

令和5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6年3月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構  
安全研究・防災支援部門 原子力緊急時支援・研修センター  
防災研究開発ディビジョン 航空機モニタリンググループ

本報告書は、「令和5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.....	1
2.	有人ヘリコプターによるモニタリングシステム.....	7
2.1.	航空機モニタリングシステム.....	7
2.2.	ヘリコプターの選定.....	9
2.3.	RSIシステムの保守.....	11
3.	データ取得及び解析方法(有人ヘリコプター).....	14
3.1.	航空機モニタリング及び地上測定の方法.....	14
3.2.	キャリブレーションフライト方法.....	16
3.3.	解析のフロー.....	21
3.4.	空間線量率への換算方法.....	22
3.4.1.	空気中核種及び宇宙線由来の $\gamma$ 線計数率.....	22
3.4.2.	対地高度補正係数 $HF$ の算出方法.....	24
3.4.3.	空間線量率への換算係数 $CD$ の算出方法.....	24
3.4.4.	空間線量率への換算方法.....	25
3.5.	検出限界値.....	26
3.6.	不確かさ.....	26
3.7.	補間方法.....	26
3.8.	空気中のラドン子孫核種の弁別手法.....	28
3.8.1.	ラドン子孫核種.....	28
3.8.2.	ラドン弁別手法の理論.....	30
3.8.3.	$GI$ の高度補正方法.....	32
3.9.	天然放射性核種の濃度換算手法.....	32
4.	モニタリング結果と考察.....	35
4.1.	ヘリコプターによるフライト地上測定及びの実績.....	35
4.2.	換算パラメータ.....	35
4.3.	空間線量率マップ.....	41
4.3.1.	地上測定による現地調査.....	45
4.3.2.	GPS測位データの比較.....	45
4.3.3.	換算パラメータの再算出及び空間線量率マッピング結果.....	46
4.4.	空間線量率マップと地質情報の比較考察.....	51
4.5.	地上測定値との比較.....	53
4.6.	天然放射性核種の濃度.....	57
4.7.	ラドン弁別手法の適用.....	66
4.7.1.	パラメータ( $RI$ 及び $GI$ )の決定.....	66

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.....	69
4.8.	放射性セシウムの沈着量 .....	79
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 .....	81
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.....	81
5.2.	令和5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.....	82
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モニタリング .....	82
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.....	89
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.....	97
5.3.1.	無人機の訓練フライトについて .....	97
5.3.2.	緊急時航空機モニタリングについて .....	98
6.	無人航空機用放射線モニタリングシステムの開発.....	100
6.1.	背景 .....	100
6.2.	無人航空機搭載用放射線測定システムについて .....	102
6.2.1.	システム概要 .....	102
6.2.2.	環境用測定システム.....	103
6.2.3.	緊急時の放射線モニタリング用検出器.....	105
6.3.	放射線検出器の照射試験 .....	110
6.3.1.	試験概要 .....	110
6.3.2.	試験結果 .....	110
6.4.	地上運転試験.....	112
6.4.1.	試験概要 .....	112
6.4.2.	試験結果 .....	113
7.	緊急時モニタリングで活用できる無人航空機の調査.....	115
7.1.	無人航空機に関する調査 .....	115
7.1.1.	無人航空機の性能要件の調査.....	115
7.1.2.	無人航空機を飛行させるための手続きの調査 .....	122
7.2.	手動飛行試験の実施.....	124
7.2.1.	飛行試験に関わる事前準備 .....	124
7.2.2.	機体の飛行性能の評価.....	127
7.3.	自動飛行試験の実施.....	142
7.3.1.	輸送及び展開性能の確認 .....	142
7.3.2.	自動帰還の機能の確認.....	145
7.3.3.	緊急時モニタリングを想定した自動飛行.....	147
7.4.	まとめ .....	155
8.	まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理.....	157
	謝辞.....	162
	参考文献.....	163

Table list

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL (一部抜粋).....	5
Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧.....	18
Table 3-2 RSI システムと機体組み合わせと空气中核種由来の計数率平均値及び CR-Index.....	23
Table 3-3 ラドン子孫核種の放出する $\gamma$ 線.....	29
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.....	35
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 .....	37
Table 4-3 2023 年度に取得した AF データ一覧.....	39
Table 4-4 2023 年度に取得した CD データ一覧.....	39
Table 4-5 解析に用いた換算パラメータのまとめ.....	40
Table 4-6 高精度 GPS システム測位データに基づく CR-Index の再算出結果.....	47
Table 4-7 高精度 GPS システム測位データに基づく AF の再算出結果.....	48
Table 4-8 高精度 GPS システム測位データに基づく CD の再算出結果.....	48
Table 4-9 再解析に用いた換算パラメータのまとめ.....	48
Table 4-10 天然放射性核種濃度への換算パラメータ一覧.....	59
Table 4-11 解析に用いた RI 及び GI の一覧.....	68
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.....	82
Table 5-2 無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンによるモニタリングタイムテーブル.....	84
Table 5-3 令和 5 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 (2023 年 10 月 29 日).....	90
Table 5-4 UH-60 に対する換算パラメータの一覧.....	90
Table 7-1 調査対象とした無人航空機及び調査項目.....	118
Table 7-2 PF2 及び M300 に関する詳細なヒアリング結果.....	122
Table 7-3 PF2 の取り扱い慣熟のための訓練の実績.....	125
Table 7-4 飛行試験実績.....	127
Table 7-5 基本水平飛行中の対地高度変化.....	130
Table 7-6 基本旋回飛行中の対地高度変化.....	132
Table 7-7 基本旋回飛行中の水平変化.....	132
Table 7-8 基本昇降飛行中の水平変化.....	134
Table 7-9 組み合わせ飛行 1 (8 の字) 中の高度変化.....	136
Table 7-10 組み合わせ飛行 2 中の水平変化.....	138
Table 7-11 衝突防止機能の確認結果.....	141
Table 7-12 輸送及び展開性試験の実施項目.....	143
Table 7-13 本測定による高度補正係数と空気減弱係数.....	150
Table 7-14 自動飛行試験の項目.....	150
Table 7-15 クリギングの入力パラメータ.....	154

## Figure list

Fig. 1-1 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 .....	5
Fig. 1-2 2015 年度から 2020 年度までのバックグラウンド航空機モニタリング結果.....	6
Fig. 2-1 RSI システムのブロック図 .....	8
Fig. 2-2 RSI システムの外観.....	8
Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧 .....	9
Fig. 2-4 川内 (前期) の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell430 (JA02AX)).....	10
Fig. 2-5 川内 (後期) の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell412 (JA6929)).....	10
Fig. 2-6 システムのエネルギー分解能及び Gain の推移 (川内 (前期)).....	12
Fig. 2-7 システムのエネルギー分解能及び Gain の推移 (川内 (後期)).....	13
Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (川内 (前期) 及び川内 (後期)) .....	15
Fig. 3-2 航空機モニタリングデータ取得のイメージ.....	16
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 .....	16
Fig. 3-4 テストラインフライトのイメージ .....	18
Fig. 3-5 川内 (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 (鹿児島県出水市)	19
Fig. 3-6 テストポイントフライトのイメージ.....	19
Fig. 3-7 宇宙線フライトのイメージ .....	20
Fig. 3-8 空気中核種フライトのイメージ.....	20
Fig. 3-9 オーバーラップフライトに用いた測線 (鹿児島県出水市) .....	20
Fig. 3-10 解析のフロー .....	21
Fig. 3-11 空気中核種フライトで取得した陸上と海上での $\gamma$ 線スペクトル例.....	23
Fig. 3-12 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例 .....	23
Fig. 3-13 IDW に入力するパラメータとマップの関係.....	28
Fig. 3-14 ウラン系列及びトリウム系列 .....	29
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 .....	31
Fig. 3-16 空気中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ.....	31
Fig. 3-17 航空機モニタリングで取得できる $\gamma$ 線スペクトル例.....	33
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)....	34
Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例 .....	37
Fig. 4-2 川内 (前期) 及び川内 (後期) のテストポイントにおける地上測定値 .....	38
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 .....	40
Fig. 4-4 川内における空間線量率マップ (RSI システム GPS データに基づく).....	43
Fig. 4-5 川内における空間線量率マップの比較.....	44
Fig. 4-6 熊本県天草市における地上測定値.....	45
Fig. 4-7 RSI システムの GPS 及び高精度 GPS システムに基づく海拔高度と DEM データの比較....	46
Fig. 4-8 高精度 GPS システム測位データに基づく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 .....	49

Fig. 4-9 高精度 GPS システム測位データに基づく川内における空間線量率マップ	50
Fig. 4-10 川内(前期)及び川内(後期)の測線近傍における地上測定値	55
Fig. 4-11 川内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	56
Fig. 4-12 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)	57
Fig. 4-13 川内の K-40 濃度マップ	60
Fig. 4-14 川内の U 系列濃度マップ	61
Fig. 4-15 川内の Th 系列濃度マップ	62
Fig. 4-16 川内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)	63
Fig. 4-17 川内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)	64
Fig. 4-18 川内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)	65
Fig. 4-19 海上及び陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr <sub>3</sub> (Ce)検出器の計数率の関係	67
Fig. 4-20 川内におけるラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ	73
Fig. 4-21 川内における空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ	74
Fig. 4-22 川内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(直交距離回帰による <i>RI</i> 及び <i>GI</i> を用いた場合)	75
Fig. 4-23 川内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)	77
Fig. 4-24 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	78
Fig. 4-25 川内における放射性セシウム沈着量マップ	80
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	85
Fig. 5-2 モニタリングに用いた機体及び放射線検出器	86
Fig. 5-3 訓練フライトに用いたシステムの構成	87
Fig. 5-4 無人ヘリコプターモニタリングによる上空での空間線量率の解析結果(新潟県柏崎市柏崎中央海水浴場)	87
Fig. 5-5 ドローンモニタリングによる上空での空間線量率のリアルタイムマッピング結果(新潟県柏崎市柏崎中央海水浴場)	88
Fig. 5-6 無人航空機モニタリングによる空間線量率解析結果(RTF)	88
Fig. 5-7 令和5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	91
Fig. 5-8 令和5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)	92
Fig. 5-9 航空機モニタリングシステムの搭載状況	92
Fig. 5-10 令和5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)	93
Fig. 5-11 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	94
Fig. 5-12 令和5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.....	95
Fig. 5-13 緊急時航空機モニタリング中の対地高度の推移.....	96
Fig. 5-14 スタッドボルトを設置する位置決めを行うための目印付き紐.....	99
Fig. 6-1 既存の無人機によるシステムと原子力災害時に備えるべき無人航空機システム.....	101
Fig. 6-2 無人航空機 Penguin C 概要.....	101
Fig. 6-3 無人航空機搭載用放射線測定システム概要.....	102
Fig. 6-4 環境用測定システム外観図面.....	103
Fig. 6-5 環境用測定システム接続図面.....	104
Fig. 6-6 環境用測定システム機体搭載時の外観.....	104
Fig. 6-7 地上局で確認できる測定システムの動作確認画面の例.....	105
Fig. 6-8 緊急時用測定システム外観図面.....	107
Fig. 6-9 緊急時用測定システム接続図面.....	108
Fig. 6-10 緊急時用測定システム機体搭載時の外観.....	108
Fig. 6-11 緊急時における放射線測定環境.....	109
Fig. 6-12 線源試験時の様子.....	110
Fig. 6-13 環境用測定システムにおける $\gamma$ 線照射試験結果.....	111
Fig. 6-14 緊急時用測定システムにおける $\gamma$ 線照射試験結果.....	112
Fig. 6-15 地上運転試験時の様子.....	113
Fig. 6-16 環境用測定システムの地上運転試験結果.....	114
Fig. 6-17 緊急時用測定システムの地上運転試験結果.....	114
Fig. 7-1 無人航空機の調査結果.....	120
Fig. 7-2 PF2 の取り扱い慣熟のための訓練に使用した場所 (真野交流センター).....	125
Fig. 7-3 飛行性能試験に使用した場所 (RTF 瓦礫土砂崩落フィールド).....	126
Fig. 7-4 衝突防止機能試験に使用した場所 (RTF 屋内試験場).....	126
Fig. 7-5 水平飛行 (前後左右移動) のイメージ.....	128
Fig. 7-6 水平飛行 (斜め移動) のイメージ.....	128
Fig. 7-7 PF2 の水平飛行中の経過時間に対する対地高度の変化.....	129
Fig. 7-8 M300 の水平飛行中の経過時間に対する対地高度の変化.....	129
Fig. 7-9 基本旋回飛行のイメージ.....	130
Fig. 7-10 PF2 の旋回飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの距離の変化 .....	131
Fig. 7-11 M300 の旋回飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの距離の変化 .....	131
Fig. 7-12 基本昇降飛行のイメージ.....	132
Fig. 7-13 PF2 の昇降飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの距離の変化 .....	133
Fig. 7-14 M300 の昇降飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの距離の変化 .....	133

Fig. 7-15 組み合わせ飛行 1 (8 の字) のイメージ.....	134
Fig. 7-16 PF2 の組み合わせ飛行 1 (8 の字) 中の経過時間に対する対地高度の変化.....	135
Fig. 7-17 M300 の組み合わせ飛行 1 (8 の字) 中の経過時間に対する対地高度の変化.....	135
Fig. 7-18 組み合わせ飛行 2 のイメージ .....	137
Fig. 7-19 PF2 の組み合わせ飛行 2 中の経過時間に対する対地高度の変化.....	137
Fig. 7-20 M300 の組み合わせ飛行 2 中の経過時間に対する対地高度の変化 .....	138
Fig. 7-21 PF2 の組み合わせ飛行 2 のイメージ.....	139
Fig. 7-22 M300 の組み合わせ飛行 2 のイメージ.....	139
Fig. 7-23 操縦位置と通信の構成 .....	140
Fig. 7-24 衝突防止機能試験の結果 .....	142
Fig. 7-25 PF2 の収納状況.....	143
Fig. 7-26 M300 の収納状況.....	143
Fig. 7-27 PF2 への放射線検出器の搭載状況.....	144
Fig. 7-28 M300 への放射線検出器の搭載状況.....	144
Fig. 7-29 展開後の写真 (PF2).....	145
Fig. 7-30 展開後の写真 (M300).....	145
Fig. 7-31 電波途絶時の PF2 の送信機上のコマンド画面 .....	146
Fig. 7-32 電波途絶時の M300 の送信機上のコマンド画面 .....	147
Fig. 7-33 ドローンによるモニタリングにおける空気減弱係数と空間線量率換算係数の求め方 ....	148
Fig. 7-34 歩行モニタリングによる空間線量率の測定結果 .....	149
Fig. 7-35 キャリブレーションフライトで得られた対地高度と計数率の関係 .....	149
Fig. 7-36 PF2 の自動飛行試験において GPS 測位データが途切れた例 .....	151
Fig. 7-37 ホスウィッチ型検出器で取得される $\gamma$ 線スペクトルの例 .....	151
Fig. 7-38 PF2 による空間線量率の算出結果.....	152
Fig. 7-39 M300 による空間線量率の算出結果.....	153
Fig. 7-40 空間線量率の比較結果 .....	155
Fig. 8-1 川内周辺における管制空域に係る情報.....	161

## 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、福島原子力発電所）事故後から、周辺環境における放射性物質の分布調査を行うために、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行っている。事故から約13年にわたり、継続的に航空機モニタリングを実施しながら、手法の改善及び体制の整備を行ってきた<sup>1)・19)</sup>。原子力防災のツールとして航空機モニタリングを活かすためには、事故時の航空機モニタリングの具体的な活用方法、機器の恒久的な管理体制の維持及び技術の継承等の課題があることが分かった。事故後整備された原子力災害対策マニュアルには、このような課題及び福島原子力発電所事故における教訓を踏まえ、航空機モニタリングに関し下記のように定められており<sup>22)</sup>、原子力防災のツールとして有効活用できるよう基盤整備が進められている。

### 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。

一方、実際の原子力災害を想定した場合、フライトのタイミングや体制等を事故前に決定しておく必要がある。特にフライトのタイミングについては、原子力災害対策指針<sup>23)</sup>に定められている防護措置の実施の判断基準 (Operational Intervention Level、以下、OIL) を踏まえて位置づけられることが望ましい。Table 1-1 に原子力災害対策指針における OIL について示す。また、機能的かつ効率的にフライトするには、事前に想定される地域を訓練として実際にフライトし、地域的な特性 (飛行場から原子力発電所までの距離及び事故発生からフライト開始までの最短時間評価並びに地形等フライト時の懸念事項) を把握しておくことが望ましい。さらに、航空機モニタリングのデータを解析して情報を公表するまでの時間についてもシミュレーションしておく必要がある。

現在、福島原子力発電所の周辺で行っている航空機モニタリングは、周辺環境に沈着した

放射性セシウムから放出される  $\gamma$  線の測定を目的としている。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、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。福島原子力発電所事故以前に実施された測定により推定された天然の放射性核種由来の空間線量率分布は西日本で高い傾向にあり、最大  $0.13 \mu\text{Gy/h}$  程度の場所もあるとされている<sup>24)</sup>。また、河川堆積物試料中に含まれる天然放射性核種濃度を基に空間線量率を評価した例<sup>25)</sup>を Fig. 1-1 に示す。この例でも空間線量率は西日本で高い傾向にあり、約  $0.13 \mu\text{Gy/h}$  を上回る地域が一部に見られる。このような天然放射性核種由来の空間線量率 (以下、バックグラウンド) は、Table 1-1 に示した飲食物に係るスクリーニングを実施するための基準となる  $0.5 \mu\text{Sv/h}$  を評価する場合には、無視できない大きさである。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、 $\gamma$  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り、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こと、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。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ってデータ解析の経験や知見を蓄積し、技術維持及び品質向上に努めることが肝要である。このため、原子力規制庁 (以下、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を実施してきた<sup>7),9),11),13),15),17),19),21)</sup>。この内、2015 年度 (平成 27 年度) から 2020 年度 (令和 2 年度) までの受託事業で実施した原子力施設周辺における航空機モニタリングにより作成したバックグラウンド空間線量率マップを Fig. 1-2 に示す。バックグラウンド空間線量率は近畿地方及び中国地方を含む西日本側で比較的高い傾向にあり、Fig. 1-1 で示した河川堆積物中の天然放射性核種濃度の測定データを基に作成された空間線量率マップと分布傾向は同様である。

近年、ドローン等の無人飛行体 (UAV) の開発は著しく、福島原子力発電所事故後、放射線検出器と組み合わせたシステムが開発されている。原子力機構では、福島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<sup>26)-28)</sup>。また、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (以下、JAXA) と共同で燃費が良い飛行機型 UAV に放射線検出システムを搭載したモニタリングシステム (Unmanned Airplane Radiation Monitoring System : UARMS) を開発してきている<sup>29)-31)</sup>。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<sup>29)</sup>。無人航空機の特徴は、長距離通信での無人飛行が可能及び航続時間が長いことが挙げられ、有人ヘリコプターを用いた航空機モニタリングの代替技術として期待されているほか、将来的には原子力防災への適用が

可能と考えられている。UAV を用いると放射線計測を遠隔地から実施できるため、本技術を原子力防災のツールとして適用することで、測定関係者の被ばく線量を低減することが可能となる。以上のことから、我が国の原子力防災に UARMS 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 UARMS の開発及び運用試験を開始し、無人航空機 Penguin C 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<sup>15),17),19),21)</sup>。この技術的検討がベースとなり、政府ロジスティックスとして、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) への無人機を用いた航空機モニタリングに関する記載の追加がなされた。

これまでの原子力発電所周辺における航空機モニタリング及び無人航空機の国内における運用技術開発に関する受託事業で得られた成果は以下の通りである。

平成 27 年度 (2015 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<sup>7)</sup>。

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<sup>9)</sup>。

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<sup>11)</sup>。

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<sup>13)</sup>。

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<sup>15)</sup>。

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<sup>17)</sup>。

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<sup>19)</sup>。

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<sup>21)</sup>。

本報告書では、2023 年度 (令和 5 年度) に実施した、川内の周辺 3 km～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングにより得られた測定結果を報告する。なお、川内のモニタリングは 7 月及び 11 月の 2 回に分けて実施し、本報告書においてそれぞれ区別する必要がある場合には、川内 (前期) 及び川内 (後期) と呼称する。また、原子力災害時における航空機モニタリングに係る対応力を高めるため、令和 5 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訓練を実施した。本訓練の一環として、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も併せて実施した。さらに、無人航空機 Penguin C に搭載する放射線検出器を開発し、Cs-137 点線源を用いた基本的な放射線応答試験を行うとともに、当該検出器を Penguin C に組付けた状態で地上ベースの運転試験を実施し、緊急時モニタリングへの適合性を確認した。加えて、緊急時モニタリングで活用できる無人航空機の調査を、特にドローンを中心として行った上で 2 機種選定し、基本的な飛行動作試験及び放射線モニタリングを実施した。当該試験を通じて緊急時モニタリングのツールとしてドローンを運用する際の課題を抽出し取りまとめた。

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL<sup>23)</sup> (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 $\mu$ 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	$\beta$ 線: 40,000 cpm (皮膚から数cmでの検出器の計数率) $\beta$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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			

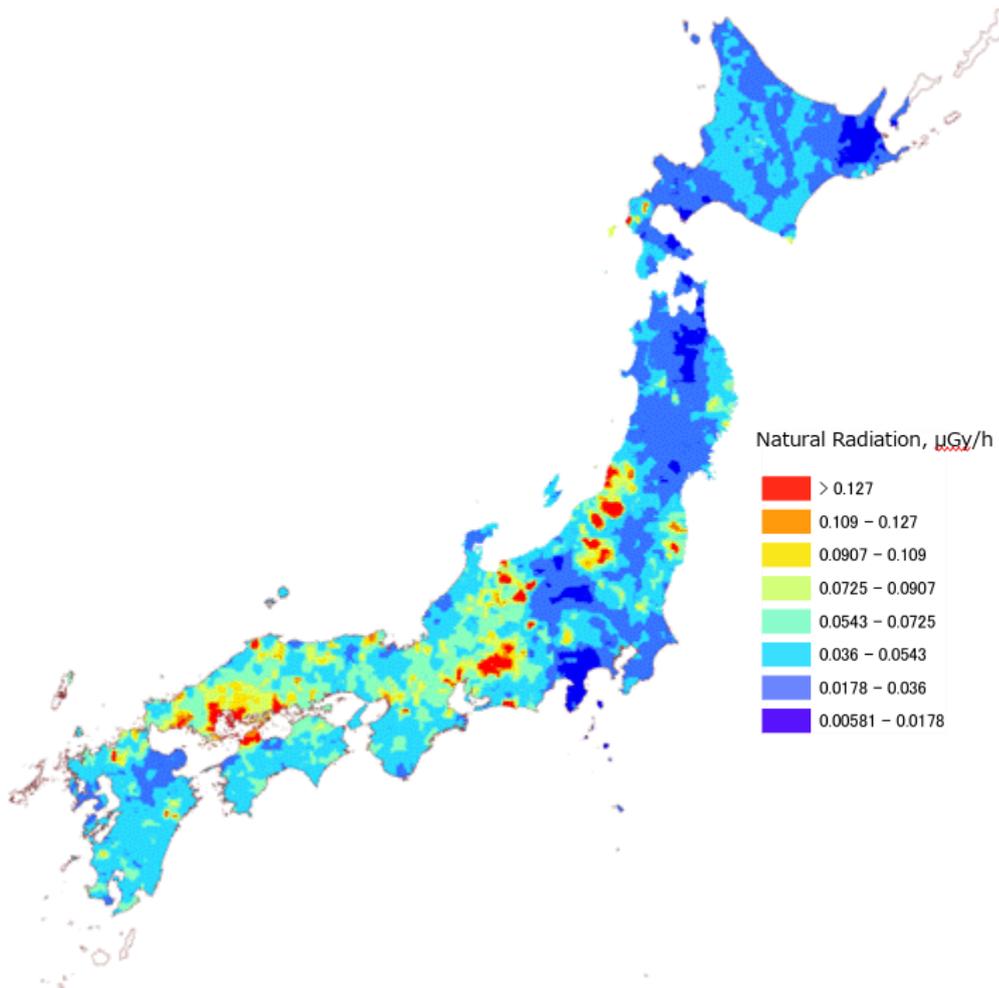


Fig. 1-1 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果  
(日本地質学会ホームページ<sup>25)</sup>より)

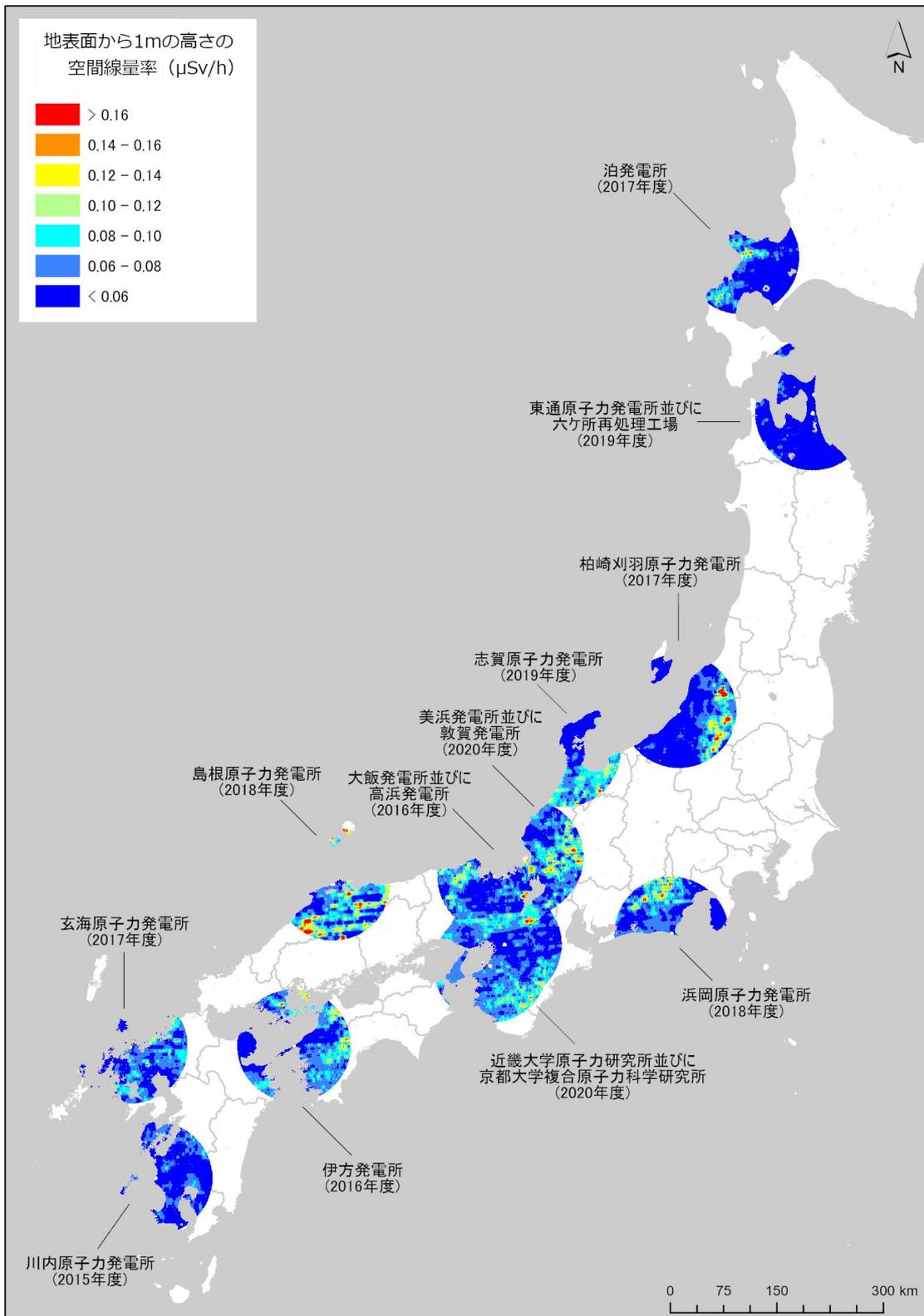


Fig. 1-2 2015 年度から 2020 年度までのバックグラウンド航空機モニタリング結果 (7),9),11),13),15),17)

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

## 2. 有人ヘリコプターによる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 LaBr<sub>3</sub>(Ce)シンチレーション式検出器 (3"×3"、以下、LaBr<sub>3</sub>(Ce)検出器) は空気中ラドンの子孫核種に起因する  $\gamma$  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  $\gamma$  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  $\gamma$  線の計数率情報をリアルタイムに確認できる。また、全体は外付けのバッテリーで駆動し、完全充電で 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、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリング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定を行うことができる。測定された  $\gamma$  線計数率とその位置情報との紐付けは基本的に RSI システムの GPS で取得された緯度及び経度を基に行うが、RSI システムの GPS が異常値を示す例が確認されている<sup>8),10)</sup>、そのような事象が起きた際には、位置情報を高精度 GPS で取得された緯度、経度及び高度に置換する。

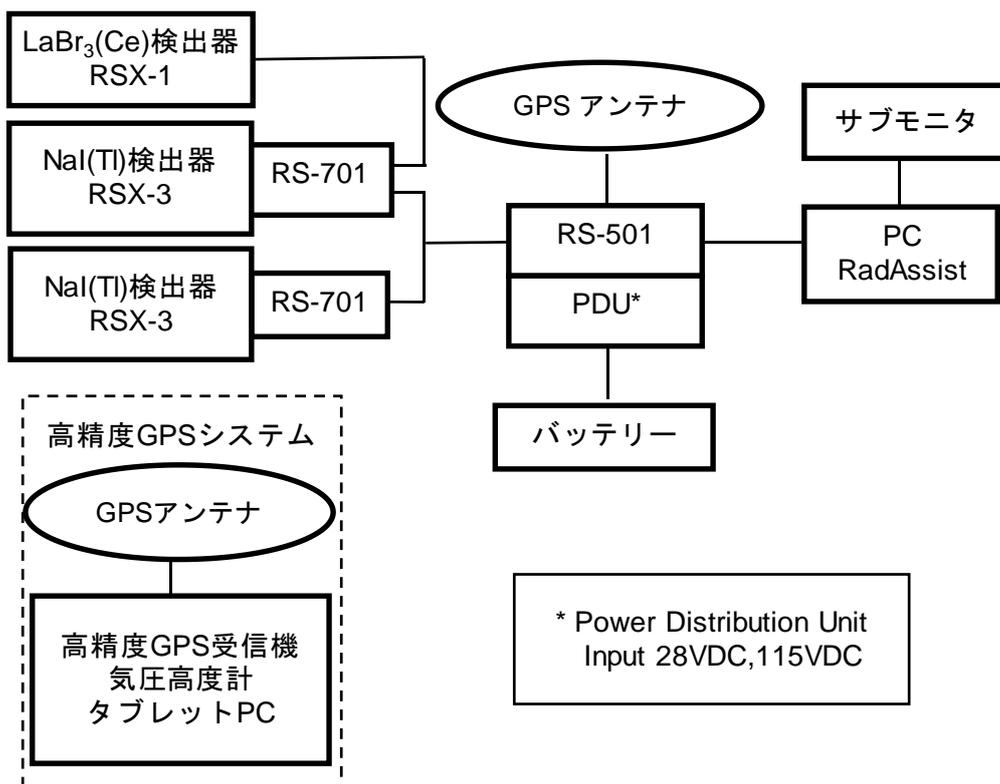


Fig. 2-1 RSI システムのブロック図

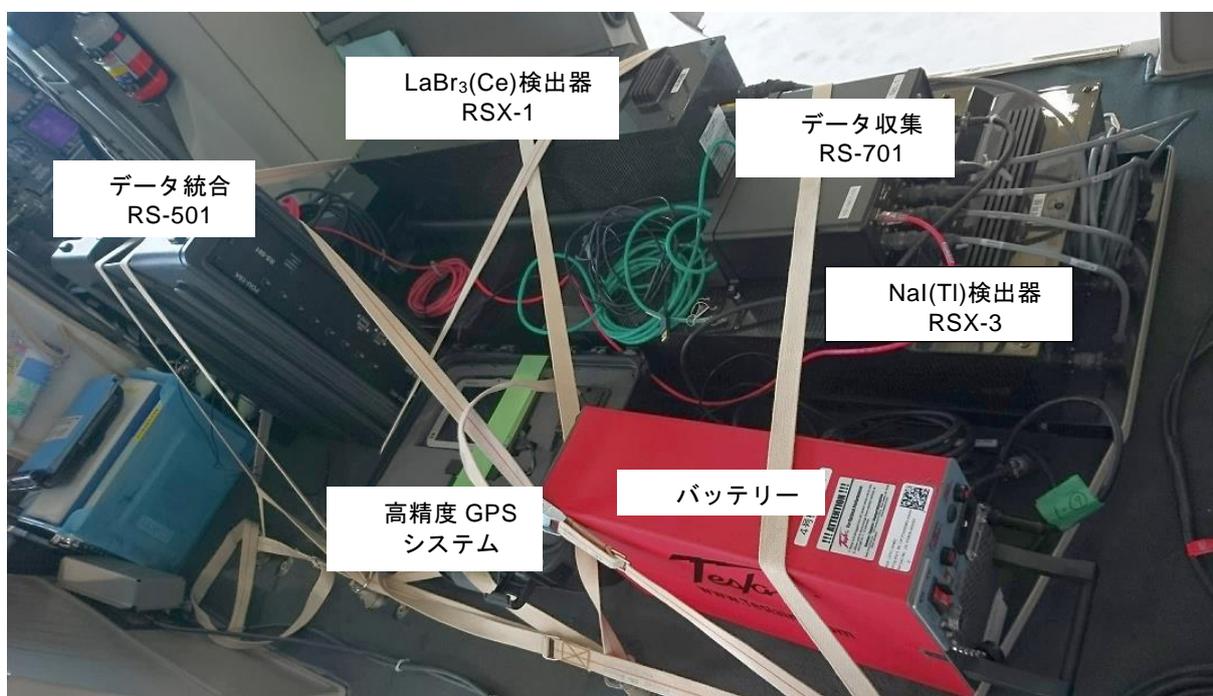


Fig. 2-2 RSI システムの外観

## 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 $\gamma$ 線の遮へい効果を考慮する必要がある。そこで、 $\gamma$ 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。使用できる機種のを Fig. 2-3 に示す。2023 年度(令和 5 年度)に使用したヘリコプター機種(機体番号)を Fig. 2-4、Fig. 2-5 に示す。機体繰りの都合から、川内(前期)では Bell430 (JA02AX)、川内(後期)では Bell412 (JA6929) を使用した。



**Bell430**  
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



**Bell412**  
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



**AS332**  
アエロスパシアル社製



**S-76**  
シコルスキー・エアクラフト社製

**Fig. 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** 川内 (前期) の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell430 (JA02AX))



**Fig. 2-5** 川内 (後期) の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell412 (JA6929))

### 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。川内 (前期) 及び川内 (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。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。川内 (前期) 及び川内 (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ことが望ましい。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。

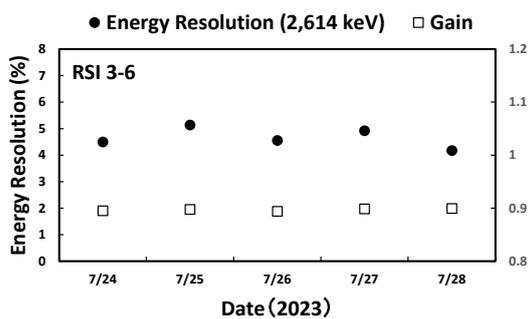
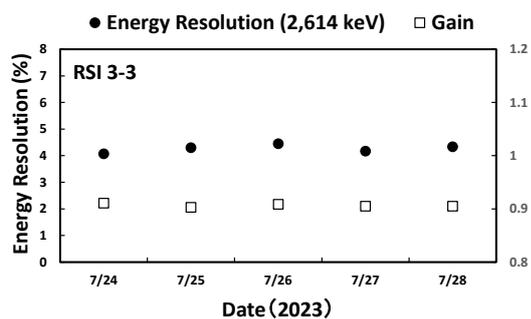
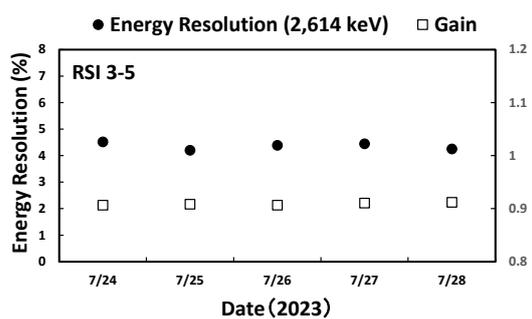
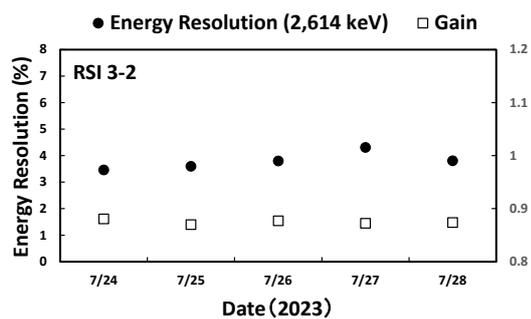
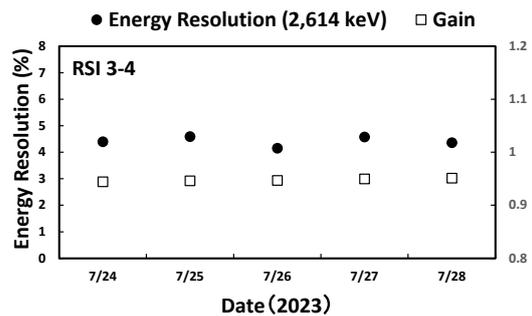
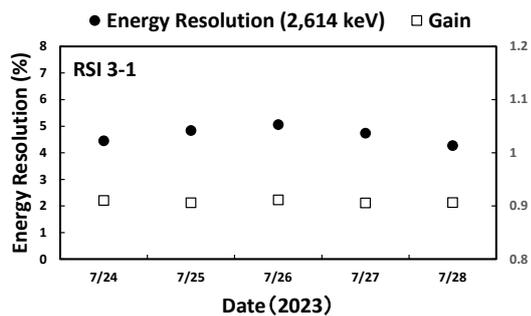


Fig. 2-6 システムのエネルギー分解能及び Gain の推移 (川内 (前期))

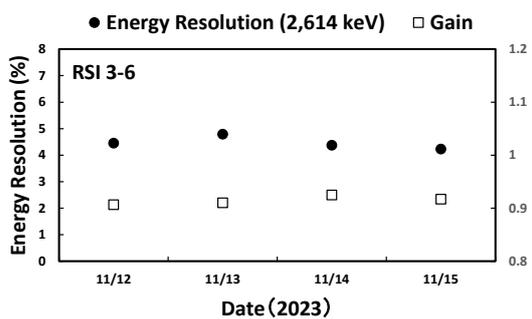
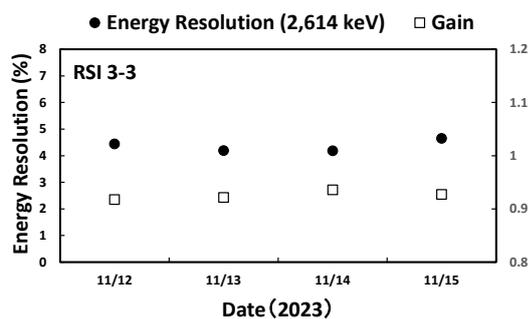
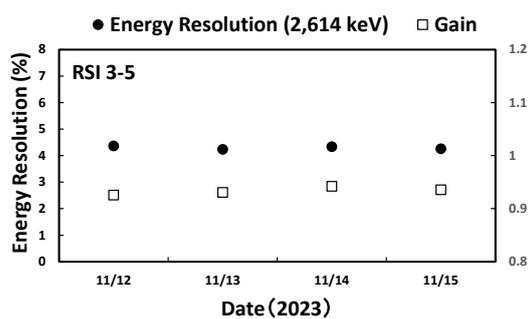
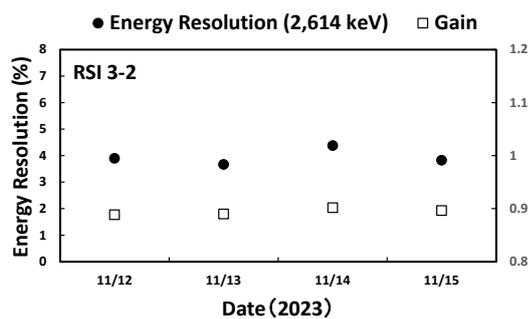
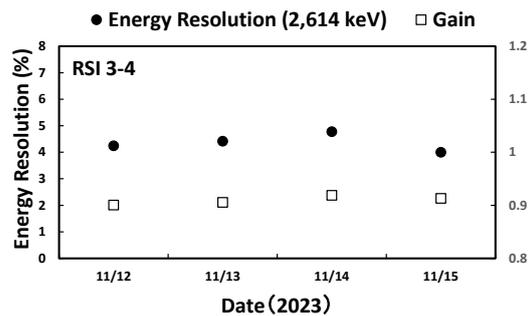
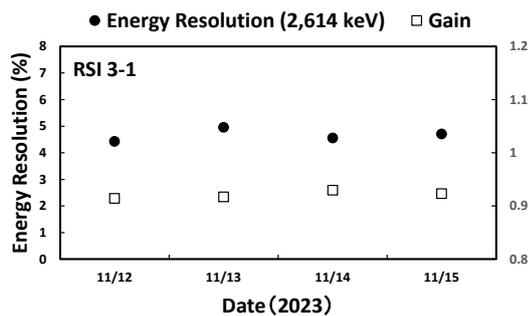


Fig. 2-7 システムのエネルギー分解能及び Gain の推移 (川内 (後期))

### 3. データ取得及び解析方法 (有人ヘリコプター)

#### 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、 $\gamma$  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、10 km または 20 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 $\gamma$ 線の計数率を記録し、対地高度の許容範囲から逸脱した測定データは不確かさが比較的大きく含まれるため、空間線量率等の算出には用いないこととした。Fig. 3-1に川内(前期)及び川内(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2015年度(平成27年度)に実施した川内におけるバックグラウンドモニタリングから一部間引いたもので、測線間隔は基本的に5 kmであるが、一部で10 kmまたは20 kmとした。航空機モニタリングの拠点として、鹿児島空港に併設されている株式会社ノエビアアビエーション鹿児島空港事務所を使用した。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て取り扱った。

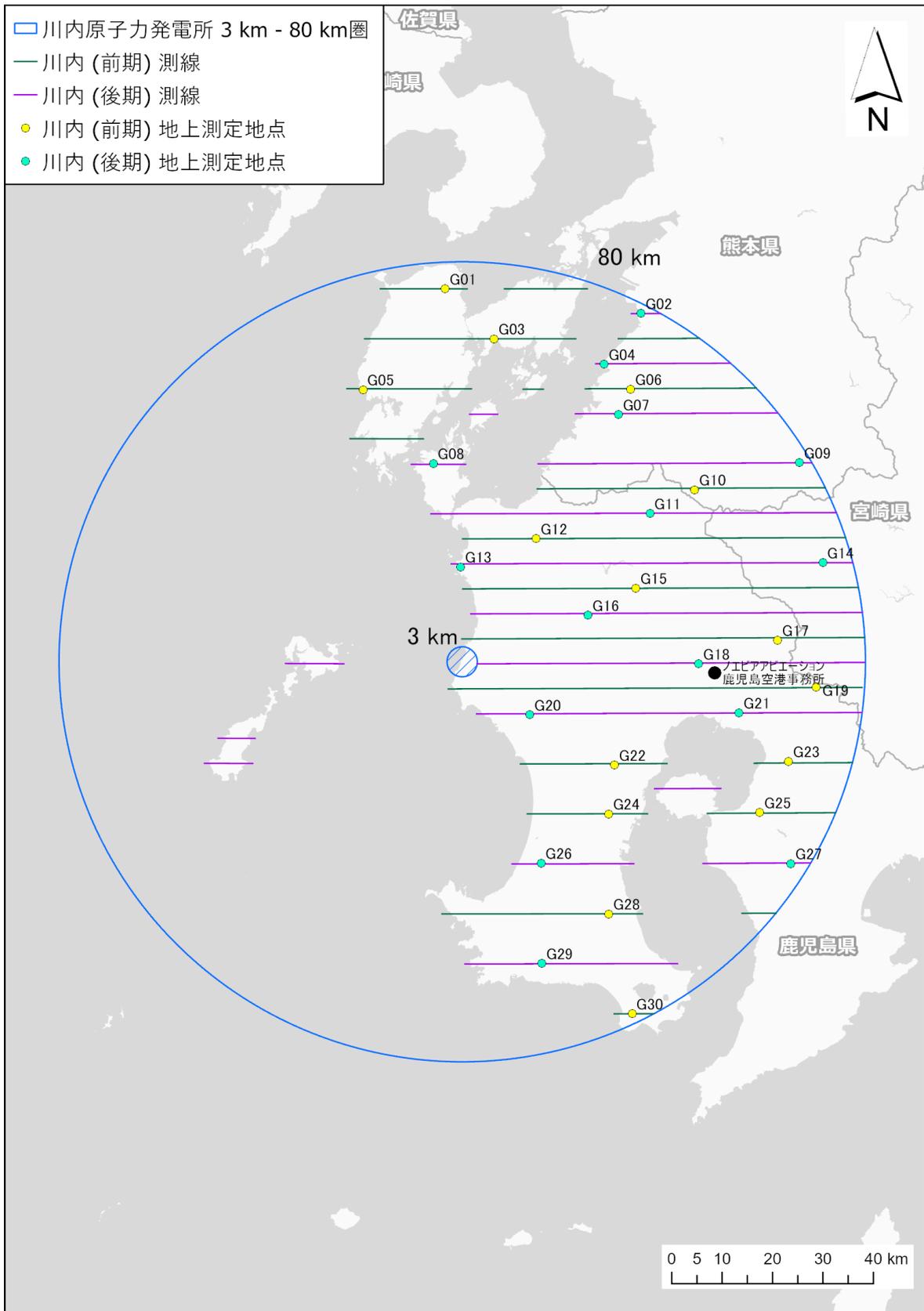


Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (川内 (前期) 及び川内 (後期))  
 (背景地図は、ESRI ジャパンデータ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

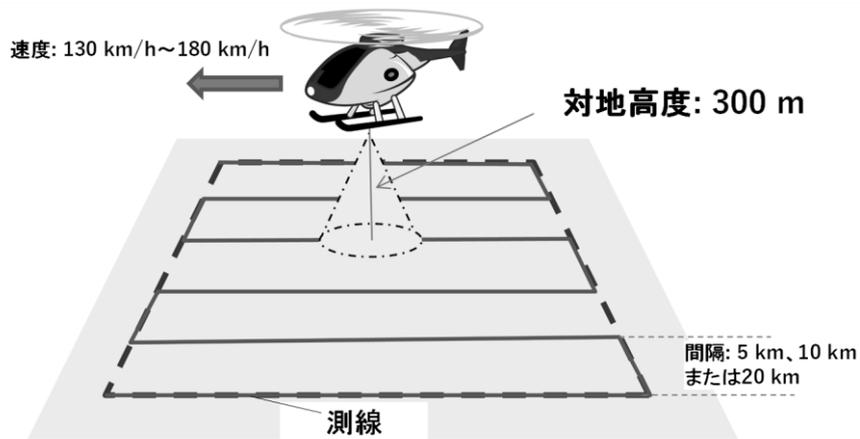


Fig. 3-2 航空機モニタリングデータ取得のイメージ

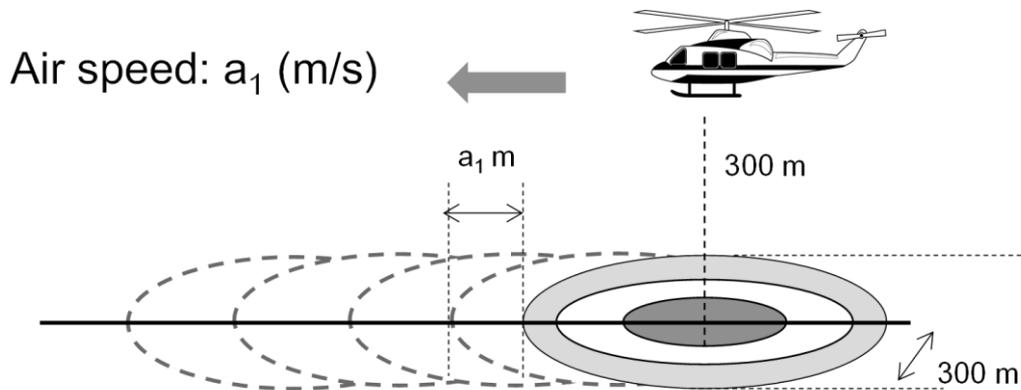


Fig. 3-3 航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージ

### 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 $\gamma$ 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

実際のフライト対地高度と基準対地高度とのずれによって生じる $\gamma$ 線計数率の多寡を補正するための実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor:  $AF (m^{-1})$ ) を求めるフライトである。本フライトは、線量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 $\gamma$ 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鹿児島県出水市の周辺とした。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  $\gamma$  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  $\gamma$  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  $\gamma$  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  $\gamma$  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  $\gamma$  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<sup>4)</sup>。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  $\gamma$  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鹿児島県の長島から南西方向、または熊本県の天草諸島から南西方向に少し離れた東シナ海上で実施した。

#### ・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地上における対地高度(または海上における海拔高度)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  $\gamma$  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、空気中核種フライトは鹿児島県の長島から南西方向、または西方海岸から西方向に少し離れた東シナ海上で実施した。

#### ・オーバーラップフライト

上記した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 10 km、間隔 1 km、本数 4 本)をフライトして取得した  $\gamma$  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川内(前期)の終期と川内(後期)の始期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
空気中核種フライト	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

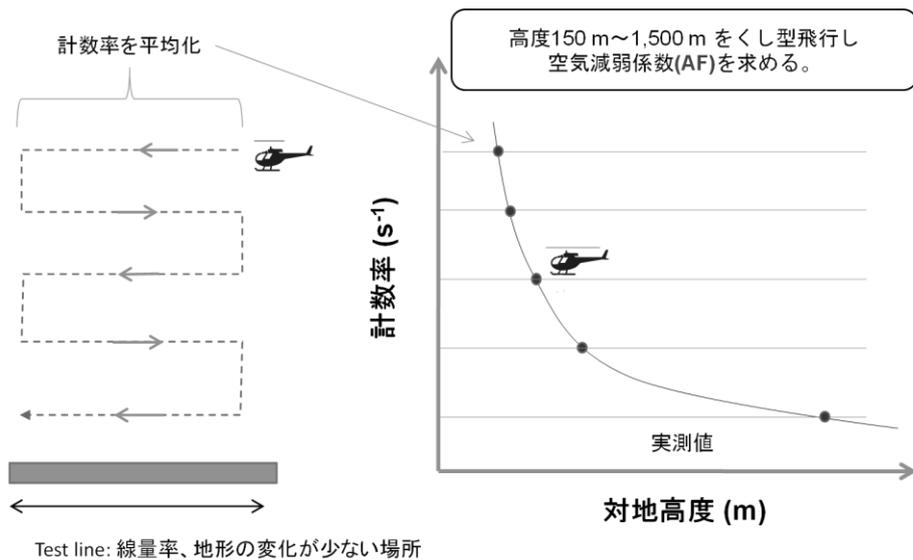


Fig. 3-4 テストラインフライトのイメージ

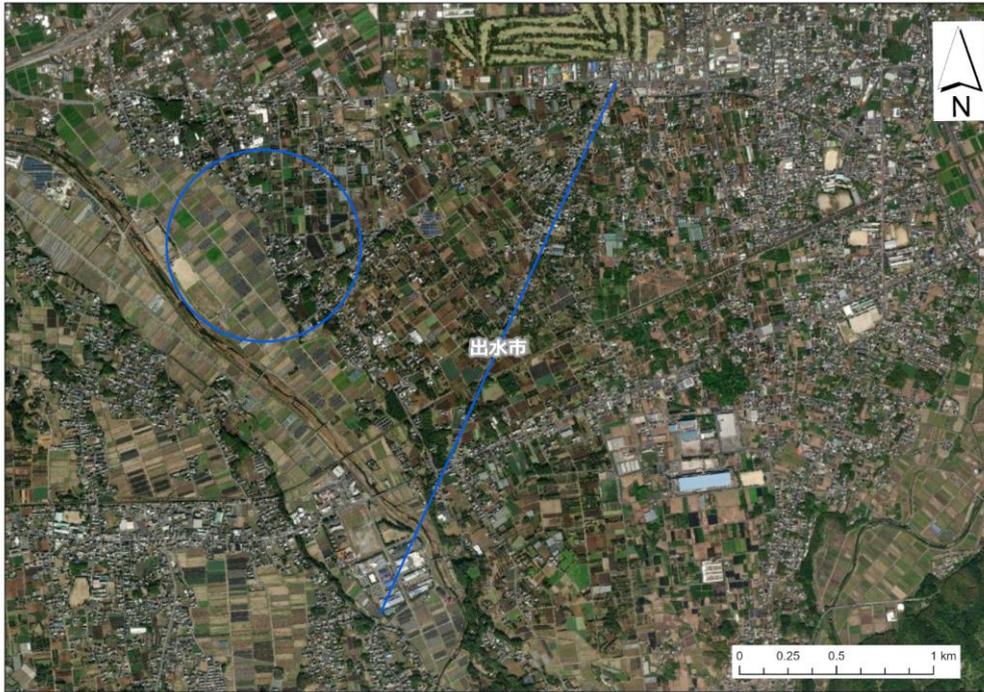
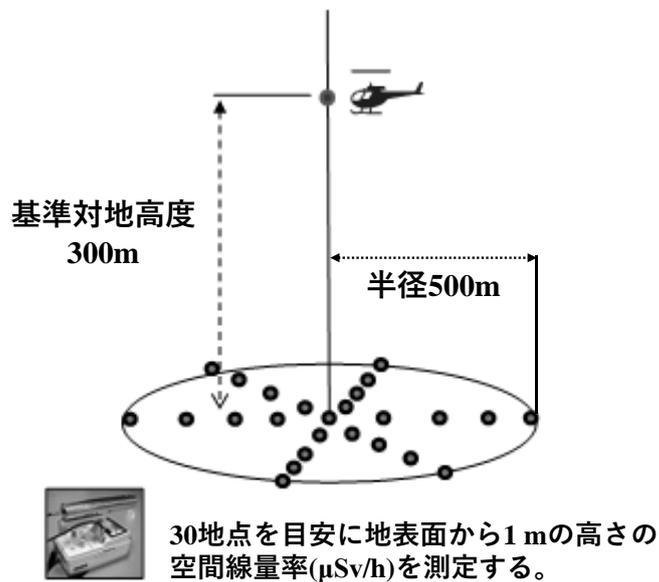


Fig. 3-5 川内 (前期及び後期) におけるテストライン及びテストポイントの場所  
(鹿児島県出水市)

(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( $\text{s}^{-1}$ )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

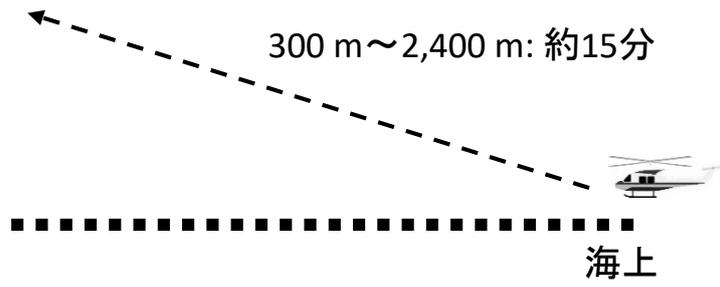


Fig. 3-7 宇宙線フライトのイメージ



陸上または海上

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  
(鹿児島県出水市)

### 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 $\gamma$ 線は、主に以下の4種類に分けられる。

- ① 天然放射性核種からの $\gamma$ 線
- ② 空气中核種からの $\gamma$ 線
- ③ 宇宙線
- ④ 放射性セシウムの $\gamma$ 線

本報告で測定した川内においては④の影響は非常に小さく無視できるため、①を評価するためには、②及び③起源の計数率を全計数率から減算する必要がある。これらを考慮した解析のフローを Fig. 3-10 に示す。本報告では、当該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。

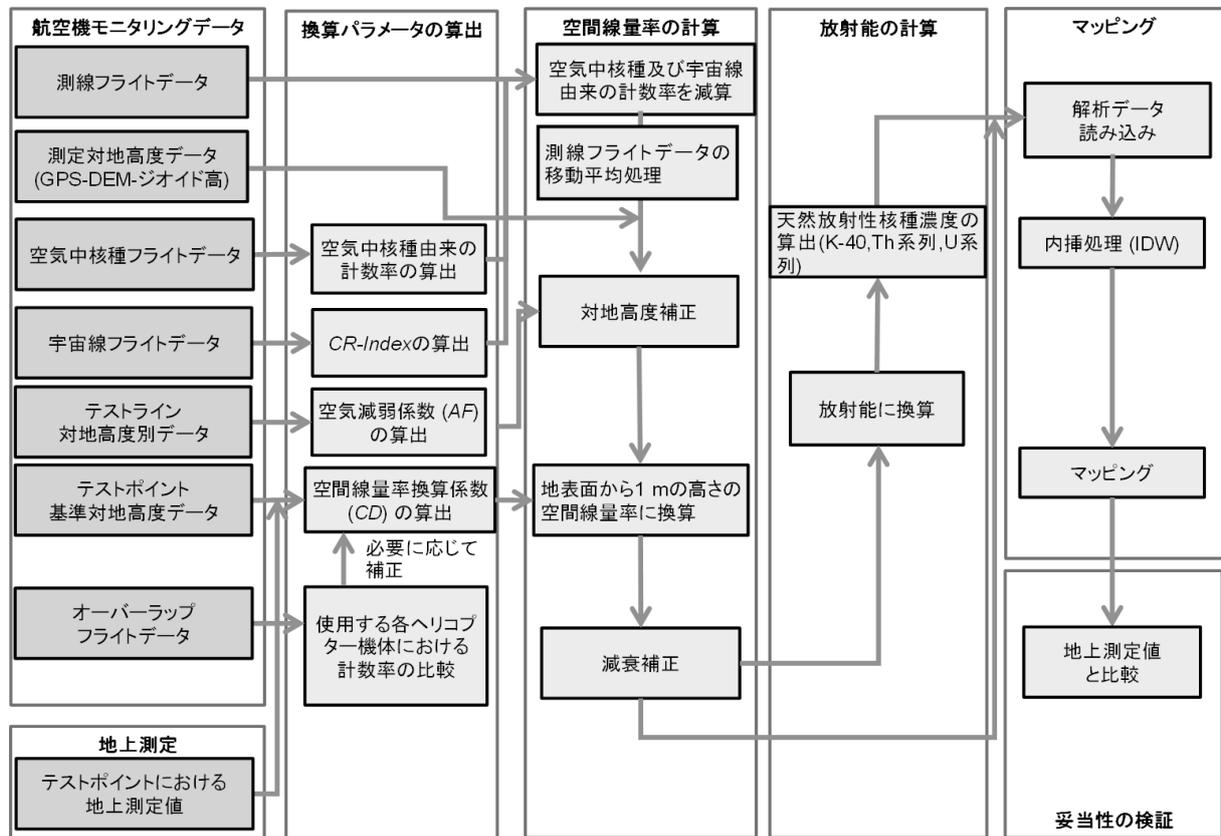


Fig. 3-10 解析のフロー

### 3.4. 空間線量率への換算方法

#### 3.4.1. 空気中核種及び宇宙線由来の $\gamma$ 線計数率

航空機モニタリングにおいて、空気中核種及び宇宙線由来の計数率は全計数率から減算する必要がある。本項では、これらの減算方法について示す。

空気中核種由来の $\gamma$ 線計数率については、空気中核種フライト（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。空気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<sup>17)</sup>を Fig. 3-11 に示す。このように、空気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気中核種からの $\gamma$ 線計数率の減算に用いることが可能である。本報告においては、鹿児島県の長島から南西方向、または西方海岸から西方向に少し離れた東シナ海上で空気中核種フライトのデータを取得した。空気中核種フライトで取得した計数率の算術平均値を Table 3-2 に示す。なお、空気中核種フライトのデータを用いることなく、空気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<sup>5)-21)</sup>から海拔高度が上昇すると宇宙線起因の計数率が上昇することが分かっている。宇宙線起因の $\gamma$ 線は RSI システムが測定している全エネルギー範囲（30 keV～3,000 keV）で計数されており、Tl-208 が放出する 2,614 keV の $\gamma$ 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～2,000 m で取得したデータのうち、2,800 keV 以上の $\gamma$ 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 $\gamma$ 線の計数率は正の相関にあり、計測する場所に影響されない。また、2,800 keV を超える $\gamma$ 線の計数率と 2,800 keV 以下の $\gamma$ 線の計数率の比（*CR-Index*）は、高度に依存せず一定の数値を示す。*CR-Index* は機体と検出器の組み合わせごとに設定し、測定データにおける 2,800 keV 以上の $\gamma$ 線計数率に *CR-Index* を乗じることで全エネルギーにおける宇宙線起因の計数率を推定し、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。

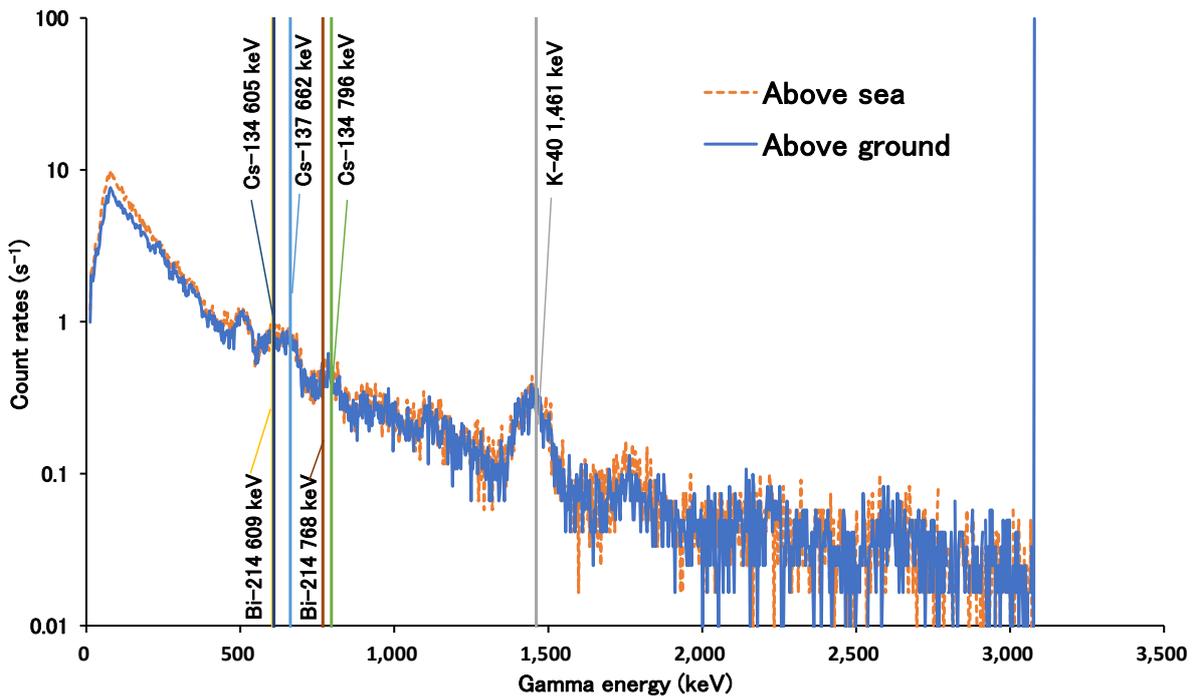


Fig. 3-11 空气中核種フライトで取得した陸上と海上での  $\gamma$  線スペクトル例<sup>17)</sup>

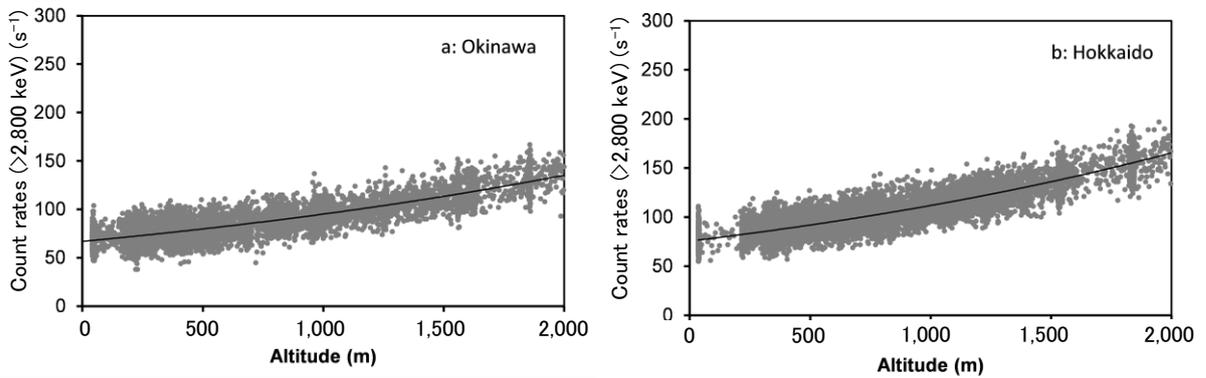


Fig. 3-12 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例<sup>4)</sup>

(a: 沖縄海域, b: 北海道海域)

(図中の曲線は、測定データの指数関数による近似曲線である。)

Table 3-2 RSI システムと機体組み合わせと空气中核種由来の計数率平均値及び 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( $s^{-1}$ )	CR-Index
川内(前期)	RSI 3	Bell430 (JA02AX)	朝日航洋 株式会社	232	3.46
川内(後期)	RSI 3	Bell412 (JA6929)	朝日航洋 株式会社	324	3.71

### 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  $\gamma$  線計数率の多寡を補正するために、テストラインで取得したデータを基に、実効的な空気減弱係数  $AF$  を求め、計算式 [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。

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

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)<sup>32)</sup>及びジオイド高<sup>32)</sup>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、非線形最小二乗法によって指数関数回帰を Python3 で実施し、最適化された曲線の傾きを  $AF$  とした。指数関数回帰のあてはまりの良さは残差分散 (本報告では、実測値と回帰による推定値との差の平方和を、データ数－説明変数の個数 (2 個) で除算することで算出した。以下、 $RV$ ) で評価した。 $RV$  は非負であり、小さいほど実測値と回帰による推定値がよく一致していることを意味する。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  $\gamma$  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  $CD$  ( $[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$ ) 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上測定値及び算出した  $CD$  については 4.2 節に詳述する。

---

\*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。

### 3.4.4. 空間線量率への換算方法

上記したパラメータを用いて空間線量率に換算する方法について以下に示す。また、計算式を式 [2] 及び式 [3] に示す。

- ① 測定で得られた  $\gamma$  線スペクトルから以下の領域の計数率を計算する。
  - (1) 全計数率 ( $C_{\text{all}}$ )
  - (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、 $C_{\text{net}}$  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起源の計数率 ( $C_{\text{cos}}$ ) を推定する。
- ③ 空气中核種フライトで取得したデータを空气中核種起源の計数率 ( $C_{\text{air}}$ ) とする。
- ④  $C_{\text{all}}$  から  $C_{\text{cos}}$  と  $C_{\text{air}}$  を差し引いた計数率を正味の計数率  $C_{\text{net}}$  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。

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

ここで、

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

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

$HF$ : 対地高度補正係数 ( $\text{m}^{-1}$ )

$CD$ : 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  $\gamma$  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。

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

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 ( $\mu\text{Sv/h}$ )

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

$AF$ : 空気減弱係数 ( $\text{m}^{-1}$ )

$H_{\text{std}}$ : 基準対地高度 (300 m)

$H_{\text{m}}$ : 測定対地高度 (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の検出限界値は  $C_{\text{air}}$  と  $C_{\text{cos}}$  の影響を受ける。 $C_{\text{cos}}$  はこれまでの測定結果<sup>5)-21)</sup>を見ると  $200 \text{ s}^{-1} \sim 500 \text{ s}^{-1}$  の範囲となり、 $C_{\text{air}}$  は約  $400 \text{ s}^{-1}$  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 ( $\sigma$ ) を式 [4] に示した Currie の式<sup>33)</sup>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  $900 \text{ s}^{-1}$  とすると、 $N_D$  は  $142 \text{ s}^{-1}$  となる。これに、RSI システムの標準的な  $CD$  ( $13,000 \text{ [s}^{-1}\text{]}/[\mu\text{Sv/h}]$ ) 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。本測定の経験を重ねてきた現在では、その不確かさは小さくなってきている。
- 高度補正係数の選択： $CD$  と同様に、キャリブレーションのためのデータ取得の状況により係数の選択時の不確かさが生じる。
- 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。本誤差の低減については今後の課題である。

### 3.7. 補間方法

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<sup>34)</sup>。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。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<sup>35)</sup>。

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

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

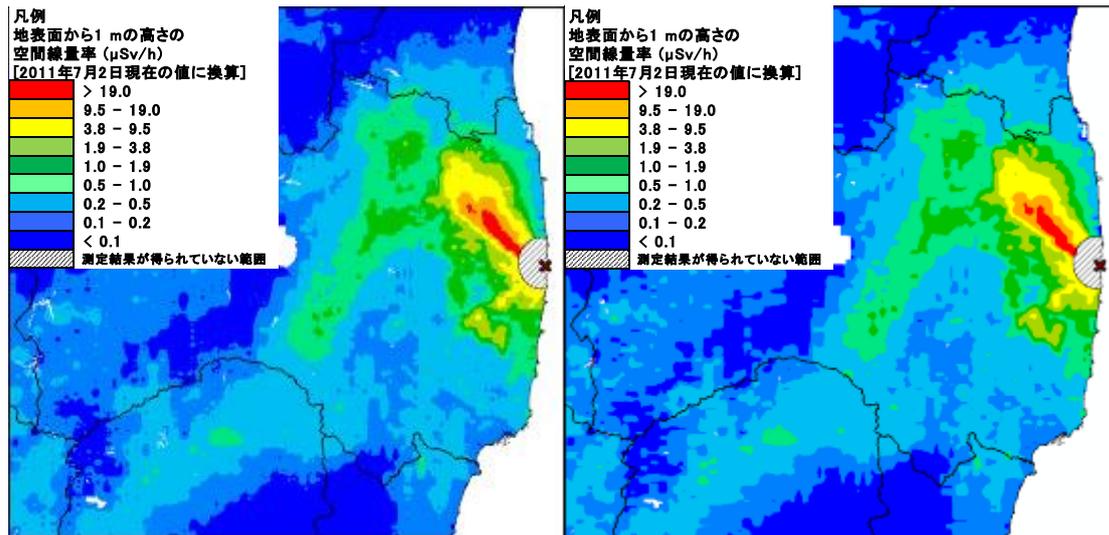
$z_i$  : 各サンプル点を持つ実測値

$s$  : 補間地点から近傍のサンプル点

である。

IDWによる補間の条件として「補間地点とサンプル点間の距離が大きくなるにつれて、その補間地点においてサンプル点が推定値に与える影響が減衰していく」ことが前提になる。そのため、推定する(重み付け平均)値は補間地点から近傍 $s$ 点の最高値より大きくならず、最低値より小さくなることはない。また、IDWには複雑なパラメータ設定が不要である。必要となるのは、補間地点とサンプル点間の距離に応じて影響度を制御するべき乗数 $\lambda$ 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 $\lambda$ 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。 $\lambda$ 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。 $\lambda$ 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、 $\lambda$ 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。 $\lambda$ を2.3、 $s$ を400としたFig. 3-13 a)と $\lambda$ 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、基準地域メッシュ(1 km)をベースとしつつ、上記の測定範囲を考慮して250 mにメッシュサイズを決定した。



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

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

\*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. 空気中の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変遷系列には、気体であるラドンが存在し、ラドンの一部は大気中に散逸する。Fig. 3-14 に主な天然の放射性変遷系列であるウラン系列とトリウム系列について示す。Table 3-3 にラドン子孫核種が放出する  $\gamma$  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 及び Bi などのラドン子孫核種に壊変し、大気中の微粒子に吸着して大気中を浮遊する。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  $6 \text{ Bq/m}^3$  程度とされている<sup>36)</sup>。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気中におけるラドン子孫核種濃度が変動することが知られており、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<sup>37)</sup>。これまでの航空機モニタリングの経験においても、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  $\gamma$  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<sup>5)-7)</sup>。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、ラドン子孫核種由来の  $\gamma$  線計数率を除去することが望ましい。

これまでの航空機モニタリングにおいては、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<sup>7)</sup>、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<sup>8)</sup>。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2022年度(令和4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<sup>9),11),13),15),17),19),21)</sup>。2023年度(令和5年度)も引き続き川内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、大気中のラドン子孫核種の影響の除去手法を「ラドン弁別手法」と呼称する。

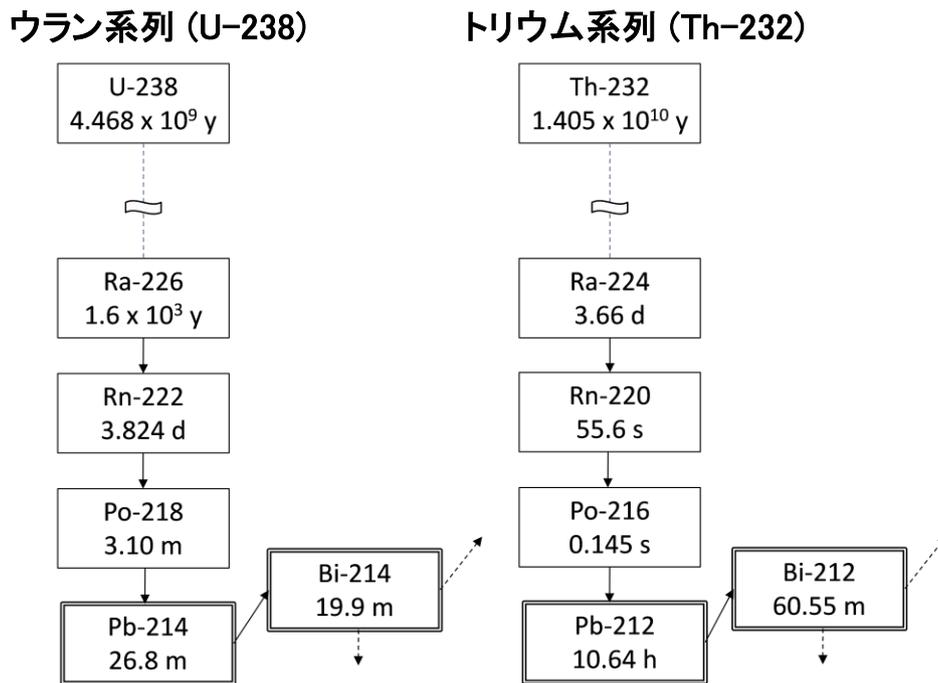


Fig. 3-14 ウラン系列及びトリウム系列  
(核種名の下の数値は半減期を表す。)

Table 3-3 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. ラドン弁別手法の理論

前述したように、ラドン子孫核種は大気中だけでなく地表面及び地殻にも存在し、その $\gamma$ 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、ラドン子孫核種に起因する $\gamma$ 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 $\gamma$ 線計数率を推定する方法として、全計数率を取得する検出器に加え、空气中のラドン子孫核種から放出される $\gamma$ 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<sup>34)</sup>。原子力機構では当該手法を参考にして、空气中のラドン子孫核種に起因する $\gamma$ 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 $\gamma$ 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<sup>7)・21)</sup>。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 $\gamma$ 線をなるべく遮へいし、空气中ラドン子孫核種の $\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $C_{\text{NaI},g}$ を求め、これを空間線量率に換算してマッピングする。

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

ここで、

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

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

である。

ヘリコプターの機種または機体によって  $\gamma$  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。

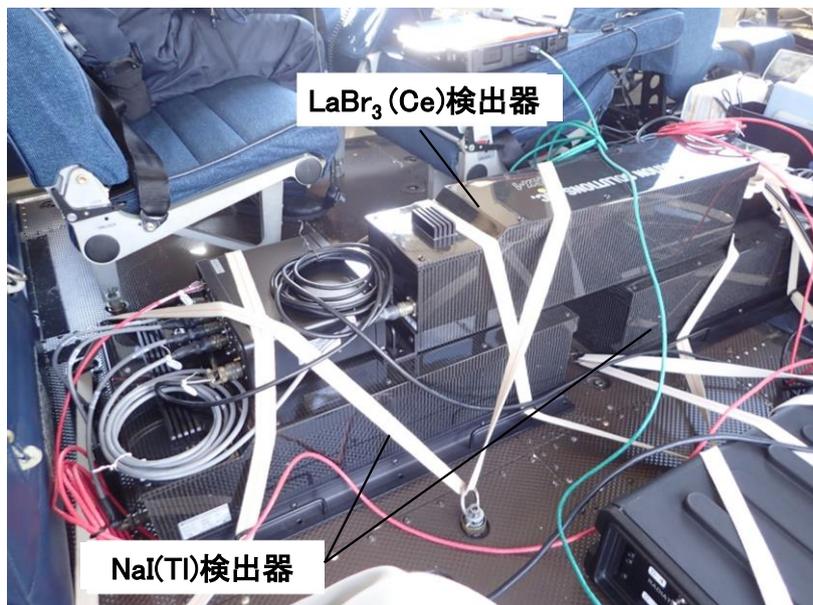


Fig. 3-15 空气中ラドン子孫核種測定用の検出器とヘリコプターへの搭載状況

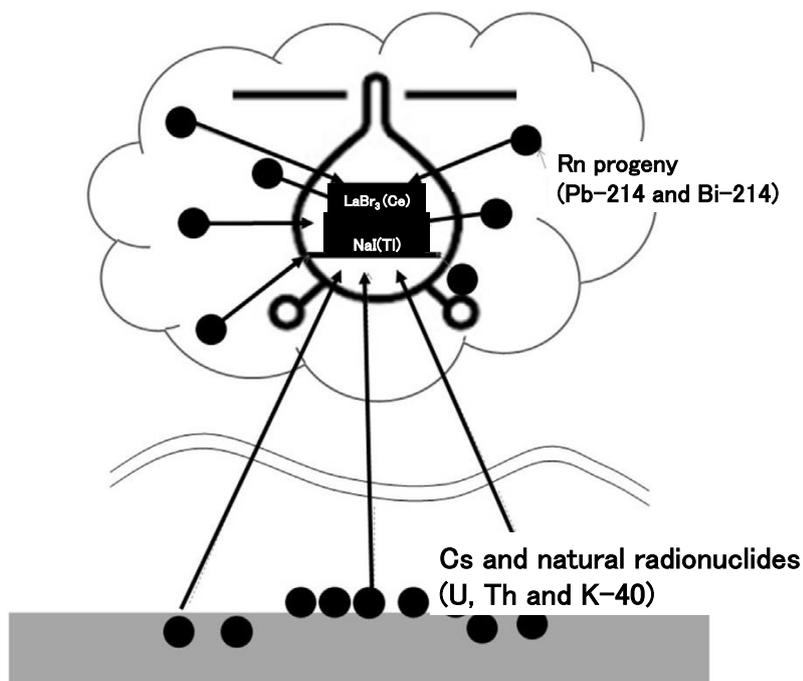


Fig. 3-16 空气中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ

### 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<sup>7)</sup>。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<sup>9)</sup>。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、

$GI_{\text{corr}}$  : 高度補正後の *GI*

$H_m$  : 測定時における対地高度 (m)

$H_{\text{std}}$  : 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、 $\gamma$  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、 $\gamma$  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  $\gamma$  線スペクトル例<sup>7)</sup>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  $\gamma$  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  $\gamma$  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) として取

り扱った。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思われることから川内 (前期) にのみ実施し、同測定値を川内 (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、川内 (前期) と川内 (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)<sup>38)</sup> によるシミュレーションの結果  $\eta$  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。

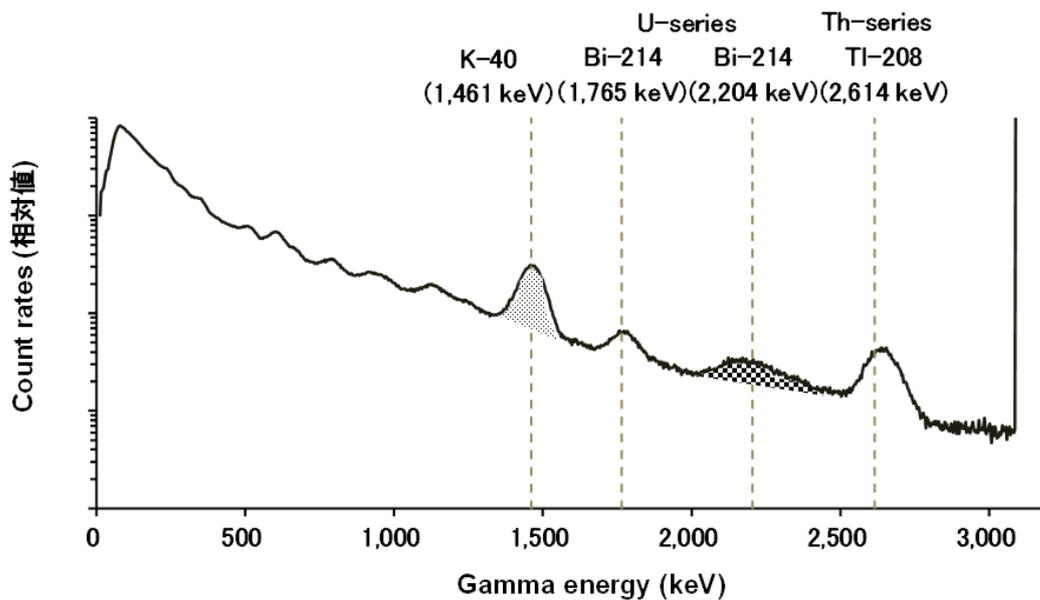


Fig. 3-17 航空機モニタリングで取得できる  $\gamma$  線スペクトル例<sup>7)</sup>

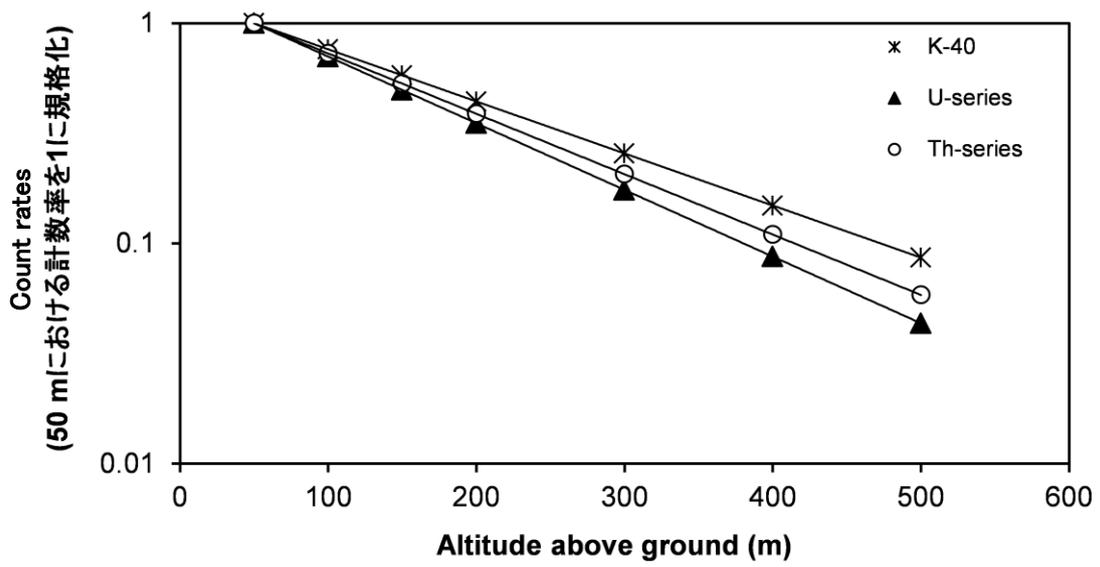


Fig. 3-18 天然放射性核種ごとの対地高度と計数率の関係  
(EGS5 によるシミュレーション結果<sup>7)</sup>)

#### 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地上測定及びの実績

2.2 節に記述した通り、川内（前期）及び川内（後期）の航空機モニタリングでは Bell430 (JA02AX) 及び Bell412 (JA6929) を使用した。フライトに要した期間は以下の通りである。また、ヘリコプターごとにフライトした距離や平均フライト速度、回数等をまとめた表を Table 4-1 に示す。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]

- 川内（前期）
  - ・ 航空機モニタリング：2023 年(令和 5 年) 7 月 25 日～7 月 28 日 (延べ 8 フライト)
  - ・ 地上測定：同年 7 月 25 日～7 月 28 日
- 川内（後期）
  - ・ 航空機モニタリング：2023 年(令和 5 年) 11 月 12 日～11 月 15 日 (延べ 7 フライト)
  - ・ 地上測定：同年 11 月 12 日～11 月 15 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
川内（前期） Bell430 (JA02AX)	694	2,591	143	2023年7月25日	2023年7月28日	8
川内（後期） Bell412 (JA6929)	664	2,443	130	2023年11月12日	2023年11月15日	7

※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 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、空気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  $\gamma$  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  $\gamma$  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川内 (前期) では 7 月 26 日、川内 (後期) では 11 月 13 日に取得した数値を採用した。CD については  $\gamma$  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、川内 (前期) では 7 月 26 日に取得した数値を採用した。川内 (後期) ではいずれの CD も同値であるが、11 月 15 日に取得したデータの方が  $\gamma$  線計数率及び対地高度が比較的安定しているという観点から良好である。また本表には参考として、福島原子力発電所周辺における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について、Bell430 (JA02AX) については 2021 年度 (令和 3 年度) に複数取得したデータから最も信頼できると思われる数値を選定したものであり、Bell412 (JA6928 及び JA412N) については、2012 年 (平成 24 年) から 2014 年 (平成 26 年) に取得したデータの算術平均値である。なお、後者については 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、同様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やや差異が見られた。また、川内 (前期) と川内 (後期) とで用いたヘリコプター機種及び測定時期は異なるが、同一の場所で取得したため AF 及び CD は概ね同様であった。これらに見られた差異については測定した主要な  $\gamma$  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  $\gamma$  線遮へい能力といった要因が複雑に絡み合っただけで数値が変動するものと推察される。

ここで、川内 (前期) 及び川内 (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 Bell430 (JA02AX) で 2023 年 (令和 5 年) 7 月 28 日に、Bell412 (JA6929) で 2023 年 (令和 5 年) 11 月 12 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  $\gamma$  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、同日における空気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 を適用して空気中核種及び宇宙線由来の  $\gamma$  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  $\cdot$  HF 補正計数率) 比較した (Fig. 4-3)。Fig. 4-3 に示した回帰直線の傾きがヘリコプター間の CR-Index  $\cdot$  HF 補正計数率の比であると解釈でき、この傾き (0.82) が Table 4-5 に示した CD の比と一致することが望ましい。つまり、Bell412 (JA6929) / Bell430 (JA02AX)  $\approx$  0.76 が理想値である。この比が回帰直線の傾きと 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 8 % であり、よく一致していたことから、CD の補正を施す必要性は無いと判断された。

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 <sup>-1</sup> )	CR-Index
川内 (前期)	RSI 3	Bell430 (JA02AX)	朝日航洋 株式会社	232	3.46
川内 (後期)	RSI 3	Bell412 (JA6929)	朝日航洋 株式会社	324	3.71

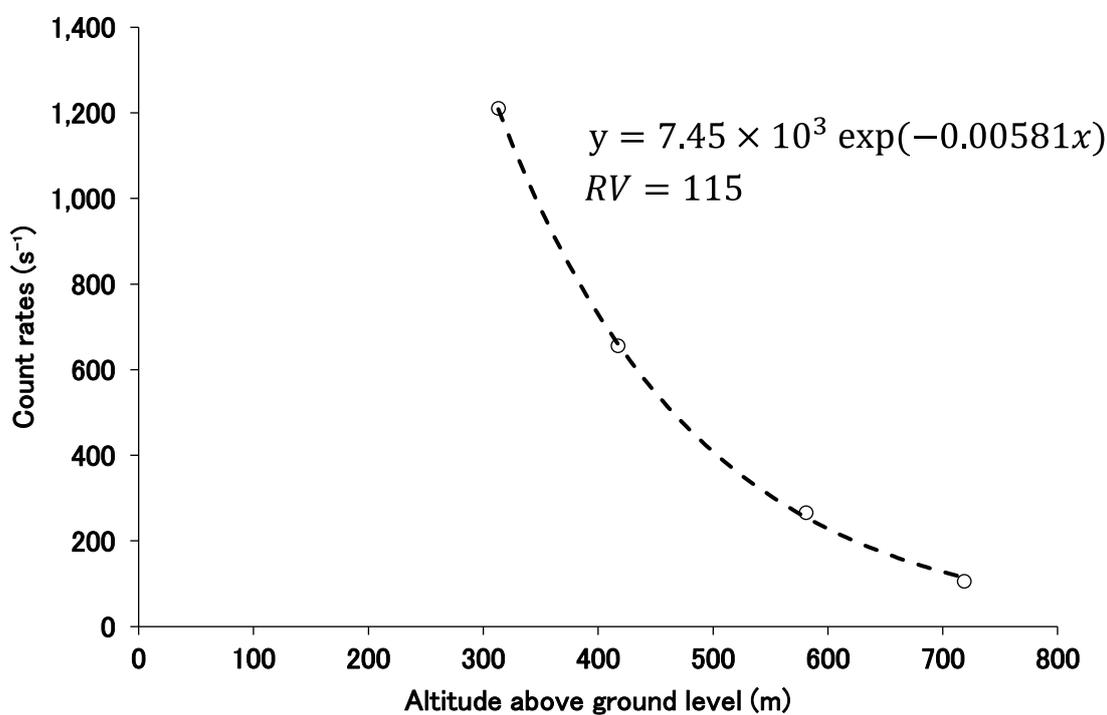


Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例<sup>19)</sup>

(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。)

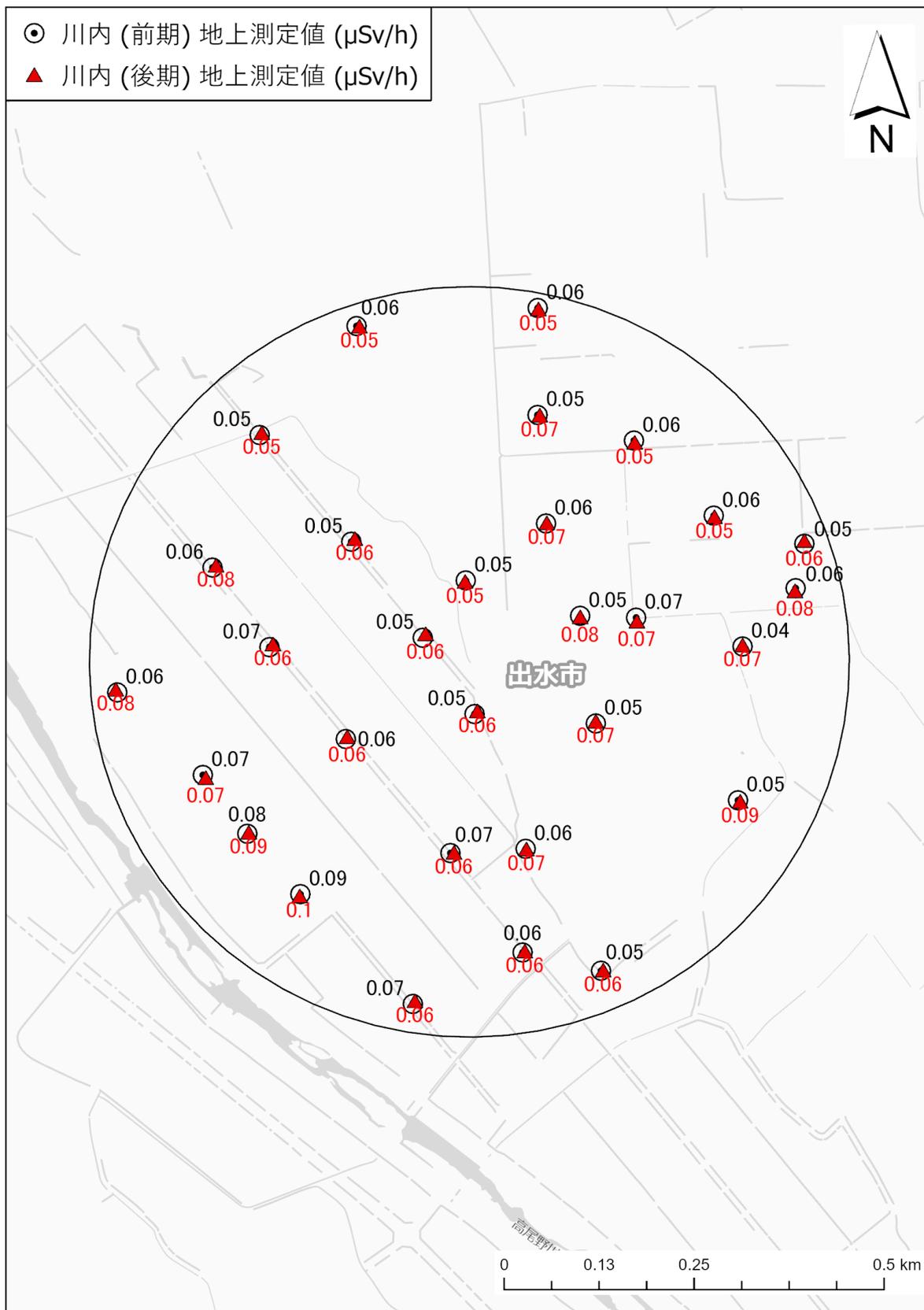


Fig. 4-2 川内 (前期) 及び川内 (後期) のテストポイントにおける地上測定値

Table 4-3 2023 年度に取得した AF データ一覧

モニタリング	ヘリコプター機種 (機体番号) (運航会社)	RSIシステム	実施年日	テストライン名	AF	
					$\mu(m^{-1})$	RV
川内 (前期)	Bell430 (JA02AX) (AAC)	RSI 3	2023/07/26	出水	-0.00759	0
			2023/07/27		-0.00438	51
2023/11/13	-0.00632		0			
2023/11/15	-0.00513		6			
川内 (後期)	Bell412 (JA6929) (AAC)					

※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 2023 年度に取得した CD データ一覧

モニタリング	ヘリコプター機種 (機体番号) (運航会社)	RSIシステム	実施年日	テストポイント名	地上測定値			テストポイントフライトデータ				CD ( $s^{-1}/[\mu Sv/h]$ )
					空間線量率 ( $\mu Sv/h$ )	標本標準偏差 ( $2\sigma$ )	相対標準偏差 (%)	計数率 ( $s^{-1}$ )	標本標準偏差 ( $2\sigma$ )	対地高度 (ft)	標本標準偏差 ( $2\sigma$ )	
川内 (前期)	Bell430 (JA02AX) (AAC)	RSI 3	2023/07/26	出水	0.06	0.02	40	1,286	131	1,152	32	18.100
			2023/07/27		0.06	0.02	36	1,617	148	917	71	14.900
2023/11/13	0.06		0.02		35	1,364	151	1,062	108	13.800		
2023/11/15	0.06		0.02		33	1,574	195	959	47	13.800		
川内 (後期)	Bell412 (JA6929) (AAC)											

※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	
		$AF$ ( $m^{-1}$ )	$CD$ ( $s^{-1}/[\mu Sv/h]$ )
川内 (前期)	Bell430 (JA02AX)	-0.00759	18,100
福島原子力発電所	Bell430 (JA02AX)	-0.00692	12,100
川内 (後期)	Bell412 (JA6929)	-0.00632	13,800
福島原子力発電所	Bell412 (JA6928及びJA412N)	-0.00720	11,000

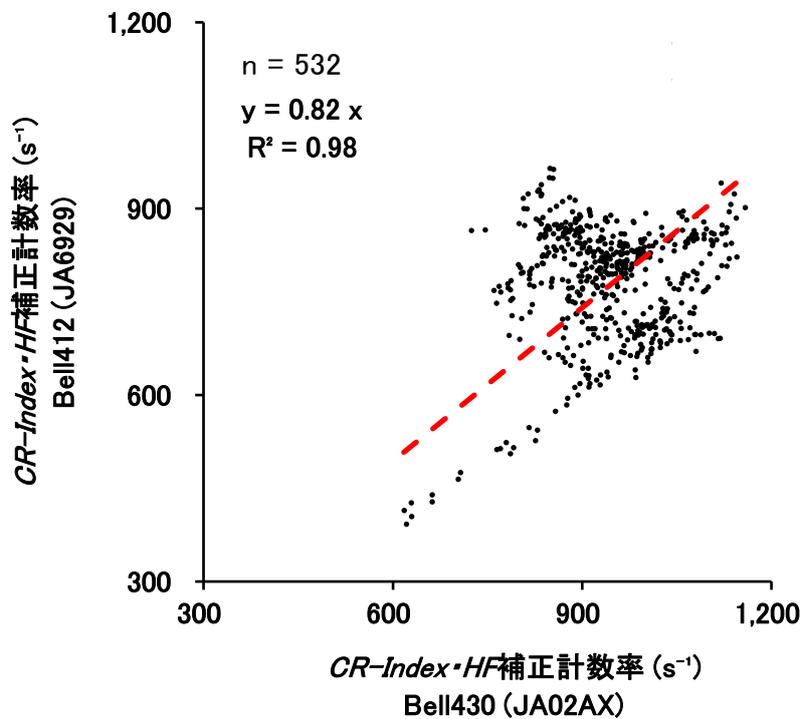


Fig. 4-3 オーバーラップフライトによるヘリコプター間の  $CR-Index \cdot HF$  補正計数率の比較

### 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の高さの空間線量率の分布状況を示した「空間線量率マップ」を示す。空間線量率マップの色合いについては、福島原子力発電所周辺において行っている航空機モニタリングで適用している設定<sup>20)</sup>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. 1-1 に示した日本地質学会のホームページに掲載されている、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<sup>25)</sup>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ある程度容易にするために、本比較における航空機モニタリングによる空間線量率マップの色合いは、コンターインターバルを0.02  $\mu\text{Sv/h}$  とし、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<sup>42)</sup>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  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Sv}$  と換算できる」<sup>25)</sup>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  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  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程度であると思われる。結果の比較には以上の点を念頭に置く必要がある。

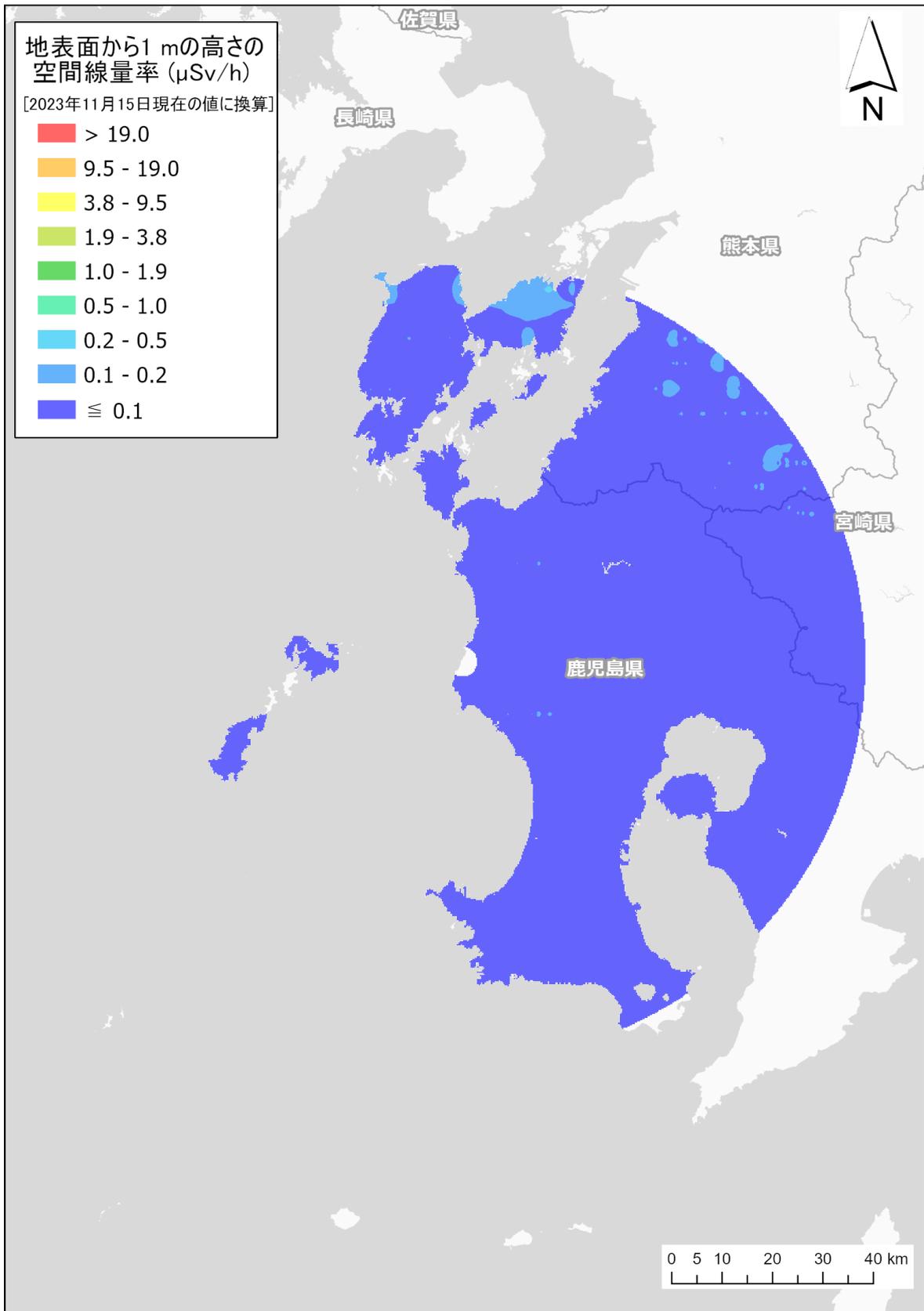
川内における空間線量率マップを Fig. 4-4 に示す。川内から半径3 km圏内は航空機モニタリングの対象範囲外であるためマッピングを行っていない。また、2015年度(平成27年度)当時から測線を間引いたことに伴い、測定データが取得できなかった一部の諸島や半島部はマッピングの対象外とした。なお、航空機モニタリング値の最大値は熊本県天草市の北東部で約0.24  $\mu\text{Sv/h}$ であった。次に、Fig. 4-5 に示した川内における航空機モニタリングによる空間線量率マップについて、測定エリアの北東部で航空機モニタリング値が比較的高くなる傾向は、2015年度(平成27年度)と2023年度(令和5年度)の両方で同様であった。一方、北西部において2023年度(令和5年度)では0.08  $\mu\text{Sv/h}$ ～0.10  $\mu\text{Sv/h}$ の領域が広がり、さらに0.16  $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域(熊本県天草市の北東部)が認められたのに対し、2015年度(平成27年度)ではその大部分で0.06  $\mu\text{Sv/h}$ 程度であったという点で相違が見られた。また、日本地質学会の自然放射線量マップ(Fig. 4-5(右))では、中央部で0.10  $\mu\text{Gy/h}$ 前後であり、2023年度(令和5年度)の航空機モニタリング値と概ね同等であった。一方、北東部については概ね0.05  $\mu\text{Gy/h}$ 前後であるのに対し、2023年度(令和5年度)の航空機モニタリング値は概ね0.10  $\mu\text{Sv/h}$ 前後であり、0.16  $\mu\text{Sv/h}$ を超える場所が局所的に認められた点で差異が認

められた。なお、日本地質学会の自然放射線量マップでは熊本県の天草諸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。

上述した通り熊本県天草市の北東部において、2023年度(令和5年度)と2015年度(平成27年度)の航空機モニタリング値に顕著な差異が認められた。本現象の原因を確かめるため、以下の2項目について調査を行った。

- (1) 熊本県天草市周辺の空間線量率が実際に上昇していないか
- (2) 航空機モニタリングで取得したGPS測位情報に不具合がないか

(1)については、熊本県天草市周辺において地上測定値を追加で取得し、航空機モニタリング値と比較することとした。本追加調査の詳細については4.3.1項に示す。(2)については、2.1節で触れた通り、RSIシステムに用いられているGPSの測位データが異常値を示した可能性があることから、調査項目に加えた。また、測位データが異常値を示さなかったとしても高さ方向の測位誤差が大きい場合は高度補正係数が妥当に算出されず、空間線量率の多寡に影響する<sup>8)</sup>。本調査の詳細については4.3.2項に示す。



**Fig. 4-4 川内における空間線量率マップ (RSI システム GPS データに基づく)**  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

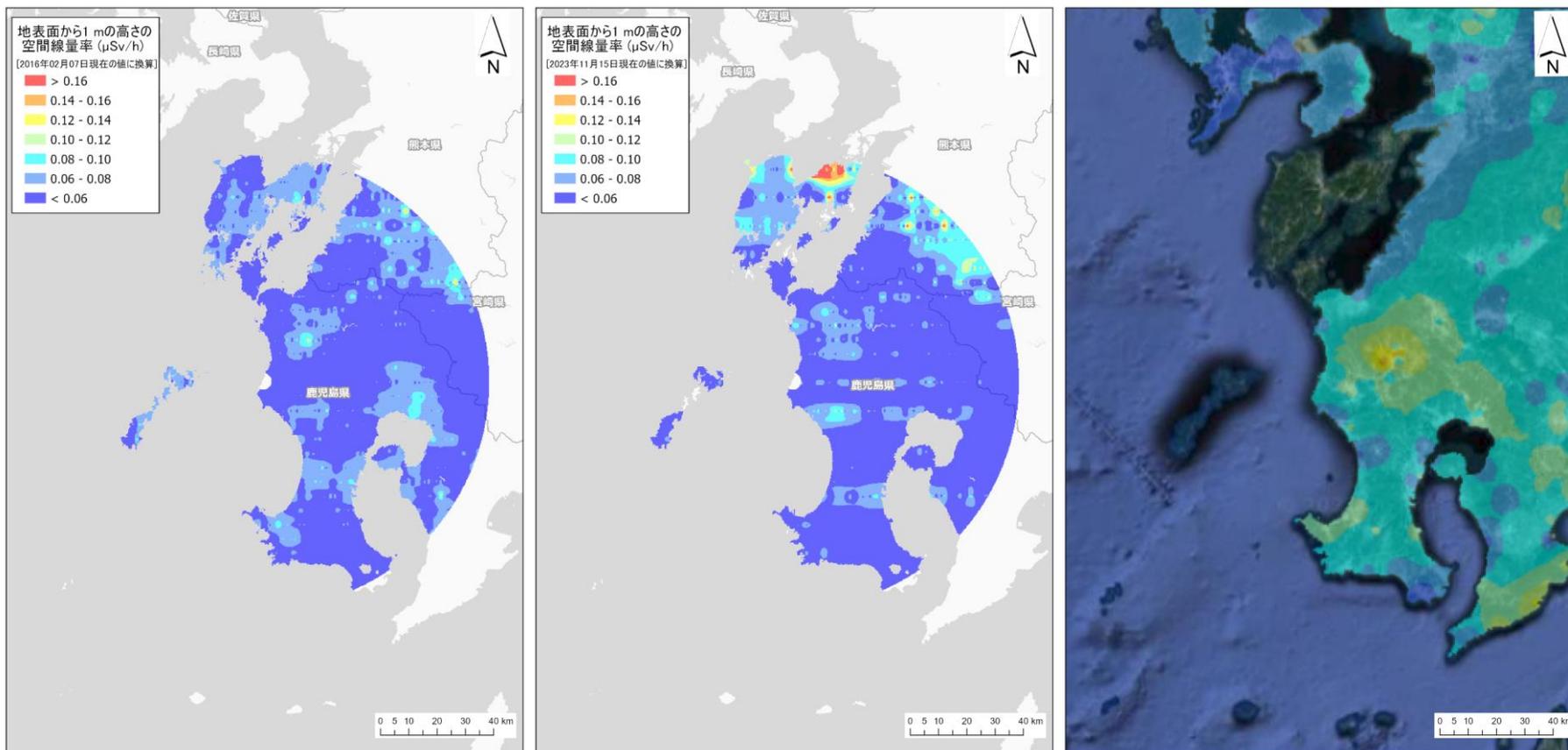


Fig. 4-5 川内における空間線量率マップの比較

(左：2015年度<sup>7)</sup>、中央：2023年度 (RSI システム GPS データに基づく)、右：日本地質学会による自然放射線量マップ<sup>25)</sup>)

(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)

#### 4.3.1. 地上測定による現地調査

熊本県天草市北東部において追加の地上測定を2024年(令和6年)1月15日及び16日に航空機モニタリング測線の概ね近傍11地点で行った。地上測定は3.1節に記載した方法と同様であるが、地上測定に用いたNaI(Tl)検出器はアロカ株式会社製TCS-171Bである。本地上測定の実施地点を測定結果とともに、Fig. 4-6に示す。天草市周辺の地上測定値は0.07  $\mu\text{Sv/h}$ ~0.09  $\mu\text{Sv/h}$ であり、Fig. 4-5(中央)に見られたような0.16  $\mu\text{Sv/h}$ を超える地点は確認できなかった。熊本県天草市周辺の空間線量率が実際に上昇したのではないことが確認された。

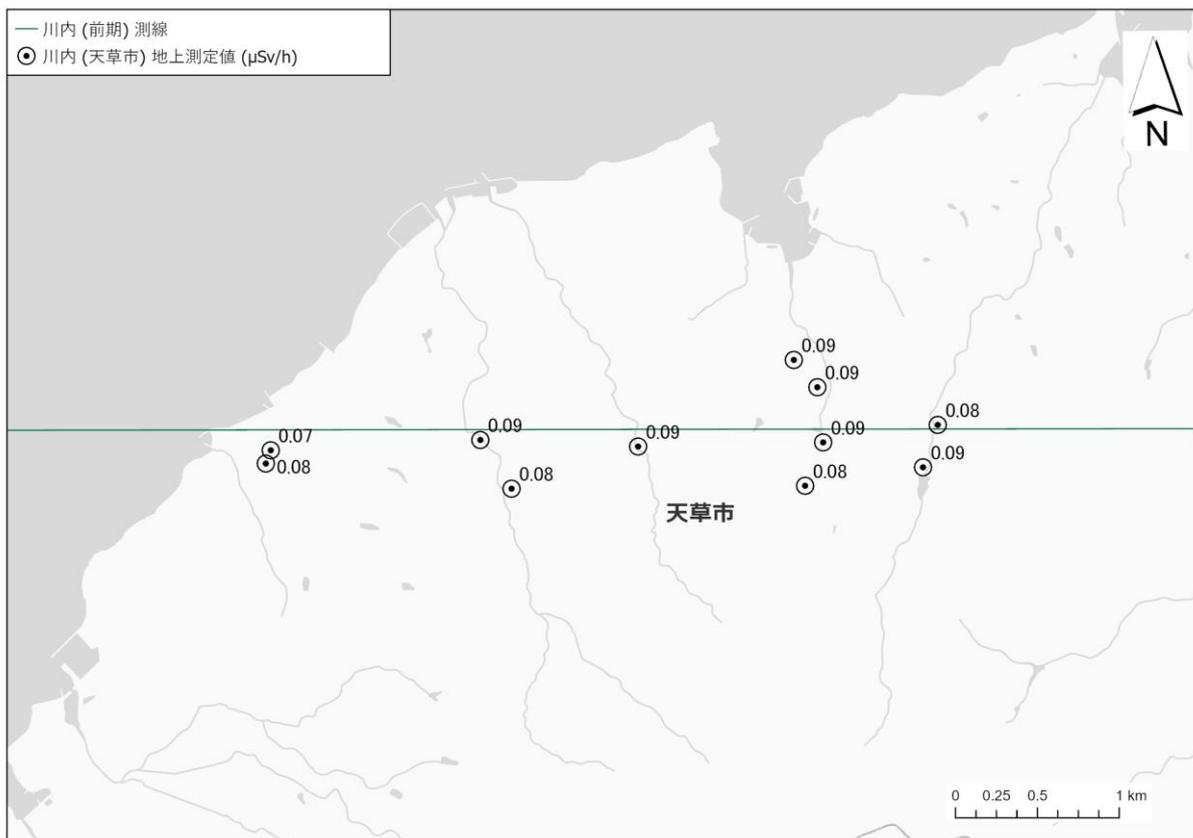


Fig. 4-6 熊本県天草市における地上測定値  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用)

#### 4.3.2. GPS 測位データの比較

熊本県天草市の北東部をフライトした2023年(令和5年)7月26日9時30分~9時50分のGPS測位データ(RSIシステムのGPS及び高精度GPSシステム)から海拔高度を算出した。これをDEMデータと比較し、地形に沿って海拔高度が変化しているかを確認した(Fig. 4-7)。RSIシステムのGPSと高精度GPSシステムの海拔高度に、100 m~150 mの差異が一部で認められた。両者ともにDEMデータの変化に概ね追従できているが、高精度GPSの方

が比較的良好に追従できているように思われる。詳細な原因は判然としないが、熊本県天草市の北東部をフライトした際に、RSI システムの高さ方向の測位誤差が大きくなった可能性があると考え、高精度 GPS システムによる測位データを用いて一連の換算のパラメータを再算出し、空間線量率マッピングを実施することとした。

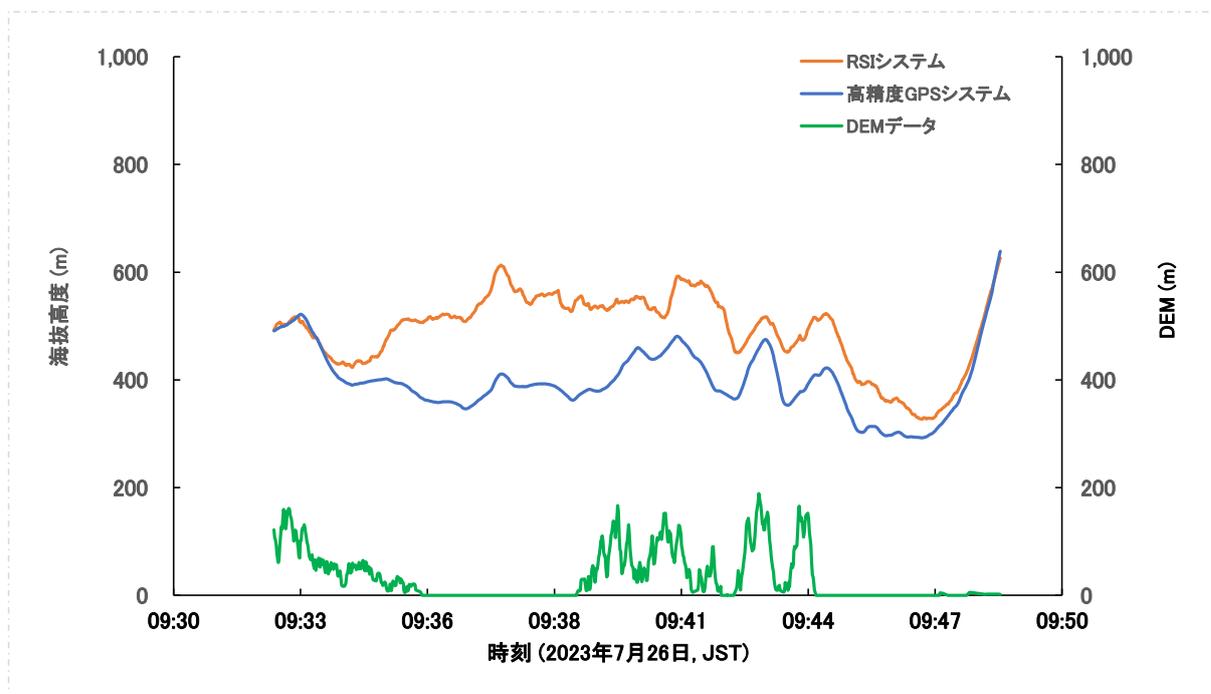


Fig. 4-7 RSI システムの GPS 及び高精度 GPS システムに基づく海拔高度と DEM データの比較

#### 4.3.3. 換算パラメータの再算出及び空間線量率マッピング結果

高精度 GPS システムによる測位データに基づき、*CR-Index*、*AF* 及び *CD* を再算出した。この時、オーバーラップフライトの結果を用いて、*CD* 設定値の妥当性検証も併せて行った。

*CR-Index* の再算出結果を Table 4-6 に示す。Table 3-2 に示した、RSI システムの GPS 測位データに基づいて算出した結果とほとんど同値であった。

*AF* の再算出結果を Table 4-7 に示す。Table 4-3 に示した、RSI システムの GPS 測位データに基づいて算出した結果と概ね同様であったが、2023 年 7 月 26 日に取得した *AF* に差異が見られた。再解析に使用する *AF* は、*RV* が最も小さいデータとして川内 (前期) では 7 月 26 日、川内 (後期) では 11 月 15 日に取得した数値を採用した。

*CD* の再算出結果を Table 4-8 に示す。Table 4-4 に示した、RSI システムの GPS 測位データに基づいて算出した結果と概ね同様であったが、2023 年 7 月 26 日に取得した *CD* に比較的大きな差異が見られた。再解析に使用する *CD* は  $\gamma$  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、川内 (前期) では 7 月 26 日、川内 (後期) では 11 月 13 日に取得した数値を採用した。各換算パラメータの再算出により、空間線量率マッピングに用いる

こととなった数値を Table 4-9 に示す。

ここで、空間線量率マッピングに用いる *CD* の妥当性の確認を行うために、4.2 節で示した方法と同様に、オーバーラップフライトの結果を比較した。なお、2023 年 (令和 5 年) 11 月 12 日のオーバーラップフライトにおいて、Fig. 3-9 で示した最も北側の測線を飛行した際、高精度 GPS システムの測位データがほとんど欠落していたため、*CR-Index*・*HF* 補正計数率の比較には、他の測線 3 本をフライトして得られたデータのみを用いることとした。そのため、比較点数が Fig. 4-3 では 532 点あったのに対し、380 点に減少した。オーバーラップフライトの比較結果を Fig. 4-8 に示す。本図における回帰直線の傾き (0.89) が Table 4-9 に示した *CD* の比と一致することが望ましい。つまり、Bell412 (JA6929) / Bell430 (JA02AX)  $\approx 0.91$  が理想値である。回帰直線の傾きと理想値との差異は 2 % であり、非常によく一致していたことから、*CD* の補正を施す必要性は無く、再解析に用いる数値として妥当であると判断された。

Table 4-9 の換算パラメータを用いて、空間線量率マッピングを行った結果を Fig. 4-9 に示す。測定エリア中央部及び北東部においては、再解析結果の方がやや空間線量率が高く算出される場所が散見されたが、Fig. 4-5 (中央) において 0.16  $\mu\text{Sv/h}$  を超えていた領域が概ね 0.08  $\mu\text{Sv/h}$  ~ 0.10  $\mu\text{Sv/h}$  に収まり、Fig. 4-6 で示した地上測定値とほとんど一致した。なお、再解析による航空機モニタリング値の最大値は熊本県球磨郡山江村の北部で約 0.16  $\mu\text{Sv/h}$  となった。

以上の結果から、高精度 GPS システムの測位データに基づく解析結果の方が、空間線量率を妥当に評価できていると結論した。よって、本項以降では、Fig. 4-9 に示した空間線量率マップを基に、地質情報との比較や測線近傍における地上測定値との比較を行う。

Table 4-6 高精度 GPS システム測位データに基づく *CR-Index* の再算出結果

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( $\text{s}^{-1}$ )	<i>CR-Index</i>
川内 (前期)	RSI 3	Bell430 (JA02AX)	朝日航洋 株式会社	232	3.43
川内 (後期)	RSI 3	Bell412 (JA6929)	朝日航洋 株式会社	324	3.79

Table 4-7 高精度 GPS システム測位データに基づく AF の再算出結果

モニタリング	ヘリコプター機種 機番 (運航会社)	RSIシステム	実施年月日	テストライン名	非線形最小二乗法による 指数関数回帰の結果	
					AF (m <sup>-1</sup> )	RV
川内 (前期)	Bell430 (JA02AX) (AAC)	RSI 3	2023/07/26	出水	-0.00568	4
			2023/07/27		-0.00439	50
川内 (後期)	Bell412 (JA6929) (AAC)		2023/11/13		-0.00599	10
			2023/11/15		-0.00593	0

※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 4-8 高精度 GPS システム測位データに基づく CD の再算出結果

モニタリング	ヘリコプター機種 (機体番号) (運航会社)	RSIシステム	実施年月日	テストポイント名	地上測定値			テストポイントフライトデータ				CD (s <sup>-1</sup> /[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 <sup>-1</sup> )	標本標準偏差 (2σ)	対地高度 (ft)	標本標準偏差 (2σ)	
川内 (前期)	Bell430 (JA02AX) (AAC)	RSI 3	2023/07/26	出水	0.06	0.02	40	1.286	131	1,051	72	13,800
			2023/07/27		0.06	0.02	36	1.617	148	917	71	15,700
川内 (後期)	Bell412 (JA6929) (AAC)		2023/11/13		0.06	0.02	37	1.364	151	1,020	109	12,500
			2023/11/15		0.06	0.02	34	1.574	195	928	114	13,300

※AAC: 朝日航洋株式会社

Table 4-9 再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		
		CR-Index	AF (m <sup>-1</sup> )	CD (s <sup>-1</sup> /[μSv/h])
川内 (前期)	Bell430 (JA02AX)	3.43	-0.00568	13,800
川内 (後期)	Bell412 (JA6929)	3.79	-0.00593	12,500

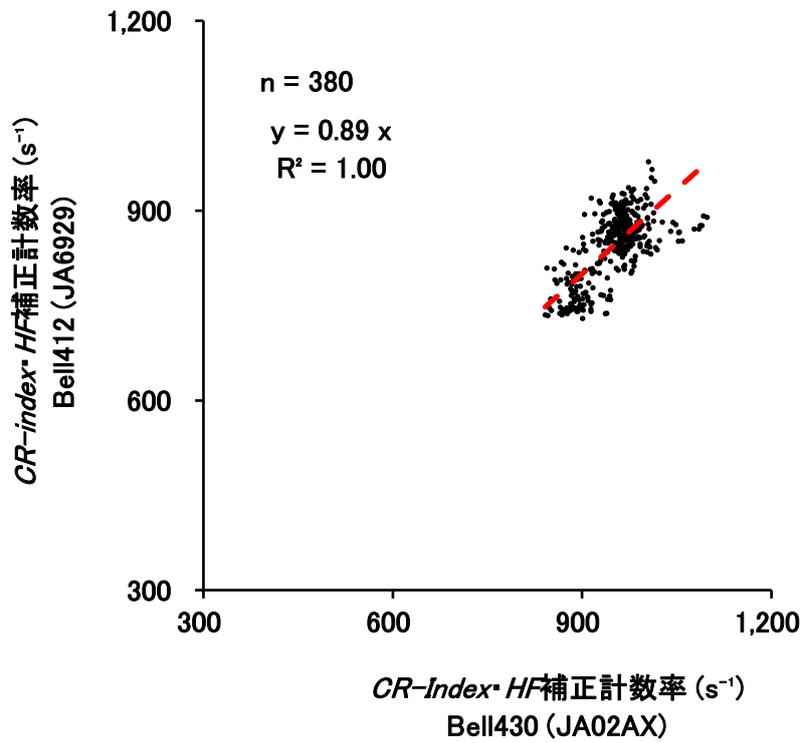


Fig. 4-8 高精度 GPS システム測位データに基づくオーバーラップフライトによるヘリコプター間の  $CR\text{-}Index \cdot HF$  補正計数率の比較

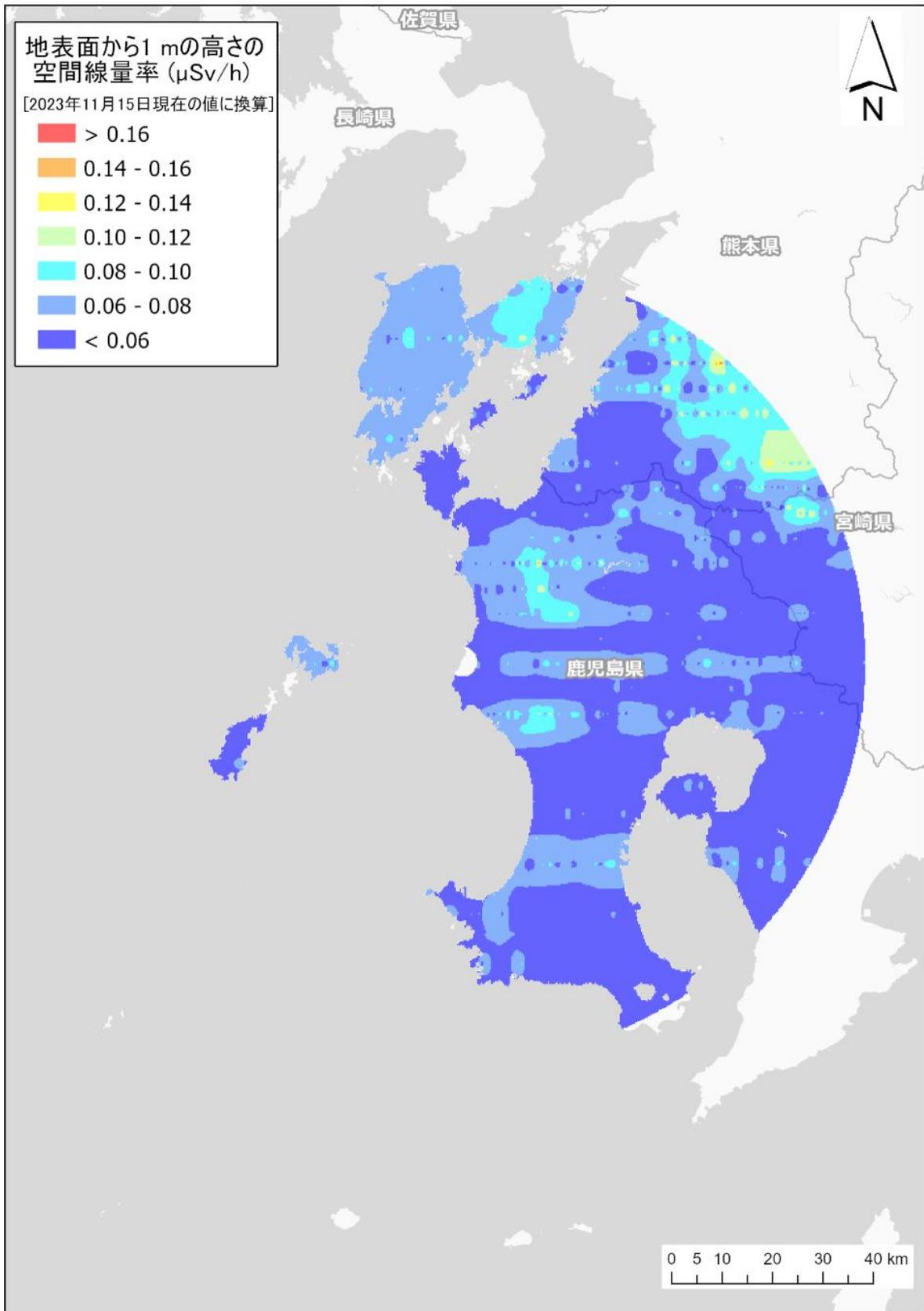


Fig. 4-9 高精度 GPS システム測位データに基づく川内における空間線量率マップ  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用)

#### 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、2023年度(令和5年度)の高精度GPSシステムの測位データに基づく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2015年度(平成27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<sup>39)</sup>を基に、空間線量率の多寡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、熊本県の北側から、①天草市の北東部、有明町上津浦、有明町赤崎、有明町楠甫の近辺、②天草市の北東部、岳倉町宮田の近辺、③八代市坂本町の球磨川流域及び油谷ダムの近辺、④球磨郡山江村の北西部、万江川の流域、⑤球磨郡球磨村の北西部、川内川の流域、⑥球磨郡錦町の中央部、及び⑦球磨郡錦町の中央部、高柱川の流域の7ヶ所である。なお、川内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地質調査レポートは現時点で非公開のものが多数あり、考察に十分な情報量がないのが現状である。

##### ① 天草市の北東部、有明町上津浦、有明町赤崎、有明町楠甫の近辺について

有明町上津浦、有明町赤崎、有明町楠甫の近辺で航空機モニタリング値が0.08  $\mu\text{Sv/h}$ ～0.10  $\mu\text{Sv/h}$ の領域が広がっており、0.10  $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域が局所的に認められた。日本シームレス地質図によると、本地域は海成層や泥岩が主体であるが、花崗閃緑岩とトーナラル岩から成る岩体及び閃緑岩と石英閃緑岩体から成る岩体が局所的に分布している。ヘリコプターが飛行した場所の近傍には航空機モニタリング値の上昇に寄与する岩石類は確認できない。また、ヘリコプターが飛行した場所から約2 km南方に花崗閃緑岩とトーナラル岩から成る比較的大きな岩体が認められるものの、これが本地域の航空機モニタリング値の上昇に顕著な影響を及ぼすとは考えにくい。2015年度(平成27年度)当時における同地域の航空機モニタリング値は0.06  $\mu\text{Sv/h}$ ～0.08  $\mu\text{Sv/h}$ であったが、2023年度(令和5年度)の航空機モニタリング値と顕著な差異ではない。

##### ② 天草市の北東部、岳倉町宮田の近辺について

岳倉町宮田の近辺で航空機モニタリング値が0.10  $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域があった。日本シームレス地質図によると、本地域は①と同様な地質分布であるが、閃緑岩や石英閃緑岩から成る岩体が特に広く分布している点で異なる。航空機モニタリング値が比較的高く算出された場所では、この岩体が有人ヘリの周囲を取り囲む状況であった。よって、地質的な要因に加えて地形的な要因が航空機モニタリング値の上昇に寄与したと推察される。

##### ③ 八代市坂本町の球磨川流域及び油谷ダムの近辺について

本地域では航空機モニタリング値が0.10  $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域が点在し、0.12  $\mu\text{Sv/h}$ を超える領域が局所的に認められた。日本シームレス地質図によると、本地域は粘土板、砂岩、チャート及び石灰岩から成る地層(通称:与奈久層)が主体であり、航空機モニタリング値の上昇に寄与する岩石類は確認できない。一方で、与奈久層には走向断層、小断層、小褶曲が多くみられる急峻な地形であることから、地形的な要因が航空機モニタリング値の上昇に寄与した可能性がある。2015年度(平成27年度)では同地域の航空機

モニタリング値概ね  $0.10 \mu\text{Sv/h}$  未満であったが、2023 年度 (令和 5 年度) の航空機モニタリング値と顕著な差異ではない。

④ 球磨郡山江村の北西部、万江川の流域について

航空機モニタリング値が  $0.10 \mu\text{Sv/h}$  を超える領域が比較的大きく広がっており、 $0.16 \mu\text{Sv/h}$  を超える領域が局所的に認められた。特に航空機モニタリング値が高く算出されたのは日本シームレス地質図によると、チャート、粘板岩、砂岩から成る地層が分布する範囲であり、この地層には航空機モニタリング値の上昇に寄与する岩石類の存在は確認できない。本領域の地形は急峻であり、地形に沿ってヘリコプターの対地高度を下げて山間に入り、周囲を地形物に囲まれた状況下で航空機モニタリング値が高く算出された。2015 年度もこれと同様の状況が生じており、同領域における航空機モニタリング値は  $0.14 \mu\text{Sv/h}$  程度であった。よって地質的な要因というよりは、地形的な要因が空間線量率の上昇に寄与したと推察される。

⑤ 球磨郡球磨村の北西部

本地域では航空機モニタリング値が  $0.10 \mu\text{Sv/h}$  を超える領域が点在した。日本シームレス地質図によると、本地域は海成層砂岩や海成層泥岩等の堆積岩が複雑に入り組んで分布しているが、空間線量率の上昇に寄与する岩石類の存在は確認できない。本領域の地形は急峻であり、地形に沿って有人ヘリの対地高度を下げて山間に入り、周囲を地形物に囲まれた状況下で空間線量率が高く算出されている。2015 年度 (平成 27 年度) もこれと同様の状況が生じており、同領域における航空機モニタリング値は  $0.14 \mu\text{Sv/h} \sim 0.16 \mu\text{Sv/h}$  程度であった。よって地質的な要因というよりは、地形的な要因が空間線量率の上昇に寄与したと推察される。

⑥ 球磨郡錦町の中央部

本地域では航空機モニタリング値が  $0.10 \mu\text{Sv/h}$  を超える領域が点在した。日本シームレス地質図によると、本地域は海成層砂岩や砂岩泥岩互層といった付加体が主に分布しているが、航空機モニタリング値の上昇に寄与する岩石類の存在は確認できない。本領域の地形は急峻であり、⑤と同様に周囲を地形物に囲まれた状況下で航空機モニタリング値が高く算出されていた。2015 年度 (平成 27 年度) もこれと同様の状況が生じており、同領域における航空機モニタリング値は  $0.10 \mu\text{Sv/h} \sim 0.12 \mu\text{Sv/h}$  程度であった。よって地質的な要因というよりは、地形的な要因が空間線量率の上昇に寄与したと推察される。

⑦ 球磨郡錦町の中央部

航空機モニタリング値が  $0.10 \mu\text{Sv/h} \sim 0.12 \mu\text{Sv/h}$  の領域が広範囲に認められた。本領域は段丘堆積物が主体である堆積岩の分布地帯と砂岩泥岩互層及び海成層泥岩が主体である付加体の分布地帯との境界付近である。いずれの岩石体にも航空機モニタリング値の上昇に寄与する岩石類の存在は確認できず、また、地形は急峻でなく比較的平坦である。2015 年度 (平成 27 年度) 当時の航空機モニタリング値は  $0.06 \mu\text{Sv/h}$  程度であり、2023 年度 (令和 5 年度) の空間線量率が 2 倍程度高く算出された理由は不明確である。

以上のように、地質の分布情報の関連付けが難しい場所が多く、空間線量率が比較的高く算出された場所のほとんどで、地形的な要因が関与していることが推察された。

#### 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の妥当性を検証するため、Fig. 3-1 に示した 30 地点 (川内 (前期) : 15 点、川内 (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. 4-10 に示す。

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) と地上測定値との比較を Fig. 4-11 に示す。これらの図には参考として、2015 年度 (平成 27 年度) の川内の比較結果も掲載した。それぞれ散布図及び相対誤差のヒストグラムで比較した。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、2023 年度 (令和 5 年度) では約 97 % (全 30 点中 29 点)、2015 年度 (平成 27 年度) では 100 % (全 30 点中 30 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、2023 年度 (令和 5 年度) では -0.10 及び -0.15、2015 年度 (平成 27 年度) では -0.01 及び -0.03 であった。2023 年度の川内では、航空機モニタリング値は地上測定値よりも概ね 10 % ~ 15 % 程度、過小評価したことが窺える。2015 年度 (平成 27 年度) の川内については平均値と中央値ともに 0 に近かったことから、2023 年度 (令和 5 年度) の川内の航空機モニタリングと地上測定との整合性について、過去の結果と比べるとやや妥当性に劣るように思われる。

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知るために、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 ( $\mu\text{Sv/h}$ )

*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 ( $\mu\text{Sv/h}$ )

$D_{g,i}$ : *i* 番目の地上測定値 ( $\mu\text{Sv/h}$ )

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. 4-12 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、2023 年度 (令和 5 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。

*RMSE* を過去の結果と比較すると、2023 年度 (令和 5 年度) では約 0.019  $\mu\text{Sv/h}$ 、2015 年度 (平成 27 年度) では約 0.015  $\mu\text{Sv/h}$  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、2023 年度 (令和 5 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* が大きい、その差は僅かであった。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、両モニタリング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。

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

- ①測定範囲の違い：対地高度 300 m からの測定値は、上空を頂点とし対地高度を高さとした円錐の底面部分 (半径約 300 m) に該当する地上の放射線量の平均値となる。一方、地表面から 1 m の高さにおける測定範囲は半径 30 m 程度の円の放射線量の平均値となる。よって、地上の放射線分布が一樣の場所では地上測定値と航空機モニタリング測定値は整合しやすいが、地上の空間線量率の分布が均一でない場所では、測定結果が整合しにくいと考えられる。
- ②周辺からの影響：地上の測定場所の近傍に大きな建物や森林等がある場合には、建物や樹木に沈着している放射性核種が地上測定値に影響する可能性がある。また、上空で測定する場合においては、建物や森林等が地表面からの放射線を遮へいするため、単純に比較できない場所がある。本報告において、比較用に取得した地上測定値は比較的地形が平坦な場所が多く、条件がよい場所を選定しているが、上記した影響を免れない場所が一部含まれている。

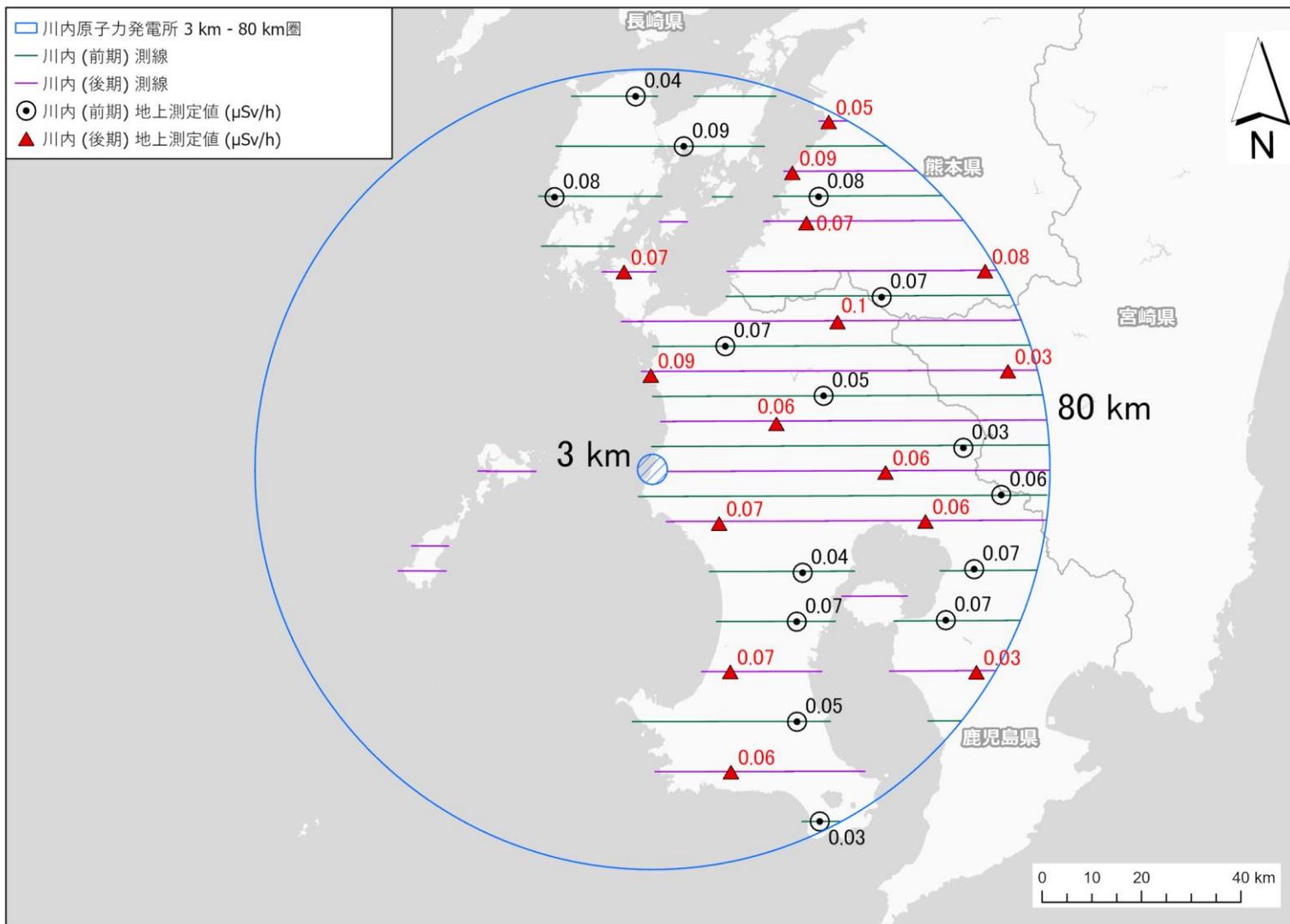


Fig. 4-10 川内 (前期) 及び川内 (後期) の測線近傍における地上測定値  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

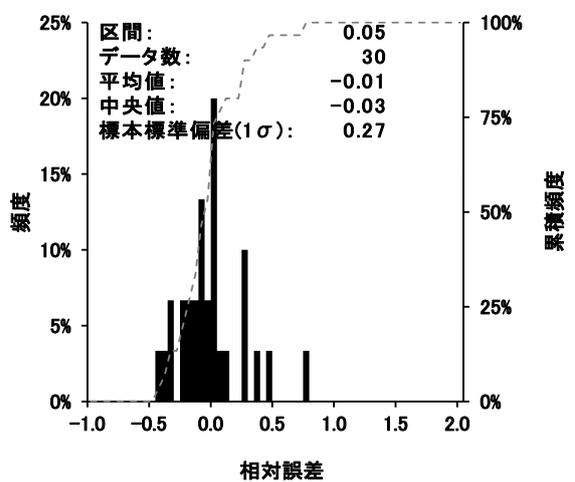
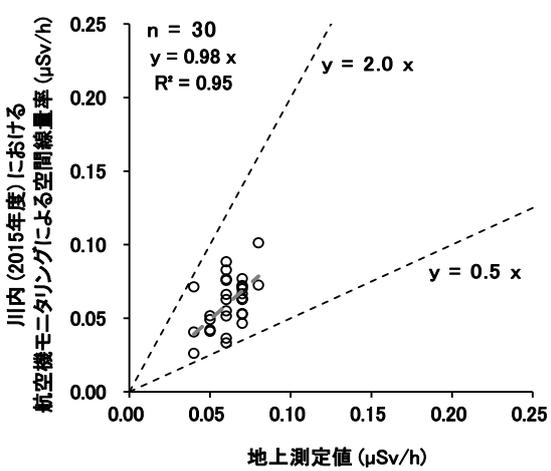
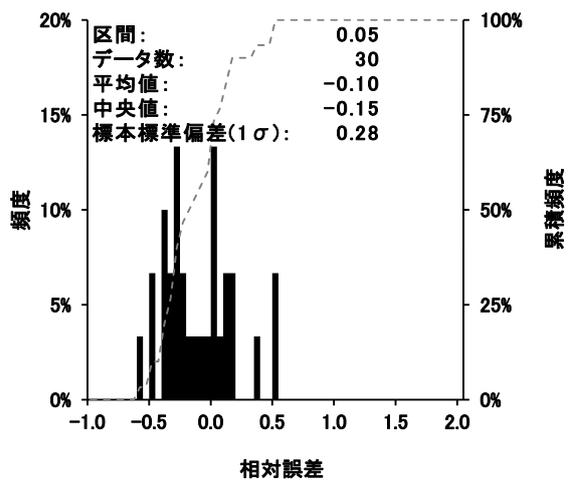
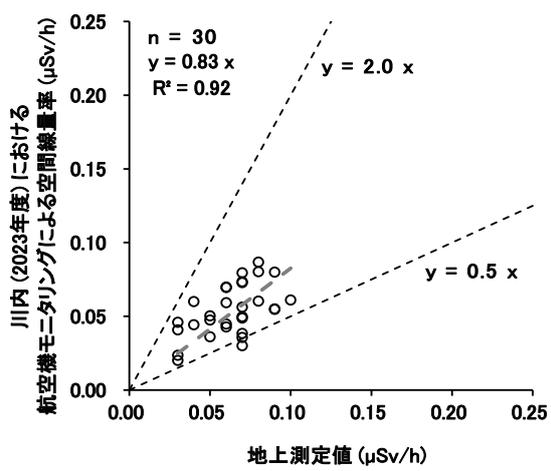


Fig. 4-11 川内における航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較  
 (上: 2023年度、下: 2015年度<sup>7)</sup>)  
 (左: 散布図、右: 相対誤差の頻度分布)

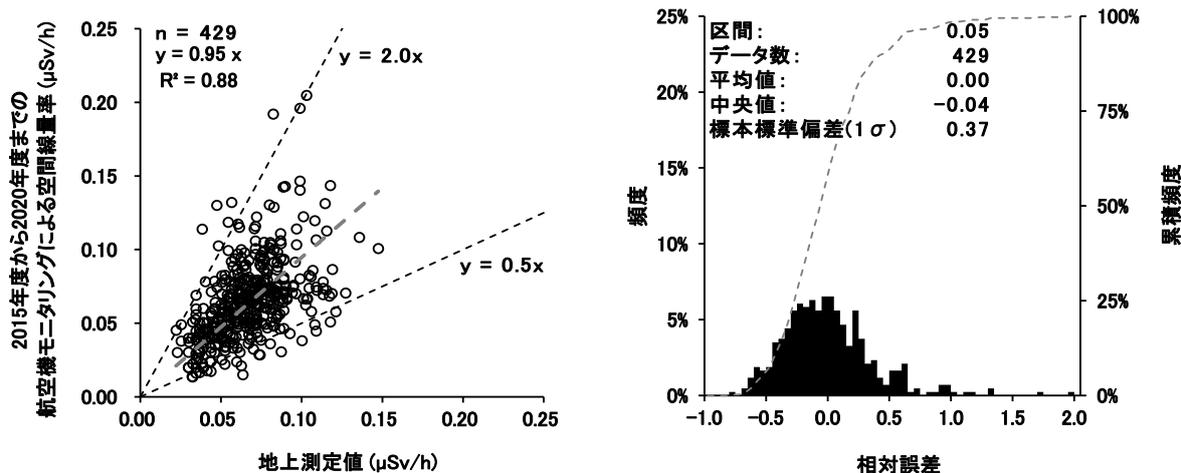


Fig. 4-12 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較  
(2015年度から2020年度までの全データ 7),9),11),13),15),17))  
(左: 散布図、右: 相対誤差の頻度分布)

#### 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  $CC$  と  $AF$  の数値を Table 4-10 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<sup>40)</sup>。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<sup>41)</sup>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.<sup>42)</sup>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、山間部等のデータは少ないため、比較にあたっては注意が必要である。また、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も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. 4-13~Fig. 4-15 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 1,770 Bq/kg (鹿児島県出水市の南西部)、約 200 Bq/kg (鹿児島県いちき串木野市の北東部、薩摩川内市との境界付近) 及び約 120 Bq/kg (熊本県人吉市の南西部) 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 730 Bq/kg、約 60 Bq/kg 及び約 50 Bq/kg であり、上記した各元素の平均濃度レベルと概ね整合した。

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. 4-16~Fig. 4-18 に示す。なお、海と陸の

地球化学図において熊本県の天草諸島に色付けされていない理由は前節に記した理由と同一であると推察される。測定エリアの北東部及び中央部付近で各元素ともに比較的高濃度であるという点で大きな分布傾向は一致していた。また、Fig. 4-9 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箇所との対比も良好に思われる。K-40、U 系列、Th 系列の濃度マップ (Fig. 4-16~Fig. 4-18) のいずれについても、航空機モニタリングによるマップと海と陸の地球化学図によるマップとで、測定エリアの北東部及び中央部付近で比較的高濃度であるという点で概ね同様な分布傾向であった。特に、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分布傾向はほとんど同一であった。しかしながら、U 系列濃度と Th 系列濃度の多寡の関係について、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、分布の傾向が互いに逆であった。U 系列濃度について、海と陸の地球化学図によるマップでは 1.90 ppm 未満の領域が川内エリアの大部分を占めている中に、1.9 ppm 及び 2.77 ppm を超える領域も散見される。このような海と陸の地球化学図の U 系列濃度の高い領域と航空機モニタリングによる U 系列濃度の高い領域は概ね重なった。しかしながら、例えば鹿児島県いちき串木野市、薩摩川内市及び薩摩郡さつま町の付近では、前者の U 系列濃度が 2 ppm~3 ppm 程度であるのに対し、後者の U 系列濃度は 90 Bq/kg を超えている。航空機モニタリングでは U 系列濃度をかなり過大に評価している可能性がある。Th 系列濃度について、海と陸の地球化学図によるマップでは、鹿児島県薩摩郡さつま町の西部で特に高濃度な領域が見られた。当該地点の付近で採取された河川堆積物試料における Th 系列濃度は約 24.5 ppm であり、川内エリアにおける他の河川堆積物試料の Th 系列濃度が 10 ppm 未満である中で際立って高濃度である。この Th 系列濃度が特に高い河川堆積物試料の採取地点の近傍で、航空機モニタリングデータを取得しているものの、航空機モニタリングによる Th 系列濃度は概ね 50 Bq/kg 程度であり、さほど高濃度ではない。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再現できるものと思われる。

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 系列濃度の多寡の関係について、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。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。信頼性のより高い現存の自然放射性核種の分布マップを構築するために、3.9 節に示した航空機モニタリングによる一連の解析手法の更なるブラッシュアップを目指したい。

Table 4-10 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
川内 (前期)	$CC$ ( $s^{-1}$ [Bq/kg])	0.020	0.120	0.080
	$AF$ ( $ft^{-1}$ )*	-0.0054	-0.0070	-0.0063
川内 (後期)	$CC$ ( $s^{-1}$ [Bq/kg])	0.020	0.130	0.070
	$AF$ ( $ft^{-1}$ )*	-0.0054	-0.0070	-0.0063

\*EGS5のシミュレーション結果より<sup>7)</sup>

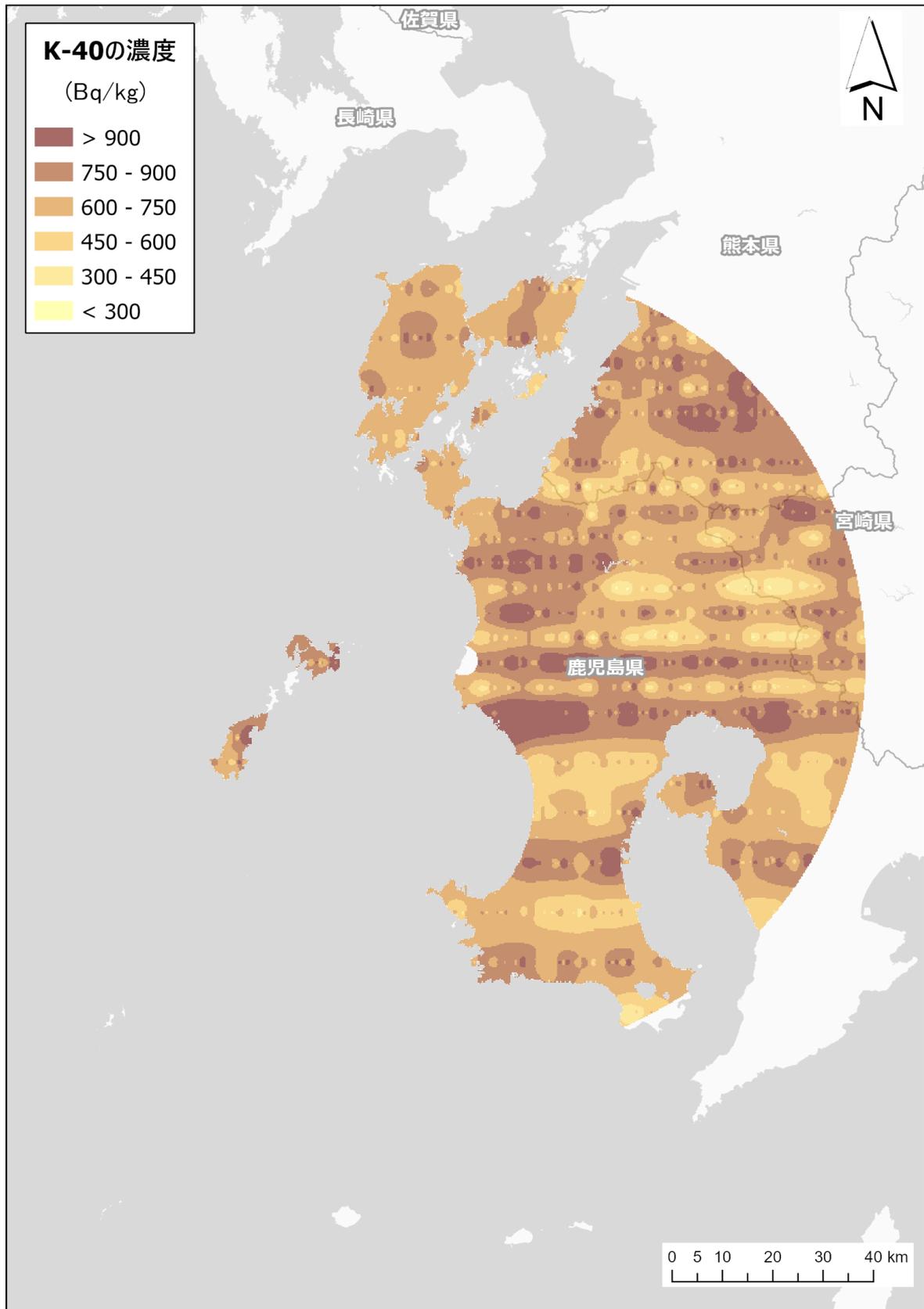
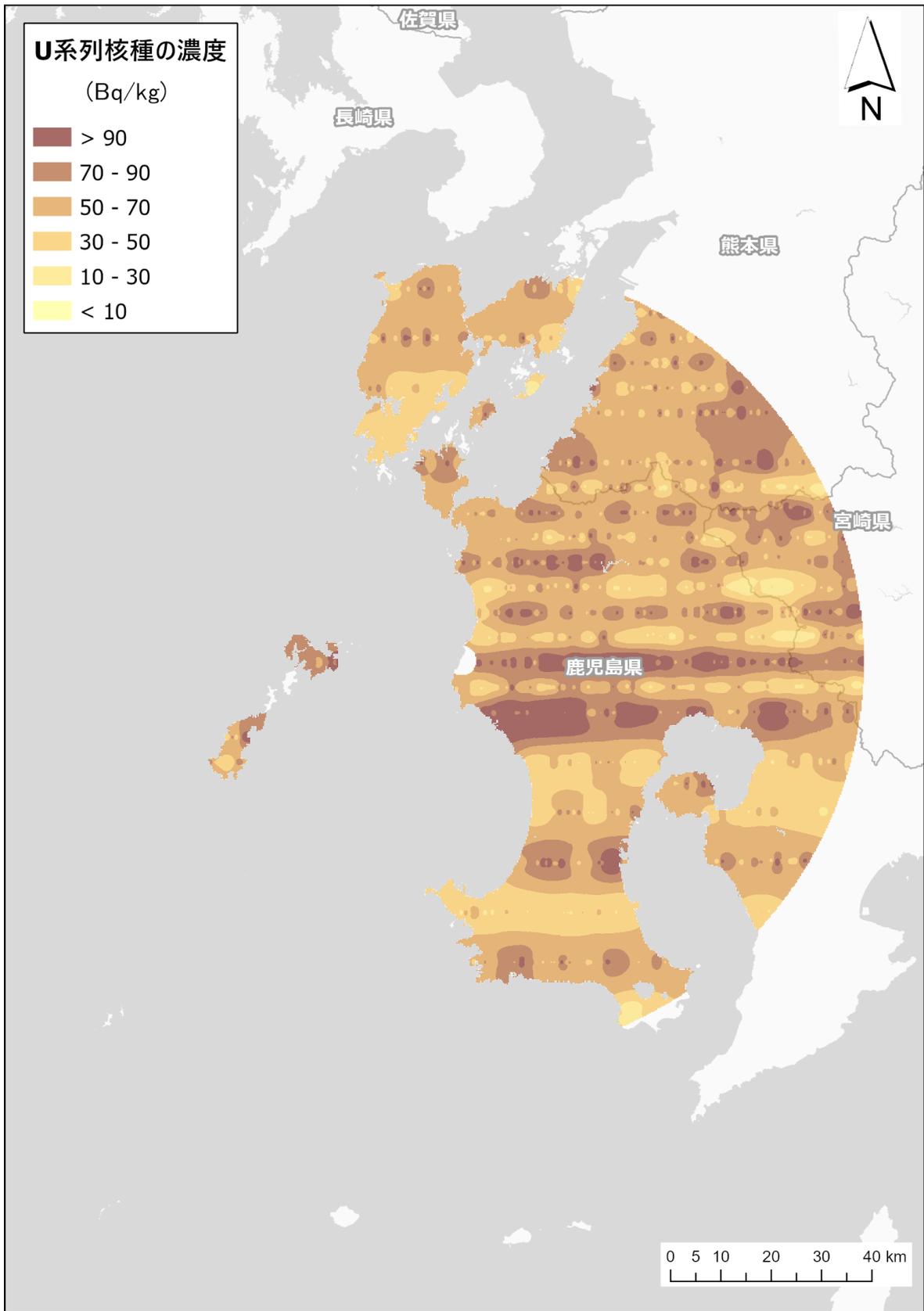
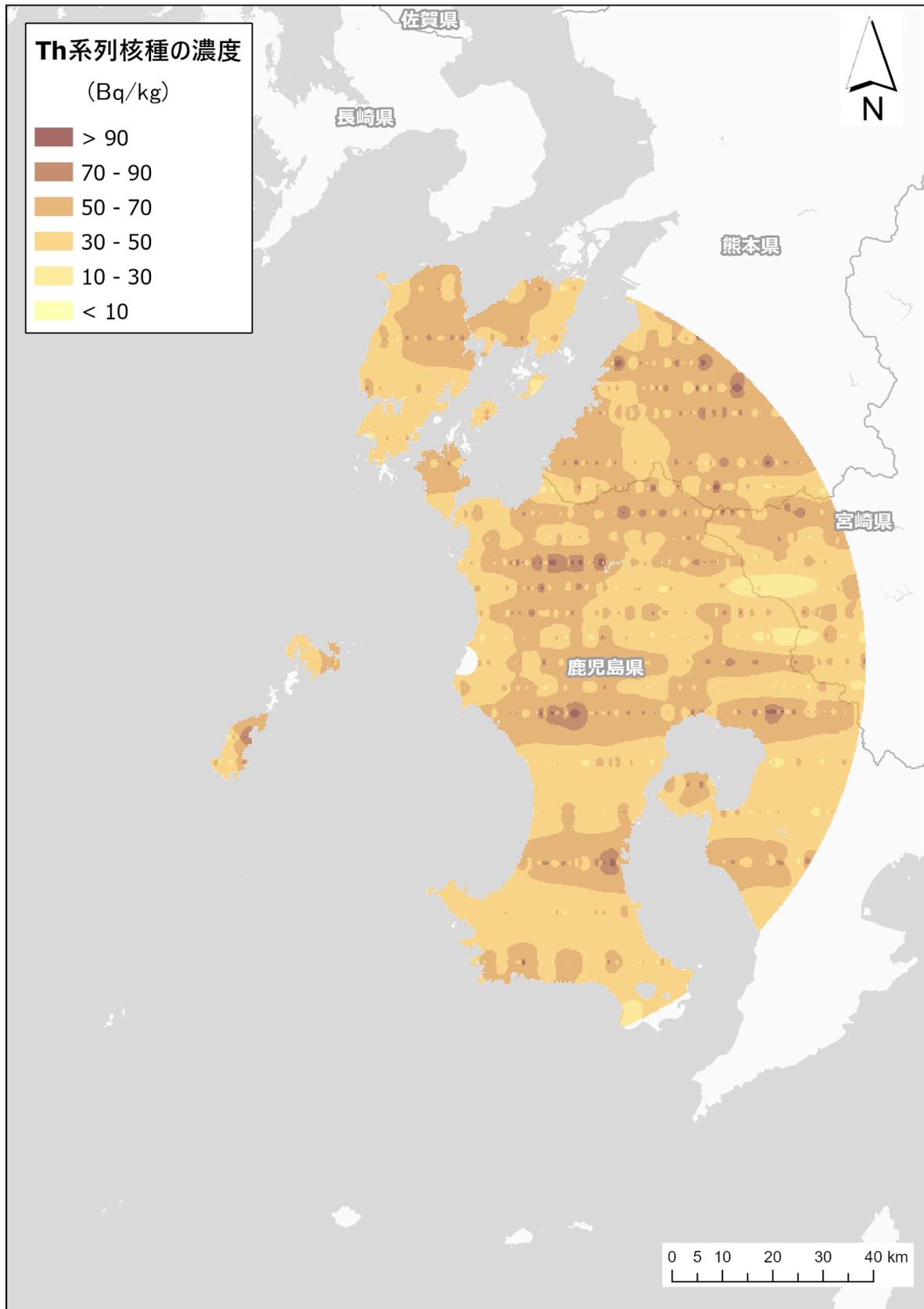


Fig. 4-13 川内の K-40 濃度マップ  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



**Fig. 4-14 川内の 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. 4-15 川内の 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。)

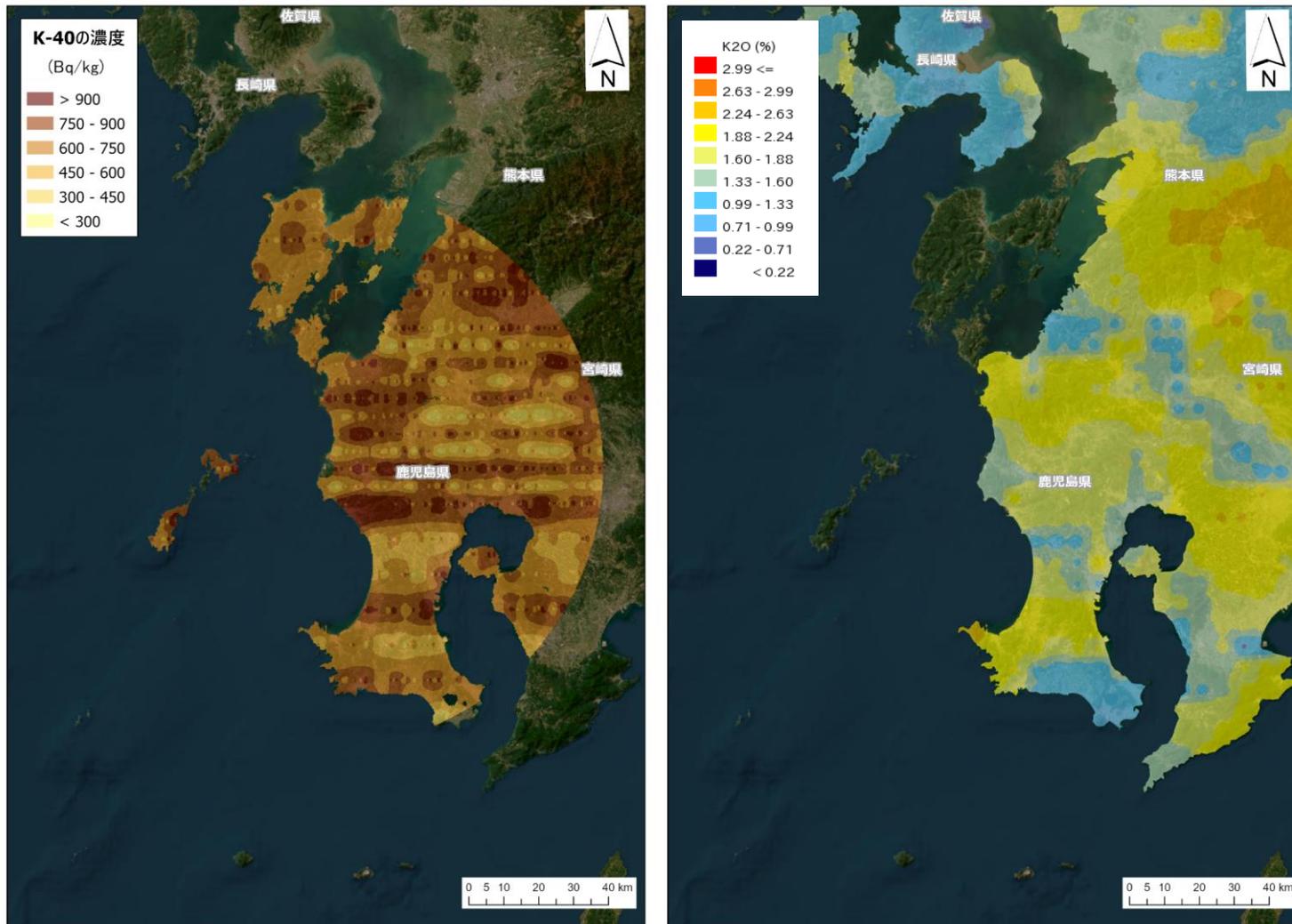


Fig. 4-16 川内の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (K-40)

(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。)

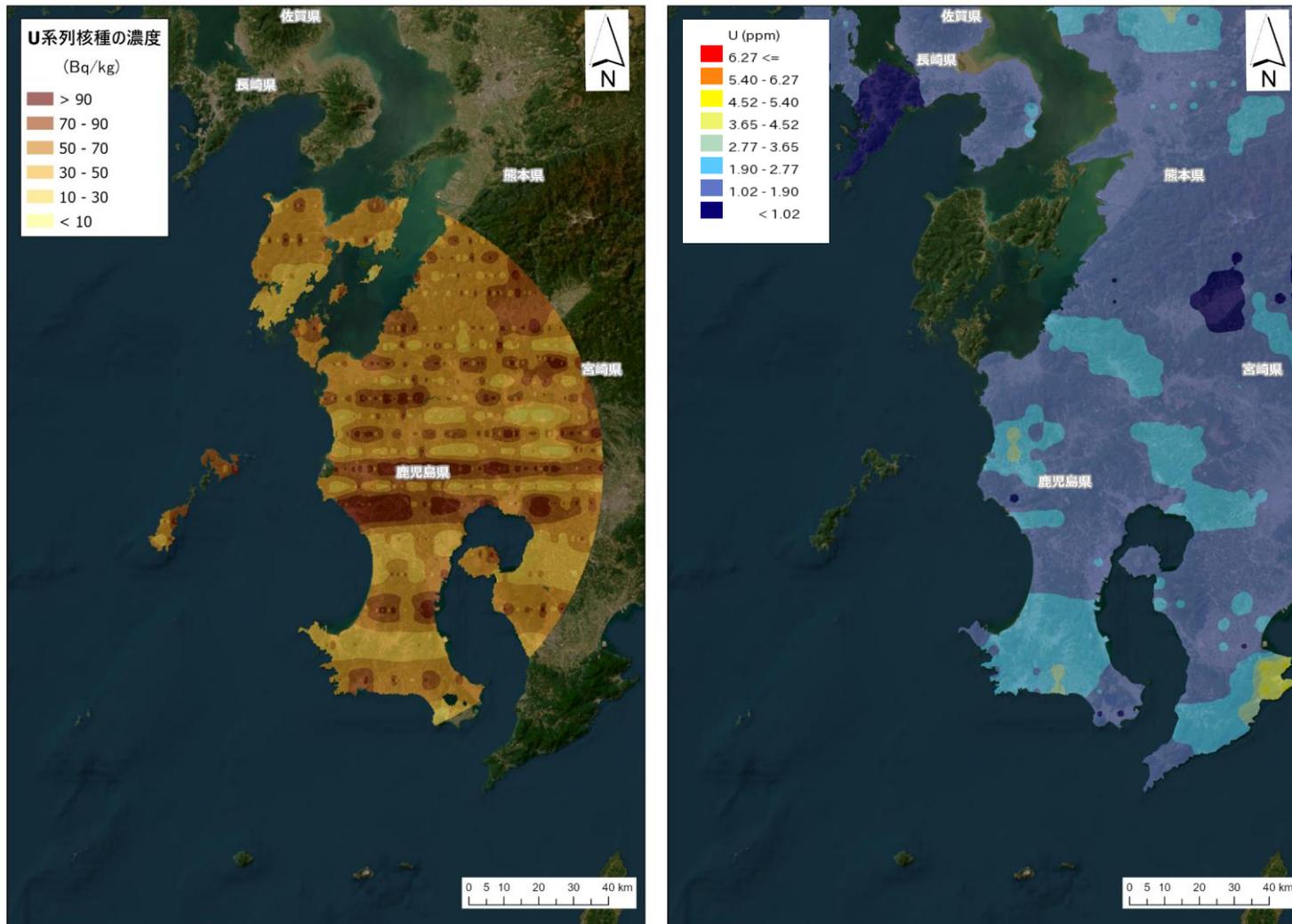


Fig. 4-17 川内の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (U 系列)

(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。)

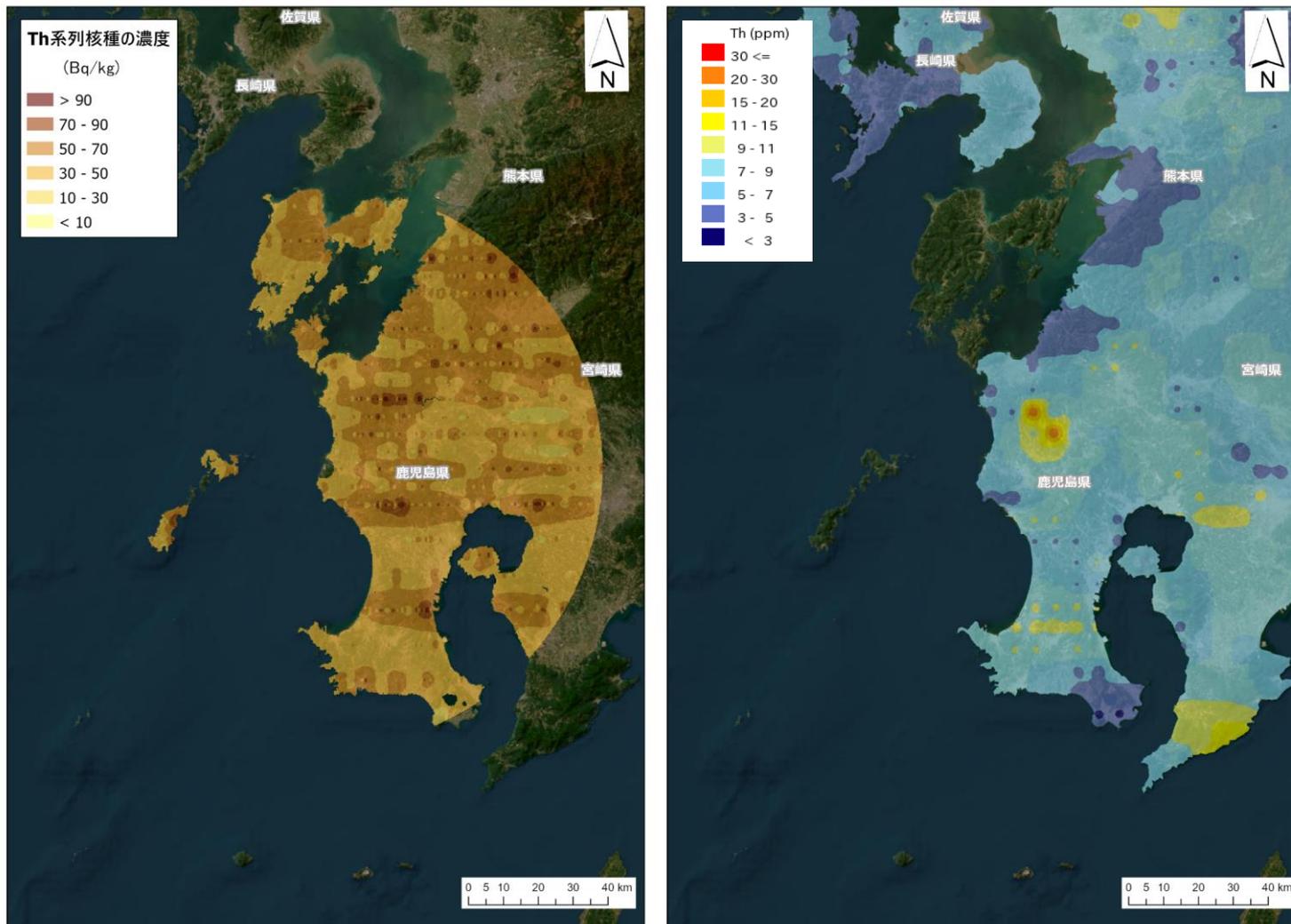


Fig. 4-18 川内の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (Th 系列)

(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  $\gamma$  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、川内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  $\gamma$  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 m  $\pm$  150 m (実際のフライト海拔高度が 150 m $\sim$ 450 m) で取得したデータを抽出対象とし、*GI* については陸上で取得したデータの内、対地高度が 300 m 前後 (実際のフライト対地高度が 290 m $\sim$ 320 m) のデータのみを抽出対象とした。抽出したデータに対して線形回帰 (ただし、切片が 0 であることを前提とする) を実施して得られた線形回帰式の傾き (回帰係数) を *RI* 及び *GI* とする。しかしながら、データ数が少ない或いはばらつきが比較的大きく外れ値が含まれるデータに対して最小二乗法による線形回帰を実施した場合、回帰係数に悪影響を及ぼすケースが過去に見られた<sup>17)</sup>。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<sup>21)</sup>。ここで、上記したいずれの手法も x 軸 ( $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  検出器の計数率) または y 軸 ( $\text{NaI}(\text{Tl})$  検出器の計数率) のいずれか一方にのみ有意な誤差が含まれるという仮定の下に線形回帰が行われる。この仮定が *RI* 及び *GI* の算出に悪影響を及ぼす可能性があると考え、本報告では x 軸及び y 軸の両方向の誤差を考慮に入れた回帰手法である直交距離回帰<sup>43)</sup>の導入を検討した。直交距離回帰は測定データ点と回帰直線の直交距離の二乗和を最小とする回帰アルゴリズムであり、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  検出器及び  $\text{NaI}(\text{Tl})$  検出器の計数率の両者に含まれる誤差を考慮した上で回帰係数が求めることが可能である。

*RI* 及び *GI* の算出に係る  $\text{NaI}(\text{Tl})$  検出器の計数率と  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  検出器の計数率の関係を Fig. 4-19 に示す。本図には最小二乗法及び直交距離回帰による線形回帰で得られた近似直線と回帰式を併記した。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ることから、ラドン子孫核種に起因する計数率のみが反映されていると考えられるが、ややばらつきが大きい。これは大気中ラドン子孫核種の分布の不均一さや抽出対象とするデータの海拔高度範囲が広いことに起因すると思われる。また、Fig. 4-19 の下段に示した *GI* の算出に用いたデータについては、上記したように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。

*GI* については最小二乗法と直交距離回帰とで回帰係数に差異はほとんど見られなかった。

一方で *RI* については差異が比較的大きく、直交距離回帰の方が回帰係数は大きくなる傾向にあった。本報告では、*RI* 及び *GI* は直交距離回帰による回帰係数をメインとして解析に使用することとし、最小二乗法による回帰係数を用いた場合の解析結果との比較は 4.7.2 項にて地上測定値を指標として行う。ラドン弁別手法に使用するパラメータを Table 4-11 にまとめた。本表には参考として、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングで使用しているパラメータを併記した。ヘリコプター機種が同一であっても、*RI* には比較的ばらつきが見られ、これには上述した要因が関与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、概ね同一の値に収まる傾向にある。

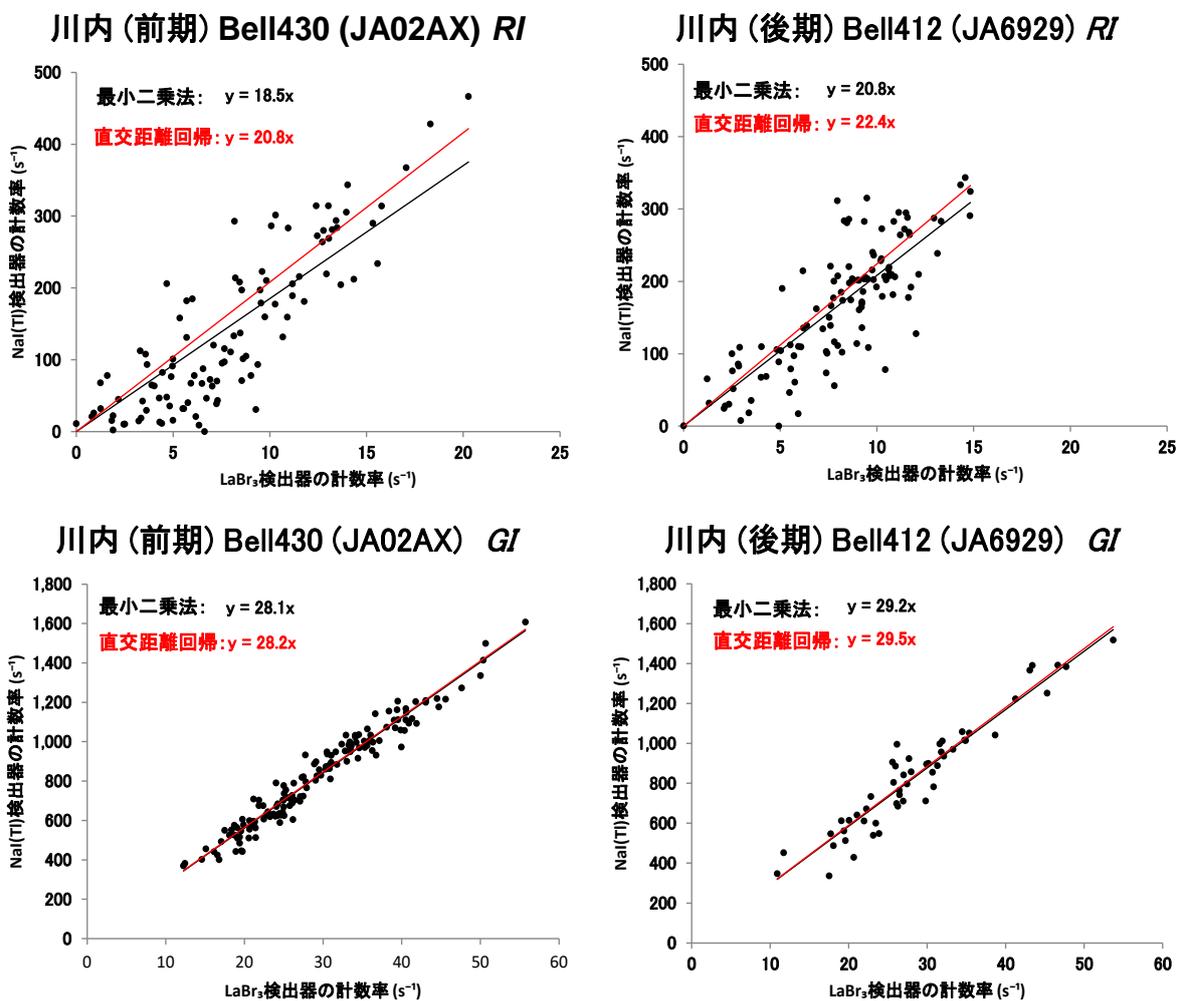


Fig. 4-19 海上及び陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr<sub>3</sub>(Ce)検出器の計数率の関係 (上段 : *RI*、下段 : *GI*)

Table 4-11 解析に用いた *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>
川内 (前期)	2023/07/25	2023/07/28	Bell430 (JA02AX)	20.8	28.2
川内 (後期)	2023/11/12	2023/11/15	Bell412 (JA6929)	22.4	29.5
東日本14次モニタリング	2023/09/28	2023/10/18	Bell430 (JA05TV)	20.4	28.9
	2023/09/20	2023/09/25	Bell430 (JA02AX)	16.3	27.7
	2023/09/25	2023/10/16	Bell412 (JA412N)	27.9	29.7

#### 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  $GI$  を川内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  $\gamma$  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、川内 (前期) の場合は 28.2、川内 (後期) の場合は 29.5 をそれぞれ  $GI$  の基準値とし、 $GI$  を 27.2 及び 28.5、26.2 及び 27.5 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。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. 4-9 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. 4-19 に示した最小二乗法に基づく  $RI$  及び  $GI$  を用いた場合についても解析を実施した。この時、上記したように最小二乗法における  $GI$  の基準値を定め、この基準値から 1 及び 2 減じた場合の空間線量率の換算値についても、地上測定値と比較した。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し評価対象外となる  $\gamma$  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 $\gamma$ 線計数率マップ

Fig. 4-20 及び Fig. 4-21 に空間線量率マップ及び空气中ラドン子孫核種由来の  $\gamma$  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. 4-9 と同一) も掲載した。ラドン弁別手法を適用すると、測定エリア北西部におい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。一方で測定エリア北東部において、航空機モニタリング値が  $0.10 \mu\text{Sv/h} \sim 0.12 \mu\text{Sv/h}$  の領域の面積が、標準的解析手法の場合よりも減少する領域も認められた。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、測定エリア北西部において航空機モニタリング値が  $0.10 \mu\text{Sv/h}$  を超える領域の面積が増加した。これは式 [6] において、 $GI$  を 1 及び 2 減じる程度の範囲においては、 $C_{\text{NaI,g}}$  が大きくなる傾向にあるためである。

空气中ラドン子孫核種の計数率マップはラドン弁別手法の過程で計算した、 $\text{NaI(Tl)}$  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  $\text{NaI(Tl)}$  検出器における全計数率から、式 [6] により算出した  $C_{\text{NaI,g}}$  を減算し、求めたものである。測定日時が場所により異なるため、空气中ラドン子孫核種由来の計数率は離散的である。また、空気ラドン子孫核種の起源としては中国大陸からの大気輸送と測定地近傍における地殻からの放出が考えられ、前者の影響は特に日本海側の冬季に大きくなる傾向にある<sup>44)-46)</sup>。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. 4-21 について、川内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  $100 \text{ s}^{-1}$  を

下回る程に小さかったが、中央部から北東部にかけて  $100 \text{ s}^{-1}$  以上の領域が広がり、この領域と航空機モニタリング値が比較的大きく算出された領域とが概ね一致した。しかしながら、北西部では航空機モニタリング値が比較的高い領域において、空气中ラドン子孫核種由来の計数率はさほど高くなかった。以上をまとめると、川内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内、中央部から北東部については、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  $\gamma$  線計数率が占める割合が比較的大きく、従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減少する傾向にあったと推察される。北西部については逆に、全計数率に対して空气中ラドン子孫核種由来の  $\gamma$  線計数率が占める割合はさほど小さくなく、本地域をフライトした際のヘリコプター周囲の地形的状況といった測定状況に関する要因が比較的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上記した各  $GI$  の数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. 4-22 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 97 % (全 30 点中 29 点) であったのに対し、ラドン弁別手法では川内 (前期) で  $GI = 28.2$  及び川内 (後期) で  $GI = 29.5$  のとき及び、川内 (前期) で  $GI = 27.2$  及び川内 (後期) で  $GI = 28.5$  のとき 97 % (全 30 点中 29 点)、川内 (前期) で  $GI = 26.2$  及び川内 (後期) で  $GI = 27.5$  のとき 93 % (全 30 点中 28 点) であり、ラドン弁別手法適用前後でほとんど差異は見られなかった。また、ラドン弁別手法を適用した結果同士で比較すると、 $GI$  を基準値よりも小さく設定しても、互いにほとんど差異は見られなかった。相対誤差については、標準的解析手法では平均値が  $-0.10$ 、中央値が  $-0.15$ 、1 標本標準偏差が  $0.28$  であったのに対し、ラドン弁別手法では  $GI$  を川内 (前期) で  $GI = 28.2$  及び川内 (後期) で  $GI = 29.5$  のとき及び、川内 (前期) で  $GI = 27.2$  及び川内 (後期) で  $GI = 28.5$  としたとき、平均値は  $0.10$  以下、中央値は  $0$  前後、1 標本標準偏差は  $0.42$  であった。 $GI$  を川内 (前期) で  $GI = 26.2$  及び川内 (後期) で  $GI = 27.5$  としたとき、平均値は  $0.12$ 、中央値は  $0.04$ 、1 標本標準偏差は  $0.42$  であり、ラドン弁別手法における他 2 つの結果よりもやや妥当性に劣るように思われる。ラドン弁別手法では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の向上が僅かにもたらされたように思われる。また、式 [8] に基づいて  $RMSE$  を計算したところ、標準的解析手法で  $0.019 \mu\text{Sv/h}$  であったのに対し、ラドン弁別手法では川内 (前期) で  $GI = 28.2$  及び川内 (後期) で  $GI = 29.5$  のとき  $0.021 \mu\text{Sv/h}$ 、川内 (前期) で  $GI = 27.2$  及び川内 (後期) で  $GI = 28.5$  のとき  $0.022 \mu\text{Sv/h}$ 、川内 (前期) で  $GI = 26.2$  及び川内 (後期) で  $GI = 27.5$  のとき  $0.021 \mu\text{Sv/h}$  であり、それぞれ値がやや前後しているものの、ほとんど同一であった。

### (3) $\gamma$ 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  $\gamma$  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 (Fig. 4-24)。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鹿児島県の長島から南西方向、または西方海岸から西方向に少し離れた東シナ海上で実施した。また、本図には比較のため、2023 年 (令和 5 年) 9 月 20 日～10 月 18 日にかけて実施した、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 14 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 14 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 (JA412N) については埼玉県本庄市の周辺、埼玉県深谷市の周辺、栃木県芳賀郡益子町の周辺、栃木県真岡市の周辺、Bell430 (JA05TV) については福島県須賀川市の周辺、宮城県登米市の周辺において実施された。Bell430 (JA02AX) の空気中核種フライトについては、全て海域で実施された。Fig. 4-24 を見ると、川内 (前期) 及び川内 (後期) で使用した Bell430 (JA02AX) 及び Bell412 (JA9616) については、全データを平均すると、ラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率の方が両者とも 1.3 倍程度高くなった。また、東日本第 14 次モニタリングにおいても、いずれのヘリコプター機体についても、標準的解析手法で用いたバックグラウンド計数率よりもラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率の方が高くなる傾向にあった。具体的には、Bell412 (JA412N) では約 1.8 倍、Bell430 (JA02AX) 及び Bell430 (JA02AX) では約 1.2 倍程度であった。このように、川内と東日本第 14 次モニタリングとで、ラドン弁別手法で求めた空気中核種計数率と標準的解析手法で用いたバックグラウンド計数率における多寡の関係がほとんど同様であった。以上のことより、ラドン弁別手法ではバックグラウンド減算がやや過剰であり、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. 4-20 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 0.08  $\mu\text{Sv/h}$ ～0.10  $\mu\text{Sv/h}$  の領域が増加しており、上述した推論とは一見矛盾する。当該エリアのほとんどは測線間隔が 10 km と広く、また測線距離が短く、測定データが少ない中で、内挿補間 (IDW) によって空間線量率が算出されている。当該エリアについては、標準的解析手法よりもバックグラウンド減算がやや過小で、従って空間線量率が高く算出され、それが内挿補間により広域に広がったものと推察される。

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  $\gamma$  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取得した計数率を、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思われる。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点に強みがある。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こととなる。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り、*RI* 及び *GI* の算出方法について、今後も知見を蓄積し更なる改良に向けた検討を行っていく必要があると考えられる。現状では、*RI* 及び *GI* の算出に用いている回帰方法に外れ値の影響を緩和した上で、回帰係数を求めるロバストなアルゴリズムを持たせていない。外れ値が生じた場合にはロバストな回帰アルゴリズムにより、外れ値の影響を緩和して算出される *RI* を用いると、*GI* を人為的に変化させる必要なく、ラドン弁別手法において空間線量率の換算結果がより良くなる見込みが得られた<sup>21)</sup>。今後は最小二乗法及び直交距離回帰にロバスト性を持たせ、*RI* の算出方法の更なる改良を検討したい。具体的には、実測値と回帰による予測値との誤差を全データで等分散とするのではなく、データが持つ重みを考慮して外れ値の影響を緩和できるような回帰アルゴリズムを組み込む予定である。

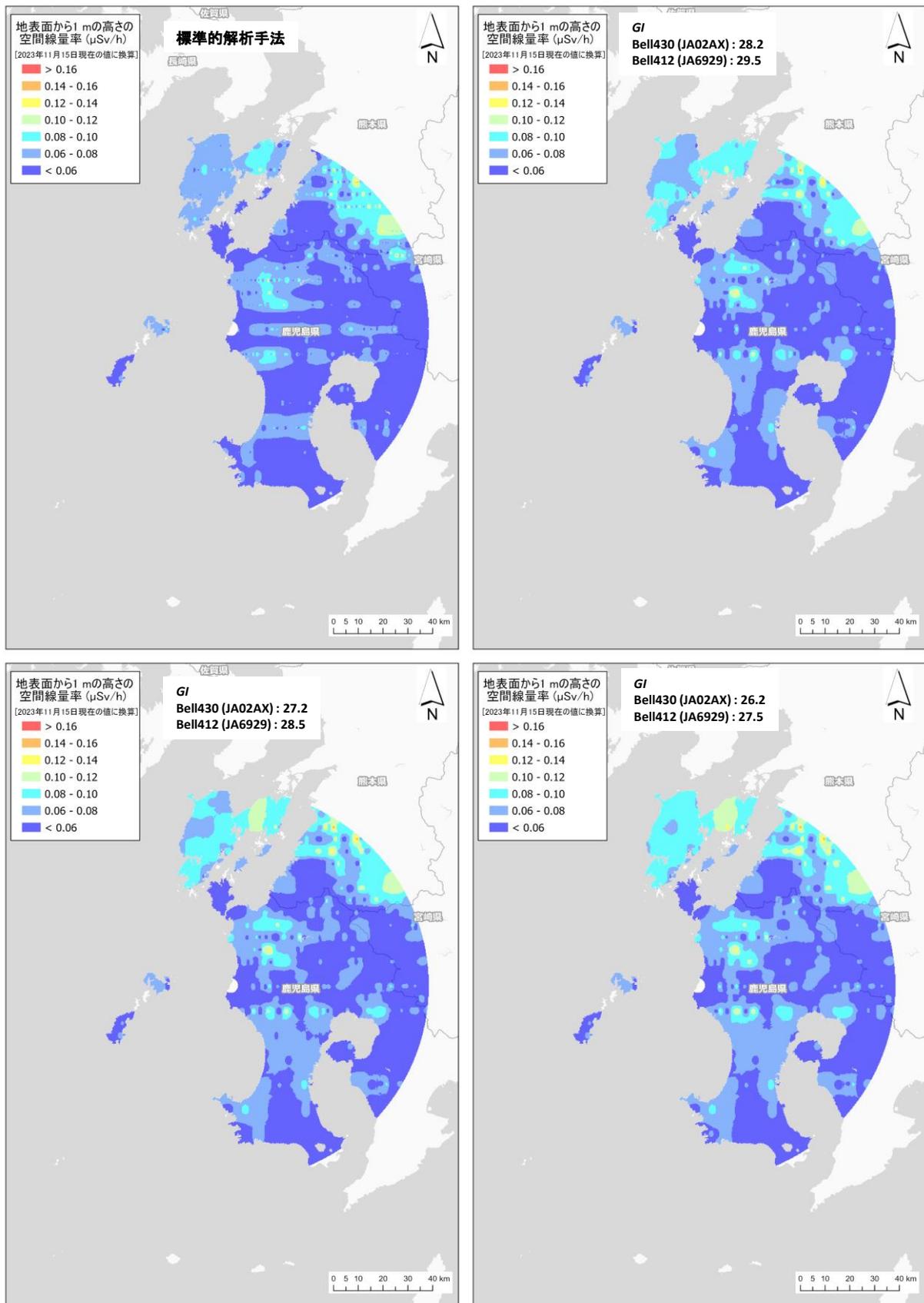


Fig. 4-20 川内におけるラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

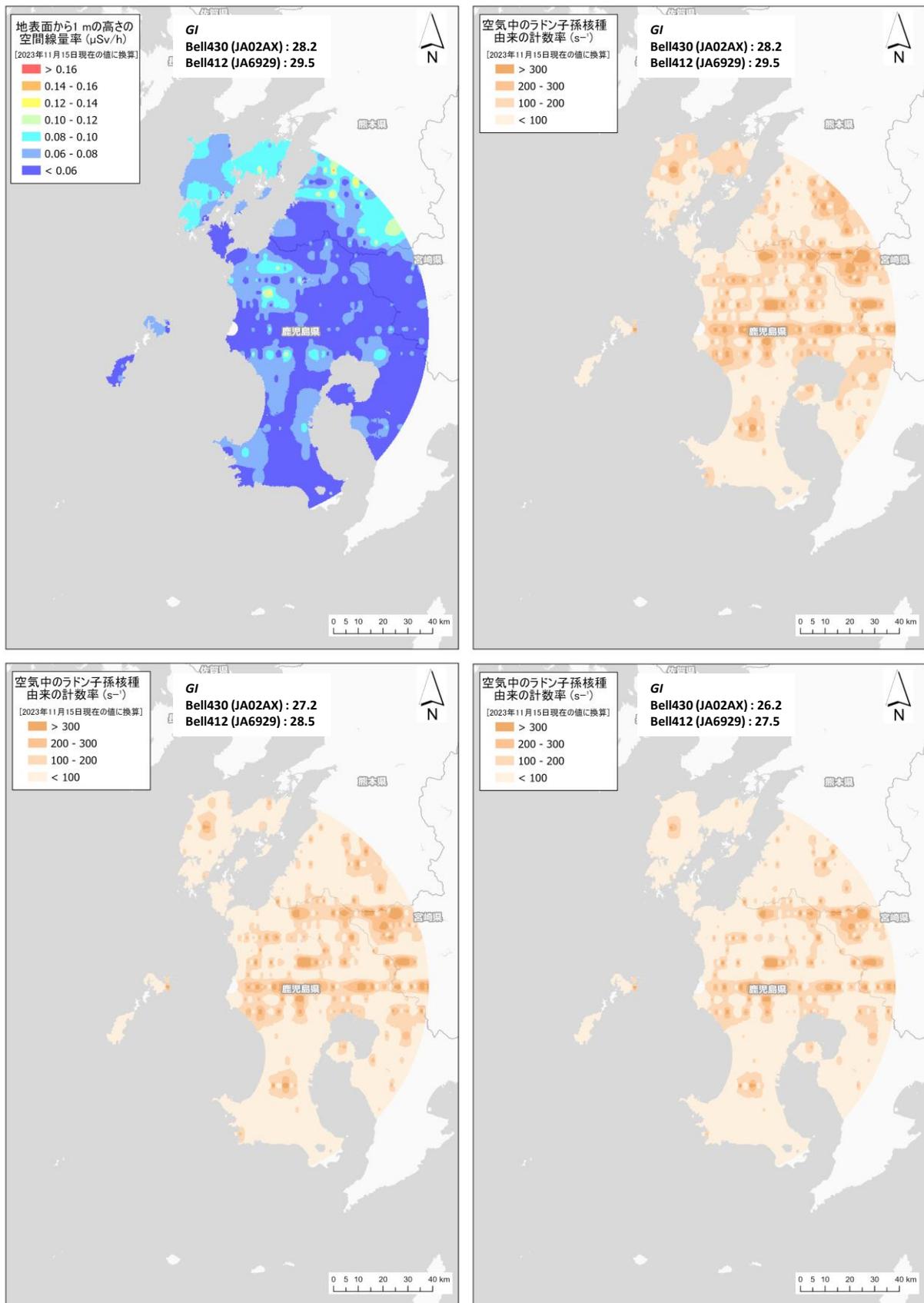


Fig. 4-21 川内における空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

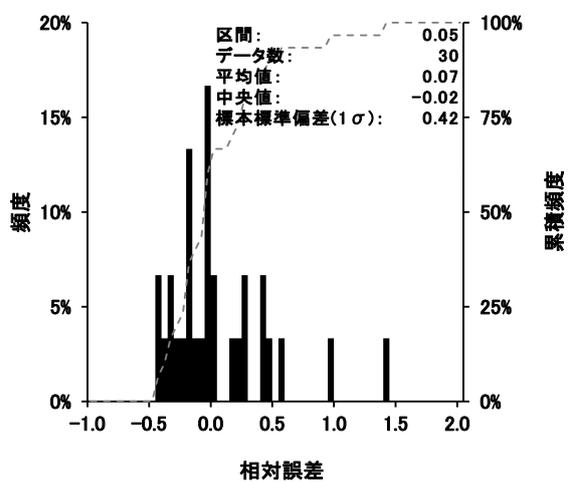
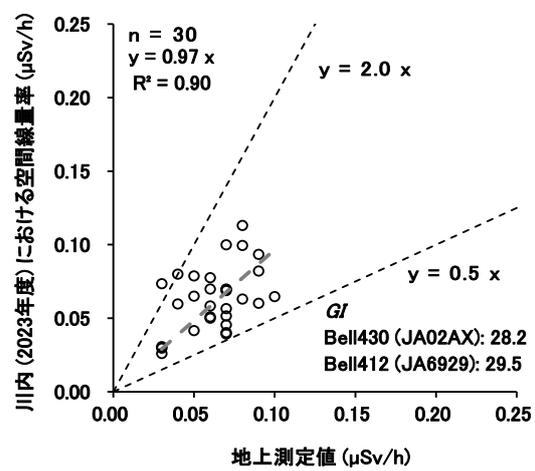
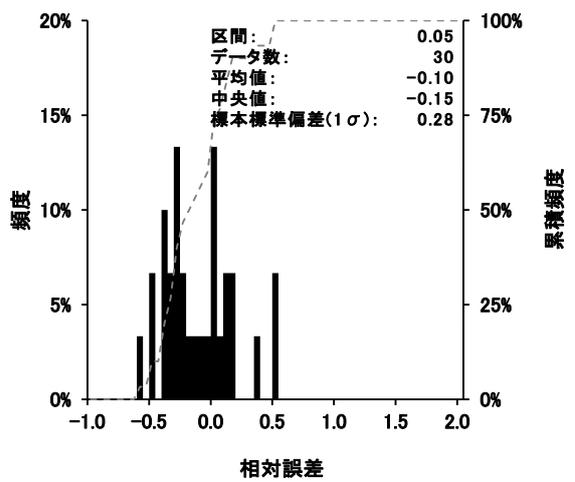
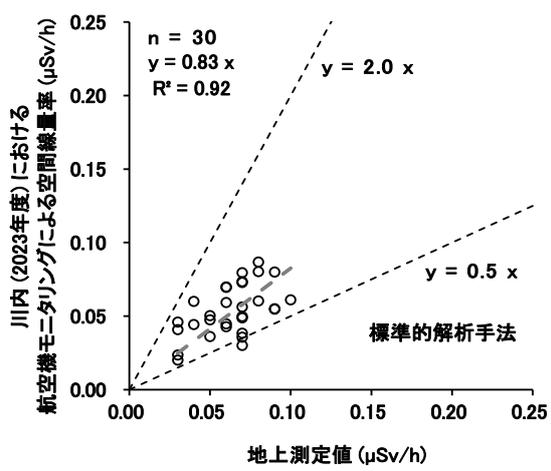


Fig. 4-22 川内における標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (直交距離回帰による RI 及び GI を用いた場合)  
(左：散布図、右：相対誤差のヒストグラム)  
(1/2)

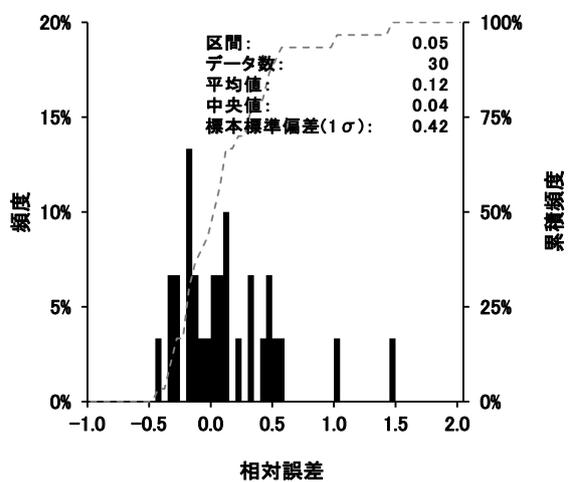
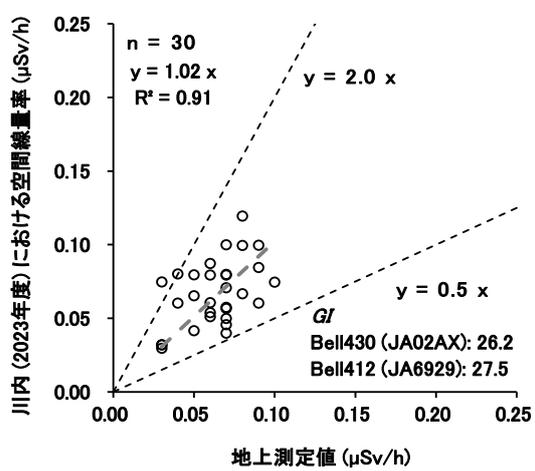
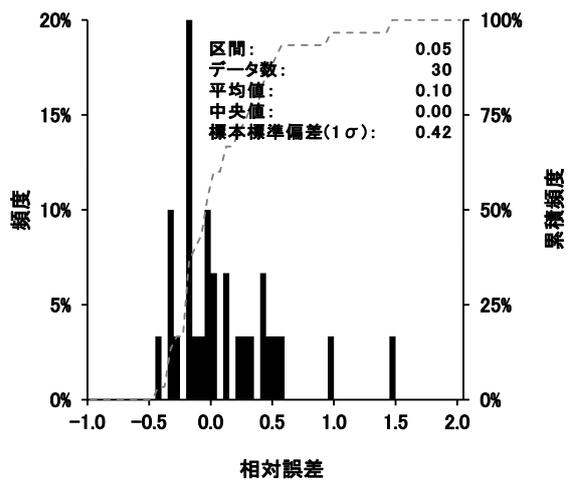
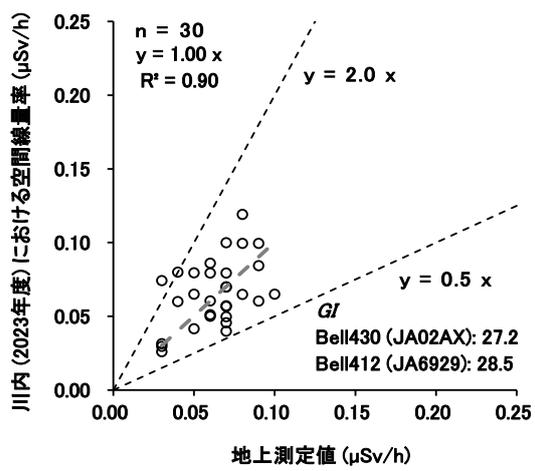


Fig. 4-22 川内における標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (直交距離回帰による RI 及び GI を用いた場合)

(2/2)

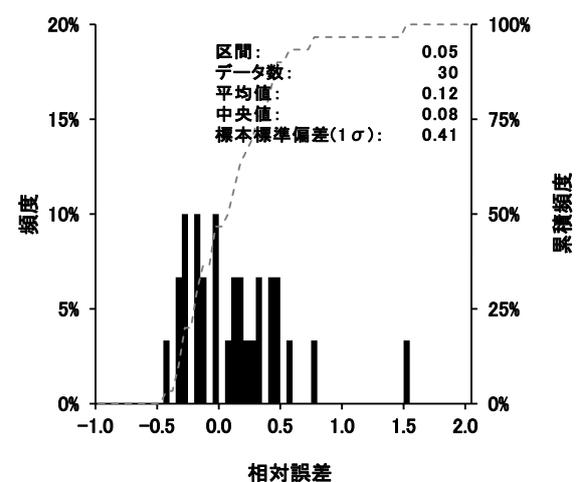
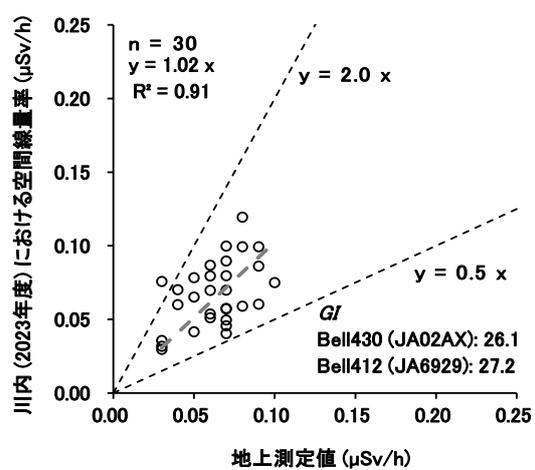
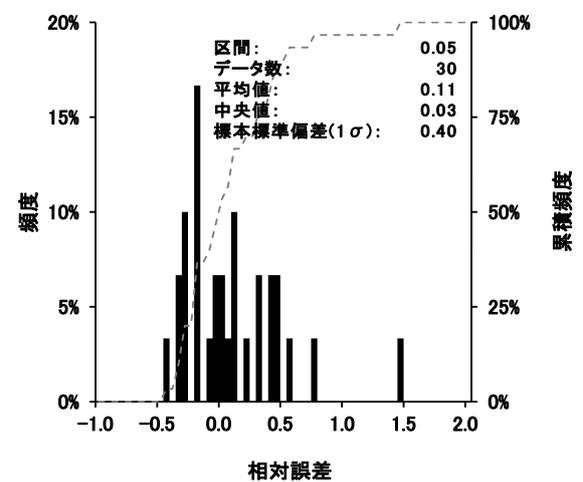
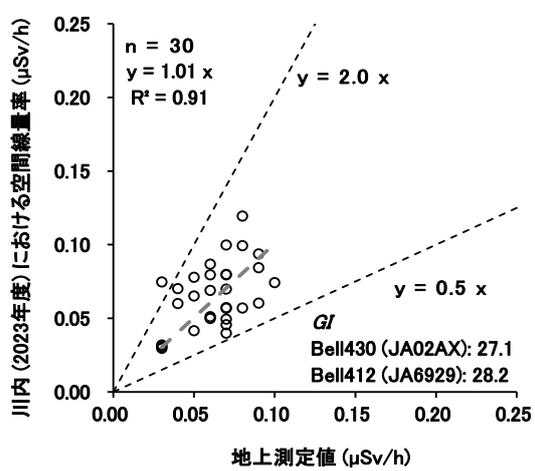
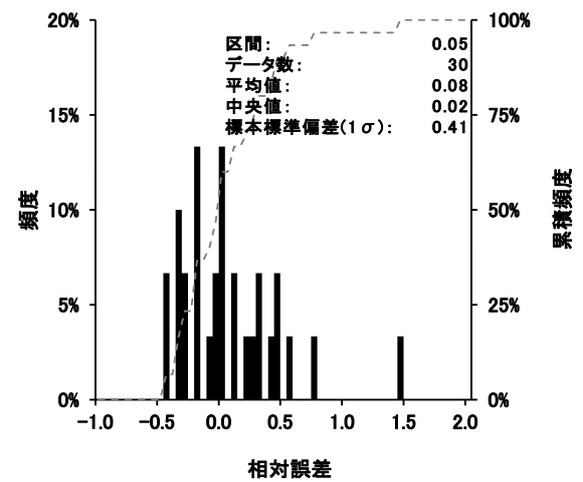
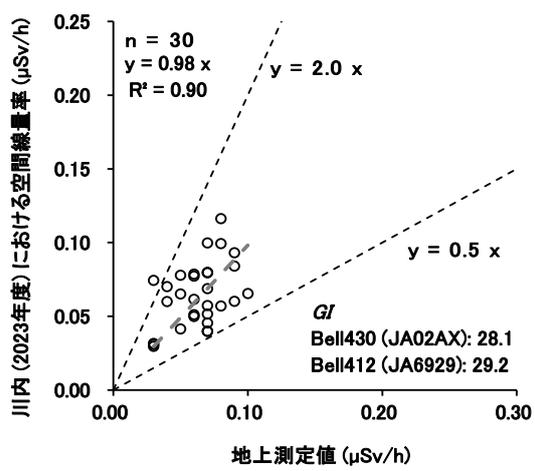


Fig. 4-23 川内におけるラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (最小二乗法による  $RI$  及び  $GI$  を用いた場合)

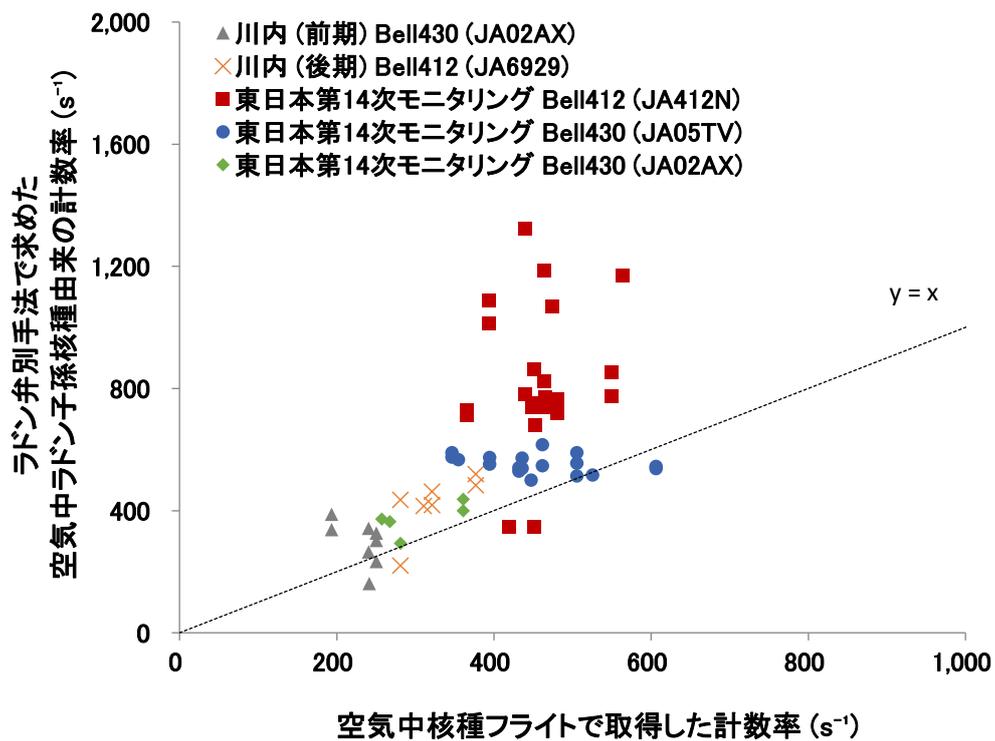
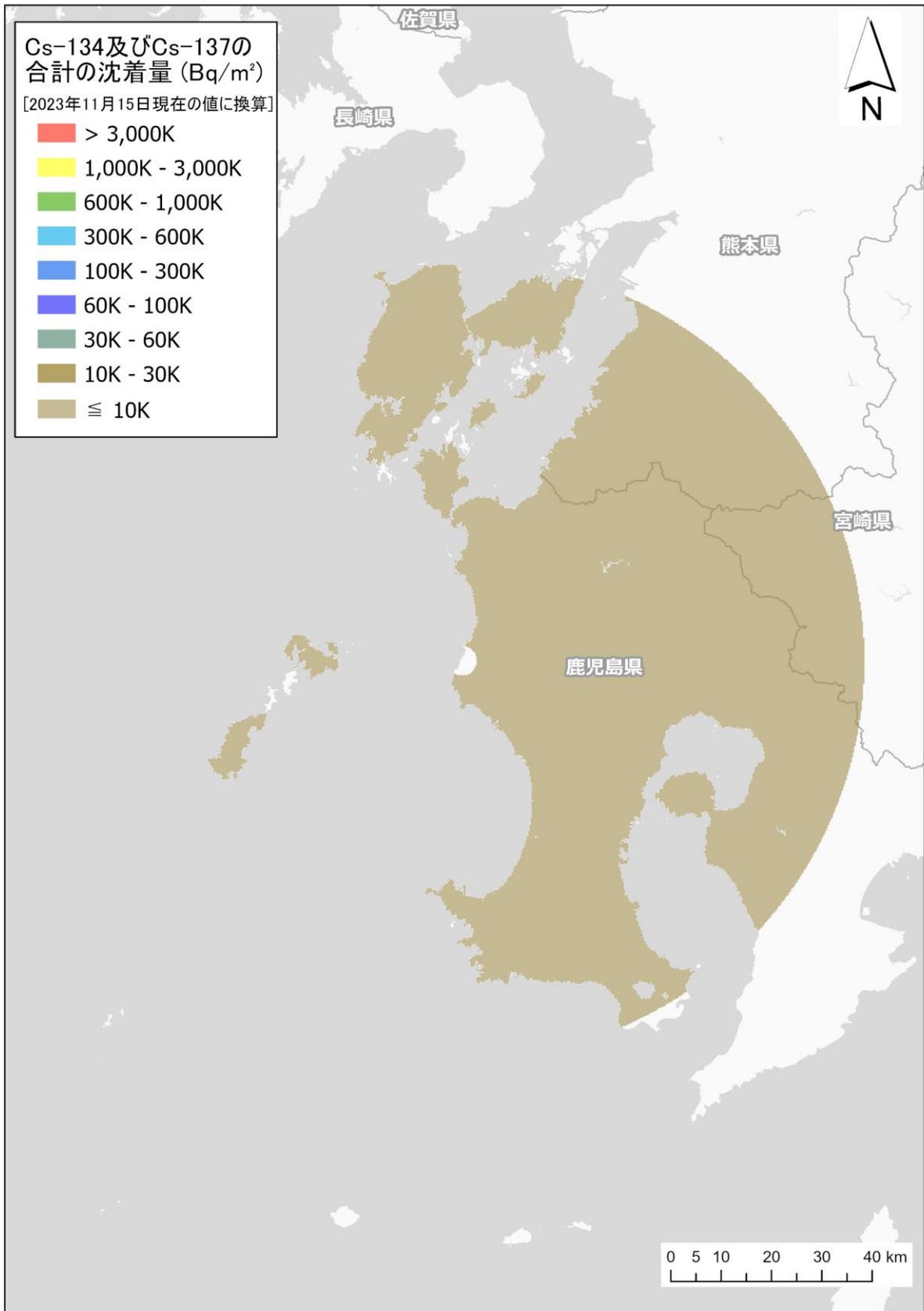


Fig. 4-24 空気中核種フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子孫核種由来の計数率の比較

#### 4.8. 放射性セシウムの沈着量

川内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. 4-25 に示す。このように、全範囲において検出限界値未満となり、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、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリング<sup>20)</sup>と同様とした。



**Fig. 4-25 川内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

### 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

原子力機構は原子力災害時等の緊急時に人的及び技術的支援を行うことが要求されている。第1章で触れた通り、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<sup>22)</sup>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原子力規制庁（以下、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。

本章では、2023年度（令和5年度）の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柏崎刈羽原子力発電所である。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を柏崎中央海水浴場を離発着点として実施した。なお、当日は悪天候であったため、後日、当該モニタリングの一部を公益財団法人福島イノベーション・コースト構想推進機構福島ロボットテストフィールド（以下、RTF）にて実施した。有人ヘリコプターについては、航空自衛隊新潟分屯基地を離発着点として、新潟県の柏崎市、上越市及び十日町市の周辺において緊急時航空機モニタリングを実施した。

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 (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 (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 (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 (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 (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 (2023年10月28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 (Matorice 300 RTK)	新潟県 柏崎中央海水浴場
令和5年度 原子力総合防災訓練 (2023年10月28日～29日)	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

## 5.2. 令和5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5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<sup>47)</sup>を以下に示す。

『新潟県上中越沖を震源とした地震が発生する。これにより、運転中の柏崎刈羽原子力発電所7号機は緊急停止する。さらには、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、原子力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西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モニタリング

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柏崎中央海水浴場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2023年（令和5年）10月27日に福島県南相馬市から新潟県柏崎市までバン型車両3台にて陸上輸送した。翌日、10月28日に柏崎中央海水浴場において、無人航空機（Edge Autonomy社製 Penguin

C、Fig. 5-2 (c))、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 300 RTK、Fig. 5-2 (c) ) の各機体のフライト準備作業及び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による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準備した。また、ドローンについては、規制庁の所有する松浦電工社製の KURAMA をベースとした LTE 通信によるデータ収集が可能な検出器を採用した。ドローンについては現状として、検出器の情報の収集のみで地表面から 1 m の高さの空間線量率への換算機能は有していない。

当日のタイムテーブルは Table 5-2 の通りである。当日は降雨及び強風の悪天候であり、訓練フライトの中止も想定しながらの対応となった。当日 13 時までに基地局準備と無人航空機、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、13 時以降、降雨及び強風の無い時間帯を気象予報、現地での風雨の状況を見ながら判断し、無人ヘリコプターについては 2 回、ドローンについては 3 回のモニタリングを実施した。

無人ヘリコプターに搭載した放射線検出器で測定した計数率を空間線量率に換算し、マッピングした結果を Fig. 5-4 に示す。また、ドローンに搭載した放射線検出器で測定された上空での空間線量率のリアルタイムマッピングの状況を Fig. 5-5 に示す。悪天候のため、訓練フライトは飛行予定経路の一部でのみ実施したが、放射線検出器を搭載したフライト及び空間線量率分布のリアルタイムなマッピングに成功した。なお、これら空間線量率マップは、空間線量率の分布が視覚的に分かりやすくなるよう、コンターインターバルを細かく設定した。また、これらモニタリングを実施したエリアの大部分は海上であることと、当日は荒天であり地表面が雨に濡れていたため、空間線量率の値は必ずしも正確でない。当日は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) を進めた時点で離陸、飛行は可能な状況であったが、強い横風が吹く状況での着陸が避けられず、着陸予想エリアが海上または飛行範囲外となるリスクが想定されたことから、当日のフライトは断念した。2023 年 (令和 5 年) 12 月 19 日に RTF において無人航空機の訓練フライトを改めて実施することとなった。当日は 33 分間のフライトを実施し、Fig. 5-6 に示すように空間線量率分布のマッピングに成功した。

Table 5-2 無人航空機、無人ヘリコプター及びドローンによるモニタリングタイムテーブル

時刻 (2023年10月28日)	実施内容			
	無人航空機 Penguin C	無人ヘリ FAZER R G2	ドローン Matrice 300 RTK	基地局
10:00				基地局準備
11:00				
12:00	準備	準備	準備	
13:00	エンジンテスト ※悪天候のため モニタリング中止	モニタリング(14分)	モニタリング(10分)	
14:00			モニタリング(12分)	
15:00		モニタリング(26分)	モニタリング(18分)	
16:00				基地局撤去



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 Vector<sup>48)</sup>に飛行範囲及び飛行予定経路を追記して掲載)

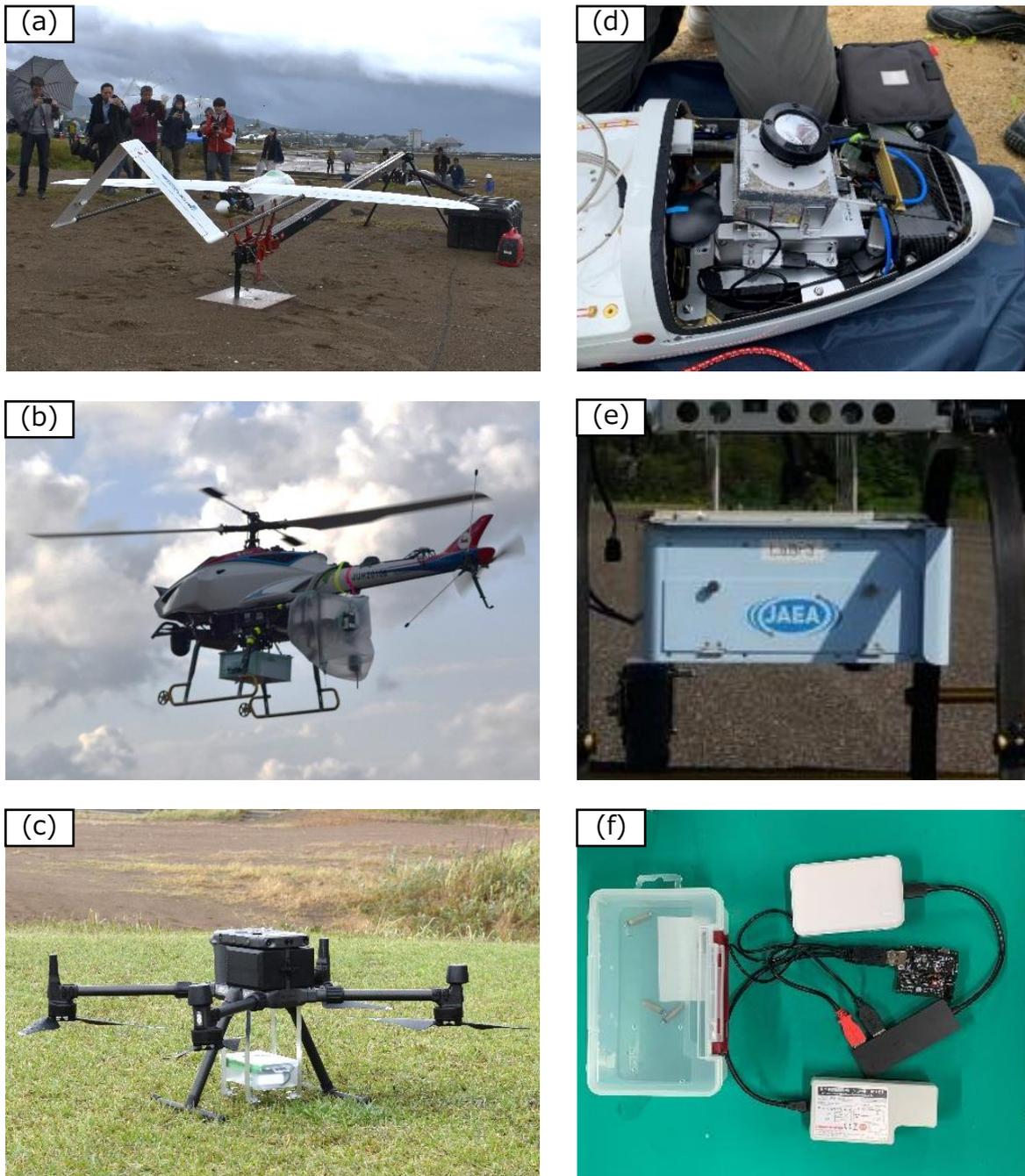


Fig. 5-2 モニタリングに用いた機体及び放射線検出器

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 300 RTK)

放射線検出器：(d) プラスチックシンチレータ及び BGO、(e)  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  検出器、(f) KURAMA

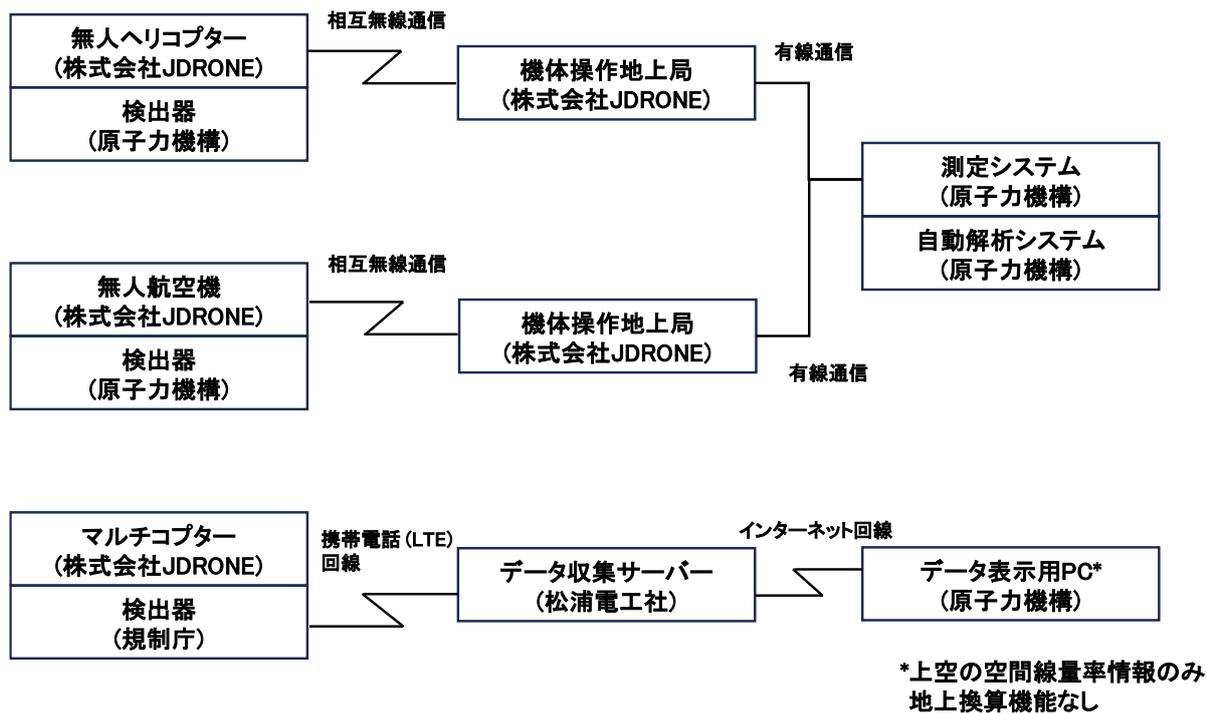


Fig. 5-3 訓練フライトに用いたシステムの構成

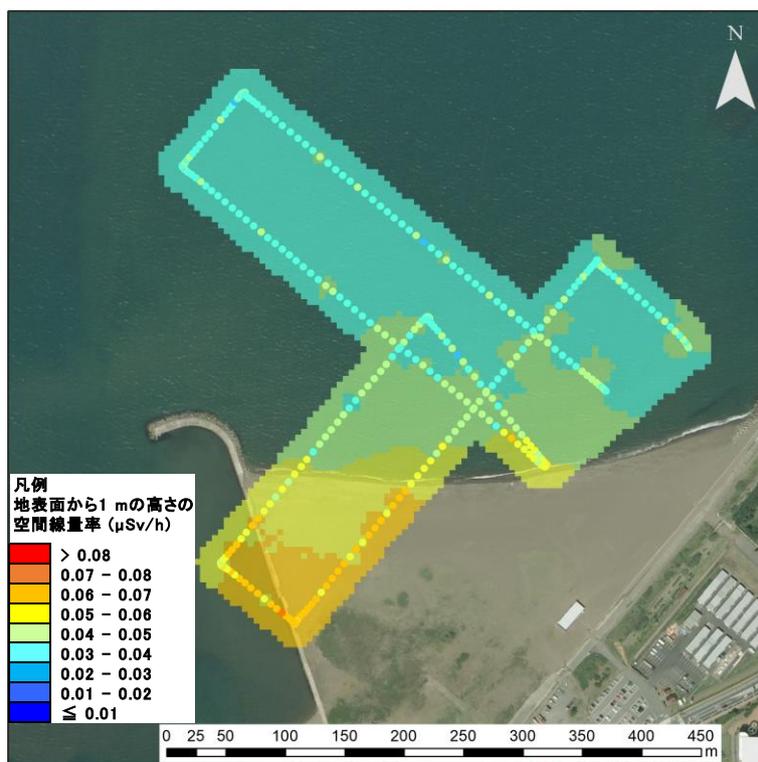


Fig. 5-4 無人ヘリコプターモニタリングによる上空での空間線量率の解析結果 (新潟県柏崎市柏崎中央海水浴場)

(背景地図は、地理院地図 Vector<sup>48)</sup>に飛行軌跡及び空間線量率を追記して掲載)



Fig. 5-5 ドローンモニタリングによる上空での空間線量率のリアルタイムマッピング結果  
 (新潟県柏崎市柏崎中央海水浴場)  
 (背景地図は、地理院地図 Vector<sup>48)</sup>に飛行軌跡及び空間線量率を追記して掲載)

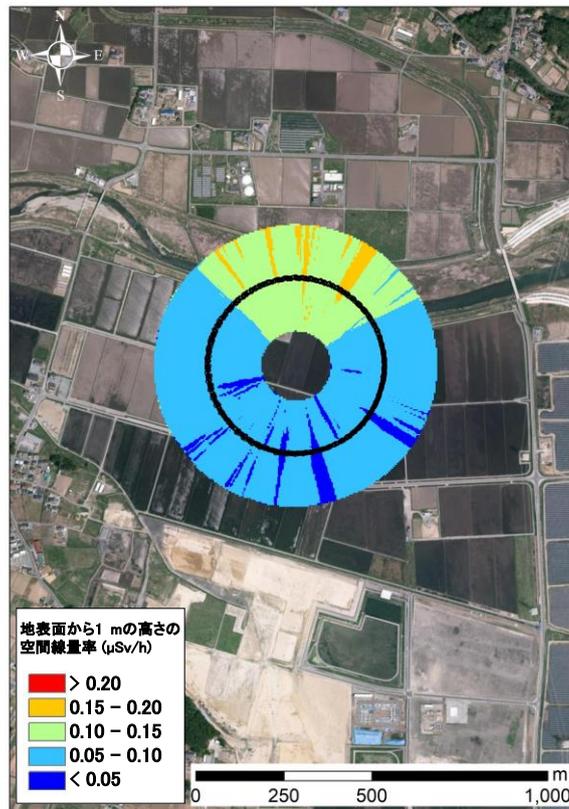


Fig. 5-6 無人航空機モニタリングによる空間線量率解析結果 (RTF)  
 (背景地図は、地理院地図 Vector<sup>48)</sup>に飛行軌跡及び空間線量率を追記して掲載)

### 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

航空自衛隊新潟分屯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 5 まで順番に飛行するプランとした (Fig. 5-7)。この時、基準対地高度は 300 m (≒1,000 ft)、上限対地高度は 530 m (≒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<sup>11)</sup>に取付け、リアルタイムデータ通信システム<sup>13)</sup>も含めて、2023 年 (令和 5 年) 10 月 27 日に NEAT から新潟分屯基地へ輸送した。10 月 28 日に新潟分屯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. 5-8) 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. 5-9 に示す。また同日、航空機モニタリングシステム及びリアルタイムデータ通信システムから発せられる電磁ノイズが UH-60 に備えられている計器類に悪影響を及ぼすか否かを確認するため、簡易的な電磁干渉試験を UH-60 に対して実施し、問題がないことを確認した。

上記フライトプランに基づき、10 月 29 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、内 2 名が機体に搭乗して 2 時間 20 分程度モニタリングを行った (Fig. 5-10)。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最中は新潟分屯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最中は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. 5-11)。なお、測線 2 のフライト中に高精度 GPS システムの不調が見られ、当システムの再起動に時間を要したため、測線 2 に関するデータは本図にプロットされていない。それ以外の箇所についてもデータの途切れが時々見られたが、これはリアルタイムデータ通信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な物であると思われる。また、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、最も信頼性が高いと思われる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. 5-12 に示す。なお、上述の通り、モニタリング中に高精度 GPS システムの不調が見られ、測線の一部で測位データが欠落したため、RSI システムの GPS 測位データを空間線量率マッピングに用いた。また、緊急時航空機モニタリングを実施したエリアは荒天であり地表面が雨に濡れていたため、空間線量率の換算値は必ずしも正確でない。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 本部に報告を完了するまで、25 分程度であった。その後、本マップを 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。

緊急時航空機モニタリング中に取得した GPS 測位データに基づいた対地高度の推移を Fig. 5-13 に示す。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。測線 5 の東端付近において雲がヘリの進路上にあり、安全確保のため測線から一時的に離脱した。その後、雲が通過したのを確認した上で、当該測線を再測定するよう NEAT 航空機モニタリング要員からパイロットに指示を行った。

**Table 5-3 令和 5 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 (2023 年 10 月 29 日)**

時刻	実施内容
6:40	新潟分屯基地に入域
7:00	飛行決心
7:10	防衛省及びJAEA:RSIシステムチェック等の航空機モニタリング準備
8:00	新潟分屯基地を離陸
8:30～9:50	測線1～測線5をフライト
10:25	新潟分屯基地に着陸、航空機モニタリングシステムの取り外し
10:45～11:10	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報告
12:10	新潟分屯基地から航空機モニタリング機材の搬出作業
12:30	新潟分屯基地から退域

**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> ( $\text{m}^{-1}$ )	<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。

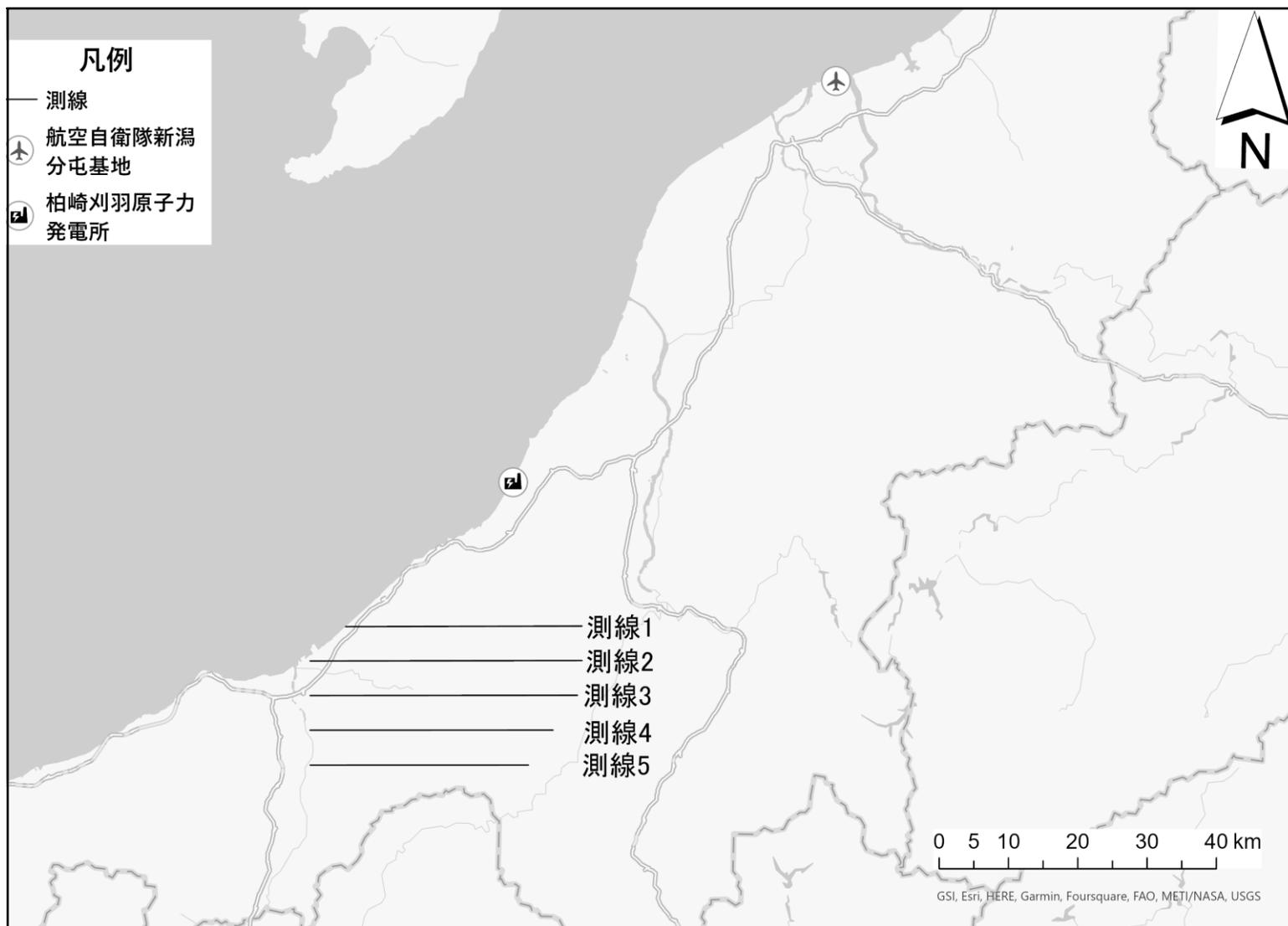


Fig. 5-7 令和5年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングのフライトプラン  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 5-8 令和5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)

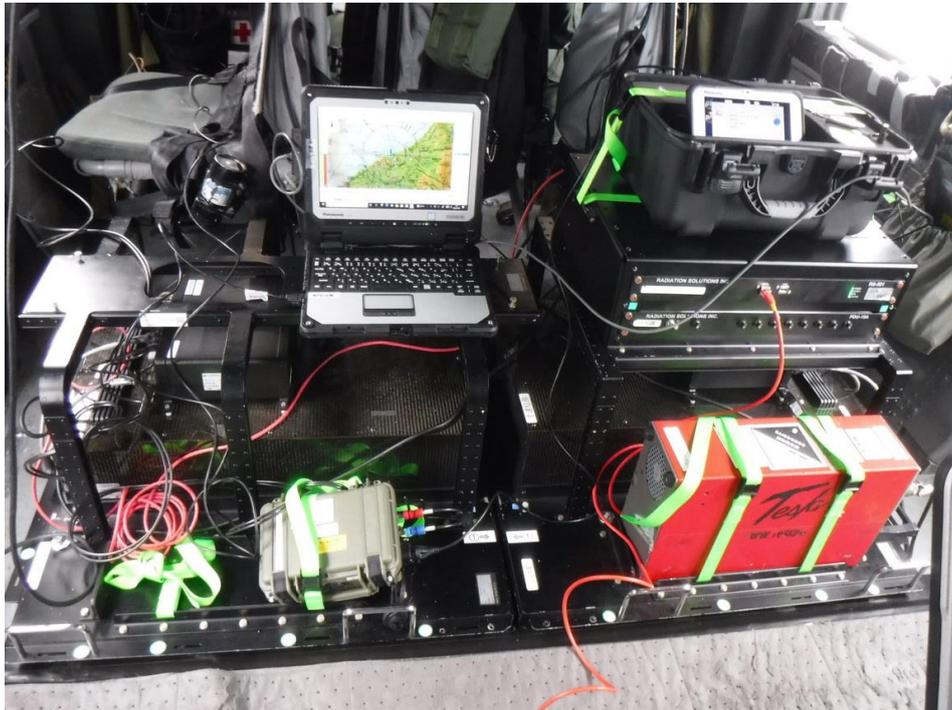


Fig. 5-9 航空機モニタリングシステムの搭載状況



Fig. 5-10 令和 5 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. 5-11 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 $\gamma$ 線計数率を表す。)  
 (背景地図は、電子地形図 25000 (国土地理院)<sup>49)</sup>に航空機モニタリングデータを追記して掲載。)

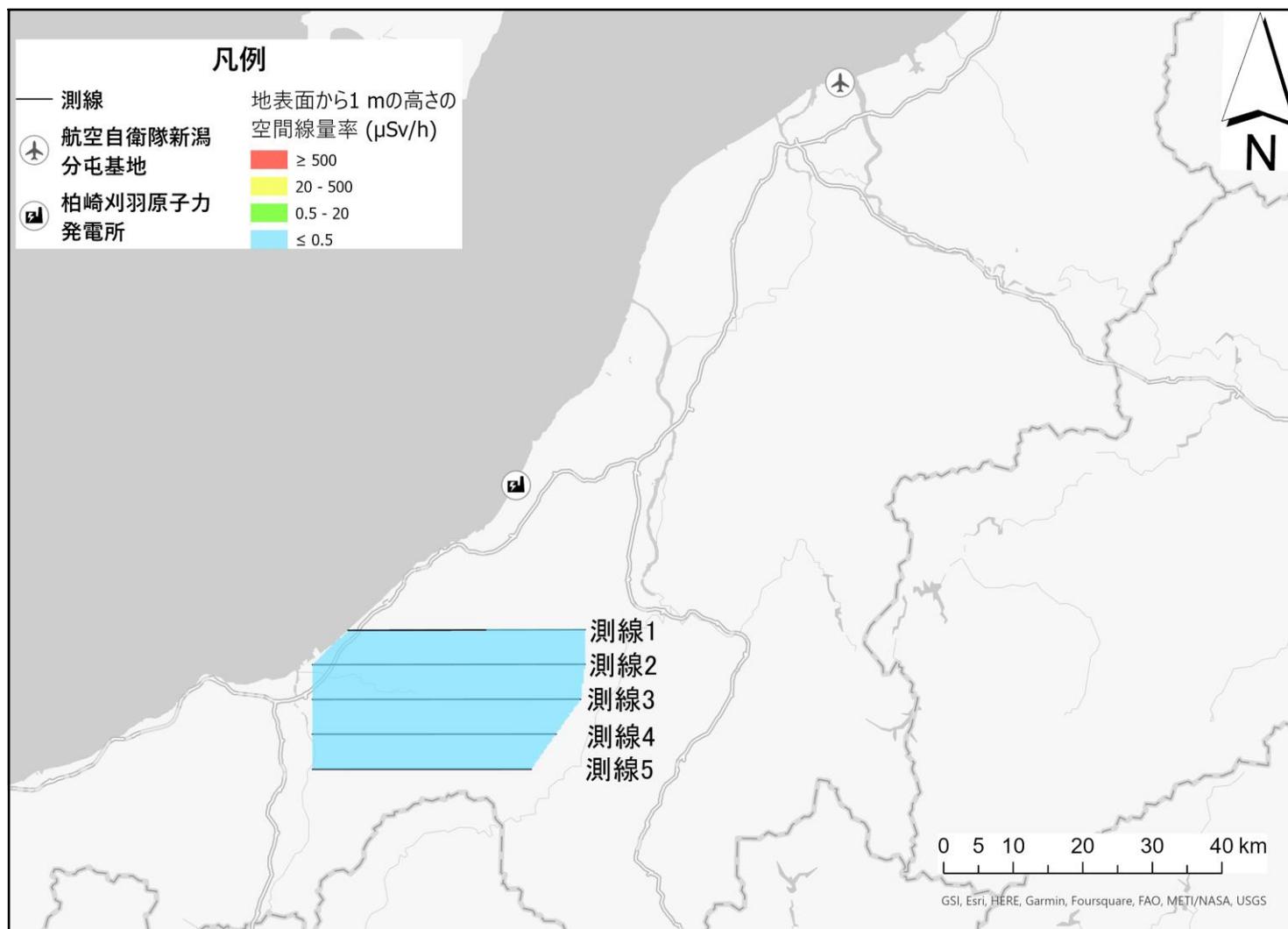


Fig. 5-12 令和5年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングによる空間線量率分布マップ  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

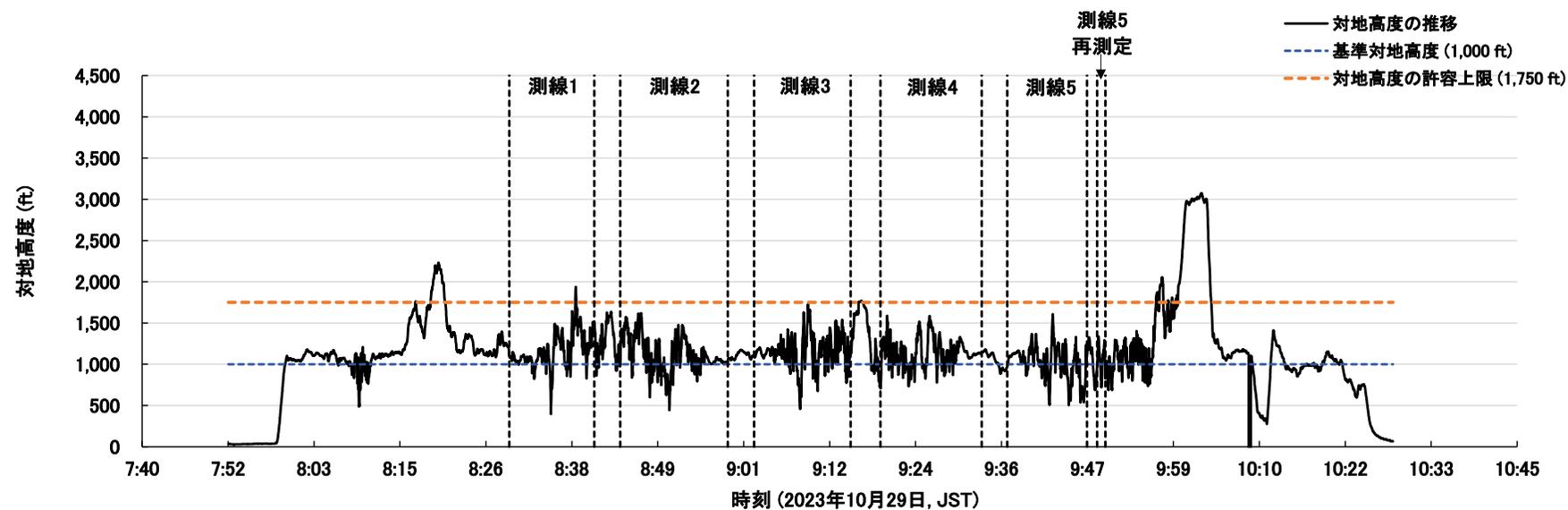


Fig. 5-13 緊急時航空機モニタリング中の対地高度の推移

### 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5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

##### • 無人機訓練について

国内初の無人機の総合防災訓練での訓練フライトを実施できた。福島県南相馬市に配備されている3種の無人機の訓練フライトを現地で実施するために車両5台(バン型車両3台、普通乗用車2台)、原子力機構4名、運用事業者である株式会社JDRONE7名で対応した。当日は、午前中から降雨約2.5 mm/h、地上風速9.8 m/sという悪天候であったが、システムの展開は1時間程度で完了できた。今後、原子力発電所立地地域での訓練を重ねることで、より多くの課題が抽出されるものと考えられる。

##### • 天候不良時の対応について

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。今回の気象条件、フライト場所の条件では、近傍の海水浴場でパラセーリングなどを行っている利用者がいたため、無人航空機のフライトを断念せざるを得なかった。また、それぞれに搭載している検出器は防水機能を有おらず、今後更なる適用条件の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。ドローンについては、検出器のみならず機体についても防水機能がなく、降雨時のフライトは難しい。今後、防水型のドローンの採用を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。将来的には、現地のPCと規制庁や自治体などのPCをインターネット経由で接続し、情報共有が可能となるような基盤構築を進めていく予定である。ドローンについては、データの通信は確認できたものの、地表面から1 mの高さの空間線量率への換算システム機能を有していないのが現状である。飛行時間やペイロードの特徴が異なる無人機プラットフォームの使用のタイミングを検討しつつ、情報共有システムの統合及び機能の最適化を検討する必要がある。

##### • 原子力災害時の対応体制について

上記で記述したように今回の訓練では、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7名が対応した。このような訓練を通して、実際の原子力災害時の最適な対応体制、招集方法及び平常時の体制維持の方法などは今後検討を要する。

- 訓練ロジスティックスについて

国内初の試みということもあり、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。実際の事故時にはこのような事前打ち合わせは不可能であるため、予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および航空管制の状況などを確認し、手順化が必要である。

### 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ヘリコプターの離発着地点まで輸送した。しかしながら、原子力災害時等においては、民間の輸送業者や自衛隊等の他機関から輸送に係る協力を得られない可能性もあるため、原子力機構が当該輸送を担う方法についても検討する必要がある。

- 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、新潟分屯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。なお、昨年度に抽出された課題<sup>2)</sup>に対して以下のように改善を施した。これらの対策は、当該作業の標準化に資するものである。しかしながら、その有効性の確認は UH-60 を用いる場合のみに留まっているのが現状である。今後、緊急時航空機モニタリングに用いる可能性のある UH-1J や CH-47 等についても、当該作業に関する知見を蓄積していく必要がある。

▶ スタッドボルトを設置する位置決めの迅速化

UH-60 機内床にスタッドボルトを設置できるポイントが多数あり、ラックにフィットするスタッドボルトの設置ポイントが確定できず、ラックの設置作業が難航していた。今回、使用すべきスタッドボルトの設置ポイントを一目で分かるようにするため、簡易的な目印付き紐 (Fig. 5-14) を作製し活用した。この紐に付けた黄色い目印がラックのボルト穴の位置であり、Fig. 5-14 のようにヘリコプター機体の床面に紐を広げ、これら黄色い目印と重なる場所が使用すべきスタッドボルトの設置ポイントである。これにより、現地で試行錯誤することがなくなり、ラックの設置ポイントの確定に掛ける時間が短縮された。

▶ スタッドボルトのナット締めにかかる労力軽減

UH-60 機内の限られたスペースで、工具を用いてスタッドボルトのナット締めを迅速に行うのに難航していた。そこで、ナット締め作業を非常に狭いスペースで行うことを想定した事前練習を NEAT で実施した。また、平ワッシャーを数枚重ねてスタッドボルトのねじ部分を埋めることで、ナット締めに必要な深さを短くした。これにより、ナット締め作業にかかる労力が軽減された。

- データ解析、空間線量率マッピングについて

昨年度まで用いていた、緊急時航空機モニタリング専用のデータ解析ソフトウェア「AMS Total System」を廃止し、現在のバックグラウンド航空機モニタリングに用いている解析システムを本訓練でも使用した。平常時と緊急時で解析作業手順に一貫性が生まれたことにより、

現地の解析対応者が把握すべき情報量が軽減された。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 本部への報告完了まで概ね 25 分程度で完了した。緊急時航空機モニタリングで取得された全測定データから、空間線量率のマッピングに用いるデータを選別し抽出する作業に 10 分程度要したため、本作業の迅速化に資するツール群の構築に取り組む予定である。

- リアルタイムデータ通信システムについて

Fig. 5-11 に示した通り、リアルタイムデータ通信システムは RSI システムの測定データ ( $\gamma$  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に活用しやすくするため、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を開発し、導入することが必要である。

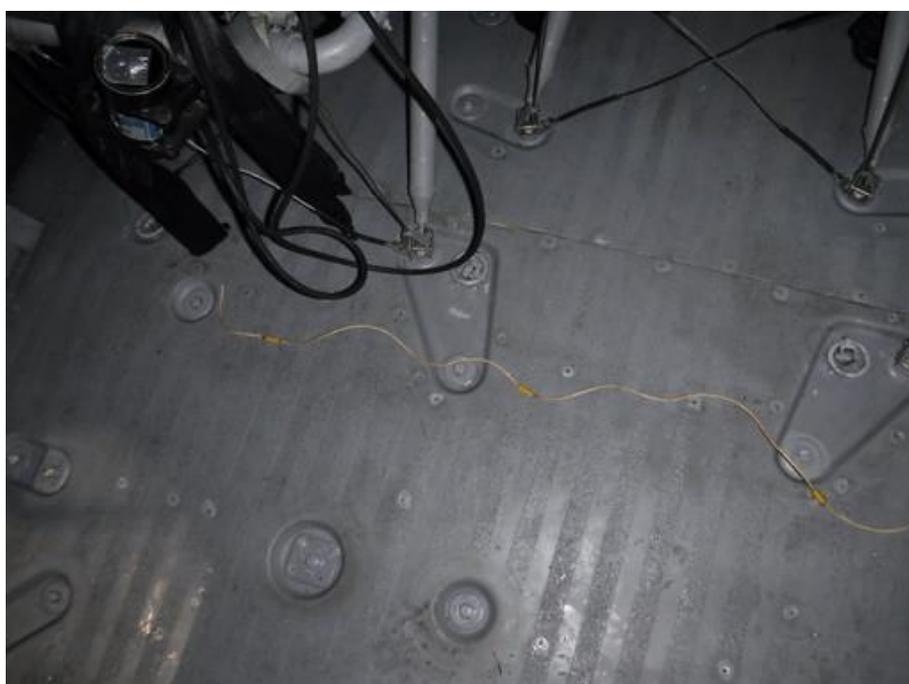


Fig. 5-14 スタッドボルトを設置する位置決めを行うための目印付き紐

## 6. 無人航空機用放射線モニタリングシステムの開発

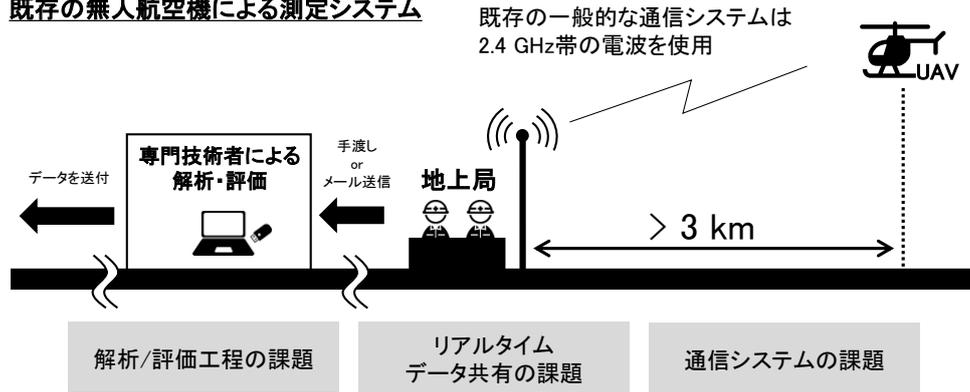
### 6.1. 背景

福島第一原子力発電所における事故後、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<sup>22)</sup>」が大幅に改定された。原子力施設敷地外に放射性物質が放出された場合、数時間以内に緊急時防護措置を準備する区域 (Urgent Protective action planning Zone : 原子力施設から概ね 5 km~30 km 圏内、以下、UPZ) の OIL 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。

福島原子力発電所事故後、発電所周辺の放射線分布測定のため無人ヘリコプター等の無人航空機が活用されている<sup>26),27)</sup>。無人航空機によるモニタリングは車両や人手によるモニタリングと比較して、モニタリング要員の被ばく低減が可能な他、陸路を用いないため、住民の避難との干渉を防ぐことができ、モニタリングポストのような点での測定と比較して面的な放射線分布の評価が可能である等の特長がある。しかし、発電所周辺の放射線測定に使用している現行のシステム (無人ヘリコプター等) は、緊急時のモニタリングに即座に対応できる機能及び体制が構築されておらず、運用に際していくつかの課題がある。Fig. 6-1 に既存の無人航空機による測定システムの課題と、原子力災害時に備えておくべきシステムの概要図を示す。まず、現在使用されている通常の通信システムでは長距離通信 (数十キロメートル以上) による運用が難しく、UPZ 外からの放射線測定は難しい。また、フライトの時間が 2 時間未満<sup>27)</sup>であり、UPZ 範囲内を迅速にモニタリングするには、複数の機体による同時並行でモニタリングを行う必要があり、それに対応できる専門技術者も必要十分に確保及び育成しなくてはならない。さらに、測定機器の動作状況や検出器等の機器情報を、機体通信等を用いてリアルタイムで監視及びデータを保存する機能がなく、機器に問題が生じた際に即時かつ適切な対応を行うことが難しい。なお、上空で取得した測定データは、地表面から 1 m の高さの空間線量率への換算やマッピングが必要であり、これらの解析作業は専門技術者が専用ソフトなどを使用して各自のコンピュータで行っている。測定、解析、評価の工程で手間と時間が掛かり、緊急時モニタリングに対応できる効率的なシステム基盤の整備が十分に進んでいないのが現状である。

2019 年度 (令和元年度) から 2023 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 Penguin C (Fig. 6-2) 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<sup>15),17),19),21)</sup>。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、緊急時モニタリングでの運用を想定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。本章では開発した無人航空機搭載用放射線測定システムの概要及び動作試験を行った結果について詳細を述べる。

### 既存の無人航空機による測定システム



### 原子力災害時に備えておくべきシステム

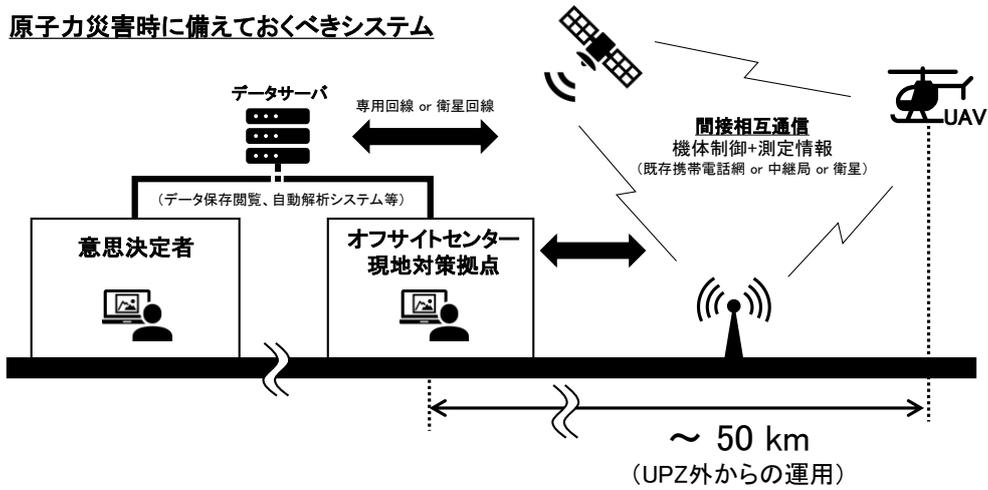


Fig. 6-1 既存の無人機によるシステムと原子力災害時に備えるべき無人航空機システム

名称	Penguin C
メーカー (国)	Edge Autonomy (ラトビア)
サイズ	翼長 3.3 m
最大離陸重量 (kg)	23
燃料	混合燃料 (ガソリン+オイル)
最大航続時間 (分)	1200
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 (km)	180 *高出力電波使用時
最大積載重量 (ペイロード)	燃料と合わせて7.64 kg



Fig. 6-2 無人航空機 Penguin C 概要<sup>50)</sup>

## 6.2. 無人航空機搭載用放射線測定システムについて

### 6.2.1. システム概要

本報告では原子力災害時の放射線モニタリングを想定し、無人航空機 (Penguin C) に搭載して使用する無人航空機搭載用放射線測定システムを製作した (Fig. 6-3)。Fig. 6-3において黄色で示した部分が本報告で製作したものであり、環境中の放射線モニタリング用検出器 (以下、環境用測定システム) と、緊急時の放射線モニタリング用検出器 (緊急時用測定システム) の2種類の検出器を製作した。環境用測定システムは、災害後の長期に渡る環境中の放射線モニタリング等での使用を想定し製作したもので、搭載する検出部を最大限大きく確保し、低線量下でも計数率を確保できるように設計したものである。緊急時用測定システムは、災害直後、高線量下で放射性物質が浮遊している状態でも測定できるように設計している。

また、それぞれの放射線測定情報を Penguin C の機体通信を用いて地上局で確認できるシステムを構築した。各検出器のシステム詳細概要及び動作試験結果を以下に述べる。

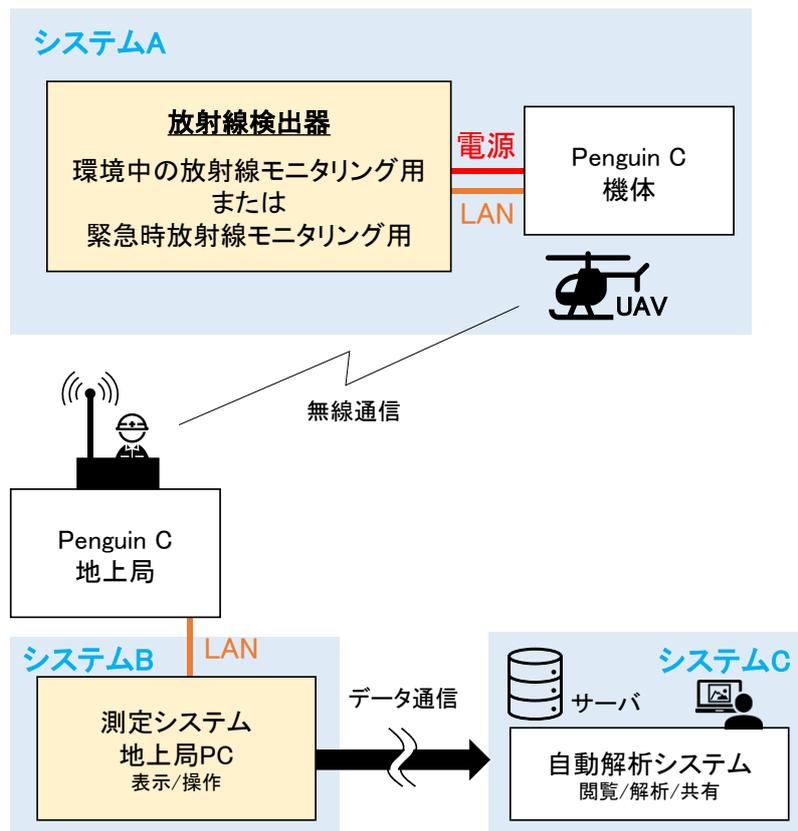


Fig. 6-3 無人航空機搭載用放射線測定システム概要

## 6.2.2. 環境用測定システム

環境用測定システムの外観図面を Fig. 6-4 に、接続図面を Fig. 6-5 示す。環境用測定システムの機体搭載部分の総重量は約 1.9 kg であり、サイズは幅 207 mm×奥行 219 mm×高さ 163 mm である。環境用測定システムの検出部は 25 mm×25 mm×25 mm の High Energy Resolution  $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}(Ce)$  (以下、HR-GAGG) シンチレータを 4 つ搭載し、光半導体素子に SiPM を使用している。環境用測定システムでは、各検出部の測定ステータス (検出器電圧や温度)、 $\gamma$  線計数率、 $\gamma$  線スペクトル (1,024 ch)、GPS 取得データ (時刻、緯度、経度及び高度)、気温、湿度、気圧が 1 秒毎に得られ、csv 形式でシステム本体に保存され、地上局に無線通信でデータが送信及び保存される。環境用測定システムには運行用カメラが搭載されており、地上局においてリアルタイムでカメラ映像を確認することができる。Fig. 6-6 に環境用測定システムを機体に搭載した際の外観図を、Fig. 6-7 に地上局で確認できる測定システムの動作状況確認画面の例を示す。

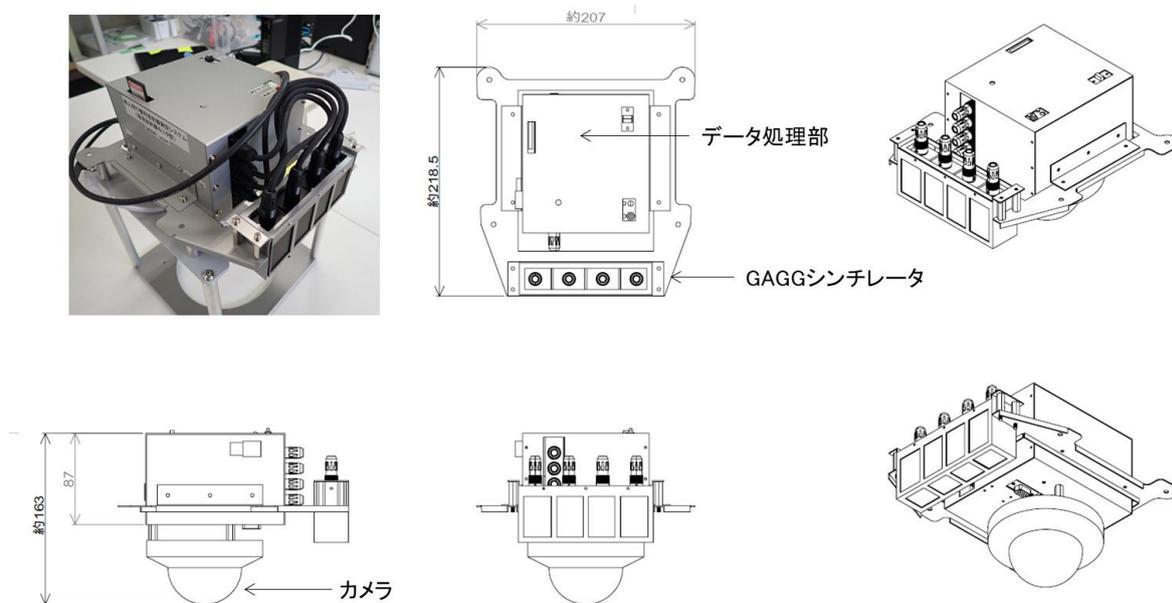


Fig. 6-4 環境用測定システム外観図面

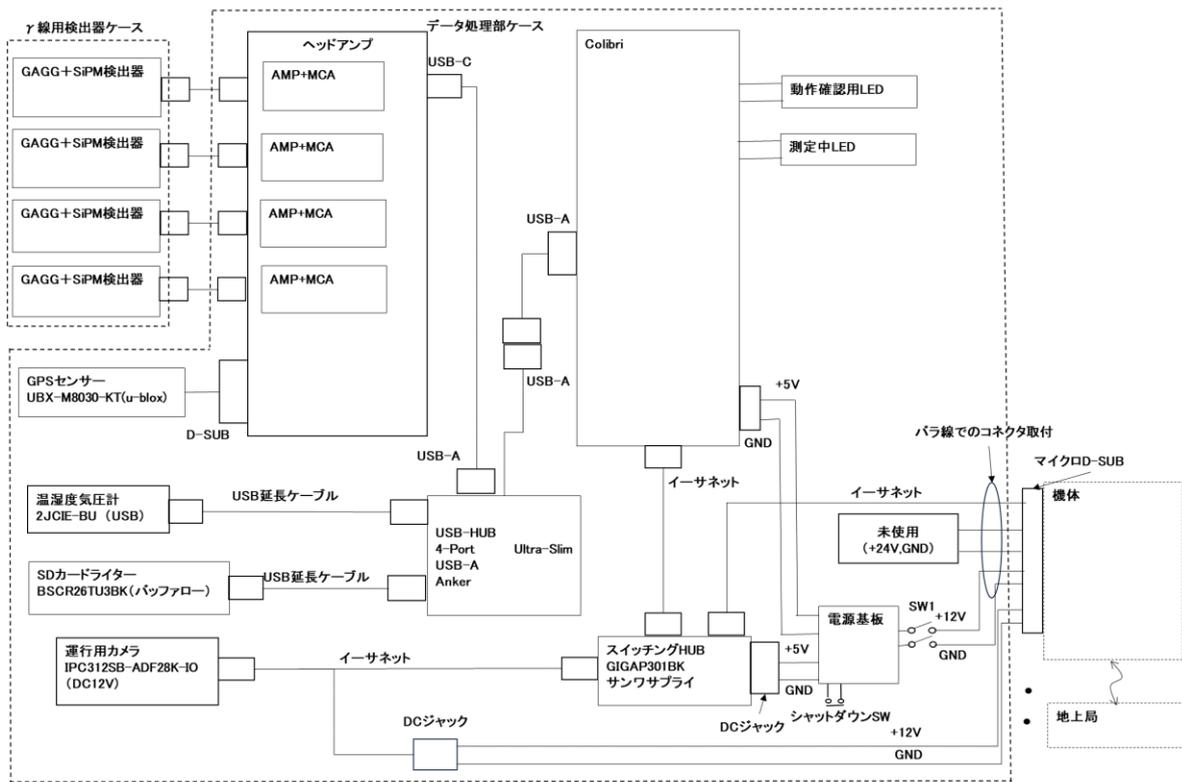


Fig. 6-5 環境用測定システム接続図面



Fig. 6-6 環境用測定システム機体搭載時の外観

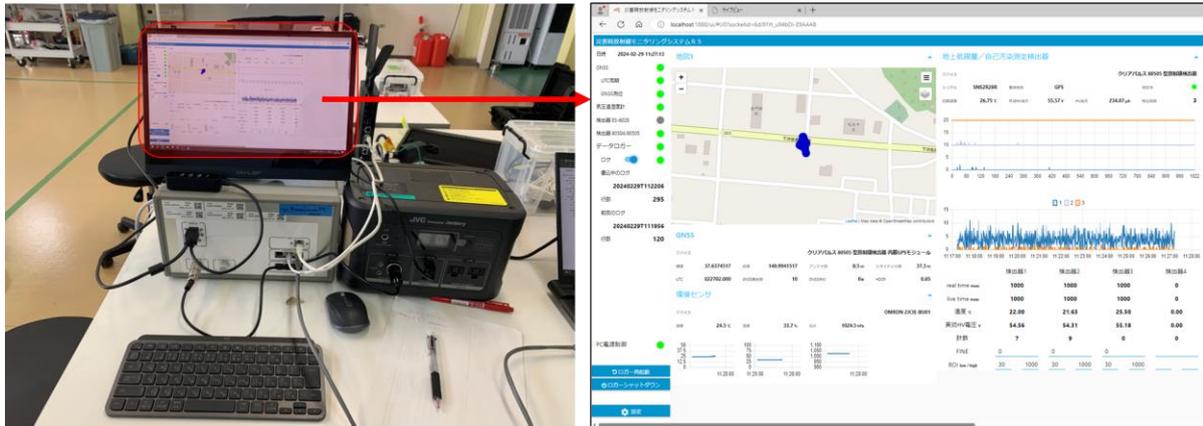


Fig. 6-7 地上局で確認できる測定システムの動作確認画面の例

### 6.2.3. 緊急時の放射線モニタリング用検出器

緊急時用測定システムの外観図面を Fig. 6-8 に、接続図面を Fig. 6-9 示す。緊急時用測定システムの機体搭載部分の総重量は約 1.3 kg であり、サイズは幅 207 mm × 奥行 219 mm × 高さ 194 mm である。緊急時用測定システムは 2 種類の検出部を保持しており、25 mm × 25 mm × 0.3 mm のプラスチックシンチレータを 1 つ、10 mm × 10 mm × 10 mm の HR-GAGG シンチレータを 2 つ搭載している。緊急時用測定システムでは、各検出部の測定ステータス (検出器電圧や温度)、 $\gamma$  線計数率 (HR-GAGG)、HR-GAGG シンチレータのスペクトル (1,024 ch)、 $\beta$  線計数率 (プラスチックシンチレータ)、プラスチックシンチレータスペクトル、GPS 取得データ (時刻、緯度、経度及び高度)、気温、湿度、気圧が 1 秒毎に得られ、csv 形式でシステム本体に保存、また地上局に無線通信でデータが送信及び保存される。緊急時用測定システムには運行用カメラが搭載されており、地上局においてリアルタイムでカメラ映像を確認することができる。Fig. 6-10 に緊急時用測定システムを機体に搭載した際の外観図を示す。

本システムは複数の放射線検出部を用いることで、機体の周辺汚染状況と地面からの放射線寄与を弁別するシステムであり、個々の結晶から  $\gamma$  線計数率を取得し、遮へい率の違いから、各寄与からの放射線計数率を推定する。Fig. 6-11 に緊急時における放射線測定環境を示す。Fig. 6-11 の環境において、地表面及び機体周辺の放射性物質の寄与で検出した放射線計数率には以下のような関係が成り立つと仮定する。

$$y_A = A_c + A_g \quad [9]$$

$$y_B = B_c + B_g \quad [10]$$

ここで、 $y_A$  は検出部 A の全計数率、 $y_B$  は検出部 B の全計数率、 $A_c, B_c$  は各検出部で機体周辺の放射性物質に起因する放射線計数率、 $A_g, B_g$  は地表面に存在する放射性核種に起因する放射線計数率である。

機体周辺に汚染がなく、全計数率が地表面に存在する放射性核種に起因する計数率のみと見なせる場合、 $A_g$  と  $B_g$  の比は一定であると仮定すると、以下の式 [11] が成り立つ。

$$B_g = SC_1 \times A_g \quad [11]$$

ここで、 $SC_1$ は遮へい係数であり、遮へい体や各検出部の配置によって変化する。

次に、地表面に存在する放射性核種に起因する計数率の影響がほとんどなく、全計数率が機体周辺の放射性物質に起因する計数率のみであると見なせる場合、 $A_c$ と $B_c$ の比は一定であると仮定すると以下の式 [12] が成り立つ。

$$B_c = SC_2 \times A_c \quad [12]$$

ここで、 $SC_2$ は遮へい係数であり、遮へい体や各検出部の配置によって変化する。

$SC_1 \neq SC_2$ のとき、以下の連立方程式 [13] から $A_c, A_g$ を推定することが可能となる。

$$\begin{cases} y_A = A_c + A_g \\ y_B = SC_2 A_c + SC_1 A_g \end{cases} \quad [13]$$

$$A_g = \frac{SC_2 y_A - y_B}{SC_2 - SC_1}, \sigma_g = \sqrt{\left(\frac{SC_2}{SC_2 - SC_1}\right)^2 y_A + \left(\frac{1}{SC_2 - SC_1}\right)^2 y_B} \quad [14]$$

$$A_c = \frac{SC_1 y_A - y_B}{SC_1 - SC_2}, \sigma_c = \sqrt{\left(\frac{SC_1}{SC_1 - SC_2}\right)^2 y_A + \left(\frac{1}{SC_1 - SC_2}\right)^2 y_B} \quad [15]$$

ここで、 $\sigma_g$ と $\sigma_c$ は $A_g$ と $A_c$ の標準偏差である。 $SC_1$ と $SC_2$ の差が大きいほど、推定精度は向上する。ただし、 $A_c$ の影響が機体に対して均一ではなく部位によってばらつきがある、または各検出部の計数率が低く測定精度が担保できない場合等では、式 [13] の関係性が大きく崩れるとき、本方式での各計数の推定精度は低くなる。

ここで $A_c$ を $A_g$ のバックグラウンドと考えると、 $A_g$ の検出限界値 $N_g$ は式 [16] により算出される。

$$N_g = A_c + 3\sigma_c \quad [16]$$

上記に示した手法により、緊急時測定システムは地表面の放射性核種からの寄与と、機体周辺の放射性核種からの寄与とに大まかに弁別することは可能だが、機体周辺の放射性核種からの寄与について、機体周辺に存在する放射性プルーム等からの寄与と、機体自体に付着している放射性核種からの寄与とに詳細に弁別することが難しいという課題がある。そこで本システムでは、 $\beta$ 線測定用として検出部 C (プラスチックシンチレータ) を機体表面汚染検知のため

めに搭載している。検出部 C の計数率と機体表面汚染の  $\gamma$  線成分の間に相関関係にあると仮定し、そこから算出された機体表面汚染成分を  $A_c$  と  $B_c (= SC_2 A_c)$  から減算することで、機体周辺の放射性核種からの寄与の影響を推定することができる。

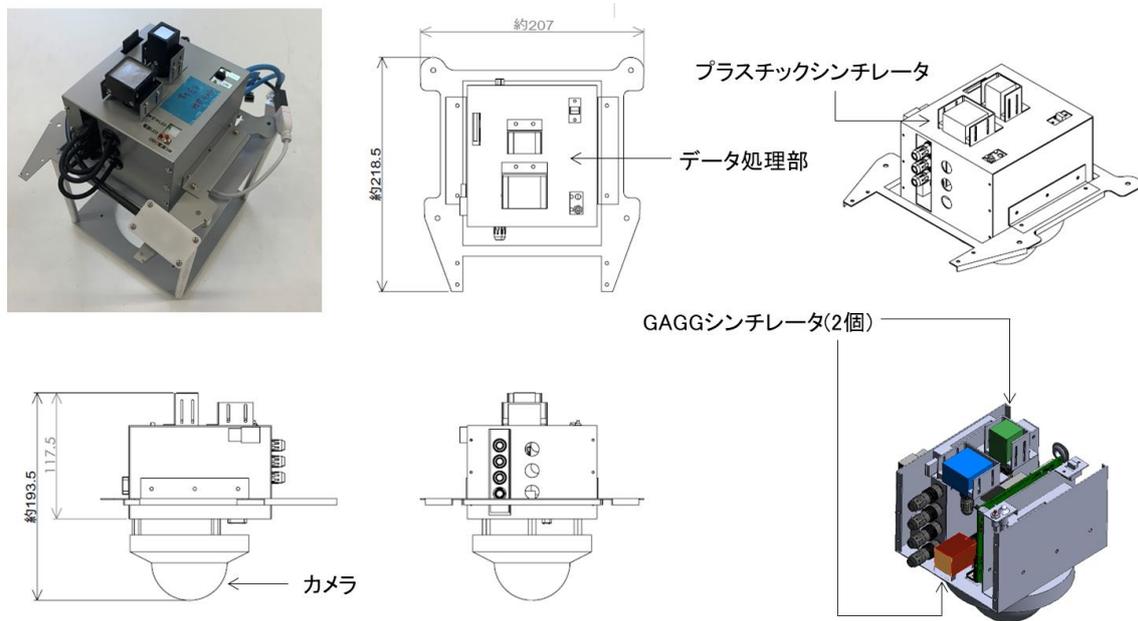


Fig. 6-8 緊急時用測定システム外観図面

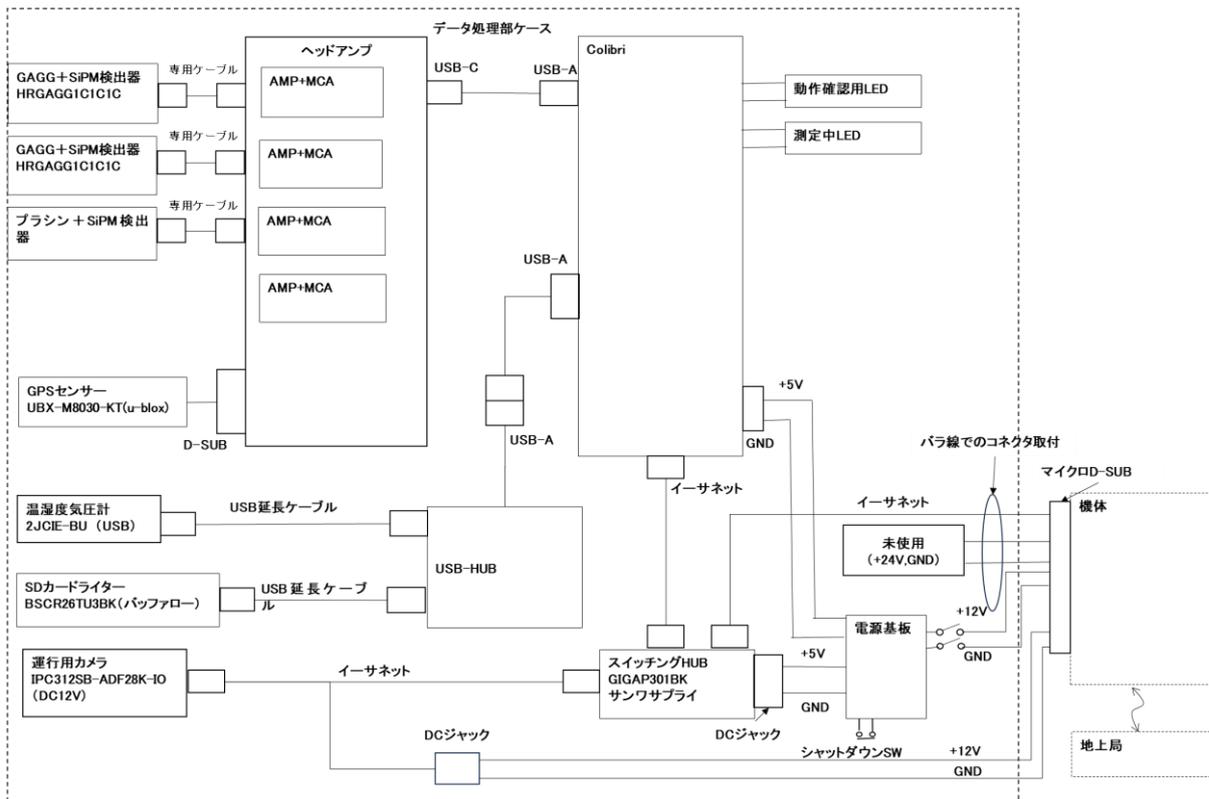


Fig. 6-9 緊急時用測定システム接続図面



Fig. 6-10 緊急時用測定システム機体搭載時の外観

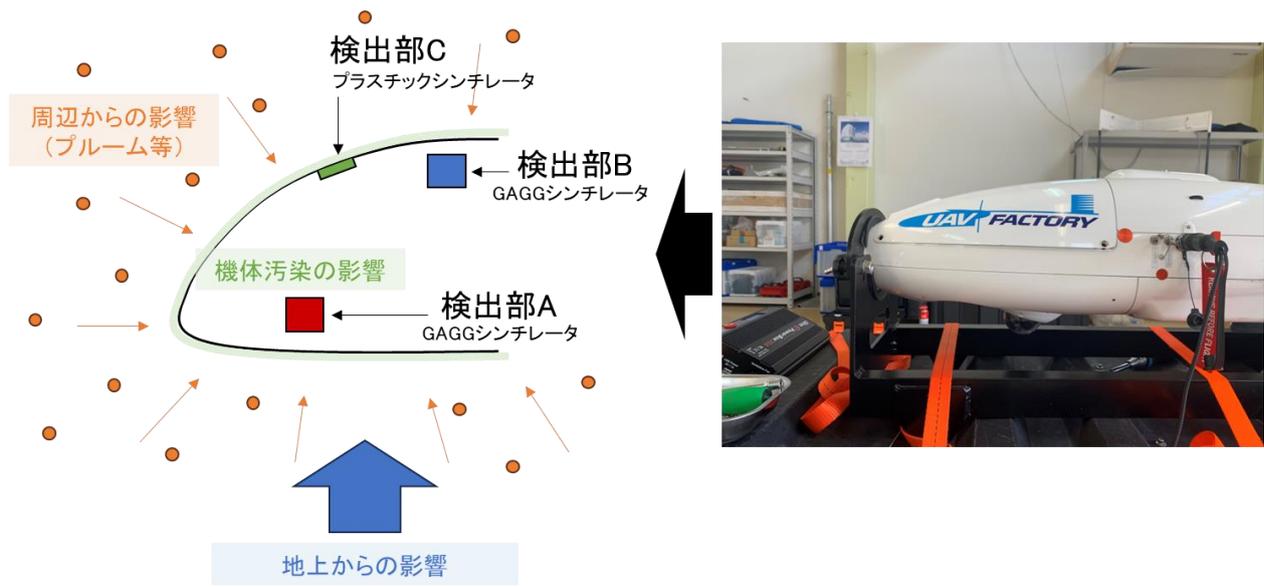


Fig. 6-11 緊急時における放射線測定環境

### 6.3. 放射線検出器の照射試験

#### 6.3.1. 試験概要

各放射線検出器を無人航空機 (Penguin C) に搭載し、各方向から放射線照射を行うことで、放射線検出器の方向特性を確認した。放射線源には Cs-137 $\gamma$  線源 (約 10 MBq) を使用し、機体の前、後、右、左、上、下の方向から  $\gamma$  線を照射し、それぞれ 10 分測定を行った (Fig. 6-12)。線源は検出器中央部から約 1 m 離して設置した。線源を設置しない状況におけるバックグラウンド値 (60 分測定) も併せて取得した。なお機体の燃料はほぼ空の状態で行った。

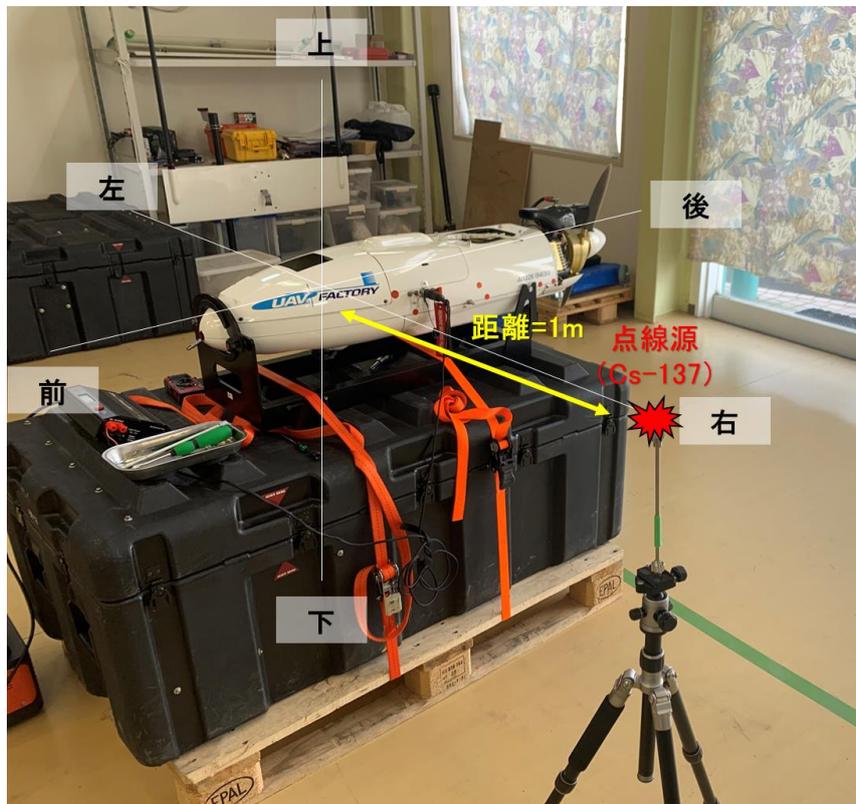


Fig. 6-12 線源試験時の様子

#### 6.3.2. 試験結果

環境用測定システムに各方向から  $\gamma$  線照射を行い得られた計数率の結果を Fig. 6-13 に、緊急時用測定システムの結果を Fig. 6-14 に示す。Fig. 6-13 の環境用測定システムの試験結果を見ると、右と左で結晶ごとに計数率が異なった。これは放射線検出部が横並びに配置されており、検出部による遮へいが大きく影響していると考えられる。各検出部の平均を見ると、前、上、下は同レベルの計数率を示し、それらと比較して後、右、左の計数率は約 40 %低い傾向を示した。本結果より、環境用測定システムは前方向優位の検出特性を有していることが分かった。Fig. 6-14 の緊急時用測定システムの試験結果を見ると、特に検出器 A の下方向の計数率が大き

く検出された。検出器 C の計数率は全て  $1 \text{ s}^{-1} \sim 2 \text{ s}^{-1}$  程度であり、どの方向から  $\gamma$  線照射を行ってもほとんどバックグラウンドレベルであった。検出器 A と B の各計数率の違いについては、結晶配置の違いが大きく影響していると考えられる。ここで、バックグラウンド計数率を  $A_c$ 、 $B_c$ 、下方向に線源を設置し測定したデータを  $A_g$ 、 $B_g$  としたとき、 $SC_1$  と  $SC_2$  を算出した結果、 $SC_1 = 0.576$ 、 $SC_2 = 0.987$  ( $SC_1 \neq SC_2$ ) であった。本結果より、緊急時用測定システムにより  $A_c$ 、 $A_g$  を推定することが可能であることが分かった。ただし、本試験で算出したパラメータは面線源ではなく、点線源で算出したパラメータである。今後、空間線量率の高いエリアでのフライト試験（面線源での評価）及び機体への模擬線源吹付試験（機体汚染が与える影響の評価）等を行うことで、より精度の高いパラメータを取得することができると考えられる。併せて  $SC_1$  と  $SC_2$  に、より大きな差をつける工夫をすることで、推定精度をより高めることができると考えられる。また各測定結果を見ると、両結果共に後方向の計数率が低く測定されたが、これは機体後方のエンジン部の遮へいが大きく影響していると考えられる。環境用測定システムと同様、製作した緊急時用測定システムは前方向優位の検出特性であることが分かった。

なお、本試験では機体エンジンに燃料をほとんど入れずに試験を行った。今後、精度の高い計数率評価を行うためには、機体エンジンの残存燃料の変化に伴う遮へい率の変化傾向を取得する必要がある。また、本試験では各放射線検出器を機体に搭載してフライト試験を行っていない。実際のフライト状況での性能を評価するため、今後、各放射線検出器を搭載してのキャリブレーションフライト、フライト試験による空間線量率の測定及び地上測定値との比較評価を行う必要がある。

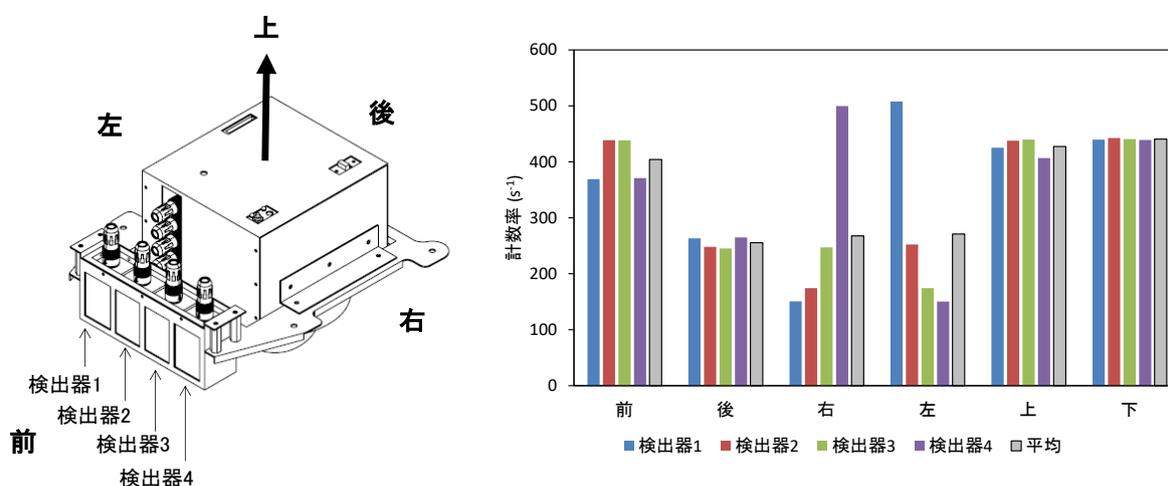


Fig. 6-13 環境用測定システムにおける  $\gamma$  線照射試験結果

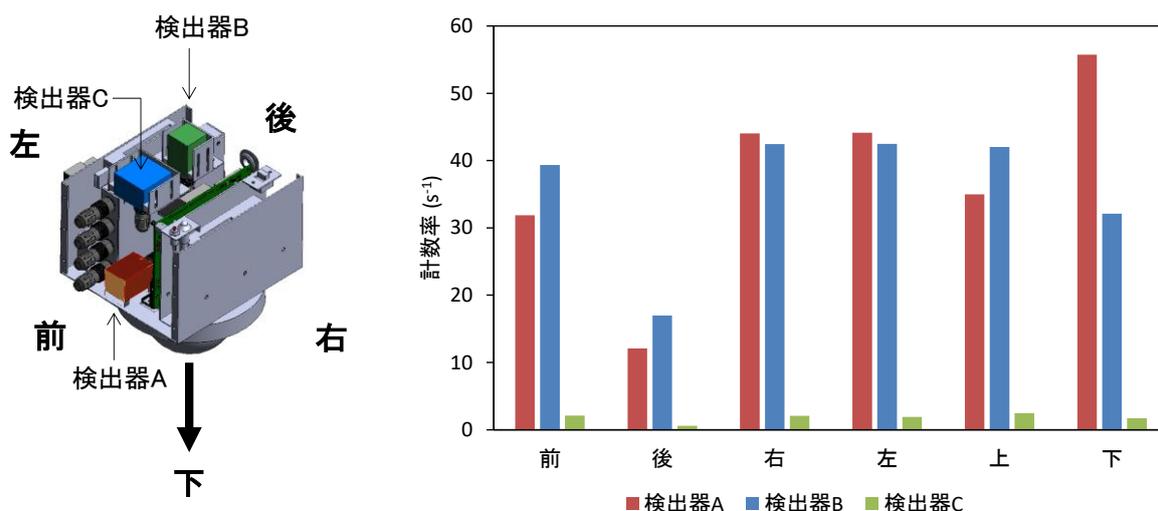


Fig. 6-14 緊急時用測定システムにおける  $\gamma$  線照射試験結果

#### 6.4. 地上運転試験

##### 6.4.1. 試験概要

搭載したシステムが電磁波ノイズ等を発し、機体制御やGNSS情報等に影響を及ぼさないか安全性を確認するため、フライト試験の前段階として地上運転試験を実施した。地上運転試験では、各放射線検出器を無人航空機 (Penguin C) に搭載し、地上でエンジンを回転させながら放射線測定試験を行うことで、機体に搭載したシステムに影響を及ぼさないか、また機体の振動による検出器へのノイズの混入がないかを確認した。試験は福島県南相馬市海岸にて行った。Fig. 6-15 に、地上運転試験時の様子を示す。地上運転試験では、機体を台座に固定し、機体のエンジン回転数を 0 rpm (静止状態)、3,000 rpm、3,500 rpm、4,000 rpm、4,500 rpm、5,000 rpm、5,500 rpm、6,000 rpm 及び 6,100 rpm と変化させ、各回転数において 5 分ずつ各放射線検出器で測定を行った。なお、フライト時の機体エンジン回転最小値は約 3,000 rpm、最大値は約 6,100 rpm である。

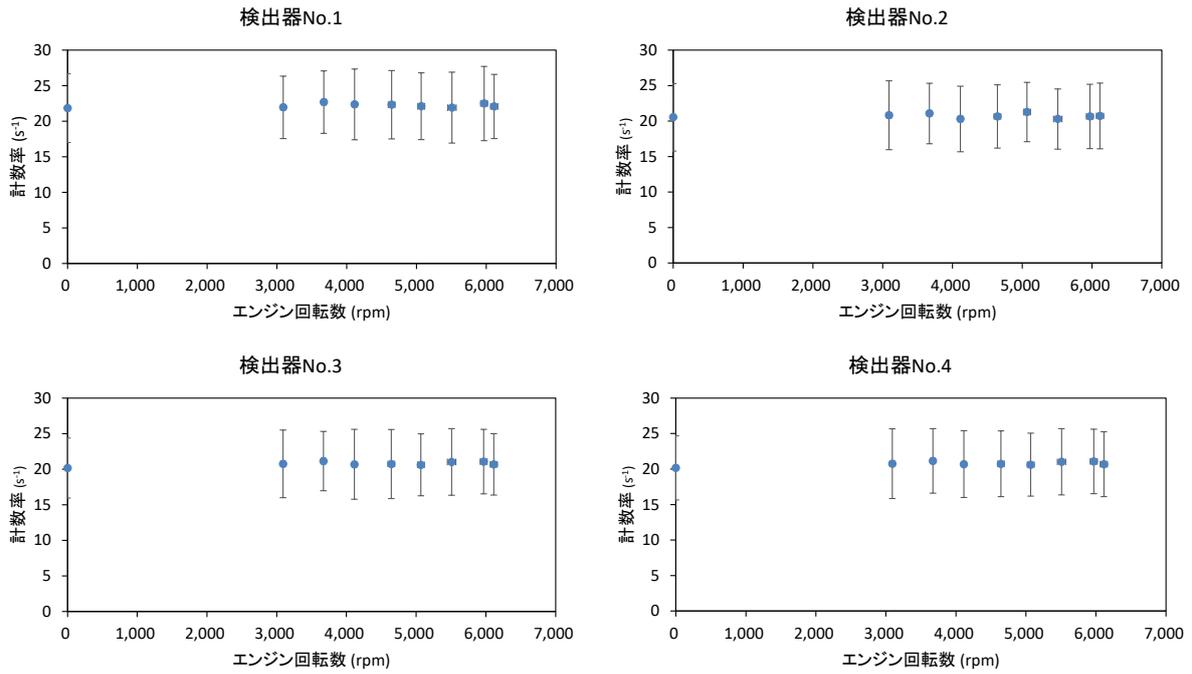


Fig. 6-15 地上運転試験時の様子

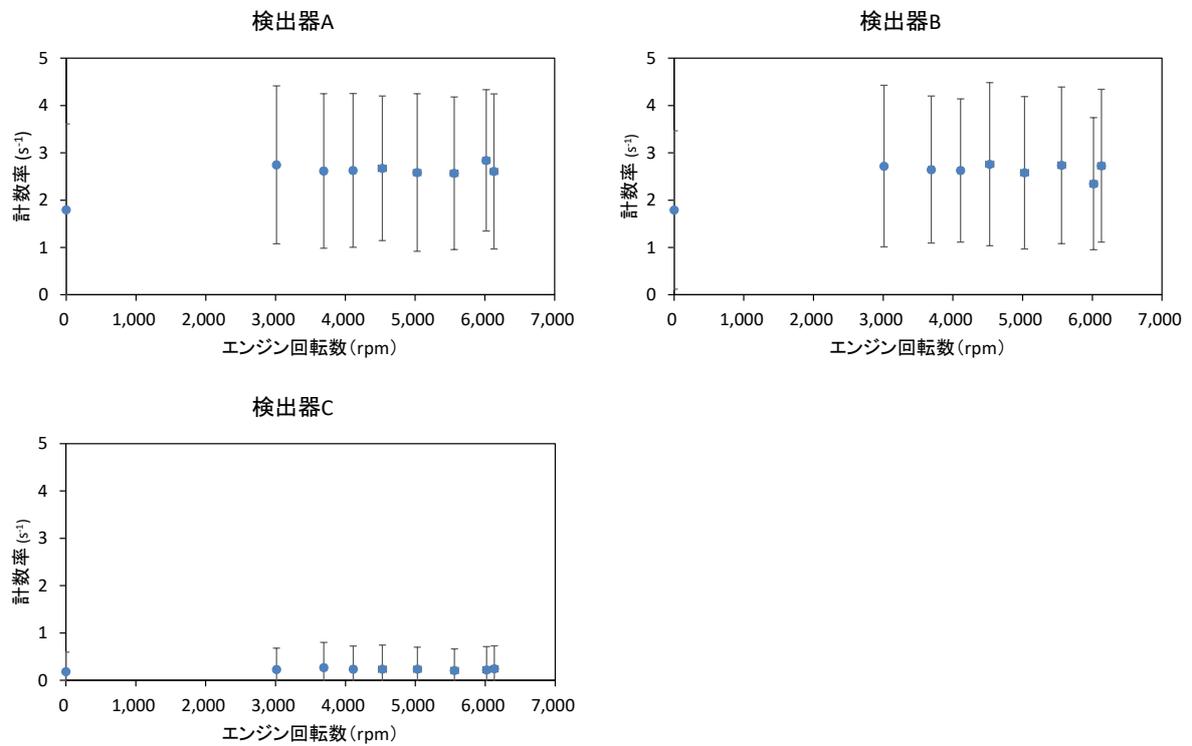
#### 6.4.2. 試験結果

地上運転試験の結果、搭載した機器による機体制御、また GNSS 情報等への影響は見られなかった。これらの結果より、各測定システムを機体に搭載してフライト試験を実施しても、運用上問題ないと考えられる。

地上運転試験における放射線検出器の計数率と機体エンジン回転数の関係について、環境用測定システムの測定結果を Fig. 6-16 に、緊急時用測定システムの測定結果を Fig. 6-17 に示す。エンジン回転数に伴う計数率の変動や、計数率及び放射線スペクトルへのノイズ混入の有無を確認した結果、両検出器共にノイズ影響などは確認されなかった。本試験では地上での運転試験のみを行ったが、フライト時の機体の振動影響は地上での試験環境と若干異なるため、フライト時の計測では放射線測定データにノイズが混入する可能性が考えられる。各放射線検出器を放射線モニタリング等の運用に使用するためには、各放射線検出器を搭載してフライト試験を行い、各機器の信頼性評価を行う必要がある。



**Fig. 6-16 環境用測定システムの地上運転試験結果**  
(図中のエラーバーは各値の標準偏差を示している。)



**Fig. 6-17 緊急時用測定システムの地上運転試験結果**  
(図中のエラーバーは各値の標準偏差を示している。)

## 7. 緊急時モニタリングで活用できる無人航空機の調査

### 7.1. 無人航空機に関する調査

#### 7.1.1. 無人航空機の性能要件の調査

中国<sup>51)</sup>、フランス<sup>52)</sup>、アメリカ<sup>53)</sup>をはじめとする世界各国で、ドローン等の無人航空機の開発が進められている。6.1 節に記載した、原子力災害時における無人航空機運用の課題を考慮した上で、緊急時モニタリングに活用する無人航空機を選定する必要がある。今回は無人航空機の中でも、緊急時モニタリングで要求される要件(性能、価格、量産性、放射線検出器統合等)を満たす機体について、無人航空機のカタログ調査、無人航空機メーカーへのヒアリングにより調査した。調査対象とした無人航空機及び調査項目を Table 7-1 に示す。調査対象とした無人航空機は全 11 機体であり、日本製が 5 機体、中国製が 2 機体、ラトビア製が 4 機体である。調査結果は調査項目ごとに Fig. 7-1 にまとめた。

本調査の結果、緊急時モニタリングに適した無人航空機は日本製の占める割合が最も高かった。放射線検出器を搭載できるペイロードのある産業機で、入手がしやすい機体としては中国製及び日本製が選択肢となる。これらの機体は航空局による審査や認証を受けている機種も多く、無人航空機を飛行させる際の手続きが簡便であり、特に国産機においては情報セキュリティ面での安心感が高い。中国産の機体の特徴として、機体を運用するソフトウェアの完成度(安定性やユーザーインターフェースの分かりやすさ)、機体を操縦する際の挙動の安定性、位置保持精度の高さなどが挙げられる。ラトビア産の機体は、国内での認証等はないが、垂直離着陸機 Vertical Take-Off and Landing (以下、VTOL 機)を開発している。VTOL 機は固定翼機と回転翼機の特徴を併せ持ち、回転翼機より長時間の滞空を得意としており、緊急時モニタリングに際しては、対象とするエリアの範囲や測定時間に応じて回転翼機と使い分けが必要である。回転翼機は低空及び低速での飛行が可能であることから、狭いエリアを高い位置分解能で調査することに適している。VTOL 機と回転翼機は機体の離着陸地点の制約が比較的少なく、日本のように電信柱や家屋が多い環境であっても、緊急時モニタリングを実施するに際して運用上の制限を受けにくい。また、VTOL を含む固定翼機は、揚力を固定翼により得ているため燃費が高く、UPZ または PAZ 外からの長距離及び長時間の運用が可能である。

動力の種類としてはバッテリー駆動の割合が高く、バッテリー駆動の機体を用いる場合には予備バッテリーを準備することが必要である。一方、ガソリン駆動の機体を用いる場合、対応するガソリンの種類を明確にするとともに、給油方法の手順を整備しておく等の対策が必要である。ペイロードは機体により大きく異なることから、緊急時モニタリングの目的に応じて、放射線検出器やその外部電源などの搭載物の重量に対応した機体を選択しなければならない。最低運用人数は回転翼機では 1 人だが、固定翼機及び VTOL 機では 2 人が必要である。より長距離での飛行を目的とする際には、より多くの運用人数が必要となる。一部の回転翼機では手動飛行が可能であることから、狭いエリアで飛行プランを柔軟に変更して緊急時モニタリングが可能である。今回調査対象とした機体では全て自動飛行が可能であったことから、予め飛行

プランを策定しておくことで、迅速な緊急時モニタリングに資する。

巡航・最大飛行速度では、回転翼機と固定翼機及びVTOL機で大きな違いが見られたことから、緊急時モニタリング結果の共有に求められる迅速性に応じた機体の選択が必要である。航続可能時間と距離でも同様の違いが見られたことから、重点的な緊急時モニタリングが必要な場所を事前に選定し、最適な位置に基地局を選定することで迅速なモニタリングに資する。回転翼機及びVTOL機では、ホバリングが可能であることから、後述の空間線量率換算係数や空気減弱係数といった換算パラメータの算出が短時間内で可能である。一方、固定翼機ではホバリングが不可能であり、3.2節に記載したテストラインフライトと同様の手順を踏む必要があり、パラメータ算出に比較的長時間を要する。今回調査対象とした機体は全て雨天時でも飛行可能だが、検出器やカメラなどの搭載物が防水仕様でない場合、ケースに収納するなど対策が必要である。

緊急時モニタリングの際の安全確認は、カメラでの映像とリアルタイムに取得される機体ログを基地局ソフトウェアで確認することによって達成される。衝突防止機能も機体の安全を担保する有効な手段であるが、当該機能を有しているのは現状として回転翼機のみであるため、その他の機種では自動飛行に向けて予め対象エリアの障害物や地形を鑑みて、安全な飛行計画を策定することが有効である。飛行中に無線通信が断絶した際、今回調査対象とした全機体ともに自動で帰還することが可能であるため、より安全な飛行運用に資する。機体の価格について、回転翼機は安く、固定翼機及びVTOL機は高い傾向にあった。FIXAR 025のように量産性が低い機体については、価格が高くなる傾向にある。複数の拠点において無人航空機を用いた緊急時モニタリング体制を整備するためには、機体の量産性と価格が重要な要素となる。FIXAR 025は開発段階にあり、放射線検出器を搭載するには機体内部の構造と電源供給の方式について検討が必要である。検出器の搭載が可能である機体についても、機体の種類によって求められる機体構造の位置情報が異なる。PF2-AE InspectionとATLAS PROは、カメラ以外のものを搭載することが想定されておらず、緊急時モニタリングに適用するのであれば、PF2-AE Deliveryなどの他の機体の方が適している。MATRICE 300では、搭載する検出器とバッテリーの総重量が300g程度であれば、緊急時モニタリングに活用することが可能である。SOTENに関しては、バッテリー容量が小さく飛行時間も少ないことから、緊急時モニタリングに適用する場合、より小型の検出器の開発が必要となる。

原子力発電所事故に限らない複合災害発生時には、放射線検出器だけでなくカメラによる機体周辺の状況把握が非常に有効である。しかし、カメラと放射線検出器の同時搭載は、パイロットの観点から一部の回転翼機では限定される。また、機体に備えられているポートから放射線検出器に電源供給可能な機体もあったが、一部の回転翼機では飛行のためのバッテリーを放射線検出器に配分することになるため、飛行時間が短縮されてしまう。よって、モバイルバッテリーのような別システムの電源供給システムを用意する必要がある。FAZER R G2やPenguin Cのように、機体の通信機能を利用して放射線測定システムへデータを送受信できるように開発された機体を除く、ほとんどの機体でデータ送受信が不可能であったことから、検出器単体でシステムへデータ送受信できるような通信システムを別途開発しなければならない。併せて、長距離通信機器を利用して、広範囲のモニタリングで得られるデータをリアルタイムで基地局

に転送することも検討が必要である。

国内のドローン企業の活動が目立ち始めた 2016 年(平成 28 年)時点では、既に主力機 Phantom の第四世代機を送り出していた DJI 社製ドローンの飛行性能に対して、国産機が太刀打ちできるものではなかった。しかし、近年は機体の技術開発が進むことで、無人航空機としての国産機の飛行性能は、外国産の機体と遜色がなくなってきた。以上の調査の結果から、国内を代表するリーディングカンパニーとして国内初のレベル 4(有人地帯の目視外飛行)対応機の開発及び実証飛行等で実績を持つ ACSL 社製、及び世界トップシェアでドローン業界のデファクトスタンダードとなっている DJI 社の製品を選定した。DJI 社の米国市場シェアは一般向けで 7 割以上<sup>54)</sup>と、ドローンを初めて操作する者でも利用しやすい製品を展開していることから、日本国内でも不自由なく機体の操縦できることが想定される。一方で、メーカーが中国企業であり今後の政府方針によって調達に支障を来すリスクを抱えている<sup>55)</sup>ため、運用にあたり注視が必要である。

約 2 kg の放射線測定器を搭載することを想定した上で、緊急時モニタリングに対応するために、ペイロードや検出器の搭載の可否を考慮し、ACSL 社製 PF2 と DJI 社製 MATRICE 300 RTK(以下、M300)の 2 機種を選定した。PF2 は衝突防止機能を有さない従来モデルと、衝突防止機能を有する後継機モデル PF2-AE がある。両機体は、縮尺や電源機構などの基本的な構造が同一である。自動飛行試験を含む衝突防止機能以外の試験を PF2 の従来モデルで実施し、衝突防止機能の試験のみ PF2-AE で実施した。選定した 2 機体について、緊急時モニタリングを実施するにあたって必要な項目について、より詳細にヒアリングした結果の一部を Table 7-2 に示す。

Table 7-1 調査対象とした無人航空機及び調査項目

(1/2)

番号	項目	機体					
							
0	機種	PF2	MATRICE 300RTK	PF2-AE Delivery	PF2-AE Inspection	SOTEN(蒼天)	MATRICE 30
1	製造国	日本	中国	日本	日本	日本	中国
2	機体の種類	回転翼機	回転翼機	回転翼機	回転翼機	回転翼機	回転翼機
3	動力	バッテリー	バッテリー	バッテリー	バッテリー	バッテリー	バッテリー
4	ペイロード(kg)	2.75	2.7	1.3	2.7	0.28	0.3
5	最低運用人数	1	1	1	1	1	1
6	手動飛行の可否	可	可	可	可	可	可
7	自動飛行の可否	可	可	可	可	可	可
8	巡航・最大飛行速度 (m/s)	10	23	10	10	15	23
9	航続可能時間(最大) (分)	30	55	18	23	29	41
10	航続可能距離(通信距離) (km)	4	8※	4	4	4	8※
11	ホバリングの可否	可	可	可	可	可	可
12	雨天時のフライトの可否	可	可	可	可	可	可
13	カメラでの映像確認の可否	可	可	可	可	可	可
14	衝突防止の可否	可***	可	可	可	可	可
15	機体ログのリアルタイム取得の可否	可	可	可	可	可	可
16	機体ログのリアルタイム取得の仕様	基地局ソフトウェア上での確認	基地局ソフトウェア上での確認	基地局ソフトウェア上での確認	基地局ソフトウェア上での確認	基地局ソフトウェア上での確認	基地局ソフトウェア上での確認
17	無線通信断絶時の自動帰還	可	可	可	可	可	可
18	概算価格(機体一式) (万円)	350	150	350	350	140	100
19	量産性	可	可	可	可	可	可
20	放射線検出器の搭載の可否	可	可	可	不可	不可	可
21	放射線検出器を搭載するために必要な情報	機体下部の構造	機体下部の構造	機体下部の構造	機体下部の構造	機体上部の構造	機体上部の構造
22	カメラと放射線検出器の同時搭載の可否	可	可	可	不可	不可	可
23	機体から放射線検出器等への電源供給の可否	可	可	可	可	不可	可
24	機体から放射線検出器等への電源供給の仕様	複数の機体ポートからの給電	複数の機体ポートからの給電	複数の機体ポートからの給電	複数の機体ポートからの給電	不可	複数の機体ポートからの給電
25	機体の通信機能を利用した放射線測定システムへのデータ送受信の可否	不可	不可	不可	不可	不可	不可
26	長距離通信(セルラー通信等)搭載の可否	可	可	可	可	可	可

※: 日本仕様、※※: 衛星を使用した場合、※※※: 後継機

Table 7 1 調査対象とした無人航空機及び調査項目

(2/2)

番号	項目	機体				
	写真					
0	機種	ATLAS PRO	FAZER G2	Penguin C	PenguinC VTOL	FIXAR025
1	製造国	ラトビア	日本	ラトビア	ラトビア	ラトビア
2	機体の種類	回転翼機	回転翼機	固定翼機	垂直離着陸機	垂直離着陸機
3	動力	バッテリー	ガソリン	ガソリン	ガソリン	バッテリー
4	ペイロード(kg)	0.315	33	5	4.5	10
5	最低運用人数	1	2	2	2	3
6	手動飛行の可否	可	可	不可	不可	不可
7	自動飛行の可否	可	可	可	可	可
8	巡航・最大飛行速度 (m/s)	15.5	20	22	33	23
9	航続可能時間(最大) (分)	32	100	1320	720	210
10	航続可能距離(通信距離) (km)	10	100**	100	180**	100**
11	ホバリングの可否	可	可	不可	不可	不可
12	雨天時のフライトの可否	可	可	可	可	可
13	カメラでの映像確認の可否	可	可	可	可	可
14	衝突防止の可否	可	不可	不可	不可	不可
15	機体ログのリアルタイム取得の可否	可	可	可	可	可
16	機体ログのリアルタイム取得の仕様	基地局ソフトウェア上での確認	基地局ソフトウェア上での確認	基地局ソフトウェア上での確認	基地局ソフトウェア上での確認	基地局ソフトウェア上での確認
17	無線通信断絶時の自動帰還	可	可	可	可	可
18	概算価格(機体一式) (万円)	600	8000	15000	15000	3000
19	量産性	可	可	可	可	不可
20	放射線検出器の搭載の可否	不可	可	可	可	不可
21	放射線検出器を搭載するために必要な情報	機体上部の構造	機体下部の構造	機体内部の構造	機体内部の構造	機体内部の構造
22	カメラと放射線検出器の同時搭載の可否	不可	可	可	可	不可
23	機体から放射線検出器等への電源供給の可否	不可	可	可	可	不可
24	機体から放射線検出器等への電源供給の仕様	不可	機体ポートからの給電	機体ポートからの給電	機体ポートからの給電	不可
25	機体の通信機能を利用した放射線測定システムへのデータ送受信の可否	不可	可	可	可	不可
26	長距離通信(セルラー通信等)搭載の可否	不可	可	可	可	可

※: 日本仕様、\*\*※: 衛星を使用した場合、\*\*\*※: 後継機

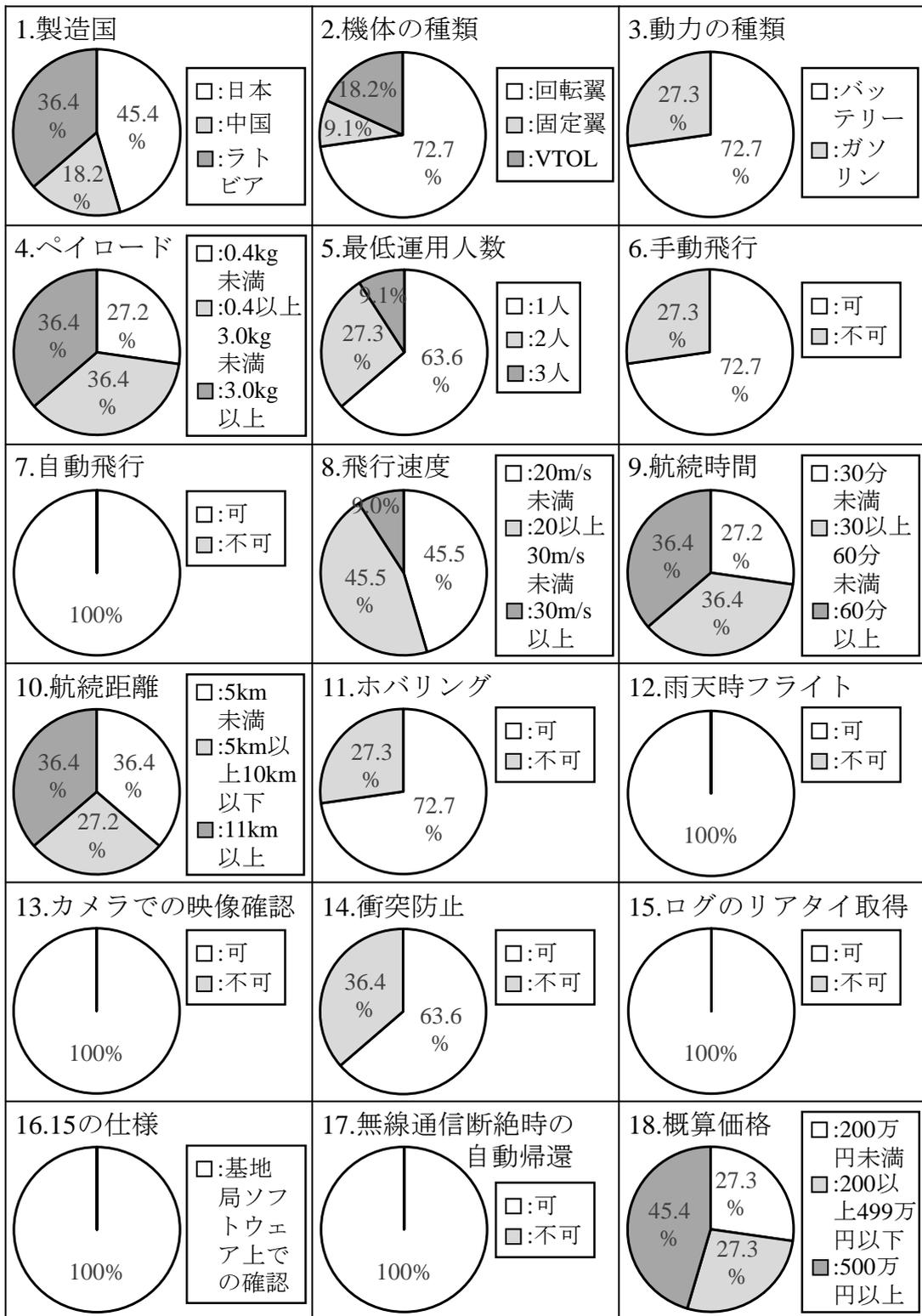


Fig. 7-1 無人航空機の調査結果

(1/2)

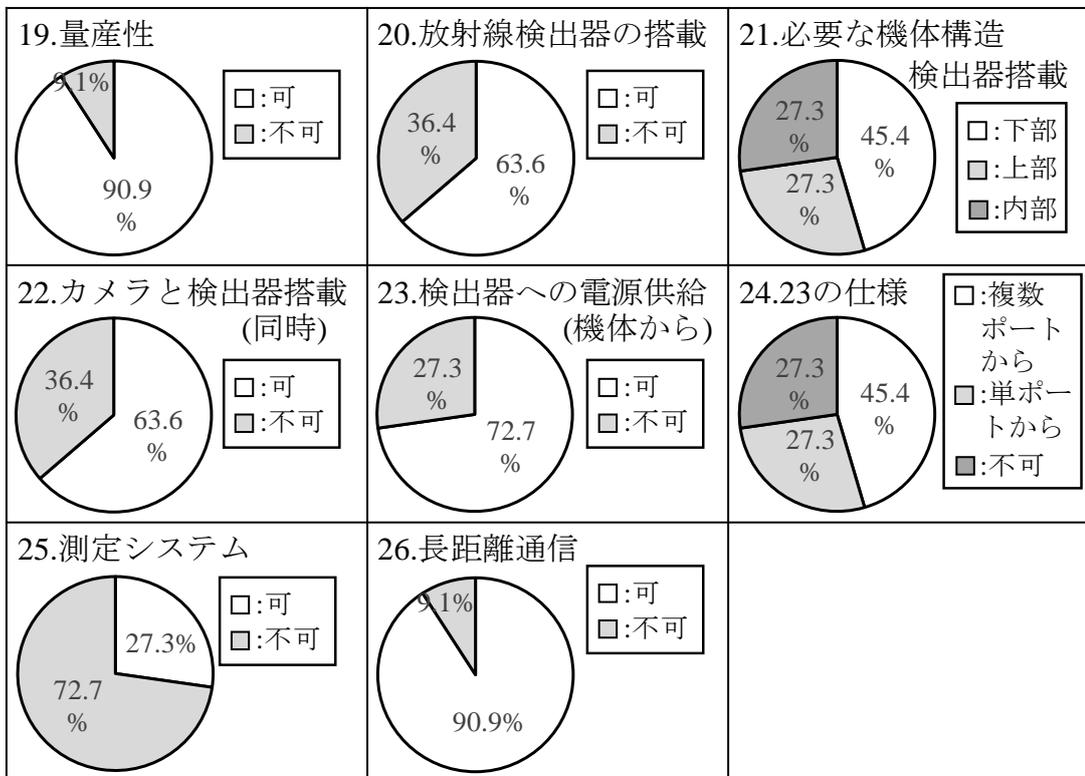


Fig. 7 1 無人航空機の調査結果  
(2/2)

Table 7-2 PF2 及び M300 に関する詳細なヒアリング結果

ヒアリング項目	PF2	M300
機体から放射線検出器等への電源供給の可否とその仕様	下部ボックス内にて 12V/5/3.3V 合計 2 A の出力が利用可能 JST-GH コネクタ 2 ピン (コネクタ仕様 1 A)	PSDK ポート 3 ヶ所 (上部左側、下部両側) : 13.6 V または 17.0 V, 4A, USB タイプ C 形状コネクタ OSDK ポート 1 ヶ所 (上部右側) : 24.0 V, 4 A, USB タイプ C 形状コネクタ
機体の通信機能を利用した放射線測定システムへのデータ送受信の可否	不可	標準機能では不可
機体ログのリアルタイム取得の可否とその仕様	再利用可能な形かつリアルタイムは不可 事後に受信データのログを取得可	標準仕様では非対応 飛行後のログ抽出は可
カメラと放射線検出器の同時搭載の可否	FPV※カメラ：機首方向に固定 検出器：FPV カメラプレート直下に固定 上記の場合は可	FPV カメラ：機首方向に固定(標準搭載) 検出器：機体下部に固定 上記の場合は可
長距離通信機器 (セルラー通信等) 搭載の可否	標準機体では不可	純正セルラー通信モジュールは日本国内で非対応

※: First Person View : 機体に搭載されたカメラからの一人称視点の視界のこと。

#### 7.1.2. 無人航空機を飛行させるための手続きの調査

無人航空機を飛行する場合の法律、制度、飛行させるための免許等の手続きを調査した。無人航空機の飛行を実施するための流れは、概ね次の通りである。

- (1) 機体登録の申請
- (2) 機体認証・技能証明の取得
- (3) 飛行許可・承認の申請
- (4) 飛行計画の通報
- (5) 飛行日誌の記載

各項目について、以下に詳述する。

### (1)機体登録の申請

新規に購入された無人航空機の重量が 100 g 以上の場合、登録が必要となる<sup>56)</sup>。緊急時モニタリングには放射線検出器の搭載が必須であり、必然的に機体重量は 100 g を超えることから登録作業が必要になる。2024 年 (令和 6 年) 3 月現在では、前提として、登録情報を電波にて周囲に発信するリモート ID 機能の装備が義務付けられており、機体に内蔵されていない機種については外付けリモート ID 発信機を装備する必要がある。以下にその登録手順を説明する。

- (1)-1 ドローン情報基盤システム Drone/UAS Information Platform System (以下、DIPS) 2.0 にアカウントを作成する。
- (1)-2 DIPS 上から登録する無人航空機の諸情報を入力する。
- (1)-3 登録費用を支払う。
- (1)-4 DIPS アカウント上に認可された機体記号が発給される。
- (1)-5 機体記号を機体表面に表記する。
- (1)-6 リモート ID 機能に発給された機体記号を紐付けする。

### (2)機体認証・技能証明の取得

2024 年 (令和 6 年) 3 月現在の航空法においては、有人地帯での目視外飛行となるカテゴリーⅢ・レベル 4 飛行を実施する場合に限り、第一種機体 (型式) 認証及び一等操縦技能証明の取得が必要となる<sup>56)</sup>。緊急時に、立ち入り管理が現実的でない都市部の人口集中地区がモニタリング対象となる事態がありうる。しかし、同年 3 月時点で、日本国内で第一種認証機体は ASCL 社の PF2-CAT3 に限定されている<sup>57)</sup>。この機体はペイロードが 1.0 kg であり、今回搭載する放射線検出器 (2 kg) を下回るため、現状第一種認証機体を用いた緊急時モニタリングの対応は困難である。なお、住民が避難したことで無人となった地帯等での飛行であれば、カテゴリーⅡ・レベル 3 飛行となるため、未認証機体及び技能証明のない操縦者でも運用に支障はない。

### (3)飛行許可・承認の申請

航空法において、以下 4 種類の飛行空域及び 6 種類の飛行方法については特定飛行と定義され、国土交通大臣による飛行の許可及び承認が必要である<sup>56)</sup>。

#### (3)-1 飛行する空域

- ・ 空港等の周辺
- ・ 対地高度 150m 以上の上空
- ・ 人口集中地区の上空
- ・ 緊急用務空域

#### (3)-2 飛行の方法

- ・ 夜間での飛行
- ・ 目視外での飛行

- ・人又は物件と距離を確保できない飛行
- ・催し場所上空での飛行
- ・危険物の輸送
- ・物件の投下

### (3)-3 包括申請

この内、人口集中地区の上空、夜間での飛行、目視外での飛行及び人又は物件と距離を確保できない飛行については、包括申請として事前に年間の許可・承認を得ておくことが可能である(カテゴリーIII・レベル4飛行を除く)。この場合でも、個別飛行毎の申請に準じた安全対策(飛行エリアの立ち入り管理や補助者の配置等)が都度行われていることが前提となる。また、前記以外の特定飛行については包括申請ができず、飛行範囲と時間を明示した上で飛行毎の個別申請が必要である。

### (4) 飛行計画の通報

ドローンの特定飛行を行う場合には、事前に飛行範囲と時間をDIPS上で通報することが義務付けられている。(3)での飛行申請とは別個の物であり、申請に対する許可・承認を得ただけでは飛行計画の通報とは見做されないことに注意が必要である<sup>56)</sup>。また、特定飛行に当てはまらない飛行に関しても、飛行前に通報を行うことが推奨される。

### (5) 飛行日誌の記載

ドローンの特定飛行を行う前後には、航空局によって定められた飛行日誌の作成が義務付けられている<sup>56)</sup>。飛行日誌は飛行記録、日常点検記録及び点検整備記録から成る。飛行記録は飛行した日時や場所、操縦者等を記録した物であり、主として飛行時間管理のための記録である。日常点検記録は飛行直前及び直後の機体点検の内容を記録するものであり、航空局の参考要領ないし製造者の取扱説明書等に準じた項目の点検を実施し記録する。点検整備記録は上記に加えて改造及び整備の内容(部品を交換した場合にあっては、当該交換部品名を含む)を記載することが求められており、上記の改造及び整備を実施した場合か、概ね20飛行時間毎に実施することが定められている。なお、特定飛行に当てはまらない飛行に関しても飛行日誌の作成は推奨される。

## 7.2. 手動飛行試験の実施

### 7.2.1. 飛行試験に関わる事前準備

対象機体の基礎性能及び実証試験の項目として、以下の通り検討及び準備した。なお、実証試験場としてRTFを利用した。試験内容及び施設利用状況に鑑み、使用範囲は瓦礫・土砂崩落フィールドとし、機体の衝突防止機能試験は後日試験となったため、屋内試験場も利用した。なお、RTF一帯は無人航空機の飛行の許可が必要となる空域ではなく、利用許可を受けた

私有地内での昼間・目視内飛行であることから承認が必要となる飛行の方法にもあたらない。試験実施前に瓦礫・土砂崩落フィールドを事前に下見し、リスクアセスメントを実施することで安全に作業を行うことができるか確認し、リスクアセスメントワークシートにまとめた。市場調査の結果に従い、PF2 及び M300 の 2 機種を選定して準備した。

本試験にあたって選定した 2 機種の内、PF2 については試験に先立ち基本的な取り扱い慣熟のための訓練を福島県南相馬市の真野交流センター (Fig. 7-2) において実施した。同場所は RTF と同様に、飛行に関する承認等は不要である。当該訓練の実績を Table 7-3 に示す。PF2 の取り扱い講習を実施後、PF2 及び M300 を RTF 内の瓦礫・土砂フィールド (Fig. 7-3) に持ち込み、衝突防止機能以外の基礎性能の評価試験を実施した。衝突防止機能は RTF 内の屋内試験場 (Fig. 7-4) に PF2 及び M300 を持ち込み、評価試験を実施した。当該飛行試験の実績を Table 7-4 に示す。



**Fig. 7-2 PF2 の取り扱い慣熟のための訓練に使用した場所 (真野交流センター)**  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

**Table 7-3 PF2 の取り扱い慣熟のための訓練の実績**

日付	訓練内容
12/11 (月)	実機を使用しての取り扱い確認、手動・自動操縦での訓練飛行
12/12 (火)	強風により実機飛行は中止、自動飛行プラン作成等の演習



**Fig. 7-3 飛行性能試験に使用した場所 (RTF 瓦礫土砂崩落フィールド)**  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)



**Fig. 7-4 衝突防止機能試験に使用した場所 (RTF 屋内試験場)**  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

**Table 7-4 飛行試験実績**

日付	実施内容
12/13(水)	強風により飛行は中止、PF2 の展開性能試験等を実施
12/14(木)	PF2 及び M300 の自動・測定飛行及び地上測定を実施
12/15(金)	強風により飛行は中止、M300 の展開性能試験等を実施
12/18(月)	M300 の手動飛行を実施
12/20(水)	PF2 の手動飛行を実施
02/14(水)	PF2-AE にて衝突防止機能の試験を実施

## 7.2.2. 機体の飛行性能の評価

### (1) 手動での基本水平飛行

手動飛行でドローンによる放射線モニタリングを行う際の基本動作は、対地高度を一定とし機体を水平及び斜め方向に飛行させる（基本水平飛行）。基本水平飛行において、離陸後対地高度を 3.0 m に保ちエレベーター及びエルロンの操作により水平移動する性能を試験した。始めに、前後左右の移動 (Fig. 7-5) 及び斜め移動を実施した (Fig. 7-6)。飛行ログから抽出した PF 及び M300 の基本水平飛行中の対地高度変化を Fig. 7-7 及び Fig. 7-8 にそれぞれ示す。両機体とも水平移動中に高度を一定に保ち、急激な高度の変化が無かった。Table 7-5 に示す水平移動中の位置精度は、同表に記載した M300 の仕様上で保証されたホバリング位置精度内に収まることが確認できた。なお、DJI 社の公称値は、GPS を有効にして、ビジョンポジショニングシステム\*2を無効にした場合の値である。前後左右移動した場合に比べ、斜め移動した方が対地高度の標準偏差が大きくなった。ドローンを送信機で操作する際には、スティック・モードが 2 種類あり、国産のドローンではスティック・モード 1 での操縦が主流である。スティック・モード 1 での操縦では、操縦機の左と右の 2 本のスティックを同時操作して斜め移動を実現するため、僅かな入力のズレが対地高度方向の操舵指示として現れた可能性がある。しかし、実用上問題のない誤差範囲であり、熟練した操縦者の官能評価結果として、PF2、M300 共に送信機の操舵量と機体の移動量は概ね意図した通りの動作であった。

\*2 赤外線センサーと画像カメラを使い、GPS がなくても DJI の機体の水平・垂直位置を維持する機能。

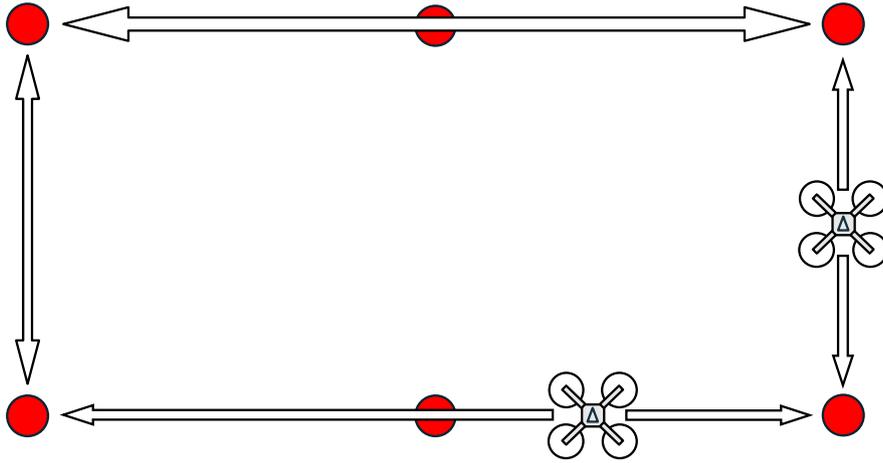


Fig. 7-5 水平飛行 (前後左右移動) のイメージ

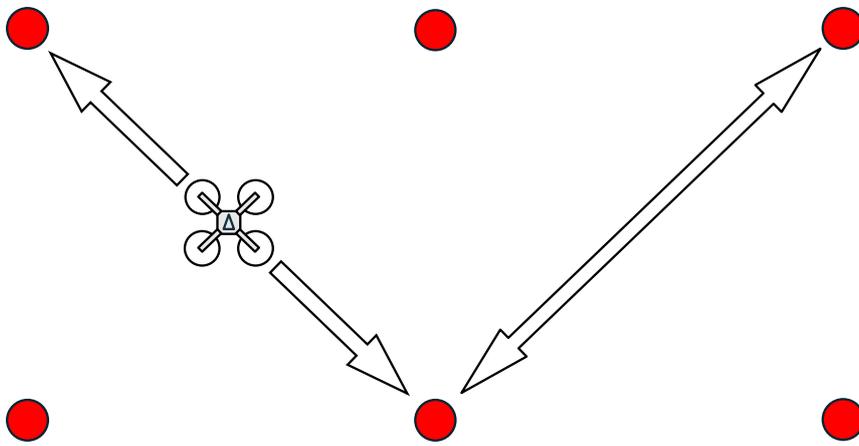


Fig. 7-6 水平飛行 (斜め移動) のイメージ

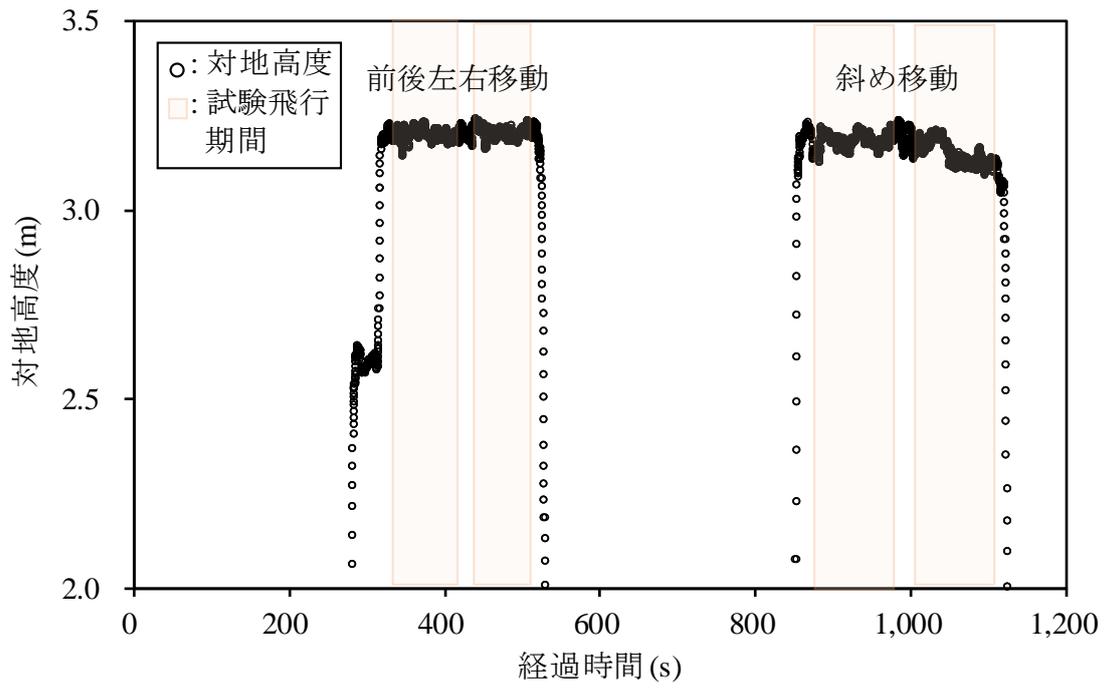


Fig. 7-7 PF2 の水平飛行中の経過時間に対する対地高度の変化

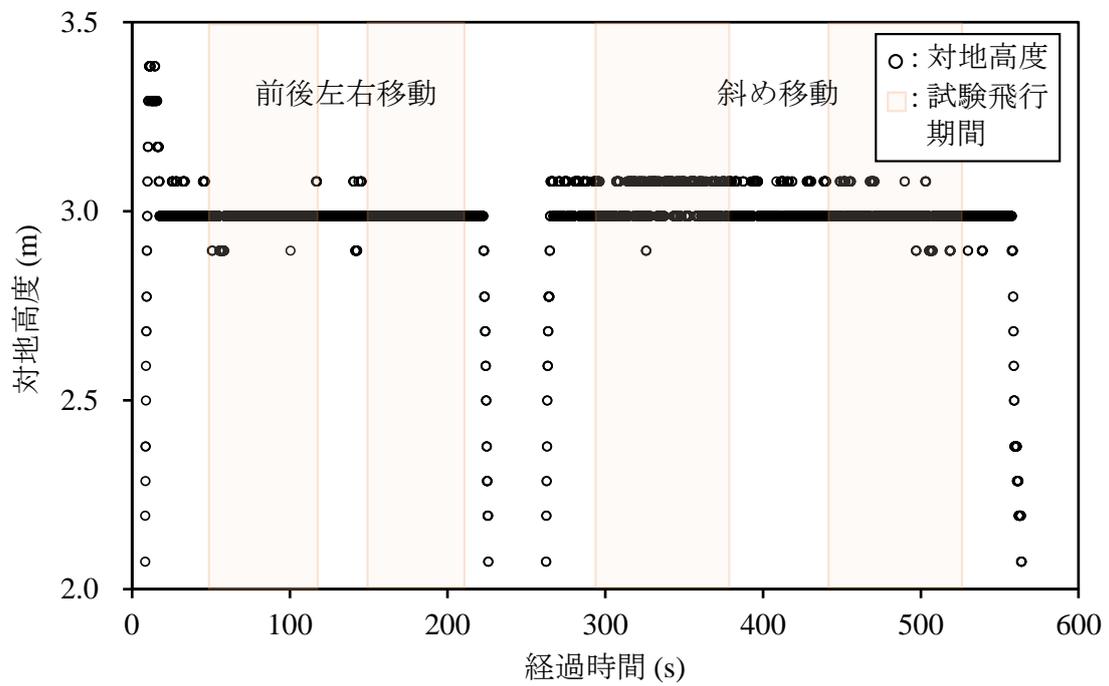


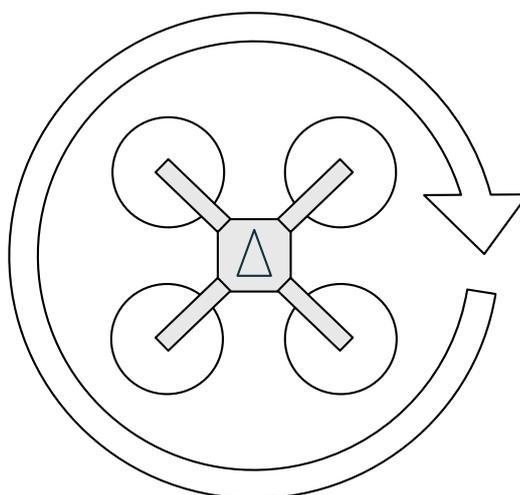
Fig. 7-8 M300 の水平飛行中の経過時間に対する対地高度の変化

**Table 7-5 基本水平飛行中の対地高度変化**

飛行項目	平均値 ± 標準偏差	
	PF2	M300
機体		
水平飛行 (前後左右移動) (m)	3.20 ± 0.015	2.99 ± 0.013
水平飛行 (斜め移動) (m)	3.16 ± 0.031	3.01 ± 0.042
水平飛行精度のメーカー公称値 (ホバリング時) (m)	計測値 ± 0.5	計測値 ± 1.5

(2) 手動での基本旋回飛行

手動飛行でドローンによる放射線モニタリングを行う際に、異なる方向へ機体の進行方向を変更した上で、高度を一定で飛行させる飛行方法がある(基本旋回飛行)。基本旋回飛行においては、離陸後対地高度を 3.0 m に保ち、ラダー操作によりその場で機首方位を変化させる性能について試験した (Fig. 7-9)。飛行ログから抽出した旋回飛行中の高度変化と測定地点からの距離を Fig. 7-10 及び Fig. 7-11 に示す。両機体とも旋回飛行中に高度と水平位置を一定に保っており、急激な変化がないことが分かる。Table 7-6 に示す旋回飛行中の高度の精度は、仕様上保証されたホバリング位置精度内に収まることが確認できた。これは無風状態でホバリングしたときに対する精度であるため、飛行方法により当該基準を超える可能性もあるが、水平方向の精度についても、Table 7-7 に示すように仕様上保証されたホバリング位置精度内に収まった。熟練した操縦者の官能評価結果として、PF2、M300 共に送信機の操舵量と機体の移動量は概ね意図した通りの動作であった。



**Fig. 7-9 基本旋回飛行のイメージ**

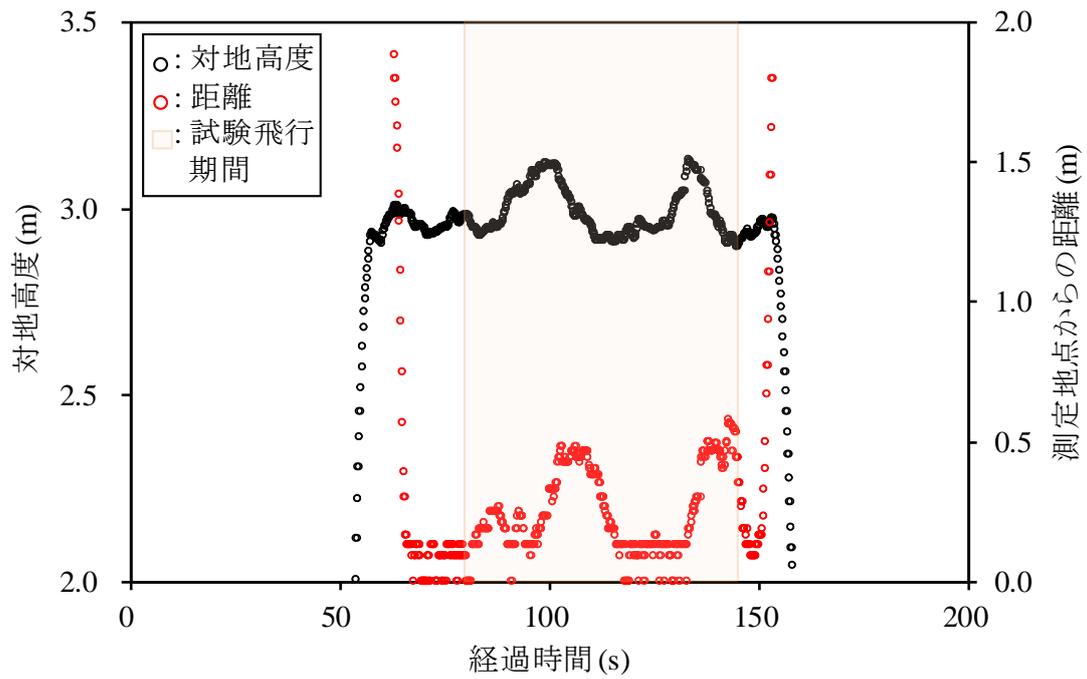


Fig. 7-10 PF2 の巡回飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの距離の変化

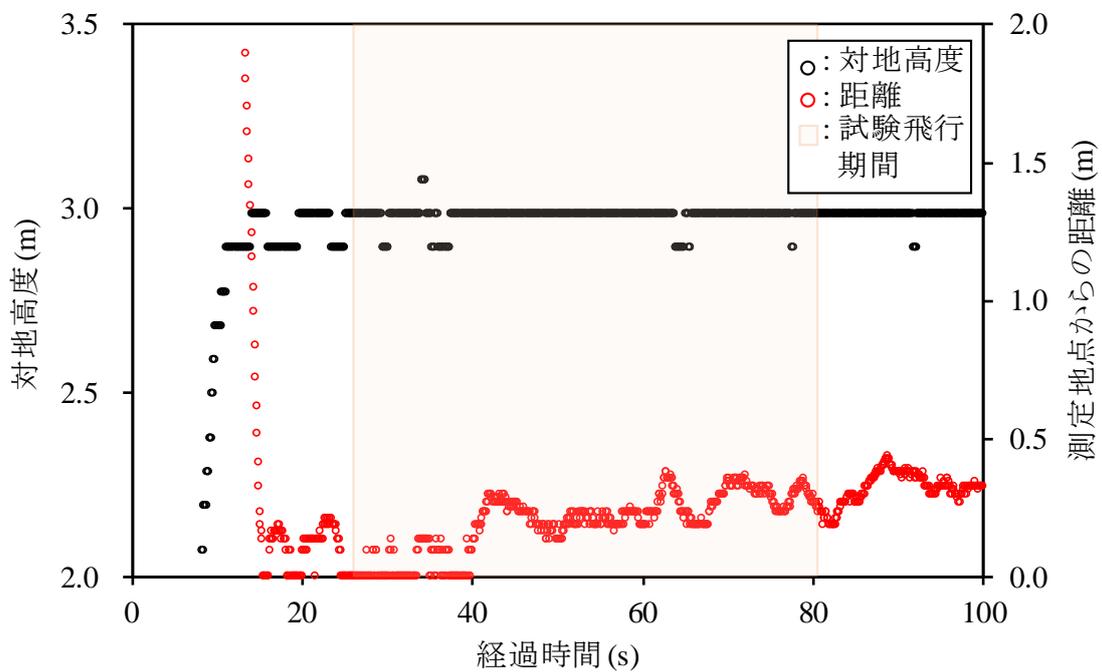


Fig. 7-11 M300 の巡回飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの距離の変化

**Table 7-6 基本旋回飛行中の対地高度変化**

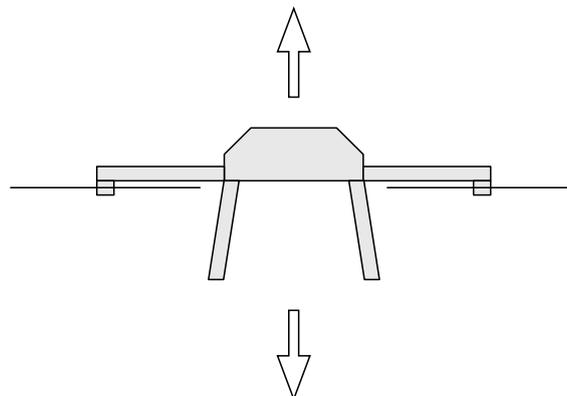
飛行項目	平均値 ± 標準偏差	
機体	PF2	M300
基本旋回飛行 (m)	2.99 ± 0.065	2.98 ± 0.027
ホバリング精度のメーカー 公称値 (m)	計測値 ± 0.5	計測値 ± 1.5

**Table 7-7 基本旋回飛行中の水平変化**

飛行項目	平均値 ± 標準偏差	
機体	PF2	M300
基本旋回飛行 (m)	0.242 ± 0.152	0.195 ± 0.109
ホバリング精度のメーカー 公称値 (m)	計測値 ± 0.5	計測値 ± 0.5

(3) 手動での基本昇降飛行

ドローンで空気減弱係数を取得するためには、ある地点でホバリングさせる必要がある(基本昇降飛行)。基本昇降飛行においては、離陸後高度 3.0 m からスロットル操作によりその場で高度を 10.0 m まで変化させる性能を試験した(Fig. 7-12)。飛行ログから抽出した PF2 及び M300 の昇降飛行中の高度変化と測定地点からの距離を Fig. 7-13 及び Fig. 7-14 にそれぞれ示す。両機体とも昇降飛行中に水平位置を一定に保ち、急激な変化がないことが分かる。Table 7-8 に示した昇降飛行中の水平位置の精度は、両機体ともメーカー公称値の範囲に収まった。送信機スティック・モード 1 での操縦では高度と左右移動が同じスティック操作に割り振られている。M300 の方が PF2 に比べて標準偏差が大きくなったのは、送信機スティック・モード 1 で操縦した際に、僅かな入力の変位が左右方向の操舵指示として現れた可能性がある。しかし、実用上問題のない誤差範囲の偏差であり、操縦者の官能評価結果として、PF2、M300 共に送信機の操舵量と機体の移動量は概ね意図した通りの動作であった。



**Fig. 7-12 基本昇降飛行のイメージ**

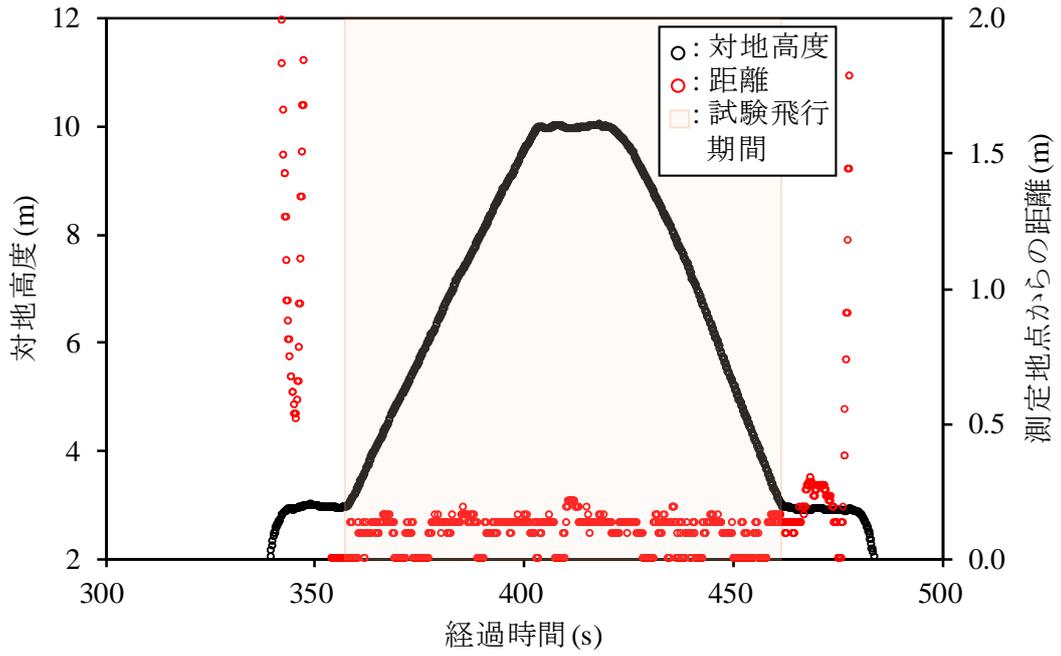


Fig. 7-13 PF2 の昇降飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの距離の変化

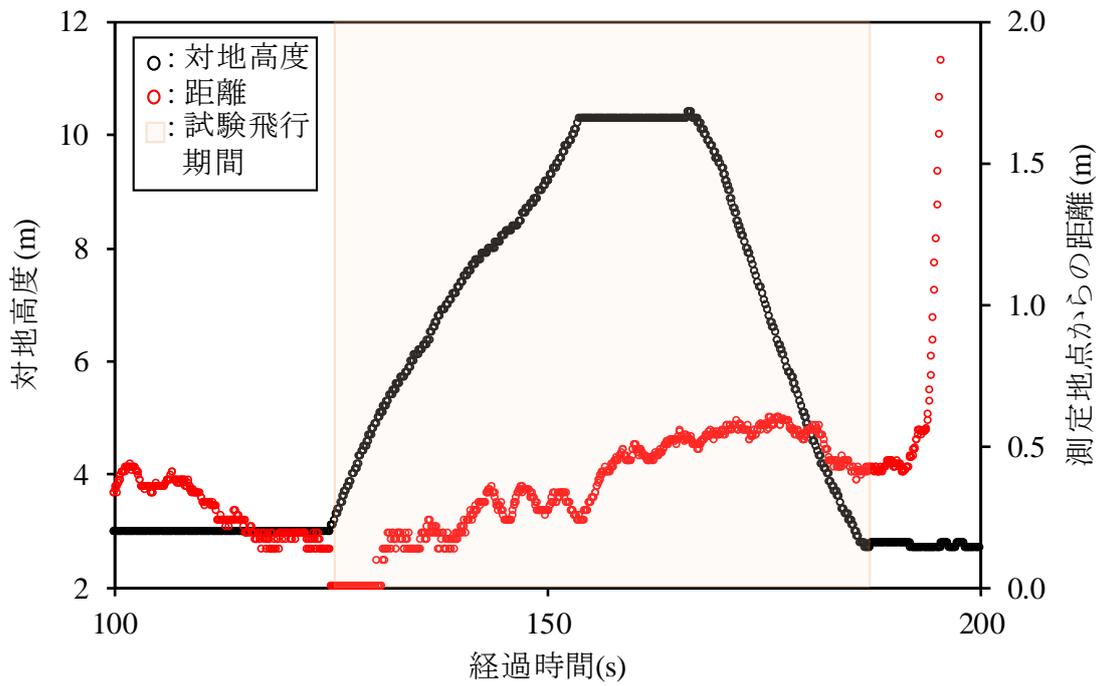


Fig. 7-14 M300 の昇降飛行中の経過時間に対する対地高度と基地局から測定地点までの距離の変化

Table 7-8 基本昇降飛行中の水平変化

飛行項目	平均値 ± 標準偏差	
	PF2	M300
機体		
旋回飛行 (m)	0.0953 ± 0.0620	0.349 ± 0.180
ホバリング精度のメーカー 公称値 (m)	計測値 ± 0.5	計測値 ± 0.5

(4) 手動での組み合わせ飛行 1 (8 の字)

手動飛行でドローンによる放射線モニタリングを行う際に、構造物を避けて飛行するために、対地高度を一定に保ちつつ機体を 8 の字に旋回させる場合もある (組み合わせ飛行 1 (8 の字))。組み合わせ飛行 1 (8 の字) においては、離陸後高度を 3.0 m に保ちエレベーター、エルロン及びラダーの操作により水平移動する性能を試験した (Fig. 7-15)。飛行ログから抽出した PF2 及び M300 の組み合わせ飛行 1 (8 の字) 中の高度変化を Fig. 7-16 及び Fig. 7-17 に示す。両機体とも組み合わせ飛行 1 (8 の字) 中に高度を一定に保ち、急激な高度の変化がないことが分かる。Table 7-9 に示す組み合わせ飛行 1 (8 の字) 中の高度の位置精度は、両機体とも M300 が仕様上保証されたホバリング位置精度内に収まった。PF2 の方が M300 に比べて標準偏差は大きくなったが、8 の字飛行は全ての舵を連続的に使用する高度な飛行であり、今回の結果が機体毎の性能差によるものとはまでは言えず、誤差の範疇と考えられる。従って、熟練した操縦者の官能評価結果としては、PF2、M300 共に送信機の操舵量と機体の移動量は概ね意図した通りの動作であった。

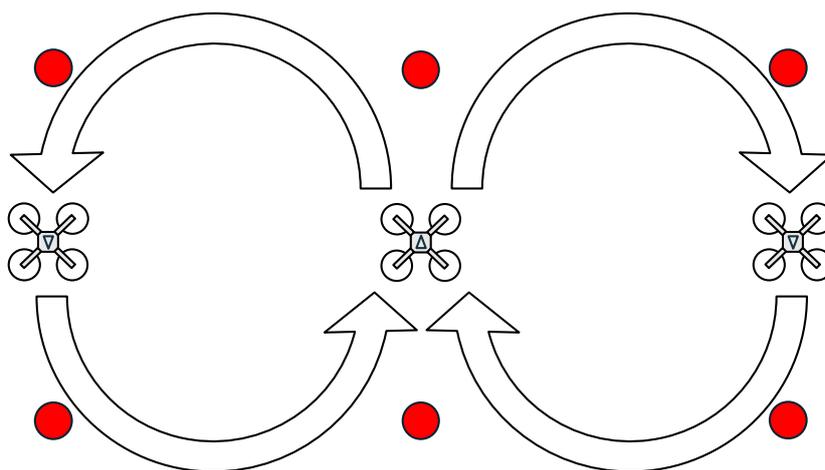


Fig. 7-15 組み合わせ飛行 1 (8 の字) のイメージ

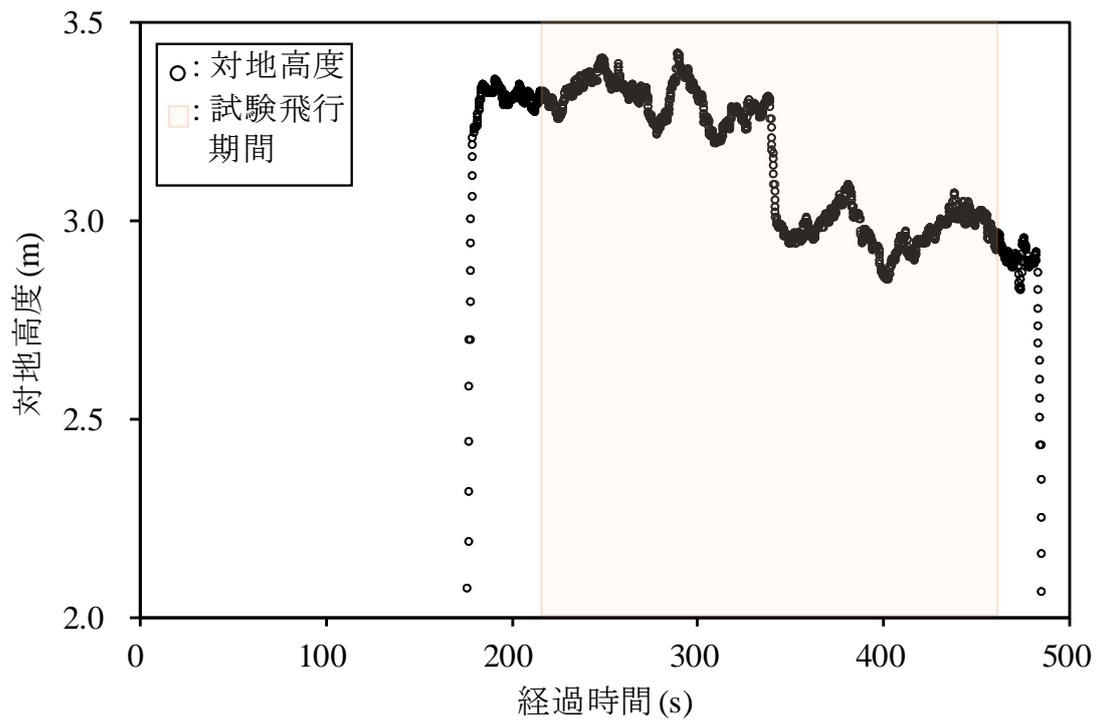


Fig. 7-16 PF2 の組み合わせ飛行 1 (8 の字) 中の経過時間に対する対地高度の変化

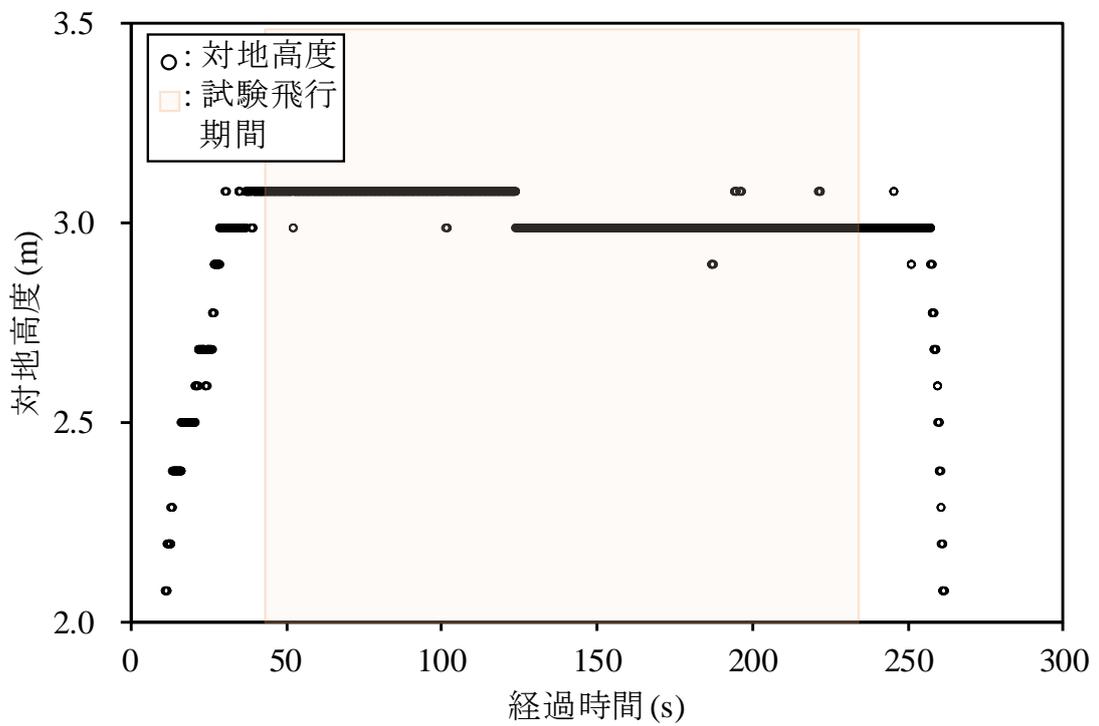


Fig. 7-17 M300 の組み合わせ飛行 1 (8 の字) 中の経過時間に対する対地高度の変化

Table 7-9 組み合わせ飛行 1 (8 の字) 中の高度変化

飛行項目	平均値 ± 標準偏差	
	PF2	M300
機体		
旋回飛行 (m)	3.14 ± 0.172	3.02 ± 0.0456
ホバリング精度のメーカー 公称値 (m)	計測値 ± 0.5	計測値 ± 1.5

(5) 手動での組み合わせ飛行 2

手動飛行でドローンによる放射線モニタリングを行う際に、構造物などを避けて飛行するために、対地高度を変化させて飛行する場合もある (組み合わせ飛行 2)。組み合わせ飛行 2 においては、構造物を避けると想定し離陸後高度を 3.0 m から 10.0 m まで水平移動を伴いながら変移させ、エレベーター、エルロン及びスロットルの操作により水平・昇降移動する性能を試験した (Fig. 7-18～Fig. 7-20)。Table 7-10 に示した組み合わせ飛行 2 中の左右方向の位置精度から、PF2 に対して M300 の標準偏差が大きかった。飛行ログから抽出した組み合わせ飛行 2 中の PF2 及び M300 の飛行軌跡を Fig. 7-21 及び Fig. 7-22 にそれぞれ示す。PF2 は直線的に飛行できているが、M300 は比較的曲線で飛行している。これは、機体の性能ではなく、操縦者が飛行中に方向転換する操作をしてしまったためと推察される。

操縦者の官能評価結果として、PF2 については水平方向と上下方向の操舵量を同量として操舵したところ、概ね意図した機体移動量であった。M300 については水平方向と上下方向の操舵量を同量として操舵したところ、上下方向の機体移動量が若干少なかった。具体的には、水平方向の始点から中間地点 (始点から 10.0 m) への移動において、始点高度 3.0 m から中間地点高度 10.0 m を目標に上昇を目指すところ、同目標高度に達する前に水平方向の中間地点に達した。同様に、水平方向の中間地点 (始点から 10.0 m) から終点 (始点から 20.0 m) への移動において、中間地点高度 10.0 m から終点高度 3.0 m を目標に下降を目指すところ、同目標高度に達する前に水平方向の終点に達した。これは、M300 標準のスロットル・スティック・エクスポネンシャル設定<sup>\*3</sup>が PF2 と異なる設定であるためと考えられる。高度保持制御が一般的なドローンにおいて、上昇及び降下を細かく操作することは考え難く、むしろ意図しない高度変化を招く恐れがあることから、このような設定が成されているものと考えられる。これらの設定は、操縦者の好みに応じて任意の変更が可能である。

\*3 スティック中央位置付近での操作感度を意図的に鈍くすることにより、必要以上に敏感な操作が舵に反映されることを防ぐ機能。

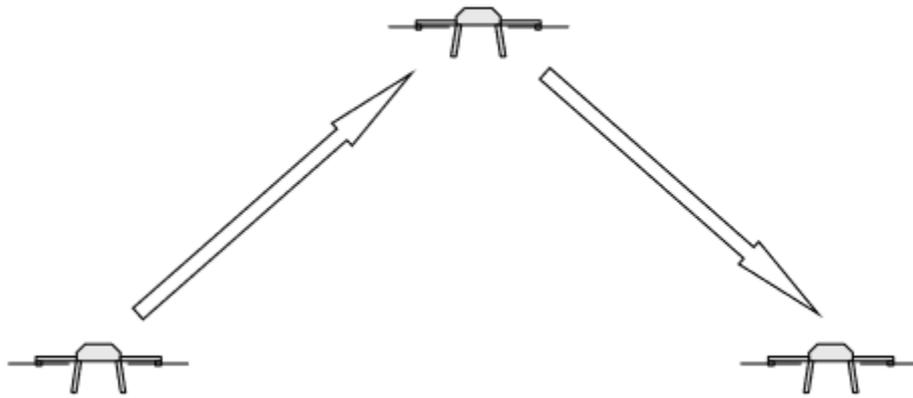


Fig. 7-18 組み合わせ飛行 2 のイメージ

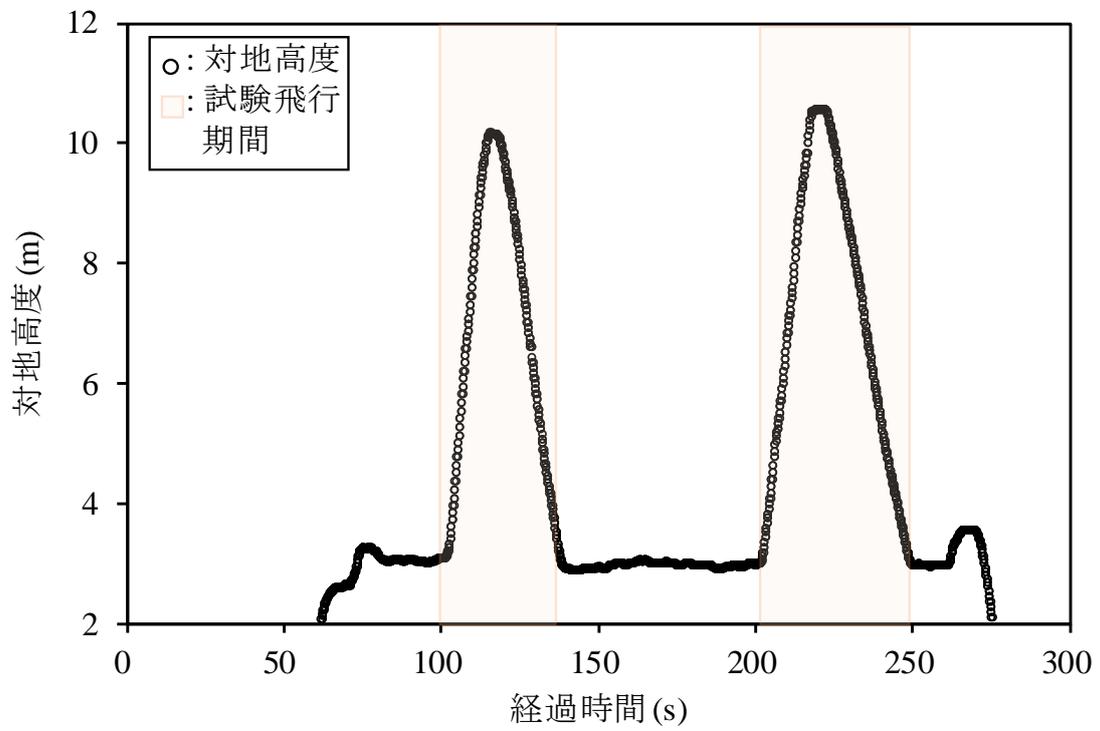


Fig. 7-19 PF2 の組み合わせ飛行 2 中の経過時間に対する対地高度の変化

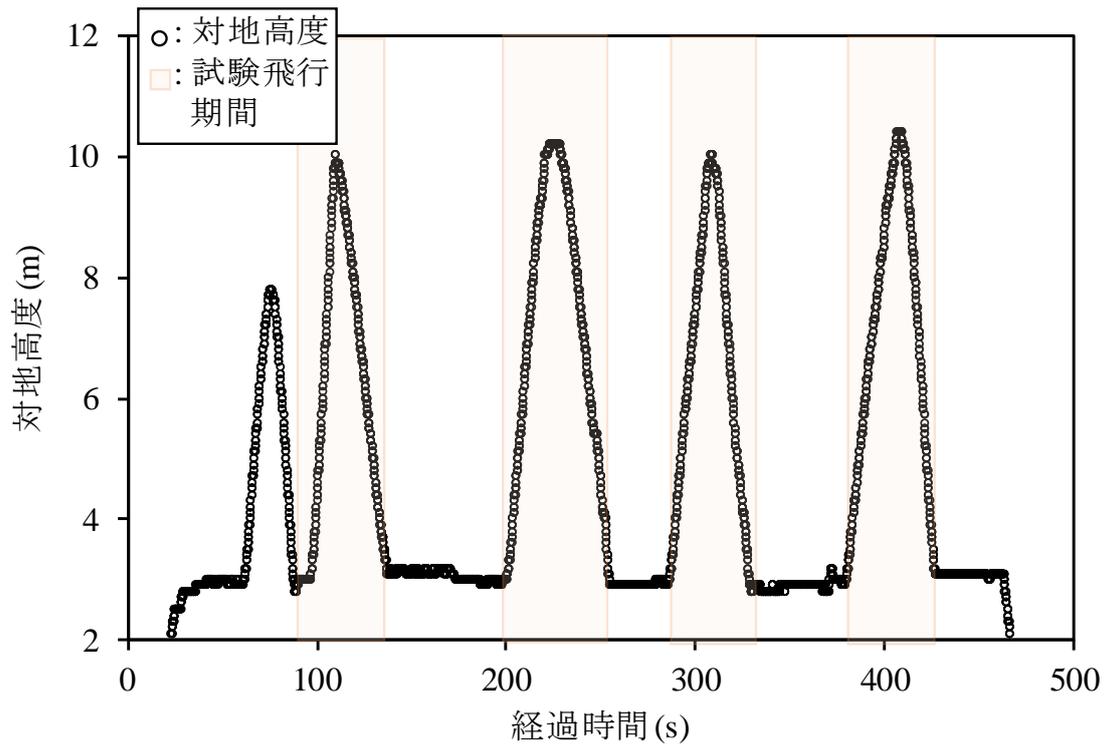


Fig. 7-20 M300 の組み合わせ飛行 2 中の経過時間に対する対地高度の変化

Table 7-10 組み合わせ飛行 2 中の水平変化

飛行項目	平均値 ± 標準偏差	
機体	PF2	M300
組み合わせ飛行 2 (m)	0.116 ± 0.008	0.569 ± 0.570

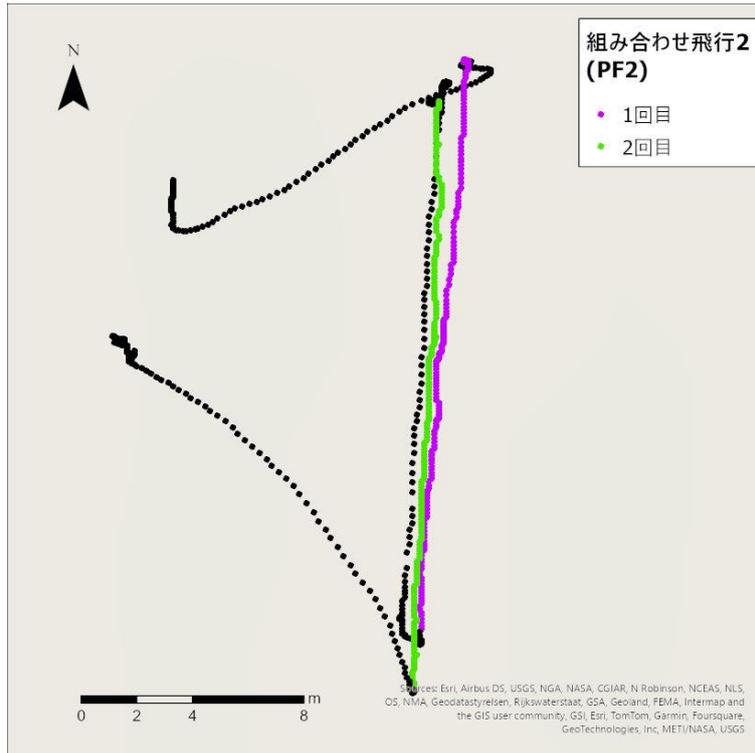


Fig. 7-21 PF2 の組み合わせ飛行 2 のイメージ

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

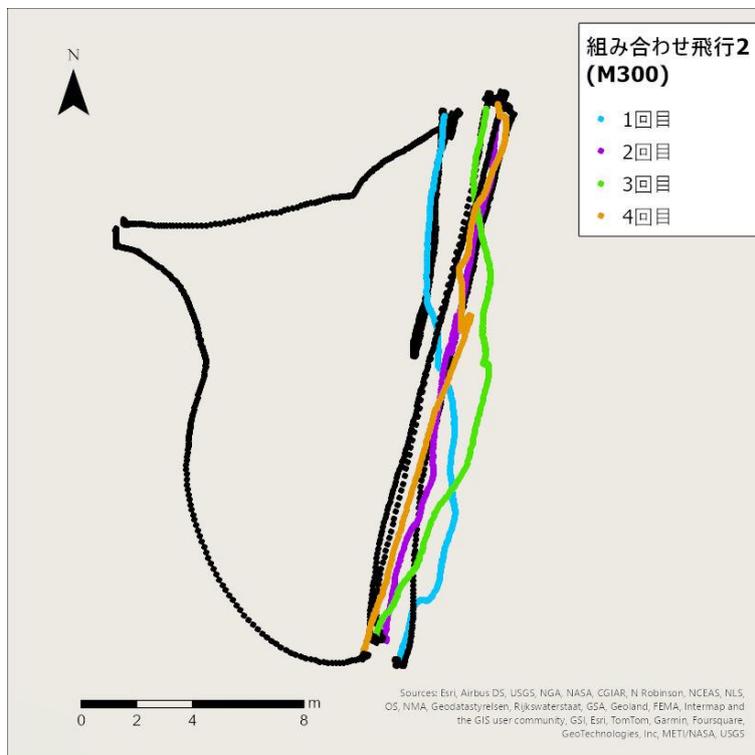


Fig. 7-22 M300 の組み合わせ飛行 2 のイメージ

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

## (6) 通信性能の確認

ドローンを飛行させる際に基地局と機体の通信は、自動と手動飛行問わず、安定な飛行を実現する上で注視すべき項目である。PF2 においては機体と基地局 PC との通信に瞬間的な断絶が起り、PC 側で収集する飛行ログが間欠する事象が見られた。PF2 側の操縦装置が手動制御と自動制御、機体情報監視で独立しており、機体情報監視を担う基地局 PC 側の通信信頼性が低いことに起因すると考えられる(Fig. 7-23)。一方、M300の試験飛行中は、機体と送信機との通信が途切れる等して飛行操縦に影響が出る事態は起こらなかった。



Fig. 7-23 操縦位置と通信の構成  
(左: PF2、右: M300)

## (7) 衝突防止機能の確認

自動または手動飛行を問わず、ドローンの障害物への衝突防止機能は、安定な飛行を実現する上で注視すべき項目である。屋内試験場にて壁面から 5.0 m、10.0 m 及び 15.0 m に基準点を設定し、機体の衝突防止機能の設定距離に対して、正しく機体が反応するかの試験を実施した。試験項目について、送信機の表示等により障害物の検知警告が発せられることを確認した。PF2 については、警告と制動の指標となる赤外線センサーの測距距離が送信機の画面に表示されることを確認した。GNSS 電波が受信できない環境下であっても、任意の距離設定において、警告と制動のステータスが画面上で随時変化し、衝突防止機能が確認された。M300 については、GNSS 電波が受信できない環境下であっても、自動制動を含む衝突防止機能が完全に作動し、衝突防止機能が確認された。M300 は検知した障害物との距離を表示しない仕様であるため、警告と制動の発動地点で、機体装備の赤外線レーザー測距計にて壁面との距離を計測し記録した。衝突防止機能の試験結果を Table 7-11 にまとめた。また、本結果を散布図として示す(Fig. 7-24)。PF2の方がM300に比べて、設定した距離に近い位置で警報が鳴動した。PF2の機体上部に搭載された1つのセンサーは、光による検知と測距(Light Detection And Ranging :

LiDAR) を用いており 360° 方向の距離を計測している。一方、M300 は 4 つのビジョンセンサーと赤外線検知システムによって、特定方向の距離を計測している。これら搭載したセンサーの性能と方向特性の違いが、警報距離に影響を与えたと考えられる。これらの試験結果から、予め飛行計画の立案が必要な自動飛行においては、これらの警報及び制動距離を考慮した上で、予定エリア内の構造物に反応しないようにルートを策定する必要がある。また、緊急時に事前の飛行計画立案が難しいエリアで手動飛行によりモニタリングをする場合でも、これらの衝突防止機能により安定した機体の制御が可能である。

**Table 7-11 衝突防止機能の確認結果**

検知方向	飛行高度 (m)	警告距離 (m)	制動距離 (m)	PF2 の結果	M300 の結果	備考
前方	3.0	15.0	10.0	未実施	15.0 m で警告 11.7 m で制動	PF2 は未実施 (10 m が機体の制動距離の性能限界のため)
前方	3.0	12.5	10.0	未実施	14.0 m で警告 12.5 m で制動	PF2 は未実施 (10 m が機体の制動距離の性能限界のため)
前方	3.0	10.0	10.0	未実施	12.4 m で警告 12.4 m で制動	
前方	3.0	10.0	7.5	未実施	12.0 m で警告 9.5 m で制動	
前方	3.0	10.0	5.0	9.9 m で警告 制動未実施	11.6 m で警告 7.3 m で制動	
前方	3.0	7.5	5.0	7.4 m で警告 制動未実施	9.2 m で警告 7.1 m で制動	
前方	3.0	5.0	5.0	警告反応飛越え 4.9 m で制動	7.1 m で警告 7.1 m で制動	
前方	8.0	5.0	5.0	警告反応飛越え 4.9 m で制動	6.6 m で警告 5.7 m で制動	
右方	3.0	10.0	5.0	9.9 m で警告 制動未実施	11.5 m で警告 制動未実施	
右方	3.0	7.5	5.0	7.5 m で警告 制動未実施	9.0 m で警告 制動未実施	
右方	3.0	5.0	5.0	警告反応飛越え 5.0 m で制動	6.9 m で警告 6.9 m で制動	

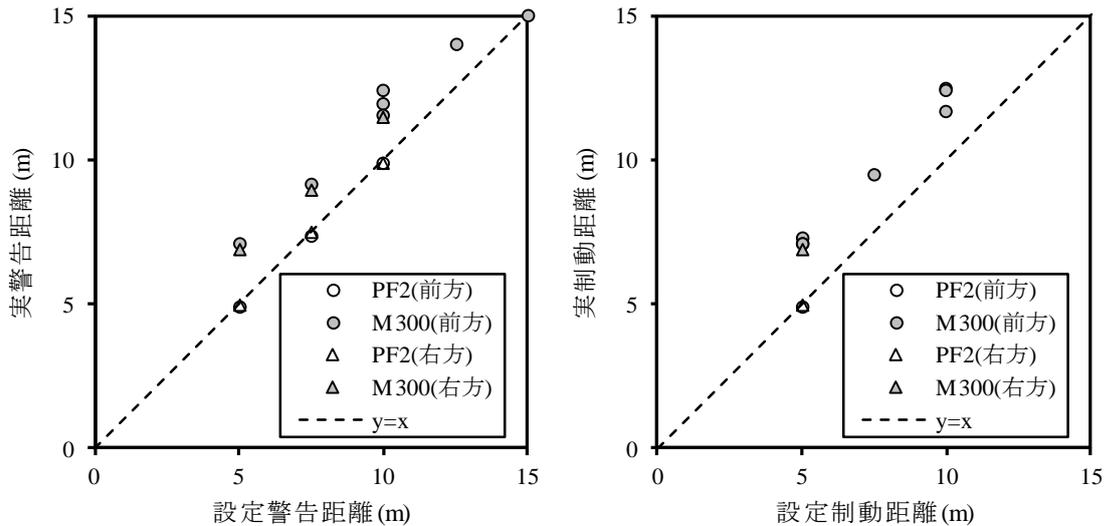


Fig. 7-24 衝突防止機能試験の結果

### 7.3. 自動飛行試験の実施

#### 7.3.1. 輸送及び展開性能の確認

緊急時モニタリングを迅速に実施するために、機体の展開と検出器の搭載時間を把握する必要がある。機体展開及び検出器の搭載時間を計測した (Table 7-12)。PF2 の長所は、標準ケースで検出器を搭載したまま輸送可能であり、飛行までに必要な時間から放射線検出器の搭載時間を除くことができる点である。一方、短所として機体の折り畳みができないため、輸送車両の大半のスペースを占有してしまう点が挙げられる (Fig. 7-25)。M300 の長所は、機体を折り畳むことが可能で、輸送車両のスペースをあまり占有しない点が挙げられる。一方、短所として標準ケースから展開後、放射線検出器の搭載作業が必要な点が挙げられる (Fig. 7-26)。しかしながら、展開及び放射線検出器の搭載作業に掛かる合計時間はPF2の飛行準備完了までと大差なく、折り畳みを考慮せず搭載するのであれば、離陸までの時間はPF2よりも短い。

上記の輸送及び展開性能の確認の結果、両機体の構造に大きな違いがあった。PF2 が採用するバランス充電コネクタ付きのフライトバッテリーは、一般的なドローンと同様に、ラジコンホビー界隈での使用を想定している。そのため耐久性と信頼性に比較的劣っており、機体を取り扱う際に破損しないよう注意が必要であった。一方、M300 のバッテリーはカートリッジ化されており、機体及び充電器との接続が簡便で、電圧や温度も自己管理するスマートバッテリーを採用している。PF2 に比べ M300 の方が現場での運用面で勝ることが、操縦者及び補助者の官能調査で分かった。また、自動飛行試験に先立って、両機体に放射線検出器の搭載が可能であることも確認した (Fig. 7-27 及び Fig. 7-28)。自動飛行試験では、Fig. 5-2 (d) に示したプラスチックシンチレータと BGO から構成される放射線検出器 (以下、ホスウィッチ型検出器) を搭載した。全ての必要機材を展開し、ホスウィッチ型検出器を搭載して離陸可能な状態になった両機体の外観は Fig. 7-29 及び Fig. 7-30 に示す通りである。

**Table 7-12 輸送及び展開性試験の実施項目**

実施項目	PF2	M300
機体展開時間	約 10 分+検出器立上 10 分	約 3 分+検出器立上 10 分
検出器搭載時間	約 13 分	約 8 分



**Fig. 7-25 PF2 の収納状況**



**Fig. 7-26 M300 の収納状況**  
(左：メイン収納部、右：上蓋収納部)

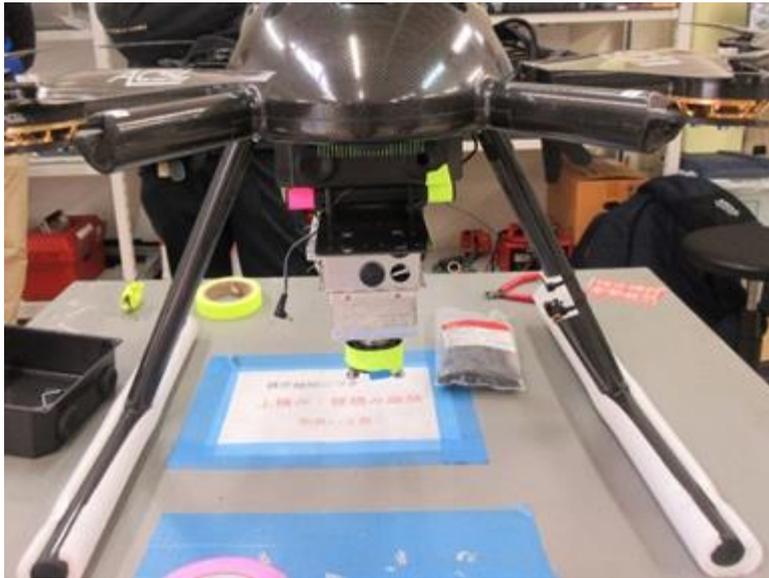


Fig. 7-27 PF2 への放射線検出器の搭載状況



Fig. 7-28 M300 への放射線検出器の搭載状況



Fig. 7-29 展開後の写真 (PF2)



Fig. 7-30 展開後の写真 (M300)

### 7.3.2. 自動帰還の機能の確認

ドローンの自動飛行により放射線モニタリングを行う際には、予期せぬ電波遮断等の不測の事態に対応するために、基地局への自動帰還機能が必要となる。自動飛行試験の実施にあたり、安全を確保した状態で意図的に送信機の電源を切断することで、ドローンに備えられているフェイルセーフ機能の一つである RTH<sup>\*4</sup>が正常に発動するかを試験した。Fig. 7-31 及び Fig. 7-32 に示すように、PF2 及び M300 の両機体について送信機画面上で当該機能の発動が確認さ

---

<sup>\*4</sup> Return to Home。事前に設定を行うことで、電波途絶等の緊急時に機体が離着陸地点まで自動で帰還する機能。

れた。PF2 は、電波途絶後も自動航行を続けるためには、メーカー側で特別な出荷時設定を行う必要がある。今回は、設定した通りに従前の自動航行を続けることが確認できた。M300 においては、電波途絶後も自動航行を続けるために、ユーザー側で任意の設定の切り替えが可能である。事前の設定に基づき、離陸地点への自動帰還が実施されることを確認した。よって、電波遮断などの不測の事態であっても、状況に応じて帰還またはモニタリングの継続を選択することが可能である。また、機体メーカーの非純正ペイロードである放射線検出器の搭載による飛行への影響は、両機種共に重量増による順当なバッテリー消費の増加程度であり、空力等の飛行特性への有意な影響は見られなかった。

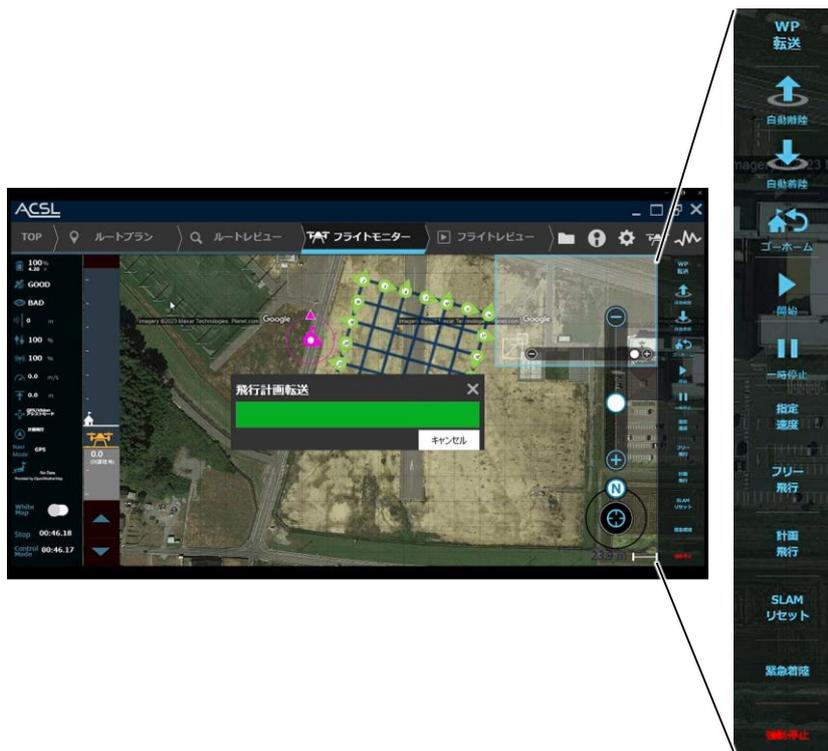


Fig. 7-31 電波途絶時の PF2 の送信機上のコマンド画面



Fig. 7-32 電波途絶時の M300 の送信機上のコマンド画面

### 7.3.3. 緊急時モニタリングを想定した自動飛行

#### (1) キャリブレーションフライト

ドローンに搭載したホスウィッチ型検出器により、上空で測定した計数率データを、地表面から 1 m の高さにおける計数率に補正するためのパラメータ (空気減弱係数  $AF$  ( $m^{-1}$ )) 及び補正後の計数率を空間線量率に換算するためのパラメータ (空間線量率換算係数  $CD$  ( $[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$ )) を算出するために、RTF の敷地内において M300 でキャリブレーションフライトを実施した。キャリブレーションフライトは、以下の条件でホバリングさせて実施した。

- 対地高度：20 m、30 m、40 m、60 m、80 m、100 m、120 m 及び 140 m
- 測定時間：各高度で 30 秒

また、空間線量率換算係数の算出のため、キャリブレーションポイントにおいて、KURAMA-II<sup>58)</sup>による歩行モニタリングを以下の条件で実施し、地表面から 1 m の高さの空間線量率 ( $\mu Sv/h$ ) を測定した。

- 測定範囲：キャリブレーションポイントを中心とした半径 50 m 円内
- 測定ポイント：25 点

空間線量率換算係数の算出に用いる歩行モニタリングの代表値を求める方法は以下の通りとした。

- キャリブレーションポイントを中心とした半径 50 m 円内に収まる測定データを集計する。
- 基準地域メッシュ (1 km 区画) をベースに、20 m 区画となるよう独自に分割したメッシュごとに測定データの平均値を算出する。

- 各メッシュ内の歩行モニタリング値を平均化する。

以上のデータを用いて、Fig. 7-33 のように空気減弱係数  $AF$  と空間線量率換算係数  $CD$  を算出した。

歩行モニタリングの結果を Fig. 7-34 に示す。空間線量率が  $0.1 \mu\text{Sv/h}$  以下の場所が大部分を占めており、空間線量率の分布は概ね均一であった。上述した手順によって求めた歩行モニタリングの代表値は  $0.058 \mu\text{Sv/h}$  であった。キャリブレーションフライトにおける対地高度と計数率の関係は Fig. 7-35 のようになった。本図に示した実線は Microsoft Excel® の指数近似機能によって得られた近似曲線であり、この傾きが空気減弱係数  $AF (\text{m}^{-1})$  である。このように、対地高度が増加するに伴って計数率は指数関数的に減衰したが、対地高度  $40 \text{ m}$  における計数率がこの傾向に従わず、計数率が高くなった (赤丸点)。対地高度  $40 \text{ m}$  のデータは換算パラメータを算出するに際して、悪影響を与える外れ値であると判断し、本データを除外して空気減弱係数  $AF$  と空間線量率換算係数  $CD$  を算出することとした。本測定で、地表面から  $1 \text{ m}$  の高さの空間線量率の算出に使用する換算パラメータを Table 7-13 にまとめた。

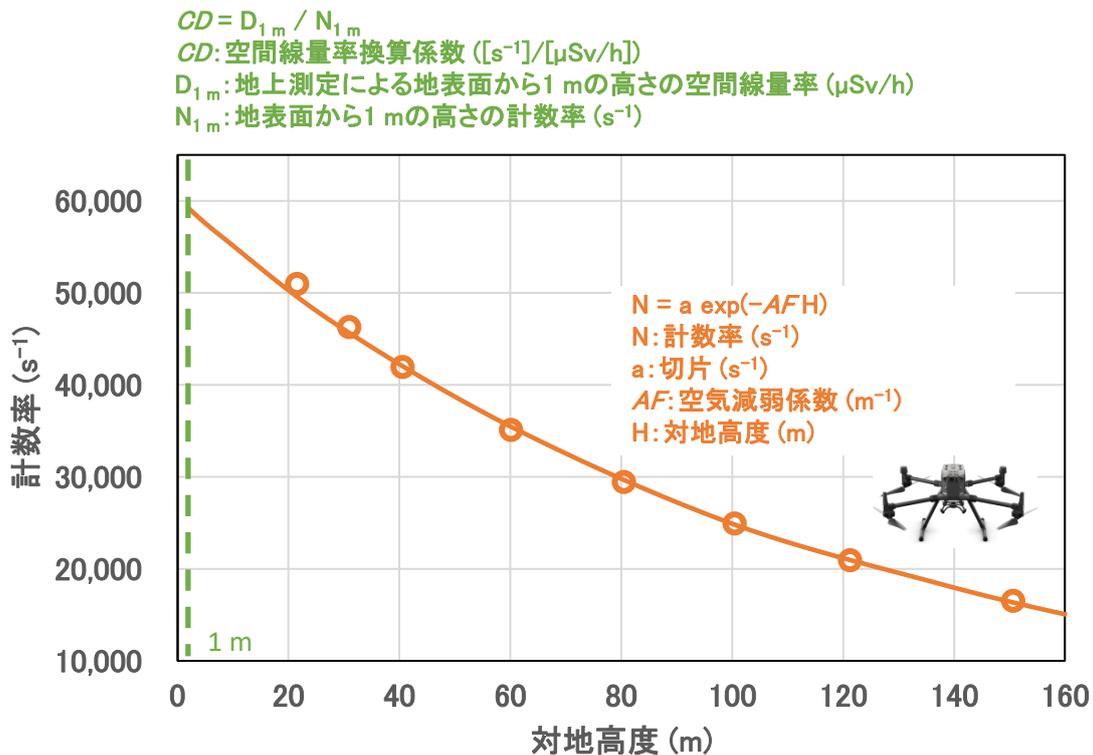


Fig. 7-33 ドローンによるモニタリングにおける空気減弱係数と空間線量率換算係数の求め方



Fig. 7-34 歩行モニタリングによる空間線量率の測定結果

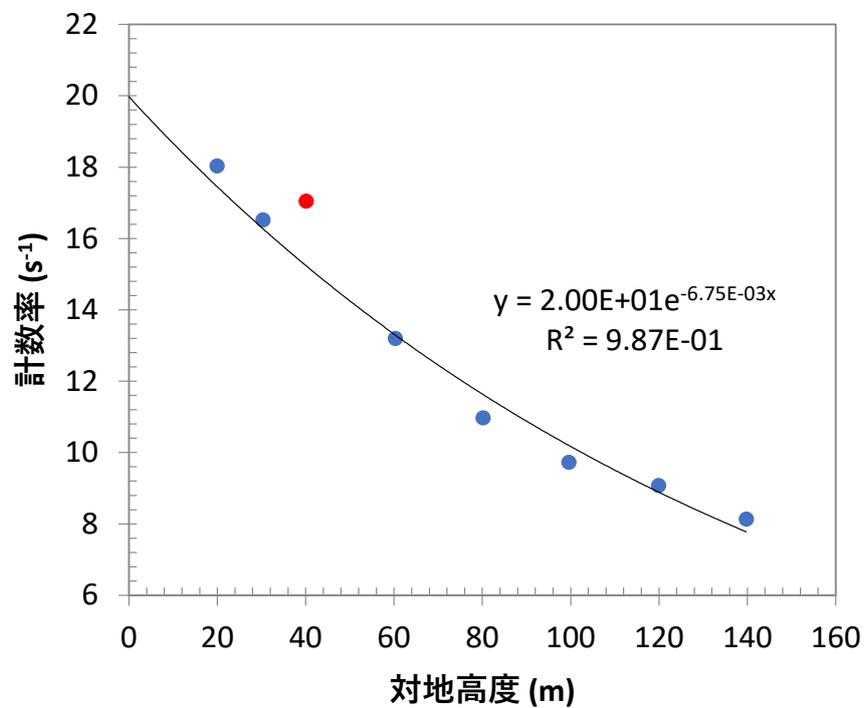


Fig. 7-35 キャリブレーションフライトで得られた対地高度と計数率の関係  
 (対地高度 40 m のデータ (赤丸点) は指数近似の対象から除外した。)

**Table 7-13 本測定による高度補正係数と空気減弱係数**

空気減弱係数 ( $m^{-1}$ )	-0.00675
空間線量率換算係数 ( $[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$ )	340

(2) 全体飛行の実施

緊急時モニタリングを迅速に行う上で、予め策定したプラン (対地高度、測線間隔、速度) に則り、ドローンの自動飛行を実施する必要がある。緊急時モニタリングを想定した自動飛行試験を実施した。当試験の項目については Table 7-14 の通りである。また、自動飛行試験で取得した計数率から地表面から 1 m の高さの空間線量率を算出するにあたって、下記のようにデータを取り扱った。

• 位置情報について

解析に用いた緯度、経度、対地高度は、ドローンに搭載された GPS の測位データを用いた。ただし、7.2.2 項 (6) に記載した要因によって、PF2 については、測定中に地上基地局へのデータ送信が途切れることが多く、Fig. 7-36 のように GPS 測位データの欠損が見られたため、放射線検出器に組み込まれている GPS 測位データを用いた。

• 全計数率について

自動飛行試験を実施した地点は空間線量率が比較的低く、天然放射性核種の K-40 が支配的であり、福島原子力発電所事故由来の放射性セシウムの影響があまり見られない。ドローンに搭載したホスウィッチ型検出器では Fig. 7-37 のように特定の範囲を抽出せず、全チャンネルの計数率の積算値を全計数率として用いた。

• 地表面から 1 m の高さの空間線量率の算出

全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方法は式 [3] に従った。ただし、正味の計数率にはバックグラウンドを考慮せず全計数率を用いており、基準対地高度は 20 m とした。

PF2 及び M300 で実施した飛行試験の項目ごとに、空間線量率の算出結果を Fig. 7-38 及び Fig. 7-39 にそれぞれ示す。各結果より、空間線量率は概ね  $0.05 \mu Sv/h$  から  $0.10 \mu Sv/h$  と算出され、飛行高度、移動速度や使用機種によって空間線量率の顕著な差異は現れなかった。

**Table 7-14 自動飛行試験の項目**

開始時高度 (m)	飛行速度 (m/s)	対地高度変化	備考
20	2.0	開始から一定	
20	4.0	開始から一定	
20	8.0	開始から一定	
20	4.0	地形追随	
40	4.0	開始から一定	
80	4.0	開始から一定	PF2 は荒天のため 未実施

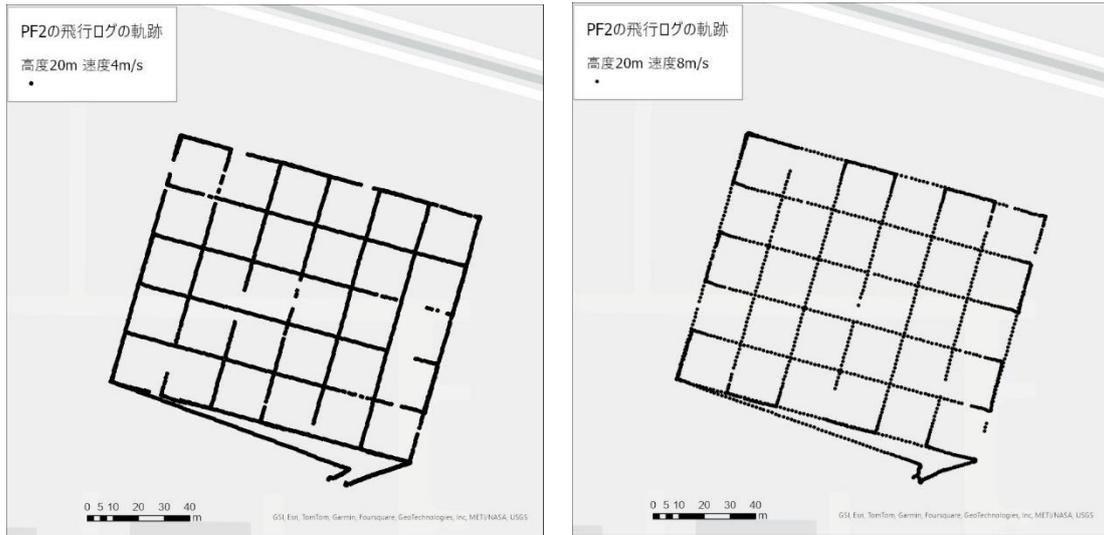


Fig. 7-36 PF2 の自動飛行試験において GPS 測位データが途切れた例

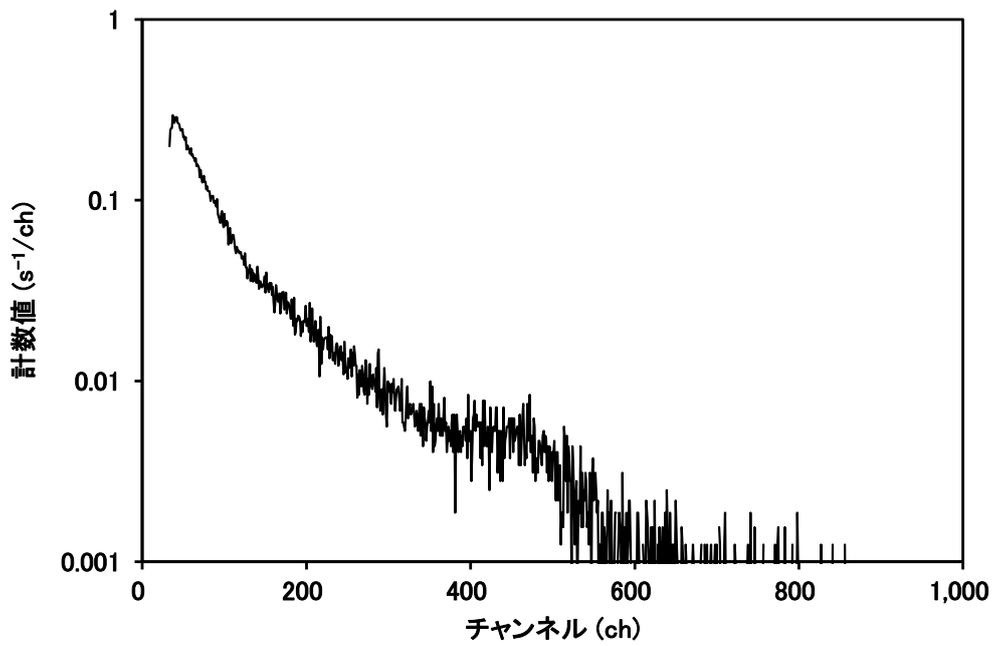
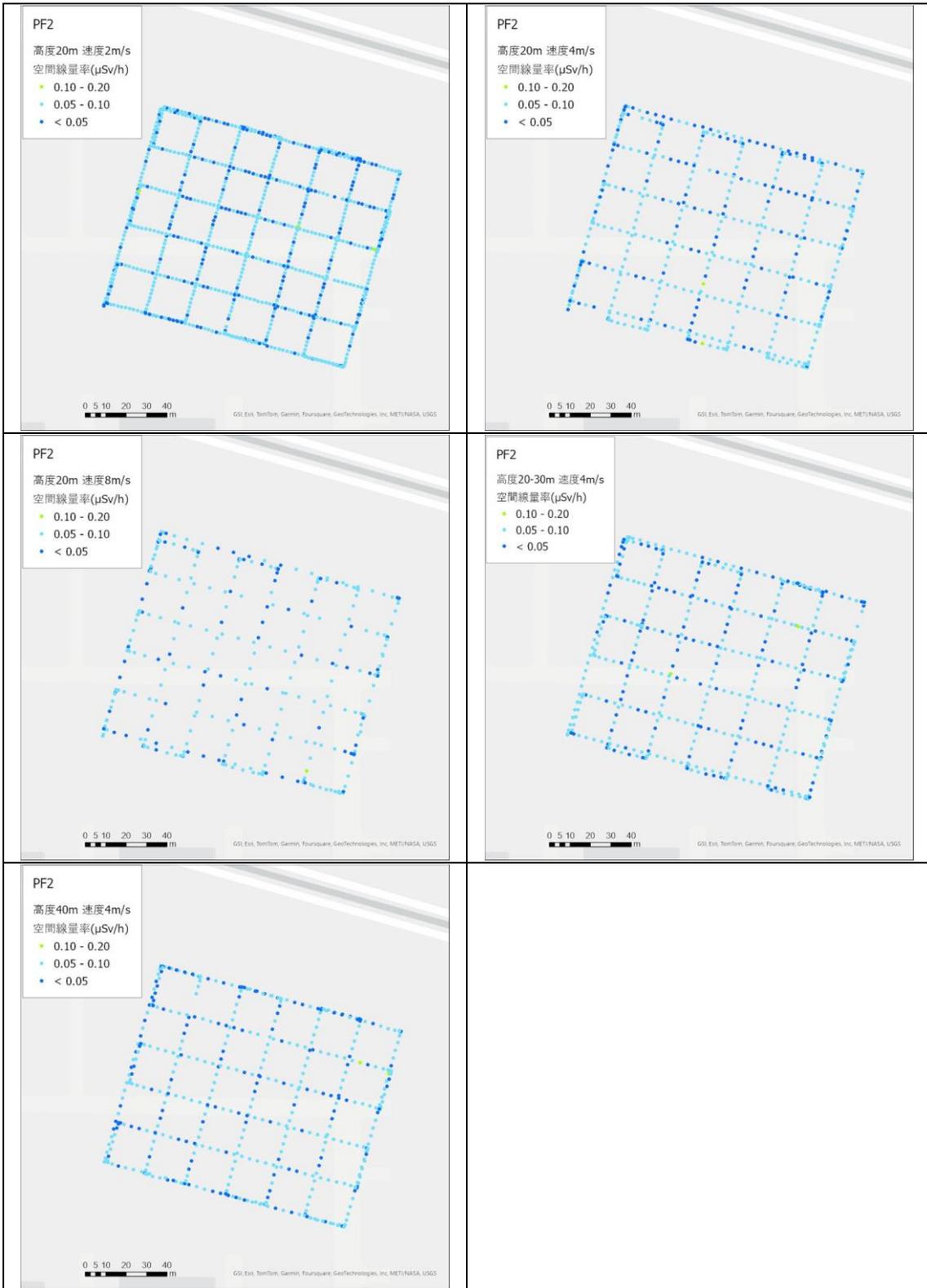


Fig. 7-37 ホスウィッチ型検出器で取得される  $\gamma$  線スペクトルの例



**Fig. 7-38 PF2 による空間線量率の算出結果**  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

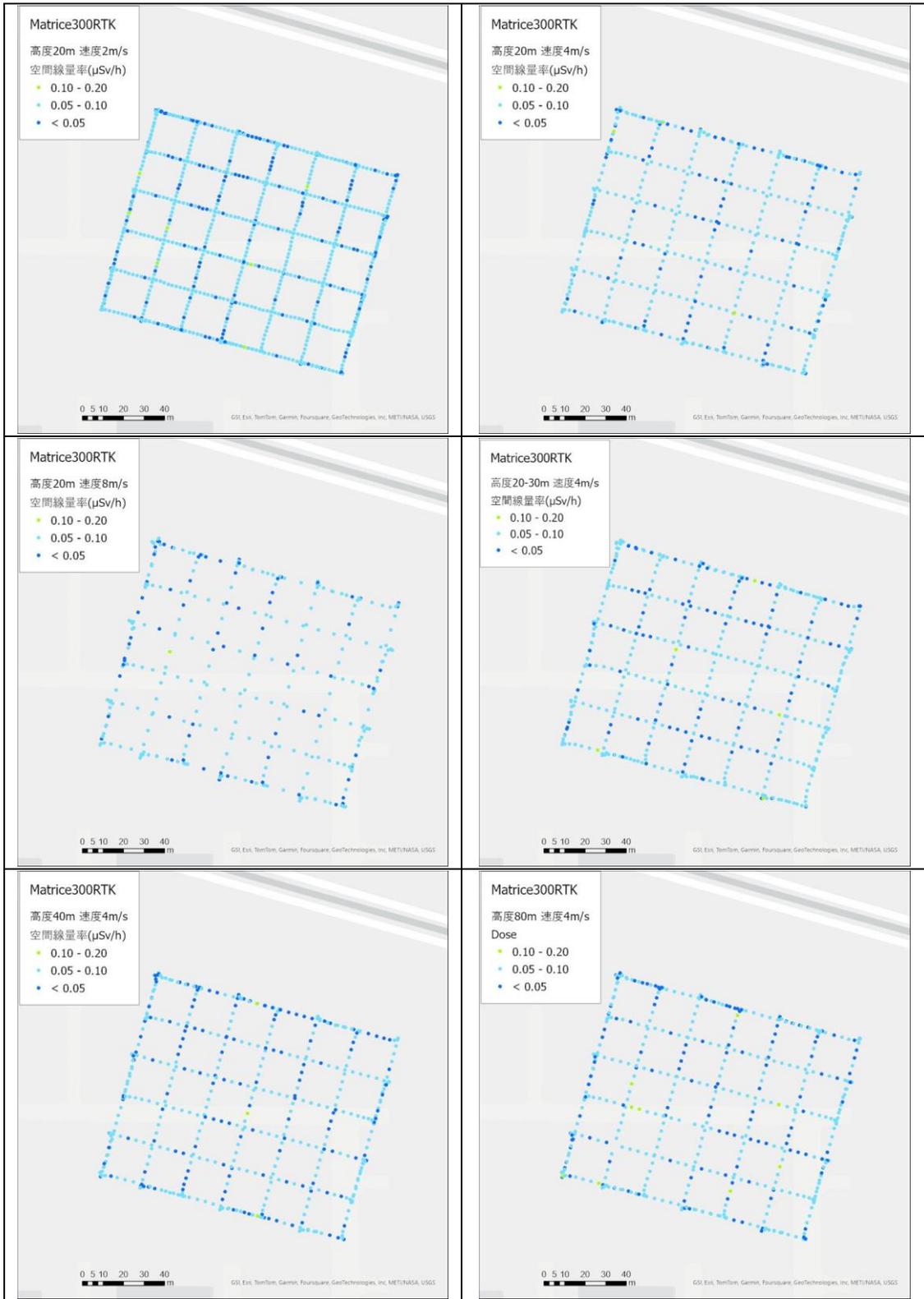


Fig. 7-39 M300 による空間線量率の算出結果  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

### (3) 空間線量率分布の比較

(2) で算出した空間線量率を測定範囲で内挿補間し、空間線量率の分布マップを作成した際に、自動飛行試験の項目間で差異が生じるかについて調査した。ArcGIS Pro (Environmental Systems Research Institute, Inc.) に備えられている機能を用いてクリギングによる内挿補間を実行し、生成された空間線量率マップの全セル値の平均値同士を比較することで検証した。クリギングの入力パラメータは複数あり、Table 7-15 のように設定した。クリギングによる計算処理の範囲は、ドローンの飛行プログラムで設定した測定範囲を包括するように設定した。また、クリギングによる内挿値の誤差を低減するために、測定データが近接する場合は一方を除外し、測定データが空間的に重ならないように処理を施した上でクリギングを実行した。クリギング実行後に生成された空間線量率マップデータからセル値を抽出し、全セル値を算術平均して各自動飛行試験の項目の平均空間線量率として取り扱った。

空間線量率分布の比較結果を Fig. 7-40 に示す。各自動飛行試験の項目間で空間線量率の平均値に顕著な差異が見られない(概ね  $0.01 \mu\text{Sv/h}$  以下) ことから、飛行高度や移動速度の差異、PF2 と M300 の機体性能による違いが、空間線量率の評価に大きな影響を及ぼすことはないであろうことが推察される。ただし、7.2.2 項の各飛行パターン試験の結果で示されたように、同じ飛行パターンであっても機体の水平及び鉛直方向の位置情報のばらつきが見られた。これらのばらつきが空間線量率の算出結果にどの程度影響を与えるのかについては、定量的な評価に至っていないことに留意する必要がある。

**Table 7-15 クリギングの入力パラメータ**

設定項目		設定値
セミバリオグラム プロパティ	クリギング手法	Ordinary
	セミバリオグラムモデル	Spherial
同 詳細パラメータ	Lag size	5
出力セルサイズ (m)		5
検索範囲		可変
検索範囲の設定	ポイント数	36
	最大距離	(設定なし)
投影座標系		WGS1984_UTM _Zone_54N

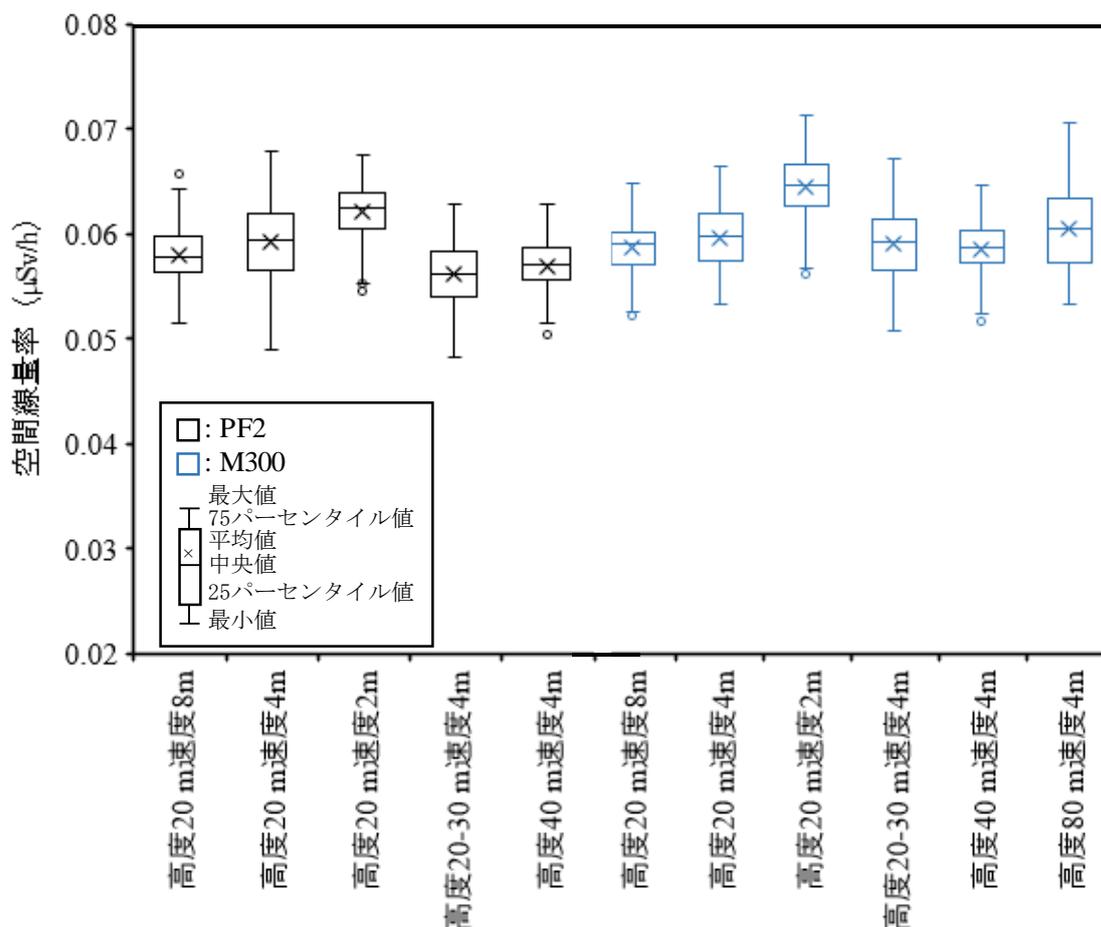


Fig. 7-40 空間線量率の比較結果

#### 7.4. まとめ

緊急時モニタリングに活用できる無人航空機に関する調査の結果、今回の飛行試験に使用したホスウィッチ型検出器をドローン用の放射線検出器とする場合、緊急時モニタリングに適した機体として、ASCL社のPF2とDJI社のM300が選定された。両機の手動飛行による操縦者の官能評価として、PF2及びM300は大きな不安なく操縦及び飛行させることができたとのことであった。また、緊急時モニタリングを想定した自動飛行試験の結果、両機体で得られた空間線量率分布に顕著な差が見られなかったことから、両機体の緊急時モニタリングへ適用が期待できる。一方、PF2の自動飛行試験中、地上基地局のPCとの通信が途絶する場面があった。しかしながら、手動操縦用の送信機との通信は正常に維持されており、かつ事前のフライトプランに基づき自動航行で測定を続けることができた。ホスウィッチ型検出器に組み込まれたGPS測位データを活用することにより、PF2とM300とで同等の空間線量率分布マップを作成することが可能である。しかし、PF2を運用する際には、機体に備え付けられているGPS測位情報の通信品質について留意しなければならないことが明らかとなった。

以上の調査結果から、回転翼機である2つのドローンについて、双方とも緊急時モニタリングに対応できる見込みが高いことが分かった。今後の展望として、原子力発電所等のUPZ内

に予め通信機能を備えたドローンを複数機配備し、ドローンを任意のルートで自動航行させることで、緊急時における可搬型モニタリングポストの代替として運用するための基盤整備に取り組むことが挙げられる。これにより、緊急時モニタリングに適用するドローン自体の大型化及び高価格化を抑えることも可能だと考える。

## 8. 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

川内について、3 km～80 km 圏における天然放射性核種由来の空間線量率の分布マップ及び天然放射性核種 (K-40、U 系列及び Th 系列) について濃度マップを作成した。空間線量率マップは、RSI システムの GPS 測位データに基づいた場合と、高精度 GPS システムの測位データに基づいた場合とで差異が見られた。これには、GPS の高さ方向の測位誤差が影響した可能性が大きく、結果として高精度 GPS システムの測位データを用いた方が、妥当な空間線量率マップを作成できた。緊急時モニタリングで提供する航空機モニタリング結果の妥当性の向上に資するため、今後は高精度 GPS システムによる測位データを用いることを解析の基本方針とすることを検討したい。作成したマップの妥当性については、地上測定値や他機関から公開されている地質調査レポート等と比較することで検証した。空間線量率マップについては、標準的解析手法によるものと、ラドン弁別手法によるものの2種類を作成した。両解析手法ともに、空間線量率の計算値と地上測定値との *RMSE* は  $0.02 \mu\text{Sv/h}$  程度であり、概ね妥当な誤差範囲に収まった。また空間線量率マップは、既往の地質調査レポート等との関連付けが難しく、地質的な要因というより、地形的な要因が空間線量率の上昇に寄与したであろうことが推察された。ラドン弁別手法については、標準的解析手法と遜色のない解析結果を得られる点で一定の有効性が示されているものの、本手法を用いても明らかなメリットが得られていないのが現状である。ラドン弁別手法の信頼性を向上させることができれば、標準的解析手法で行っている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こととなる。本手法の信頼性向上に資するため、換算パラメータ *RI* 及び *GI* の算出方法を改良し、更なる高度化に努める必要がある。天然放射性核種の濃度マップについては、他機関から公開されている元素濃度マップの分布傾向を概ね再現できていた。一方で、航空機モニタリングでは U 系列濃度が過大に評価されている傾向があるように思われ、計数率を放射性核種濃度に換算するためのパラメータの設定方法について、再検討を行う必要がある。しかし、概して航空機モニタリングデータを基にした天然放射性核種濃度の推定方法が有効に機能しており、一定の信頼性を持った天然放射性核種別濃度マップが作成可能であると思われる。

### ・航空機モニタリングの期間と出来事について

測線は 5 km、10 km または 20 km 間隔で東西方向に設定した。川内から半径 80 km 圏内 (以下、川内測定エリア) のモニタリングは前期と後期の 2 回に分けてモニタリングを行った。前期については航空機モニタリング及び地上測定の期間は令和 5 年 (2023 年) 7 月 25 日～7 月 28 日 (航空機モニタリングは延べ 8 フライト) の 4 日間であった。後期については航空機モニタリング及び地上測定の期間は同年 11 月 12 日～11 月 15 日 (航空機モニタリングは延べ 7 フライト) の 4 日間であった。前期、後期ともに航空機モニタリングシステムにトラブルが生じることなくスムーズに測定が進んだ。川内測定エリアには養鶏場等の畜産施設が密集しており、そこで飼育されている動物に対する騒音ストレスを最小限に留めるため、家畜施設の直上を飛行

することのないよう、モニタリング経路を決定した。また、川内測定エリアには霧島山や桜島等の「常時観測火山」があり、気象庁が 24 時間体制で火山活動を観測及び監視を行っている<sup>59)</sup>。これら火山の活動状況に応じて、噴火警戒レベルが都度、発表されている<sup>60)</sup>。ヘリコプターを運航する航空会社によっては、噴火警戒レベル 3 (入山規制) に達すると飛行制限指示が出され、当該火山から半径 3 km が要警戒範囲に設定され、入域及び飛行が禁止される。本報告では、航空機モニタリングの進捗に影響するような噴火等は無かった。このようなモニタリング対象地域の風土や特色を考慮し、柔軟にモニタリングの計画を行うことが必要である。

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

Fig. 8-1 に川内測定エリアにおける管制空域に係る情報を円及び多角形の枠で示す。本報告では、資機材等の搬出入等の手続きに煩雑さが少なく、現地測定作業員の待機場所が使用できること等、利便性が高いことから、川内測定エリアの拠点として鹿児島空港に併設されている株式会社ノエビアアビエーション鹿児島空港事務所 (A1) を使用した。当事務所は川内測定エリアの概ね中央部に位置しており、また、川内原子力発電所 (P1) から直線距離で約 50 km とある程度離れており、緊急時の航空機モニタリングを想定する上でも優位な施設である。この他、川内測定エリアの拠点候補として熊本空港 (A3) があるが、川内測定エリアの測線から遠く、効率的に航空機モニタリングを行う観点から不便である。川内測定エリア内外には海上自衛隊鹿屋航空基地 (A2)、自衛隊訓練/試験空域 (B1、B2) 及び民間訓練/試験空域 (C1～C9) といった、不定期で飛行訓練が実施される管制空域が複雑に入り組んでいる。特に、民間訓練/試験空域は細かく区切られており、どの区画をいつ通過するか、フライト前に十分に整理した上で、事前に当該空域の使用状況を確認するとともに、通過時には管制機関等とのコンタクトを確実に実施する必要がある。

川内測定エリアにおける気象の特徴について、気象庁のホームページ<sup>61)</sup>を参考に以下に記述する。川内測定エリアの大部分は温帯または亜熱帯であり、降水量は 3 月から 9 月に多いが、特に梅雨の時期となる 6 月から 7 月にかけては顕著に多く、年間降水量の 3 割を占める。逆に、冬季の降水量は極端に少なくなり、夏季の 5 分の 1 程度である。冬季では、冬型の気圧配置が強くなり、季節風による寒気が入るようになると、東シナ海側では曇雨天の日が多くなり、太平洋側では晴天の日が多くなる。川内測定エリアにおける通年の気象情報を総合すると、梅雨明け以降 (8 月) から、冬期 (12 月頃) の間が航空機モニタリングに適していると思われる。本報告では、梅雨が明けた前期の測定期間中 (7 月下旬)、昼頃から局地的豪雨があり、モニタリングが午前中にしか実施できない日があった。川内測定エリアでは特に、夏季は天候が移り変わりやすいことに留意しておく必要がある。

川内測定エリアの地形については、北部を除いて平坦な地形がほとんどである。本報告の前期の測定で用いた Bell 430 のように航続時間が長く、振動の少ない安定飛行が可能な機種を航空機モニタリングに用いることが望ましい。

・RSI システムの保守点検方法について

RSI システムについて、月例保守点検の方法を定型化し、確実に実施した。結果として、特にシステムの異常等は見られなかった。

・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  
対象サイトを柏崎刈羽原子力発電所とした令和5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及び無人機の訓練フライトを実施した。本訓練では、柏崎刈羽原子力発電所から南西方向に放射性核種が拡散したと想定された。緊急時航空機モニタリングについては航空自衛隊新潟分屯基地を離発着点として新潟県の柏崎市、上越市及び十日町市の周辺をモニタリングした。取得データをオンサイトで解析し、空間線量率分布マップを作成した。航空機モニタリングシステムを一まとまりにする緊急時モニタリング用ラック及びラックをUH-60機内床に固定するポイントを特定するための目印付き紐が有効に機能し、UH-60にシステムを搭載完了するまで30分程度であった。また、簡易的な電磁干渉試験を行い、航空機モニタリングシステム及びリアルタイムデータ通信システムがUH-60で使用可能であることを確認した。モニタリングについては、事前にヘリコプターパイロットと入念に打ち合わせを行うとともに、フライト中にも密にコミュニケーションを取ることで、良質なモニタリングデータの取得に努めた。また、リアルタイムデータ通信システムにより、機内から地上にモニタリングデータがリアルタイムに共有されることを確認できた。データ解析については、航空機モニタリング解析システムにより、データ解析に着手してから結果の共有まで、約25分程度を要した。空間線量率の算出に用いるべきデータの選別作業に比較的多くの時間を要したため、本作業を効率化できるような仕組みを検討し、実装する必要がある。

無人機の訓練フライトは新潟県柏崎市の柏崎中央海水浴場で実施した。これは国内初の原子力総合防災訓練での無人機訓練フライトである。ただし、当日は降雨及び強風の悪天候であり、無人航空機Penguin Cについては訓練フライトを断念し、RTFで改めて訓練フライトを実施した。機体等のシステムの展開は1時間程度で完了でき、迅速にモニタリング準備がなされたものとする。無人ヘリコプターと無人航空機が備えている、リアルタイム通信及び逐次解析システムによる準リアルタイムに地表面から1m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が有効に機能することを確認できた。今後、本システムを緊急時における防護措置の実施判断に活用するため、現地のPCと規制庁や自治体などのPCをインターネット経由で接続し、情報共有が可能となるような基盤構築を進めていく予定である。なお、ドローンについては、地表面から1mの高さの空間線量率への換算機能を有していないため、当該機能の開発を行う必要がある。また、各無人機に搭載した放射線検出器は防水機能を有しておらず、今回の訓練のような悪天候下での使用は望ましくない。無人機による緊急時モニタリングの適用条件を拡大するために、各検出器に防水機能を不可することを検討すべきと考える。また、現在使用しているドローンについては機体に防水機能がないため、防水型のドローンを利用することも視野に入れる必要がある。今後も同様の訓練を重ね、より多くの課題を抽出し、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。

・無人航空機用放射線モニタリングシステムの開発について

緊急時モニタリングでの運用を想定した無人航空機搭載用放射線測定システムを開発し、動作試験を行った。放射線測定システムとして、環境用測定システムと緊急時用測定システムの2種類を開発し、測定対象エリアの空間線量率の状況等に応じて使い分けられるよう設計した。Cs-137線源を用いて両検出器の方向特性を試験し、環境用測定システムが前方優位な方

向特性を有していることを確認した。また、緊急時用測定システムにより、機体周辺の放射性物質に起因する放射線計数率と地表面に存在する放射性核種に起因する放射線計数率を弁別して推定することが可能であることが分かった。この推定精度を向上させるために、検出器中の遮へい体等の構成を再検討するとともに、実環境でのフライト試験を通じて推定パラメータの取得に取り組む予定である。また、機体エンジン部の残燃料の状況によっても推定パラメータが変動すると推察されたことから、両検出器を搭載して各種パラメータを取得し、その変動範囲を評価する必要がある。両検出器を Penguin C に組み付けて地上ベースで運転試験を行い、Penguin C に搭載している他の機器等に影響がないこと、計数率にノイズ成分が混入しないことを確認した。今後、実際にフライト試験を行ってもこれらの現象が見られないことを確かめ、両検出器が緊急時モニタリングに使用可能であることを実証する必要がある。

- ・緊急時モニタリングで活用できる無人航空機の調査について

緊急時モニタリングに活用可能な無人航空機の調査を行うとともに、無人航空機を飛行させるために必要な手続き等の情報についても取りまとめた。本調査の結果、11機が候補に挙げられたが、これらの内、パイロードや検出器の搭載の可否を考慮し、日本製の1機(ACSL社製 PF2)及び中国製の1機(DJI社製 MATRICE 300 RTK)のドローンを選定して基本的な飛行性能試験を行った。両機体とも十分な飛行性能を有しており、機体間で顕著な差異は見られなかった。また、放射線検出器を搭載した上で様々な条件でフライトし、空間線量率の算出及びマッピングを実施した。結果として、飛行高度、移動速度によって空間線量率の顕著な差異はなく、両機体間でも差異はほとんど見られなかった。しかしながら、PF2の自動飛行試験中、地上基地局のPCとの通信が途絶することがあり、当該機体に備え付けられているGPS測位情報の通信品質について留意しなければならないことが明らかとなった。なお、今回の飛行試験で使用した放射線検出器に組み込まれているGPS測位データを活用すれば、欠測した測位データのカバーが可能である。以上の結果から、本報告で選定した2機のドローンは緊急時モニタリングに対応できる見込みが高いことが分かった。

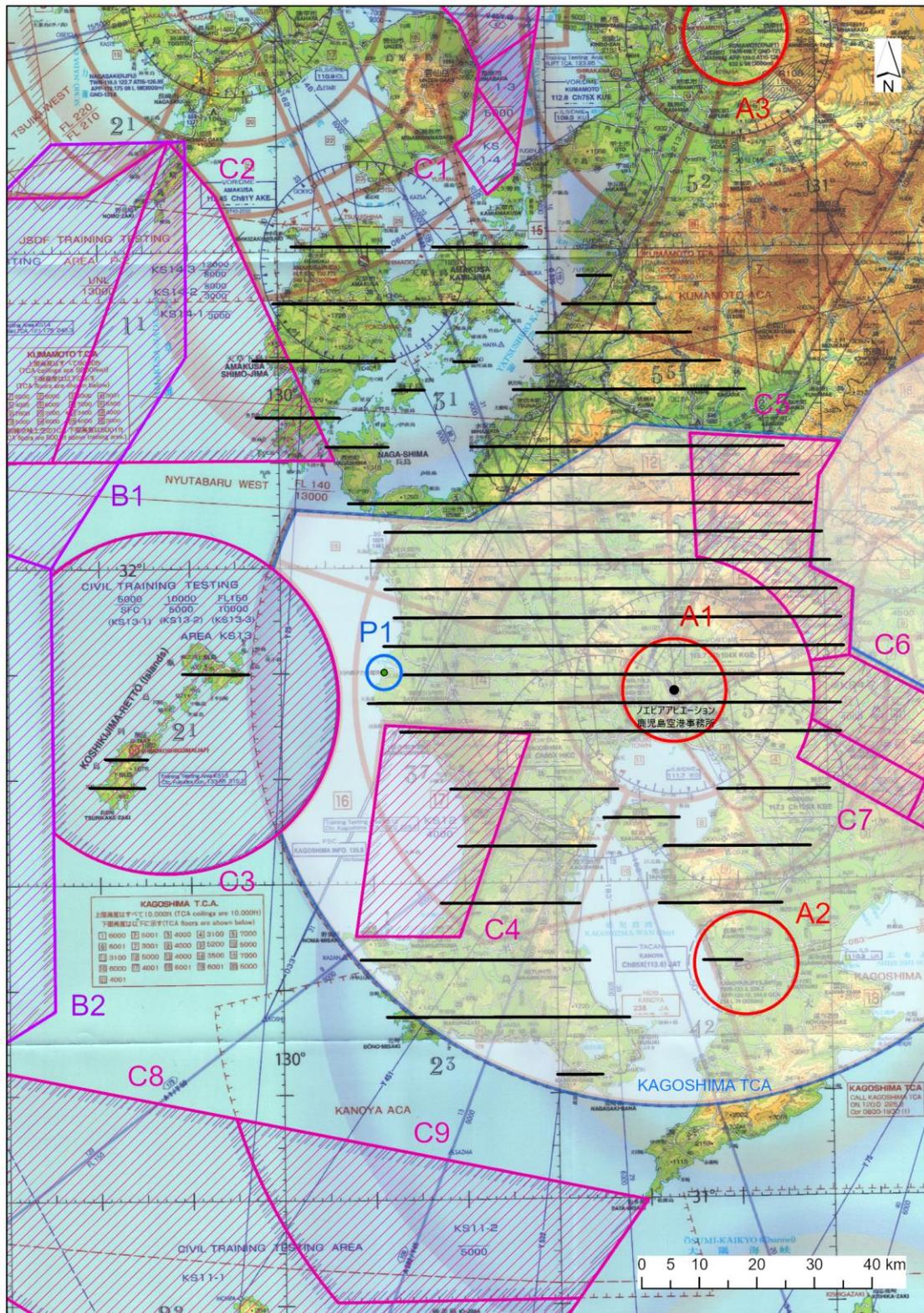


Fig. 8-1 川内周辺における管制空域に係る情報

A : 空港及び航空基地、B : 自衛隊訓練/試験空域、C : 民間訓練/試験空域  
 P : 原子力関連施設

(背景地図は、区分航空図 九州 ((公社) 日本航空機操縦士協会) を使用。)

## 謝辞

本調査研究は、原子力規制庁からの受託事業「令和 5 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。原子力機構、株式会社静環検査センターの 20 余名が、航空機に搭乗しての測定、地上での空間線量率測定、さらにデータ解析とそのマップ化に取り組んだ。ヘリコプターの運航は、朝日航洋株式会社が行った。また、令和 5 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り、航空自衛隊新潟分屯基地救難隊の皆様にご協力を頂いた。また、同訓練の無人機訓練フライト及び緊急時モニタリングで活用できる無人航空機の調査の一環として実施した、ドローンの各種飛行試験には株式会社 JDRONE から多大な協力を頂いた。ここに本事業に関与された皆様に謹んで謝意を表します。

## 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, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 工藤保, 平成 29 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2018-016, 2019, 98p.
- 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, 卜部嘉, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成 30

- 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-016, 2019, 116p.
- 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, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成30年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-017, 2019, 95p.
  - 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, 卜部嘉, 工藤保, 令和元年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-018, 2021, 121p.
  - 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, 卜部嘉, 工藤保, 令和元年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-019, 2021, 128p.
  - 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, 卜部嘉, 外川織彦, 安藤真樹, 工藤保, 令和2年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2021-029, 2022, 132p.
  - 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, 卜部嘉, 工藤保, 令和2年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2021-020, 2021, 138p.
  - 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, 坏雄一郎, 卜部嘉, 工藤保, 令和3年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2022-027, 2023, 148p.
  - 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, 坏雄一郎, 外間智規, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和3年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2022-028, 2023, 127p.
  - 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, 坏雄一郎, 新井仁規, 卜部嘉, 扇柳仁, 工藤保, 令和4年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2023-027, 2024, 146p.
  - 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, 坏雄一郎, 新井仁規, 外間智規, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和4年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング及び無人航空機による放射線モニタリングに係る技術開発(受託研究), JAEA-Technology 2023-026, 2024, 160p.
  - 22) 原子力防災会議幹事会, 原子力災害対策マニュアル, 平成24年10月19日制定(令和4年9月2日一部改訂).
  - 23) 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4年7月6日一部改正).
  - 24) 湊進, 日本における地表 $\gamma$ 線の空間線量率分布, 地学雑誌, 115, 2006, pp.87-95.
  - 25) 日本地質学会, 日本の自然放射線量,

- <http://www.geosociety.jp/uploads/fckeditor/hazard/2011/daishinsai/20110412imai/Radiation-m2.gif> (2024年3月1日閲覧).
- 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, 卜部嘉, 志風義明, 杉田武志, 近藤敦哉, 鳥居建男, 原子力発電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定, JAEA-Research 2013-049, 2014, 129p.
  - 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) 国土地理院, 基盤地図情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> (2024年3月1日閲覧).
  - 33) Currie, L. A., Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry., Anal. Chem, 40(3), 1968, pp.586-593.
  - 34) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, pp.81-101.
  - 35) 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.
  - 36) 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.
  - 37) 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.
  - 38) Hirayama, H., Namito, Y., Bielajew, A. F., Wilderman, S. J., Nelson, W. R., The EGS5 Code System, SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8, 2005, pp.20-132.
  - 39) 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/> (2024年3月1日閲覧).
  - 40) 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](https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_09-01-01-02.html) (2024年3月1日閲覧).

- 41) 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/> (2024年3月1日閲覧).
- 42) 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.
- 43) 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.
- 44) 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.
- 45) 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.
- 46) 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.
- 47) 内閣府, 令和 5 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\\_r5jissi.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/kunren/pdf/07_r5jissi.pdf) (2024年3月1日閲覧).
- 48) 国土地理院, 地理院地図 Vector, <https://maps.gsi.go.jp/vector/> (2024年3月1日閲覧).
- 49) 国土地理院, 地理院タイル一覧, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2024年3月  
1日閲覧).
- 50) UAV Factory Ltd., Penguin C Operator's Handbook V1.13, 2020.
- 51) DJI 社ホームページ, <https://www.dji.com/jp> (2024年3月5日閲覧).
- 52) Parrot 社ホームページ, <https://www.parrot.com/en> (2024年3月5日閲覧).
- 53) 3DRobotics 社ホームページ, <https://www.3dr.com> (2024年3月5日閲覧).
- 54) ドローンの市場シェアの紹介,  
<https://www.drone.jp/news/2021030811351043980.html> (2024年3月6日閲覧).
- 55) 首相官邸 政府機関等における無人航空機の調達等に関する方針について,  
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/pdf/siryoku15.pdf> (2024年3月6日閲覧).
- 56) 国土交通省 無人航空機登録ポータルサイト,  
<https://www.mlit.go.jp/koku/drone/> (2024年3月6日閲覧).
- 57) ACSL 社 プレスリリース,  
<https://www.acsl.co.jp/news-release/press-release/2798/> (2024年3月6日閲覧).
- 58) Tanigaki, M., Okumura, R., Takamiya, K., Sato, N., Yoshino, H., Yhinaga, H., Kobayashi, Y.,  
Uebara, A., Yamana, H., Development of KURAMA-II and its operation in Fukushima, Nucl.,  
Instrum., Methods Phys. Res. A, 781, 2015, pp.57-64.
- 59) 気象庁ホームページ, 地震・津波と火山の監視 火山の監視,  
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/intro/gyomu/index92.html> (2024年3月1日閲覧).
- 60) 気象庁ホームページ, 噴火警報・予報,  
<https://www.data.jma.go.jp/multi/volcano/index.html?lang=jp> (2024年3月1日閲覧).
- 61) 気象庁 鹿児島地方気象台ホームページ, 九州南部の平年の天候,  
[https://www.data.jma.go.jp/kagoshima/obs/tenkou/TenkouKaisetsuHeinenGaisetsu\\_S-](https://www.data.jma.go.jp/kagoshima/obs/tenkou/TenkouKaisetsuHeinenGaisetsu_S-)

Kyushu.html (2024年3月1日閲覧).