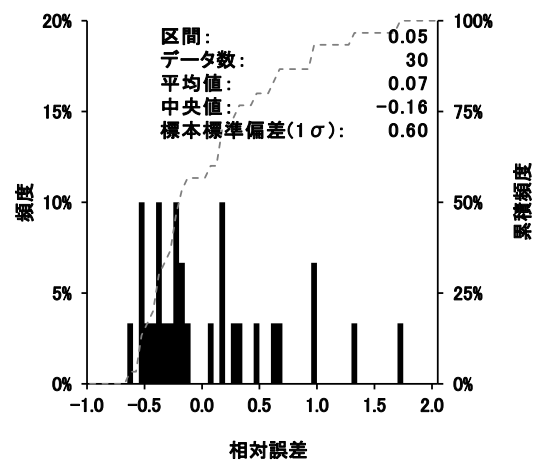
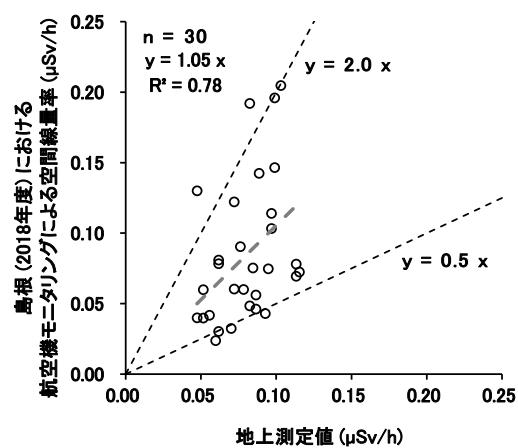
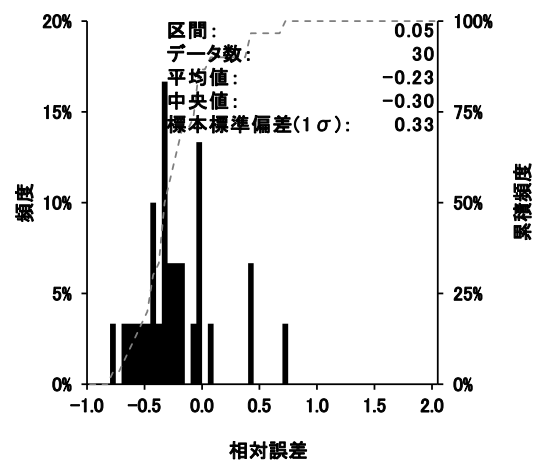
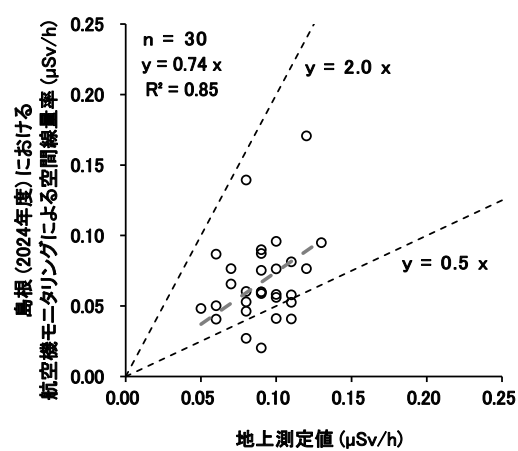


Fig. 4-9 島根における航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較
(上: 2024年度、下: 2018年度¹³⁾)
(左: 散布図、右: 相対誤差の頻度分布)

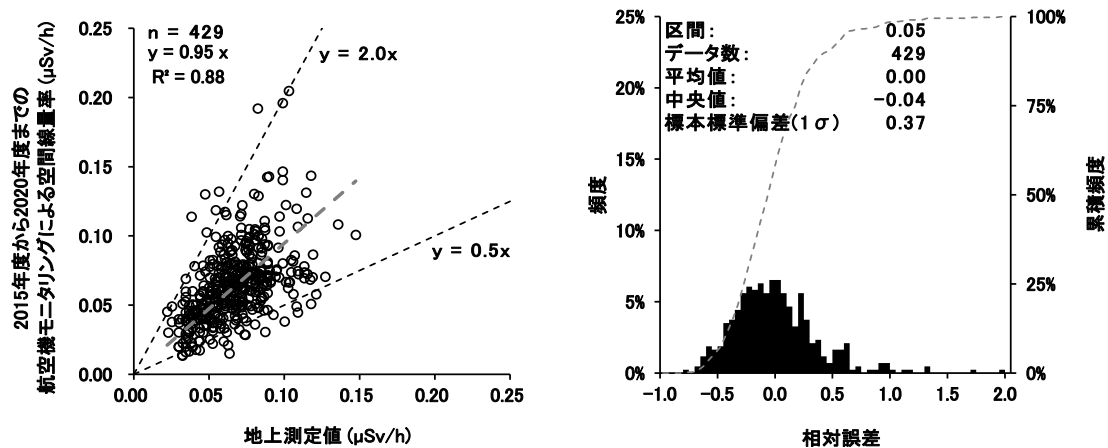


Fig. 4-10 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較
(2015年度から2020年度までの全データ 7),9),11),13),15),17))
(左: 散布図、右: 相対誤差の頻度分布)

4.6. 天然放射性核種の濃度

3.9 節に示した方法により求めた濃度換算係数 CC と空気減弱係数 AF の数値を Table 4-6 に示す。本節では、本表に示したパラメータを利用し、天然放射性核種濃度をマップ化した結果を示す。なお、日本における K-40、U 系列及び Th 系列の核種濃度は、それぞれ 100 Bq/kg～700 Bq/kg、10 Bq/kg～50 Bq/kg 及び 7 Bq/kg～50 Bq/kg とされている⁵⁹⁾。次に、天然放射性核種濃度の分布マップの妥当性を検証するために、産業技術総合研究所地質調査総合センターホームページに公開されている海と陸の地球化学図⁶⁰⁾との比較結果を示す。この海と陸の地球化学図の元素濃度マップは日本各地における河川堆積物試料の元素濃度測定結果に対して Beck et al.⁴¹⁾の換算係数を適用して作成されており、その中でも K-40、U 系列及び Th 系列の濃度測定結果は 4.3 節で示したように、日本地質学会の空間線量率マップに使用されている。しかしながら、海と陸の地球化学図では河川堆積物試料中の元素濃度 (%または ppm) を示しており、航空機モニタリングによる計算結果 (Bq/kg) との単純な比較は難しいことを念頭に置く必要がある。

K-40、U 系列及び Th 系列の濃度マップを Fig. 4-11～Fig. 4-13 に示す。K-40、U 系列及び Th 系列の各最大濃度については、約 1,310 Bq/kg (島根県隠岐郡隠岐の島町の北西部)、約 130 Bq/kg (島根県邑智郡邑南町と広島県三次市との境界付近) 及び約 75 Bq/kg (鳥取県日野郡日野市の南東部) であった。また、測定エリア全体における K-40、U 系列及び Th 系列の各平均濃度については、約 560 Bq/kg、約 40 Bq/kg 及び約 30 Bq/kg であり、上記各元素の平均濃度レベルと概ね整合した。なお、島根測定エリアにおける航空機モニタリングによる空間線量率値が最大であった広島県三次市周辺では、K-40、U 系列及び Th 系列濃度はそれぞれ、約 700 Bq/kg、約 40 Bq/kg 及び約 60 Bq/kg であり、K-40 と Th 系列濃度が比較的高かった。このことから、特に、K-40 と Th 系列濃度が空間線量率の上昇に寄与したと推察される。

航空機モニタリングによる天然放射性核種濃度マップと海と陸の地球化学図による元素濃度マップの比較を K-40、U 系列、Th 系列の順に Fig. 4-14～Fig. 4-16 に示す。なお、海と陸の地球化学図において島根県の隠岐島に色付けされていないのは、河川堆積物試料の採取地点がないためである。島根県の宍道湖の西方や、測定エリアの中央部において、各元素ともに比較的高濃度であるという大まかな分布傾向は一致した。また、Fig. 4-6 (中央) に示した空間線量率マップにおいて航空機モニタリング値が比較的高く算出された場所と、K-40、U 系列及び Th 系列濃度が高く算出された場所は、島根県の宍道湖の西方を除いて、概ね一致した。K-40 の濃度マップについては、海と陸の地球化学図と航空機モニタリングによるマップとで、測定エリアの中央部から東部にかけて、比較的高濃度であるという点で分布傾向が同様であった。また、島根県隠岐郡隠岐の島町において、航空機モニタリングで評価した K-40 濃度が比較的高かった範囲と、同町に分布する重栖層の流紋岩溶岩及び貫入岩の分布範囲が概ね一致した。しかしながら、U 系列

濃度と Th 系列濃度については、航空機モニタリングによるマップでは U 系列濃度の方が高いのに対し、海と陸の地球化学図によるマップでは Th 系列濃度の方が高いという点で、逆の分布傾向が見られた。U 系列濃度について、島根県の宍道湖及び鳥取県の中海の周辺と島根測定エリアの南西部で比較的高濃度である点で、両者の分布傾向は概ね一致していた。Th 系列濃度について、海と陸の地球化学図では、島根県の宍道湖の西方で 30 ppm 以上の領域が認められる。これは、島根県出雲市内で採取された河川堆積物試料について、それらのほとんどで Th 濃度が概ね 5 ppm 程度であるが、その中に約 48 ppm の際立って高濃度なデータが 1 点あるためと推察される。同エリアにおいて、航空機モニタリングによって評価された Th 系列濃度は概ね 30 Bq/kg 程度であり、島根エリア全体の Th 系列濃度の平均値程度であった。また、日本シームレス地質図では、同エリアは河岸平野堆積物が主体であり、Th 濃度が顕著に高くなる要因は確認できなかった。このような特殊なケースを除けば、航空機モニタリングは海と陸の地球化学図の Th 系列濃度の分布傾向を概ね再現できていた。

以上のことから、地上の河川堆積物試料中の元素濃度測定結果に基づく元素濃度マップを再現するのが難しい箇所があるものの、航空機モニタリングにより、一定の信頼性をもつ天然放射性核種濃度マップの作成が可能であると考えられる。しかしながら、U 系列濃度と Th 系列濃度に航空機モニタリングと海と陸の地球化学図によるマップとで齟齬が見られた。ただし、海と陸の地球化学図による元素濃度マップが完成したのが 2010 年 (平成 22 年) であり、その当時から各種元素の分布状況が変化している可能性があることに留意する必要がある。

Table 4-6 天然放射性核種濃度への換算パラメーター一覧

Measurement Area	Parameters	K-40	U-series	Th-series
島根（前期）	CC (s^{-1} [Bq/kg])	0.030	0.230	0.140
	AF (m^{-1})*	-0.0054	-0.0070	-0.0063
島根（後期）	CC (s^{-1} [Bq/kg])	0.030	0.240	0.160
	AF (m^{-1})*	-0.0054	-0.0070	-0.0063

*EGS5のシミュレーション結果より⁷⁾

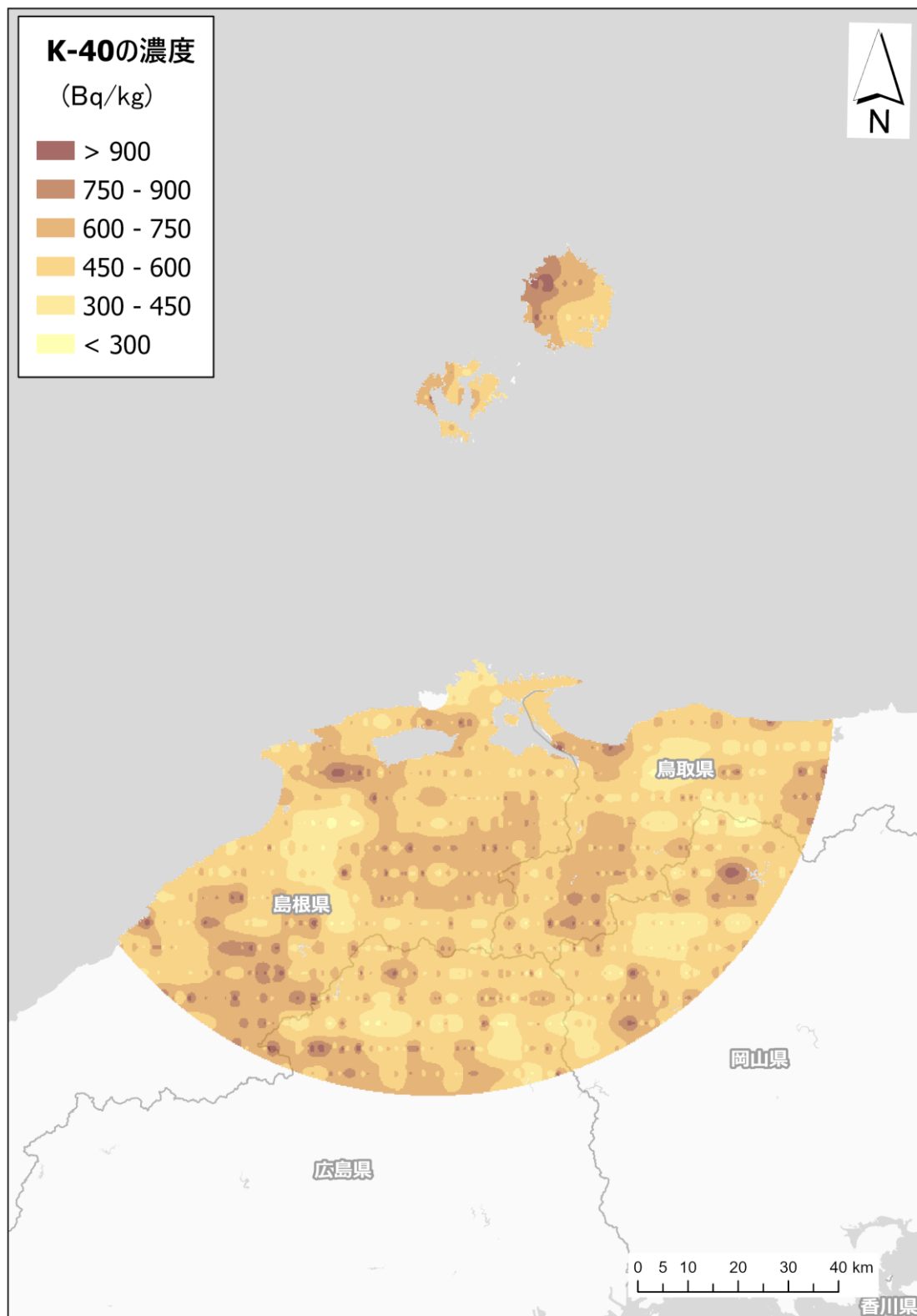


Fig. 4-11 島根の K-40 濃度マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

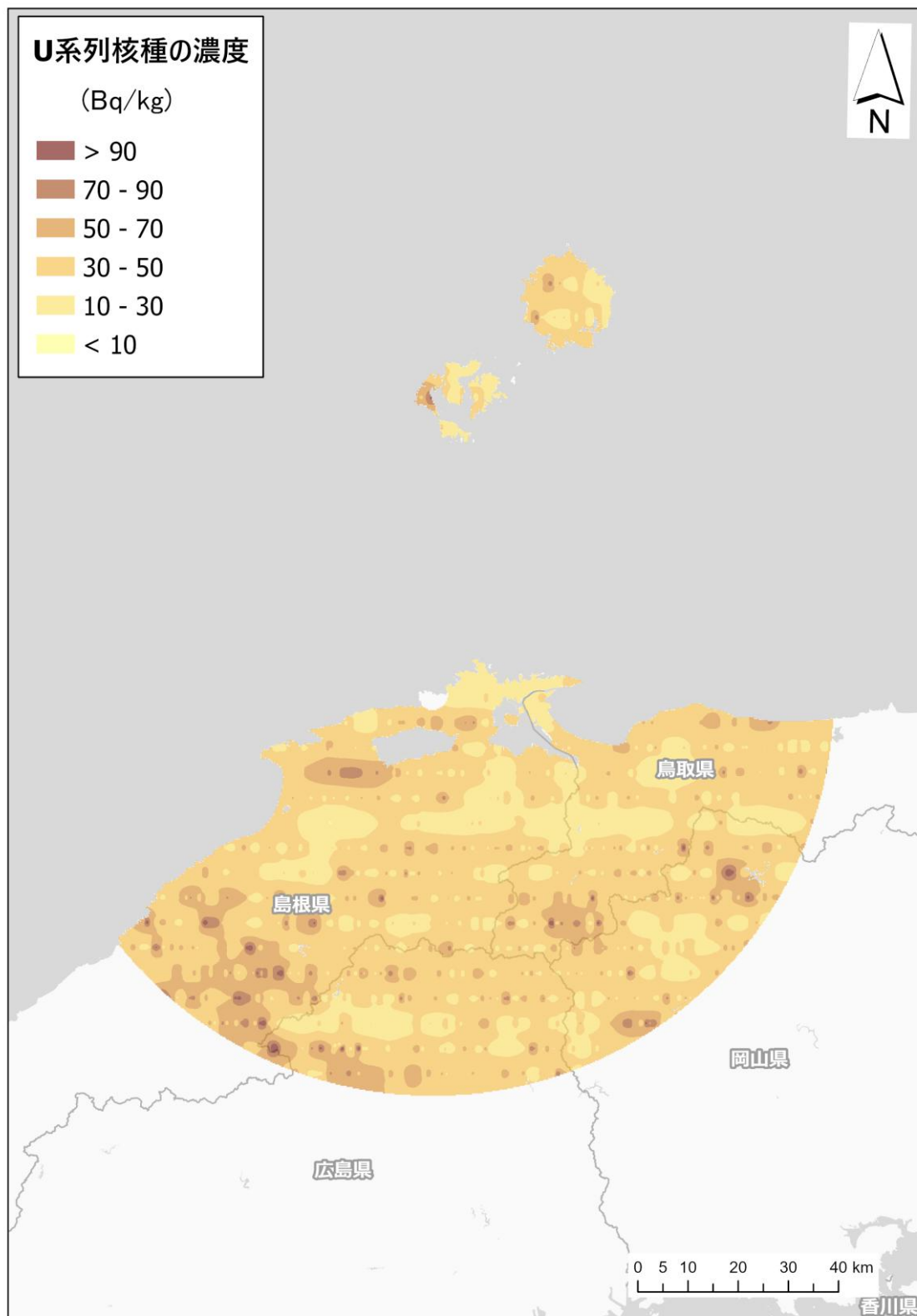


Fig. 4-12 島根の U 系列濃度マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

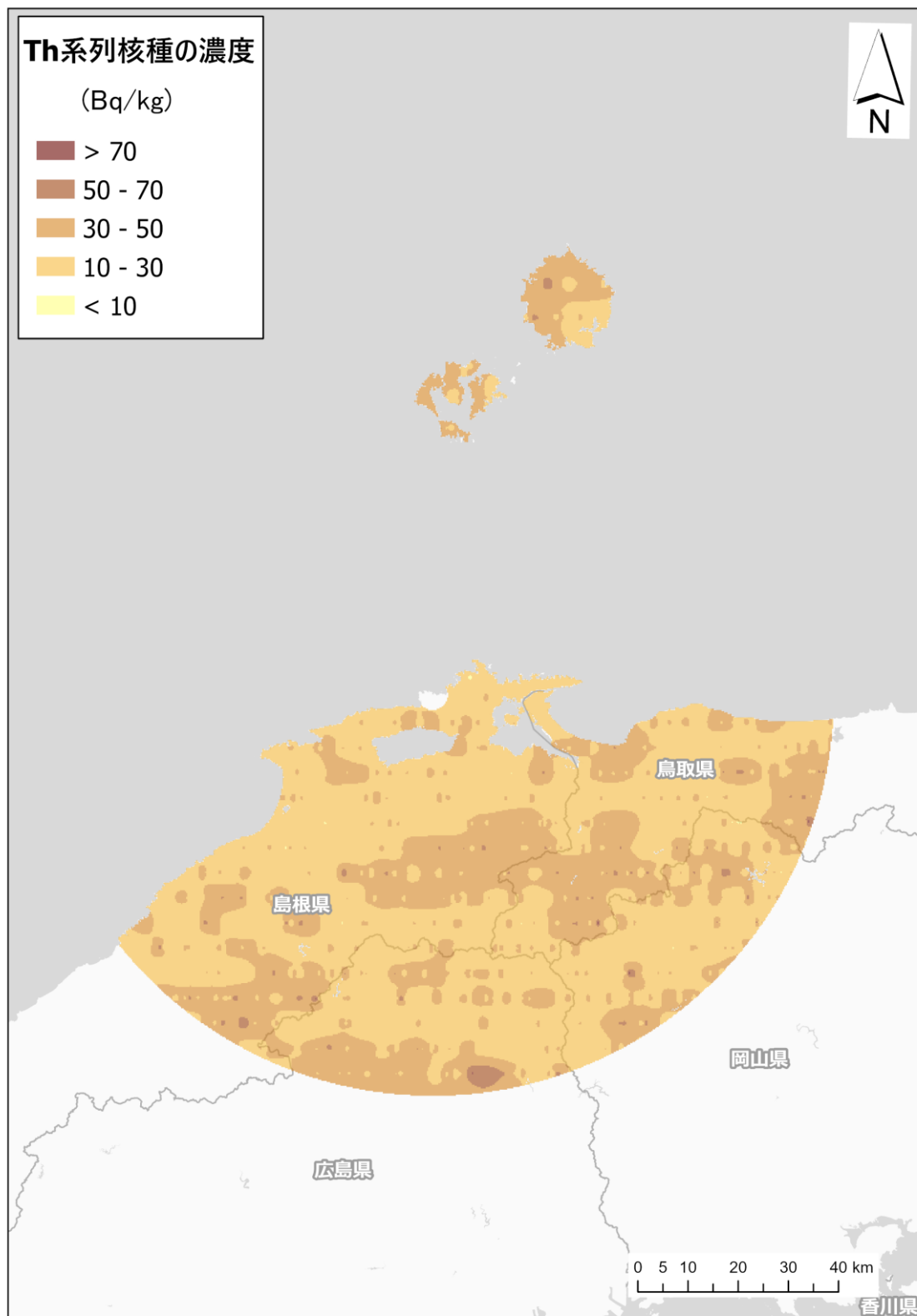


Fig. 4-13 島根の Th 系列濃度マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

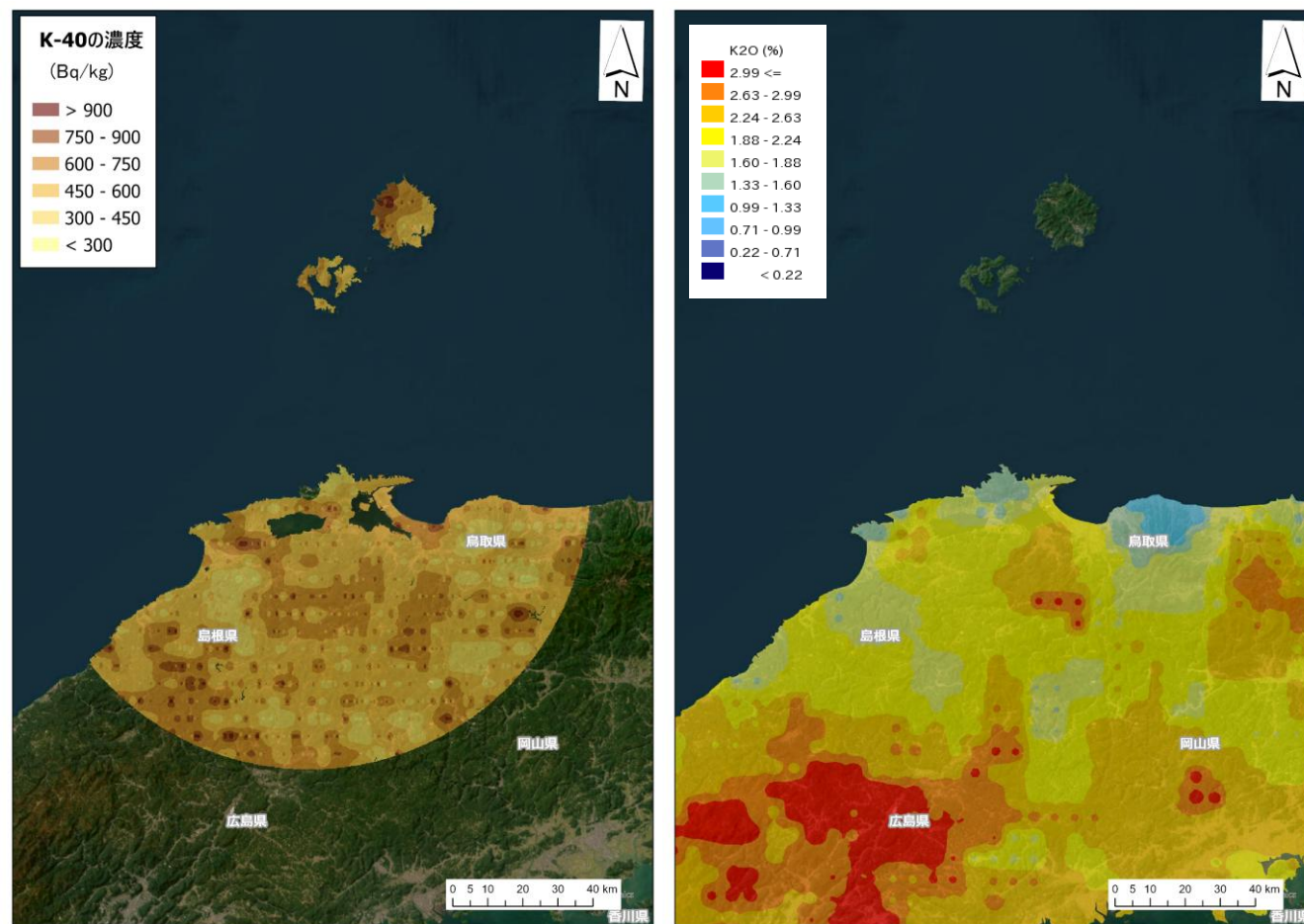


Fig. 4-14 島根の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (K-40)

(背景地図は、ESRI, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community を使用。)

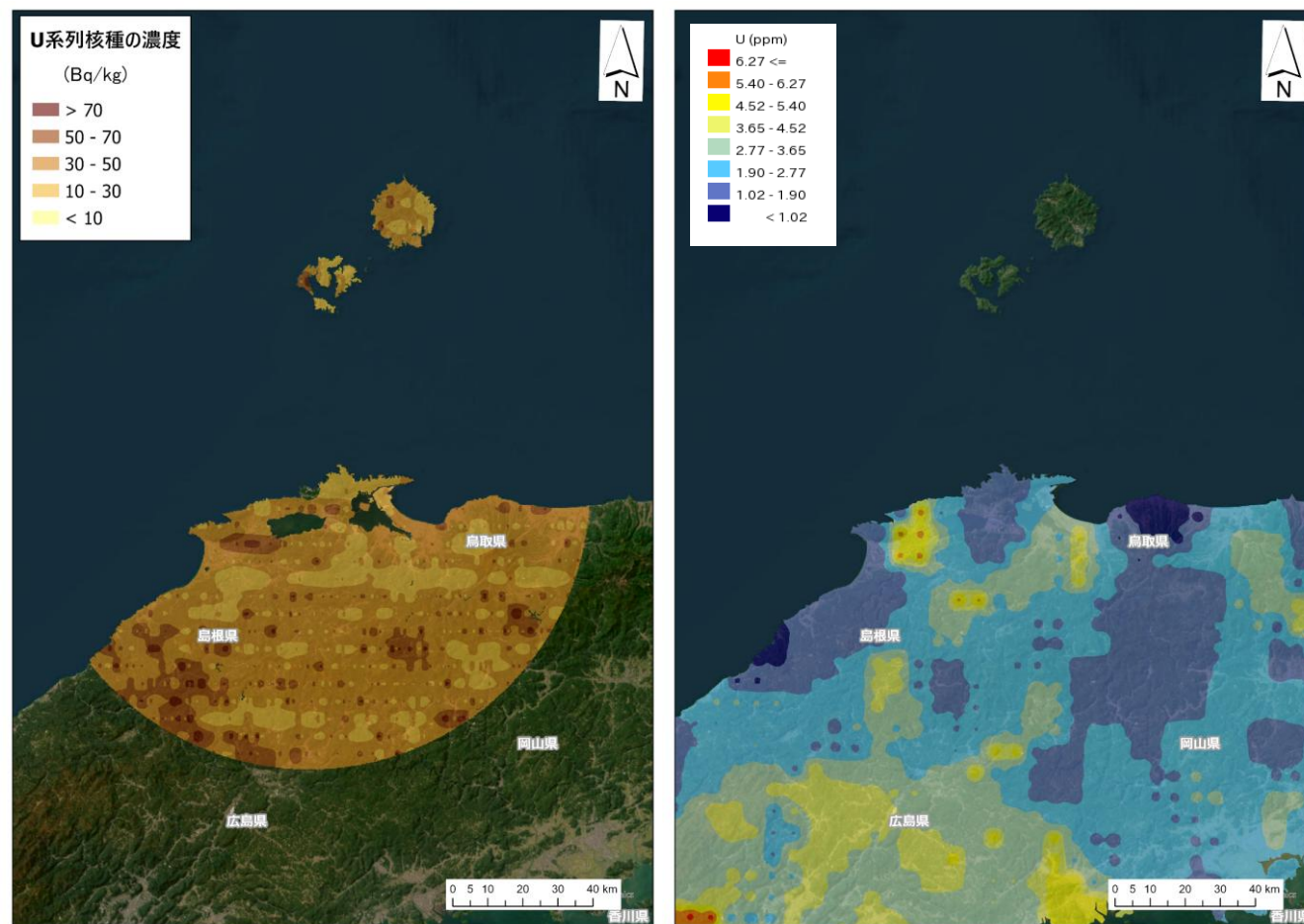


Fig. 4-15 島根の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (U 系列)

(背景地図は、ESRI, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community を使用。)

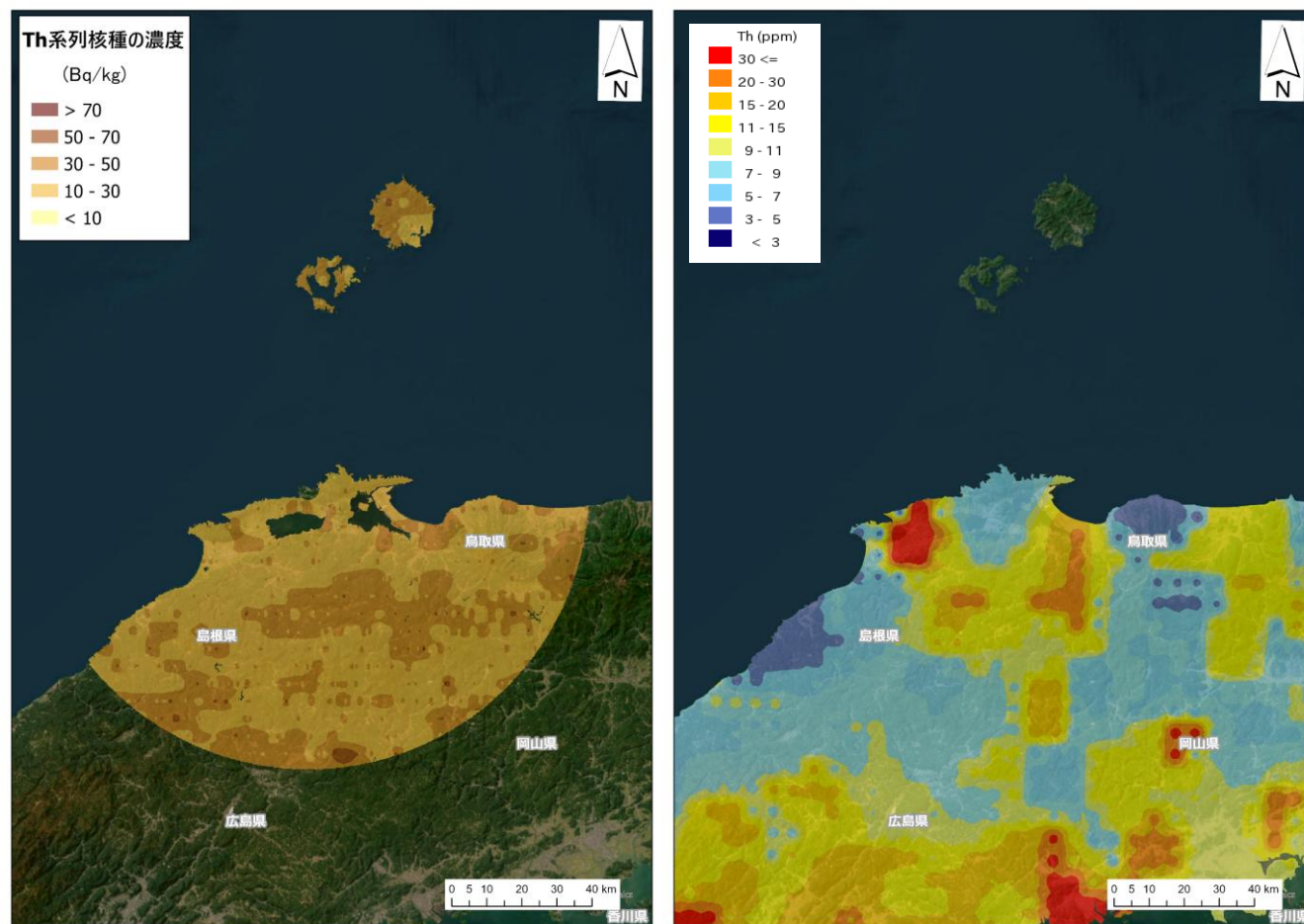


Fig. 4-16 島根の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (Th 系列)

(背景地図は、ESRI, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community
を使用。)

4.7. ラドン弁別手法の適用

4.7.1. パラメータ (RI 及び GI) の決定

式 [6] を用いたラドン弁別手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。ヘリコプターの遮へいによる 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、使用したヘリコプター機種ごとに実測データから数値を決定した。

計数率の変動による影響をなるべく低減するために、島根の航空機モニタリングにおいて取得した計数率データ及び高精度 GPS データ (緯度、経度及び飛行高度) を 40 秒平均し、全計数率から宇宙線及びヘリコプター機体に起因する γ 線計数率の寄与をバックグラウンドとして減算したうえで RI 及び GI の算出に用いた。このとき、 RI については海上でフライトしたデータの内、海拔高度が $300\text{ m} \pm 150\text{ m}$ で取得したデータを抽出し、 GI については陸上で取得したデータの内、対地高度が $290\text{ m} \sim 320\text{ m}$ のデータのみを抽出した。抽出したデータに対して線形回帰 (ただし、切片が 0 であることを前提とする) を実施して得られた線形回帰式の傾き (回帰係数) を RI 及び GI とする。これまで、データ数が少ない或いはばらつきが比較的大きく外れ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に回帰係数に悪影響を及ぼすケースが過去に見られた¹⁷⁾。また、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²¹⁾。これらいずれの手法も 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を行っており、この仮定が RI 及び GI の算出に悪影響を及ぼす可能性があると考えられる。そこで、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⁶¹⁾を導入した。直交距離回帰は測定データ点と回帰直線の直交距離の二乗和を最小とする回帰アルゴリズムであり、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器及び $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の計数率の両者に含まれる誤差を考慮した上で回帰係数が求めることが可能である。さらに、直交距離回帰に簡易的にロバスト性を持たせるために、 x 軸及び y 軸データの標準偏差の逆数を重みとした重み付き回帰を組み合わせ RI 及び GI の算出に用いた。本報告では、この手法を「重み付き直交距離回帰」と呼称する。

RI 及び GI の算出に係る $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の計数率と $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の計数率の関係を Fig. 4-17 に示す。本図には最小二乗法及び重み付き直交距離回帰による線形回帰で得られた近似直線と回帰式を併記した。本図の上段に示した RI の算出に用いたデータは、海上で取得したものでありラドン子孫核種に起因する計数率のみが反映されていると考えられるが、ややばらつきが大きい。これは大気中ラドン子孫核種の分布の不

均一さや抽出対象とするデータの海拔高度範囲が広いことに起因すると推測される。また、Fig. 4-17 の下段に示した *GI* の算出に用いたデータについては、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。

最小二乗法と重み付き直交距離回帰の結果を比較すると、Fig. 4-17 から *RI* 及び *GI* について差異はほとんど見られなかった。これは、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器及び $\text{NaI}(\text{Tl})$ 検出器の計数率に、両回帰の結果に大きな影響を及ぼすような外れ値が生じなかったためと推察される。本報告では、*RI* 及び *GI* は重み付き直交距離回帰による回帰係数をメインとして解析に使用することとし、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 4.7.2 項にて地上測定値を用いて行う。

ラドン弁別手法に使用するパラメータを Table 4-7 にまとめた。Bell412 (JA6928) については *RI* を 22.4、*GI* を 30.4 とし、S-76 (JA6901) については *RI* を 28.2、*GI* を 32.5 とした。また、本表には参考として、東電福島原子力発電所から半径 80 km 圏外における航空機モニタリング (以下、東日本第 15 次モニタリング) で使用しているパラメータを併記した。*RI* には比較的ばらつきが見られ、ヘリコプター機種が同一であっても差異が比較的大きい。これに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ことが推察される。*GI* については、回帰に用いるデータが比較的多くなるため、ヘリコプター機種や測定場所に依らず、概ね 30 程度に収まる傾向にある。

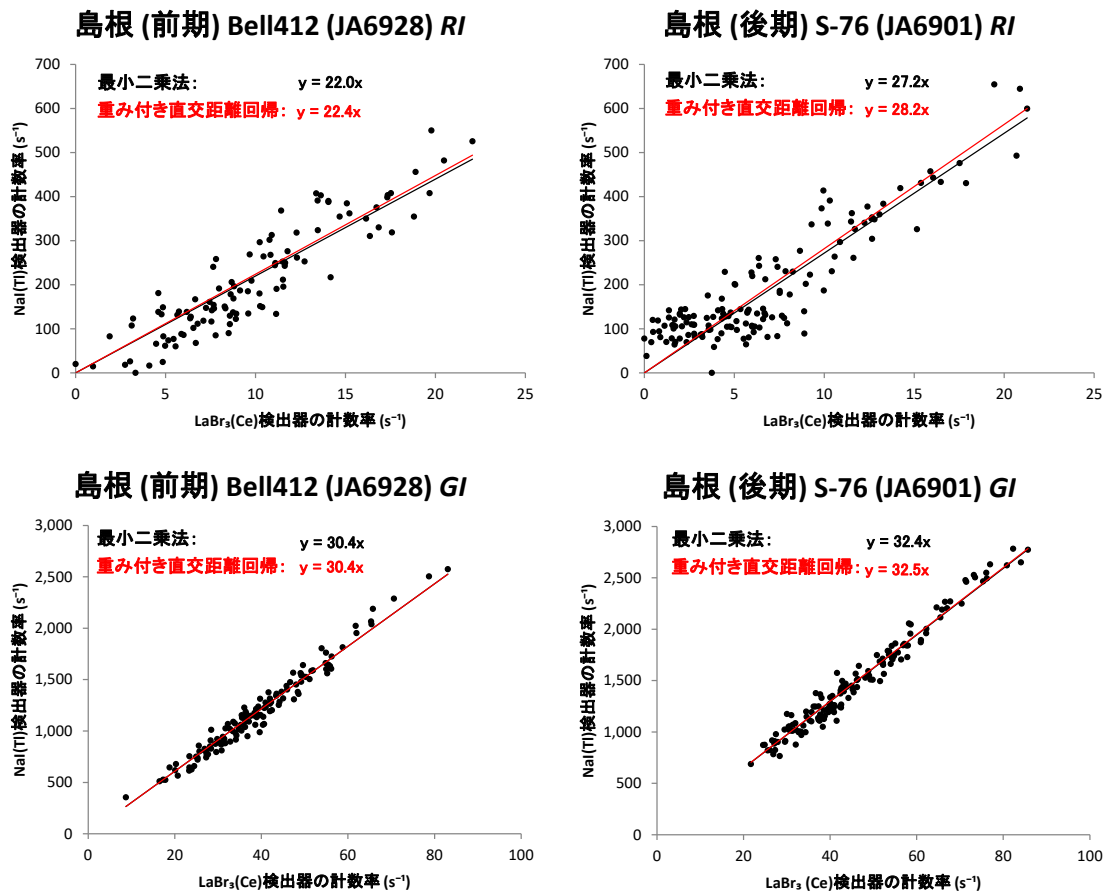


Fig. 4-17 海上及び陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr₃(Ce)検出器の計数率の関係

(上段 : RI、下段 : GI)

Table 4-7 ラドン弁別手法に用いた *RI* 及び *GI* の一覧

モニタリング名	開始日	終了日	ヘリコプター機種(機体番号)	<i>RI</i>	<i>GI</i>
島根(前期)	2024/06/13	2024/06/17	Bell412 (JA6928)	22.4	30.4
島根(後期)	2024/08/23	2024/09/05	S-76 (JA6901)	28.2	32.5
東日本15次モニタリング	2024/07/10	2024/07/31	Bell412 (JA6928)	25.6	29.7
	2024/09/11	2024/09/18	S-76 (JA6901)	21.3	30.9
	2024/09/18	2024/10/14	Bell430 (JA05TV)	17.5	27.5

4.7.2. ラドン弁別手法の適用結果及び標準的解析手法との比較

前項に記した RI 及び GI を島根の航空機モニタリングデータに適用し、ラドン弁別手法による空間線量率マップ及び空气中ラドン子孫核種由来の γ 線計数率マップを作成した。なお、今までの経験から GI を実測データに基づく数値よりもある程度小さく設定した方が、航空機モニタリング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、前項で示した重み付き直交距離回帰による GI を基準値とし、基準値から 1 及び 2 を減じた場合についても解析を実施した。すなわち、島根 (前期) 及び島根 (後期) についてそれぞれ 30.4 及び 32.5 を GI の基準値として解析し、他にも 29.4 及び 31.5、28.4 及び 30.5 とした場合についても解析し、それぞれの場合で空間線量率マップ及び空气中ラドン子孫核種の計数率マップを作成した。なお、 GI を 1 及び 2 減じる程度の範囲においては、式 [6] において $C_{NaI,g}$ が大きくなるため空間線量率は大きくなる。

空間線量率マップについては地上測定値 30 点と比較し、その妥当性を検証した。この時、Fig. 4-6 (中央) に示した標準的解析手法 (ラドン弁別手法を適用しない場合の航空機モニタリングによる空間線量率解析手法) による比較結果も併記し、ラドン弁別手法が空間線量率の換算結果の妥当性向上をもたらすかを検証した。また、Fig. 4-17 に示した最小二乗法に基づく RI 及び GI を用いた場合についても解析を実施した。この時、上記のように最小二乗法における GI の基準値を定め、この基準値から 1 及び 2 減じた場合の空間線量率の換算値についても、地上測定値と比較した。最後に、航空機モニタリングにおいて空間線量率マップを作成するに際に評価対象外となる γ 線計数率の除去効果の有効性を検証した。以下に詳細を述べる。

(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

Fig. 4-18 及び Fig. 4-19 に空間線量率マップ及び空气中ラドン子孫核種由来の γ 線計数率マップを示す。空間線量率マップについては比較のため、標準的解析手法によるマップ (Fig. 4-6 (中央) と同一) も掲載した。ラドン弁別手法を適用すると、測定エリア全体にわたって航空機モニタリング値が $0.08 \mu\text{Sv/h}$ を超える領域の面積が、標準的解析手法の場合よりも明らかに増加した。また、ラドン弁別手法において、空間線量率は GI を基準値から減じるほど大きくなる傾向にあり、例えば測定エリア南西部において航空機モニタリング値が $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を超える領域の面積が増加した。

空气中ラドン子孫核種由来の計数率マップは、 NaI(Tl) 検出器における空气中ラドン子孫核種由来の計数率をマッピングしたものである。この計数率は NaI(Tl) 検出器における全計数率から、式 [6] により算出した $C_{NaI,g}$ を減算し、求めたものである。測定日時が場所により異なるため、空气中ラドン子孫核種由来の計数率は離散的である。また、空气中ラドン子孫核種の起源としては中国大陆からの大気輸送と測定地近傍における地殻か

らの放出が考えられ、前者の影響は特に日本海側の冬季に大きくなる傾向にある⁶²⁾⁻⁶⁴⁾。本手法で検出されたラドン子孫核種がどちら由来なのか弁別することは困難であり、本結果はその地域におけるラドン子孫核種の分布傾向を決定付けるものではないことに留意する必要がある。Fig. 4-19 について、 GI を基準値とした場合、島根エリアの大部分で空气中ラドン子孫核種由来の計数率は 300 s^{-1} を上回る程に大きく、この領域と航空機モニタリング値が比較的小さく算出された領域とが概ね一致した。また、 GI を基準値から減じると、空气中ラドン子孫核種由来の計数率が 100 s^{-1} 未満の面積が増大した。以上をまとめると、島根の航空機モニタリング値が比較的高く算出された領域の大部分において、航空機モニタリングで得られた全計数率に対して、空气中ラドン子孫核種由来の γ 線計数率が占める割合はさほど小さくなく、したがってラドン弁別手法を適用すると、標準的解析手法の場合よりも空間線量率の比較的高い領域の面積が増大する傾向にあったと推察される。つまり、島根エリアの大部分において、地質的な要因や測定時のヘリコプター周囲の地形的状況といった要因が、空間線量率の上昇に比較強く関与していることが推察される。

(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

標準的解析手法及び重み付き直交距離回帰により求めた GI の各設定値を用いてラドン弁別手法を適用した場合の航空機モニタリング値と地上測定値との比較結果を Fig. 4-20 に示す。また、最小二乗法により求めた GI の各設定値を用いた場合の同比較結果を Fig. 4-21 に示す。散布図において、ファクター2 の範囲に収まっているプロットの数に着目すると、標準的解析手法で約 83% (全 30 点中 25 点) であったのに対し、ラドン弁別手法では、重み付き直交距離回帰の場合、島根 (前期) の $GI = 30.4$ 、島根 (後期) の $GI = 32.5$ 、島根 (前期) の $GI = 29.4$ 及び島根 (後期) の $GI = 31.5$ のとき約 93% (全 30 点中 28 点)、島根 (前期) の $GI = 28.4$ 及び島根 (後期) の $GI = 30.5$ のとき約 97% (全 30 点中 29 点) となった。最小二乗法の場合、島根 (前期) の $GI = 30.4$ のとき約 93% (全 30 点中 28 点)、島根 (後期) の $GI = 32.4$ 、島根 (前期) の $GI = 29.4$ 及び島根 (後期) の $GI = 31.4$ 、島根 (前期) の $GI = 28.4$ 及び島根 (後期) の $GI = 30.4$ のとき 97% (全 30 点中 29 点) であった。ラドン弁別手法を適用すると、空間線量率の換算結果の妥当性が改善された。また、ラドン弁別手法を適用した結果同士で比較すると、 GI を基準値減じるとファクター2 の範囲に収まっているプロットの数が増える傾向が見られ、最小二乗法と重み付き直交距離回帰とでは、ほとんど差異はみられなかった。

相対誤差については、標準的解析手法では平均値が -0.23 、中央値が -0.30 、1 標本標準偏差が 0.33 であったのに対し、ラドン弁別手法を適用した場合には、重み付き直交距離回帰の場合、島根 (前期) で $GI = 30.4$ 、島根 (後期) で $GI = 32.5$ としたときの平均値は 0 、中央値は -0.03 、1 標本標準偏差は 0.38 であった。島根 (前期) で $GI = 29.4$ 及び島根 (後期) で $GI = 31.5$ としたときの平均値は 0.05 、中央値は 0.06 、1 標本標準偏差は 0.39 で

あった。島根 (前期) で $GI=28.4$ 及び島根 (後期) で $GI=30.5$ としたときの平均値は 0.10、中央値は 0.11、1 標本標準偏差は 0.41 であった。最小二乗法の場合、島根 (前期) で $GI=30.4$ 、島根 (後期) で $GI=32.4$ としたときの平均値は 0.01、中央値は -0.02、1 標本標準偏差は 0.37 であった。島根 (前期) で $GI=29.4$ 及び島根 (後期) で $GI=31.4$ としたときの平均値は 0.06、中央値は 0.07、1 標本標準偏差は 0.37 であった。島根 (前期) で $GI=28.4$ 及び島根 (後期) で $GI=30.4$ としたときの平均値は 0.10、中央値は 0.09、1 標本標準偏差は 0.39 であった。ラドン弁別手法では重み付き直交距離回帰、最小二乗法のいずれの場合も、標準的解析手法の場合よりも相対誤差のばらつきがやや大きいものの、空間線量率の換算結果の妥当性が向上したように見られる。特に、 GI を基準値とした場合に相対誤差の平均値、中央値ともに 0 に近く、空間線量率の換算結果の妥当性が最も向上した点については、今までの経験則とは異なる結果が得られた。なお、ラドン弁別手法においては、重み付き直交距離回帰または最小二乗法を用いた場合との結果に、顕著な違いは生じなかった。

式 [8] に基づいて $RMSE$ を計算した結果、標準的解析手法で $0.038 \mu\text{Sv/h}$ であったのに対し、ラドン弁別手法では、重み付き直交距離回帰の場合、島根 (前期) の $GI=30.4$ 及び島根 (後期) の $GI=32.5$ のとき $0.032 \mu\text{Sv/h}$ 、島根 (前期) の $GI=29.4$ 及び島根 (後期) の $GI=31.5$ のとき $0.034 \mu\text{Sv/h}$ 、島根 (前期) の $GI=28.4$ 及び島根 (後期) の $GI=30.5$ と $0.036 \mu\text{Sv/h}$ であった。最小二乗法の場合、島根 (前期) の $GI=30.4$ 及び島根 (後期) の $GI=32.4$ 、島根 (前期) の $GI=29.4$ 及び島根 (後期) の $GI=31.4$ のとき $0.032 \mu\text{Sv/h}$ 、島根 (前期) の $GI=28.4$ 及び島根 (後期) の $GI=30.4$ と $0.034 \mu\text{Sv/h}$ であった。以上より、ラドン弁別手法を適用すると、標準的解析手法よりも $RMSE$ がやや小さくなり、地上測定値との誤差が改善される傾向が認められた。一方で、ラドン弁別手法において、 RI 及び GI の算出に重み付き直交距離回帰と最小二乗法のいずれを用いた場合でも $RMSE$ はほとんど同一であった。

(3) γ 線計数率の除去効果の有効性

空間線量率マップを作成するにあたって評価対象外となる γ 線計数率の除去効果の有効性を検証するため、標準的解析手法において空気中核種フライトで求めた計数率と、 GI に基準値を設定しラドン弁別手法を適用して求めたラドン子孫核種由来の計数率を比較した。3.2 節「空気中核種フライト」の項目に記載した通り、空気中核種フライトは島根県から西方向または北西方向の日本海上で実施した。また、本図には比較のため、2024 年 (令和 6 年) 7 月 10 日～10 月 14 日にかけて実施した、東日本第 15 次モニタリングのデータについて同様に比較した結果も示した。東日本第 15 次モニタリングでは、空気中核種フライトは海域だけでなく、陸域で行っている場合もあり、Bell412 (JA6928) については茨城県の鹿島灘付近の海域の他、群馬県前橋市にある群馬ヘリポート近辺の陸域、S-76 (JA6901) については茨城県の鹿島灘付近の海域の他、栃木県芳賀郡芳賀町に

ある栃木ヘリポート近辺の陸域、Bell430 (JA05TV) については宮城県栗原市にある瀬峰飛行場近辺及び福島県石川郡玉川村と須賀川市に跨る福島空港近辺の陸域において実施された。

標準的解析手法において空気中核種フライトで取得した計数率と *GI* に基準値を設定しラドン弁別手法を適用して求めた空気中ラドン子孫核種由来の計数率を比較した結果を Fig. 4-22 に示す。Fig. 4-22 を見ると、島根 (前期) 及び島根 (後期) で使用した Bell412 (JA6928) 及び S-76 (JA6901) について、全データを平均すると、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方が 1.04 倍～1.32 倍程度高くなった。また、東日本第 15 次モニタリングにおいても、ほとんどの場合で、標準的解析手法で用いた空気中ラドン子孫核種由来の計数率よりも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方が高くなる傾向にあった。具体的には、Bell412 (JA6928) では約 1.26 倍、S-76 (JA6901) で約 1.44 倍、Bell430 (JA05TV) では約 0.88 倍程度であった。このように、島根と東日本第 15 次モニタリングにおいて用いた同一のヘリ機体に注目すると、標準的解析手法とラドン弁別手法で求めた空気中核種由来の計数率における大小関係はほとんど同様であった。以上より、ラドン弁別手法を採用するとバックグラウンド減算がやや過剰となり、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ると推察される。しかしながら、Fig. 4-18 で示したように、ラドン弁別手法による空間線量率マップの方が、標準的解析手法によるものより、測定エリアの北部域で $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を超える領域が明らかに増加しており、上述した推論とは矛盾する。これは、本節の (1) に記載したように、島根エリアの大部分において空間線量率の上昇に寄与する主要因は、地質的な要因や測定時のヘリコプター周囲の地形的状況であり、空気中ラドン子孫核種による寄与が小さいためと推察される。

標準的解析手法では、地表面に分布する放射性核種由来の γ 線計数率を算出するために、測定日ごとに空気中核種フライトを実施し計数率を取得し、その日の測定エリア全体における全計数率から減算する。空気中核種フライトで取得される計数率には空気中ラドン子孫核種由来の計数率も含まれており、ある程度正確に空気中ラドン子孫核種の影響を差し引くことが可能であると考えられる。しかしながら、空気中核種フライトを実施する場所と測線フライトを実施する場所が離れてしまった場合、測定エリア近傍における地殻から放出される空気中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という強みがある。ラドン弁別手法の信頼性を向上させることができれば、空気中核種フライトが不要となり、航空機モニタリングの測定期間やデータの解析に掛かる時間の短縮等の効率化に寄与する。よって、ラドン弁別手法の更なる改良と信頼性の向上に係る検討を重ねることは意義深いことである。本報告では、*RI* 及び *GI* を算出するのに用いたデータに顕著な外れ値が生じなかったため、重み付き直交

距離回帰の明確な優位性が認められなかった。一方で、外れ値が生じない通常のデータを用いる場合でも、重み付き直交距離回帰は、従来用いてきた最小二乗法と遜色ない回帰係数を算出できることも明らかとなった。よって今後は、重み付き直交距離回帰を *RI* 及び *GI* の標準的な算出方法に用いるのがよいと考える。

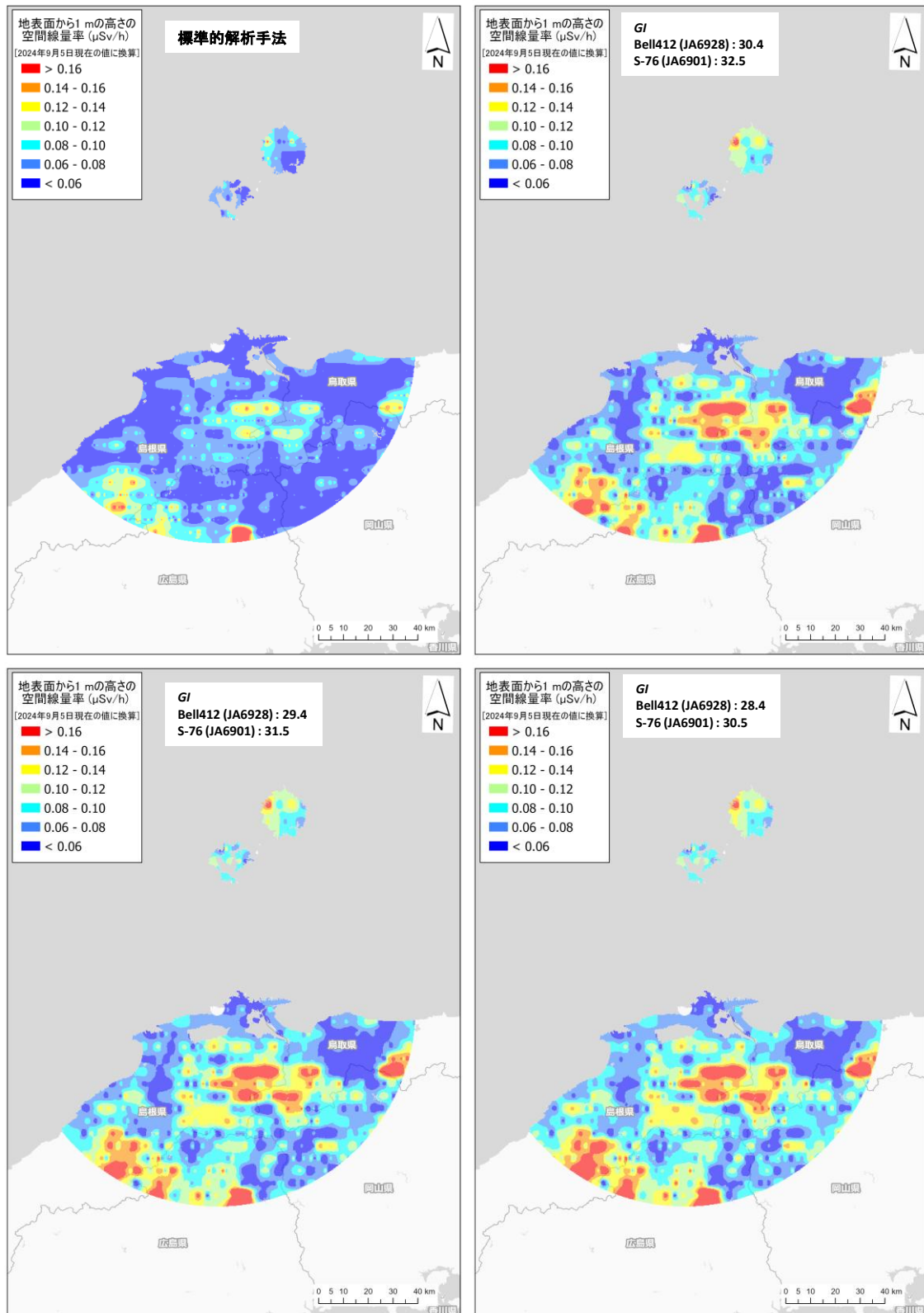


Fig. 4-18 島根におけるラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

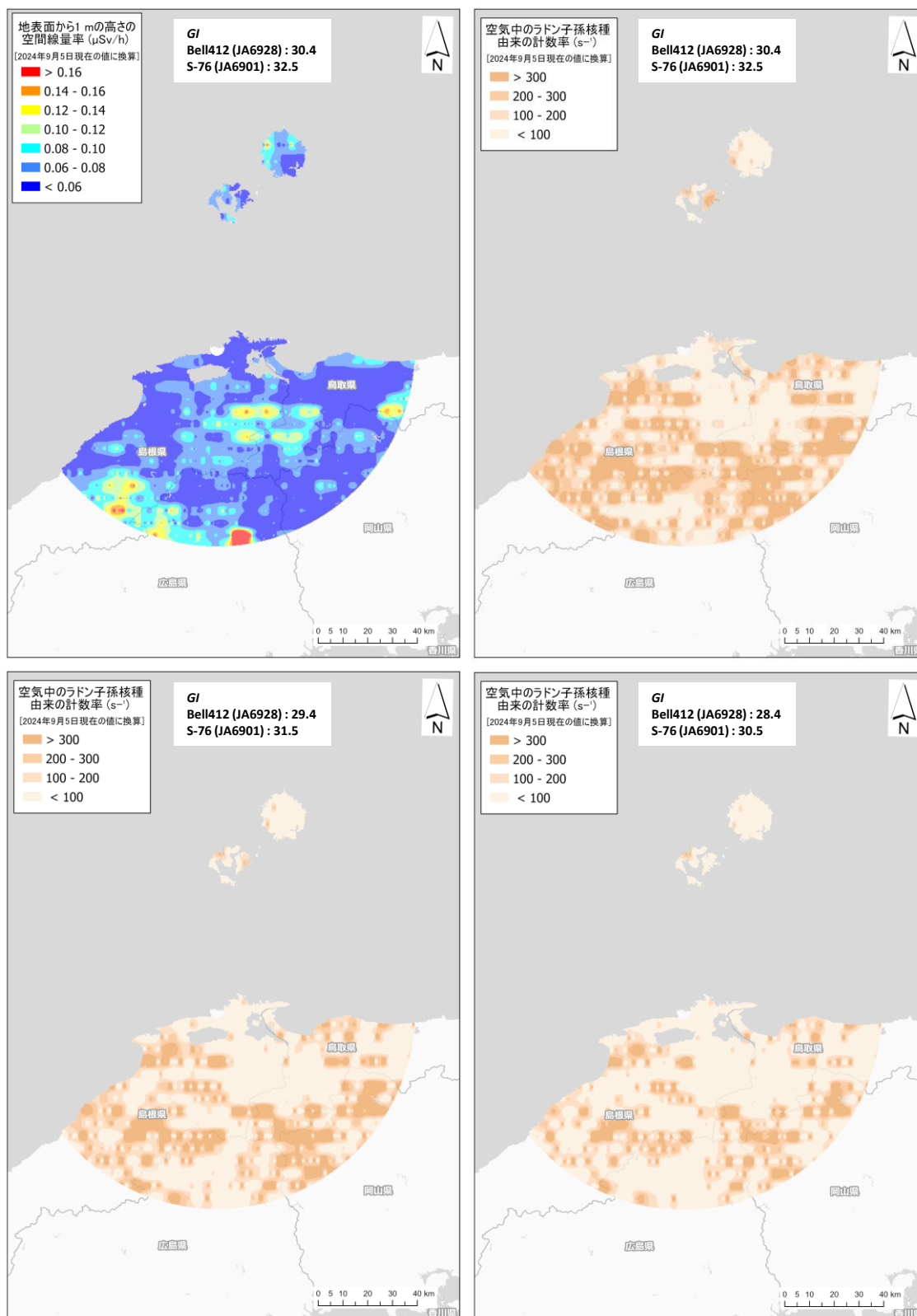


Fig. 4-19 島根における空気中のラドン子孫核種由来の計数率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

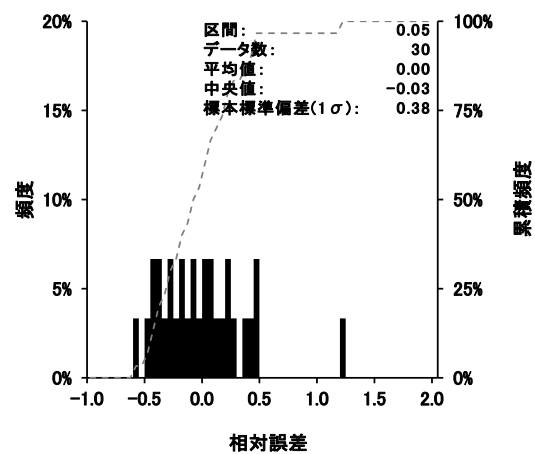
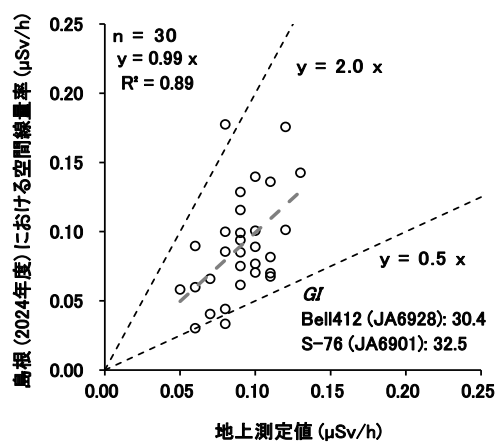
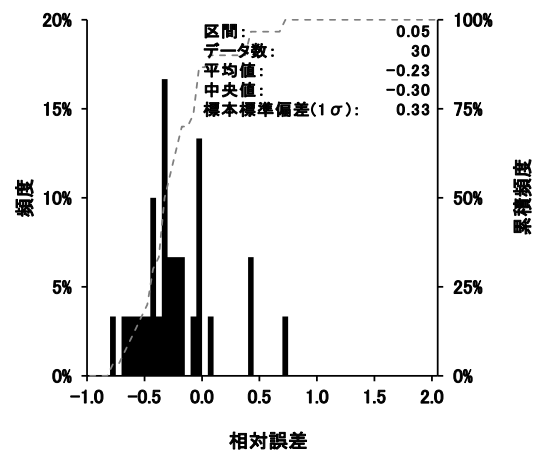
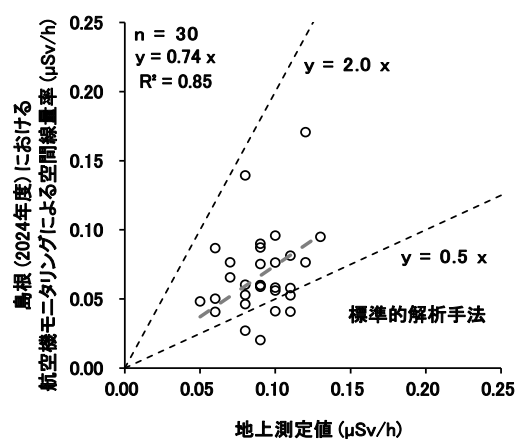


Fig. 4-20 島根における標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (重み付き直交距離回帰による RI 及び GI を用いた場合)

(左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

(1/2)

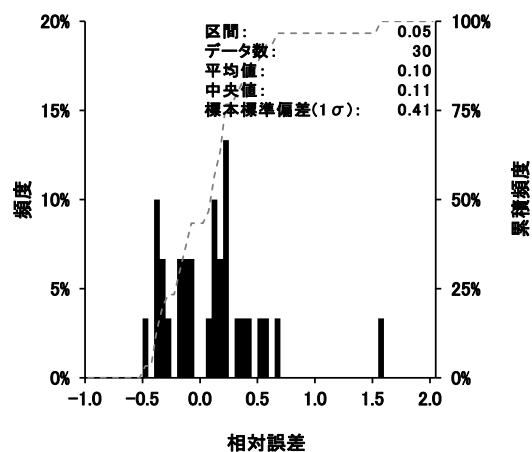
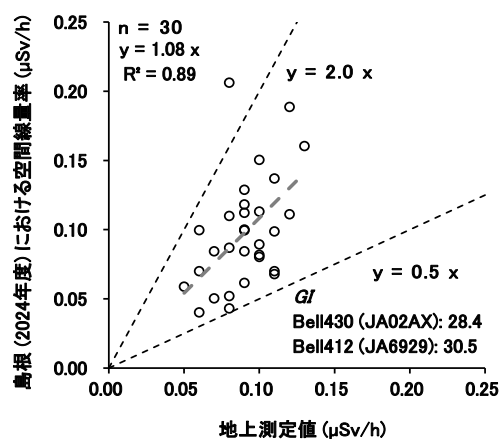
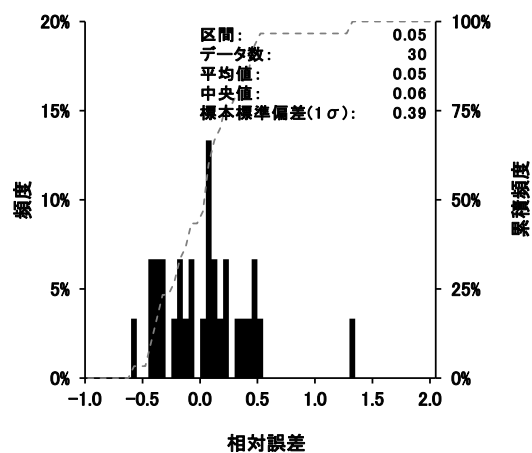
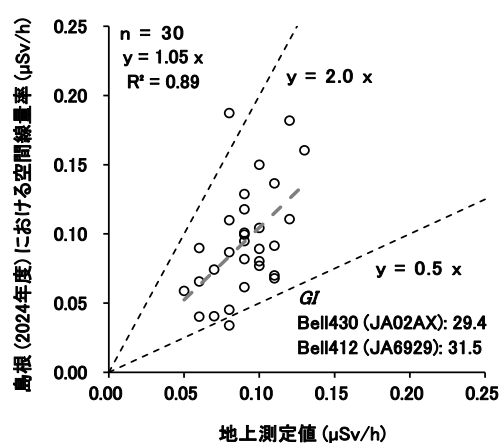


Fig. 4-20 島根における標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (重み付き直交距離回帰による RI 及び GI を用いた場合)

(2/2)

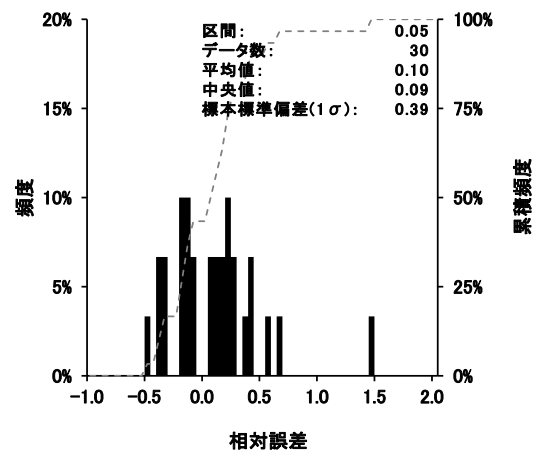
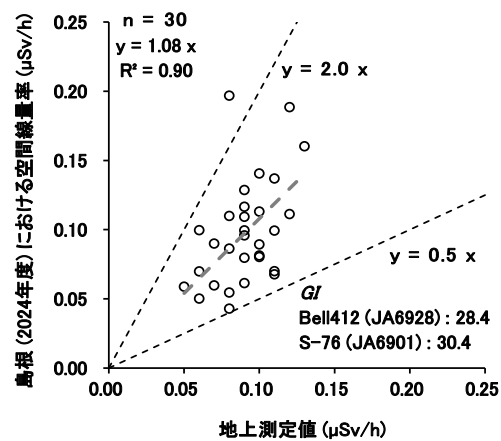
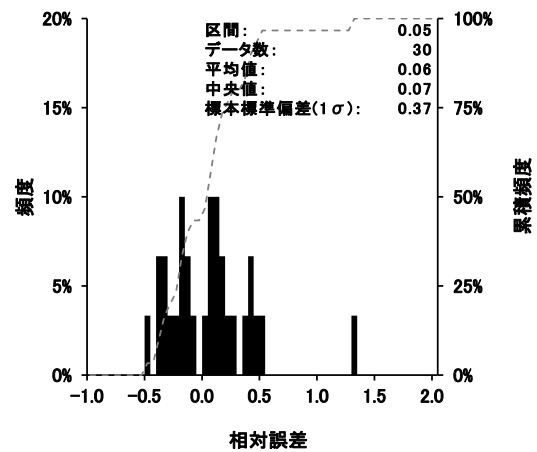
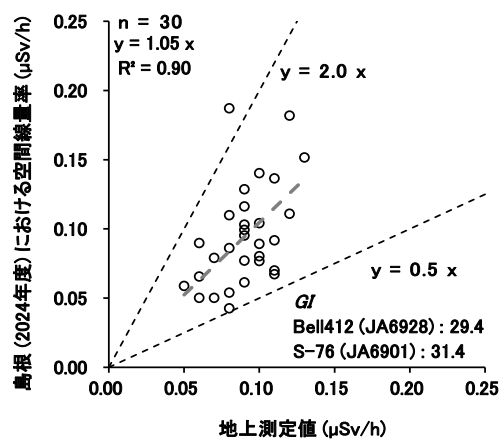


Fig. 4-21 島根におけるラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (最小二乗法による RI 及び GI を用いた場合)

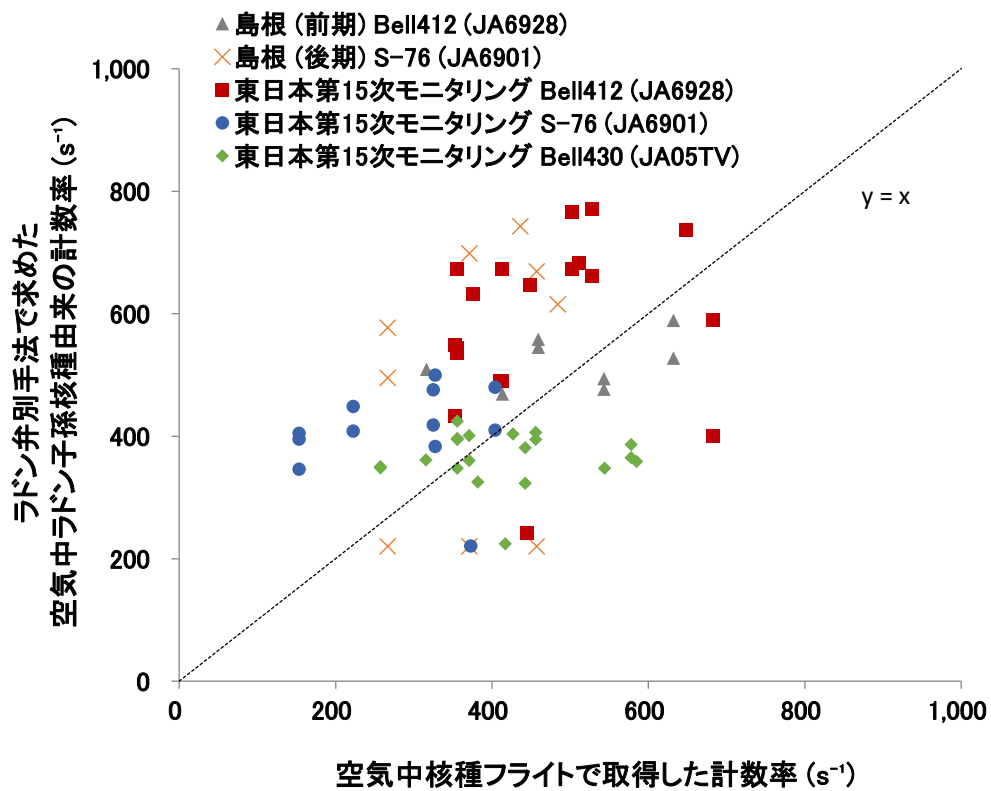


Fig. 4-22 空気中核種フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子孫核種由来の計数率の比較

4.8. 放射性セシウムの沈着量

島根における航空機モニタリング結果から、放射性セシウムの沈着量を評価した。放射性セシウムの沈着量マップを Fig. 4-23 に示す。このように、全範囲において検出限界値以下 ($\leq 10 \text{ kBq/m}^2$) となり、本測定エリアにおいて放射性セシウムは検出されなかった。なお、放射性セシウムの沈着量の計算手法及びマップの色合いの設定については、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²²⁾と同様とした。

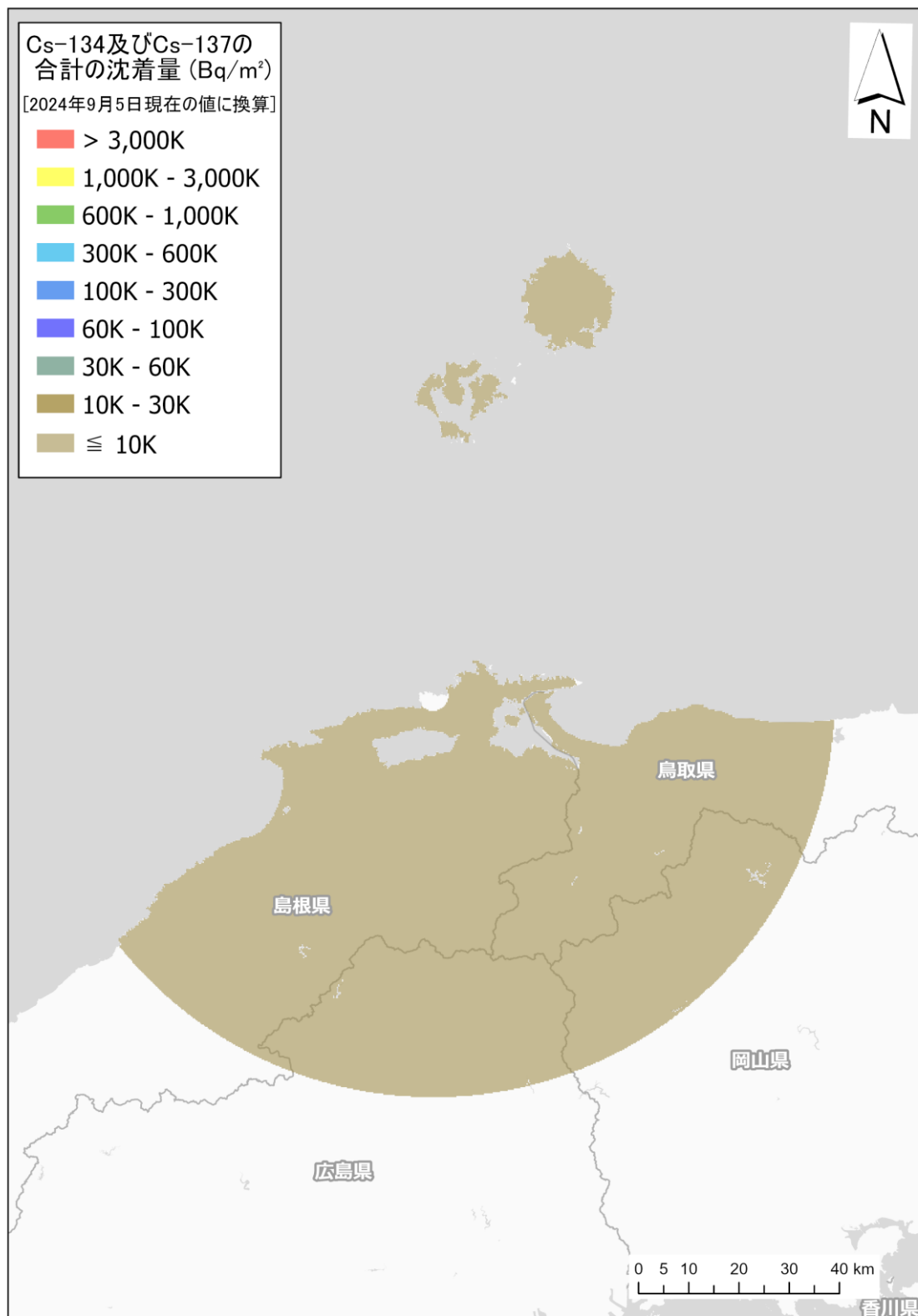


Fig. 4-23 島根における放射性セシウム沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

5. 原子力防災訓練における緊急時航空機モニタリング及び無人機の訓練フライト

本章では、規制庁受託の一環として実施した、2024 年度 (令和 6 年度) の内閣府主導による原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングの概要及び本訓練で得られた実働上の課題について述べる。本訓練の対象サイトは川内原子力発電所であった。無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンによる訓練フライトは、長崎堤防を離発着点として実施した。また、有人ヘリコプターについては、航空自衛隊新田原基地を離発着点として、鹿児島県薩摩川内市、いちき串木野市、姶良市、鹿児島市及び日置市の上空において緊急時航空機モニタリング訓練を実施した。

5.1. 原子力総合防災訓練等に係る航空機モニタリングの経緯

第 1 章で述べた通り、緊急時モニタリングの一環として、航空機モニタリングを実施することが原子力災害対策マニュアル²²⁾に定められている。緊急時における航空機モニタリングの実効性向上に資するため、内閣府が主体となって実施する原子力総合防災訓練等において規制庁及び防衛省 (自衛隊) と連携して航空機モニタリングに協力してきた (Table 5-1)。なお、令和 3 年度 (2021 年度) の北海道原子力防災訓練については防衛省 (陸上自衛隊) から航空機モニタリングシステムの使用許可が得られなかったため、モニタリングは実施せず、事前に策定したフライトプランに沿ってフライトするのみに留まった。

Table 5-1 原子力総合防災訓練等における航空機モニタリング実施状況

訓練名 (実施年日)	対象サイト (モニタリングまたはフライト地域)	使用機体 (所有組織)	機体の 離発着地点
航空機モニタリング訓練 (2016年11月7日)	なし (千葉県富津市)	CH-47 (陸上自衛隊木更津駐屯地)	千葉県 木更津駐屯地
平成29年度 原子力総合防災訓練 (2017年9月4日)	玄海 (長崎県壱岐市)	UH-60 (航空自衛隊芦屋基地)	福岡県 芦屋基地
平成30年度 原子力総合防災訓練 (2018年8月26日)	大飯・高浜 (滋賀県高島市)	UH-60 (航空自衛隊小松基地)	石川県 小松基地
平成30年度 北海道原子力防災訓練 (2018年10月22日)	泊 (北海道小樽市から余市郡赤井川村)	UH-1J (陸上自衛隊丘珠駐屯地)	北海道 丘珠駐屯地
令和元年度 原子力総合防災訓練 ¹⁵⁾ (2019年11月8日～10日)	島根 (鳥取県米子市、南部町、 島根県安来市)	UH-60 (航空自衛隊芦屋基地)	島根県 美保基地
令和2年度 原子力総合防災訓練 ¹⁷⁾ (2021年2月7日)	女川 (宮城県登米市から宮城県松島町)	新型コロナウイルス感染症に関する緊急事態宣言の発令に伴い、中止となった。	
令和3年度 北海道原子力防災訓練 ¹⁹⁾ (2021年10月27日～28日)	泊 (北海道小樽市から余市郡赤井川村) ※フライトのみ実施	UH-1J (陸上自衛隊丘珠駐屯地)	北海道 丘珠駐屯地
令和3年度 原子力総合防災訓練 ¹⁹⁾ (2022年2月11日～12日)	女川 (宮城県登米市から宮城県松島町)	訓練対応者に新型コロナウイルス感染症の罹患者が認められたため、中止となった。	
令和4年度 原子力総合防災訓練 ²¹⁾ (2022年11月4日～6日)	美浜 (岐阜県揖斐郡揖斐川町、滋賀県米原 市、長浜市、高島市)	UH-60 (航空自衛隊小牧基地)	愛知県 小牧基地
令和5年度 原子力総合防災訓練 ²³⁾ (2023年10月28日～29日)	柏崎刈羽 (新潟県柏崎市)	無人航空機:Penguin C 無人ヘリコプター:FAZER R G2 マルチコプター:Matrice 300 RTK (株式会社JDRONE)	新潟県 柏崎中央海水浴場
	柏崎刈羽 (新潟県柏崎市、上越市、十日町市)	UH-60 (航空自衛隊新潟分屯基地)	新潟県 新潟分屯基地
令和6年度 原子力総合防災訓練 (2025年2月14日～15日)	川内 (鹿児島県薩摩川内市)	無人航空機:Penguin C 無人ヘリコプター:FAZER R G2 マルチコプター:Matrice 30 (株式会社JDRONE)	鹿児島県 長崎堤防
	川内 (鹿児島県薩摩川内市、いちき串木野 市、姶良市、鹿児島市、日置市)	UH-60 (航空自衛隊新田原基地)	宮崎県 新田原基地

5.2. 令和 6 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングの全体概要

令和 6 年度原子力総合防災訓練における原子力発電所事故の想定⁶⁵⁾を以下に示す。

『鹿児島県薩摩半島西方沖を震源とした地震が発生する。これにより、定格熱出力一定運転中の川内原子力発電所 1 号機及び 2 号機の原子炉が自動停止する。さらには、1 号機において設備の故障が重なり、原子炉注水機能を喪失する事象が発生し、施設敷地緊急事態、全面緊急事態に至る。』

このように事故が進展していく中で周辺環境中に放射性核種が放出されたと想定し、規制庁緊急時対応センター（以下、ERC）放射線班から原子力緊急時支援・研修センター（以下、NEAT）に航空機モニタリング出動要請が発出された。放射性核種は発電所から南東方向に拡散したと想定された。

5.2.1. 無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンによる訓練フライト

無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンの訓練フライトは鹿児島県薩摩川内市の長崎堤防を離発着点として実施した。事前に計画した飛行範囲及び飛行予定経路を Fig. 5-1 に示す。無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンによる訓練フライトに必要な資機材は 2025 年（令和 7 年）2 月 10 日に福島県南相馬市から鹿児島県薩摩川内市までバン型車両 2 台にて陸上輸送した。2 月 14 日に長崎堤防において、無人航空機（Edge Autonomy 社製 Penguin C、Fig. 5-2 (a)）、無人ヘリコプター（ヤマハ発動機社製 FAZER R G2、Fig. 5-2 (b)）及びドローン（DJI 社製 Matrice 30、Fig. 5-2 (c)）の各機体のフライト準備作業とリハーサルを実施した。2 月 15 日に、各機体の訓練フライトを実施した。また、当日それぞれの機体に搭載した放射線検出器も Fig. 5-2 (d)、Fig. 5-2 (e) 及び Fig. 5-2 (f) に併せて示す。それぞれ、検出器の情報を地上にリアルタイムにダウンリンクするシステムを有している（Fig. 5-3）。無人ヘリコプター及び無人航空機は、原子力機構の開発したリアルタイム通信及び逐次解析システム SkyDataLink（準リアルタイムに地表面から 1 m の高さの空間線量率への換算及びマッピングが可能なシステム）を使用し、空間線量率分布マップを描写した。また、ドローンについては、LTE 通信によるデータ収集が可能な検出器を採用した。SkyDataLink により、空間線量率の時系列データを描写した。なお、本訓練後に、無人航空機についても無人ヘリコプターやドローンと同様に、無線通信により PC 上でデータを表示及び確認できるよう、システムのプログラムを改良した。

2 月 14 日のリハーサル及び 2 月 15 日の訓練フライトのタイムテーブルは Table 5-2 の通りである。2 月 14 日は、午前 10 時までに基地局準備と無人ヘリコプター及びドローンのフライト準備作業を完了し、無人ヘリコプター、ドローンのモニタリングを実施した。なお、無人航空機については放射線検出器の搭載、フライト準備作業（エン

ジンテストまで)を進めた。2月14日に行った各検出器のモニタリング結果を Fig. 5-4 に示す。これらモニタリングを実施したエリアの大部分は河川上空であることから、空間線量率の値は必ずしも正確でない。無人ヘリコプターと無人航空機については、上空で得られた計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算した。マルチコプターについては、地表面から 20 cm の高さで得られた空間線量率に対して、帰還困難区域で得られた換算係数をかけることで、地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算した。この換算係数は、マルチコプター用検出器を地表面から 20 cm 及び 1 m の高さに設置し、それぞれ空間線量率を測定することで評価した。各検出器とも、問題なく測定データをダウンロードし、SkyDataLink にてデータ表示ができたが、無人ヘリコプターによるモニタリング中に、検出器の電源が遮断される事象が発生した。この事象の発生後、無人ヘリコプター機体から検出器へ電源を直接供給していたのを、データ処理等を行う装置から外部供給するよう変更したことで正常に動作することを確認し、2月14日のリハーサルを終了した。この事象の原因を訓練後に調査した結果、検出器内部の電源基盤に不具合があることが分かったため修理した。

2月15日は、午前10時までに基地局準備と無人ヘリコプター及びドローンのフライト準備作業を完了し、同日午後1時以降、無人ヘリコプター、ドローン、無人航空機のモニタリングを実施した。無人航空機は、当日の風向きが北西風であり、それに合わせて北西方向へと離陸した。また、当日に訓練フライトを視察していた原子力に関わる行政担当者や報道機関、海外視察団からモニタリング機器の仕組みや運用方法、データの共有や解析に関する質問が多く寄せられた。各関係機関による視察の状況を Fig. 5-4 に示す。2月15日に行った各検出器のモニタリング結果を Fig. 5-4 に示す。無人ヘリコプターを含む全ての無人機用検出器についてモニタリングデータをダウンロードし、SkyDataLink 上で確認できた。マルチコプター用検出器は2式あり、内1式をマルチコプター搭載用、他方を基地局での展示用とした。マルチコプター用検出器についても空間線量率の時系列データをダウンロードし、SkyDataLink 上で確認できた。無人航空機については、当初の予定通り基地局南方の田んぼの上空にてパラシュートを開傘し、機体及び検出器に損傷なく安全に着陸させることができた。

Table 5-2 無人航空機、無人ヘリコプター及びマルチコプターによる訓練フライトの
タイムテーブル

時刻 (2025年2月14日)	実施内容			
	無人航空機 Penguin C	無人ヘリ FAZER R G2	ドローン Matrice 30	基地局
9:00	準備	準備	準備	基地局準備
10:00		モニタリング (30分)	モニタリング (10分)	
11:00				
	エンジンテスト			
12:00				
13:00		モニタリング (15分)		
14:00				
15:00				基地局撤去
16:00				

時刻 (2025年2月15日)	実施内容			
	無人航空機 Penguin C	無人ヘリ FAZER R G2	ドローン Matrice 30	基地局
9:00	準備	準備	準備	基地局準備
10:00				
11:00				
12:00				
13:00	モニタリング (40分)	モニタリング (30分)	モニタリング (10分)	
14:00				
15:00				基地局撤去
16:00				

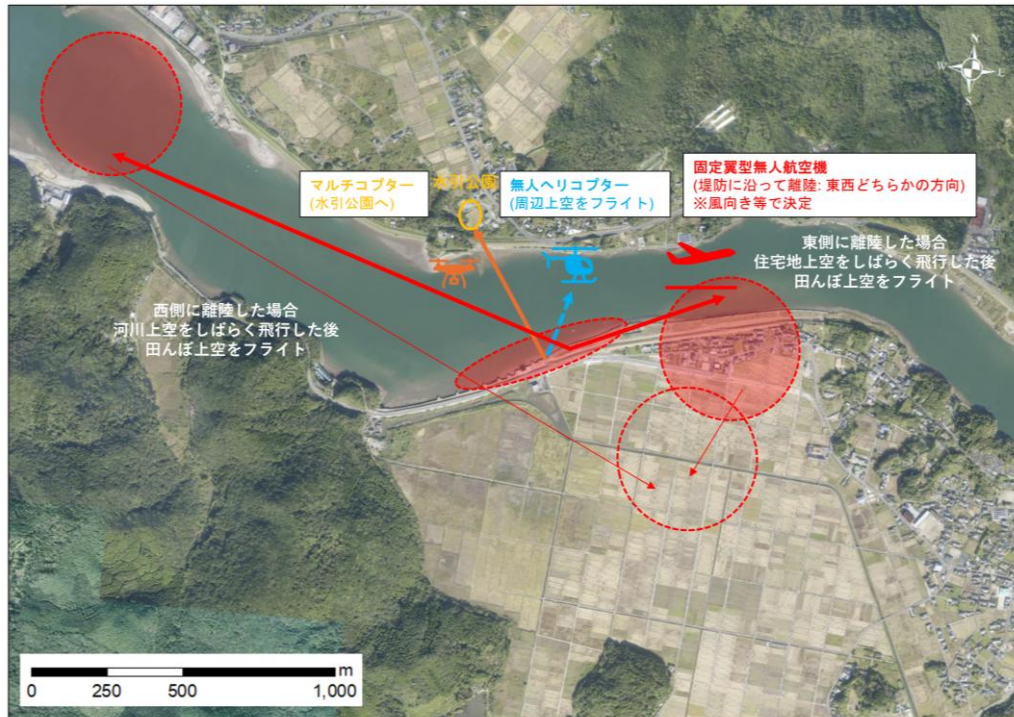


Fig. 5-1 無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンの飛行範囲と飛行予定経路
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁶⁾飛行範囲及び飛行予定経路を追記して掲載)

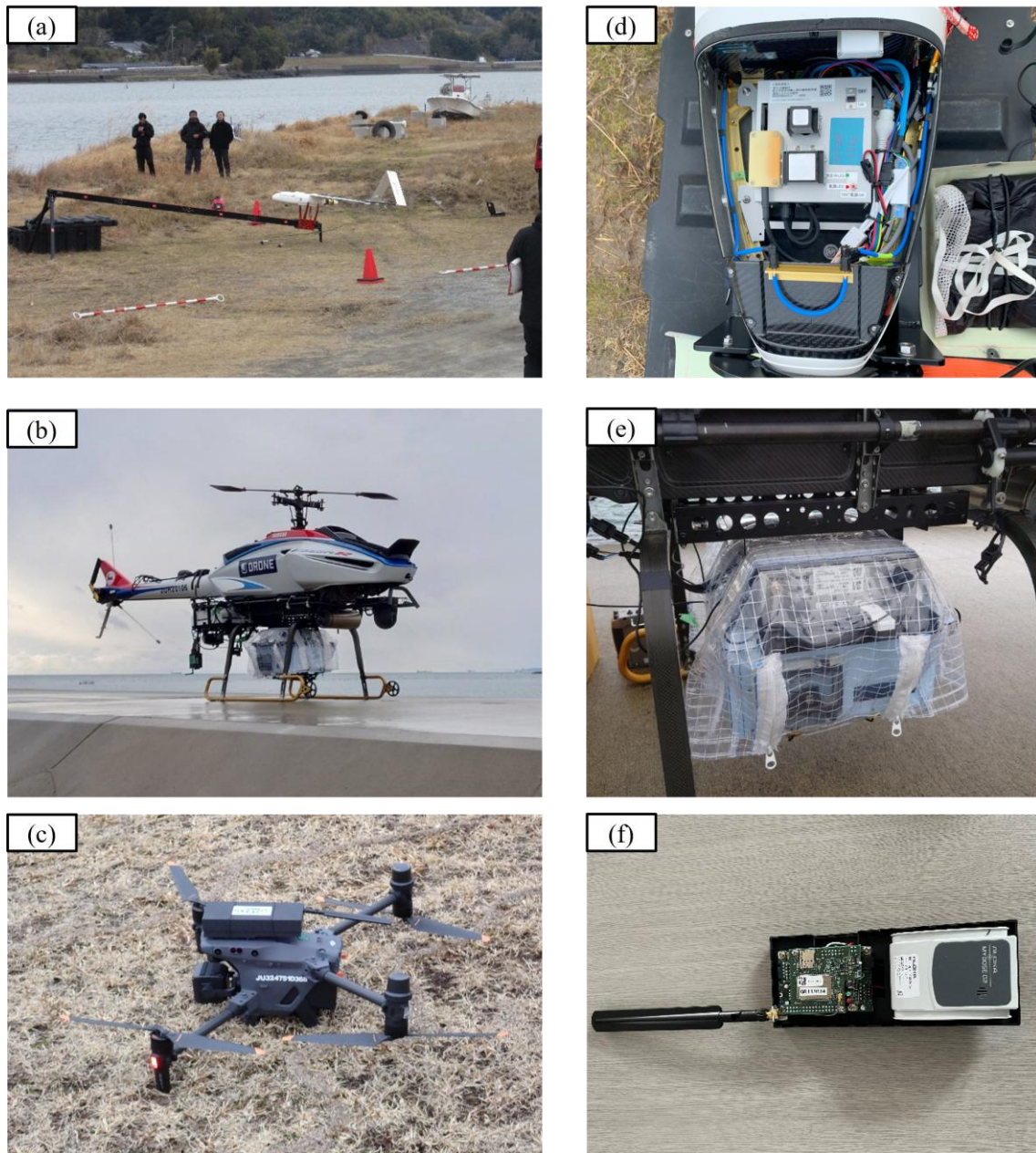


Fig. 5-2 モニタリングに用いた機体及び放射線検出器

機体：(a) 無人航空機 (Edge Autonomy 社製 Penguin C)、(b) 無人ヘリコプター (ヤマハ発動機社製 FAZER R G2)、(c) ドローン (DJI 社製 Matrice 30)

放射線検出器：(d) プラスチックシンチレータ及び GAGG、(e) CeBr₃ 検出器、(f) Si 半導体検出器

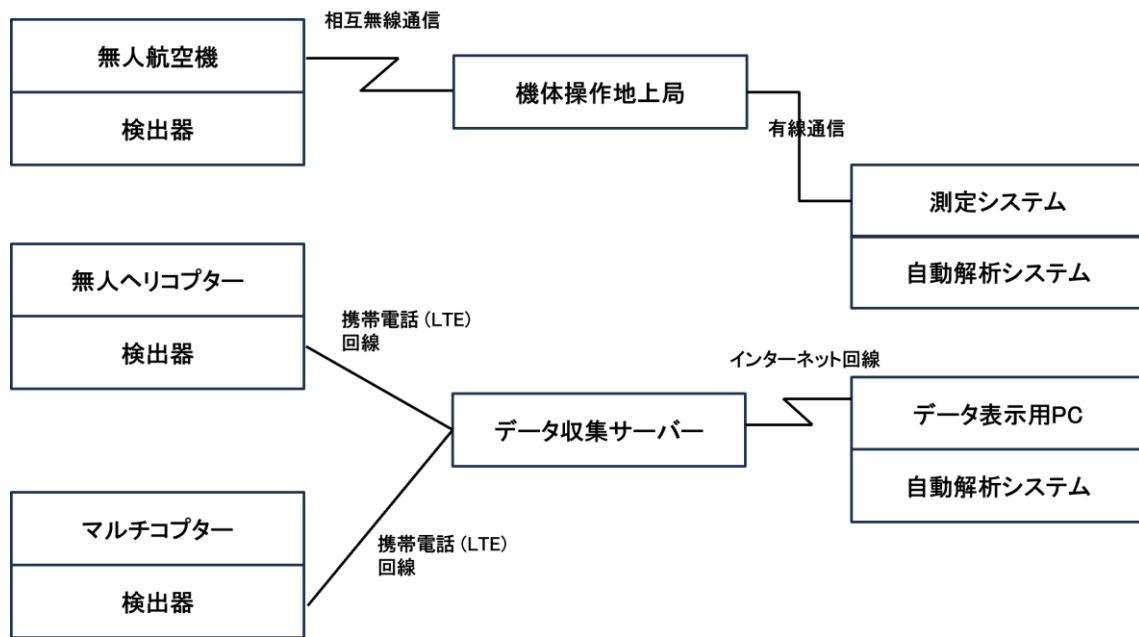


Fig. 5-3 訓練フライトに用いたシステムの構成

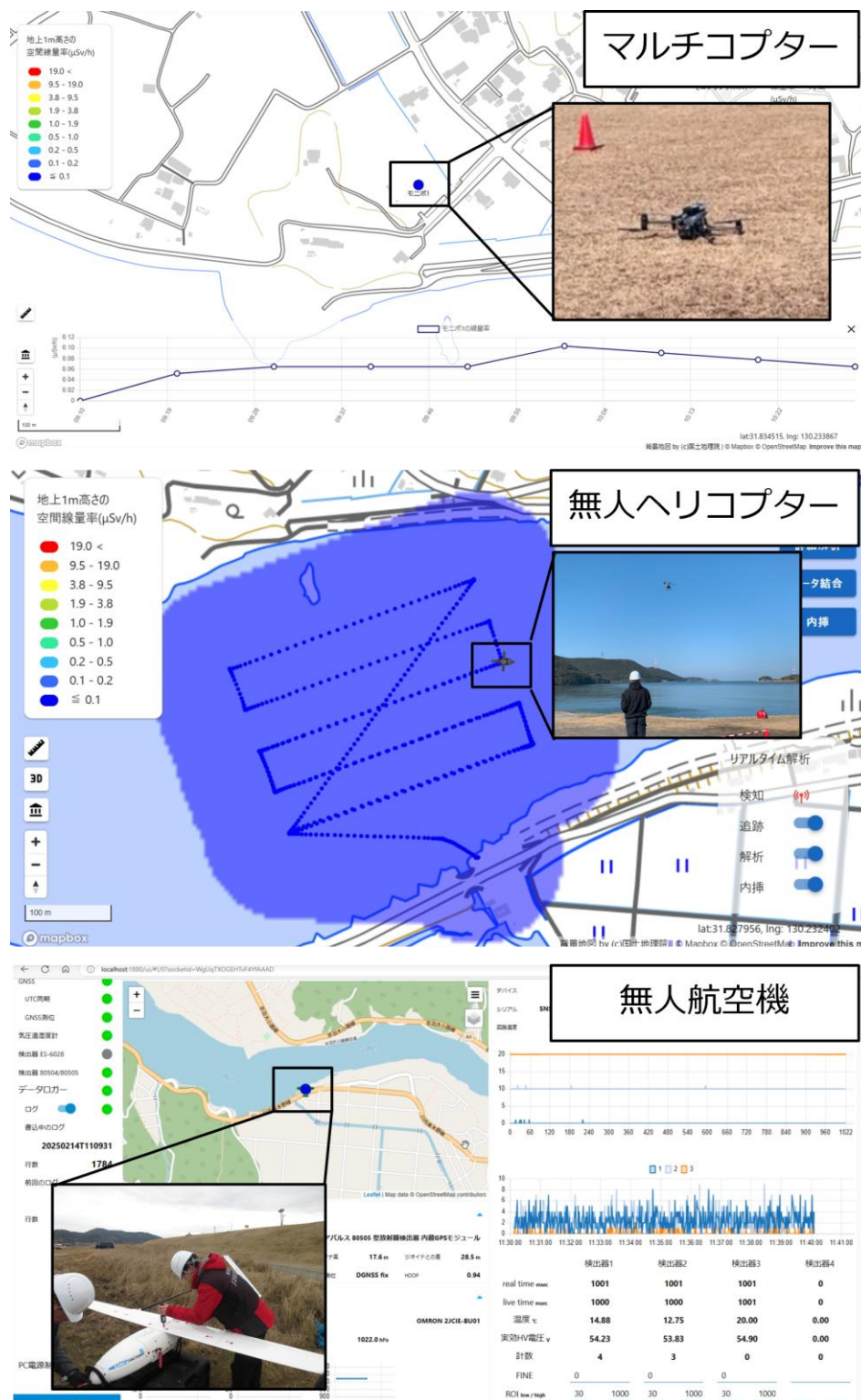


Fig. 5-4 2月14日時点の各検出器の測定データのダウンロード結果
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁶⁾に飛行軌跡及び空間線量率を追記して掲載)



Fig. 5-5 関係機関による訓練フライト視察の様子 (2025 年 2 月 15 日)

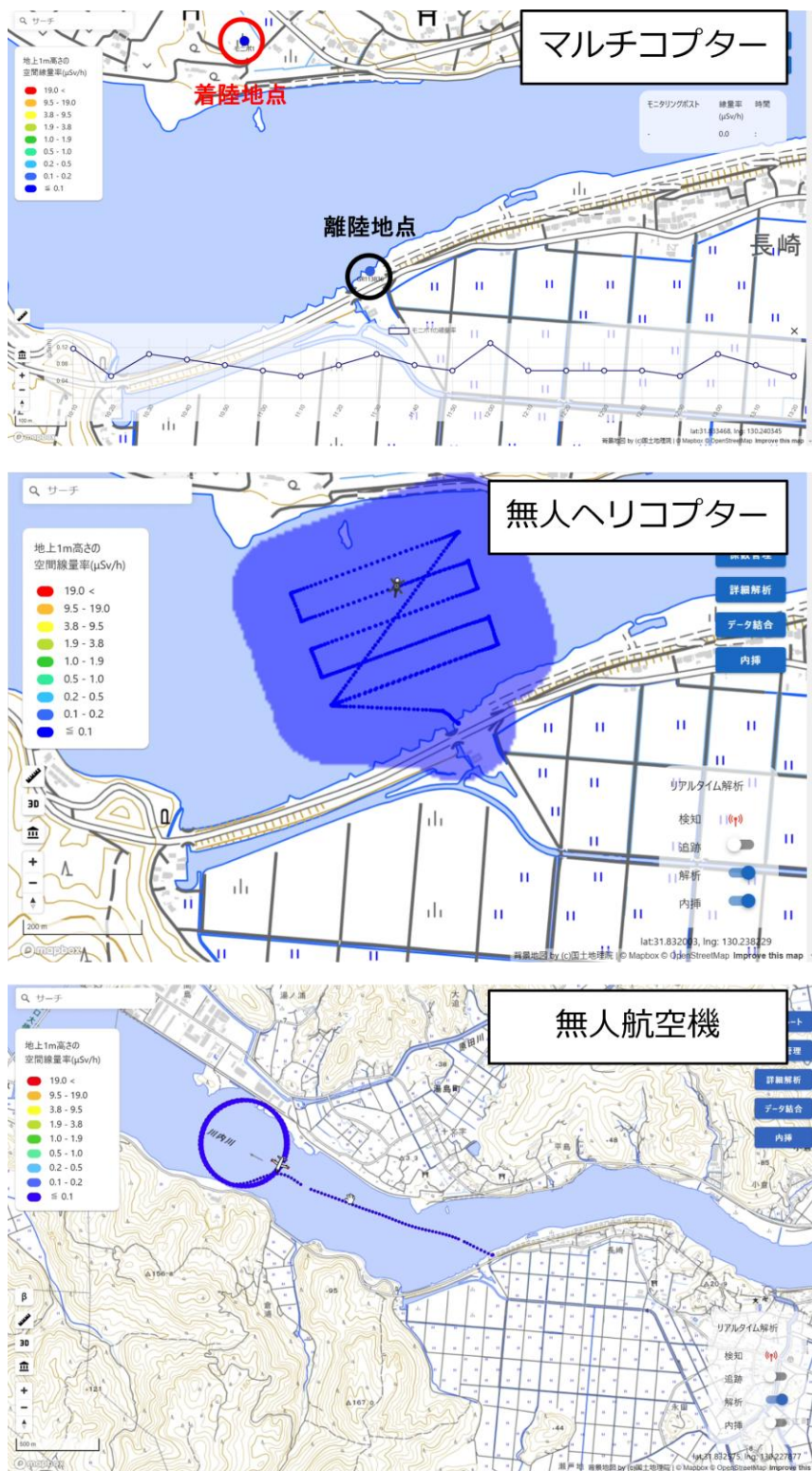


Fig. 5-6 各検出器による測定データのダウンリンク結果 (2025 年 2 月 15 日)
(背景地図は、地理院地図 Vector⁶⁶⁾に飛行軌跡及び空間線量率を追記して掲載)

5.2.2. 自衛隊の有人ヘリコプターによる緊急時航空機モニタリング

有人ヘリコプターによる緊急時航空機モニタリングは、航空自衛隊新田原基地を離発着点として、測線 1 の西端から進入し、以降は測線 2 から測線 7 まで順番に飛行するものとした。(Fig. 5-6)。この時、基準対地高度は 300 m ($\approx$ 1,000 ft)、上限対地高度は 530 m ($\approx$ 1,750 ft)、下限対地高度は 0 m と設定した。

航空機モニタリングシステムは緊急時モニタリング用ラック¹¹⁾に取付け、リアルタイムデータ通信システム¹³⁾も含めて、2025 年(令和 7 年)2 月 12 日に NEAT から新田原基地へ輸送した。2 月 14 日に新田原基地で航空機モニタリングシステムを積み下ろし、本訓練で使用したヘリコプター UH-60 (Fig. 5-7) に搭載し、ケーブル接続等を行った。搭載完了後の航空機モニタリングシステムを Fig. 5-8 に示す。

本項の冒頭に述べたフライトプランに基づき、2 月 15 日に緊急時航空機モニタリングを実施した。Table 5-3 に当日のタイムテーブルを示す。航空機モニタリング要員として NEAT から参加した 3 名が現地対応し、うち 2 名が機体に搭乗して 1 時間 10 分程度かけてモニタリング(測線フライト)を行った(Fig. 5-9)。また、全ての測線フライトを完了した後、新田原基地への帰還途中に、鹿児島県曾於市と都城市の境界付近の陸域で空気中核種フライトを実施し得られた γ 線計数率を、地表面から 1 m の高さの空間線量率の評価に妨害となる成分を差し引くの用に用いた。なお、リアルタイムデータ通信システムのイリジウム衛星²⁾へのデータ送信間隔は 30 秒に 1 回に設定した。緊急時航空機モニタリングのフライト中は新田原基地のパイロットと NEAT 航空機モニタリング要員とで密にコミュニケーションを取り、RSI システム及び高精度 GPS システムに備えられているナビゲーション機能も適宜利用して、パイロットへのフライト指示を確実に行った。残りの 1 名は地上に待機し、緊急時航空機モニタリングのフライト中にリアルタイムデータ通信システムにより、航空機モニタリングデータがリアルタイムに電子地図上に表示されることを確認した(Fig. 5-10)。リアルタイムデータ通信システムから伝送されるデータの途切れが時々見られたが、これはシステムの異常ではなく、イリジウム衛星の使用状況や天候の状況により発生する偶発的事象である。

緊急時航空機モニタリング終了後はデータ解析及びマッピングを行った。UH-60 に対する換算パラメータは過去に取得したものの内、最も信頼性が高いパラメータセットを選定し適用した。具体的には、*CR-Index* 及び *AF* については平成 30 年度原子力総合防災訓練で取得した数値、*CD* については 2011 年に福島原子力発電所周辺における

*2 イリジウム衛星は、地球低軌道を周回する 66 基の通信衛星で構成されるグローバルな衛星通信ネットワークである。地上の通信インフラが整備されていない地域でもデータ通信が可能である。リアルタイムデータ通信システムにおいては、ヘリコプター機内から γ 線計数率及び GPS 測位データの送信に利用される。

航空機モニタリングで取得した数値を用いた (Table 5-4)。解析結果を基に作成した空間線量率分布マップを Fig. 5-11 に示す。なお、空間線量率分布マップは、規制庁が運用している放射線モニタリング情報共有・公表システム (以下、RAMIS) で表示可能な Keyhole Markup Language (以下、KML) 形式に変換し、併せて NEAT に伝送した。本マップの色分けは住民等に対する防護措置の実施判断に活用しやすくするため、以下の基準に沿って設定した。

- ・ 赤色：500 $\mu\text{Sv/h}$ 超過 (緊急防護措置としての OIL1 を超過)
- ・ 黄色：20 $\mu\text{Sv/h}$ ～500 $\mu\text{Sv/h}$ (早期防護措置としての OIL2 を超過)
- ・ 緑色：0.5 $\mu\text{Sv/h}$ ～20 $\mu\text{Sv/h}$ (飲食物に係るスクリーニング基準を超過)
- ・ 水色：0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 未満 (防護措置を実施する判断基準未満)

データ解析を開始してから空間線量率分布マップを完成させ NEAT 本部に伝送及び報告を完了するまで、25 分程度であった。その後、本マップ及び KML ファイルを NEAT 本部から ERC 放射線班へメールで送付し、緊急時航空機モニタリングの結果を報告した。同日中に KML ファイルが RAMIS で正常に表示されたことが規制庁で確認された。

緊急時航空機モニタリング中に取得した高精度 GPS 測位データに基づいた対地高度の推移を Fig. 5-12 に示す。測線 2 の中程と測線 3 の開始時に対地高度の許容上限である 1,750 ft 超過が見られたものの、空間線量率マップの作成に影響が及ばない程度であった。その他の測線上では基準対地高度である 1,000 ft 付近を概ね維持しながらフライトできた。

Table 5-3 令和 6 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングに係るタイムテーブル (2025 年 2 月 15 日)

時刻	実施内容
7:45	新田原基地に入域
8:00	飛行決心
8:30	RSIシステムチェック等の航空機モニタリング準備
9:00	新田原基地を離陸
9:30～10:40	測線1～測線7をフライト
11:10	新田原基地に着陸、航空機モニタリングシステムを取り外し
11:20～11:45	航空機モニタリングデータの解析、空間線量率分布マップの作成及び結果伝送
12:00	新田原基地から航空機モニタリング機材の搬出作業
12:50	新田原基地から退域

Table 5-4 UH-60 に対する換算パラメータの一覧

<i>CR-Index</i> (-)	<i>AF</i> (m^{-1})	<i>CD</i> ($\text{s}^{-1}/[\mu\text{Sv/h}]$)
2.45	-0.00394	10,300

※*CR-Index*及び*AF*については、平成30年度原子力総合防災訓練で取得したものである。

※*CD*については、2011年に福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングで取得した数値である。

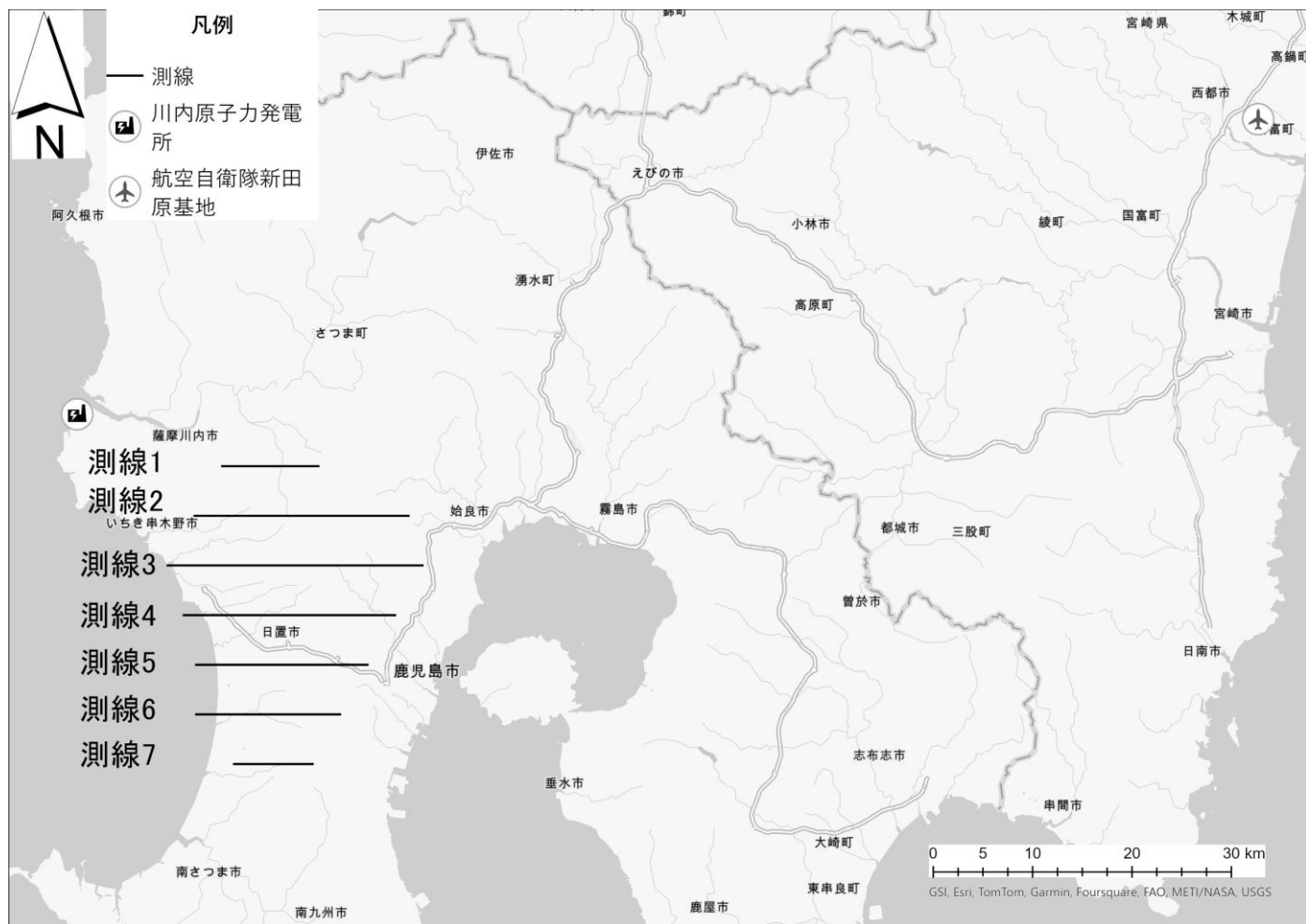


Fig. 5-6 令和6年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングのフライトプラン
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 5-7 令和 6 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングに使用したヘリコプター (UH-60)



Fig. 5-8 航空機モニタリングシステムの搭載状況



Fig. 5-9 令和 6 年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングのヘリコプター内での測定状況 (訓練)

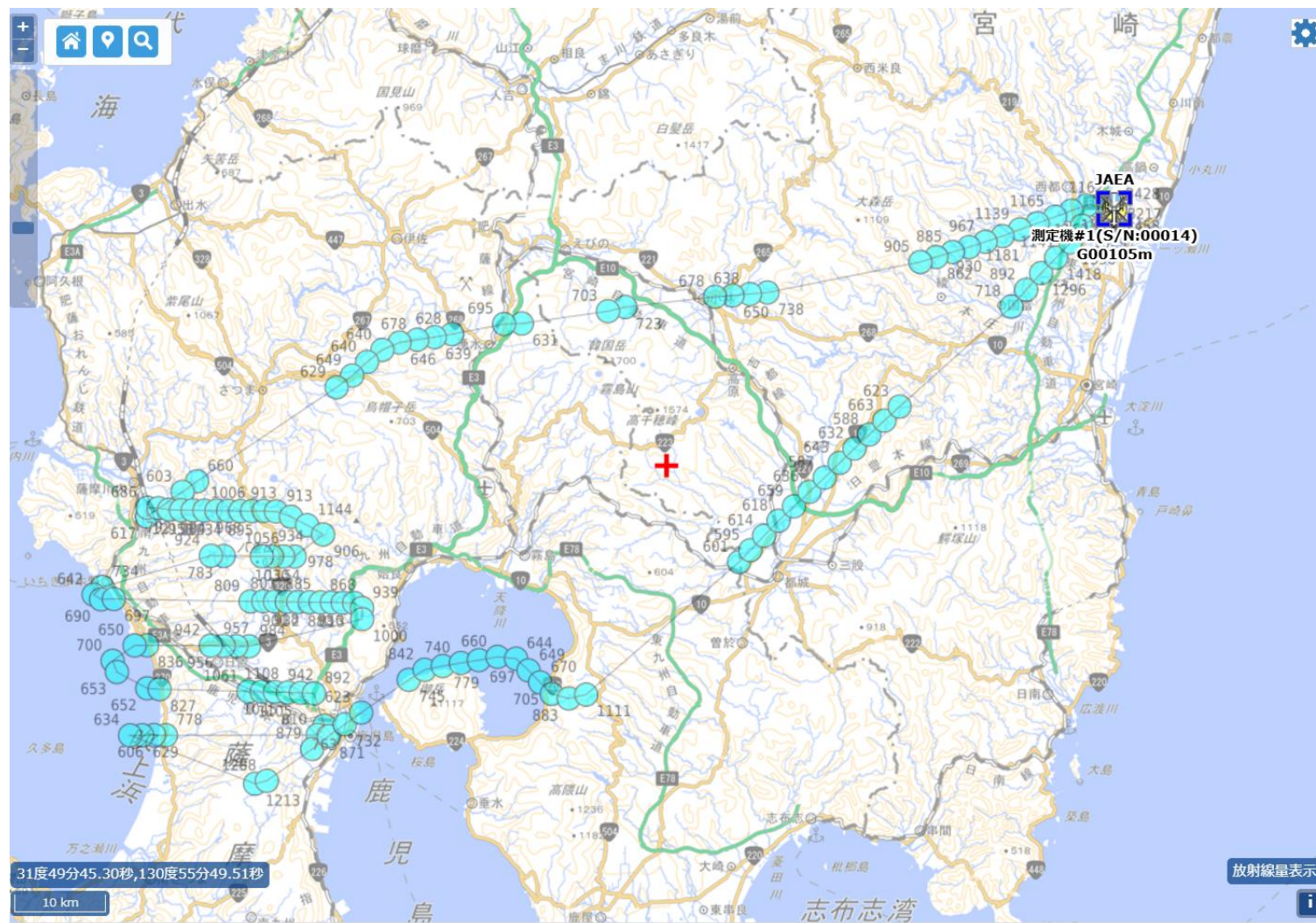


Fig. 5-10 リアルタイムデータ通信システムにより電子地図上に表示された航空機モニタリングデータ
(図中の水色のプロットはヘリコプターの飛行位置、プロット近傍の数値は γ 線計数率(s^{-1})を表す。)
(背景地図は、電子地形図 25000 (国土地理院)⁶⁷⁾に航空機モニタリングデータを追記して掲載。)

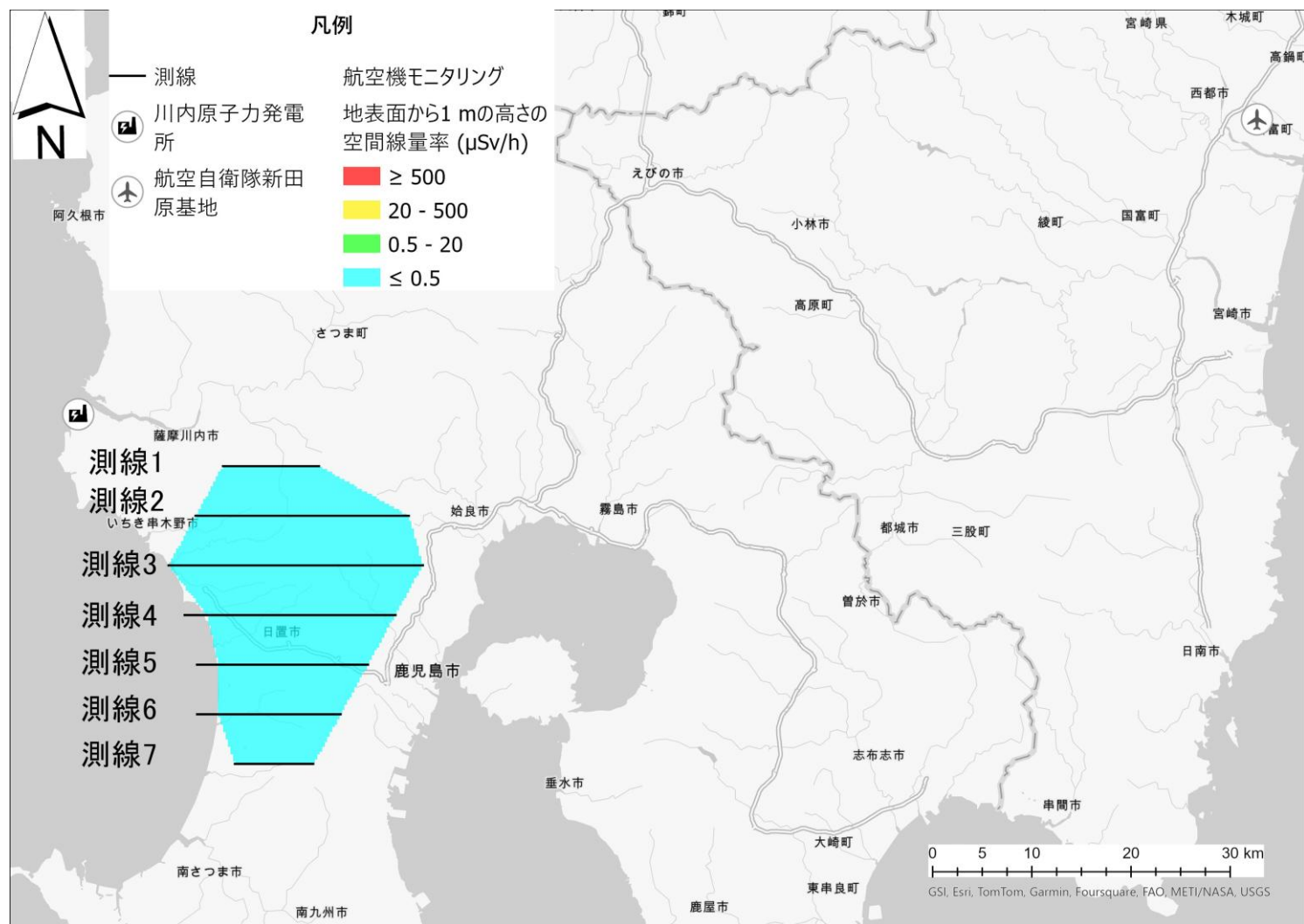


Fig. 5-11 令和6年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングによる空間線量率分布マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

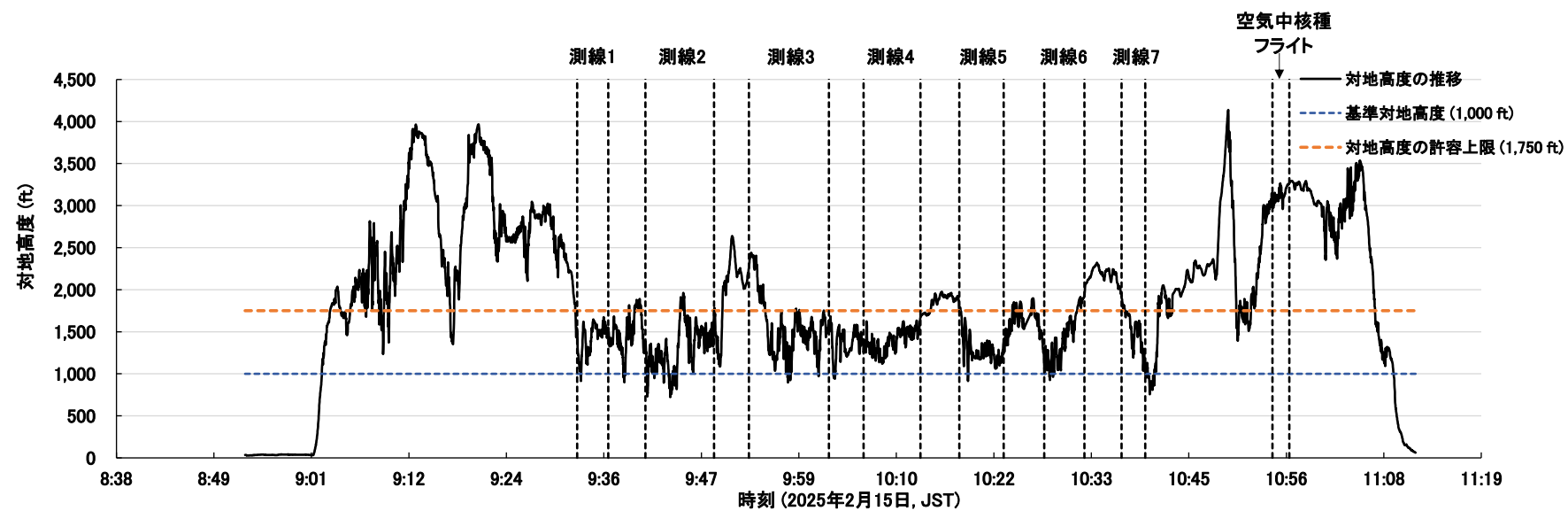


Fig. 5-12 緊急時航空機モニタリング中の対地高度の推移

5.3. 訓練から得られた緊急時航空機モニタリングの課題と課題に対する取り組み

令和 6 年度原子力総合防災訓練で実施した無人機の訓練フライト及び緊急時航空機モニタリングの各作業において抽出した課題を以下にまとめる。

5.3.1. 無人機の訓練フライトについて

日本国内では報告例の少ない、総合防災訓練での無人機の訓練フライトを実施できた。今回の訓練では、原子力機構のモニタリング専門家 4 名及び無人機運用事業者である株式会社 JDRONE9 名が対応した。訓練を通じて、以下の課題が明らかとなった。これらの課題に対し、今後の訓練や検討を通じて、実際の原子力災害時における最適な対応体制の構築を目指す。

- 訓練フライトの事前準備について

リハーサル及び訓練フライト当日は降雨がなく、平均地上風速約 4.0 m/s という好天であり、システムの展開は 1 時間程度で完了できたが、突風による影響で基地局用テントの設営が難航した。本訓練では、テントが飛ばされないよう重量物で抑えながら設営作業を進めた。原子力発電所の多くが海沿いに立地していることから、今回のように海風の影響を強く受ける場合を想定した基地局設営の事前訓練や、強風の影響を受けない設営方法について検討する必要がある。今後、同様の訓練を重ねることで、より多くの実務的課題を抽出できると考えられる。

- 天候不良時の対応について

マルチコプター、無人ヘリコプター、無人航空機は降雨 5 mm/h、地上風速 10 m/s での運航が可能とされている。しかしながら、無人航空機については、パラシュートでの着陸に十分なスペースが確保されていることが制約条件となる。昨年度の防災訓練²³⁾では降雨時の対応が課題であったため、無人ヘリコプター用検出器については防水用具を取り付けたことにより、降雨時であってもモニタリングが可能となった。マルチコプター用検出器については、生活防水には対応 (IPX4 相当) しているが、激しい降雨の場合には防水用フィルム等で検出器だけでなく、LTE 通信機も保護する必要がある。無人航空機用検出器については、防水機能を有しておらず、適用条件の更なる拡大のため検出器の防水機能の付加について検討すべきと考える。

- 無人機のシステムについて

原子力機構の開発したマルチコプター、無人ヘリコプター及び無人航空機用のリアルタイム通信並びに逐次解析システム SkyDataLink について、所定の性能及び有効性を確

認できた。本システムは、Web ブラウザで稼働する仕様となっており、専用のソフトウェアのインストールなしに PC での操作が可能である。無人ヘリコプター用検出器はリハーサル時に電源が遮断したため、検出器への電源供給方法を変更することでモニタリング可能な状態に復旧した。本訓練後に、この現象は無人ヘリコプター用検出器の電源基盤の不具合によるものであることが分かり、電源基盤を修理した。修理の際に必要な交換部品をあらかじめ用意するとともに、即座に修理が難しい場合の復旧方法について文書化しておくことで、このような不測の事態に対応できると考えられる。本訓練で複数の無人機を用いてほとんど同時にモニタリングさせることができ、飛行速度、適用距離がそれぞれ異なる無人機を組み合わせることで、原子力災害時に機動的な空間線量率測定が可能であることが確認できた。また、SkyDataLink に表示される空間線量率マップから OIL 判断等に資する情報を迅速に ERC 放射線班等の関係機関に共有できると考えられる。

- 原子力災害時の無人機モニタリングの対応体制構築について

原子力災害時に専門家や無人機の運用事業者を速やかに招集し、緊急時モニタリングに対応するための手順や連絡体制の整備が必要である。また、無人機の機体及び検出器の継続的な保守管理が必要となる。このため、無人機による緊急時モニタリングを実施するための実務マニュアル及び無人機モニタリングシステムの保守点検マニュアルの整備に取り組む予定である。さらに、緊急時モニタリング対応要員の技術向上を図るため、原子力防災訓練等で実動訓練の継続的实施が必要である。本訓練では、無人機のフライト場所の調整、手続き及び当日のスケジュールなど対象自治体の担当者と事前に密な打合せを実施した。実際の緊急時にはこのような事前打合わせは困難と予想されるため、無人機の離発着可能な場所、原子力発電所の立地地域の特徴及び航空管制の状況について文書化することは今後の課題である。

5.3.2. 緊急時航空機モニタリングについて

- 航空機モニタリングシステムの輸送について

本訓練では民間の輸送業者に委託して航空機モニタリングシステム等測定機材を NEAT からヘリコプターの離発着地点まで輸送した。今後、実際の緊急時に想定される航空機モニタリング機材等及び人員の輸送方法(例えば、NEAT から所定の自衛隊基地に航空機モニタリング機材等を輸送後、ヘリに積み込み、NEAT 航空機モニタリング対応要員とともにモニタリング拠点まで空輸する等)に基づいた訓練に取り組む必要があると考える。これにより、緊急時航空機モニタリングの準備段階で行うべき一連の作業をより具体化できる。

- 航空機モニタリングシステムの UH-60 への搭載について

航空機モニタリングシステムのヘリコプターへの搭載作業にあたっては、新田原基地の隊員からの協力を得て、概ね 30 分程度で設置及び動作確認を完了した。今年度までに対応した原子力防災訓練で抽出された課題に対して講じた対策が上手く機能することを確認した。今後、UH-60 以外の搭載作業も迅速に完了できるよう慣熟に努める必要がある。また、本訓練で対応した NEAT 職員が持つ豊富な作業経験を活かして同作業を迅速に完了できた側面がある。そのため、不慣れな者でも対応できるよう、NEAT 職員が培ってきた経験を作業マニュアル等に落とし込み、形式知化に取り組む必要がある。

- データ解析、空間線量率マッピングについて

データの解析に着手してから空間線量率分布マップの作成及び NEAT 本部への伝送完了まで概ね 25 分程度で完了した。空間線量率分布マップの作成に用いる測定データの選別作業を高速化できれば、更なる短縮が可能である。また、KML 形式に変換した空間線量率分布マップが RAMIS に表示されることが確認でき、緊急時における航空機モニタリング結果の共有方法が構築できたと考える。今後、RAMIS で航空機モニタリング結果が視認及び活用しやすくなるよう、KML のプロパティ (色の透明度、セル罫線の太さ、データクリック時のポップアップ情報などの設定) を具体化することが必要である。

- リアルタイムデータ通信システムについて

Fig. 5-10 に示した通り、リアルタイムデータ通信システムでは、RSI システムの測定データ (γ 線計数率) をそのまま電子地図上に表示するのに留まっているのが現状である。本システムを住民等に対する防護措置の実施判断や詳細な緊急時モニタリング計画の立案に活用しやすくするために、地表面から 1 m の高さの空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) に換算した上で電子地図上に表示が可能となるプログラムの開発及び導入を 2025 年度 (令和 7 年度) に予定している。

6. 無人機データ収集システムの整備

福島原子力発電所事故後、原子力災害時における事故後の対応について「原子力災害対策マニュアル²⁴⁾」が大幅に改定された。改定された原子力災害対策マニュアルでは、緊急時モニタリング体制の強化や情報伝達手段の見直しなどが盛り込まれた。これに対応するためには、モニタリング技術の高度化や関係機関との連携体制の強化等に取り組む必要がある。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 : UPZ) の OIL (Operational Intervention Level) の区域設定や、スクリーニングの重要性分類のため、エリアの空間線量率の測定 (緊急時モニタリング) を迅速かつタイムリーに実施する必要がある。

この必要性に応えるため、本事業では無人航空機を活用した迅速な緊急時モニタリングシステムの開発と、その運用体制の構築に取り組んできた。2019年度(令和元年度)から2022年度(令和4年度)にかけて、長時間運用が可能である商用化された無人航空機 (Edge Autonomy, Penguin C)を用いて、緊急時モニタリングにおける無人航空機の運用のための慣熟訓練を実施するとともに、原子力災害時に無人航空機を運用する際に必要となる機能等の検討を行ってきた^{15),17),19),21)}。2023年度(令和5年度)は、上述した緊急時モニタリングにおける無人航空機に係る課題を踏まえ、これまで検討してきた機能を考慮した無人航空機搭載用放射線測定システムの開発及び製作を行った²³⁾。2024年度(令和6年度)は、これまで本事業及び別事業等で開発してきた、各無人機の測定データを一挙に確認できる基本システムの構築を行った。本章では基本システムを元に構築した無人機データ収集システムの詳細、また構築したシステムによる各無人機のデータ収集例について述べる。Fig. 6-1に本事業で構築したシステムの概要図を示す。

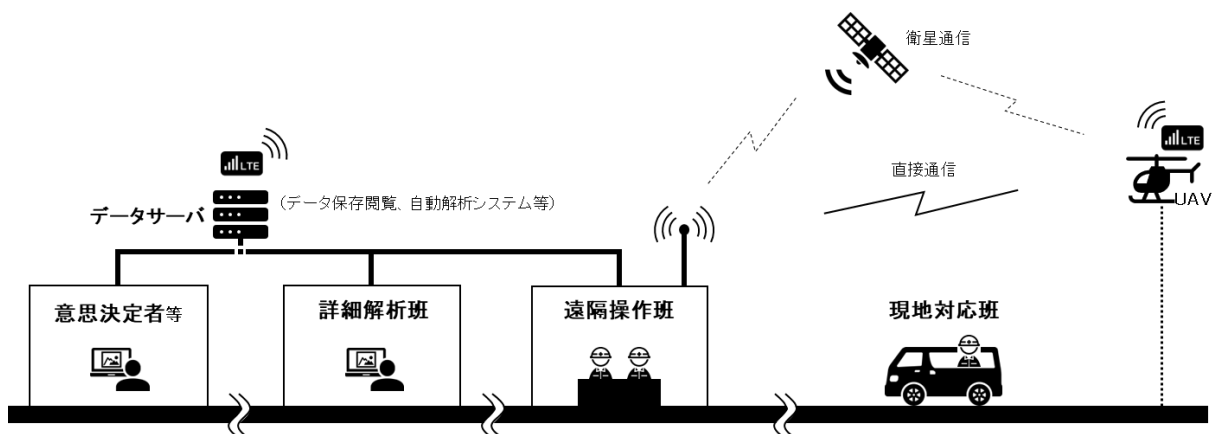


Fig. 6-1 測定システムの概要

6.1. 無人機データ収集システムについて

6.1.1. システム概要

無人機データ収集システム (株式会社 JDRONE 製, SkyDataLink) は、LTE (Long Term Evolution) 通信を用いてサーバ上にアップロードされた放射線検出器等の情報を管理、閲覧、編集できる機能を保持したシステムである。Fig. 6-2 に無人機データ収集システムの概要を示す。LTE 通信により送信されたデータはサーバ上に蓄積され、測定ポイント等を Web ブラウザ上でリアルタイムに確認することができる。無人機データ収集システムのトップページを Fig. 6-3 に示す。無人機データ収集システムには、各種機器のデータ確認及び編集ができる他、解析に使用する地形データ (数値標高モデル (DEM)、数値表層モデル (DSM)、オルソ画像等の TIFF データ) の管理、データ送信元の機器情報の管理、測定ルートの作成、システムのアカウント管理、測定員情報の管理、プロジェクトの管理等を行う機能が備えられている。現在、本システムにデータ送信を行うことができる機器の一覧を Table 6-1 に示す。なお、測定機器がデータ送信機能を保持していれば、Table 6-1 に示した以外の機器も無人機データ収集システムに登録設定を行うことで運用することが可能である。

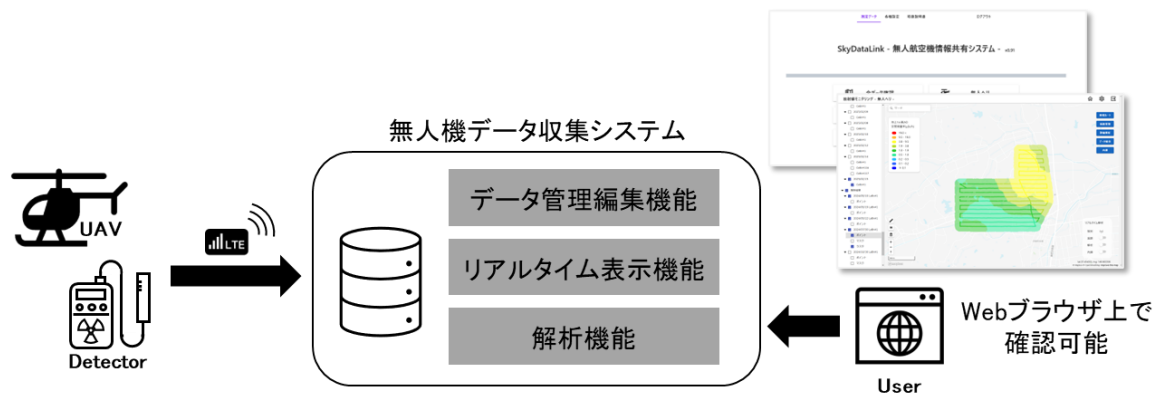


Fig. 6-2 無人機データ収集システムの概要

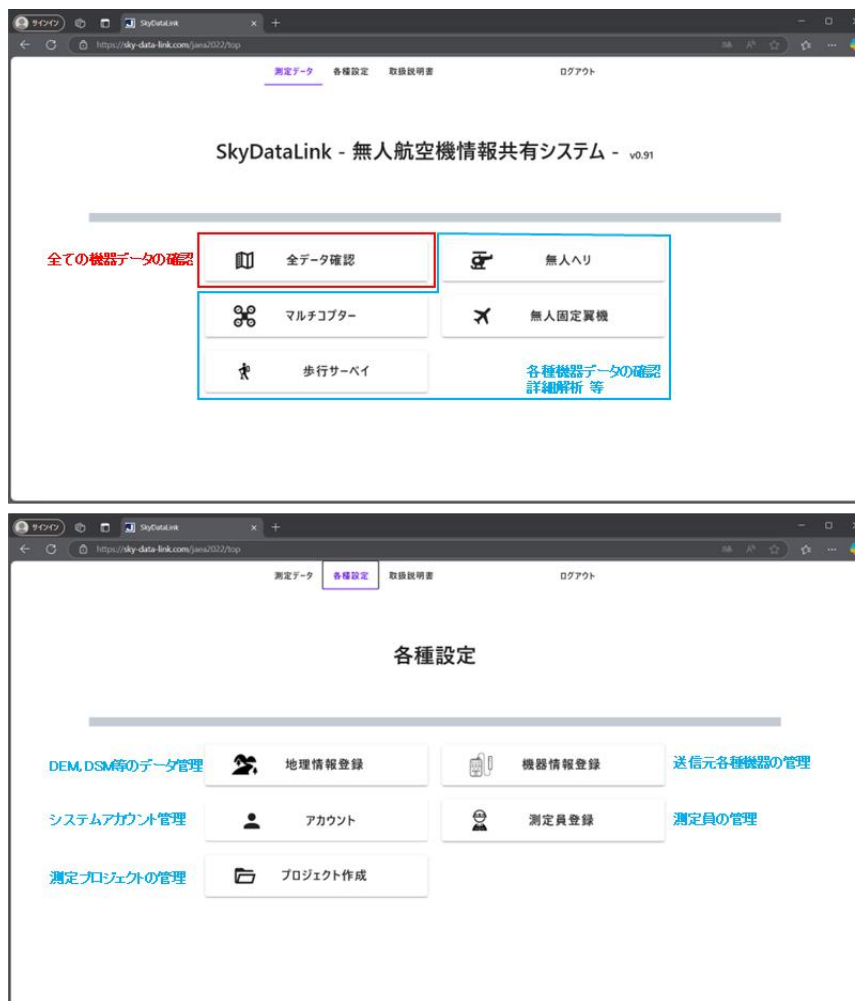


Fig. 6-3 無人機データ収集システムのトップページ

Table 6-1 無人機データ収集システムに対応している機器一覧

区分	機体	測定システム	通信様式
マルチコプター	DJI, Matrice 30	Si半導体検出器 (PDM-RC43-24159, ALOKA製)	FTP(TCP/21) Binary パッシブモード
無人ヘリコプター	ヤマハ発動機, FAZER-R	LaBr ₃ 検出器又はCeBr ₃ 検出器 (日本放射線エンジニアリング製) データ処理装置(コントレイルズ製)	REST API (https) JSON形式
固定翼型無人航空機	Edge Autonomy, Penguin C	HR-GAGG検出器(クリアパルス製) 環境用と緊急時用あり	REST API (https) JSON形式

6.1.2. 解析システムについて

無人機データ収集システムは、各種機器から送られてきたデータを自動解析機能により、リアルタイムで地表面から 1 m の高さの空間線量率に簡易的に換算する機能 (以下、リアルタイム解析機能) と、後処理で各種データの詳細解析を行う機能 (以下、後処理解析機能) がある。解析方法は 3.3 節に示した手法に則っている。

リアルタイム解析機能は、サーバに送信されたデータに対して、予め用意した換算パラメータを適用して地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算し、内挿補間 (クリギング) 処理によりマッピングして表示するものである。リアルタイム解析の例を Fig. 6-4 に示す。リアルタイム解析では、ボタン一つでポイントデータの空間線量率への換算及び内挿補間処理を実行することができる。

後処理解析機能では、解析に使用する換算パラメータの設定 (Fig. 6-5 参照)、解析に使用するデータ範囲の指定 (Fig. 6-6)、スペクトルのレンジ設定 (Fig. 6-7)、内挿補間処理 (クリギング) に用いるパラメータの設定 (Fig. 6-8) 等を行った上で、地表面から 1 m の高さの空間線量率への換算及びマッピングが可能となっている。後処理解析で得られたマップの例を Fig. 6-9 に示す。なお、解析結果の内、ポイントデータについては CSV ファイルでダウンロードすることができるが、マッピング結果のダウンロード機能は備えていない。後者の機能については、他の地理情報ソフトウェアでも表示可能な KML や TIFF といった形式でダウンロードできるようにする予定である。

以上のシステムの各種解析は全て Web ブラウザ上で実施可能であり、各個人の PC 環境等に依存しない。なお、内挿補間処理には商用の地理空間情報解析ソフトウェア (Environmental Systems Research Institute, Inc, ArcGIS Pro) を使用している。

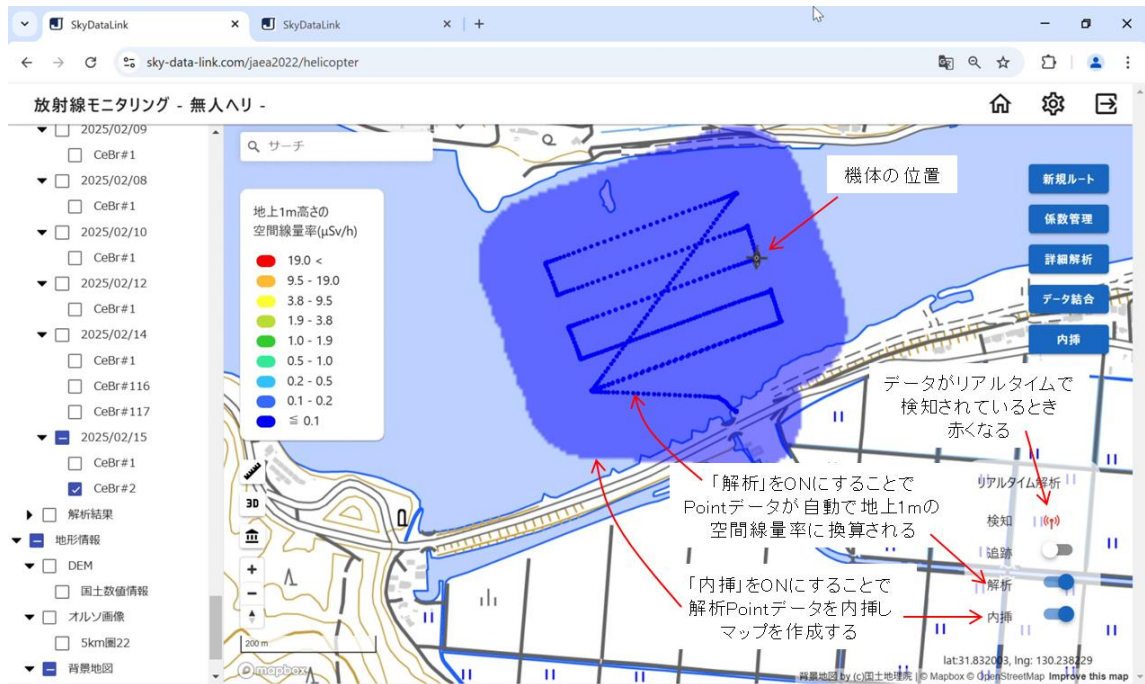


Fig. 6-4 リアルタイム解析の例
(無人ヘリコプターによる測定)

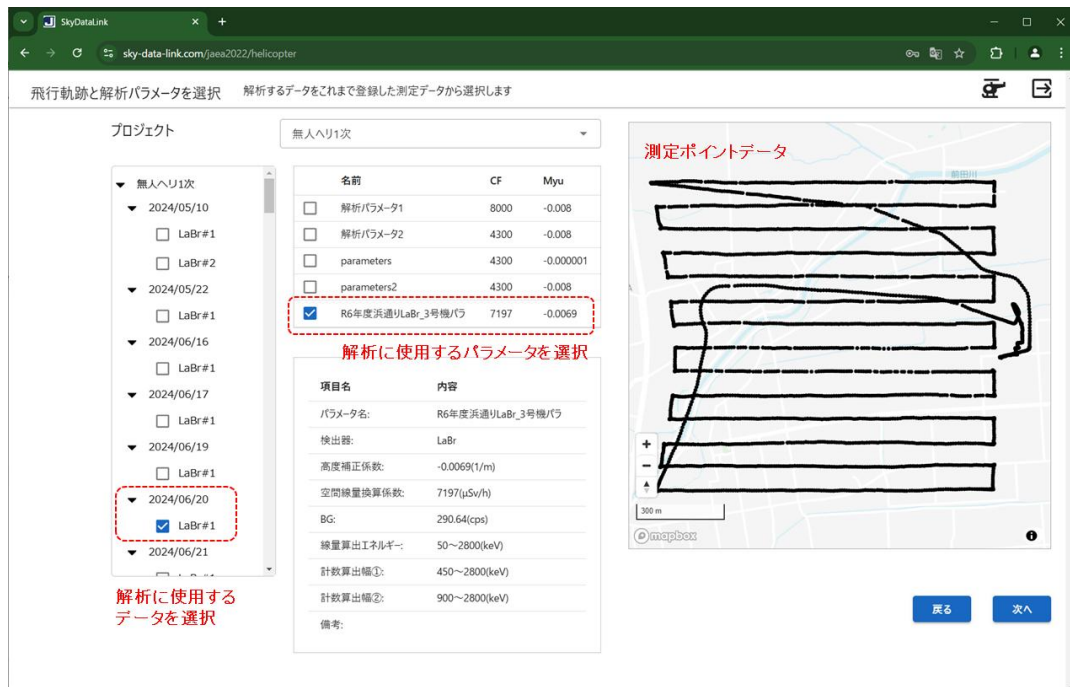


Fig. 6-5 後処理解析に使用するパラメータの設定例
(無人ヘリコプターのデータを使用)

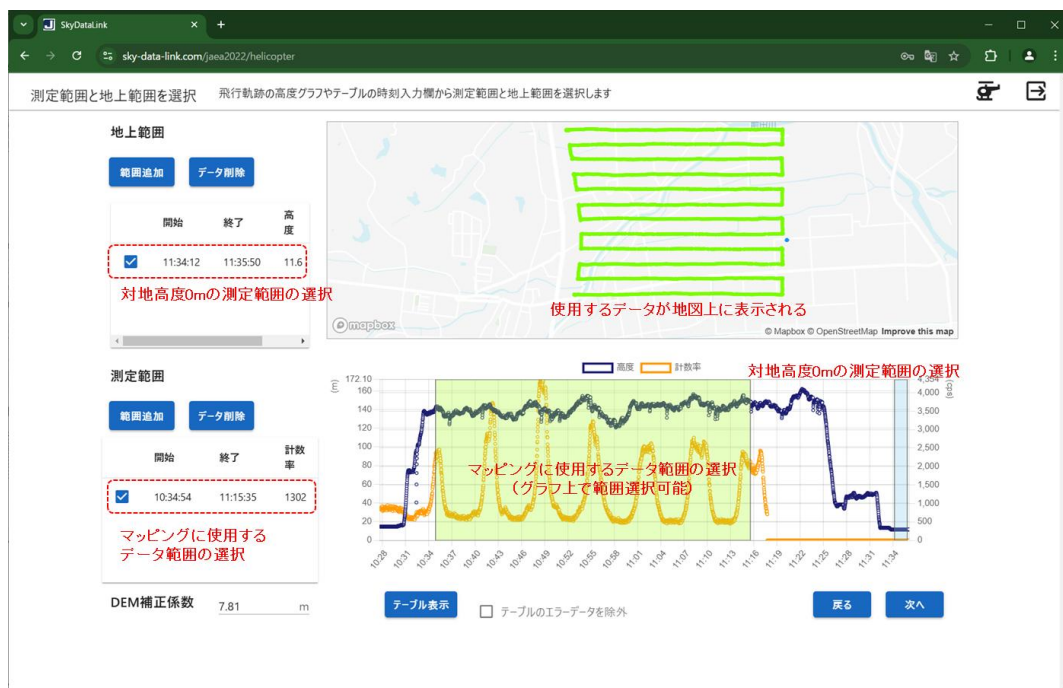


Fig. 6-6 後処理解析に使用するデータ範囲の指定例
(無人ヘリコプターのデータを使用)

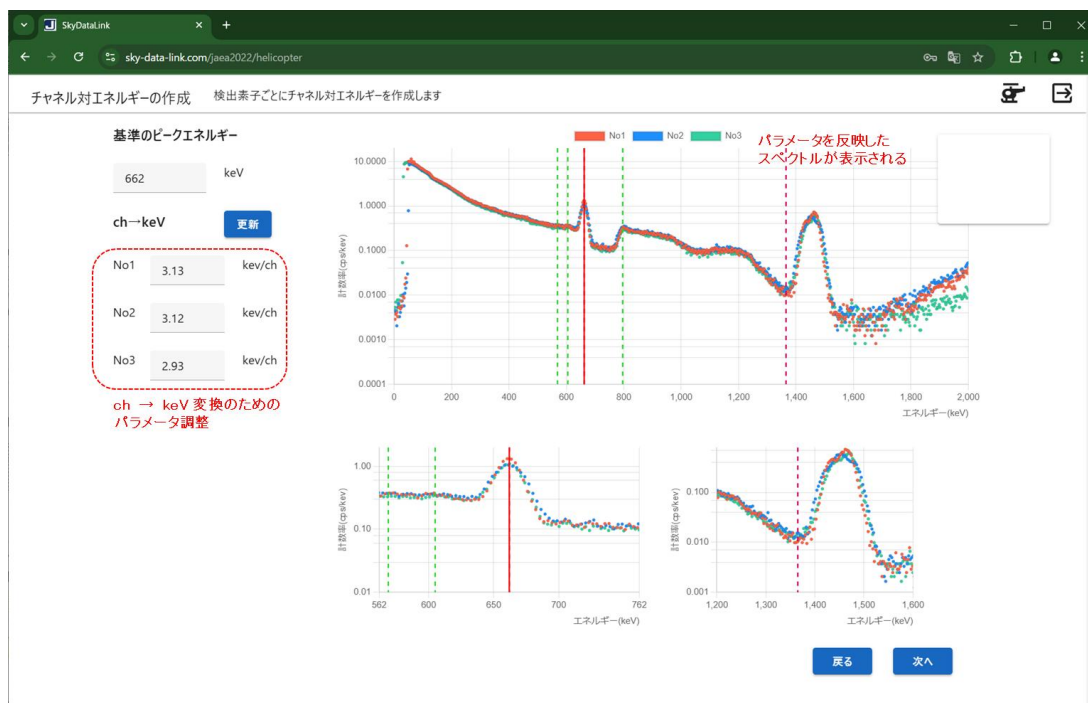


Fig. 6-7 後処理解析におけるスペクトルのレンジ設定例
(無人ヘリコプターのデータを使用)

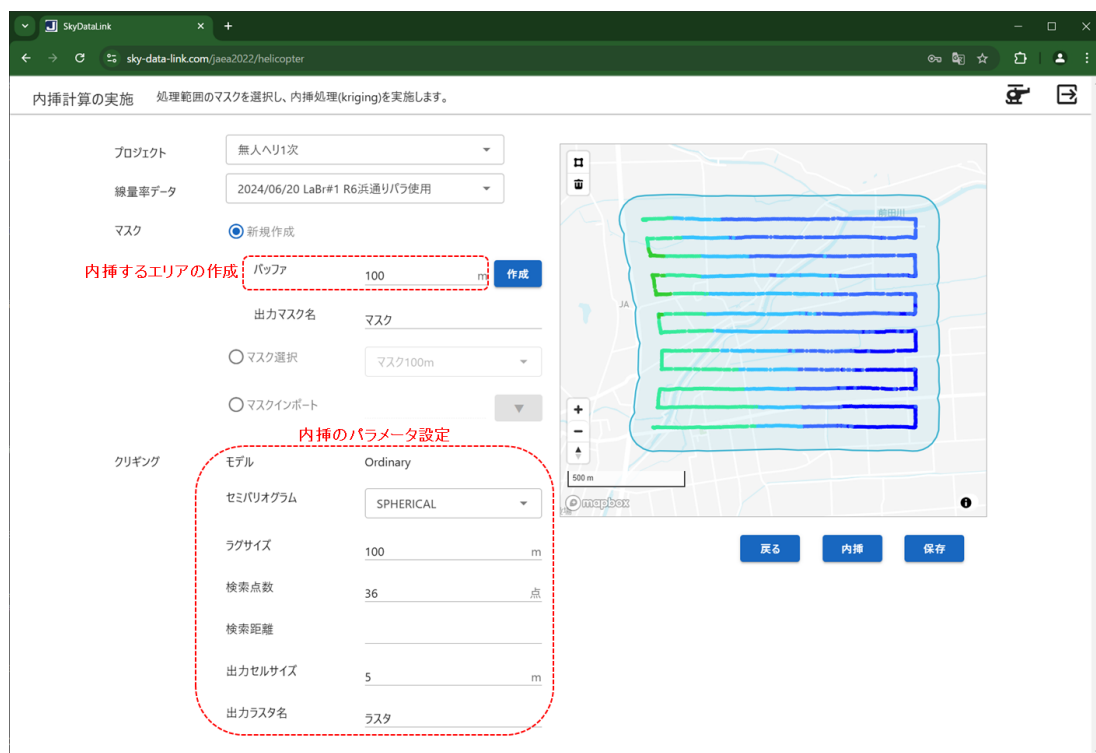


Fig. 6-8 後処理解析における内挿補間処理の設定例
(無人ヘリコプターのデータを使用)

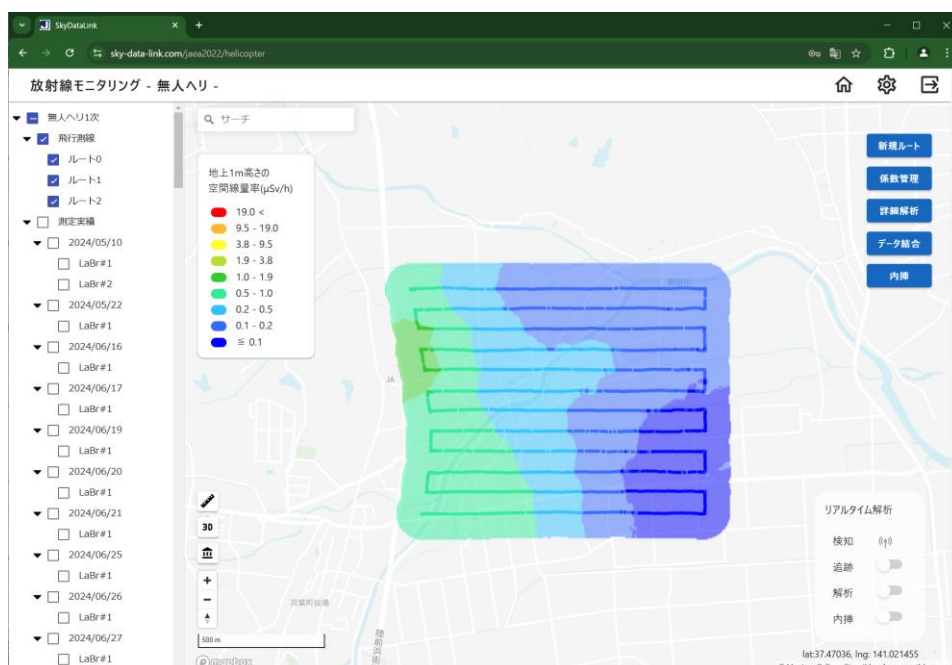


Fig. 6-9 後処理解析で得られたマップ例
(無人ヘリコプターのデータを使用)

6.1.3. マルチコプターを用いた測定システムについて

マルチコプターを用いた測定システムは、各都道府県に設置されたモニタリングポストから何らかの理由で空間線量率データが取得不可となった際、該当モニタリングポストの代替として利用できるよう開発されたものである。マルチコプターを用いた測定システムの概要を Fig. 6-10 に、使用機体の詳細を Fig. 6-11 に、放射線検出器の詳細情報を Fig. 6-12 に示す。

本システムでは、放射線検出器に Si 半導体検出器 (アロカ株式会社製 PDM-RC43-24159)、データ通信に LTE 通信 (株式会社アットホームテクノ製 Armadillo-IoT-A6) を用いている。放射線検出器及び通信機含めた重量は約 300 g であり、バッテリー電源で動作する。通信機は 10 時間以上の連続測定が可能であり、10 分に 1 回、空間線量率の値を LTE 通信によりサーバ上にアップロードする。放射線検出器は一週間以上にわたって連続測定が可能であり、通信機の電源がなくなってもそのまま測定を続行し、システム内部にデータを保存し続ける仕様である。データ通信には上空通信ができる LTE 通信を利用し、使用時には電波法に基づき予め使用予約が必要となる。放射線検出器を搭載する機体には、小型のマルチコプター MATRICE 30 (DJI 製) を使用している。本機の最大積載量は 300 g で、連続飛行可能時間は 40 分以上である。機体と機体操縦を行う送信機の通信は、見通し 3 km 程度まで通信可能であり、機体は送信機との通信が途絶えても、そのまま目的地点までのフライトを続行することができる。機体にはカメラが搭載されており、フライト中に送信機で映像を確認しながら運用することができる。また機体には、壁や障害物への衝突防止機能が備えられており、飛行時の安全性を確保できる。

MATRICE 30 を用いた測定システムは、現地付近まで機体を運搬し、放射線検出器を機体に搭載後、測定地点までフライト及び着陸させて運用する。本システムの運用にあたって、現地フライト実施時の最低必要人員は 1 名 (安全監視員等を配置しない場合) で、機体操縦及び検出器操作が可能な人員が必要となる。

測定データは、測定高度および機体の遮へい効果を考慮し、事前に取得した換算パラメータを用いて地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算される。Fig. 6-13 は、マルチコプターに放射線検出器を搭載した状態 (着陸時：高さ 20 cm) で測定した空間線量率と、同地点の地表面から 1 m の高さで NaI(Tl) 検出器 (アロカ株式会社製 TCS-172B) を用いて測定した空間線量率を比較した結果である。Fig. 6-13 の結果から、マルチコプターで測定した値に約 1.3 倍した値が、NaI(Tl) 検出器 TCS-172B による測定値と一致することが分かった。無人機データ収集システムでは、Fig. 6-13 に示したパラメータで地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算された値が表示されるように設計されている。なお、マルチコプターを用いた測定システムでは、スペクトルデータ等は取得できないため、無人機データ収集システムにおける後処理解析機能に相当する機能はない。



Fig. 6-10 マルチコプターを用いた空間線量率測定システムの概要

名称	MATRICE 30
メーカー (国)	DJI (中国)
サイズ	W215×D365×H195mm
最大離陸重量 (kg)	4
電源	リチウムポリマーバッテリー
連続航続時間 (分)	40
操作方法	専用送信機によるマニュアル 及びプログラムフライトが可能
最大通信距離 (km)	3 (2.4GHz通信使用)
最大積載重量 (ペイロード)	300 g



Fig. 6-11 マルチコプター情報及び外観

放射線検出器	PDM-RC43-24159
メーカー	アロカ株式会社
サイズ	W62×D85×H23mm
空間線量率測定範囲	0.01 $\mu\text{Sv/h}$ ～10mSv/h
電源	単四形アルカリ電池
無線通信機	Armadillo-IoT-A6
メーカー	株式会社アットホームテクノ
サイズ	W50×D85×H18mm
電源	リチウムポリマー電池
システム全体重量	300 g
連続動作時間	10時間以上

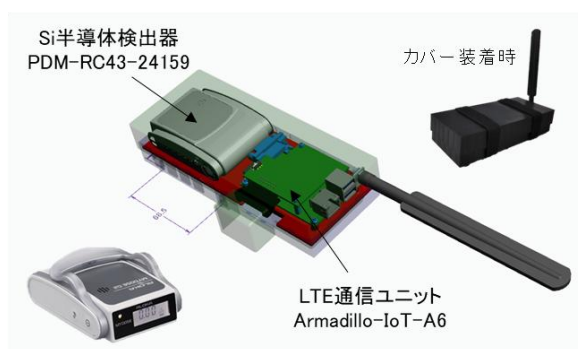


Fig. 6-12 マルチコプター搭載用放射線検出器情報及び外観

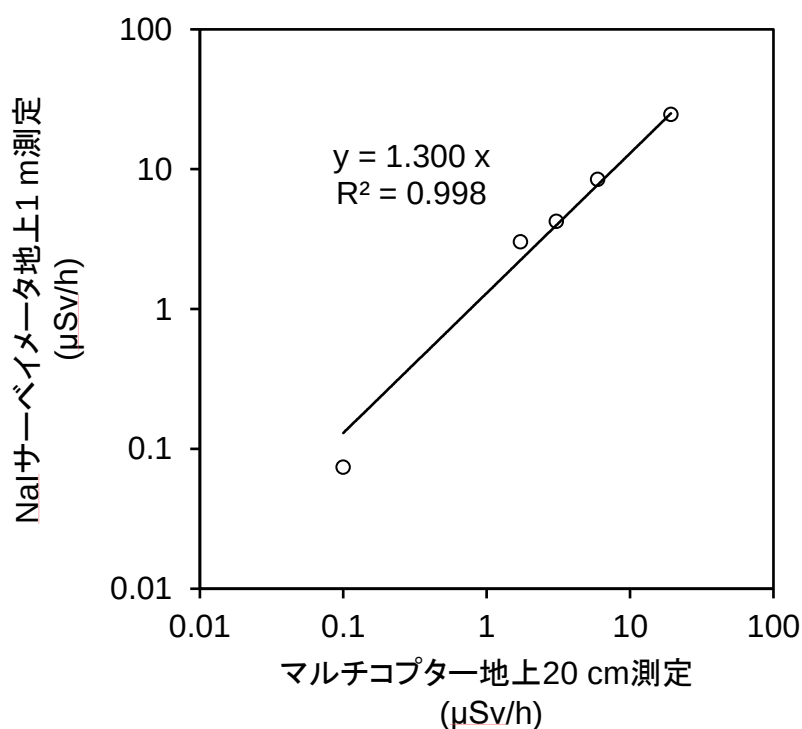


Fig. 6-13 マルチコプター着陸時の空間線量率換算値と NaI(Tl)検出器による地表面から1 m の高さの空間線量率測値の比較結果

(測定データは 2024 年 10 月に福島県内で取得した)

6.1.4. 無人ヘリコプターを用いた測定システムについて

無人ヘリコプターを用いた測定システムは、広範囲エリアの放射線分布を上空から面的に測定するために開発されたシステムである。他の無人航空機に比べ積載可能重量が大きいこと、大型の放射線検出器を搭載可能であり、環境中の放射線モニタリング等に活用可能である。この特長を活かし、東電福島原子力発電所周辺 5 km 圏内における空間線量率の測定²²⁾や、森林や河川等の放射線測定⁶⁸⁾に活用されている。無人ヘリコプターを用いた測定システムの概要を Fig. 6-14 に、使用機器のフロー図を Fig. 6-15 に、使用機体の詳細を Fig. 6-16 に、放射線検出器の詳細情報を Fig. 6-17 に示す。

本システムでは、放射線検出器として $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器 (結晶サイズ : $2.0''\phi \times 2.0'' \text{H} \times 3$ 本, 重量 : 約 7 kg) 又は CeBr_3 検出器 (結晶サイズ : $2.0''\phi \times 2.0'' \text{H} \times 2$ 本, 重量 : 約 6 kg) のいずれかを搭載しての測定が可能である。放射線検出器は 1 秒ごとに各結晶の γ 線スペクトル (1,000 ch) を取得可能であり、測定データは GNSS 測位で得られた時間情報及び位置情報と紐づけられ保存される。放射線検出器と共に機体に搭載されるデータ処理装置 (重量 : 雲台等含め約 5 kg) は、放射線検出器で得られたデータ、機体から得られた GNSS 情報、また気圧温湿度計の情報等を GNSS 時刻と紐づけて保存し、LTE 通信を用いて Web サーバ (無人機データ収集システム) 及び地上基地局にデータを伝送することができる。地上基地局では、測定で得られた各種情報をリアルタイムで確認することができ、記録の開始/停止、搭載機器の電源の ON/OFF/再起動等の操作を遠隔で行うことができる。搭載機器は無人ヘリコプターのバッテリーからの給電で駆動する。データ通信には上空通信が利用可能な LTE 通信を利用し、使用時には電波法に基づき予め使用予約が必要となる。機器を搭載する機体としては、無人ヘリコプター FAZER-R G2 (ヤマハ発動機社製) を使用している。本機の最大積載量は 30 kg で、連続飛行可能時間は 100 分以上である。機体の遠隔操作は、2.4 GHz 帯の地上波通信、又は衛星通信を使用して操縦できる。機体にはカメラが搭載されており、フライト中に基地局で映像を確認しながら運用することができる。機体及び搭載機器は基本的に防水に対応しており、放射線検出器の放射能汚染を防止する簡易的なカバーも作成されている (Fig. 6-14 写真参照)。

FAZER-R G2 を用いた測定システムの運用では、現地に機体を運搬し、離着陸は現地におけるマニュアル操縦によって行われる。離陸後、プログラムフライトに移行し、衛星通信を用いて遠隔操縦を行う。測定フライトでは、予め指定した位置、高度、速度で飛行するように設定した自動フライトプログラムに則って、フライトが行われる。運用における最低必要人員は、現地への機体運搬及び操縦に 2 名、衛星通信を用いた機体操作員及び記録員に 2 名の計 4 名である。

測定データは、事前に取得した換算パラメータを用いて、測定時の対地高度に依存する放射線の減衰補正、地表面から 1 m の高さの空間線量率への換算を経て、内挿補間処理によりマッピングされる。リアルタイム解析では、この工程が自動で行われる。後処

理解析では、使用するデータ範囲の指定や、スペクトルレンジの設定等を行い、詳細解析を行うことができる。解析方法は3.3節に示した手法に則っている。

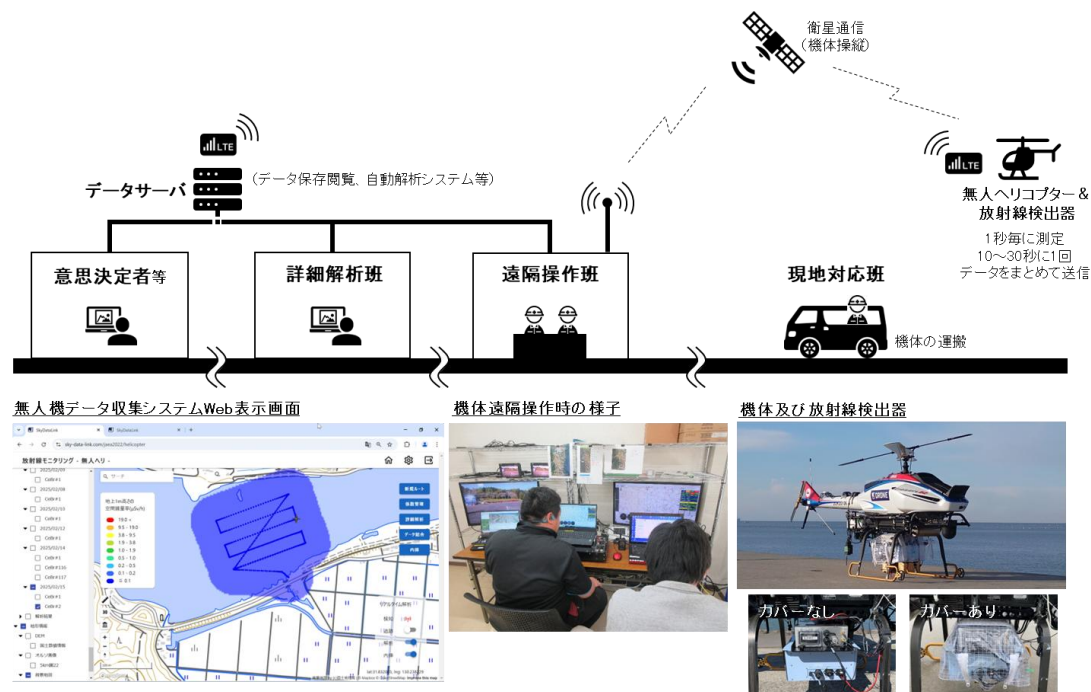


Fig. 6-14 無人ヘリコプターを用いた測定システムの概要

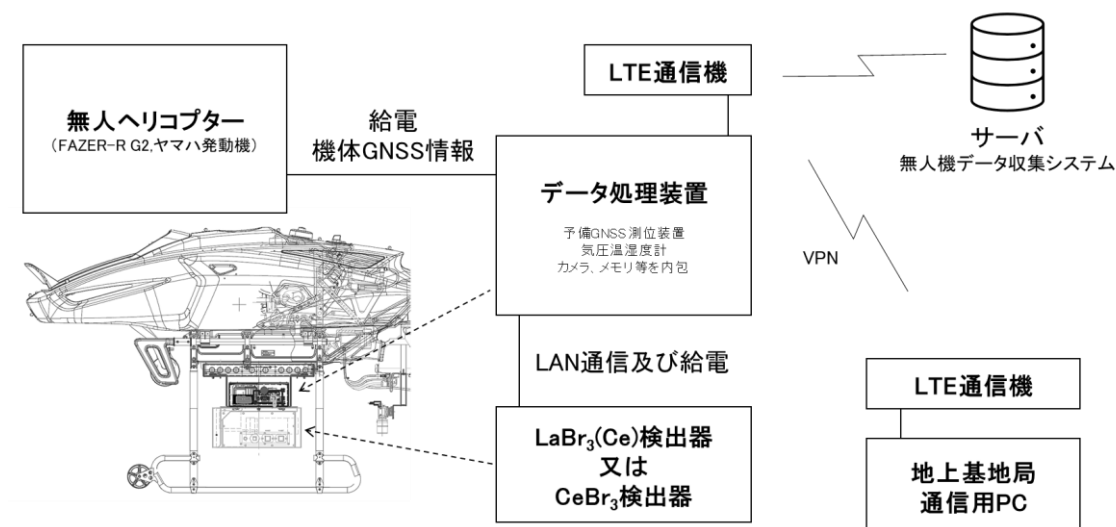


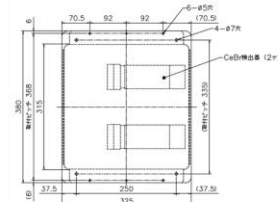
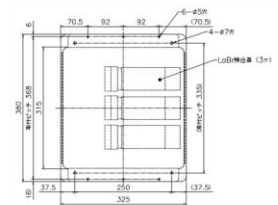
Fig. 6-15 無人ヘリコプターを用いた放射線測定システムの機器フロー図

名称	FAZER-RG2
メーカー (国)	ヤマハ発動機株式会社 (中国)
サイズ	W734×D3665×H1226 mm
最大離陸重量	100 kg未満
燃料	ガソリン(12 L)
最大連続航続時間	120分 (実運用100分)
操作方法	専用送信機によるマニュアル 及びプログラムフライトが可能
最大通信距離	3 km(2.4GHz通信使用) 衛星通信時:衛星取得可能エリア 全域
最大積載重量 (ペイロード)	30 kg



Fig. 6-16 無人ヘリコプター詳細情報及び外観
(写真は、ヤマハ発動機株式会社ホームページ⁶⁹⁾より抜粋)

放射線検出器	LaBr ₃ (Ce)シンチレータ
メーカー	日本放射線エンジニアリング株式会社
全体サイズ	W440×D420×H400 mm(通信装置含む)
重量	約10 kg(通信装置含む)
結晶サイズ	2.0"φ×2.0" H×3本
取得データ	1秒毎の位置情報、γ線スペクトル情報
放射線検出器	CeBr ₃ シンチレータ
メーカー	日本放射線エンジニアリング株式会社
全体サイズ	W440×D420×H400 mm(通信装置含む)
重量	約9 kg(通信装置含む)
結晶サイズ	2.0"φ×2.0" H×2本
取得データ	1秒毎の位置情報、γ線スペクトル情報
データ処理装置	PC、GNSS受信機、カメラ、気圧温湿度計、通信装置等を内包
メーカー	株式会社コントレイルズ
全体システム通信方式	LTE通信使用 通信プロトコル:REST API(http)、フォーマット:JSON形式
全体システム電源	機体電源を使用(13 V)



機体搭載時の外観



Fig. 6-17 無人ヘリコプター搭載用放射線検出器の情報及び外観

6.1.5. 固定翼型無人航空機を用いた測定システムについて

固定翼型無人航空機を用いた測定システムは、広範囲エリアの放射線分布を上空から面的に測定するために開発されたシステムである。固定翼型無人航空機は、無人ヘリコプター等に比べて、最大積載重量は数 kg と小さいが、連続飛行時間が 10 時間以上と非常に長い特徴がある。この特徴を活かし、これまで緊急時における放射線モニタリングツールとしての開発が進められてきた。固定翼型無人航空機を用いた測定システムの概要を Fig. 6-18 に、使用機器の詳細を Fig. 6-19 に示す。

本システムでは放射線検出器として、環境測定用 High Energy Resolution $\text{Gd}_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}(\text{Ce})$ (以下、HR-GAGG) 検出器 (結晶サイズ: 25 mm×25 mm×25 mm×4 本, 重量: 約 2 kg)、緊急時測定用プラスチックシンチレータ (結晶サイズ: 25 mm×25 mm×0.3 mm)+HR-GAGG 検出器 (結晶サイズ: 10 mm×10 mm×10 mm, 重量: 約 1.5 kg)、ホスウィッチ型プラスチックシンチレータ (結晶サイズ: 25 mm ϕ × 1 mm H)+BGO 検出器 (結晶サイズ: 25 mm ϕ × 25 mm H, 重量: 約 2 kg) のいずれかを搭載して測定が可能となっている。各種放射線検出器は 1 秒ごとに γ 線スペクトル(1,024 ch)を取得可能であり、緊急時測定用及びホスウィッチ型は β 線計数率も取得可能である。測定データは GNSS 測位で得られた時間情報及び位置情報と紐づけられ保存される。放射線検出器と共に機体に搭載されるデータ処理装置は、放射線検出器で得られたデータ、GNSS 情報、気圧・温度・湿度計の情報、カメラ映像等を機体の無線通信を用いて地上基地局に送信する。各種データは機器本体及び地上基地局に保存され、地上基地局からは測定で得られた各種情報をリアルタイムで確認することができ、記録の開始/停止、電源の ON/OFF/再起動等の操作を遠隔で行うことができる。地上基地局に送られたデータは、LTE 通信を用いて Web サーバ (無人機データ共有システム) に送信される。各種搭載機器は機体からの給電で駆動する。機器を搭載する機体としては、固定翼型無人航空機 Penguin C (Edge Autonomy) を使用している。本機の最大積載量は 5 kg で、連続飛行時間は 10 時間以上である。機体の遠隔操作は、2.4 GHz 帯の地上波通信を使用して操縦できる。

Penguin C を用いた測定システムの運用では、現地に機体を運搬し、カタパルトの組み立て、アンテナ機器の組み立て、基地局の設置を行い、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操縦は必須ではない。測定フライトでは、予め指定した位置、高度、速度で飛行するように設定した自動フライトプログラムに則って、フライトが行われる。固定翼型無人航空機は、マルチコプターや無人ヘリコプターと異なり、ホバリングフライトができないため、測線間隔の狭いフライトを行う際は、円軌道を重ねるようにしてフライトを行う。現地への機体運搬及び組み立て、機体操作を行う最低必要人数は 2 名であるが、現地での組み立て作業時間短縮のためには、4 名を確保する必要がある。測定データの解析工程は 6.1.4 項に示したものと同様である。

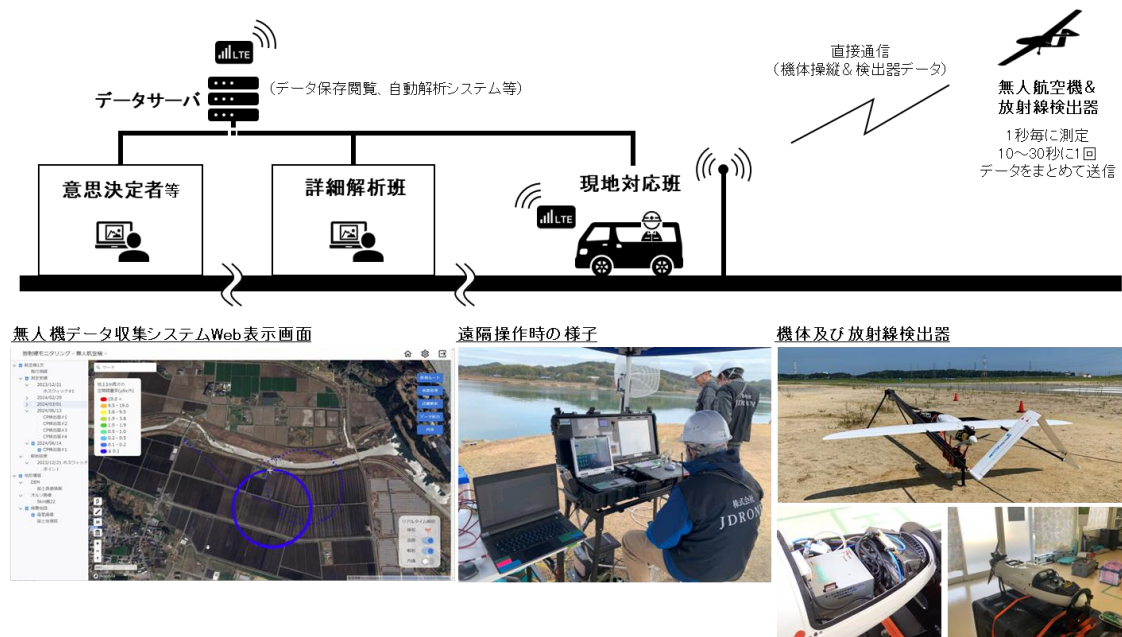


Fig. 6-18 固定翼型無人航空機を用いた測定システムの概要

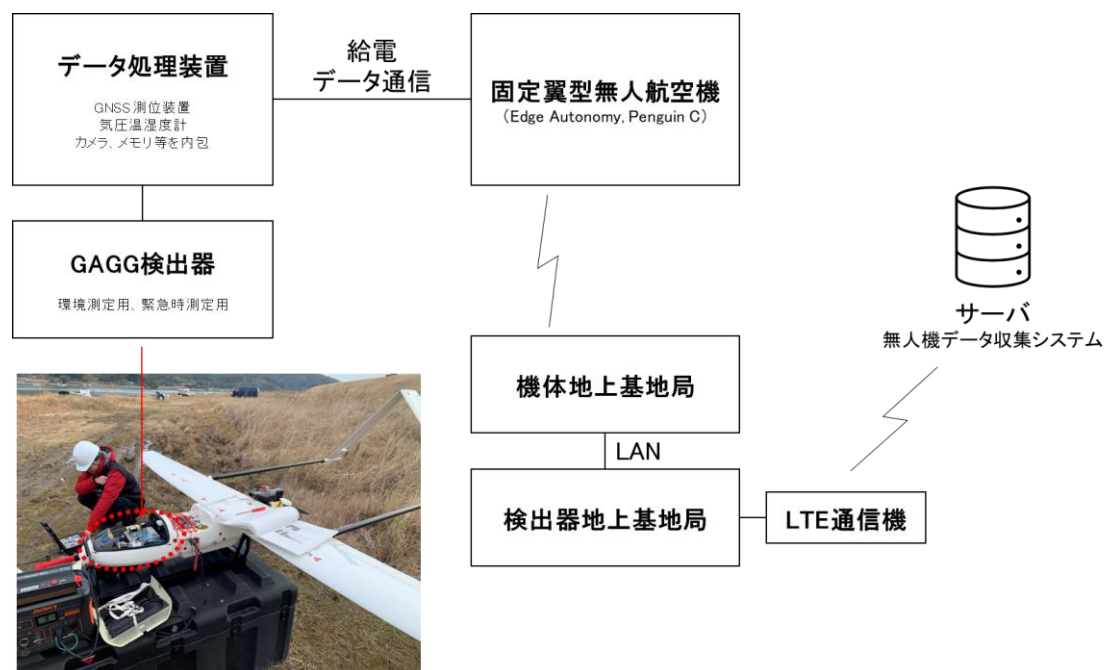


Fig. 6-19 固定翼型無人航空機を用いた放射線測定システムの詳細

名称	Penguin G
メーカー (国)	Edge Autonomy (ラトビア)
サイズ	W3300×D2300×H600 mm
最大離陸重量	23 kg未満
燃料	混合燃料 (ガソリン+オイル)
最大航続時間	20時間 (実運用10時間)
離着陸方法	カタパルトで離陸 パラシュートで着陸
最大通信距離	3 km(2.4GHz帯使用時) 180km(高出力電波使用時)*日本で使用不可
最大積載重量 (ペイロード)	燃料と合わせて7.64 kg



Fig. 6-20 固定翼型無人航空機詳細情報及び外観

環境測定用放射線検出器	HR-GAGGシンチレータ	
メーカー	クリアバルス株式会社	
全体サイズ	W210×D220×H195 mm(通信装置含む)	
重量	約2 kg(通信装置含む)	
結晶サイズ	25 mm×25 mm×25 mm×4 本	
取得データ	1 秒毎の位置情報、γ 線スペクトル情報	
緊急時測定用放射線検出器	HR-GAGG、プラスチックシンチレータ	
メーカー	クリアバルス株式会社	
全体サイズ	W210×D220×H190 mm(通信装置含む)	
重量	約1.5 kg(通信装置含む)	
結晶サイズ	HR-GAGG:10 mm×10 mm×10 mm×2 本 プラスチックシンチレータ:25 mm×25 mm×0.3 mm	
取得データ	1 秒毎の位置情報、γ 線スペクトル情報、β 線計数率情報	
ホスウィッチ検出器	BGO、プラスチックシンチレータ	
メーカー	日本放射線エンジニアリング株式会社	
全体サイズ	W210×D220×H210 mm(通信装置含む)	
重量	約2 kg(通信装置含む)	
結晶サイズ	BGO:25 mm φ × 25 mm H プラスチックシンチレータ:25 mm φ × 1 mm H	
取得データ	1 秒毎の位置情報、γ 線スペクトル情報、β 線計数率情報	
データ処理装置及び地上基地局	PC、GNSS受信機、カメラ、気圧温度湿度計を内包	
メーカー	株式会社コントレイルズ	
通信方式	検出器 ⇄ 地上基地局: 機体通信(2.4 GHz帯) 地上基地局 ⇄ サーバ: LTE通信 通信プロトコル: REST API (http)、フォーマット: JSON形式	
全体システム電源	機体電源を使用(12.24 V)	

各種検出器搭載時の外観

Fig. 6-21 固定翼型無人航空機搭載用放射線検出器情報及び外観

6.2. 無人機データ収集システム整備における課題と対応策

今年度より無人機データ収集システム (SkyDataLink) の運用を開始したが、運用していく中で挙げられたシステムの課題点を、対応策等と併せて以下に示す。

1) リアルタイム解析について

負荷の高い内挿補間処理 (クリギング) をサーバ側で実行しているため、利用者が集中した場合にマップを作成するのに 5 分から 10 分程度要し、リアルタイム性が損なわれている。

- 対応策

内挿補間処理をサーバ側でなく、各 PC に分散させる方式へ変更し、リアルタイムモニタリング処理を各 PC で分担して実施する。また、クリギングによる内挿補間処理に特に時間を要するため、内挿補間方法 3.7 節に示した IDW に変更して処理の高速化を図る。

2) 通信方式について

LTE 通信を使用できなくなった場合、サーバでデータを取得できなくなるため、通信手段の冗長化が必要である。

- 対応策

長距離無線通信方法として LTE 通信以外に、地上波 (2.4 GHz 帯、5.7 GHz 帯など) による直接通信、衛星を用いた衛星通信がある。地上波による直接通信は、通信可能な範囲が数 km であり、本システムでサーバへのデータ送信に使用するには通信距離が短いため適さない。衛星通信は、衛星が取得可能な場所であればデータ通信可能となるが、現状入手可能な衛星通信機はペイロードの小さい無人航空機に搭載するには大きく、重量及び消費電力が大きい点で不利である。無人ヘリコプターにおいて機体通信に使用している衛星通信機 AVIATOR UAV 200 は重量が 1.45 kg、寸法は 241 mm×157 mm×63 mm、消費電力は 28 W であり、マルチコプターなどに搭載するのは難しい。他にも小型の衛星通信機として Gotonomy Velaris 200 があり、重量は 430 g、寸法は直径 145 mm×高さ 83 mm、消費電力は最大 28 W であるが、日本での技術基準適合証明を受けていない。これらの理由から、現状で利用できるのは LTE 通信のみであるが、災害時に LTE 通信が使用できない状況でも安定したデータ送信を確保するためには、より小型で低消費電力の衛星通信機の開発や、無人機に実装可能な長距離無線通信技術の進展が求められる。今後の衛星通信機の開発動向を注視し、安定かつ適切な通信手段の確立に向けた検討を継続する必要がある。

3) サーバ停電時の対応について

各種測定機器で得られたデータはサーバに送られデータ処理されるが、現在運用されているサーバは 1 台である。よって、当該サーバに障害が起きた場合、データ確認等が行えなくなる。

- 対応策

サーバを分散して用意し、片方のサーバが使用できなくなった場合でも、もう片方で処理を続行できるようにする。サーバは東日本、西日本などに分散配置する。また、Microsoft Azure 等のクラウドコンピューティングサービスの利用も視野に入れ、最適なシステム設計の検討を行う必要がある。

4) 機器の防水化について

各種機体及び無人ヘリコプターの測定機器は防水性能を保持しているが、マルチコプターの測定機器、固定翼型無人航空機の測定機器は防水性能を保持していない。

- 対応策

各種機器に防水性能を付加させる。ただし全体の機器改造には費用がかかるため、簡易的な防水対策及び汚染防止対策も可能なビニールカバー等の設計製作を行うことで、費用低減を図る。

5) 他の機器との連携について

無人機データ収集システムにおいてデータ管理等を行える機器は、現在 Table 6-1 に示した機器のみとなっている。無人航空機だけでなく、地上における放射線測定においてこれまで多くの測定機器が開発されてきたが、各機器同士の連携は取られていない。今後、他の機器とも連携できるように仕組みを構築する必要がある。

- 対応策

他の機関等が機器製作等の際に参考にできる基本の機器構成及びデータ通信のガイドラインを作成する。ガイドラインに則って機器を制作することで、データ共有システムにおいて製作機器を簡単に運用できるように、システム側も体制を整える。

6) 大規模運用時について

無人機データ収集システムにおいて運用している機器は、現状 10 台にも満たない。数十台、数百台の機器を運用した際のシステムの動作確認や運用方法を検討する必要がある。

- 対応策

通信する機器の数を増やし、大量のデータが送られてきたときのシステム運用時の動作確認を実施する。運用テストを積み重ね、大規模な機器及びデータを管理する際、どのように運用するか、システム構成、運用方法（アカウント管理方法など）を検討し、必要に応じてシステム改良の実施、運用マニュアルの作成等を行う。

7) 人材育成について

無人機データ収集システム及び各種無人航空機、各種放射線検出器を扱える人材が限られている。

- 対応策

原子力防災訓練や各種放射線モニタリング等で、緊急時モニタリング対応要員を主体にシステムを運用できるよう基盤整備に取り組み、機器及びシステムを扱える人材を育成する。また各種システムは初心者でも扱いやすいように、緊急時モニタリング対応要員等の意見を取り入れて改良を加えていく。併せて、計画、測定、解析など一連の作業を行う実動訓練を実施し、そのマニュアル等を作成する。

以上の課題への対応策を講じることで、無人機データ収集システムの運用をより安定化させ、災害時などにおいても柔軟に対応できる体制を整えることができると考えられる。今後も、技術の進展や新たな運用ニーズに応じてシステムの改善を重ね、より効率的かつ実用的なデータ収集及び解析基盤の構築を目指していく必要がある。

7. マルチコプター型モニタリングシステムの整備及び技能講習

マルチコプター型モニタリングシステムは、原子力発電所周辺のモニタリングポストから、何らかの理由で空間線量率データが取得不可となった際、代替のモニタリングポストとして活用できるよう開発されたシステムである。マルチコプターを用いた測定システムについては、「6. 無人機データ収集システムの整備」において詳細な機器情報及びシステム構成について述べている。本章では、マルチコプター型モニタリングシステムの機器整備状況及び技能講習実施状況について報告する。合わせて、マルチコプター型モニタリングシステムの運用にあたって、現場における運用時の今後の課題等を示す。

7.1. システム整備状況及び点検結果

マルチコプター型モニタリングシステムの整備状況をまとめた表を Table 7-1 に示す。各種機器の員数確認、外観確認、動作確認、校正等を行った結果、それぞれ異状がないことを確認した。以降に点検内容の詳細を示す。

Table 7-1 マルチコプター型モニタリングシステム整備状況

物品名		個数	点検完了日		保管場所
マルチコプター関連	機体本体(MATRICE 30 カメラ搭載)	5 機	2024/12/27	2025年1月から 運用開始	福島県 南相馬市
	送信機(RC PLUS)	5 個	2024/12/27		
	機体バッテリー(1機:2個使用×3セット)	30 個	2024/12/27		
	バッテリー充電器	5 個	2024/12/27		
	送信機充電ケーブル	5 本	2024/12/27		
	機体本体ケース	5 個	2024/12/27		
放射線検出器関連	ドローン搭載用放射線検出器	5 台	2024/12/9		
	放射線検出器専用ケース	5 個	2024/12/9		
	上空利用可能LTE通信用SIM	5 枚	2024/12/9		
	放射線検出器充電ケーブル	5 本	2024/12/9		
無人機データ収集システム関連	ノートパソコン	2 台	2024/12/27		
	無人機データ収集システム(SkyDataLink) ベースライセンス+オプションライセンス	1 式	-	2024年9月から 運用開始	-

7.1.1. マルチコプター機材の点検結果

マルチコプターの点検実施項目を Table 7-2 に示す。点検を行った結果、整備した機体に異常は見られず、正常に動作することを確認した。

Table 7-2 マルチコプター点検項目

項目	判定基準	判定
事前準備・確認	リストに示した機材が全て揃っているか	合
	DIPSにて機体登録がなされているか	合
	全てのファームウェア及びアプリが最新版に更新されているか	合
バッテリー	機体バッテリーは正常に機能しているか	合
	送信機内部バッテリーは正常に機能しているか	合
機体等確認	フレームアームは正しく展開され、ロックすることができるか	合
	ネジの緩みがないか	合
	ローターに割れ等はないか	合
	モーターの外観に異常がなく、手でスムーズに回転するか	合
	全ての通気口に異物が付着していないか	合
	機体及び機体バッテリーのコネクタ部に異物や汚れの付着はないか	合
	機体バッテリー(2本で1セット)はセットで正しく取り付けられ、ロックされるか	合
	カメラジンバルの外観に異常はないか	合
	カメラ等のレンズやセンサ窓に破損や汚れがないか	合
センサー等確認	FPVカメラのレンズに破損や汚れがないか	合
	ビジョンシステムのレンズに破損や汚れがないか（前後左右上下面の計12カ所）	合
	赤外線センサ窓に破損や汚れがないか（前後左右上下面の計12カ所）	合
	カメラ補助ライトのレンズに破損や汚れがないか（下面の計2カ所）	合
電源/通信確認	航空灯のレンズに破損や汚れがないか（上下面の計2カ所）	合
	送信機の使用されていないコネクタは確実にキャップされているか	合
	送信機のスティックやボタンは正常に動作するか	合
	送信機の電源をONし、『DJI Pilot2』アプリは正しく起動できるか	合
	機体の電源をONし、カメラ等は正常にウォーミングアップするか	合
	機体と送信機は正しくリンクされるか	合
離陸/暖気運転	機体から異音・異臭はないか	合
	アームどし、回転するモーターから異音はしないか	合
	低空でホバリングを実施し、特異な振動や舵の異常はないか	合

7.1.2. 放射線検出器機材の点検結果

放射線検出器の点検実施項目を Table 7-3 に示す。点検を行った結果、整備した機材に異常は見られず、正常に動作することを確認した。

Table 7-3 マルチコプター搭載用放射線検出器点検項目

項目	判定基準	判定
員数検査	員数に相違がないこと	合
外観検査	形名に相違がないこと	合
動作性能試験	電子式線量計の照射試験	積算線量指示誤差±10%以内であること
	電子式線量計の携帯電波試験	誤計数しないこと
	起動確認	正常起動すること
	電圧測定	4.90V～5.20V 以内であること
	LTE 伝送試験	LTE 通信可能なこと
	質量・寸法測定	元の設計値と大きな相違がないこと

7.2. 運用技術講習について

マルチコプター型モニタリングシステムを運用するにあたって、運用者は関連知識と技能を獲得する必要がある。そこでマルチコプターの運用及び操縦訓練、放射線検出器の取り扱い方法等に関する運用技術講習を実施した。以下に講習実施内容の概要を示す。

- 講習実施日
第1回：2024年(令和6年)12月23日－27日 10：00－17：00(5日間)
第2回：2025年(令和7年)1月20日－24日 10：00－17：00(5日間)
- 講習受講者
第1回：2名(原子力機構職員)
第2回：3名(規制庁職員)
- 講習実施場所
福島県南相馬市 真野交流センター
- 講習内容
日本ドローン協会のドローン資格「UAV1 級操縦士」取得に必要とされる講習と同等の内容で座学講習と実技講習を実施した。講習にはマルチコプターに関連した講習に加え、放射線検出器の取り扱い方法についての講習も行った。実技講習では、序盤では MATRICE 30 (DJI 社製) より小型の機体である Mavic mini (DJI 社製) 又は Phantom (DJI 社製) を用いて基礎飛行訓練を行い、後半にマルチコプター型モニタリングシステムで使用する MATRICE 30 を用いた訓練飛行を実施した。以下に各種講習内容を示す。

【座学講習】(Fig. 7-1 参照)

- | | |
|--|--------|
| - 無人航空機の概要について | (30 分) |
| - 無人航空機に関わる法律、免許制度について | (60 分) |
| - 無人航空機における許可・承認が必要な飛行について | (60 分) |
| - 無人航空機の基本的な機器構成及び注意点について | (60 分) |
| - 無人航空機の飛行原理及び運用に係る気象条件について | (60 分) |
| - 無人航空機の操縦モードの違いについて | (60 分) |
| - 夜間飛行について | (60 分) |
| - MATRICE 30 送信機 DJI Pilot 2 の取り扱いについて | (60 分) |
| - 自動飛行ルートの作成方法について | (60 分) |

- 目視外飛行について (30 分)
- 放射線検出器の取り扱い方法について (60 分)
- MATRICE 30 を用いたフライト区域設定の注意点について (60 分)
- 安全運航管理について (60 分)
- 無人航空機の運用事例紹介 (60 分)
- 指定したエリアの飛行計画の作成及びロールプレイングの実施 (120 分)
- 現地における飛行計画の作成 (60 分)
- ロールプレイング実践飛行後ディスカッション (30 分)

【実技講習】(Fig. 7-2 参照)

- 基本操作・離着陸 (60 分)
- 直線移動・斜め移動 (ヘディングホールド) (60 分)
- 直線移動・斜め移動 (ヘディングフリー) (90 分)
- 組み合わせ飛行 (60 分)
- ATTI モードを用いた飛行 (90 分)
- 夜間飛行 (30 分)
- 高高度飛行 (30 分)
- 自動飛行 (90 分)
- 目視外飛行 (90 分)
- 検出器を搭載した状態で手動・自動飛行 (120 分)
- ロールプレイング実践飛行 (150 分)



Fig. 7-1 座学講習の様子



Fig. 7-2 実技講習の様子

7.3. システムの現場運用課題について

マルチコプターを用いた放射線測定システムは、モニタリングポストの代替手段として有効であるが、その運用にはいくつかの課題が存在する。以下にその課題と対応策を示す。

1) 運用経験の蓄積について

本章で示した講習を受けることで飛行ルートの作成やドローンの基本的な操縦は可能となるものの、安全な運航、効率的な運用、各現場に応じた柔軟な対応が可能となるためには、講習以外に多くの現場経験が必要となる。特に、緊急時に迅速かつ適切な対応を行うためには、運用者は日々の操縦訓練を積むだけでなく、様々なフィールドでの飛行経験を積むことが重要であると考ええる。

また、機体が故障した場合に備えて、複数の機体の運用経験を持つことが必要であると考えられる。特定の機種だけでなく、他のマルチコプターの操作経験を持つことで、機材トラブル発生時の対応力を高めることができる。Fig. 7-3 は MATRICE 300 (DJI 社製) の運用訓練の様子を示している。MATRICE 300 は講習や運用システムで使用する MATRICE 30 よりもサイズが大きい機体である。他の機体の運用例などを参考にしながら、異なる機体の特性を理解し、状況に応じた適切な運用を行えるよう準備する必要がある。

2) 運用マニュアルの整備について

緊急時モニタリングの運用方法や訓練方法を整理したマニュアルの作成が必要と考えられる。緊急時には、単にマルチコプターを飛行させるだけではなく、運用者の安全管理、車両や機材の汚染防止措置なども併せて実施する必要がある。そのため、標準的な手順を明文化し、各運用者が一貫した対応を行えるよう整備することが重要である。

3) 事前の候補地選定について

モニタリングポストの位置を事前に把握し、その付近の機体着陸ポイントや基地局の設置場所を事前に計画することで、迅速な対応が可能となると考えられる。事前の準備が不足していると、現場での運用に時間がかかるだけでなく、安全性の確保が難しくなるため、平時からの計画策定が必要である。

上記に示したものは運用時の課題と対応策であり、放射線検出器や無人機データ収集システムに関する詳細な課題については、「6.2. 無人機データ収集システム整備における課題と対応策」においてまとめた。今後、これらの課題に対する対応策を着実に実施

し、運用体制の強化を進めることで、マルチコプターを用いた放射線測定システムの実効性を向上させることができると考えられる。



Fig. 7-3 他機体の運用例 (MATRICE 300 を使用)

8. 関係各国との意見交換及び合同環境放射線モニタリングの実施

原子力災害時の放射線や放射性物質のモニタリングに係る技術や体制については、原子力発電所を有する諸外国においても検討が進められている。これらの内容をフォローし、国内でのモニタリング体制の検討に反映させることは有効であると考えられる。本章では、航空機モニタリングをはじめとする環境放射線モニタリング技術について、これまで深く意見交換を行うことのなかった諸外国の状況について情報収集することにより、今後の我が国の緊急時モニタリング体制の確立や、関係各国との緊急時の円滑な情報共有に資することを目的とした。

8.1. 意見交換及び合同環境放射線モニタリングの全体概要

2024 年 (令和 6 年) 11 月 11 日～11 月 15 日の期間に、アメリカ、フランス、韓国及びカナダの技術者及び研究者と意見交換を実施した。当会合に参加した各国の技術者及び研究者の所属組織は、日本を含めて以下の通りである。

- ・日本：原子力機構、規制庁
- ・アメリカ：米国エネルギー省 (United States Department of Energy; 以下、DOE)
- ・フランス：フランス放射線防護原子力安全研究所 (Institute de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire; 以下、IRSN)
- ・韓国：韓国原子力研究院 (Korea Atomic Energy Research institute; 以下、KAERI)
- ・カナダ：天然資源省 (Natural Resources Canada; 以下、NRCan)

会合初日 (11 月 11 日) には、各国が有する環境放射線モニタリングシステムやデータ解析手法、東電福島原子力発電所の周辺地域での測定経験について紹介をする口頭発表を行った。発表者及び発表タイトルを Table 8-1 に示す。その後、下記の 1)～3) を主題として参加者全体で情報交換及び意見交換を行い、今後の我が国の環境放射線モニタリング体制の強化に資する情報を収集した。当日に行った意見交換会の様子を Fig. 8-1 に示す。この意見交換で収集した情報の詳細については 8.2 節に示す。具体的には、下記の 1) から 3) の順に、8.2.1 項から 8.2.3 項に記載する。

- 1) 航空機による放射線モニタリングの実施方法 (詳細は 8.2.1 項)
- 2) 各国における原子力防災体制 (詳細は 8.2.2 項)
- 3) 緊急時モニタリング体制全般 (資器材配備体制を含む。詳細は 8.2.3 項)

会合 2 日目以降 (11 月 12 日から 11 月 15 日) には、各国が持ち込んだ放射線検出器を

用いて環境放射線モニタリングを実施し、測定結果を比較した。環境放射線モニタリングとして下記の 1) から 4) の 4 項目を実施した。このとき、放射線検出器の無人ヘリへの搭載方法や地上での検出器の動作試験場所に関して測定現場で議論を行い (Fig. 8-2)、測定データの解析手法や比較結果の違いの要因について議論を行った (Fig. 8-3)。環境放射線モニタリングの実施と測定結果の比較については 8.3 節に記載する。各モニタリング項目の実施方法及び測定結果の比較に関する詳細は下記の 1) から 4) の順に、8.3.1 項から 8.3.4 項に記載する。

- 1) 定点サーベイ (詳細は 8.3.1 項)
- 2) 歩行サーベイ (詳細は 8.3.2 項)
- 3) 自動車による走行サーベイ (詳細は 8.3.3 項)
- 4) 無人ヘリコプターによるモニタリング (詳細は 8.3.4 項)

Table 8-1 発表者及び発表タイトル

No.	Presenter	Affiliation	Title
1	Yukihisa Sanada	JAEA	Radiation measurement for Nuclear Disaster in Japan
2	Mena RaJah Marie, Norsworthy Mark Andrew	DOE	Radiation measurement for Nuclear Disaster in USA and introduction of radiation measurement in Fukushima
3	Marc Gleizes, Romain Vidal	IRSN	Radiation measurement for Nuclear Disaster in France and introduction of radiation measurement in Fukushima
4	Ji Young-Young	KAERI	Radiation measurement for Nuclear Disaster in South Korea and introduction of radiation measurement in Fukushima
5	Van Brabant Reid Alexander, Fortin Richard	NRCan	Radiation measurement for Nuclear Disaster in Canada and introduction of radiation measurement in Fukushima
6	Shigeo Nakama	JAEA	Announcement of joint survey plan



Fig. 8-1 全体会合の様子 (2024 年 11 月 11 日)



Fig. 8-2 現場での意見交換や議論の様子 (2024 年 11 月 12 から 11 月 14 日)



Fig. 8-3 議論の様子 (2024 年 11 月 15 日)

8.2. 情報交換で収集した情報の詳細

本節では、2024 年 (令和 6 年) 11 月 11 日に行った情報交換及び意見交換に基づき、日本を含む各国の航空機による放射線モニタリングの実施方法、各国における原子力防災体制、緊急時モニタリング体制全般について示す。

8.2.1. 航空機モニタリングの実施方法

・日本

緊急時において有人ヘリコプターによるモニタリングは、原子力災害対策マニュアル²⁴⁾に基づき、ERC 放射線班、原子力機構及び自衛隊が連携して実施する。使用可能なヘリコプターは機底に燃料タンクのない機種に限定され、自衛隊が保有するヘリコプターでは UH-60、UH-1J 等が該当する。放射線モニタリングシステムには、2.1 節に示した通り、大型の NaI(Tl)検出器及び高精度 GPS システムが主力として用いられる。測定データの取得方法及び測定データの解析方法は 3 節に記載した通り、基準対地高度を 300 m として予め設定した測線上を飛行して γ 線計数率を取得する。 γ 線計数率に対して各種換算パラメータを適用することで地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算し、3.7 節に記載した内挿補間処理 (IDW) を行うことで空間線量率の面的な分布を可視化する。5.2.2 項に記載した通り、一連のデータ解析は有人ヘリコプター着陸後に行われ、解析が完了するまで 25 分程度である。また、イリジウム衛星通信を用いたリアルタイムデータ通信システムを有しているが、本システムは γ 線計数率を取得及び表示するのに留まっており、地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算する機能は有していないのが現状である。

緊急時における無人機を用いたモニタリングについては、2024 年 (令和 6 年) に原子力災害対策指針補足参考資料³²⁾に、有人ヘリコプターによるモニタリングと同様に実施する旨の記載が追加され、緊急時モニタリングのツールとして正式に位置付けられた。無人機には、無人ヘリコプター、無人航空機、マルチコプターが用いられる。例えば、無人ヘリコプターにはヤマハ発動機社製の Fazer R G2 を採用しており、LaBr₃(Ce)検出器を用いた放射線測定システムを使用している。Fazer R G2 はガソリンで駆動し、100 分以上連続で飛行でき、最大搭載重量は約 30 kg である。測定データの取得方法及び測定データの解析方法は、基準対地高度を 80 m として予め設定した測線上を飛行して γ 線計数率を取得する。 γ 線計数率に対して各種換算パラメータを適用することで地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算し、面的な分布を可視化する。6.1.4 節に示した通り、SkyDataLink による空間線量率データのリアルタイムのマップ化及び解析が可能となっている。また、無人ヘリコプターで得られた結果を、人工ニューラルネットワークにより解析することで、地上測定値に近づけられる解析方法も開発されている⁷⁰⁾。

・アメリカ

アメリカでは、原子力災害や放射線緊急事態において、緊急オンコール国家対応 (Emergency On-Call National Response) と国家事後対応 (Follow-On National Response) のフェーズにおいて航空機モニタリングが実施される。これにより、広範囲の空間線量率を迅速に把握し、適切な防護措置の判断を支援する。

固定翼機は緊急オンコール国家対応のフェーズで運用され、回転翼機は国家事後対応フェーズで使用される。DOE には固定翼機 (Beechcraft 社製 Super King Air B350ER) が 3 機配備されており、1 機目はラスベガス、2 機目はワシントン DC に駐留し、3 機目は両地点の間を飛行することが許可されている。これらの機体には 6 つの 2"×4"×16" の NaI(Tl) 検出器、高純度 Ge 半導体検出器 (ORTEC 社製 IDM-200-V)、携帯型の簡易サーベイメータ、GM サーベイメータ等が搭載されている。基準対地高度は約 300 m、飛行速度は約 300 km/h であり、広大なエリアを迅速に測定できる。一方、国家事後対応フェーズに移行すると、より低高度での精密なモニタリングが求められるため、回転翼機 (Agusta Westland 社製 AW319) が投入される。回転翼機は、基準対地高度は約 90 m で、飛行速度は約 130 km/h で運用され、固定翼機とほとんど同様の機器構成であるが、18 個の検出器を搭載しており、より低線量率を評価することが可能である。航空機モニタリングで取得されたデータの収集及び解析には AVID (Advanced Visualization & Integration of Data) という、DOE が保有するソフトウェアが使用されている。AVID により、フライト中にリアルタイム測定が可能となり、着陸後には迅速に空間線量率マップの作成や、所定の報告様式への即時出力ができる。これにより、関係機関への情報共有が速やかに行われ、意思決定の迅速化が可能となる。なお、AVID は航空機モニタリングだけでなく、定点サーベイ、歩行サーベイ、自動車による走行サーベイにも対応しており、環境放射線モニタリングのデータ収集及び解析が一元的に管理できる仕組みとなっている。

・フランス

フランスでの緊急時における有人ヘリコプターによるモニタリングには、4 つの NaI(Tl) 検出器 (結晶サイズ 4"×4"×16") を用いた SpirMobile (Mirion 社製) と呼ばれる放射線測定システムを使用している。ノート PC に SpirMobile を操作するソフトウェアがインストールされており、このソフトウェアにより、スペクトルの取得、安定化及び線形化を行う。GPS 測位データや DEM データの取得できる解析ツールの整備も行っている。原子力発電所から放出された人工放射性核種だけでなく、K や U 及び Th といった天然放射性核種の寄与も併せて評価する。SpirMobile は多様な種類のヘリコプターに搭載可能であり、例えば、Aerospatiale 社製の Eurocopter AS350 Ecureuil や、Beechcraft 社製の 200 Super King Air、Sud Aviation 社製の SA 330 Puma などに検出器を搭載した実績がある。通常、ヘリコプター機体の側方に取り付けたカゴの中に SpirMobile システムを搭載するが、カゴが取り付けられないようなヘリコプター機種の場合は、検出器をヘリコプ

ター機内の床に置いて対応できる。

・韓国

KAERI は、原子力発電所事故時の迅速な放射線モニタリングを目的とし、定期的に有人ヘリコプターを用いた航空機モニタリング訓練を実施している。この訓練は、釜山広域市をはじめとする地元自治体と協力のもとで行われ、実際の原子力発電所事故を想定したシナリオに基づいて測定が行われる。特に、古里原子力発電所における事故発生を想定し、発電所周辺から広安里海水浴場に至る広範な範囲で空間線量率の測定が実施された。

定期的な航空機モニタリングには、釜山広域市警察庁が所有する MI-172 ヘリコプターを使用し、大型の NaI(Tl)シンチレーション検出器を搭載している。測定結果の精度を確保するため、地形データ (DEM) や GPS データを活用した高度補正が行われる。また、米国エネルギー省 (DOE) の手法に基づき解析される。さらに、測定結果の妥当性を確認するため、同じ調査エリアにおいて車両サーベイも併用される。加えて、原子力事故時における放射性物質の拡散を想定したモニタリングシナリオでは、釜山広域市消防災害本部が所有する AW-139 ヘリコプターを使用し、原子力発電所周辺から市内へ拡散する放射性物質の影響を評価する調査が実施された。この調査では、ヘリコプターにナビゲーションシステムが搭載されており、飛行経路がより正確な直線を描くことが可能であった。古里原発周辺には標高の高い山岳地帯が広がるため、対地高度約 800 m で飛行し、海上で異なる高度で飛行することでバックグラウンド放射線の変動を評価した。この調査では、4"×4"×16"の大型 NaI(Tl)検出器を搭載し、航空機による広域の放射線測定が行われた。

以上のように、KAERI の航空機モニタリング体制は、DOE の手法を取り入れた高度なデータ解析技術と、実際の事故を想定した訓練を通じて強化されている。

・カナダ

カナダでは、航空機モニタリングの際に政府専用機や民間機を使用し、NRCan の職員がヘリコプターに搭乗して放射線測定システムを操作する。使用される放射線測定システムは、 γ 線測定用の2つの NaI(Tl)検出器 (RSI 社製) 及び中性子線測定用の He-3 中性子検出器、並びにデータ収集及び解析を行う機器で構成されている。このシステムは、ヘリコプターの機種を問わず搭載できるように設計されており、小型の民間ヘリコプターから大型の軍用ヘリコプターまで幅広い機体での運用が可能である。通常、放射線測定システムはヘリコプター機内の床に設置されるが、床面積が限られる小型機の場合には、カゴ型の検出器搭載ユニットを機体外外部に取り付けることもできる。このカゴ (Dart Aerospace 社製) は、鉄製メッシュとアルミニウム製アンカープレートで構成され、NRCan の要求仕様に基づいて製作された。カゴのバスケット部分の寸法は 63 cm × 52

cm × 213 cm で、カナダ、アメリカ、ヨーロッパで Bell 206B、Eurocopter AS350、Bell 412 への追加型式認証を取得している。搭載作業には約 2 時間を要し、装置の重量は 55 kg、全体の重量は 90 kg である。IP64 の防塵及び防水性能を有し、耐久性に優れた構造となっている。このカゴには、NaI(Tl)検出器のほか、電波高度計、レーザー距離計、航空ナビゲーションシステム、GPS 受信機、GPS アンテナなどが搭載されており、リアルタイム通信機能により測定データの即時解析及び共有が可能である。

航空機モニタリングの際には、事前に計画された測線に沿って飛行し、対象エリアの放射線分布を調査する。測線間隔は通常、飛行速度の 1～2 倍に設定される。使用される有人ヘリコプター (Bell 206B Jet Ranger または Eurocopter AS350 Astar) は、最大 2.5 時間の連続飛行が可能である。例えば、飛行速度 25 m/s、測線間隔 25 m の場合には 0.5 km² の範囲を、飛行速度 60 m/s、測線間隔 100 m の場合には 50 km² の範囲をカバーすることができる。2012 年 6 月 7 日に Suffield で実施された試験では、上空から La-140 の汚染分布を精度良く把握することができ、高速飛行時にも測定精度が確保されることを示されている。

8.2.2. 各国における原子力防災体制

本項では、日本を含む各国における原子力防災体制について記載する。日本以外の国については、8.1 節で行った情報交換及び意見交換で収集した情報に基づいているが、適宜、関連文書を参照して詳細な情報を補完した。

・日本^{24),25)}

日本の原子力防災体制は、国、地方自治体、原子力事業者、関係機関が連携し、原子力災害の発生を未然に防ぐとともに、事故時の影響を最小限に抑えることを目的として構築されている。東電福島原子力発電所事故の教訓を踏まえ、現在では防災計画の強化や緊急時対応の迅速化に重点を置いた体制が整備されている。原子力防災の基本方針は、「原子力災害対策特別措置法」に基づき、平時からの事前準備、緊急時の即応対応、事故後の復旧と影響低減の三段階で構成されている。特に、原子力施設周辺の住民を迅速かつ的確に保護するため、事故の進展に応じた段階的な防護措置が計画されており、避難や屋内退避の基準が明確に定められている。

原子力防災に関する主な関係機関として、内閣府 (原子力防災担当) が防災基本計画の策定や自治体との調整を担い、原子力規制委員会は原子力施設の安全規制やモニタリング体制の構築を担当する。原子力事業者は、施設の安全運転と事故時の初動対応を担うとともに、迅速な情報提供が求められる。地方自治体は、住民の避難計画の策定や防災訓練の実施を担当し、警察、消防、自衛隊などの機関は、事故発生時の救助、避難支援、交通規制、除染活動などに関与する。また、原子力機構等の研究機関は、放射線影響評

価や緊急時モニタリング支援を行い、科学的な知見を基に対応を支援する役割を担っている。原子力防災においては、原子力施設周辺を PAZ (原子力施設から概ね半径 5 km 圏内)、UPZ (原子力施設から概ね半径 30 km 圏内) といった区域に分類し、それぞれの区域ごとに異なる防護措置を講じることが原則となっている。PAZ では重大事故の発生直後に即時避難が求められ、UPZ では事故の進展状況に応じた避難や屋内退避、安定ヨウ素剤の服用が実施される。UPZ 外については、モニタリングデータをもとに食品や飲料水の管理や長期的な防護措置が検討される。

原子力事故が発生した場合の対応フローとしては、原子力事業者が異常を検知し、国や自治体に通報した後、原子力規制委員会が状況を評価する。事故が進展し、全面緊急事態に至った場合には、原子力災害対策本部が設置され、国及び地方公共団体が OIL を基に住民の防護措置を判断する。並行して、各地に配置されたモニタリングポスト、自動車による走行サーベイや航空機モニタリングを用いた緊急時モニタリングが実施され、環境中の放射線レベルを迅速に把握する体制が整備されている。緊急時モニタリングデータの解析結果は、原子力災害対策本部や関係機関に共有され、原子力規制委員会が OIL 基準に照らして評価を行う。これを受け、原子力災害合同対策協議会を通じて国と地方公共団体が協議し、避難や屋内退避の範囲、安定ヨウ素剤の配布などの防護措置を決定する。国は原子力規制委員会や原子力災害対策本部を通じて、地方公共団体へ必要な防護措置の指示を出し、警察、消防、自衛隊と連携して避難支援を実施する。事故収束後は、環境モニタリングの継続、被ばく医療、除染作業、住民の帰還支援など、長期的な復旧対策が実施される。

・アメリカ 74),75),76)

アメリカの原子力防災体制は、連邦政府、州政府、地方自治体が連携し、原子力事故の発生時に迅速かつ効果的な対応を行うことを目的として構築されている。特に、米国エネルギー省 (DOE) が主体となり、連邦放射線モニタリング評価センター (Federal Radiological Monitoring & Assessment Center; 以下、FRMAC) を現地に設置し、放射線モニタリング及び影響評価を統括する体制が整備されている。FRMAC は、事故の影響を評価し、得られたデータを基に適切な防護措置を決定するための情報を提供する役割を担っており、連邦、州、地方自治体の各機関との調整を行う。FRMAC の運用においては、原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission; 以下、NRC)、連邦緊急事態管理庁 (Federal Emergency Management Agency; 以下、FEMA)、環境保護庁 (Environmental Protection Agency; 以下、EPA) 及び農務省 (United States Department of Agriculture; 以下、USDA) 等の関係機関が協力する。特に NRC は、商用原子力発電所の安全規制と緊急時対応を担当し、事故発生時には専門家チームを現場に派遣して状況評価を行う。EPA は、防護対策指針 (Protective Action Guide; 以下、PAG) を策定し、放射線の影響を最小限に抑えるための基準を提供する。FEMA は、州及び地方自治体と連携し、避難計画や防護

措置の実施支援を行う。また、各州及び地方自治体は、地域の特性に応じた地域防災計画 (State and Local Emergency Plans) を策定し、住民の避難や防護措置の実施を主導する。これらの計画は、連邦政府の指針に基づきながら、地域ごとのリスクに応じて策定され、実際の対応に反映される。

緊急時の放射線モニタリングについては、FRMAC が主体となり、航空機モニタリングシステム (Aerial Measuring System; AMS) や地上走行サーベイ (Ground-based Radiological Surveys) を活用し、環境中の放射線レベルを迅速に測定する。これらのデータは、EPA の PAG に基づき評価され、住民の安全確保のための措置が講じられる。

米国の原子力災害対応は、「原子力/放射線災害付属文書 (Nuclear/Radiological Incident Annex; NRIA) に基づいて行われる。この文書では、原子力事故発生時の対応フローが定められており、DOE が FRMAC の管理と初期配備の責任を負い、各関係機関と連携しながら対応を進めることが規定されている。また、食品の安全確保に関しては、アメリカ食品医薬品局 (Food and Drug Administration; FDA) が監督し、放射能汚染の影響を評価した上で、必要な対策を講じる。

このように、米国の原子力防災体制は、連邦、州、地方自治体がそれぞれの役割を担いながら緊密に連携し、迅速な情報収集と評価、適切な防護措置の実施を通じて、事故による影響を最小限に抑える仕組みとなっている。

・フランス ^{76),77),78)}

フランスの原子力防災体制は、原子力事故の予防と、万が一の事故発生時における迅速かつ適切な対応を目的として構築されている。国内の原子力施設の安全規制、放射線モニタリング、緊急時対応は、政府機関、自治体、事業者、技術支援機関がそれぞれの役割を担い、相互に連携することで運用されている。フランスの原子力防災は、「原子力に関する透明性及び安全性に関する法律」(2006年制定)を基盤としており、原子力施設の運営情報の公開と安全性の確保が義務付けられている。また、「重大な原子力または放射線事故に係る国家対応計画」に基づき、大規模な事故時における国全体の対応フレームワークが整備されている。

フランスの原子力防災体制において、以下の主要機関がそれぞれの役割を担っている。

・原子力安全庁 (以下、ASN)

原子力施設の安全規制と監督を担い、事故発生時には対応の調整を行う。

・放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN)

ASN の技術的支援機関として、放射線モニタリング、事故影響評価、緊急時の放射線データ解析を担当する。

・県知事 (Prefet)

地方レベルでの防災対策の責任者として、特別介入計画 (PPI) を策定し、住民の避難計画や防護措置を指揮する。

- ・ フランス電力公社 (EDF)

原子力発電所の運営者として、事故発生時には施設内の対応を行い、自治体や規制当局に迅速に情報提供を行う。

原子力施設ごとに策定される特別介入計画 (以下、PPI) は、施設から半径 10 km 以内の住民を対象とし、事故発生時の防護措置や避難計画を定めている。県知事が指揮を執り、状況に応じた措置を実施する。さらに、大規模事故に対応するための「国家対応計画」が整備されており、PPI の範囲を超える影響が想定される場合には、政府主導で対応が進められる。事故発生時には、ASN が緊急時対応センターに対策本部を設置し、国レベルの対応を統括する。同時に、県庁にも現地対策本部が設置され、EDF 及び自治体と連携しながら住民保護のための措置を実施する。また、IRSN が運用する放射線モニタリングシステム (TELERAY) を通じて、フランス全土の放射線レベルをリアルタイムで監視し、異常を迅速に検出する体制が整備されている。東電福島原子力発電所事故を受け、EDF は 2011 年に原子力事故即応部隊 (以下、FARN) を創設した。FARN は、事故発生から 12 時間以内に現場へ派遣され、24 時間以内に可搬式設備の設置や冷却装置の接続を完了することを目標としている。この部隊は、過酷な環境下でも活動できるよう設計されており、原子力事故時の被害抑制に貢献する。

- ・ 韓国⁷⁹⁾

韓国の原子力防災体制は、政府機関、専門技術機関、地方自治体が緊密に連携し、原子力災害の予防および緊急時対応を実施する体制が整備されている。特に、東電福島原子力発電所事故後の安全規制強化の流れを受け、原子力安全規制の独立性確保と迅速な対応を重視した体制が構築されている。韓国の原子力安全規制の中核を担うのが、原子力安全委員会 (Nuclear Safety and Security Commission; 以下、NSSC) である。2011 年に大統領直属の独立行政機関として設立され、原子力発電所の安全規制、核物質管理、放射線災害への対応などを総括している。NSSC は、原子力安全に関する総合計画の策定や、原子力災害発生時の中央統括機関としての役割を果たし、韓国国内の原子力防災戦略を指揮する。韓国原子力安全技術院 (Korea Institute of Nuclear Safety; 以下、KINS) は、政府出資の技術専門機関として、原子力安全規制委員会を技術面で支援し、安全審査、施設検査、教育及び研究を担当している。特に、原子力施設の安全監視に関する高度な評価技術を有し、国内外の原子力機関と連携しながら、原子力防災における科学的なアプローチを提供している。本報告において合同環境放射線モニタリングに参加した KAERI は、原子力技術の研究開発を担う機関であり、政府の意思決定を技術的に支援している。KAERI は、韓国国内に複数の拠点を有し、特に環境安全技術本部において、大気拡散シミュレーションや環境放射線モニタリングの技術開発を行っている。平時においては、定期的な防災訓練やデータ比較を通じて、放射線監視体制の強化を図るとともに、

釜山をはじめとする原子力施設周辺での航空測定訓練を実施している。

原子力事故発生時には、中央放射能防災対策本部が設置され、国務総理が本部長、NSSC 委員長が次長を務める形で、政府全体として対応にあたる。また、より現場に即した指揮を行うために、現場放射能防災指揮センターが設置され、NSSC 委員長が直接指揮を執る。これにより、国レベルと現場レベルの両面で迅速かつ効果的な対応が可能となっている。放射線モニタリングに関しては、NSSC の主導のもと、各地に設置された測定機器を活用し、原子力施設周辺の環境モニタリングを行う。さらに、自動車による走行サーベイ、航空機モニタリング及び大気拡散シミュレーションを活用することで、被ばく評価を行い、防護措置の判断に活用している。

・カナダ⁸⁰⁾

カナダの原子力防災体制は、連邦政府機関が連携し、原子力災害のリスク管理と迅速な対応を可能とする体制が整備されている。主要な関係機関としては、カナダ原子力安全委員会 (Canadian Nuclear Safety Commission; 以下、CNSC) 及び NRCan が挙げられる。CNSC は、カナダ国内の原子力施設や放射性物質の使用を規制し、安全基準の策定、監督、評価を行う機関である。健康、安全、セキュリティ、環境保護を目的として、事業者のコンプライアンスを確保し、緊急時には国際基準に基づいた対応を指揮する。また、国民への情報提供や透明性の確保も重要な役割として担っている。一方、NRCan は、エネルギー、鉱物資源、地球科学、リモートセンシングなどの分野を担当し、原子力災害時には放射線モニタリングと環境評価の役割を担う。特に、カナダ地質調査所 (Geological Survey of Canada; 以下、GSC) 及びカナダ危険情報サービス (Canadian Hazard Information Service: 以下、CHIS) と連携し、放射線の拡散予測や緊急時の測定及び分析を行う。GSC は鉱物、エネルギー資源の調査とともに、放射線モニタリングや災害リスク管理を支援する地質科学的研究を実施している。また、GSC の下部組織である CHIS は、地震や宇宙天気、放射線事故などの監視を担当し、リアルタイムでの環境モニタリングを行う。さらに、国際民間航空機関 (International Civil Aviation Organization: ICAO) に対し、日本、フランス、オーストラリアと連携して放射線や天候に関する情報提供も行っている。

カナダの原子力防災体制は、これらの機関が相互に協力することで、緊急時の情報収集、リスク評価、影響予測、住民保護のための迅速な意思決定を可能にしている。また、国家レベルの放射線モニタリングシステムの強化により、災害時における被害の最小化と住民の安全確保に努めている。

8.2.3. 緊急時モニタリング体制全般

本項では、日本を含む各国における緊急時モニタリング体制全般について記載する。

日本以外の国については、8.1 節で行った情報交換及び意見交換で収集した情報に基づいているが、適宜、関連文書を参照して詳細な情報を補完した。

・日本⁸¹⁾

日本の原子力災害時における緊急時モニタリング体制は、国、地方公共団体、原子力事業者及び関係機関が連携し、迅速かつ的確に放射線の状況を把握し、防護措置の判断に必要な情報を収集することを目的としている。特に、原子力災害が発生した際には、緊急時モニタリングセンター (Emergency Monitoring Center, 以下、EMC) が設置され、関係機関と協力しながら、モニタリング活動の調整及びデータの統合を行う。EMC の主な役割は、緊急時モニタリング計画の策定、モニタリング活動の実施・調整、データの集約と評価、そして防護措置の判断支援である。事故の進展状況に応じて適切な測定手法やモニタリングポイントを設定し、速やかに環境中の放射線状況を把握できるよう体制が整えられている。収集されたデータは、OIL に基づいて分析され、住民の避難や屋内退避といった防護措置の判断に活用される。

緊急時モニタリングには複数の手法が併用される。各地に設置されたモニタリングポストでは、常時、環境放射線レベルが監視され、異常値の検知が可能となっている。自動車による走行サーベイでは、広範囲の空間線量率を効率的に測定し、放射線分布の詳細な把握が行われる。また、航空機モニタリング (有人機、無人機) では、広域の空間線量率を短時間で測定し、影響範囲の迅速な評価が可能となる。加えて、土壌や水、食品などの環境試料を採取し、放射性物質の分布や濃度を分析することで、被ばくリスクの詳細な評価が行われる。日本の緊急時モニタリング体制は、これらの多様な手法を組み合わせることで、原子力災害発生時に迅速かつ包括的な情報収集を可能とし、的確な防護措置の判断を支援する枠組みとして機能している。

・アメリカ^{82),83)}

アメリカにおける緊急時モニタリング体制は、事故の発生直後から復旧段階までの複数フェーズに分けて構築されており、各フェーズで異なる機関が役割を担いながら対応を進める仕組みとなっている。DOE、EPA、アメリカ合衆国国防総省 (United States Department of Defense; 以下、DOD)、州及び地方自治体などが連携し、事故の進展に応じた段階的な対応を行う。

事故発生直後は、DOE を中心に迅速な評価と初期対応が行われる。収集できる各種情報をもとに、大気拡散シミュレーションを実施し、放射性物質の拡散予測や空間線量率の推定が行われる。これにより、初動対応を支援するためのデータが提供され、現場での対応チームと連携した情報共有が進められる。

事故発生から数時間から数日以内には、州及び地方自治体が中心となって初動対応を実施する。各州では、原子力発電所を有するか否かによって異なる対応計画を持ってお

り、必要に応じて DOD の民間支援チーム (CST) や DOE の放射線支援プログラムが補完的に支援を行う。現場では、携帯型の放射線測定器や車両搭載型のモニタリング装置を活用し、環境中の放射線レベルの測定が行われる。測定データは、CBRN Responder と呼ばれる国家標準のモバイルアプリケーションに統合され、関係機関がリアルタイムで情報を共有できる仕組みが整備されている。事故発生から数日後には、DOE の航空機モニタリングチームが本格的に展開される。政府からの要請に応じて、4 時間以内に固定翼機による航空機モニタリングを開始する体制も整備されており、広範囲の空間線量率分布を迅速に把握することが可能である。EPA も地上チームや固定センサーを活用した放射線測定を実施し、長期的なモニタリング体制の構築に寄与する。

事故発生から数週間が経過すると、DOE が中心となって FRMAC が設置され、放射線モニタリングや環境影響評価が統括される。この段階では、FRMAC が各種データの統合、分析、意思決定の支援を行い、放射線防護のための具体的な措置が講じられる。一定の基準が満たされた後、FRMAC の指揮権は DOE から EPA へ移管され、除染や住民の帰還支援などの長期的な復旧対策が中心となる。

事故発生から数か月から 1 年程度の間には、放射線モニタリングの継続、被ばく医療、環境回復措置が進められる。この段階では、各州の役割が強化され、EPA が主導する形で国全体の復旧が図られる。緊急対応の終了後も、放射線の影響評価や長期的な健康リスクの管理が継続され、必要に応じて追加のモニタリングが行われる。

このように、アメリカの緊急時モニタリング体制は、初動対応から長期的な復旧まで、事故の進展に応じて段階的に対応できる仕組みが構築されている。各機関がそれぞれの役割を担い、連携を強化することで、迅速かつ的確な対応が可能となっている。

・フランス⁸⁴⁾

フランスでは、原子力事故や放射線緊急事態への対応として、国家レベルでの指揮系統と技術的支援機関が緊密に連携する体制が整備されている。原子力安全・放射線防護機関 (以下、ASNR) は、2025 年 1 月に原子力安全機関 (以下、ASN) と放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN) が統合されて設立された。ASNR は、政府や地方自治体と連携し、原子力事故時の意思決定を担う。特に、原子力施設の外部における住民の防護措置については、政府の地方代表である知事が最終的な判断を下し、ASNR の技術的助言をもとに避難や防護措置を実施する。緊急時には、IRSN に設置される技術緊急センターが対応を主導する。このセンターには、原子力施設の運転状況を評価し、放射性物質の放出予測を行う「施設評価セル」と、環境モニタリングデータや気象データをもとに放射線の拡散予測や住民への影響評価を行う「放射線影響セル」が設置されている。これにより、事故の進展状況を詳細に分析し、行政機関に科学的な助言を提供する体制が整っている。

放射線モニタリングは、固定型、移動型、航空機搭載型の測定機器を組み合わせた多

層的なシステムによって実施される。全国に配置された TELERAY ネットワークが平時から空間線量率を監視し、異常が検知された場合には、移動測定部隊である「モバイルセル」が現場での詳細な測定を行う。モバイルセルは、消防士などの現場対応部隊と連携し、放射線レベルの評価や環境試料の収集を担当する。これに加え、IRSN は航空機やドローンを活用した広域モニタリングを実施し、迅速な状況把握を可能としている。携帯型モニタリング機器には、NaI(Tl)検出器や Ge 半導体検出器、 α/β 線カウンター、液体シンチレーションカウンターなどが含まれる。航空機搭載型システムには、4G や衛星通信装置、レーザー距離計、放射線検出器が備えられており、広範囲のモニタリングを行うことができる。また、IRSN は産業用ドローンを活用し、地上測定が困難な地域での放射線モニタリングにも対応している。これらのシステムは、旧採掘場のモニタリングなど、複雑な地形での測定にも活用されている。

IRSN は、自国のモニタリング機器の妥当性を検証するため、複数回にわたり福島での測定を実施している。例えば、2019 年(令和元年)には原子力機構と合同で歩行サーベイ、自動車による走行サーベイ、無人ヘリコプターによるモニタリングを行い、異なる測定手法間での比較を行いながら、測定機器の妥当性を確認している⁸⁵⁾。これらの国際協力の取り組みは、緊急時モニタリング技術の発展に寄与しており、フランス国内での放射線監視体制の強化にも活かされている。

フランスにおける緊急時モニタリング体制は、ASNRR による国家レベルの意思決定と、IRSN の技術支援が緊密に連携することで、迅速かつ正確な放射線監視と防護措置の実施を可能としている。特に、モニタリングネットワークの充実と、地上測定、航空機モニタリングを組み合わせた多様な測定手法の活用が、原子力災害発生時の対応能力を高める重要な要素となっている。

・韓国

韓国では、原子力事故や放射線緊急事態への対応として、政府機関や研究機関が連携し、迅速なモニタリング体制を構築している。KAERI は、原子力安全および環境放射線モニタリングの技術開発を担い、緊急時に政府の意思決定を技術的に支援する役割を果たしている。KAERI は大田広域市、慶州市、井邑市、釜山広域市などに拠点を有し、特に環境安全技術本部が緊急時モニタリングと放射線影響評価を担当している。緊急時モニタリングでは、単に空間線量率の時系列変化を把握するだけでなく、住民の防護措置の実施に必要な情報の提供が求められる。特に、放射性物質の拡散が予測される地域では、空間線量率の分布状況を迅速に把握することが重要となる。そのため、KAERI は、 γ 線スペクトロメトリを活用した多様なモニタリング機器を開発して運用しており、バックパック型、車載型、航空機搭載型、水中測定型といった資機材を配備している。これにより、陸上、空中、水中の様々な環境において迅速な測定が可能となっている。特に、陸上で使用される可搬型の $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器については、原子力機構が開発した検

出器と比較し、その性能を評価するために、実際に福島県内の空間線量率が比較的高いエリアで試験を実施した。その結果、KAERI の検出器は原子力機構の検出器と同等の測定精度を有し、放射線レベルの評価において高い信頼性を持つことが確認された⁸⁶⁾、エラー! 参照元が見つかりません。)。さらに、近年では IoT や AI 技術を活用した無人監視システムの導入も進められている。これにより、事故発生時に人的リスクを最小限に抑えつつ、リアルタイムで広範囲の放射線モニタリングが可能となる。特に、遠隔監視技術の発展により、迅速なデータ収集と情報共有が可能となり、防護措置の意思決定を支援する体制が強化されている。

以上のように、韓国の緊急時モニタリング体制は、KAERI の技術開発と政府の連携によって強化されており、迅速かつ精度の高い放射線測定が可能となっている。

・カナダ

カナダでは、偶発的または意図的な放射線事故に対応するための緊急時モニタリング体制が整備されている。NRCCan は、原子力発電所事故、放射性物質の紛失、犯罪やテロ攻撃に対する対応支援を行い、移動式放射線モニタリング業務を担っている。これには、放射性物質の探索による事故防止活動も含まれる。NRCCan は、連邦原子力緊急事態計画 (Federal Nuclear Emergency Plan; 以下、FNEP) の第 5 版において、放射線モニタリングと測定の調整を担当する連邦政府機関として指定されており、空中及び地上ベースの移動モニタリングデータを技術諮問グループに提供する責務を負っている。NRCCan の原子力緊急時対応 (Nuclear Emergency Response; 以下、NER) チームは、放射線調査技術の開発、維持、運用を行う役割を担い、連邦放射線評価チームの一員として、航空機、車両、現地測定による放射線調査を実施する。この調査に基づき、信頼性の高い放射線マップを作成し、その結果の解釈において技術諮問グループを支援する責務を持つ NER チームは、国家および州レベルの緊急対応訓練、大規模イベントの警備、環境修復プロジェクト、各種研究プロジェクトにおいて調査を実施しており、緊急時対応能力の向上を図っている。NRCCan は、有人ヘリコプターおよび無人航空機を活用したモニタリング体制を整備しており、移動可能な検出器とリアルタイム解析機能を用いて、放射線源の迅速な追跡が可能となっている。また、GIS を活用した地図作成技術を駆使することで、緊急時の迅速な意思決定を支援している。無人機の例としては、カナダの ING Robotics Aviation 社が開発した中型遠隔操縦ヘリコプターを所有しており、バッテリー駆動の電動モーターを搭載し、気象条件が良好な場合には最大 30 分間の飛行が可能である。この無人ヘリコプターには、放射線源の方向特性を評価するための検出器「ARDUO」エラー! 参照元が見つかりません。を搭載することができる。ARDUO には 8 個の CsI(Tl)検出器が組み込まれている。

カナダにおける緊急時モニタリング体制は、NRCCan を中心に航空機及び地上の移動型モニタリング技術を組み合わせ、迅速かつ高精度な放射線測定を実現する仕組みとなっ

ている。GIS 技術を活用したデータ解析やリアルタイム通信機能の導入により、緊急時の対応能力が強化されている。

8.3. 合同環境放射線モニタリングの実施

2024 年 (令和 6 年) 11 月 12 日～14 日にかけて、アメリカ、フランス、韓国及びカナダの技術者及び研究者と共に合同環境放射線モニタリングを実施した。合同環境放射線モニタリングの実施場所の概略図を Fig. 8-4 に示す。本図の Main Monitoring Survey Area (以下、MMSA) において、定点サーベイ、歩行サーベイ、自動車による走行サーベイ及び無人ヘリコプターによるモニタリングを行った。

定点サーベイでは、測定地点にて三脚上に放射線検出器を設置し、20 分から 30 分間かけて γ 線スペクトル測定を行うことで空間線量率を評価した。歩行サーベイでは、バックパック型の放射線検出器を測定者が背負い、歩くことで空間線量率分布を評価した。自動車による走行サーベイでは、放射線検出器を自動車内の前方又は後部に設置し、広域を走行することで空間線量率分布を評価した。無人ヘリサーベイでは、ヘリ機体の下部に放射線検出器を搭載して飛行することで空間線量率分布を評価した。なお、各機関がヘリに搭載する検出器を取り付け、測定が終わり次第、次の測定機関の検出器を取り付け、同じ飛行コースで測定を実施した。

モニタリングの実施場所については、MMSA の内、Basic Monitoring Area (以下、BMA) と Sub Small Monitoring Area (以下、SSMA) の 2 つを設定した。BMA は帰還困難区域外であるが、SSMA は帰還困難区域内であるため、後者の方が前者に比べて空間線量率が高い傾向にある。このように、空間線量率の分布傾向が異なるエリアでの測定結果を各国間で相互比較することで、各国のデータ解析手法や評価基準の違いを把握することを目的としている。この比較を通じて、測定の精度向上や結果の解釈に関する共通理解の形成が期待される。BMA 内では、無人ヘリコプターによるモニタリングのキャリブレーションポイントで、定点サーベイを行った。その後、エリア全体を網羅するように、歩行サーベイ及び無人ヘリコプターによるモニタリングを実施した。SSMA 内では、BMA よりも細かい測線間隔で歩行サーベイを実施した。SSMA は BMA よりも範囲が狭いため、エリアの一部が無人ヘリサーベイによって評価された。SSMA を除いた MMSA 内では、歩行サーベイの際の測線間隔を広く取り、測定を行った。車両サーベイでは、可能な限り歩行サーベイを同じルートを走行した。なお、走行サーベイでは、MMSA だけでなく空間線量率が比較的高い東電福島原子力発電所から北西方向を測定した。定点サーベイ、歩行サーベイ、自動車による走行サーベイ及び無人ヘリコプターによるモニタリングで用いられた、各国の調査機材の詳細情報を Fig. 8-5～Fig. 8-8 に示す。定点サーベイに用いた放射線検出器 (Fig. 8-5) について、DOE と NRCan から測定機器が持ち込まれなかったため、両機関の情報は記載していない。また、歩行サーベイに用いた放射線検出器については、DOE の検出器が多数持ち込まれたが、詳細な情報をまとめることが非常に困難であったため、本報告では、他国の検出器と構成が近い検出器の情報のみ記載するに留めた。

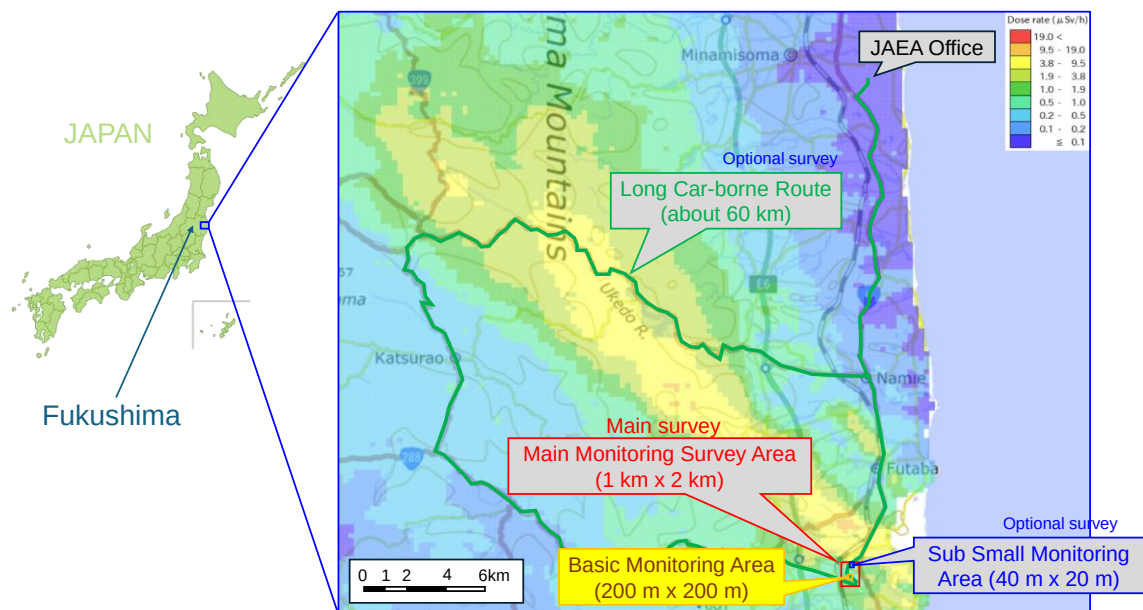


Fig. 8-4 合同環境放射線モニタリングの実施場所の概略図
(背景地図は、EMDB の航空機モニタリングの結果⁷¹⁾に範囲及び経路を追記して掲載)

Detector	Ge Detector (Falcon)	Nal(Tl) (MARK-B1)	LaBr ₃ (Ce) (MARK-B2)	LaBr ₃ (Ce) (MARK-M1)	Ge Detector (DETECTIVE DX 100)
Institution	JAEA	KAERI	KAERI	KAERI	IRSN
Size of crystal	2.4" φ × 1.2"	3.0" φ × 3.0"	2.0" φ × 2.0"	2.0" φ × 2.0" × 2 ea.	2.6" φ × 2.0"
ROI (keV)	20 – 3000	50 – 3000	50 – 3000	50 – 3000	20 – 3000
Dose rate range	BG - 30 μGy/h BG - 30 μSv/h	BG - 10 μSv/h	BG - 50 μSv/h	BG - 50 μSv/h	Not evaluated
Data collection interval (s)	1.0	1.0 or 2.0	1.0 or 2.0	2.0	Variable
Availability of spectrum measurements	○	○	○	○	○
Image					

Fig. 8-5 定点サーベイに用いた放射線検出器の詳細情報

Detector	CsI(Tl) (Hot spot finder)	NaI(Tl) (MARK-B1)	LaBr ₃ (Ce) (MARK-B2)	LaBr ₃ (Ce) (MARK-M1)	NaI(Tl) (Spirpack)	NaI(Tl) (RS-530)	NaI(Tl) (Gemini)	NaI(Tl) (Ludlum)
Institution	JAEA	KAERI	KAERI	KAERI	IRSN	NRCAN	DOE	DOE
Size of crystal	1.5" × 1.5" × 1.0"	3.0" φ × 3.0"	2.0" φ × 2.0"	2.0" φ × 2.0" ea.	3.0" × 3.0"	3.0" φ × 3.0"	1.5" × 2.5" × 8.0"	0.98" × 0.98"
ROI (keV)	30 – 2,000	50 – 3,000	50 – 3,000	50 – 3,000	25 – 3,000	12 – 3,000	30 – 3,000	20 – 1,500
Dose rate range	0.001 – 10 μSv/h	BG - 10 μSv/h	BG - 50 μSv/h	BG - 50 μSv/h	1 nSv/h - 30 μSv/h	Not evaluated	Not evaluated	Not evaluated
Data collection interval (s)	1.0	1.0 or 2.0	1.0 or 2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Availability of spectrum measurements	○	○	○	○	○	○	○	○
Image								

Fig. 8-6 歩行サーベイに用いた放射線検出器の詳細情報

Detector	CsI(Tl) (Hot spot finder)	NaI(Tl) (MARK-B1)	LaBr ₃ (Ce) (MARK-B2)	LaBr ₃ (Ce) (MARK-M1)	NaI(Tl) (Spirpack)	NaI(Tl) (Ulysse)	NaI(Tl) (RSX-1)	NaI(Tl) (Gemini)
Institution	JAEA	KAERI	KAERI	KAERI	IRSN	IRSN	NRCAN	DOE
Size of crystal	1.5" × 1.5" × 1.0"	3.0" φ × 3.0"	2.0" φ × 2.0"	2.0" φ × 2.0" ea.	3.0" × 3.0"	16" × 4.0" × 2.0"	4.0" × 4.0" × 10"	4.0" × 4.0" × 10"
ROI (keV)	30 – 2,000	50 – 3,000	50 – 3,000	50 – 3,000	25 – 3,000	25 – 3,000	12 – 3,000	12 – 3,000
Dose rate range	0.001 – 10 μSv/h	BG - 10 μSv/h	BG - 50 μSv/h	BG - 50 μSv/h	1 nSv/h - 30 μSv/h	1 nSv/h – 5 μSv/h	Not evaluated	Not evaluated
Data collection interval (s)	1.0	1.0 or 2.0	1.0 or 2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Availability of spectrum measurements	○	○	○	○	○	○	○	○
Image								

Fig. 8-7 自動車による走行サーベイに用いた放射線検出器の詳細情報

Detector	LaBr ₃ (Ce)	LaBr ₃ (Ce) (MARK-M1)	Nal(Tl) (SpirExplorer)	CsI(Tl) (ARDUO)	Nal(Tl) (Gemini)
Institution	JAEA	KAERI	IRSN	NRCAN	DOE
Size of crystal	1.5" × 1.5" × 3	2.0" φ × 2.0" × 2 ea.	1.4' " × 2.0"	8" × 1.1" × 1.1" × 2.2"	3.0" × 3.0"
ROI (keV)	50 – 2,800	50 – 3,000	25 – 3,000	12 – 3,000	30 – 3,000
Dose rate range	BG – 30 μSv/h	BG - 50 μSv/h	10 n – 100 μSv/h	Not evaluated	Not evaluated
Data collection interval (s)	1.0	2.0	0.5	1.0	1.0
Availability of spectrum measurements	○	○	○	○	○
Image					

Fig. 8-8 無人ヘリコプターによるモニタリングに用いた放射線検出器の詳細情報

8.3.1. 定点サーベイ

2024 年 (令和 6 年) 11 月 12 日から 14 日にかけて、定点サーベイを実施した。検出器は三脚を用いて検出器の実効中心が地表面から 1 m の高さになるように設置した (Fig. 8-9)。測定地点は、各機関の検出器同士を約 2 m 離れた状態とし、各地点で 20 分間から 30 分間の測定を行った。原子力機構では HASL-258⁷²⁾に準拠し、各放射性核種由来の空間線量率 (μSv/h) を評価した。

本報告では、原子力機構と同様の解析手法を適用している KAERI の解析結果を、比較対象の一例として示す。BMA 内の無人ヘリのキャリブレーションポイントでの結果を Table 5-2 に示した。放射性セシウムの沈着量解析には、「令和 5 年度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」⁷³⁾で評価された Cs-137 の実効的重量緩衝深度の幾何平均値 4.41 g/cm² を適用した。天然放射性核種である K-40 については、空間線量率と沈着量とにもよく一致した。一方、放射性セシウムについては、わずかながら差が生じた。その要因としては、BMA 内の放射性セシウムの不均一性と両機関の測定機器の測定性能の違いが影響していると考えられる。今後、BMA だけでなく SSMA での測定結果についても解析も行うことで、測定結果の差が生じた要因について分析を行う予定である。



Fig. 8-9 定点モニタリングの様子

Table 8-2 各放射性核種由来の空間線量率と沈着量の比較結果

		JAEA	KAERI
Dose rate ($\mu\text{Sv/h}$)	Cs-134	0.0059	0.0038
	Cs-137	0.178	0.130
	K-40	0.019	0.018
Inventory (kBq/m^2)	Cs-134	1.71	1.20
	Cs-137	131	113
Inventory (Bq/kg)	K-40	449	424

8.3.2. 歩行サーベイ

2024 年 (令和 6 年) 11 月 12 日から 14 日にかけて歩行サーベイを実施した (Fig. 8-10)。原子力機構は測定ルートを先導することで、可能な限り位置情報のずれによる各国の測定結果への影響を小さくするよう努めた。BMA では約 5 m 間隔で歩行サーベイを行った。BMA は田んぼ跡地であるため、ぬかるみや段差のある場所は避けて歩行した。BMA のエリア外は、道路の両端を往復して歩行サーベイを行った。SSMA は BMA に比べて測定範囲の面積が小さいため、約 2 m 間隔で歩行サーベイを行った。本報告書の執筆時点で各国の解析結果が得られた、BMA でのモニタリング結果に基づく空間線量率分布を Fig. 5-4 に示す。各国が用いた測定機器の特性の違いにより空間線量率にわずかな違いが見られたが、BMA 南西部と BMA 外の北東部で空間線量率が高い傾向は共通していた。BMA 南西部は地形に起伏があり、窪んだ地形の場所で放射性セシウムが留まりやすい環境であったと考えられる。BMA 外の北東部は帰還困難区域の森林の近傍に位置しており、歩行サーベイの際に森林に沈着した放射性セシウムの影響を受けた可能

性がある。



Fig. 8-10 歩行サーベイの様子

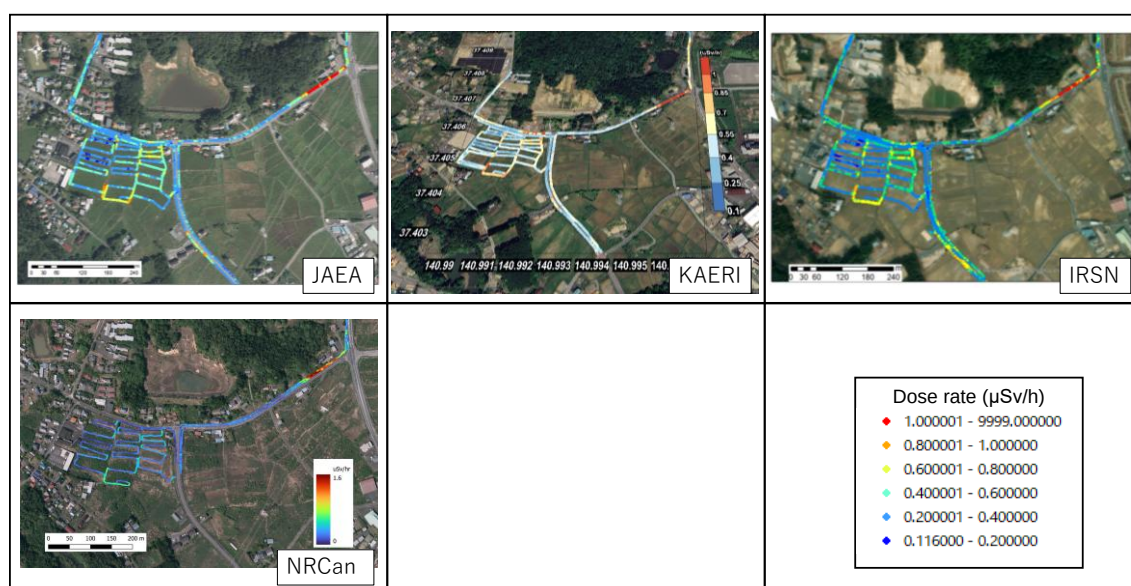


Fig. 8-11 BMA における歩行サーベイの結果

8.3.3. 自動車による走行サーベイ

2024 年 (令和 6 年) 11 月 14 日に自動車による走行サーベイを実施した。各国の放射線検出器をワンボックスカーに搭載した (Fig. 8-12)。まず、BMA 周辺のうち、特に歩行サーベイを行ったエリアを網羅するように走行した。その後、Fig. 8-4 に示したように広域の走行サーベイを実施した。代表的な地点で自動車の車内と車外でそれぞれ空間線量率を 3 分間測定し、それぞれの平均値を比較することで、自動車による放射線の遮へい

係数を評価した。車内で測定された空間線量率に対して、この遮へい係数を乗じること
で、車外の空間線量率とした。本報告書の執筆時点で各国の解析結果が得られた BMA
周辺の空間線量率分布を Fig. 8-13 に示す。歩行サーベイと同様に BMA 外の北東部で空
間線量率が高い傾向が見られた。



Fig. 8-12 車両を用いた走行サーベイに用いた放射線検出器の搭載状況

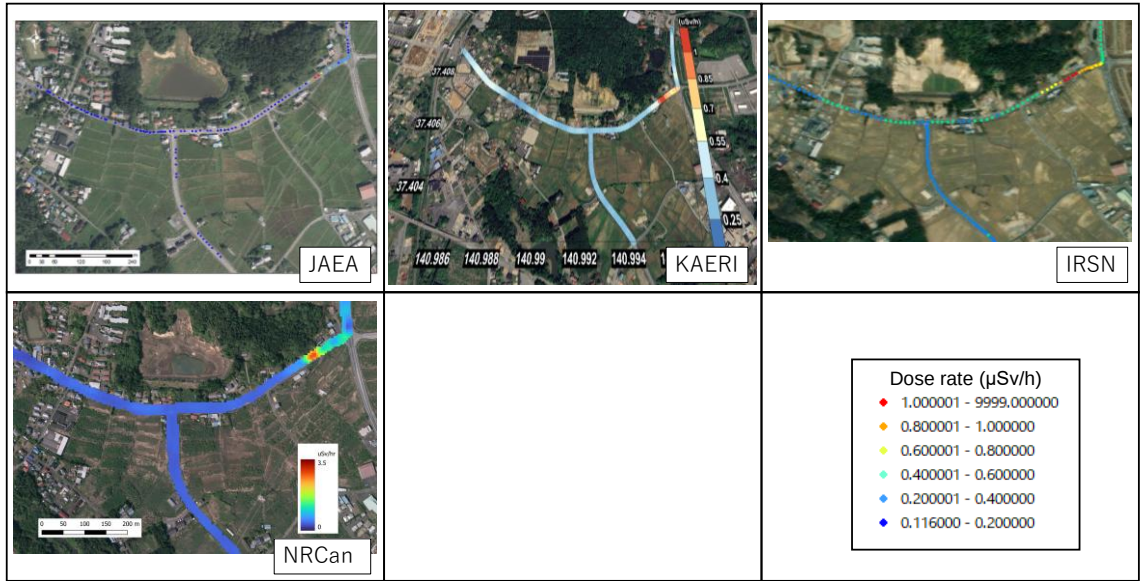


Fig. 8-13 BMA 周辺の走行サーベイの結果

8.3.4. 無人ヘリコプターによるモニタリング

2024 年(令和 6 年)11 月 11 日から 13 日にかけて、無人ヘリコプターによるモニタリン
グを実施した。11 月 11 日に原子力機構、12 日に DOE と NRCan、13 日に KAERI と IRSN

がモニタリングを実施した。無人ヘリコプターの飛行条件は、MMSA では対地高度 80 m、測線間隔 80 m、BMA 周辺では対地高度 20 m、測線間隔 20 m とした。なお、飛行速度は 8 m/s に統一し、位置情報のずれが空間線量率に与える影響を最小限に抑えるため、人手による操作ではなく自動プログラム飛行を行った。これらの測定で取得した γ 線計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するためのパラメータの評価を目的としたキャリブレーションフライトは、対地高度 20 m、30 m、40 m、60 m、80 m、100 m、120 m、150 m の各高度において 120 秒間静止して γ 線計数率を取得することで行った。

本報告書の執筆時点で、各国の解析結果が得られた BMA 周辺の空間線量率分布を Fig. 8-14 に示す。歩行サーベイ及び走行サーベイでは評価が困難であった BMA 外の北東部森林上空で空間線量率が特に高い傾向が見られた。これは、歩行サーベイと走行サーベイで BMA 外の北東部の森林近傍で空間線量率が高かった結果と矛盾しない。

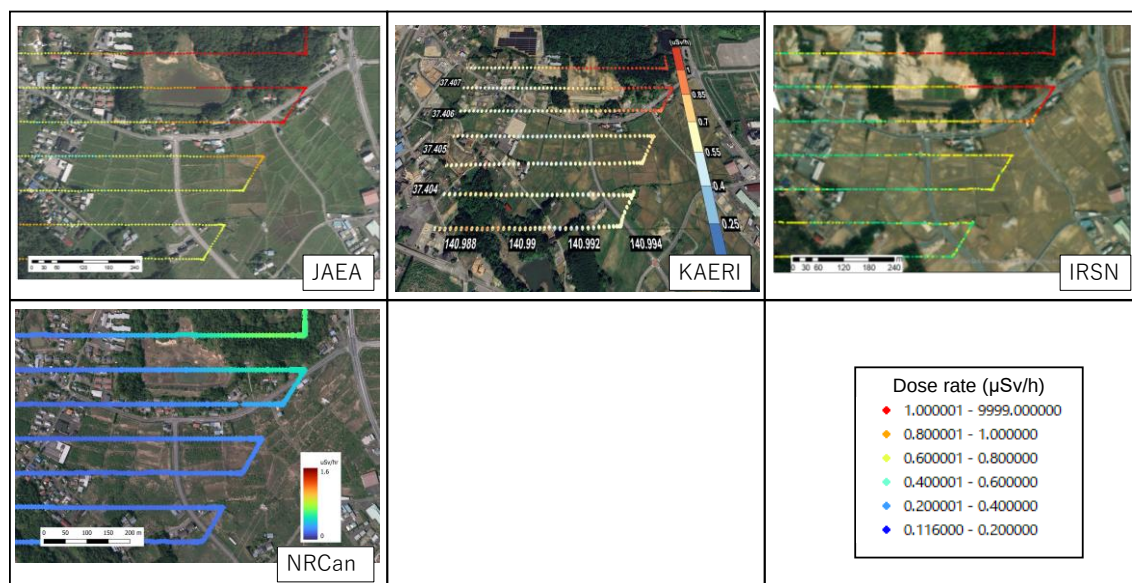


Fig. 8-14 BMA 周辺の無人ヘリコプターによるモニタリング結果

8.4. 合同環境放射線モニタリングから得られた知見と課題

本報告で実施した合同環境放射線モニタリングを通して得られた知見と課題を以下に示す。

定点サーベイ、歩行サーベイ、自動車による走行サーベイ及び無人ヘリコプターによるモニタリングのいずれにおいても、各国が測定した空間線量率の換算値は概ね一致することが確認された。これにより、原子力災害が発生し、その災害の影響が越境した際にも、各国の測定結果を相互に評価できる基盤が整ったといえる。一方で、使用する検出器の結晶サイズ、解析に用いる γ 線エネルギー範囲、 γ 線計数率から空間線量率への換

算係数の導出方法等に違いが見られ、これらが評価結果に影響を及ぼしていることが示唆された。今後、これらの条件を可能な限り統一し、それぞれの影響の程度を議論する必要がある。

原子力機構は、SkyDataLink を活用することで無人ヘリコプターによるモニタリング結果をリアルタイムで解析及びマッピングし、PC やスマートフォンから確認できることを実証した。この点は他国にはない強みであることが確認された。一方、歩行サーベイの結果は、指定のタブレットでしか確認できないという課題が残る。

KAERI は、全ての測定装置が同一のメーカー製であったことから、ユーザーインターフェースが統一されており、各測定機器に紐づけられたタブレット上で測定結果を容易に比較できる点が強みであった。また、本調査で使用した $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器や CZT 検出器を、韓国国内で既にマルチコプターに搭載して、モニタリングを行った実績があり、日本と同様に無人機でのモニタリング体制の整備が進んでいる。

DOE は、「CBRN Responder」というシステムを用いて測定データを管理しており、スマートフォンでも測定結果が確認できる点に強みがあった。これは、原子力機構の SkyDataLink と仕組みが類似していた。また、多種多様な放射線検出器を所有しており、原子力発電所事故のみならず、核物質を用いたテロにも対応可能な体制が整備されている。

NRCan については、無人ヘリコプターによるモニタリングに、放射線の入射方向を検知できる検出器を使用可能な点で他国にはない特徴を有していた。また、この検出器は既にカナダ国内で既にマルチコプターに搭載して、モニタリングを行った実績がある。

IRSN は、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ と GM サーベイメータを組み合わせた検出器を無人ヘリコプターによりモニタリングに使用しており、モニタリングエリアの空間線量率のレベルに応じて使用する検出器を、遠隔操作で即座に切り替えられる点が強みであった。

以上のように、各国のモニタリングツールの長所と短所を理解することで、日本の原子力防災体制の強化につながると考えられる。

9. まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理

本報告で得られた成果を以下にまとめる。

・航空機モニタリング結果について

島根周辺のモニタリングは令和 6 年 (2024 年) 6 月 13 日～6 月 17 日と同年 8 月 23 日～9 月 15 日の 2 回に分けて実施し、計 17 回のフライトを実施した。このモニタリングで取得したデータを基に 3 km～80 km 圏内のバックグラウンド空間線量率マップ及び天然放射性核種 (K-40、U 系列及び Th 系列) の濃度マップを作成し、地上測定値や他機関のデータと比較してその妥当性を検証した。標準的解析手法とラドン弁別手法の両方を用いた結果、バックグラウンド空間線量率値と地上測定値との *RMSE* は 0.03 $\mu\text{Sv/h}$ 程度であり、妥当な換算精度が確認された。ラドン弁別手法の適用により測定期間や解析時間の短縮が期待でき、信頼性向上のための換算パラメータの算出方法の改良が進んできたと考える。天然放射性核種の濃度マップは他機関のデータと概ね一致していたが、U 系列濃度が過大評価される傾向が見られ、パラメータ設定の再検討が必要である。

・航空機モニタリングエリアの空港、管制空域等の特徴及び気候、地形等に関する特徴について

本報告では、資機材の搬出入手続きが比較的容易であり、現地測定作業員の待機場所が使用できるなど利便性が高いことから、出雲空港を拠点として使用した。出雲空港は島根測定エリアのほとんど中央部に位置し、航空機モニタリングの実施に適した施設である。また、島根測定エリアの拠点候補としては、鳥取県に位置する米子空港も挙げられる。米子空港も同様に、運用上の利便性が高く、測定エリアへのアクセスの観点からも有力な選択肢となり得る。島根測定エリアにおける管制空域、気象、地形等に関する特徴については、2018 年度 (平成 30 年度) の内容¹³⁾から特段の変更がないため、本報告では割愛する。

・RSI システムの保守点検方法について

RSI システムの月例保守点検を定型化して実施し、特にシステムの異常等がないことを確認した。

・原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリング及び無人機の訓練フライトについて

内閣府主導の令和 6 年度原子力総合防災訓練において、緊急時航空機モニタリングと無人機の訓練フライトを実施した。本訓練では、これまでに取り組んできた UH-60 への航空機モニタリングシステム搭載方法の改善やリアルタイムデータ通信が有効に機能することを確認した。データ解析から結果の共有までの所要時間は約 25 分であり、迅速な

情報共有の基盤が構築されつつあるものの、空間線量率マップ作成に用いるデータの選別作業の効率化が今後の課題として挙げられる。

無人機については、無人機データ収集システム (SkyDataLink) によるリアルタイムな空間線量率換算とマッピングが可能であることを確認し、複数の機種を組み合わせることで、飛行速度や適用範囲の異なる無人機を効果的に活用できる可能性を示した。一方で、悪天候下での運用に向けた防水対策が依然として課題であり、特に、無人航空機用検出器の防水機能強化が求められる。今後も原子力訓練の場での訓練フライトを継続し、より多くの課題を抽出するとともに、緊急時における無人機モニタリングの対応体制の充実化と実効性の向上に取り組む予定である。

・無人機データ収集システムの整備について

SkyDataLink の運用を開始し、リアルタイム解析機能と後処理解析機能が有効に機能することを確認した。特に、サーバへ送信されたデータを基に、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をリアルタイムで実行できることを実証し、迅速な情報提供が可能となった。また、マルチコプター、無人ヘリコプター、固定翼型無人航空機の 3 種類を活用することで、測定範囲や用途に応じた柔軟な運用が可能であることを確認した。さらに、Web ブラウザ上で解析を実施できるため、特定の PC 環境に依存せず、運用の利便性が向上した。

一方で、いくつかの課題も浮き彫りになった。リアルタイム解析では、サーバ処理の負荷によりマップ作成に時間を要するため、分散処理や IDW への切り替えによる高速化を検討する必要がある。通信手段については、LTE 通信が途絶えた場合の代替手段がなく、衛星通信や長距離無線通信の活用を引き続き検討する。システムの安定運用に向けては、サーバの冗長化を進め、クラウド活用も視野に入れる必要がある。また、マルチコプターや固定翼型無人航空機の測定機器には防水性能がないため、簡易的な防水対策を講じることが求められる。

さらに、他の放射線測定機器とのデータ連携を強化し、より包括的なモニタリングが可能となる仕組みの構築が必要である。大規模運用時の負荷管理についても、機器数の増加を見据えた運用テストを実施し、システム最適化を進める。加えて、無人機の運用やデータ解析を行える人材が不足しており、継続的な訓練やマニュアル整備を通じた技術者の育成が求められる。今後もシステムの改良と運用体制の強化を進め、無人機データ収集システムの安定性と実用性を向上させ、緊急時の迅速な対応に備える。

・ドローン型モニタリング機器の整備及び技能講習について

今年度、マルチコプター型モニタリングシステムの整備を完了し、運用技術講習を実施した。点検結果では、マルチコプター本体および放射線検出器に異常はなく、正常に動作することを確認した。講習では、操縦訓練や放射線検出器の取り扱い方法について

学び、緊急時の運用に向けた技能向上を図った。特に、基礎飛行訓練から実践的なフライト訓練までを段階的に行うことで、実運用に即したスキル習得が可能となった。

一方で、運用にはいくつかの課題も明らかになった。運用者の経験不足は、安全な運航や迅速な対応を妨げる要因となるため、継続的な訓練が必要である。また、緊急時の対応を統一するための標準的な運用マニュアルの整備が求められる。さらに、測定地点周辺の着陸ポイントや基地局の設置場所を事前に選定しておくことで、よりスムーズな運用が可能となる。今後は、これらの課題に対応し、実践的な訓練の継続、運用手順の標準化、事前計画の強化を進めることで、マルチコプターを活用した放射線モニタリングの信頼性と実効性を向上させていく。

・関係各国との意見交換及び合同環境放射線モニタリングの実施について

本報告では、アメリカ、フランス、韓国、カナダとの合同環境放射線モニタリングの結果を取りまとめた。今回の意見交換および実地調査を通じて、各国のモニタリング技術や運用体制に関する情報を収集し、日本の緊急時モニタリング体制の強化に向けた重要な知見を得た。この合同モニタリングでは、定点、歩行、自動車走行、無人ヘリコプターによる測定を実施し、各国の測定機器やデータ解析手法を比較した。その結果、測定値は概ね一致しており、原子力災害時の国際的な情報共有と相互評価の基盤が整っていることが確認された。一方で、使用する検出器の種類やデータ解析の手法には違いが見られ、測定手法の標準化やデータの互換性向上に向けた議論が今後の課題となる。また、日本の SkyDataLink やアメリカの CBRN Responder といったリアルタイムデータ共有技術、KAERI の統一されたユーザーインターフェース、NRCan の放射線入射方向検出技術、IRSN の遠隔検出器切り替え機能など、各国の先進的な技術は日本のモニタリング体制の高度化に資するものであった。

今後は、測定手法やデータ解析の標準化を進め、各国の技術を参考に日本独自のデータ共有システムの発展を図るとともに、無人航空機の活用拡大やリアルタイム解析精度の向上にも取り組む必要がある。加えて、各国との合同訓練や情報交換を継続し、原子力災害時の相互協力体制を強化することが求められる。今回の合同モニタリングで得られた知見を活かし、日本の緊急時モニタリング体制のさらなる向上に努めるとともに、関係各国との協力を深め、より実効性の高い原子力防災体制の確立を目指す。

謝辞

本調査研究は、規制庁からの受託事業「令和6年度原子力施設等防災対策等委託費(航空機モニタリング運用技術の確立等)事業」の成果をとりまとめたものである。本事業の遂行にあたり、原子力機構、株式会社静環検査センター、株式会社 JDRONE の10余名が、航空機を用いた測定、地上での空間線量率測定、データ解析及びマップ化に取り組んだ。また、有人ヘリコプターの運航は朝日航洋株式会社により実施された。

令和6年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングの実施にあたっては、航空自衛隊新田原基地救難隊の皆様より多大なご協力を頂いた。同訓練における無人機訓練フライト、無人機データ収集システムの整備、マルチコプター型モニタリングシステムの整備及び技能講習に関しては、株式会社 JDRONE より貴重な技術支援を頂いた。

また、今年度の合同環境放射線モニタリングの実施に際し、株式会社ペスコにコーディネータとして調整を担当いただき、多大なる尽力を頂いた。加えて、本合同モニタリングには、アメリカ(DOE)、フランス(IRSN)、韓国(KAERI)、カナダ(NRCan)の研究者と技術者が来日し、各国と技術交流を深める貴重な機会となった。これらの国際的な協力は、本事業の発展と放射線モニタリング技術の向上に大きく寄与することが期待される。

最後に、本事業に関与されたすべての皆様に、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鳥居建男, 眞田幸尚, 杉田武志, 田中圭, 航空機モニタリングによる東日本全域の空間線量率と放射性物質の沈着量調査, 日本原子力学会誌(ATOMOS), 54(3), 2012, pp.160-165.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 眞田幸尚, 森愛理, 石崎 梓, 宗像雅広, 中山真一, 西澤幸康, 卜部嘉, 中西千佳, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 土田清文, 石橋聖, 吉田真美, 前島正道, 結城洋一, 鳥居建男, 平成 26 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2015-006, 2015, 81p.
- 7) 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.
- 8) 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, 2017, 117p.
- 9) 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.
- 10) 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.

- 11) 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, ト部嘉, 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.
- 12) 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, ト部嘉, 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.
- 13) 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, ト部嘉, 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.
- 14) 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, ト部嘉, 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.
- 15) 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, ト部嘉, 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.
- 16) 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, ト部嘉, 外川織彦, 安藤真樹, 工藤保, 令和 2 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2021-029, 2022, 132p.
- 17) 普天間章, 眞田幸尚, 佐々木美雪, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, ト部嘉, 工藤保, 令和 2 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2021-020, 2021, 138p.
- 18) 普天間章, 眞田幸尚, 長久保梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 坪雄一郎, ト部嘉, 工藤保, 令和 3 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2022-027, 2023, 148p.
- 19) 普天間章, 眞田幸尚, 佐々木美雪, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 坪雄一郎, 外間智規, 平岡大和, ト部嘉, 工藤保, 令和 3 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2022-028, 2023, 127p.
- 20) 普天間章, 眞田幸尚, 長久保梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 坪雄一郎, 新井仁規, ト部嘉, 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.

- 21) 普天間章, 眞田幸尚, 佐々木美雪, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 坪雄一郎, 新井仁規, 外間智規, 平岡大和, ト部嘉, 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.
- 22) 普天間章, 眞田幸尚, 中間茂雄, 佐々木美雪, 越智康太郎, 長久保梓, 澤幡義郎, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 坪雄一郎, 新井仁規, 石田睦司, ト部嘉, 工藤保, 令和 5 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 2024-021, 2025, 232p.
- 23) 普天間章, 眞田幸尚, 佐々木美雪, 中間茂雄, 佐々木美雪, 越智康太郎, 澤幡義郎, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 坪雄一郎, 新井仁規, 平岡大和, 石田睦司, ト部嘉, 工藤保, 令和 5 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 2024-022, 2025, 170p.
- 24) 原子力防災会議幹事会, 原子力災害対策マニュアル, 平成 24 年 10 月 19 日制定 (令和 6 年 7 月 2 日一部改訂).
- 25) 原子力規制委員会, 原子力災害対策指針, 平成 24 年 10 月 31 日制定 (令和 6 年 9 月 11 日全部改正).
- 26) 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, ト部嘉, 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.
- 27) Sanada, Y., and Torii, T., Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter, J. Environ. Radioact., 139, pp.294-299, 2015.
- 28) Sanada, Y., Kondo, A., Sugita, T., Nishizawa, Y., Yuki, Y., Ikeda, K., Shoji, Y., Torii, T., Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi nuclear power plant, Expl. Geophys., 45(1), 2014, pp.3-7.
- 29) 佐藤昌之, 村岡浩治, 穂積弘毅, 眞田幸尚, 山田勉, 鳥居建男, Multiple Model Approach による構造化ロバスト制御器設計法を適用した放射線モニタリング無人固定翼機の飛行制御則設計-福島県浪江町における放射線モニタリング飛行-, 計測自動制御学会論文集, 51(4), 2015, pp.215-225.
- 30) UARMS 開発チーム, 無人航空機による放射線モニタリングシステムの開発, Isotope News, (727), 2014, pp.30-34.
- 31) 眞田幸尚, 鳥居建男, 村岡浩次, 福島原子力発電所事故後における無人機を用いた放射線モニタリング -UARMS の開発状況-, 第 53 回飛行機シンポジウム講演論文集, 2015, 2A05.

- 32) 原子力規制庁監視情報課, 緊急時モニタリングについて (原子力災害対策指針補足参考資料), 平成 26 年 1 月 29 日制定 (令和 4 年 7 月 6 日一部改訂).
- 33) 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> (2025 年 3 月 3 日閲覧).
- 34) Currie, L. A., Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry., Anal. Chem, 40(3), 1968, pp.586-593.
- 35) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, pp.81-101.
- 36) 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.
- 37) Oikawa, S., Nobuyuki, K., Sanada, T., Ohashi, N., Uesugi, M., Sato, K., Abukawa, J. and Higuchi, H., A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan. J. Environ. Radioact., 65(2), 2003, pp.203-213.
- 38) 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.
- 39) 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, pp.20-132.
- 40) 日本地質学会, 日本の自然放射線量,
<http://geosociety.jp/hazard/content0058.html> (2025 年 3 月 3 日閲覧).
- 41) Beck, H. L., DeCampo, J. and Gogolak, C., Insitu Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry, USAEC Report HASL-258, New York, N.Y.10014, 1972.
- 42) 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 V2, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (2025 年 3 月 3 日閲覧).
- 43) 山内靖喜, 沢田順弘, 高須晃, 小室裕明, 村上久, 小林伸治, 田山良一, 西郷地域の地質, 地質調査総合センター, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 岡山(12) 第 1 号, 121p, 2009.
- 44) 千葉とき子, 金子信行, 鹿野和彦, 浦郷地域の地質, 地質調査所, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 岡山(12) 第 2 号, 74p, 2000.
- 45) 鹿野和彦, 吉田史郎, 境港地域の地質, 地質調査所, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 岡山(12) 第 7 号, 57p, 1985.
- 46) 鹿野和彦, 中野旬, 美保関地域の地質, 地質調査所, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 岡山(12) 第 8 号, 28p, 1985.
- 47) 鹿野和彦, 山内靖喜, 高安克己, 松浦浩久, 豊遙秋, 松江地域の地質, 地質調査所, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 岡山(12) 第 17 号, 126p, 1994.
- 48) 太田良平, 米子, 地質調査所, 5 萬分の 1 地質図幅説明書 岡山 第 18 号, 29p, 1985.
- 49) 服部仁, 鹿野和彦, 鈴木隆介, 横山勝三, 松浦浩久, 佐藤博之, 三瓶山地域の地質, 地質

- 調査所, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 岡山(12) 第 38 号, 168p, 1962.
- 50) 松浦浩久, 鹿野和彦, 石塚吉浩, 高木哲一, 木次地域の地質, 地質調査総合センター, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 岡山(12) 第 27 号, 72p, 2005.
- 51) 松浦浩久, 赤名地域の地質, 地質調査所, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 岡山(12) 第 50 号, 73p, 1990.
- 52) 太田良平, 赤崎・大山, 地質調査所, 5 万分の 1 地質図幅説明書 岡山 第 9 号・第 19 号, 37p, 1962.
- 53) 村山正郎, 大沢穠, 青谷・倉吉, 地質調査所, 5 万分の 1 地質図幅説明書 岡山 第 10 号・第 20 号, 71p, 1961.
- 54) 服部仁, 片田正人, 根雨, 地質調査所, 5 万分の 1 地質図幅説明書 岡山 第 29 号, 49p, 1964.
- 55) 太田良平, 湯本, 地質調査所, 5 万分の 1 地質図幅説明書 岡山 第 30 号, 29p, 1962.
- 56) 猪木幸男, 坂本亨, 多里地域の地質, 地質調査所, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 岡山(12) 第 40 号, 53p, 1977.
- 57) 服部仁, 上石見地域の地質, 地質調査所, 地域地質研究報告 5 万分の 1 図幅 岡山(12) 第 41 号, 70p, 1978.
- 58) 山田直利, 奥津, 地質調査所, 5 万分の 1 地質図幅説明書 岡山 第 31 号, 51p, 1961.
- 59) 原子力百科事典 ATOMICA, 天然の放射性核種,
https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_09-01-01-02.html (2025 年 3 月 3 日閲覧).
- 60) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 海と陸の地球化学図,
<https://gbank.gsj.jp/geochemmap/> (2025 年 3 月 3 日閲覧).
- 61) 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.
- 62) 吉岡勝廣, 飯田孝夫, 大気中ラドン濃度の周期性変動の主要な影響因子 -海洋と陸地の違い-, 保健物理, 42(1), 2007, pp.53-62.
- 63) 藤波直人, 渡辺哲也, 前田高志, 荒木智徳, 山川和彦, 日本の気候区別空間線量率の年間最大値の月別出現頻度, RADIOISOTOPES, 54, 2005, pp.569-573.
- 64) 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.
- 65) 内閣府, 令和 6 年度原子力総合防災訓練 訓練実施要領,
https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/kunren/pdf/07_r6jissi.pdf (2025 年 3 月 3 日閲覧).
- 66) 国土地理院, 地理院地図 Vector, <https://maps.gsi.go.jp/vector/> (2025 年 3 月 3 日閲覧).
- 67) 国土地理院, 地理院タイル一覧, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2025 年 3 月 3 日閲覧).
- 68) 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. Geophy.*, 45, 2014, pp.3-7.
- 69) ヤマハ発動機株式会社, 無人システム, FAZER R G2,
<https://www.yamaha-motor.co.jp/ums/solution/fazer-r-g2/> (2025 年 3 月 13 日閲覧)
- 70) Sasaki, M., Sanada, Y., Katengeza, E. W., Yamamoto, A., New method for visualizing the dose rate distribution around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant using artificial neural networks, *Sci Rep* 11:1857, 2011.
- 71) 日本原子力研究開発機構, 放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト,
<https://emdb.jaea.go.jp/emdb/> (2025 年 3 月 13 日閲覧).
- 72) Beck H. L., Decampo, J. A., Gogolak, C. V., In situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry, *HASL-258*, 1972, p.88.
- 73) 原子力規制委員会, 令和 5 年度放射性物質測定調査委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業, 成果報告書, 2024
<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/docs/rebs/rad-dist/csv-kmz/2023> (2025 年 3 月 13 日閲覧).
- 74) National Nuclear Security Administration, Federal Radiological Monitoring and Assessment Center (FRMAC), U.S. Department of Energy,
<https://nnss.gov/mission/federal-radiological-monitoring-and-assessment-center-frmac/>
(2025 年 3 月 13 日閲覧).
- 75) 日本原子力研究開発機構, 第 2 回「米国『防護対策指針 (PAG) マニュアル』の改正版ドラフトの概要」(平成 25 年 5 月),
<https://www.jaea.go.jp/04/shien/research/EP002.html> (2025 年 3 月 13 日閲覧).
- 76) 経済産業省, 各国における原子力災害対策について (平成 27 年 3 月),
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/jishuteki_anzensei/pdf/007_07_00.pdf (2025 年 3 月 3 日閲覧).
- 77) 鈴木尊紘, フランスにおける原子力安全透明化法—原子力安全庁及び地域情報委員会を中心に—, 外国の立法 244 号, 2010, pp.56-70.
- 78) 日本原子力研究開発機構, 第 16 回「フランスの重大な原子力災害に対する新たな国家対応計画」(平成 26 年 7 月),
<https://www.jaea.go.jp/04/shien/research/EP016.html> (2025 年 3 月 13 日閲覧).
- 79) 崔鐘敏, 尹順眞, 李秀澈, 河津早央里, 周瑋生, 韓国の原子力政策と原子力安全規制制度—福島原発事故が規制制度に及ぼした影響と評価を中心に—, 名城論叢, 2020, pp.133-157.
- 80) Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC, <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/> (2025 年 3 月 13 日閲覧).
- 81) 原子力規制庁 長官官房放射線防護グループ 監視情報課, 緊急時モニタリングセンター設置要領 第 3 版, 平成 26 年 10 月 29 日制定 (令和元年 6 月 25 日一部改訂).

- 82) 日本原子力研究開発機構, 第 11 回「海外における緊急時モニタリングの仕組み (その 1 : 米国の事例)」(平成 26 年 2 月),
<https://www.jaea.go.jp/04/shien/research/EP011.html> (2025 年 3 月 13 日閲覧).
- 83) 日本原子力研究開発機構, 第 12 回「海外における緊急時モニタリングの仕組み (その 2 : 米国の FRMAC)」(平成 26 年 5 月),
<https://www.jaea.go.jp/04/shien/research/EP012.html> (2025 年 3 月 13 日閲覧).
- 84) 日本原子力研究開発機構, 第 13 回「海外における緊急時モニタリングの仕組み (その 3 : フランスの事例)」(平成 26 年 2 月),
<https://www.jaea.go.jp/04/shien/research/EP013.html> (2025 年 3 月 13 日閲覧).
- 85) Ochi, K., Barker, E., Nakama, S., Gleizes, M., Manach, E., Faure, V., Sanada, Y., Comparative Study of Radiation Mapping Technologies for Nuclear Disaster Assessment, *J. Disaster Res.*, Vol.19, No.2, 2024, pp.429-445.
- 86) Ji Y. Y., Ochi, K., Hong, S. B., Nakama, S., Sanada, Y., Mikami, S., Performance of in situ gamma-ray spectrometry in the assessment of radioactive cesium deposition around the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Radiat. Phys. Chem.*, Vol.179, No.109205, 2021, pp.1-11.
- 87) Ji, Y. Y., Ochi, K., Hong, S. B., Nakama, S., Sanada, Y., Mikami, S., Joint Environmental Radiation Survey by JAEA and KAERI Around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: Performance of Mobile Gamma-Ray Spectrometry Using Backpack and Carborne Survey Platforms, *Health Phys.*, Vol.121, No.6, 2021, pp. 613–620.
- 88) Chen, C. M., Sinclair, L. E., Fortin, R., Coyle, M., Samson, C., In-flight performance of the Advanced Radiation Detector for UAV Operations (ARDUO), *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, Vol.954, 2020, 161609.



この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。