

令和4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5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4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.	モニタリングシステムとヘリコプター.....	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.....	14
3.1.	航空機モニタリングの方法.....	14
3.1.1.	データ取得方法.....	14
3.1.2.	ヘリコプターによるフライト実績.....	18
3.2.	キャリブレーションフライト方法.....	20
3.3.	解析のフロー.....	24
3.4.	空間線量率への換算方法.....	25
3.4.1.	空気中核種及び宇宙線由来の γ 線計数率.....	25
3.4.2.	対地高度補正係数 HF の算出方法.....	27
3.4.3.	空間線量率への換算係数 CD の算出方法.....	27
3.4.4.	空間線量率への換算方法.....	28
3.5.	検出限界値.....	29
3.6.	不確かさ.....	29
3.7.	マッピング.....	29
3.8.	空気中のラドン子孫核種の弁別手法.....	31
3.8.1.	ラドン子孫核種.....	31
3.8.2.	ラドン弁別手法の理論.....	33
3.8.3.	GI の高度補正方法.....	36
3.9.	天然放射性核種の濃度換算手法.....	38
4.	モニタリング結果と考察.....	41
4.1.	換算パラメータ.....	41
4.2.	地上測定値との比較.....	46
4.3.	空間線量率.....	53
4.4.	天然放射性核種の濃度.....	62
4.5.	ラドン弁別手法の適用.....	77
4.5.1.	パラメータ(RI 及び GI)の決定.....	77
4.5.2.	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.....	80
4.6.	放射性セシウムの沈着量.....	93
5.	原子力防災訓練における緊急時航空機モニタリング.....	96

5.1.	概要	96
5.2.	原子力防災訓練等における航空機モニタリングに係る全体概要	97
5.3.	訓練の総評と課題の抽出	104
6.	無人航空機による放射線モニタリングを想定した要素技術試験	106
6.1.	原子力災害時における無人航空機運用の課題	106
6.2.	無人航空機の開発状況	108
6.3.	Penguin C のカタログ性能	110
6.4.	フライト試験概要及び結果	114
6.4.1.	機体の基本性能及び信頼性の確認及び評価.....	118
6.4.2.	夜間フライトに必要となる機能及び運用体制の確認評価.....	124
6.4.3.	無線通信距離の評価.....	127
6.5.	原子力災害時に想定される無人航空機放射線モニタリング対応について	131
6.6.	無人飛行機搭載用放射線測定システムの設計製作及び動作試験結果	138
6.6.1.	本試験でを使用した無人飛行機搭載用放射線測定システムについて.....	138
6.6.2.	地上試験の結果.....	141
6.6.3.	フライト試験の結果.....	142
6.6.4.	無人飛行機搭載用放射線測定システムの必要性能及び課題について	145
6.6.5.	無人飛行機搭載用放射線測定システム案.....	147
7.	まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理.....	152
	謝辞.....	157
	参考文献.....	158

Table list

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL.....	5
Table 3-1 ヘリコプターのフライト距離及び速度とフライト回数.....	19
Table 3-2 キャリブレーションフライトの一覧.....	21
Table 3-3 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 <i>CR-Index</i>	26
Table 3-4 ラドン子孫核種の放出する γ 線.....	32
Table 3-5 天然放射性核種濃度への換算パラメーター一覧.....	40
Table 4-1 2022 年度取得した <i>AF</i> データー一覧.....	44
Table 4-2 2022 年度取得した <i>CD</i> データー一覧.....	44
Table 4-3 解析に用いた換算パラメータのまとめ.....	45
Table 4-4 解析に用いた <i>RI</i> 及び <i>GI</i> の一覧.....	79
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.....	97
Table 5-2 地上測定地点の位置情報及び空間線量率の値.....	99
Table 5-3 令和 4 年度原子力総合防災訓練に係るタイムテーブル (2022 年 11 月 6 日).....	99
Table 5-4 UH-60 に対する換算パラメータの一覧.....	99
Table 5-5 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と地上測定による空間線量率の 比較.....	105
Table 6-1 代表的な無人航空機の概観とスペック.....	109
Table 6-2 Penguin C 機体のカタログスペック.....	112
Table 6-3 UAV Factory における平均故障間隔 (MTBF) 計算時の事故分類.....	113
Table 6-4 試験日及び試験内容一覧.....	115
Table 6-5 各フライト試験の詳細情報.....	116
Table 6-6 10 回のフライト試験において修理交換した部品一覧.....	118
Table 6-7 アンテナ高が 2.9 m の結果.....	129
Table 6-8 アンテナ高が 9.2 m の結果.....	129
Table 6-9 UAV IP Data Link 仕様.....	134
Table 6-10 ドローン等での使用が想定される主な無線通信システム.....	135
Table 6-11 各モデルの SC1 と SC2 の算出結果.....	151

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 大飯・高浜周辺の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell430 (JA02AX))	10
Fig. 2-5 伊方周辺の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell412 (JA9616)).....	10
Fig. 2-6 システムのエネルギー分解能及び Gain の推移 (美浜・敦賀).....	12
Fig. 2-7 システムのエネルギー分解能及び Gain の推移 (伊方).....	13
Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (美浜・敦賀)	16
Fig. 3-2 予定したフライトの測線 (伊方).....	17
Fig. 3-3 航空機モニタリングデータ取得のイメージ.....	18
Fig. 3-4 航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージ	18
Fig. 3-5 テストラインフライトのイメージ	21
Fig. 3-6 美浜・敦賀におけるテストライン及びテストポイントの場所 (岐阜県輪之内町).....	22
Fig. 3-7 伊方におけるテストライン及びテストポイントの場所 (愛媛県東温市).....	22
Fig. 3-8 テストポイントフライトのイメージ	23
Fig. 3-9 宇宙線フライトのイメージ	23
Fig. 3-10 空気中核種フライトのイメージ	23
Fig. 3-11 解析のフロー	24
Fig. 3-12 空気中核種フライトで取得した陸上と海上での γ 線スペクトル例.....	26
Fig. 3-13 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例	26
Fig. 3-14 IDW に入力するパラメータとマップの関係.....	31
Fig. 3-15 ウラン系列及びトリウム系列	32
Fig. 3-16 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	35
Fig. 3-17 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.....	35
Fig. 3-18 計算体系のイメージ ⁸⁾	37
Fig. 3-19 計算体系のベンチマーク ⁸⁾	37
Fig. 3-20 シミュレーションによる測定高度と GI の関係 ⁸⁾	37
Fig. 3-21 天然放射性核種によるピークの解析例.....	39
Fig. 3-22 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).....	39
Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例	41
Fig. 4-2 美浜・敦賀のテストポイントにおける地上測定値 ($\mu\text{Sv/h}$).....	42
Fig. 4-3 伊方のテストポイントにおける地上測定値 ($\mu\text{Sv/h}$)	43
Fig. 4-4 美浜・敦賀の測線近傍における地上測定値 ($\mu\text{Sv/h}$)	48
Fig. 4-5 伊方の測線近傍における地上測定値 ($\mu\text{Sv/h}$).....	49

Fig. 4-6 美浜・敦賀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.....	50
Fig. 4-7 伊方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.....	51
Fig. 4-8 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)).	52
Fig. 4-9 美浜・敦賀における空間線量率マップ.....	58
Fig. 4-10 伊方における空間線量率マップ.....	59
Fig. 4-11 美浜・敦賀における空間線量率マップの比較.....	60
Fig. 4-12 伊方における空間線量率マップの比較.....	61
Fig. 4-13 K-40濃度マップ (美浜・敦賀).....	65
Fig. 4-14 U系列濃度マップ (美浜・敦賀).....	66
Fig. 4-15 Th系列濃度マップ (美浜・敦賀).....	67
Fig. 4-16 K-40濃度マップ (伊方).....	68
Fig. 4-17 U系列濃度マップ (伊方).....	69
Fig. 4-18 Th系列濃度マップ (伊方).....	70
Fig. 4-19 美浜・敦賀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).....	71
Fig. 4-20 美浜・敦賀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).....	72
Fig. 4-21 美浜・敦賀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).....	73
Fig. 4-22 伊方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).....	74
Fig. 4-23 伊方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).....	75
Fig. 4-24 伊方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).....	76
Fig. 4-25 海上及び陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr ₃ 検出器の計数率の関係.....	78
Fig. 4-26 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (美浜・敦賀).....	84
Fig. 4-27 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (美浜・敦賀).....	85
Fig. 4-28 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (伊方).....	86
Fig. 4-29 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (伊方).....	87
Fig. 4-30 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 (美浜・敦賀).....	88
Fig. 4-31 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 (伊方).....	90
Fig. 4-32 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.....	92
Fig. 4-33 放射性セシウム沈着量マップ (美浜・敦賀).....	94
Fig. 4-34 放射性セシウム沈着量マップ (伊方).....	95
Fig. 5-1 令和4年度原子力総合防災訓練におけるフライトプラン.....	100
Fig. 5-2 令和4年度原子力総合防災訓練において使用したヘリコプター (UH-60).....	101
Fig. 5-3 航空機モニタリングシステムの搭載状況.....	101
Fig. 5-4 緊急時航空機モニタリング中の様子.....	102
Fig. 5-5 令和4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.....	103
Fig. 5-6 緊急時航空機モニタリング中の対地高度の推移.....	105
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のイメージ	107
Fig. 6-2 原子力発電所事故を例にした対応シミュレーション.....	107
Fig. 6-3 Penguin C の概観.....	111
Fig. 6-4 フライト試験の工程.....	117
Fig. 6-5 Penguin C のフライト軌跡(2022年7月19日).....	119
Fig. 6-6 Penguin C のフライト試験時の飛行ログ(2022年7月19日).....	120
Fig. 6-7 LED ライトを装着した状態で行ったフライト時の様子.....	126
Fig. 6-8 日中に撮影したフライト時の IR カメラ画像.....	126
Fig. 6-9 通信試験アンテナ設置場所.....	128
Fig. 6-10 通信試験アンテナ設置状況.....	128
Fig. 6-11 直線通信距離とフレネルゾーンについて.....	130
Fig. 6-12 フレネルゾーンを 100 %確保するための高さ相関.....	130
Fig. 6-13 フレネルゾーンを 80 %確保するための高さ相関図.....	130
Fig. 6-14 カタパルトに対する打ち上げ時の風向.....	131
Fig. 6-15 放射線測定システム試作機(改良試作機)の概要.....	139
Fig. 6-16 ホスウィッチ型検出器の外観図面.....	140
Fig. 6-17 放射線測定システム機体搭載図面.....	140
Fig. 6-18 エンジン回転数 3,000 rpm 付近で見られるノイズ現象(地上試験).....	141
Fig. 6-19 フライト試験時の γ 線計数率及び地表面から 1 m の高さの空間線量率.....	143
Fig. 6-20 フライト試験時のエンジン回転数と β 線及び γ 線計数率.....	144
Fig. 6-21 無人飛行機 Penguin C 搭載用放射線測定システム設計案.....	149
Fig. 6-22 マルチ検出システムのシミュレーションモデル 1.....	150
Fig. 6-23 マルチ検出システムのシミュレーションモデル 2.....	150
Fig. 6-24 各モデルの周辺からの影響に応じた Ag の検出限界.....	151
Fig. 7-1 伊方周辺における管制空域に係る情報.....	156

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12年が経過し、継続的な航空機モニタリングを実施しつつ、手法の改善及び体制の整備を行ってきた¹⁾⁻¹⁹⁾。

福島原子力発電所事故における教訓を踏まえ、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、事故時の対応における本モニタリング技術の位置づけ、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。事故後整備された原子力災害対策マニュアルには、航空機モニタリングに関し下記のように定められている²⁰⁾。

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²¹⁾に定められている防護措置の実施の判断基準 (Operational Intervention Level: 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) を抽出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 γ 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をみると、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²²⁾。自然環境に起因する γ 線のほとんどは土壌または岩石中に含まれるカリウム、ウラン及びトリウムから放出されており、珪長質火成岩(火山岩類ではデイサイトや流紋岩、深成岩類では花崗岩やトーナル岩)においてそれら元素は比較的高濃度である^{22),23)}。つまり、これら珪長質火成岩類の存在と空間線量率の多寡は密接な関係にあると考えられる。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²⁴⁾について Fig. 1-1 に示す。例えば、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、 γ 線エネルギースペクトルからバックグラウンド計数率を減算する手法が考えられるが、スペクトル弁別には計数を一定程度蓄積する必要があり、一般的に時間がかかる。一方、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、事前にフライトすることによって、地域特有の航空管制の情報、測定拠点として用いることのできる空港等の特徴や利用方法及び山間部等のフライト上の危険個所の抽出等、緊急時における迅速かつ確実な航空機モニタリングの実施に資する情報を予め整備できることは重要な利点である。

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²⁵⁾⁻²⁷⁾。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²⁸⁾⁻³⁰⁾。UARMS はすでに試作機まで開発されており、福島原子力発電所周辺で実用機開発のための基礎データを取得しつつ、実用機の開発が進められている²⁸⁾。無人飛行機の特徴は、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、乗組員の被ばく線量低減に資すると考えられる。以上のことから、UARMS の開発及び運用実績に基づき、我が国の原子力防災に適用可能な能力があると考えられる無人飛行機 Penguin C について、性能評価を行い、国内での運用の課題について抽出することは有用である。

これまでの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周辺の 3 km~80 km 圏内について航空機を用いたバックグラウンドモニタリングを実施し、フライト時の地域特性を踏まえた注意点を抽出し

た。また、天然放射性核種の放射能濃度マップの作成手法を整備した⁷⁾。

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

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

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

令和元年度 (2019 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、無人飛行機を用いた原子力防災への運用技術開発に着手し、機器の選定及び仕様の確認のためのフライト試験を実施した¹⁵⁾。

令和 2 年度 (2020 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、無人飛行機 Penguin C の原子力防災への運用技術開発の一環として、機体の運用を慣熟することを目的としたフライト試験を実施するとともに機体に搭載する放射線検出器や通信システム等を試作し、本試作機を搭載したフライトを実施して得られたデータ及び原子力防災への運用に際しての今後の技術開発課題等を取りまとめた¹⁷⁾。

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

2015 年度から 2020 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空間線量率マップを Fig. 1-2 に示す。空間線量率の分布傾向は近畿地方及び中国地方で比較的高い傾向にあり、これは花崗岩類を含む珪長質火成岩が西日本側に広く分布していることに起因すると推察される。また、本マップの空間線量率の分布傾向は Fig. 1-1 で示した地殻中の元素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同様であり、航空機モニタリングによって地上測定ベースのものと遜色なく空間線量率を評価することが可能であると言える。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。

本報告書では、令和4年度(2022年度)に実施した、2020年度及び2016年度以来2回目となる、美浜・敦賀及び伊方の周辺3km～80km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。ただし、美浜・敦賀の測定範囲については、2016年度及び2021年度に実施した大飯・高浜の測定範囲と重複する領域を除いた。また、原子力災害時の緊急時モニタリングにおける無人飛行機 Penguin C の運用技術開発の一環として、本年度も引き続き、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を行った。フライト試験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今後の課題等について報告する。

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL

	基準の種類	基準の概要	初期設定値		
緊急防護措置	OIL1	住民等を数時間以内に避難や屋内退避させるための基準	空間線量率 500 μ Sv/h (地表面から1 mの高さ)		
	OIL4	除染を講じるための基準	β 線: 40,000 cpm 皮膚から数 cm, 入射窓面積 20 cm ² β 線: 13,000 cpm 1ヵ月後の値		
早期防護措置	OIL2	地域生産物の摂取を制限するとともに、住民等を1週間以内程度内に一時移転させるための基準	空間線量率 20 μ Sv/h (地表面から1 mの高さ)		
飲食物摂取制限	飲食物に係るスクリーニング基準	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	空間線量率 0.5 μ Sv/h (地表面から1 mの高さ)		
	OIL6	飲食物の摂取を制限する際の基準	核種	飲料水等 (Bq/kg)	食物等 (Bq/kg)
			放射性ヨウ素	300	2,000
			放射性セシウム	200	500
			ウラン	20	100
プルトニウム	1	10			

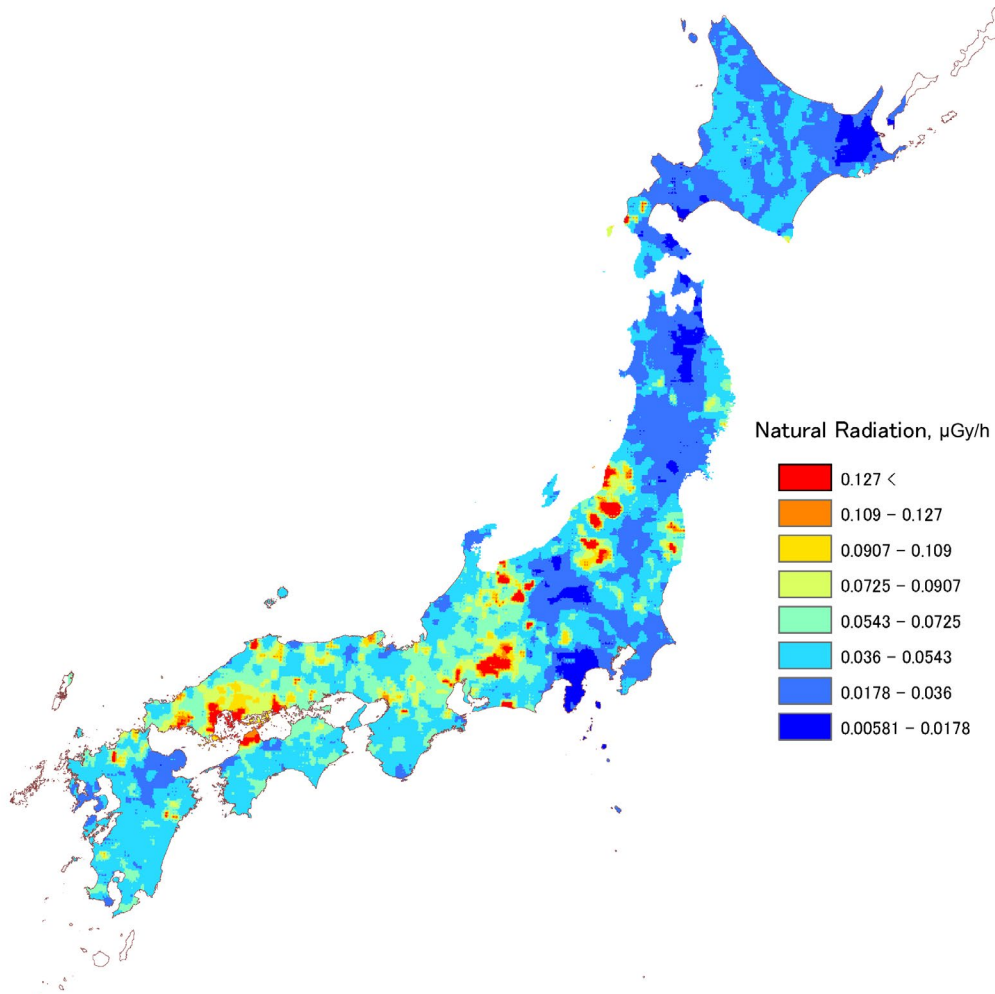


Fig. 1-1 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果 (日本地質学会ホームページ²⁴⁾より)

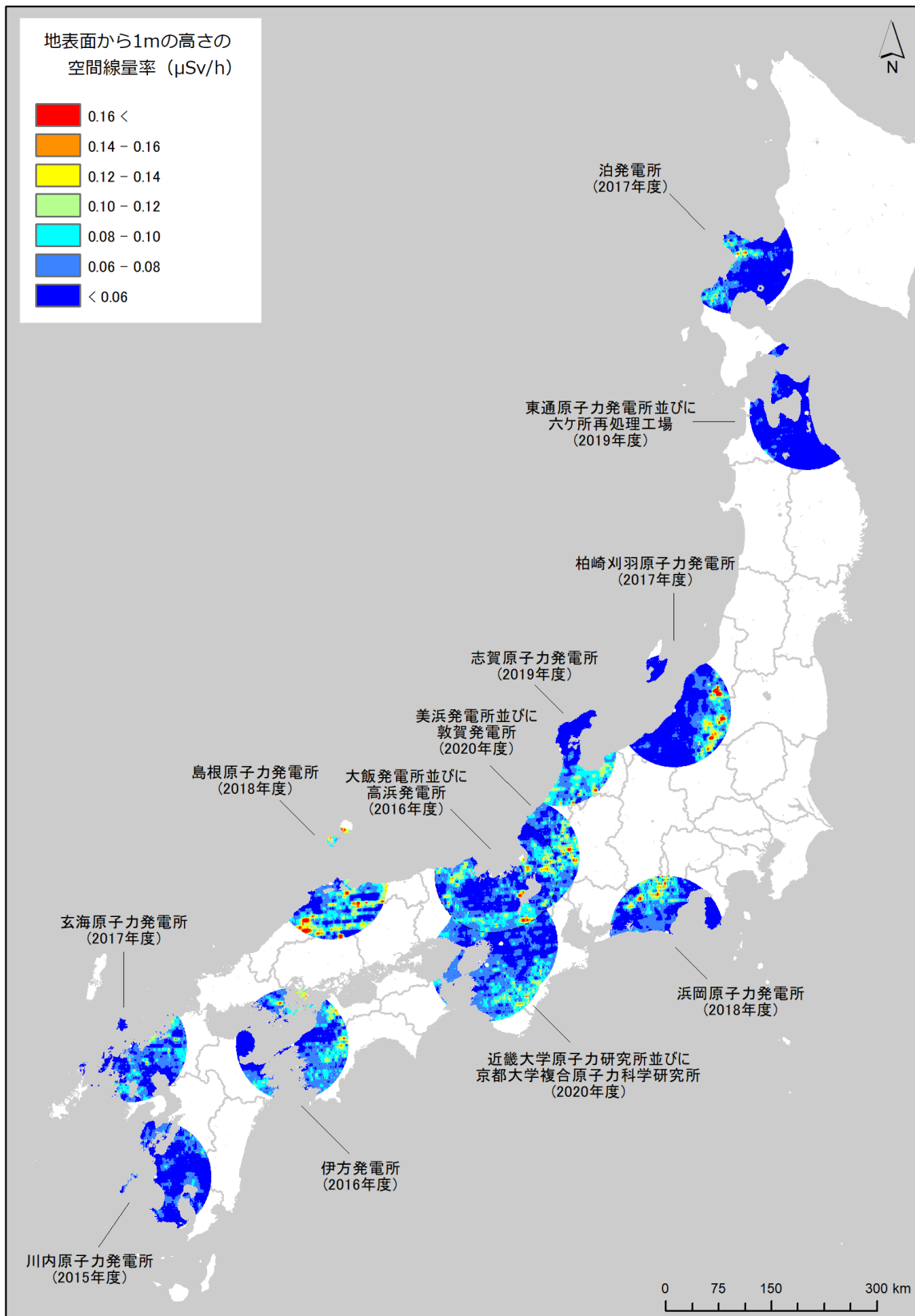


Fig. 1-2 2015年度から2020年度までのバックグラウンド航空機モニタリング結果

2. モニタリングシステムとヘリコプター

2.1. 航空機モニタリングシステム

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

今回のモニタリングで使用した Radiation Solutions Inc. (RSI, Canada) 製のシステム (以下、RSI システム) は、機内に装着するタイプである。RSI システムのブロック図を Fig. 2-1 に示し、外観を Fig. 2-2 に示す。検出部には、2" × 4" × 16" の NaI(Tl)検出器 3 本を組み込んだ検出器のユニットを 2 台使用している (合計: 12.6 L)。なお、NaI(Tl)検出器の上部に設置してある LaBr₃(Ce)シンチレーション式検出器 (3" × 3"、以下、LaBr₃ 検出器) は空気中ラドンの子孫核種に起因する γ 線計数率の弁別 (3.8 に詳述する) に使用する。検出器で計測した 1,024 ch (0 ch ~ 1023 ch) の γ 線のスペクトルは 1 秒毎に同期する GPS による位置データとともに、RS-701 と呼ばれる NaI(Tl)検出器上部に取り付けてあるデータ収集装置に保存される。検出器 2 台のデータは RS-501 という装置で統合される。RS-501 は PC と接続でき、PC にインストールされている専用のソフトウェア (RadAssist) を使用することによって GPS による位置情報や γ 線の計数率情報をリアルタイムに確認できる。また、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 γ 線計数率とその位置情報との紐付けは基本的に RSI システムの GPS で取得された緯度及び経度を基に行うが、RSI システムの GPS が異常値を示す例が確認されている¹⁰⁾。そのような事象が起きた際には、位置情報を高精度 GPS で取得された緯度及び経度に置換する。

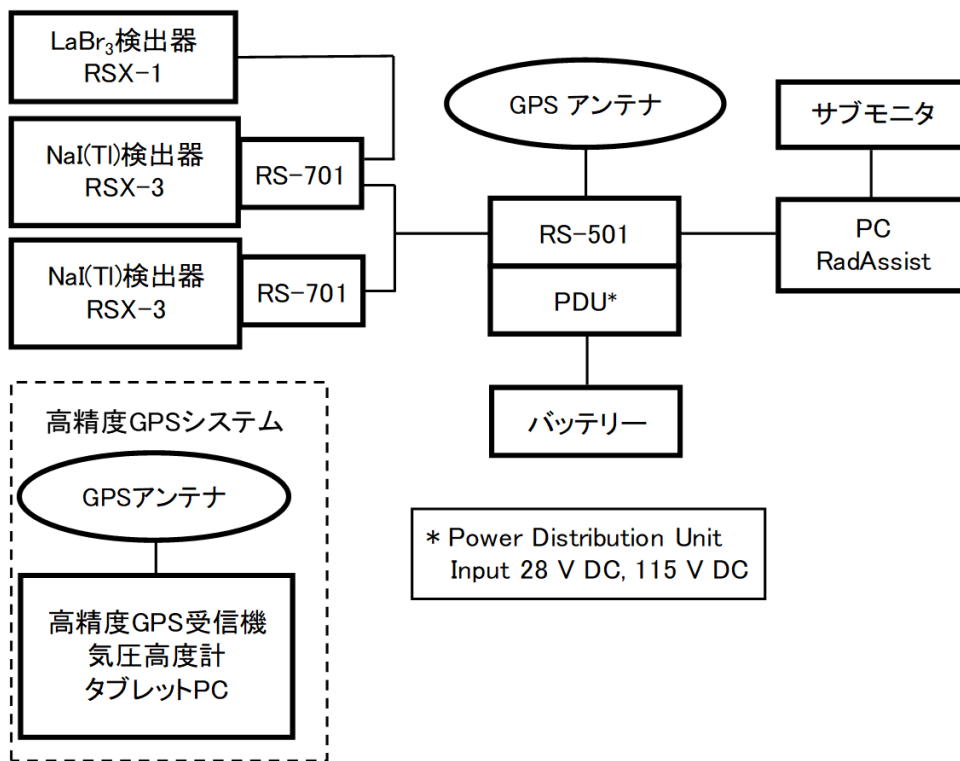


Fig. 2-1 RSI システムのブロック図

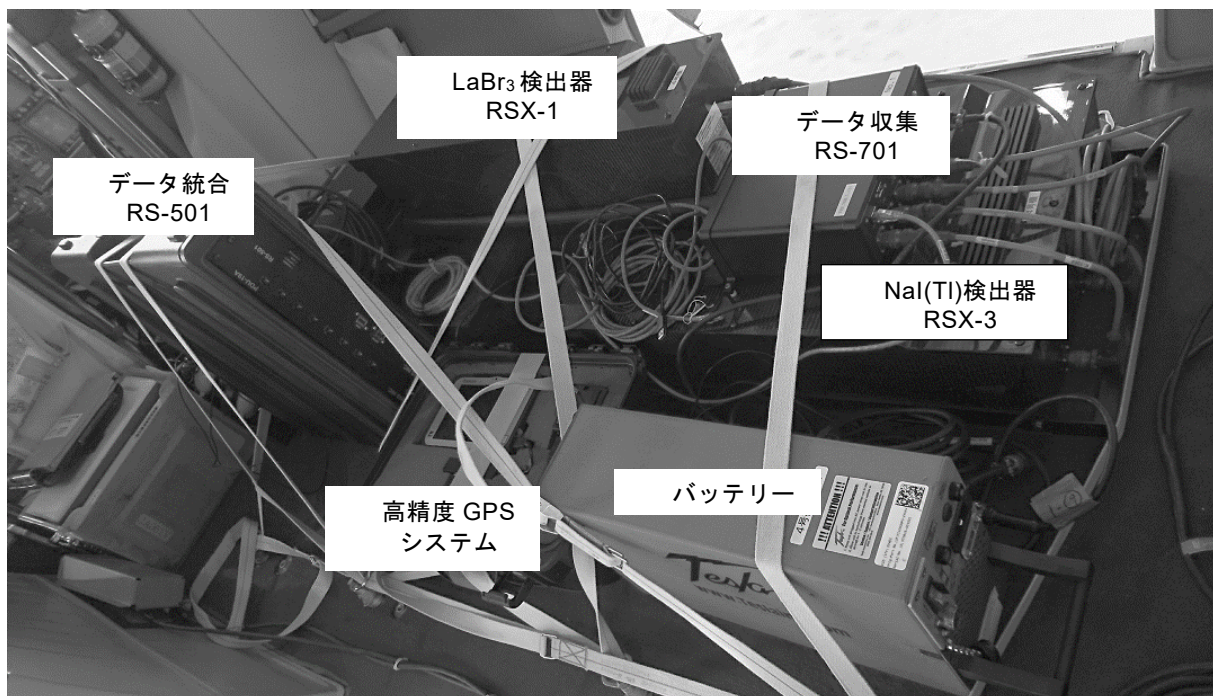


Fig. 2-2 RSI システムの外観

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 γ 線の遮へい効果を考慮する必要がある。そこで、 γ 線の測定値への誤差の混入を避けるため、ヘリコプター機体は機底に燃料タンクのないものに限定した。使用できる機種を Fig. 2-3 に示す。2022 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、美浜・敦賀では Bell430 (JA02AX)、伊方では Bell412 (JA9616) 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 大飯・高浜周辺の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell430 (JA02AX))



Fig. 2-5 伊方周辺の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell412 (JA9616))

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 TI-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。美浜・敦賀及び伊方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。美浜・敦賀及び伊方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。

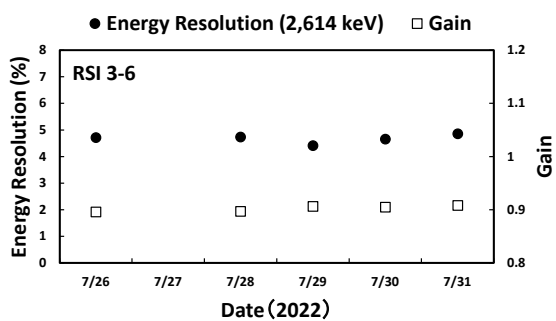
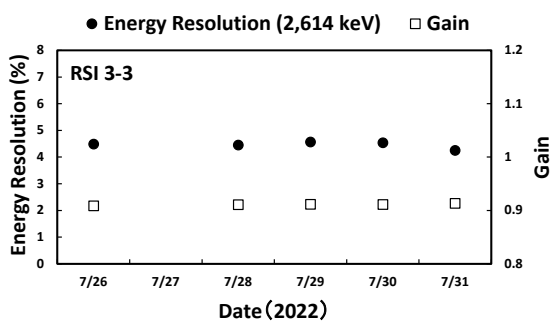
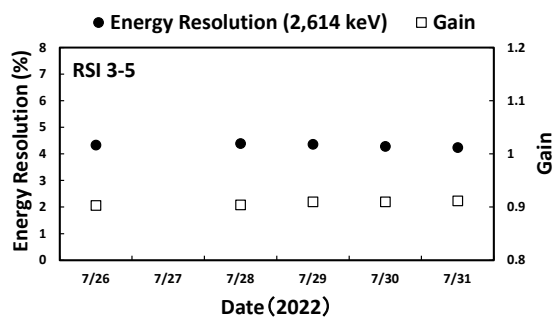
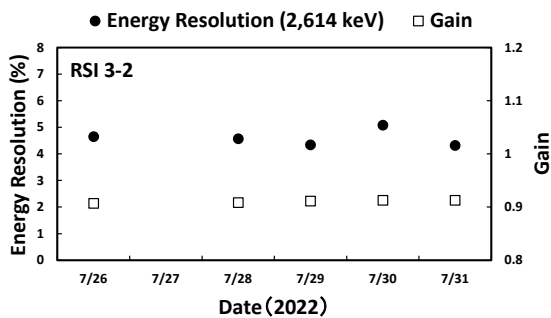
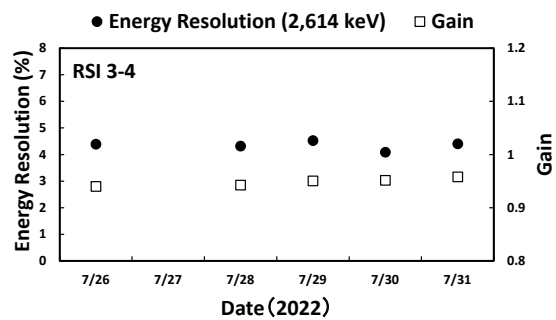
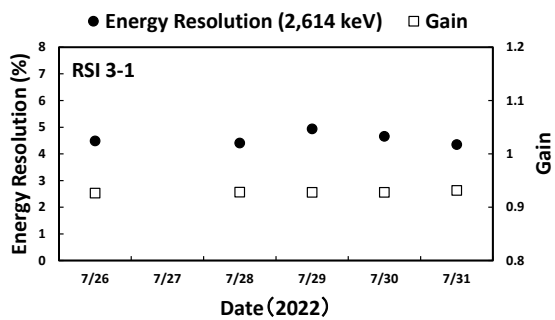


Fig. 2-6 システムのエネルギー分解能及び Gain の推移 (美浜・敦賀)

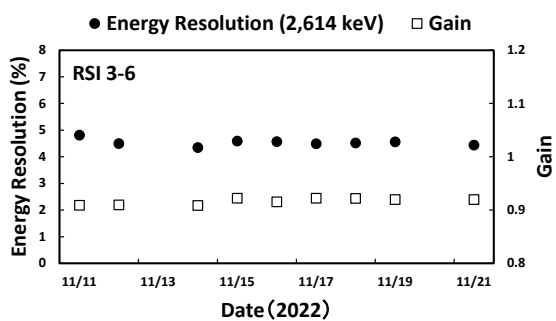
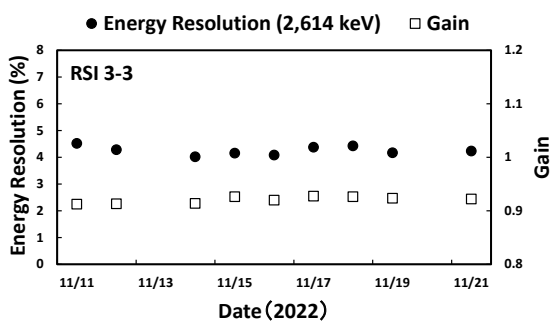
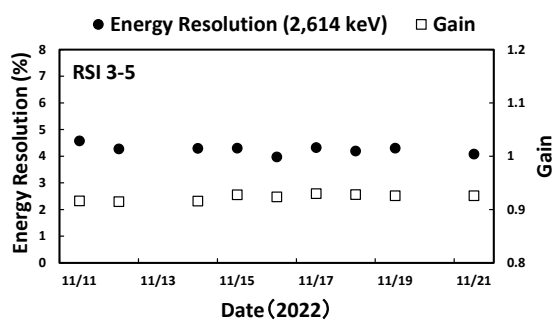
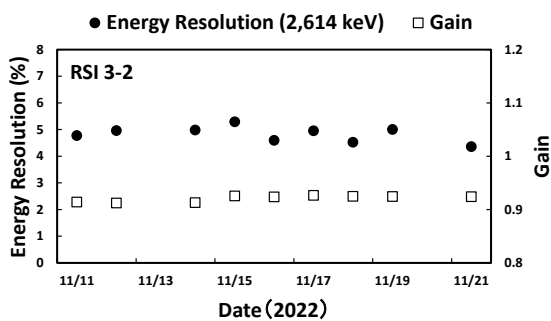
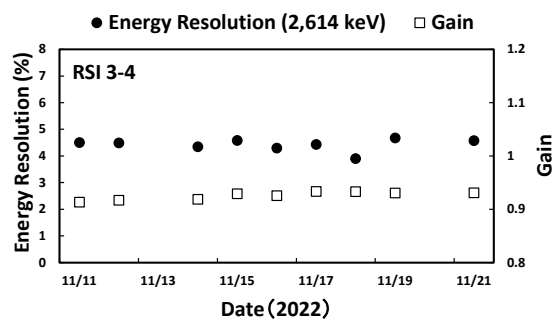
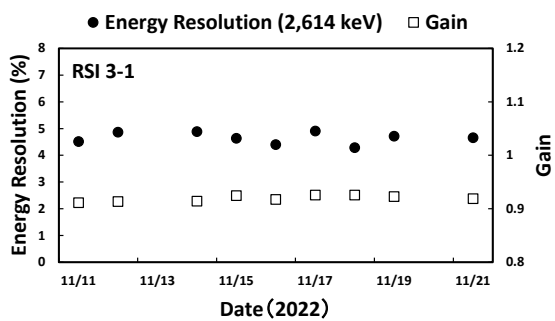


Fig. 2-7 システムのエネルギー分解能及び Gain の推移 (伊方)

3. データ取得及び解析方法

3.1. 航空機モニタリングの方法

航空機モニタリングでは、測定対象となるエリアにおいて予め設定した飛行経路 (以下、測線) の上空をフライトし、 γ 線計数率と位置情報のデータを取得する。以下に、航空機モニタリングによるデータ取得方法の詳細と美浜・敦賀及び伊方周辺の航空機モニタリングで用いたヘリコプターのフライト実績について記述する。

3.1.1. データ取得方法

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。測定データは1秒ごとにGPSによる位置情報と検出器の γ 線の計数率を記録し、下記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 及び Fig. 3-2 に美浜・敦賀及び伊方における予定測線を東西方向の実線で示す。本測線は2020年度及び2016年度に実施した美浜・敦賀及び伊方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とした。航空機モニタリングの拠点として、美浜・敦賀では県営名古屋空港、伊方では広島ヘリポートを使用した。必要に応じてヘリコプターへの燃料給油地点として、美浜・敦賀では福井空港、伊方では大分空港を利用した。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。Fig. 3-3 に航空機モニタリングデータ取得のイメージを示し、Fig. 3-4 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 及び Fig. 3-2 に示した測線の近傍 (黄色丸点) の20地点において、NaI(Tl)検出器 (日立製作所製 TCS-172B) を用いて、地表面から1 mの高さの空間線量率の測定 (以下、地上測定) を行った。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有効数字3桁目で四捨五入して有効数字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。

[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 または 10 km

[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。

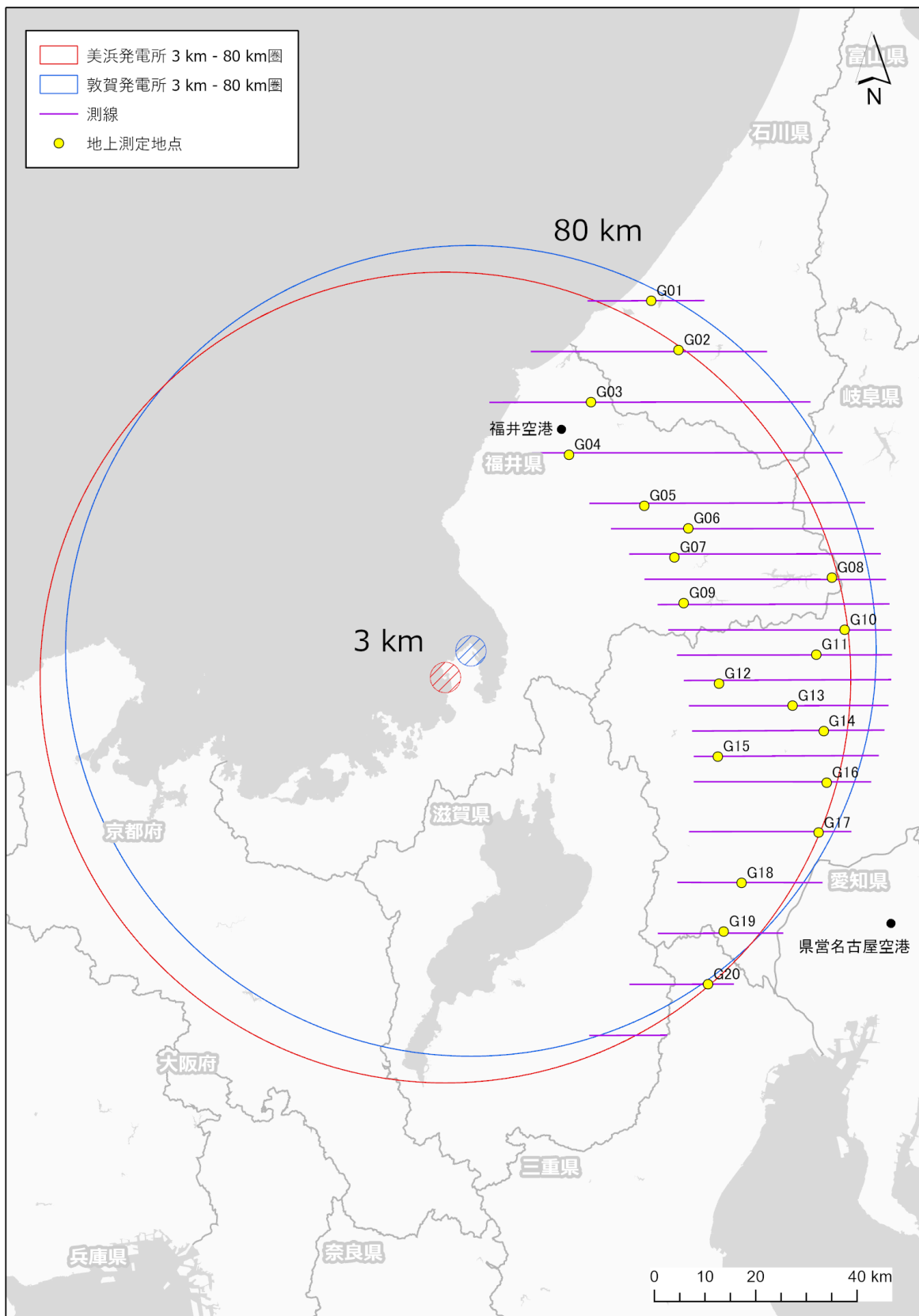


Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (美浜・敦賀)
 (背景地図は、ESRI ジャパンデータ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

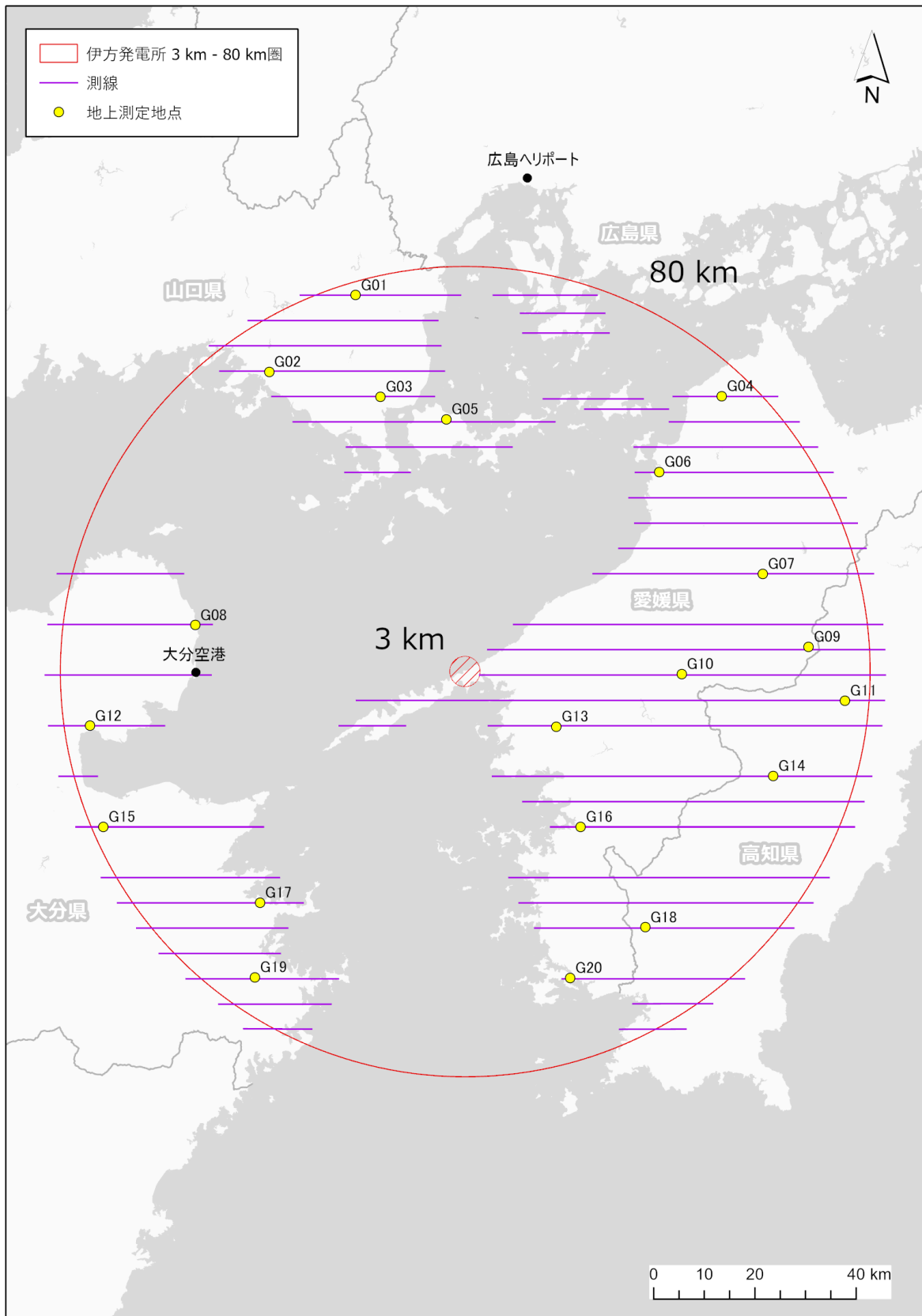


Fig. 3-2 予定したフライトの測線 (伊方)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan を使用。)

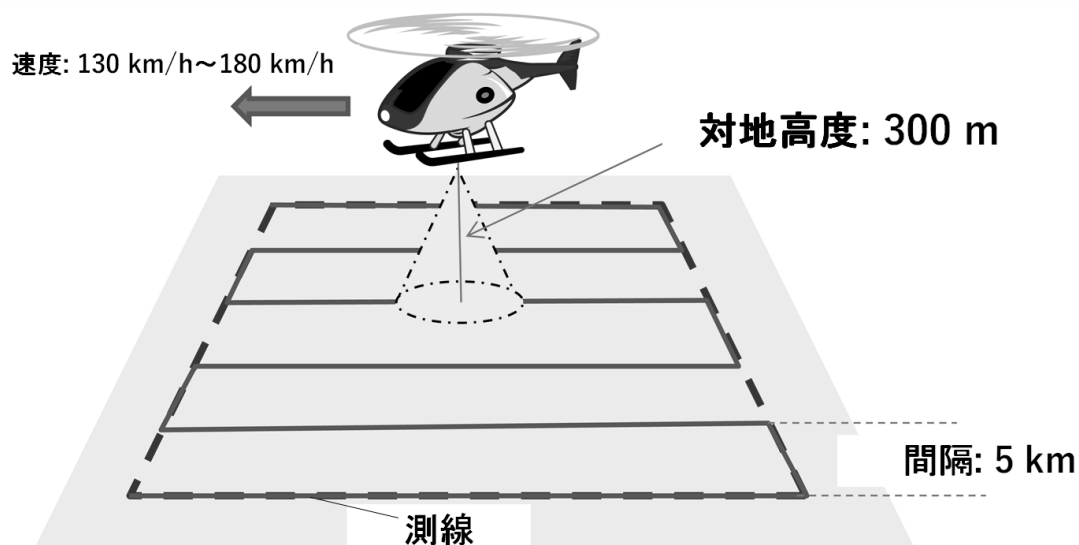


Fig. 3-3 航空機モニタリングデータ取得のイメージ

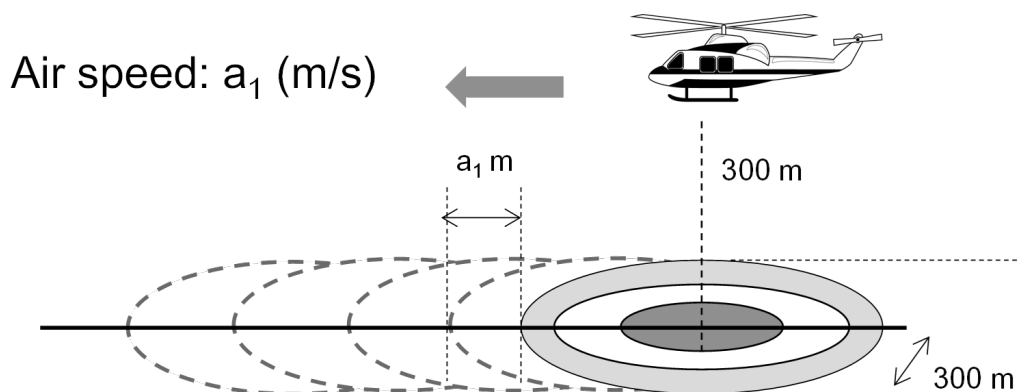


Fig. 3-4 航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージ

3.1.2. ヘリコプターによるフライト実績

2.2 節に記述した通り、美浜・敦賀及び伊方の航空機モニタリングでは Bell430 (JA02AX)及び Bell412 (JA9616) 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 3-1 に示す。測線上をフライトしたときに取得した GPS データを基に、ヘリコプターの飛行平均速度を算出したところ、前項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であり、航空機モニタリングとほとんど同時期に実施した。

[フライトに要した期間]

- 美浜・敦賀
 - ・ 航空機モニタリング : 2022年7月26日～7月31日 (延べ9フライト)
 - ・ 地上測定 : 2022年7月26日～7月30日

- 伊方
 - ・ 航空機モニタリング : 2022年11月11日～11月21日 (延べ16フライト)
 - ・ 地上測定 : 2022年11月11日～11月18日

Table 3-1 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
美浜・敦賀 Bell430 (JA02AX)	836	3,167	143	2022年7月26日	2022年7月31日	9
伊方 Bell412 (JA9616)	1,906	6,575	135	2022年11月11日	2022年11月21日	16

※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。

3.2. キャリブレーションフライト方法

航空機モニタリングにより上空で取得した γ 線計数率を地表面から1 mの高さの空間線量率や地表面の放射性セシウムの沈着量に換算するためのパラメータを求めるため、各種キャリブレーションフライトを実施する。キャリブレーションフライトの種類と目的について以下に示す。また、Table 3-2に各キャリブレーションフライトの概略をまとめた。

・テストラインフライト

実際のフライト対地高度と基準対地高度とのずれによって生じる γ 線計数率の多寡を補正するための実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor: AF (m^{-1})) を求めるフライトである。本フライトは、線量や地形の変化が少ない地点において距離が約3 kmのラインを設定し、その上空において対地高度を変化(300 m、450 m、600 m、750 m、900 m及び1,500 m)させてフライトを実施する。上記の各対地高度でフライトした際の対地高度の平均値と γ 線計数率の平均値をプロットし、それらプロットに対する指数近似曲線の傾きを AF とする。テストラインフライトのイメージをFig. 3-5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美浜・敦賀では岐阜県輪之内町、伊方では愛媛県東温市の周辺とした。また、美浜・敦賀及び伊方においてテストラインとして選定した具体的な場所についてFig. 3-6及びFig. 3-7に直線で示す。

・テストポイントフライト

空間線量率の勾配が小さく、かつ地形の平坦な地点(テストポイント)を選定し、テストポイントの中心点から半径500 mの範囲内において、対地高度300 mを維持して3分間ホバリングして γ 線計数率を取得するものである。また、テストポイントの中心点から半径500 mの範囲内で30地点を目安にNaI(Tl)検出器を用いて地上測定を行う。本フライトとテストポイントにおける地上測定値を相互比較することにより、基準対地高度(300 m)における γ 線計数率を地表面から1 mの高さの空間線量率に換算するための係数 (Conversion factor of Dose-rate: CD ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$)) が求まる。本報告において、テストポイントフライトの実施場所はテストラインフライトと同様とした。美浜・敦賀及び伊方においてテストポイントとして選定した具体的な場所をFig. 3-6及びFig. 3-7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. 3-8に示す。

・宇宙線フライト

宇宙線の影響を差し引くため、地上からの γ 線の影響が極めて少ないと考えられる海上を約300 m~2,400 mまで上昇し、宇宙線に起因する γ 線計数率データを取得するものである。宇宙線フライトにより取得される γ 線計数率は海拔高度の上昇に伴って増加し、その上昇の割合は測定エリアにはほとんど依存せず、概ね一定であることが見出されている⁴⁾。一方で、測定時期や使用するヘリコプター機種の違いが宇宙線フライトにおける γ 線計数率の上昇の割合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. 3-9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

宙線フライトは美浜・敦賀では若狭湾、伊方では伊予灘の周辺で実施した。

・ 空中核種フライト

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 γ 線計数率を取得する。空中核種フライトのイメージを Fig. 3-10 に示す。本報告において、空中核種フライトは美浜・敦賀では琵琶湖上または若狭湾上、伊方では安芸灘周辺の海上で実施した。

Table 3-2 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

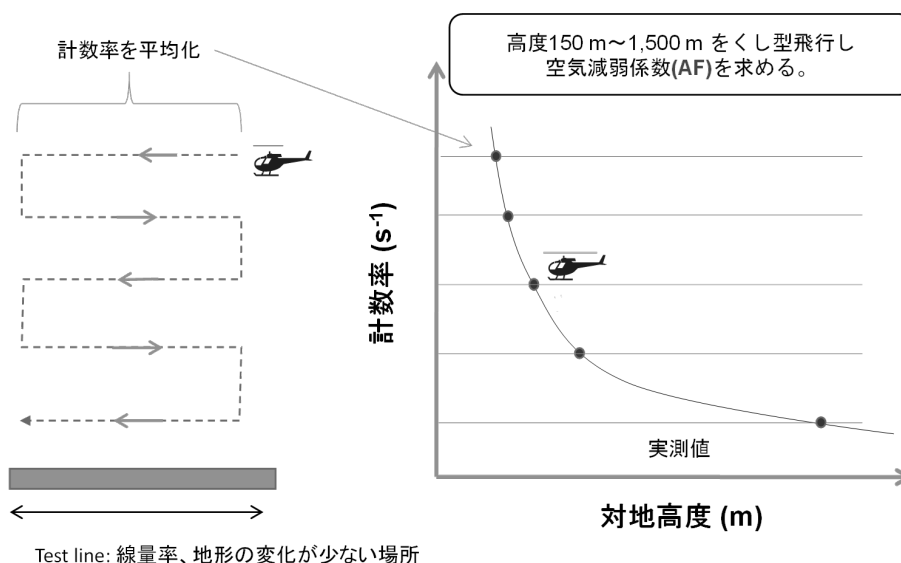


Fig. 3-5 テストラインフライトのイメージ



Fig. 3-6 美浜・敦賀におけるテストライン及びテストポイントの場所 (岐阜県輪之内町)
 (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。)

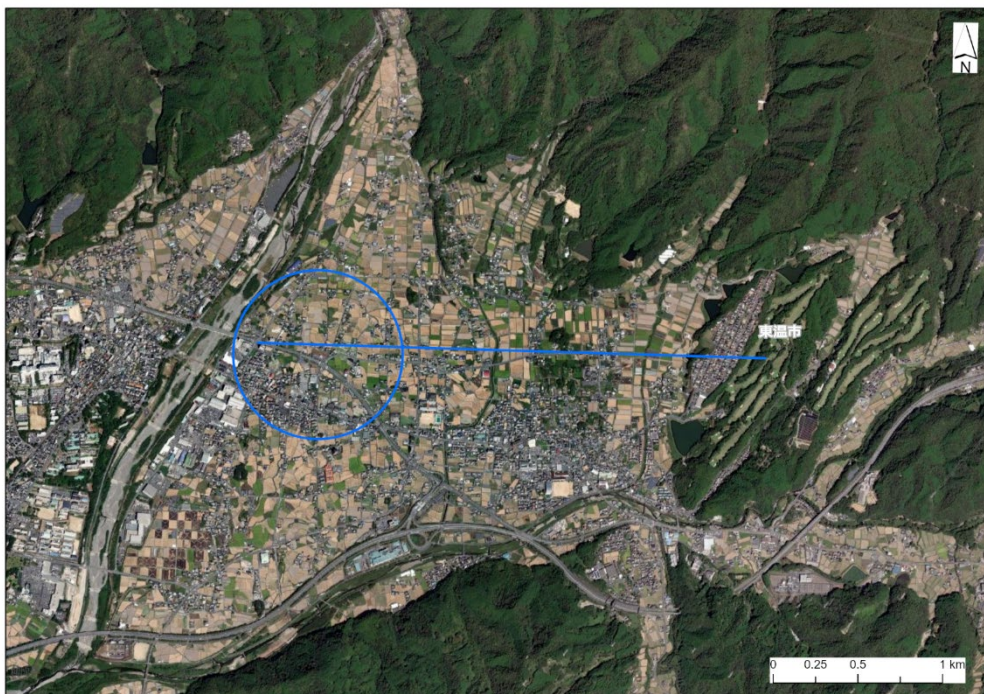
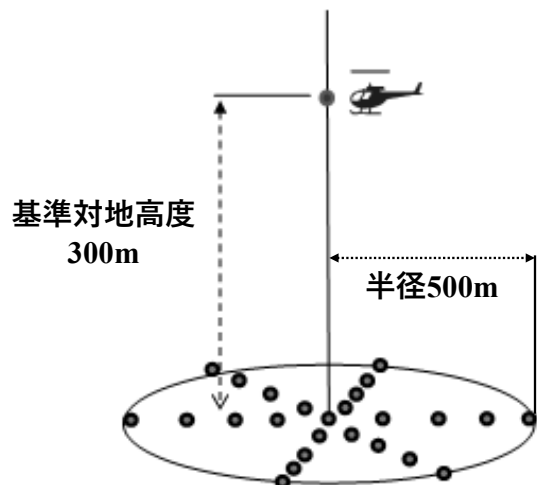


Fig. 3-7 伊方におけるテストライン及びテストポイントの場所 (愛媛県東温市)
 (背景地図は、ESRI, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community を使用。)



30地点を目安に地表面から1 mの高さの空間線量率($\mu\text{Sv/h}$)を測定する。

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

Fig. 3-8 テストポイントフライトのイメージ

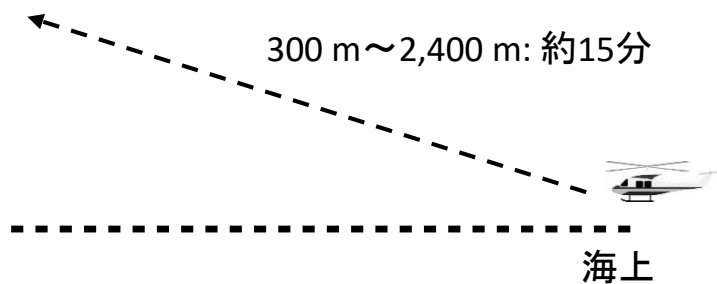


Fig. 3-9 宇宙線フライトのイメージ

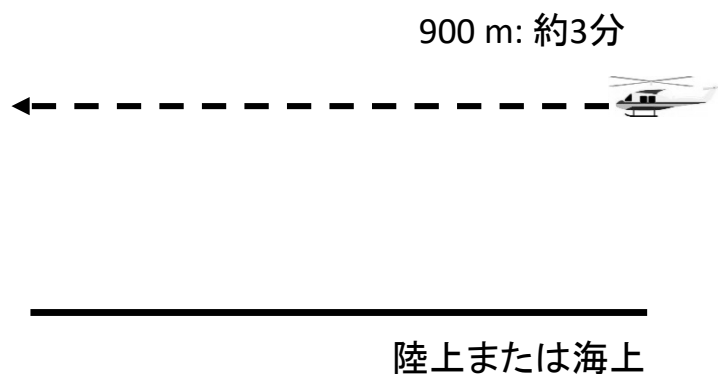


Fig. 3-10 空気中核種フライトのイメージ

3.3. 解析のフロー

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

- ① 天然放射性核種からの γ 線
- ② 空気中核種からの γ 線
- ③ 宇宙線
- ④ 放射性セシウムの γ 線

本報告で測定した美浜・敦賀及び伊方においては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. 3-11 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。

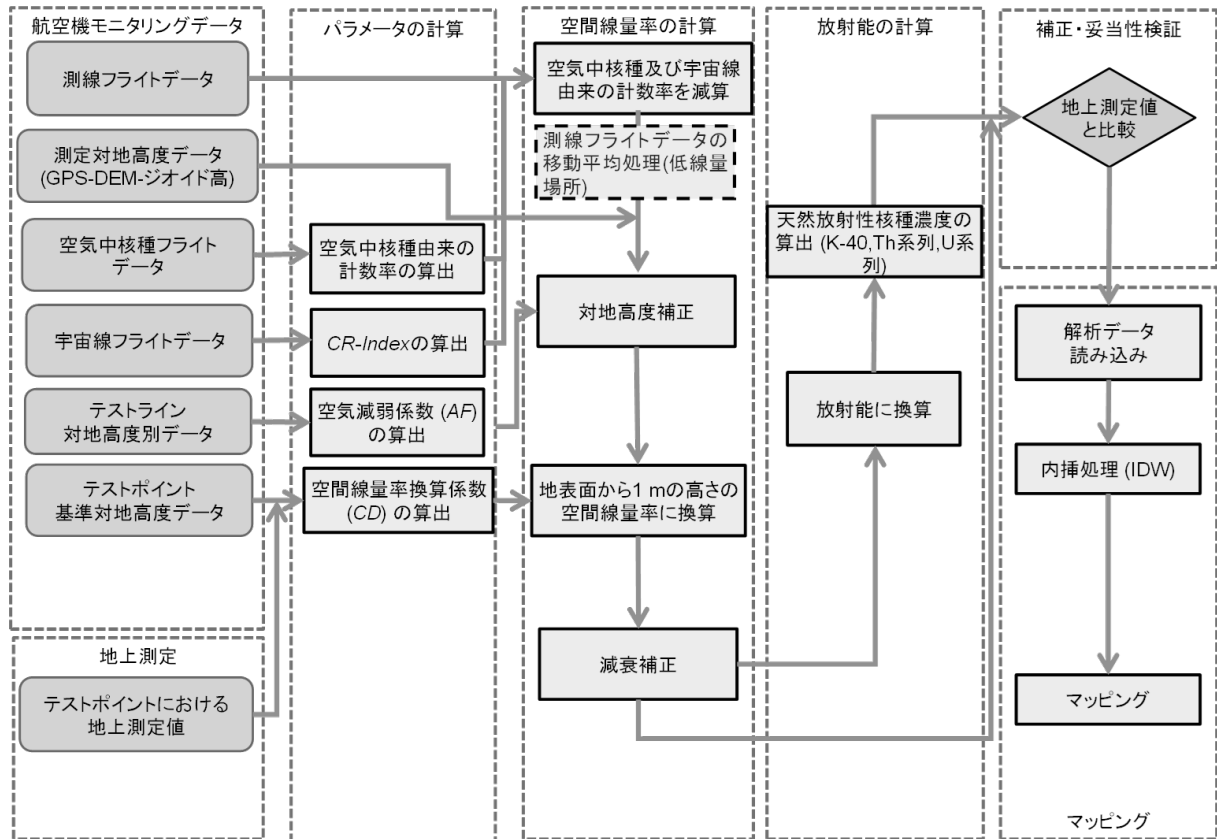


Fig. 3-11 解析のフロー

3.4. 空間線量率への換算方法

3.4.1. 空气中核種及び宇宙線由来の γ 線計数率

航空機モニタリングにおいて、空气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。

空气中核種由来の γ 線計数率については、空气中核種フライト(地上からの放射線がほとんど届かないと考えられる対地高度(または海拔高度)900 m以上)で取得したデータを用いる。空气中核種フライトによって陸上及び海上で取得したスペクトルの例を Fig. 3-12 に示す。このように、空气中核種フライトで得られるスペクトルには陸地と海上とで顕著な差異はなく、対地高度を十分に取れば陸地で得られたデータでも空气中核種からの γ 線計数率の減算に用いることが可能である。本報告においては、美浜・敦賀では琵琶湖上、伊方では安芸灘周辺の海上で空气中核種フライトのデータを取得した。空气中核種フライトで取得した計数率の算術平均値を Table 3-3 に示す。なお、空气中核種フライトのデータを用いることなく、空气中ラドン子孫核種による計数率を減算する手法(ラドン弁別手法)については3.8節に詳述する。

これまでの経験⁵⁾⁻¹⁹⁾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 γ 線はRSIシステムが測定している全エネルギー範囲(30 keV~3,000 keV)で計数されており、Tl-208が放出する2,614 keVの γ 線及びその散乱線の影響により、2,614 keV以下の計数から宇宙線による計数を弁別することは難しい。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. 3-13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 γ 線の計数率をプロットしたものである。なお、RSIシステムにおいて、3,000 keV以上の計数は最終チャンネル(1,023 ch)に積算される。このように、海拔高度と2,800 keV以上の γ 線の計数率は正の相関にあり、計測する場所に影響されない。また、2,800 keVを超える γ 線の計数率と2,800 keV以下の γ 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 γ 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。実測したデータを基に算出した*CR-Index*について Table 3-3 に示す。これらのパラメータを実際の解析に使用し、空气中核種及び宇宙線由来の計数率の減算を行った。具体的な減算方法は3.4.4項に示す。

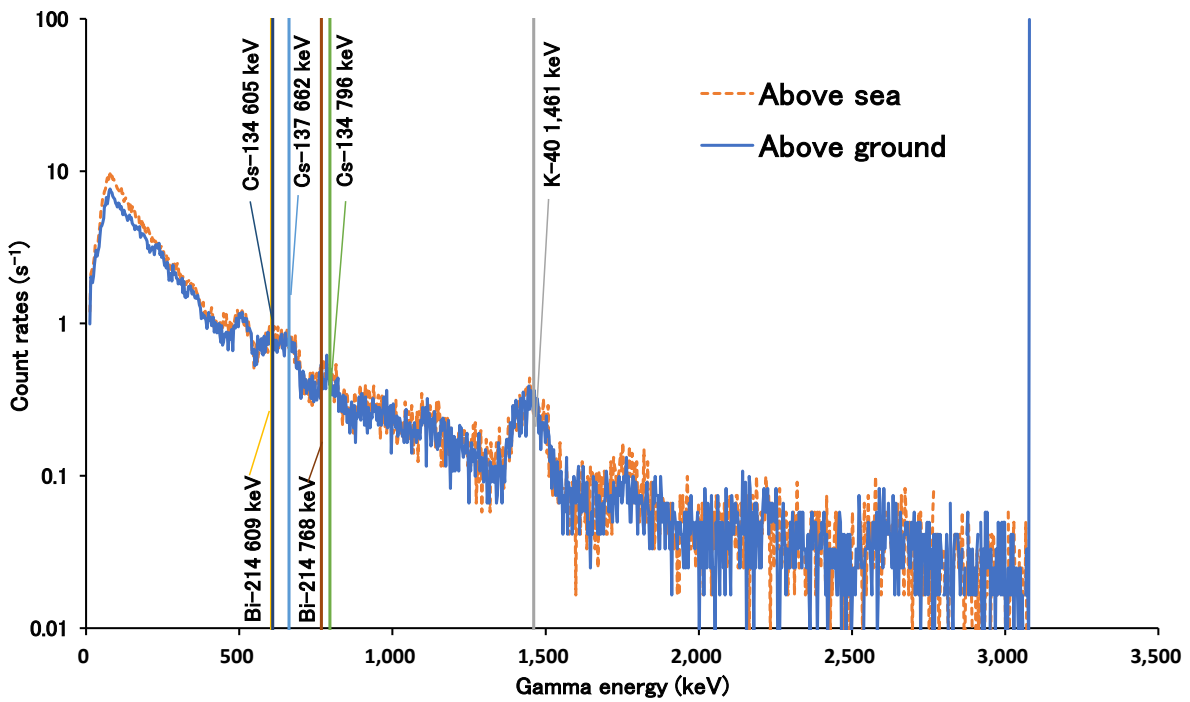


Fig. 3-12 空气中核種フライトで取得した陸上と海上での γ 線スペクトル例

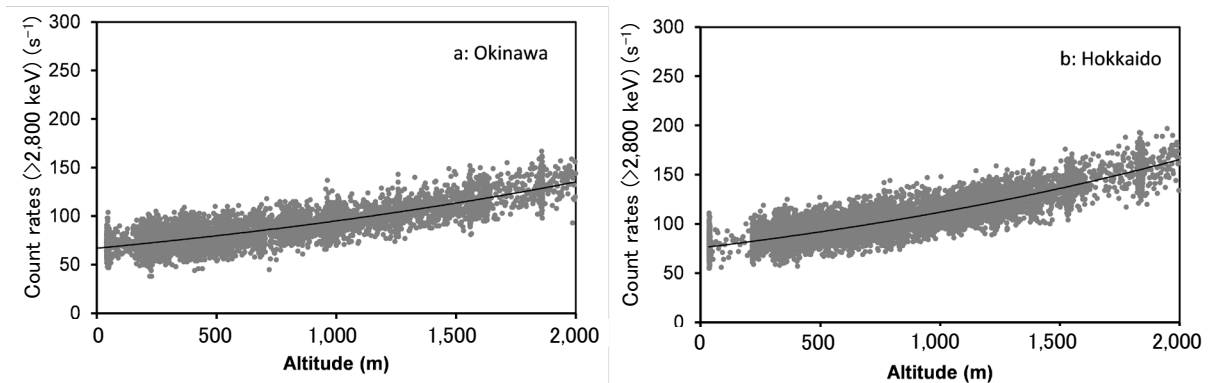


Fig. 3-13 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例

(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 3-3 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
美浜・敦賀	RSI 3	Bell430 (JA02AX)	朝日航洋 株式会社	280	3.51
伊方	RSI 3	Bell412 (JA9616)	朝日航洋 株式会社	503	3.86

3.4.2. 対地高度補正係数 HF の算出方法

各測定点における対地高度と基準対地高度とのずれによって生じる γ 線計数率の多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。ここで、2022 年度より航空機モニタリング解析システムを Python3 で動作するよう更新したのに伴い、 AF は非線形最小二乗法により求めることとした。

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

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)³¹⁾ 及びジオイド高³¹⁾ 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、4.1 節に詳述する。

3.4.3. 空間線量率への換算係数 CD の算出方法

航空機モニタリングによる γ 線計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するための換算係数 CD ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$) 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 4.1 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 γ 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_{all})
 - (2) 2,800 keV 以上の計数率 ($C_{>2,800 \text{ keV}}$)
- ② 式 [2] で用いられる、 C_{net} を算出するために、 $C_{>2,800 \text{ keV}}$ に $CR\text{-Index}$ を乗じて全エネルギー領域に対する宇宙線起源の計数率 (C_{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_{air}) とする。
- ④ C_{all} から C_{cos} と C_{air} を差し引いた計数率を正味の計数率 C_{net} とし、 CD 及び HF を用いて地表面から 1 m の高さの空間線量率 D を算出する。

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

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_{net} : 正味の計数率 (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 (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 ($\mu\text{Sv/h}$)

AF : 空気減弱係数 (m^{-1})

H_{std} : 基準対地高度 (300 m)

H_{m} : 測定対地高度 (m)

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_{air} と C_{cos} に影響を受ける。 C_{cos} はこれまでの測定結果⁵⁾⁻¹⁹⁾を見ると $200 \text{ s}^{-1} \sim 500 \text{ s}^{-1}$ の範囲となり、 C_{air} は約 400 s^{-1} であることから、ここでは、標準的な検出下限値を求めることを目的とし、 $C_{\text{air}} + C_{\text{cos}} = 900 \text{ s}^{-1}$ として評価を行った。

一般的に、検出限界値を求める際には、バックグラウンド計数率 (N_B) の標準偏差 (σ) を式 [4] に示した Currie の式³²⁾に当てはめ、検出限界値 (N_D) を算出する。

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

ここで、 N_B を 900 s^{-1} とすると、 N_D は 142 s^{-1} となる。これに、RSI システムの標準的な 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、 $0.011 \mu\text{Sv/h}$ 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。本誤差を低減する手法について検討できておらず、今後の課題である。

3.7. マッピング

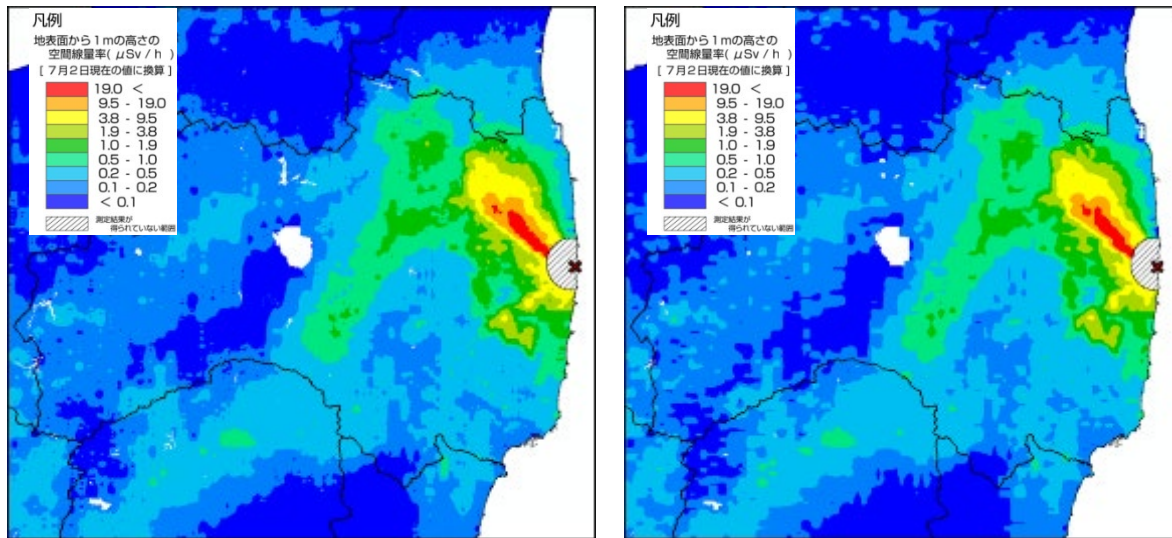
空間線量率や放射性物質のマッピングについては、国際原子力機関 (IAEA) から標準的な方法が示されている³³⁾。補間方法には、IDW (Inverse Distance Weighted: 逆距離加重法)、クリギング (Kriging)、スプライン (Spline)、Natural Neighbor 等の多くの方法が存在する。福島原子力発電所周辺の航空機モニタリングでは、2011 年 4 月 6 日～29 日にかけて実施された第 1 次の解析を担当した DOE が用いた IDW を踏襲している。IDW とはある補間地点の近傍にある複数のサンプル点の測定値を補間地点からサンプル点までの水平距離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、ある補間地点における推定値は以下の式 [5] で表される³⁴⁾。

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

本報告においては、 \hat{z}_0 を補間地点における空間線量率の推定値、 $d_{NT}(p_0, p_i)$ ($i = 1, 2, \dots, s$)を補間地点 p_0 からサンプル点 p_i までの水平距離、 z_i を各サンプル点を持つ実測値、補間地点から近傍 s 点をサンプル点とした。IDWによる補間の条件として「補間地点とサンプル点間の距離が大きくなるにつれて、その補間地点においてサンプル点が推定値に与える影響が減衰していく」ことが前提になる。そのため、推定する(重み付け平均)値は補間地点から近傍 s 点の最高値より大きくならず、最低値より小さくなることはない。また、IDWには複雑なパラメータ設定が不要である。必要となるのは、補間地点とサンプル点間の距離に応じて影響度を制御する乗数 λ と内挿処理の対象となるサンプル点数 s の2つである。IDWでは λ と s の設定によって結果が異なってくるが、最良の値を決定するための基準が存在していない。 λ が大きいほど、補間地点近傍データの影響力が相対的に大きくなり、一般的に2がよく用いられるが、必ずしも2が最良であるとは限らない。本報告では、今まで積み上げてきた経験から、 λ として2.3、 s として400を採用した。Fig. 3-14にパラメータ設定の異なる場合の空間線量率マップを示す。 λ を2.3、 s を400としたFig. 3-14 a)と λ を2.0、 s を12としたFig. 3-14 b)を比べると、両者の分布傾向は概ね一致しているが、線量のレンジの境界をみると a)の方がなめらかになっていることが分かる。

航空機モニタリングにおいては、前述したとおり300 m上空からの測定を実施するため、測定される範囲は、ヘリコプター直下の地上半径300 m円内における放射線量の平均値となる。空間線量率等のマッピングにおいては、地域基準メッシュ(1 km)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. 3-14 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. 3-15 に主な天然の放射性変遷系列であるウラン系列とトリウム系列について示す。大気中に散逸したラドンは、Po、Pb 及び Bi などのラドン子孫核種に変遷し、大気中の微粒子に吸着して大気中を浮遊する。航空機モニタリングに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 Bq/m³ 程度となっている³⁵⁾。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³⁶⁾。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γ線計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算した際に過大評価となる例が報告されている⁵⁾⁻⁷⁾。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γ線計数率を適切に除去することが望ましい。

Table 3-4 にラドン子孫核種が放出するγ線エネルギーについて示す。これらのラドン子孫核種の影響を除去し、航空機モニタリングによる空間線量率の計算を高度化することを目指した検討を 2015 年度に実施した⁷⁾。2016 年度は、開発した手法を大量のデータに適用できるよう

に既存の航空機モニタリング解析システムに組み込んだ⁸⁾。また、組み込んだ解析プログラムを使用して2016年度から2021年度に実施した原子力施設周辺におけるモニタリングデータを解析し、大気中のラドン子孫核種の影響について考察した^{9),11),13),15),17),19)}。2022年度も引き続き各原子力施設周辺の測定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。

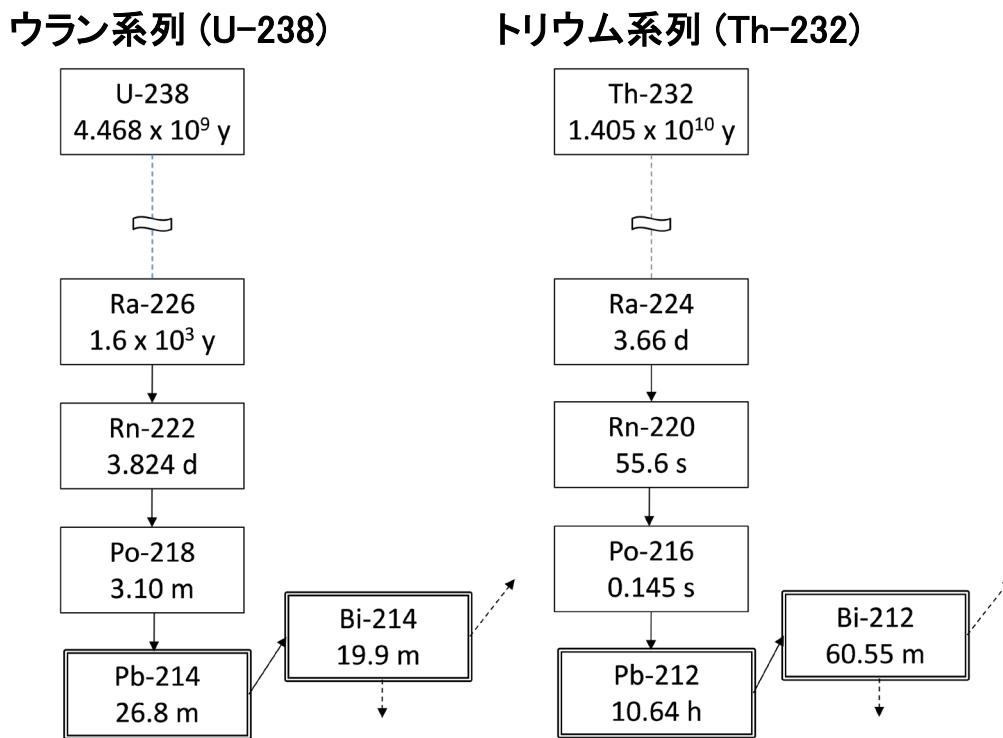


Fig. 3-15 ウラン系列及びトリウム系列
(核種名の下の数値は半減期を表す。)

Table 3-4 ラドン子孫核種の放出するγ線

Nuclide	Series	Gamma energy (keV)	Blanching 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 γ 線エネルギー領域が広範である。よって、航空機モニタリングで取得される全計数率から、ラドン子孫核種に起因する γ 線計数率のみをスペクトル分析によって弁別することは一般に難しい。航空機モニタリングにおいて空气中ラドン子孫核種に起因する γ 線計数率を推定する方法として、全計数率を取得する検出器に加え、空气中のラドン子孫核種から放出される γ 線を測定するための検出器を使用し、両者の計数率とそれらを基にして算出される換算パラメータを用いる方法の例が示されている³³⁾。原子力機構では当該手法を参考にして、空气中のラドン子孫核種に起因する γ 線を測定する検出器に LaBr_3 検出器を採用してラドン弁別手法を実施するための測定体系の構築を行い、 NaI(Tl) 検出器と LaBr_3 検出器の γ 線計数率を基にした換算パラメータの設定方法について検討と改良を重ねてきた。本項では、ラドン弁別手法の概略を示す。

LaBr_3 検出器をヘリコプター内に搭載した状況を Fig. 3-16 に示す。本図のように、地表面の放射性核種から放出される γ 線をなるべく遮へいし、空气中ラドン子孫核種の γ 線のみを測定できるようにするために、 LaBr_3 検出器は NaI(Tl) 検出器の上方に配置する。ラドン弁別手法では、空气中のラドン子孫核種及び地表面の放射性核種とヘリコプター機内に搭載した NaI(Tl) 検出器及び LaBr_3 検出器との位置関係によって生じるであろう、両検出器間の計数率の差異に着目する。Fig. 3-17 にヘリコプター機内の検出器と γ 線放出核種の位置関係のイメージを示す。このように、地表面の γ 線放出核種は常にヘリコプターの下方に存在するのに対し、大気中のラドン子孫核種はヘリコプターの周囲に存在する。つまり、地表面の放射性核種から放出される γ 線はヘリコプター下方から飛来することから、 NaI(Tl) 検出器に遮へいされて LaBr_3 検出器では比較的計数されにくい。一方で、空气中のラドン子孫核種由来の γ 線は等方的に飛来することから、 NaI(Tl) 検出器による遮へいの影響を受けにくく、 LaBr_3 検出器の計数率にさほど影響を及ぼさないと考えられる。以上のことから、地表面の放射性核種由来の γ 線に着目した場合における LaBr_3 検出器の計数率に対する NaI(Tl) 検出器の計数率の比 (NaI(Tl) 検出器計数率 / LaBr_3 検出器計数率) は、空气中のラドン子孫核種由来の γ 線に着目した場合における NaI(Tl) 検出器計数率 / LaBr_3 検出器計数率よりも大きくなると推察される。このような、 NaI(Tl) 検出器と LaBr_3 検出器における γ 線計数率に見られるであろう差異を利用し、全計数率から空气中ラドン子孫核種由来の γ 線計数率を弁別するための換算パラメータを設定する。以下のように2つの換算パラメータを定義し、ラドン弁別手法のコンセプトを数式化した。

地表面の放射性核種から放出される γ 線による影響が支配的な陸地で取得したデータにおける LaBr_3 検出器の計数率 ($C_{\text{LaBr,g}}$) に対する NaI(Tl) 検出器の計数率 ($C_{\text{NaI,g}}$) の比 ($C_{\text{NaI,g}} / C_{\text{LaBr,g}}$) をグラウンドインデックス (以下、 GI) と定義する。一方、地表面の放射性核種から放出される γ 線による影響がないと考えられる海上で取得したデータにおける LaBr_3 検出器の計数率 ($C_{\text{LaBr,a}}$) に対する NaI(Tl) 検出器の計数率 ($C_{\text{NaI,a}}$) の比 ($C_{\text{NaI,a}} / C_{\text{LaBr,a}}$) をラドンインデックス (以下、 RI) と定義する。これら2つのパラメータを利用して全計数率からラドン子孫核種由来の γ 線計数率を弁別する。本手法は NaI(Tl) 検出器における全計数率及び LaBr_3 検出器における全計数率が式 [6] 及び式 [7] で表すことができるという仮定に基づいている。また、 GI 及び RI

は式 [8] 及び式 [9] で表される。式 [6]～[9] を $C_{\text{NaI,g}}$ について解くと、式 [10] が導かれる。

$$C_{\text{NaI,all}} = C_{\text{NaI,g}} + C_{\text{NaI,a}} \quad [6]$$

$$C_{\text{LaBr,all}} = C_{\text{LaBr,g}} + C_{\text{LaBr,a}} \quad [7]$$

$$GI = \frac{C_{\text{NaI,g}}}{C_{\text{LaBr,g}}} \quad [8]$$

$$RI = \frac{C_{\text{NaI,a}}}{C_{\text{LaBr,a}}} \quad [9]$$

$$C_{\text{NaI,g}} = \frac{GI(C_{\text{NaI,all}} - RI C_{\text{LaBr,all}})}{GI - RI} \quad [10]$$

ここで、

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

$C_{\text{NaI,g}}$: NaI(Tl)検出器における全計数率の内、陸地の放射性核種から放出される
 γ 線計数率 (s^{-1})

$C_{\text{NaI,a}}$: NaI(Tl)検出器における全計数率の内、空気中のラドン子孫核種から放出される
 γ 線計数率 (s^{-1})

$C_{\text{LaBr,all}}$: LaBr₃検出器における全計数率 (50 keV～700 keV) (s^{-1})

$C_{\text{LaBr,g}}$: LaBr₃検出器における全計数率の内、陸地の放射性核種から放出される
 γ 線計数率 (s^{-1})

$C_{\text{LaBr,a}}$: LaBr₃検出器における全計数率の内、空気中のラドン子孫核種から放出される
 γ 線計数率 (s^{-1})

GI : 陸地で取得したデータにおけるLaBr₃検出器の計数率に対する NaI(Tl)
 検出器の計数率の比

RI : 海上で取得したデータにおけるLaBr₃検出器の計数率に対する NaI(Tl)
 検出器の計数率の比

である。

ヘリコプターの機種または機体によって γ 線の遮へい効果が異なるのに付随して、 RI 及び GI もヘリコプターの機種または機体に依存すると考えられることから、使用するヘリコプターごとに海上及び陸地で実際に取得したデータを基に RI 及び GI を設定することとしている。 RI 及び GI を決定するために取得したデータと両パラメータの算出結果については4.5.1項に詳述する。

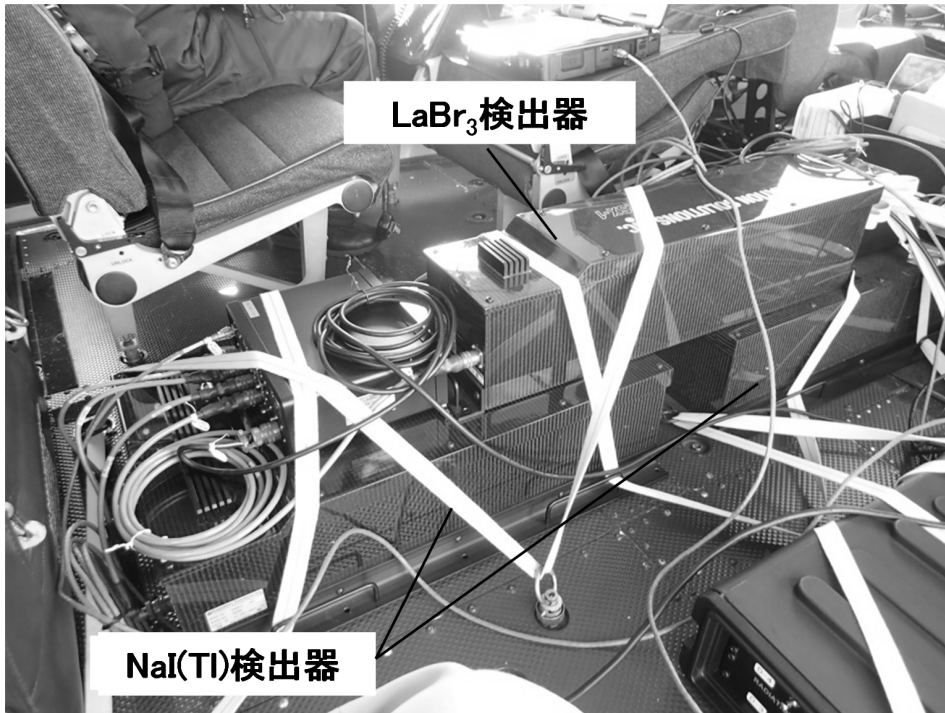


Fig. 3-16 空气中ラドン子孫核種測定用の検出器とヘリコプターへの搭載状況

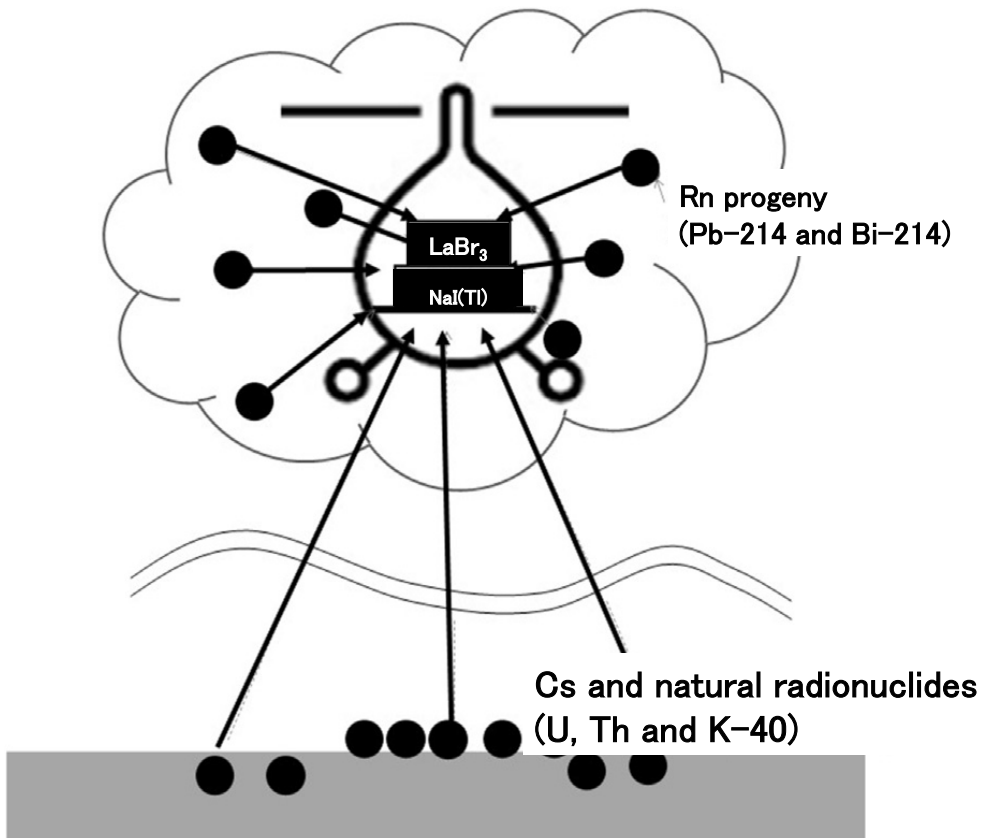


Fig. 3-17 空气中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ

3.8.3. *GI* の高度補正方法

GI については、2015 年度に実施した予備的な調査により、対地高度に依存して数値が変化することが分かっている。しかしながら、実環境中ではラドン子孫核種の寄与がないデータを取得することは不可能である。そこで、2017 年度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⁸⁾。以下では、その検討内容について簡単に記述する。

当該シミュレーションに用いた計算コードは、モンテカルロ計算コードの一種である電磁カスケードモンテカルロコード EGS5³⁷⁾ (Electron Gamma Shower Version 5) であり、ヘリコプター内の検出器の体系が簡易的に Fig. 3-18 のように模擬された。計算体系の妥当性については、正面及び横の周辺からの点線源を模擬した場合の検出器のレスポンス計算値と、実際に有人ヘリコプターに検出器を搭載した状態で、点線源 (Cs-137) を照射することによって求めた検出器のレスポンス計算値の比較結果がベンチマークとなった (Fig. 3-19)。一部値が外れている部分は、計算体系で考慮していない局所的な構造物が影響していると考えられるが、全体として構築した体系は検出器のレスポンスを再現するのに十分な精度を有すると思われる。当該計算体系に対し、地上の無限平板線源を模擬し、距離を変化させることにより *GI* と測定高度 (300 m、450 m 及び 600 m) との関係が計算により評価された。線源の模擬体系には、以下の条件が設定された。なお、土壌中の天然放射性核種濃度は全国の地上測定結果の平均値³⁸⁾が採用された。

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

検出器と線源の距離 (測定高度) に対する *GI* の計算結果を Fig. 3-20 に示す。このように測定高度と *GI* は正の相関関係にあることが見出された。

本報告において、Fig. 3-20 に示した回帰直線の傾き (0.0333) を *GI* の高度補正係数として採用し、式 [11] に基づいて各測定高度で取得したデータに対して高度補正を施した *GI* を用いた。

$$GI_{\text{corr}} = 0.0333 \times (H_m - H_{\text{std}}) + GI \quad [11]$$

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

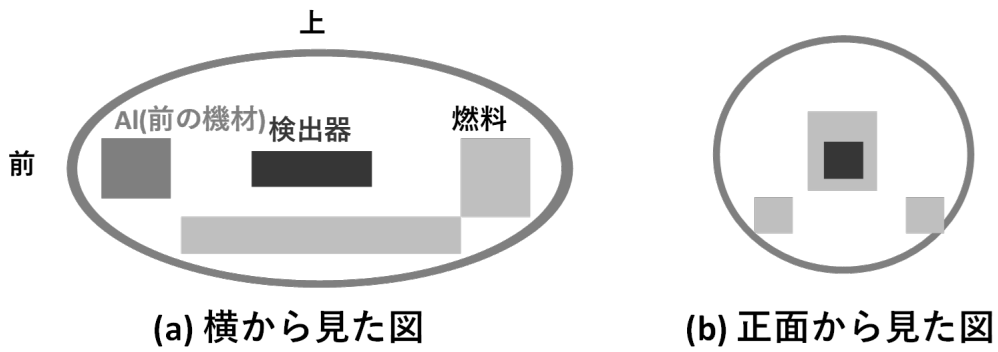


Fig. 3-18 計算体系のイメージ⁸⁾

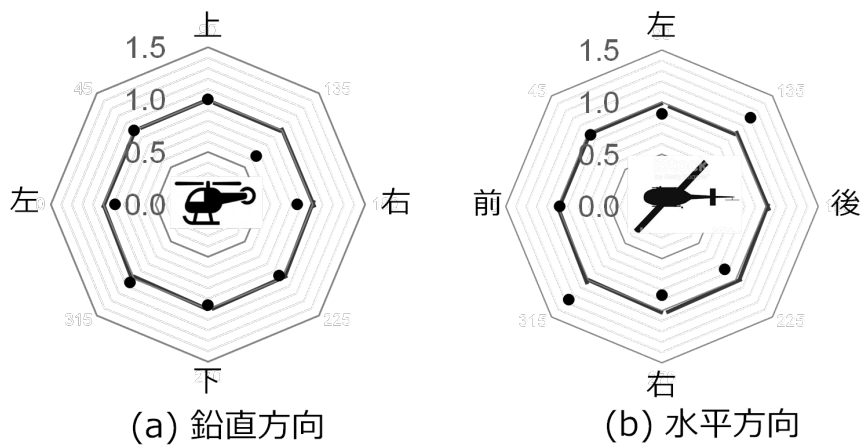


Fig. 3-19 計算体系のベンチマーク⁸⁾
(計算結果と実測結果の比)

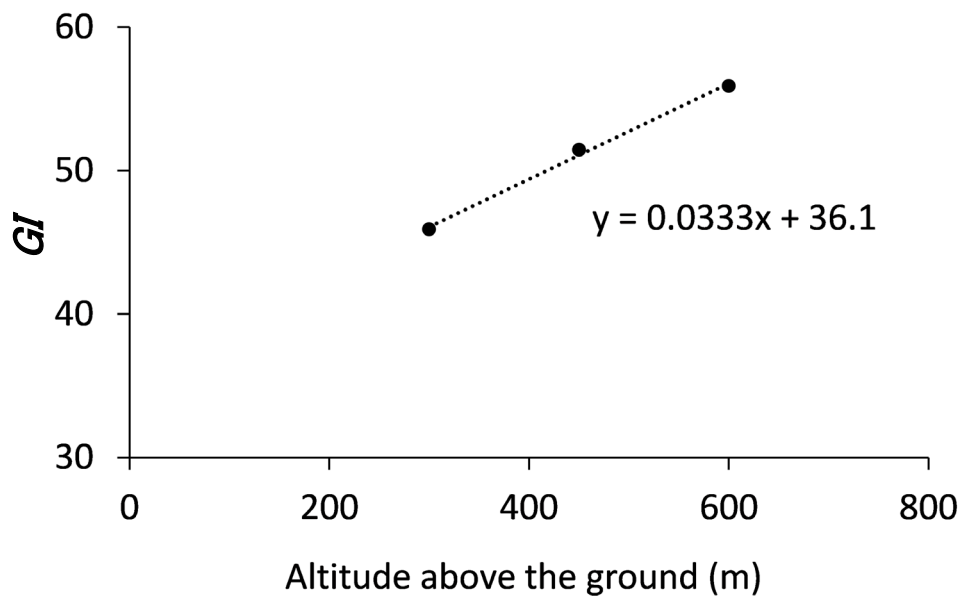


Fig. 3-20 シミュレーションによる測定高度と GI の関係⁸⁾

3.9. 天然放射性核種の濃度換算手法

一般的に、 γ 線スペクトルを利用して放射性核種を特定し、その放射能を定量化する手法が用いられている。航空機モニタリングにおいても、 γ 線スペクトルが取得できることから、天然放射性核種ごとに放射能の定量化が可能である。Fig. 3-21 に対地高度 300 m で取得できる典型的な γ 線スペクトル例を示す。このように、散乱線の影響の比較的少ない高エネルギー領域において自然放射性核種である K-40 (1,461 keV)、U 系列 (Bi-214 : 1,765 keV、2,204 keV) 及び Th 系列 (Tl-208 : 2,614 keV) が検出される。1,000 keV 以上の比較的高エネルギーの γ 線は低エネルギー側と比較して検出効率が悪いいため、スペクトルが識別できるまで測定時間をかける必要がある。航空機モニタリングでは、空間線量率の算出にスペクトルの全エネルギーの計数率を利用するため、1 秒ごとに取得したデータを使用しているが、天然放射性核種の濃度換算では計数率の誤差を考慮し、20 秒のデータを積算した γ 線スペクトルを使用して目的のエネルギーにおけるピークの計数率を求めた。

航空機モニタリングの取得データから地上における天然放射性核種濃度を求めるためには、それぞれの核種に対する濃度換算係数と高度補正係数が必要となり、スペクトル解析ではエネルギーピークごとにその数値を決定する必要がある。まず、濃度換算係数 ($CC [(s^{-1})/(Bq/kg)]$) を求めるためには、テストポイント内における地上測定値と上空での計数率との比較が必要である。ここでは、Fig. 3-6 (美浜・敦賀) 及び Fig. 3-7 (伊方) で示した、測定対象エリアごとに設定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、その平均値を地上測定値 (Bq/kg) として取り扱った。テストポイント上における計数率については、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 検出器による地上測定値との比を取って $CC [(s^{-1})/(Bq/kg)]$ 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 によるシミュレーションの結果⁷⁾を利用した。当該計算には、無限平板を模擬した半径 2,000 m の線源が仮定され、その上空 50 m、100 m、150 m、200 m、300 m、400 m 及び 500 m の計数率が計算された。計算した対地高度と計数率の関係について、上空 50 m で得られた結果を 1 に規格化したものを Fig. 3-22 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。以上により求めた CC と AF の数値について Table 3-5 に示す。

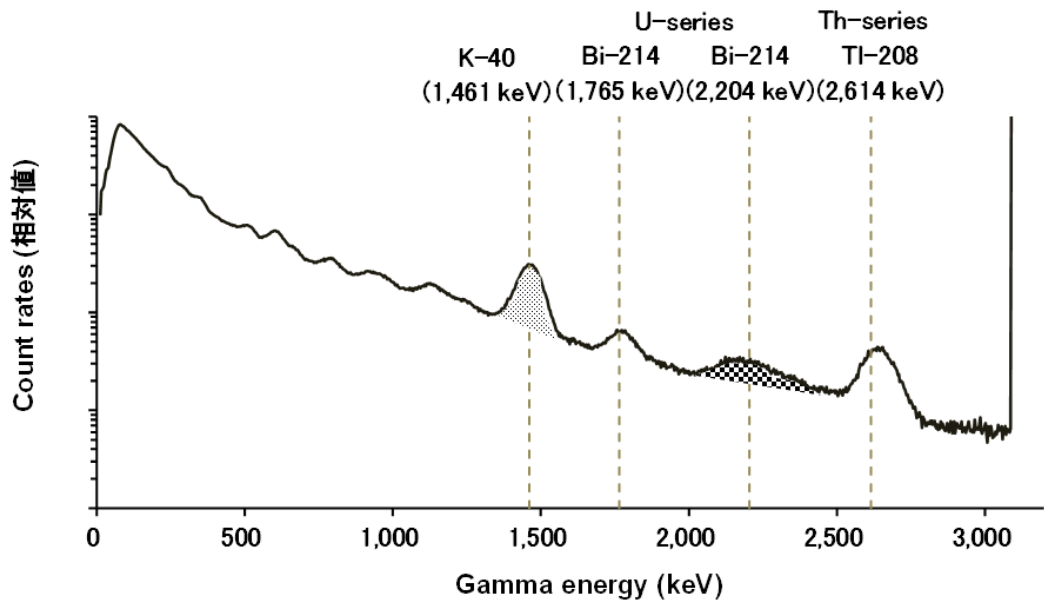


Fig. 3-21 天然放射性核種によるピークの解析例

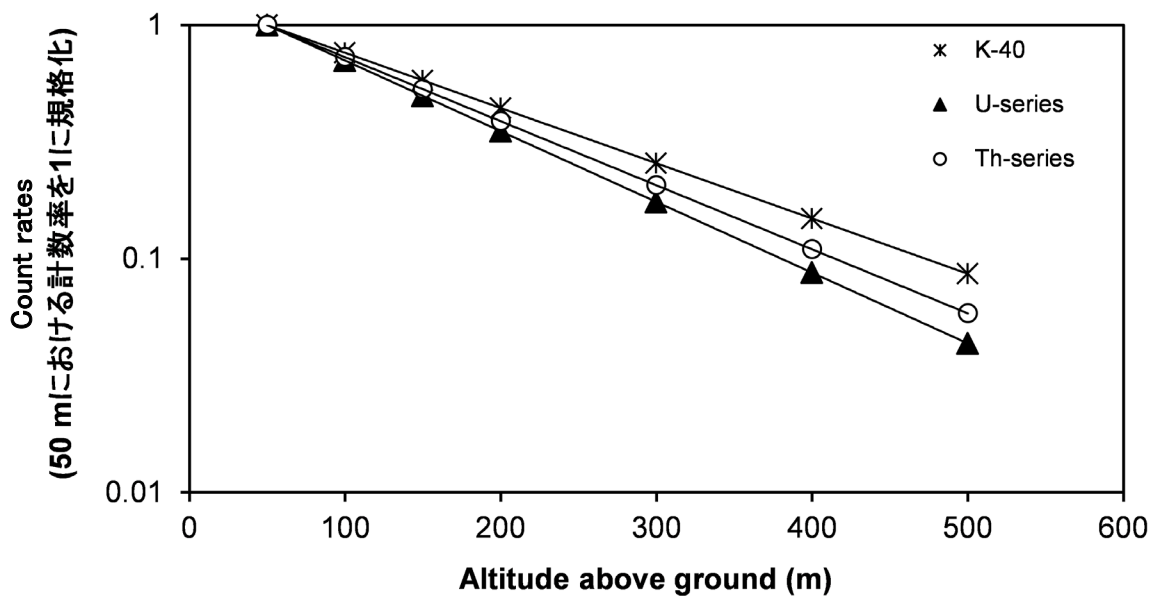


Fig. 3-22 天然放射性核種ごとの対地高度と計数率の関係
(EGS5 によるシミュレーション)

Table 3-5 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
美浜・敦賀	CC ($s^{-1}/[Bq/kg]$)	0.030	0.230	0.140
	AF (m^{-1})*	-0.0054	-0.0070	-0.0063
伊方	CC ($s^{-1}/[Bq/kg]$)	0.030	0.190	0.120
	AF (m^{-1})*	-0.0054	-0.0070	-0.0063

*EGS5によるシミュレーション結果より

4. モニタリング結果と考察

4.1. 換算パラメータ

3.4.2 項で示した方法により 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 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 4-1)。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 CD を求めた (Table 4-2)。 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 (美浜・敦賀) 及び Fig. 4-3 (伊方) に示す。なお、本図に示した空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) は NaI(Tl)検出器の指示値である。

以上で求めた AF 及び CD の内、テストラインフライトデータ及びテストポイントフライト中の γ 線計数率及び対地高度等の一定性を評価し、最も信頼できるパラメータを 1 組選定した。選定したパラメータを Table 4-3 に示す。 AF については RV が最も小さいデータとして美浜・敦賀では 7 月 31 日、伊方では 11 月 11 日に取得した数値を採用した。 CD については γ 線計数率及び対地高度が最も安定して取得できていたデータとして、美浜・敦賀では 7 月 26 日、伊方では 11 月 17 日に取得した数値を採用した。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。このように、同様のヘリコプター機種を用いたとしても、 AF 及び CD の値は福島原子力発電所由来の放射性セシウムによる影響を受けた地域において得られたデータを基に決定された数値とやや差異があり、測定対象となる γ 線の平均エネルギーの多寡に多少の影響を受けることが示唆される。

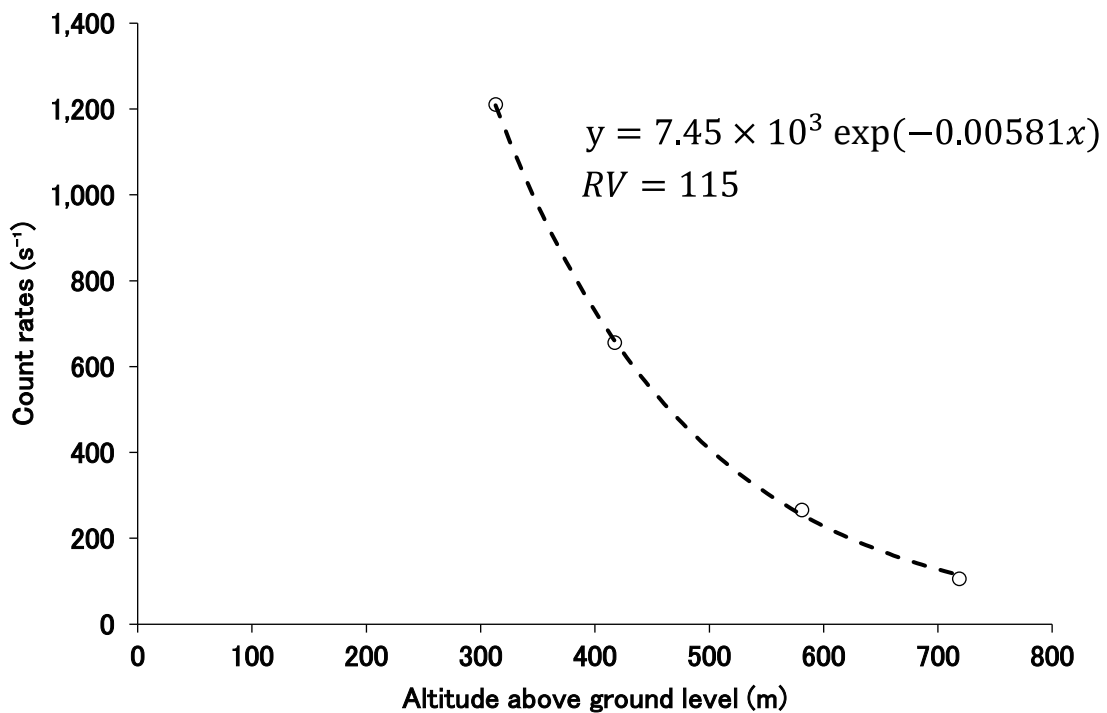


Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例
(Bell412 JA9616、2022 年 11 月 11 日、TestLine (愛媛県東温市) にて実施)

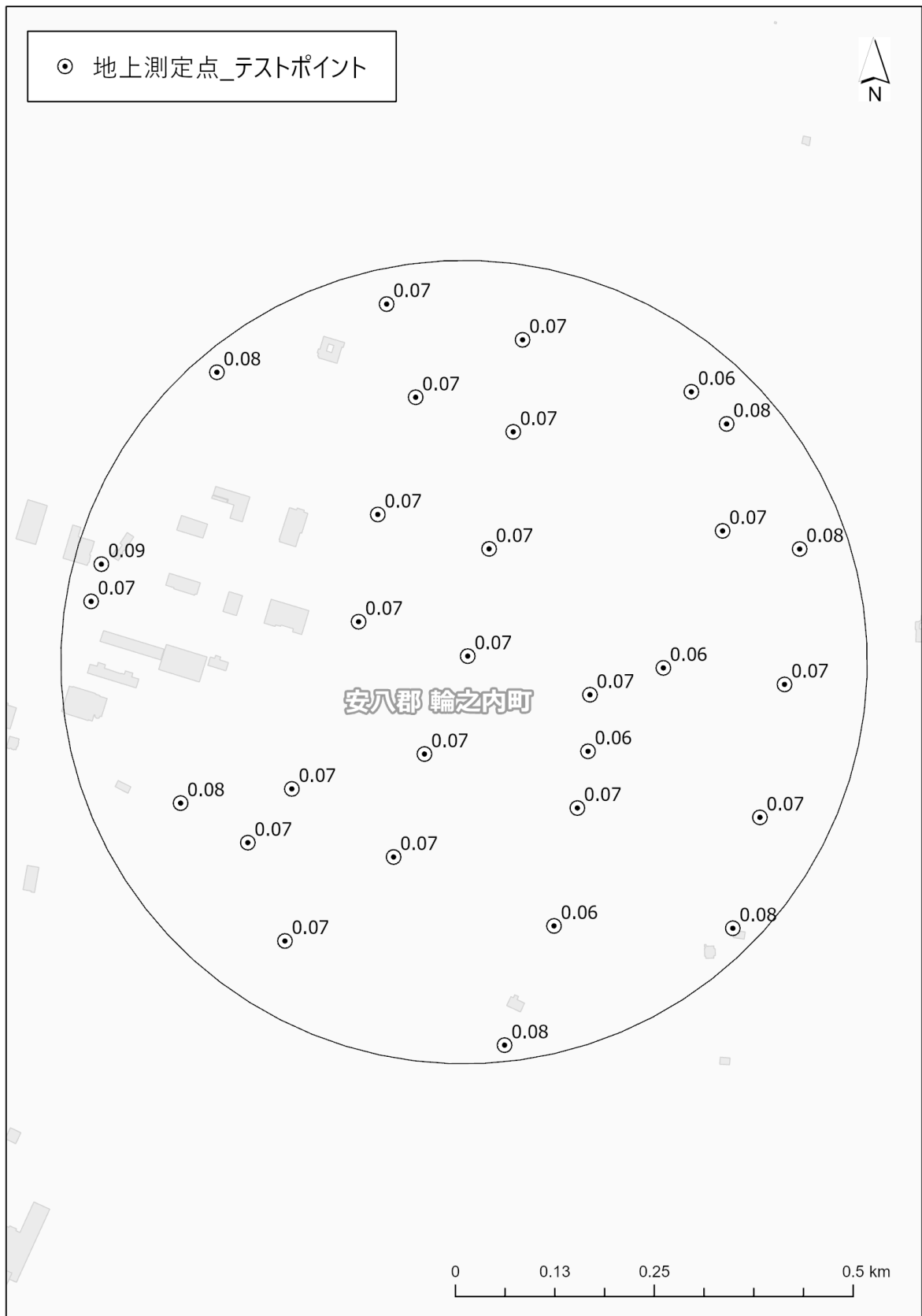


Fig. 4-2 美浜・敦賀のテストポイントにおける地上測定値 ($\mu\text{Sv/h}$)

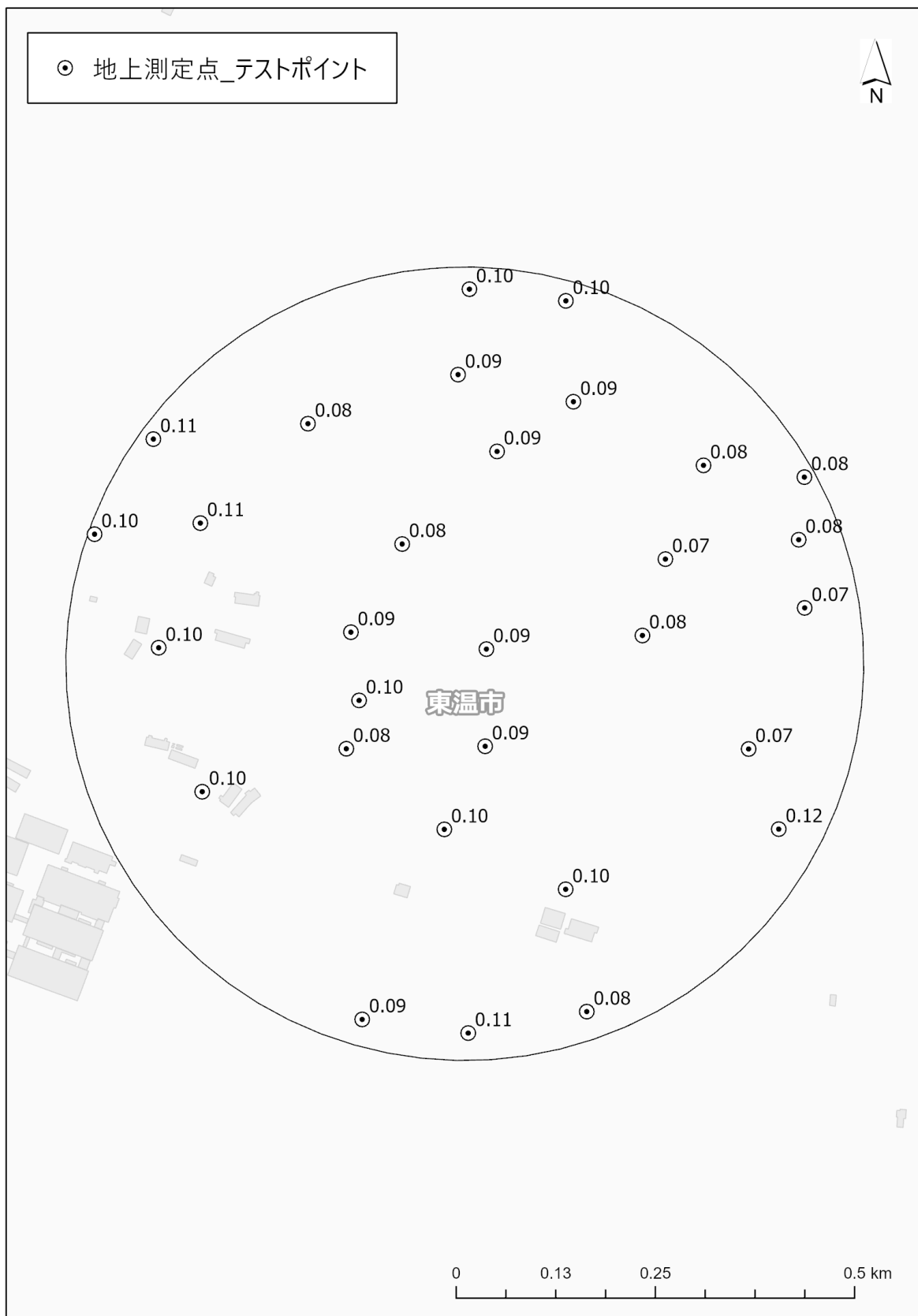


Fig. 4-3 伊方のテストポイントにおける地上測定値 (μSv/h)

Table 4-1 2022 年度取得した AF データ一覧

モニタリングエリア	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	テストライン名	非線形最小二乗法による 指数関数回帰の結果	
					AF (m ⁻¹)	RV
美浜・敦賀	Bell430 (JA02AX) (AAC)	RSI 3	2022/07/26	輪之内	-0.00545	2,249
			2022/07/31		-0.00551	823
伊方	Bell412 (JA9616) (AAC)	RSI 3	2022/11/11	東温	-0.00581	115
			2022/11/17		-0.00552	135

Average(美浜・敦賀) -0.00548

Average (伊方) -0.00567

※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 4-2 2022 年度取得した CD データ一覧

モニタリングエリア	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	テストポイント名	地上測定値			テストポイントフライトデータ				CD (s ⁻¹ /[μSv/h])
					空間線量率 (μSv/h)	標準偏差 (2σ)	相対標準偏差 (%)	計数率 (s ⁻¹)	標準偏差 (2σ)	対地高度 (ft)	標本標準偏差 (2σ)	
美浜・敦賀	Bell430 (JA02AX) (AAC)	RSI 3	2022/07/26	輪之内	0.07	0.01	16	2,124	256	1,025	18	20,600
			2022/07/31		0.07	0.01	17	1,823	313	1,072	53	19,700
伊方	Bell412 (JA9616) (AAC)	RSI 3	2022/11/11	東温	0.09	0.03	29	2,561	221	900	21	18,600
			2022/11/17		0.09	0.02	26	1,958	138	1,165	36	15,900

Average (美浜・敦賀) 20,200

Average (伊方) 17,300

※AAC: 朝日航洋株式会社

Table 4-3 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 ($s^{-1}/[\mu Sv/h]$)
美浜・敦賀	Bell430 (JA02AX)	-0.00551	20,600
福島原子力発電所	Bell430 (JA05TV)	-0.00720	13,000
伊方	Bell412 (JA9616)	-0.00581	15,900
福島原子力発電所	Bell412 (JA9616、JA6928及びJA412N)	-0.00720	11,000

4.2. 地上測定値との比較

航空機モニタリングによって計算した空間線量率の妥当性を検証するために、Fig. 3-1 (美浜・敦賀) 及び Fig. 3-2 (伊方) に示した 20 地点において地上測定を実施した。地上測定値を Fig. 4-4 及び Fig. 4-5 に示す。

航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値との比較を Fig. 4-6 (美浜・敦賀) 及び Fig. 4-7 (伊方) に示す。これらの図には参考として、2020 年度の美浜・敦賀及び 2016 年度の伊方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による空間線量率 - 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による空間線量率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、美浜・敦賀の場合、2022 年度では 85 % (全 20 点中 17 点)、2020 年度では 93 % (全 30 点中 28 点) であった。伊方の場合 2022 年度では 75 % (全 20 点中 15 点)、2016 年度では 100 % (全 50 点中 50 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の空間線量率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、美浜・敦賀の場合 2022 年度では -0.25 及び -0.30、2020 年度では 0.09 及び 0.07 であり、伊方の場合 2022 年度では -0.23 及び -0.19、2016 年度では 0.02 及び 0.01 であった。2022 年度の美浜・敦賀及び伊方では、航空機モニタリングによる空間線量率は地上測定値よりも概ね 20 % ~ 30 % 程度、過小評価したことが窺える。2020 年度の美浜・敦賀及び 2016 年度の伊方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、2022 年度の美浜・敦賀及び伊方の航空機モニタリングによる空間線量率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による空間線量率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による空間線量率の平方根平均二乗誤差 (Root Mean Squared Error: RMSE) を以下の式 [12] に従って算出した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_{a,i} - D_{g,i})^2} \quad [12]$$

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による空間線量率が地上測定値と

よく合致することを意味する。それぞれのモニタリングにおける *RMSE* は美浜・敦賀の場合、2022年度では約 0.027 $\mu\text{Sv/h}$ 、2020年度では約 0.024 $\mu\text{Sv/h}$ であり、伊方の場合、2022年度では約 0.032 $\mu\text{Sv/h}$ 、2016年度では約 0.019 $\mu\text{Sv/h}$ であった。

ここで、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年度から2020年度までのデータについて同様にまとめた結果を Fig. 4-8 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、*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計算結果の良し悪しを判断する指標の一つとなろう。

以上のことから、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、2020年度の美浜・敦賀及び2016年度の伊方のデータと比べると、2022年度の航空機モニタリングによる空間線量率の計算結果は妥当性にやや劣るように思われる。しかしながら、2022年度の美浜・敦賀及び伊方の *RMSE* は概ね 0.03 $\mu\text{Sv/h}$ 前後であったことから、上記した指標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計算結果は概ね妥当な誤差範囲に収まっている。

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様の場合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。なお、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。



Fig. 4-4 美浜・敦賀の測線近傍における地上測定値 (μSv/h)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

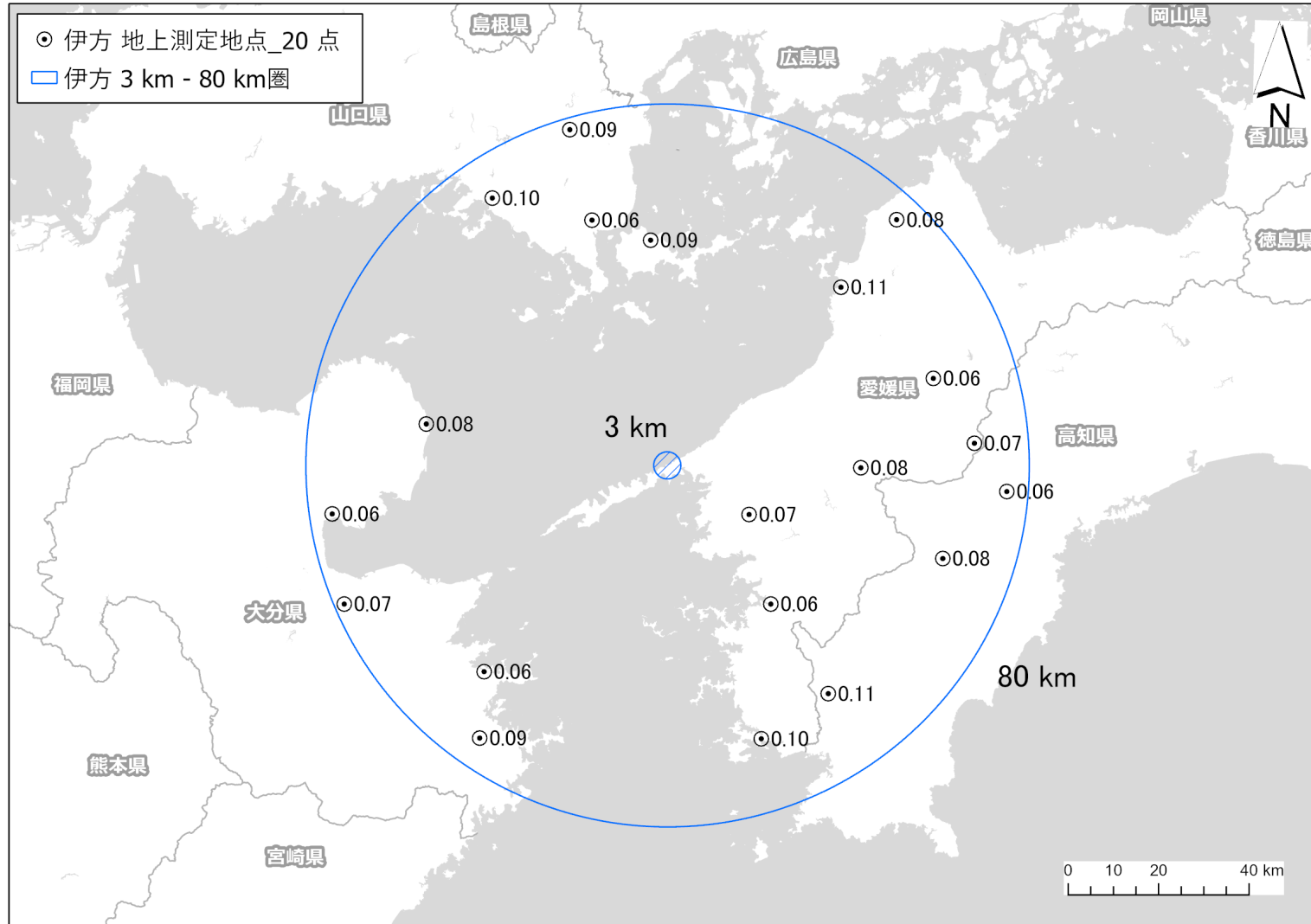


Fig. 4-5 伊方の測線近傍における地上測定値 (μSv/h)

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

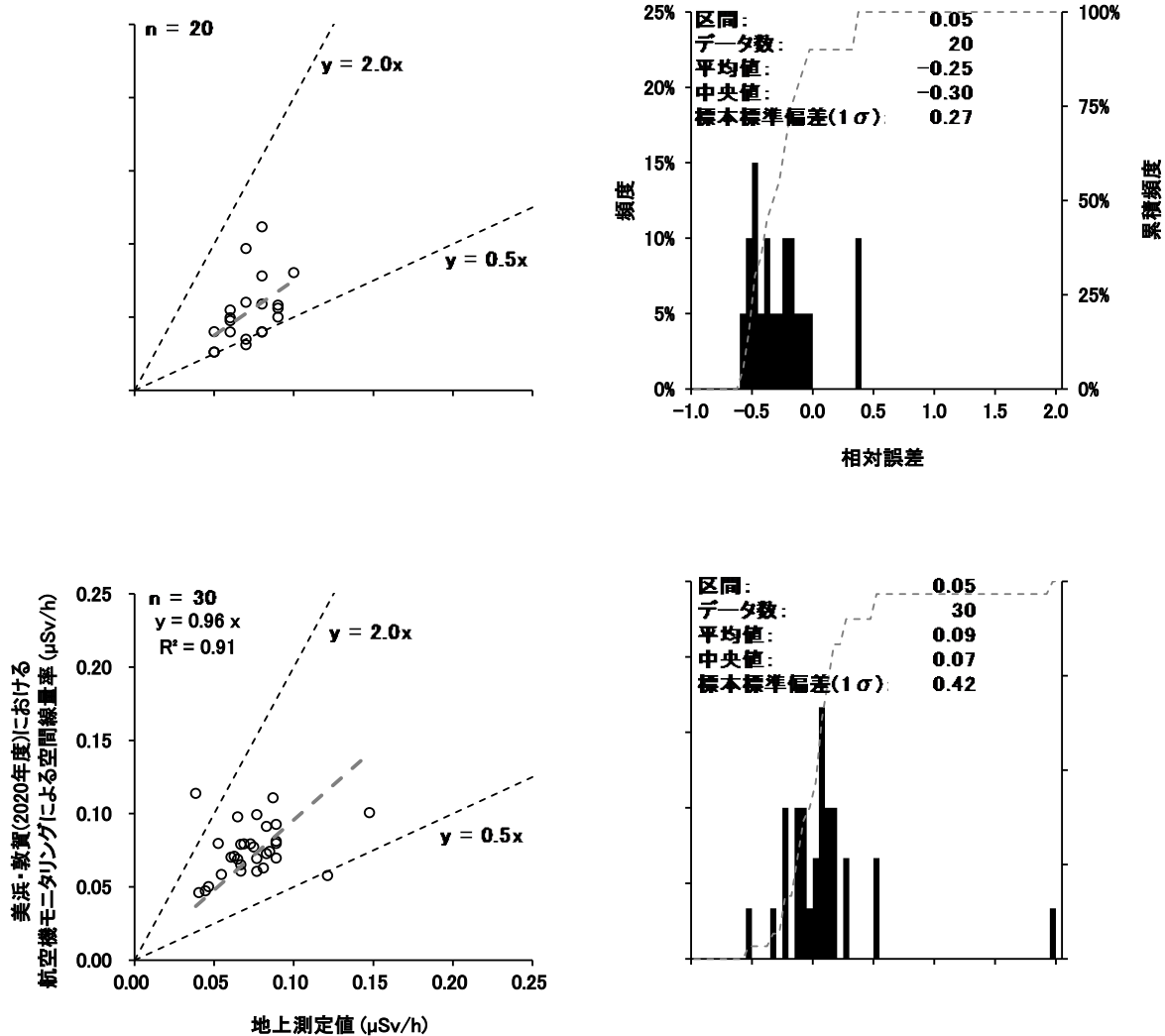


Fig. 4-6 美浜・敦賀における航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較
 (上：2022年度、下：2020年度¹⁷⁾)
 (左:散佈図、右: 相対誤差の頻度分布)

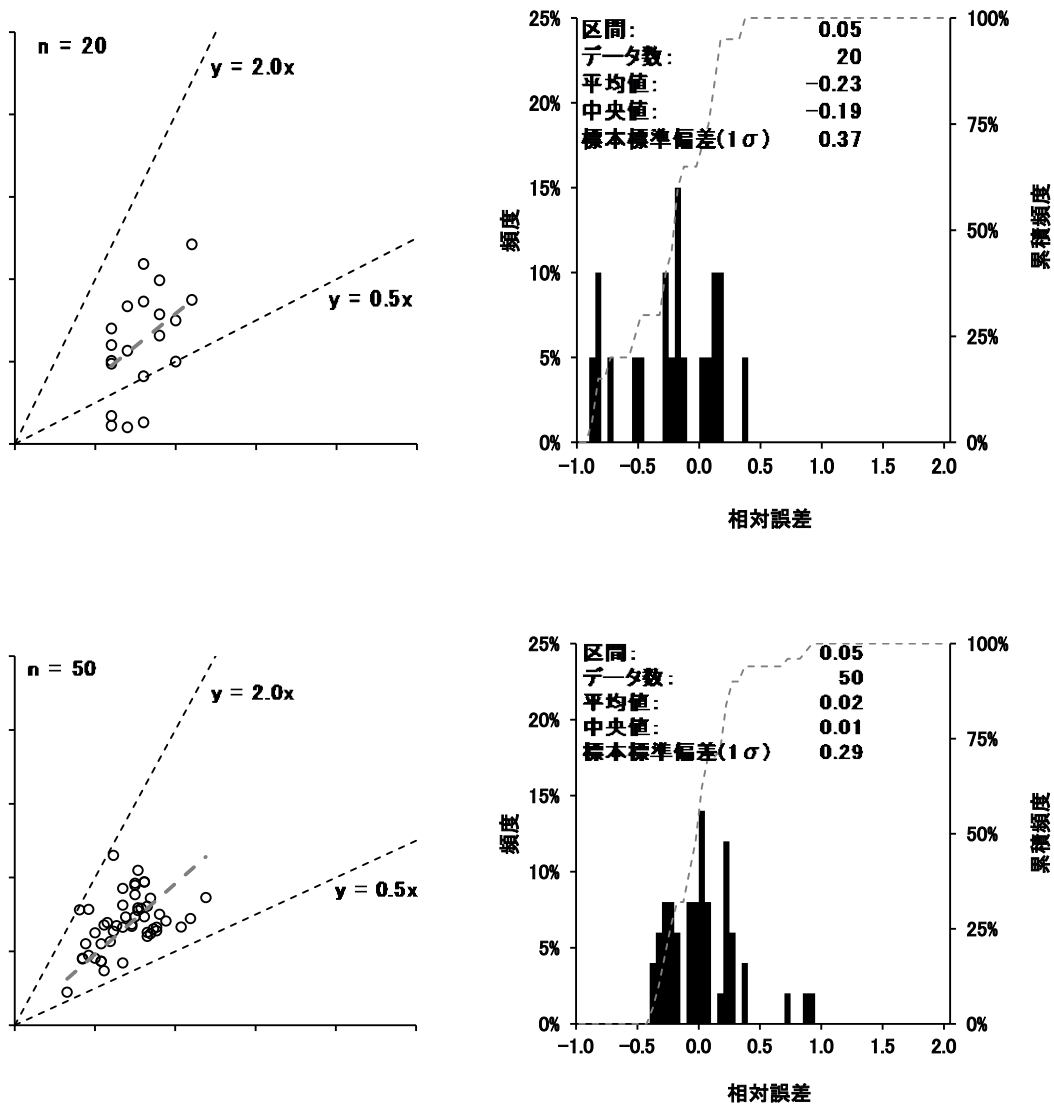


Fig. 4-7 伊方における航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較
 (上：2022年度、下：2016年度⁹⁾)
 (左:散佈図、右: 相対誤差の頻度分布)

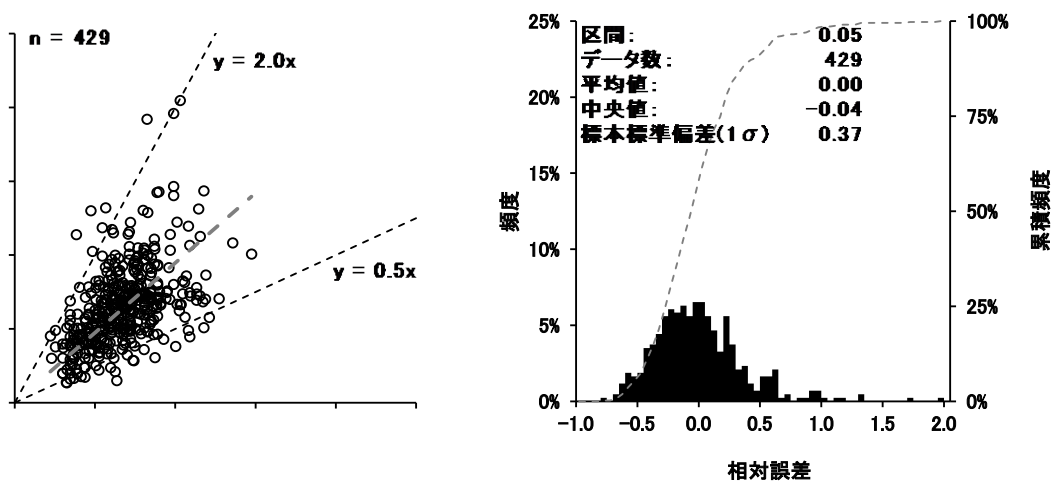


Fig. 4-8 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値の比較
 (2015年度から2020年度までの全データ 7),9),11),13),15),17)
 (左: 散布図、右: 相対誤差の頻度分布)

4.3. 空間線量率

航空機モニタリングの測定結果を基に、地表面から1 mの高さの空間線量率の分布状況を示した「空間線量率マップ」を Fig. 4-9 (美浜・敦賀) 及び Fig. 4-10 (伊方) に示す。伊方から半径 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、伊方について、2016 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。当該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の設定¹⁸⁾に準じた。なお、空間線量率の最大値は、美浜・敦賀については岐阜県関市板取の竜波山周辺で約 0.22 $\mu\text{Sv/h}$ 、伊方については愛媛県西条市丹原町の中山川溪谷周辺で約 0.40 $\mu\text{Sv/h}$ であった。

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²⁴⁾を Fig. 4-11 (美浜・敦賀) 及び Fig. 4-12 (伊方) にて並べて比較した。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³⁹⁾で作成されている。この計算手法で算出された空気吸収線量率 ($\mu\text{Gy/h}$) から「ベータ線とガンマ線の場合には全身に均等に吸収されたとき 1 Gy = 1 Sv と換算できる」²⁴⁾というコンセプトの下、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 節に記述したとおり、航空機モニタリングにおける空間線量率は周辺線量当量率 (1 cm 線量当量率) であり、日本地質学会の自然放射線量マップとは必ずしも 1 対 1 で比較できるものではないことに注意を要する。また、日本地質学会の自然放射線量マップ作成に際して計算に使用された試料の採取密度が概ね 10 km \times 10 km に 1 試料であり、それらの試料の各元素濃度の測定結果には 0.5～2.0 倍程度の誤差が伴っていること、核種濃度の測定結果が得られなかった地点については内挿補間で色付けされていることから、自然放射線量の計算値にはある程度の不確かさがあり、その分解能は 10 km 程度であると思われる。結果の比較には以上の点を念頭に置く必要がある。

Fig. 4-11 に示した美浜・敦賀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、測定エリアの中央部で空間線量率が比較的高くなる傾向は 2020 年度と 2022 年度の両者で同様であったが、主に北部と南部で相違が見られ、2022 年度の方が空間線量率は全体的に低く算出される傾向にあった。2022 年度において 2020 年度よりもコンターレベルが 2 段階 (0.04 $\mu\text{Sv/h}$) 以上変化する程に空間線量率が低く算出された主な地域は、北部については①福井県大野市の北西部の市街地部、②福井県坂井市とあわら市の境界付近の市街地部、③福井県大野市の北東部打波川流域の山間部、④石川県加賀市の動橋川流域の山間部、南部に

については⑤岐阜県本巣市の魚金山周囲の山岳地帯、⑥岐阜県養老町と輪之内町の境界付近にある市街地帯、⑦岐阜県関市の板取川流域から山県市にかかる山岳地帯、⑧三重県いなべ市と東近江市の境界付近にある竜ヶ岳周辺であった。日本シームレス地質図⁴³⁾及び各エリアにおける既往の詳細な地質調査レポート等を基に、航空機モニタリングによる空間線量率が比較的高く算出された要因について2020年度に考察を行った¹⁷⁾。これに上記の①、②及び⑥について日本シームレス地質図を基に情報を補完して、2022年度の航空機モニタリングによる空間線量率と既往の地質情報との対比について簡潔に示す。①は扇状堆積物等の堆積物と船津花崗岩類(トータル岩、花崗閃緑岩及び閃緑岩から成る)、②は玄武岩質安山岩や段丘堆積物、⑥は海岸平野堆積物等の堆積物がそれぞれ主体的に分布している。②～⑥については花崗岩類の存在が確認できず、地質学的な情報と空間線量率が比較的高く算出されることの関連付けが難しい地域である。逆に、①、⑦及び⑧については花崗岩類の存在が認められ、空間線量率が比較的高く算出されることが妥当と思われる地域である。①は2022年度では大部分で空間線量率が0.06 μSv/h未満であり、理由は判然としないが、船津花崗岩類に起因するγ線を捉えられなかったことが推察される。⑦は空間線量率の比較的高いエリアが2020年度では花崗岩類の分布範囲をはみ出して過剰に広がったのに対し、2022年度では花崗岩体の分布範囲内に丁度よく収まった。⑧は2020年度当時から測線を間引いた影響により、2022年度には花崗岩類の分布地帯を測定できておらず、従って空間線量率が低く算出されたと推察される。次に、日本地質学会の自然放射線量マップでは、測定エリアの中央部から南部にかけて比較的高線量率であり、2022年度の航空機モニタリングによる空間線量率の分布傾向は、南部域を除いて概ね同様であるように思われる。以上のことから、①及び⑧を除いた地域では、航空機モニタリングによる空間線量率マップと地質分布及び自然放射線量マップとの対比が比較的良好であると思われる。

Fig. 4-12に示した伊方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、測定エリアの北部及び南東部で空間線量率が比較的高くなる傾向は、2016年度と2022年度の両方で同様であった。一方、東部において2016年度では0.16 μSv/h以上の領域が広がっているのに対し、2022年度ではその大部分で0.06 μSv/h未満であったという点で相違が見られた。日本地質学会の空間線量率マップ(Fig. 4-12(右))では、北部で特に高線量率であり、中央部と南部にも比較的高線量率なエリアが広がっている点で、航空機モニタリングによる空間線量率の分布傾向と概ね同様である。当該マップでは、東部については概ね0.05 μGy/h前後であり、2022年度の航空機モニタリングによる空間線量率マップのコンター色と同レベルの線量率であった。本報告では、2022年度の空間線量率マップにおいて0.16 μSv/hを超えたエリアと2016年度と相違が見られたエリアを主に対象として、日本シームレス地質図及び各エリアにおける既往の詳細な地質調査レポート等を基に、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。なお、中国地方と四国地方の地質調査レポートは現時点で非公開のものが多数あり情報量が少なく、考察が不十分な場合があることを容赦されたい。0.16 μSv/hを超えたのは測定範囲の北側から、広島県については、①江田島市の南部及び呉市の倉橋島一帯であった。山口県については、①岩国市の一帯であった。愛媛県については、①松山市米野町の南部から今治市玉川町龍岡上の中央部、②西条市丹原町の中山川溪

谷付近、③伊予郡砥部町の中央東部の山間部、④上浮穴郡久万高原町若山の山間部、⑤北宇和郡松野町豊岡の中央部、⑥宇和郡鬼北町の東部の山間部及び⑦南宇和郡愛南町の北部に位置する篠山周辺の山岳部であった。高知県については、①四万十市勝間の周辺、四万十川流域の山間部であった。

・広島県について

① 江田島市の南部及び呉市の倉橋島一帯について⁴⁴⁾

本地域の大部分を呉花崗岩が占めており、一部に音戸花崗閃緑岩が分布している。呉花崗岩は中-粗粒黒雲母花崗岩、細粒黒雲母花崗岩及び細-中粒単斜輝石含有黒雲母角閃石閃緑岩及び角閃石黒雲母トータル岩の大きく 3 つに分類される。空間線量率が $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を超えたのは中-粗粒黒雲母花崗岩の分布地帯の内、倉橋島の中央部及び南東部であるが、両地域でとりわけ空間線量率が大きく算出された理由は不明確である。いずれにせよ、本地域に広く分布する花崗岩類に起因する γ 線を捉えたため、航空機モニタリングによる空間線量率が本地域一帯で比較的高く算出されたと推察される。

・山口県について

① 岩国市の一帯について⁴⁵⁾

本地域は花崗岩質な地域であり、広島花崗岩類、領家新規花崗岩類及び領家古期花崗岩類が広く分布している。これら岩石類に起因する γ 線を捉えたため、航空機モニタリングによる空間線量率が比較的高く算出されたと推察される。特に、空間線量率が $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を超えたのは領家新規花崗岩類に属する木部花崗岩の分布地帯である。本岩の主岩相は粗粒黒雲母花崗岩であり、珪長質鉱物のモード組成によると純粋な花崗岩に分類され、特に γ 線強度が高いことが推察される。

・愛媛県について

① 松山市米野町の南部から今治市玉川町龍岡上の中央部について⁴⁶⁾

本地域一帯には領家花崗岩類に属する弱片状斑状粗粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩が主に分布している中に、黒雲母花崗岩もある程度広く分布している。航空機モニタリングによる空間線量率が $0.16 \mu\text{Sv/h}$ 前後と特に高く算出されたのは黒雲母花崗岩の分布範囲と概ね重なっている。

ここで、日本シームレス地質図上では、松山市一帯は花崗閃緑岩やトータル岩といった花崗岩類によって占められているが、松山市中央部でのみ航空機モニタリングによる空間線量率が $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 前後であった。本地域における地質情報は現時点で非公開であり、花崗岩に関する詳細な情報は不明確であるが、空間線量率の上昇には寄与しない何らかの要因が存在する可能性がある。

② 西条市丹原町の中山川溪谷付近について

日本シームレス地質図によると、本地域は砂岩泥岩互層や海岸平野堆積物が主体であり、空間線量率の上昇に寄与すると思われる岩石類の存在は認められない。地形的にやや複雑ではあるが、航空機モニタリングによる空間線量率が $0.16 \mu\text{Sv/h}$ 以上になる程に影響を与える要因であるとは考え難い。地質的及び地形的要因から空間線量率の多寡を説明するには困難な点があり、これら以外の要因が潜在している可能性がある。

③ 伊予郡砥部町の中央東部の山間部について

日本シームレス地質図によると、本地域は苦鉄質片岩や安山岩が主体であり、空間線量率の上昇に寄与すると思われる岩石類の存在は認められない。②と同様に地形的に複雑ではあるが、航空機モニタリングによる空間線量率が $0.16 \mu\text{Sv/h}$ 以上になる程に影響を与える要因であるとは考え難い。地質的及び地形的要因から空間線量率の多寡を説明するには困難な点があり、これら以外の要因が潜在している可能性がある。

④ 上浮穴郡久万高原町若山の山間部について⁴⁷⁾

本地域一帯には火山性陥没構造(通称:石鎚コールドロン)が形成されており、その大部分は火砕流堆積物で占められているが、一部に花崗岩体の存在が認められる。航空機モニタリングによる空間線量率が $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を上回ったのは、石鎚コールドロン北側外縁の花崗閃緑岩体、南西部の斑状花崗閃緑岩や花崗斑岩岩体(通称:坂瀬川岩体)及び黒雲母アダメロ岩体(通称:鉄砲石川岩体)の3箇所である。いずれの場所においても花崗岩体から放出された γ 線を捉えたため、空間線量率が上昇したと推察される。

⑤ 北宇和郡松野町豊岡の中央部について⁴⁸⁾

本地域には頁岩や砂岩から成る地層が主に分布しており、空間線量率の上昇に寄与する岩石類の存在は一見して確認できない。一方、本地域から南西方向に約5 km離れた場所に大きな花崗閃緑岩体(通称:高月山岩体)が認められ、その周囲にはホルンフェルス(花崗岩類等の深成岩の接触変成作用により形成される変成岩)が広がっていることが見出されている。このことから、高月山岩体を含む岩石類が本地域に存在する可能性があるものの、航空機モニタリングによる空間線量率が $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を超える程に影響を与える要因であるとは考え難く、地質的な要因のみでは説明が困難である。

⑥ 宇和郡鬼北町の東部の山間部

日本シームレス地質図によると、本地域では泥岩、砂岩及び泥岩砂岩互層が主に分布しており、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。父野川中の地蔵山近辺で航空機モニタリングによる空間線量率が $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を上回ったが、地形の起伏がこれほどまでに空間線量率の多寡に寄与するとは考え難い。また、本地域にはかつて水銀鉱山が存在していたようだが、航空機モニタリングによる空間線量率の上昇との相関は不明である。

⑦ 南宇和郡愛南町の北部に位置する篠山周辺の山岳部について

日本シームレス地質図によると、本地域には砂岩泥岩互層が主に分布しており、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。篠川流域の地形の起伏が激しい地域において航空機モニタリングによる空間線量率が $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を上回ったが、地形の起伏がこれほどまでに空間線量率の多寡に寄与するとは考え難い。地質的及び地形的要因から空間線量率の多寡を説明するには困難な点があり、これら以外の要因が潜在している可能性がある。

・高知県について

① 四万十市勝間の周辺、四万十川流域の山間部について

日本シームレス地質図によると、本地域は砂岩及び頁岩が主に分布しており、空間線

量率の上昇に寄与すると思われる岩石類の存在は認められない。本地域は複雑な地形であることが窺われるものの、地形の起伏がこれほどまでに空間線量率の多寡に寄与するとは考え難い。地質的及び地形的要因から空間線量率の多寡を説明するには困難な点があり、これら以外の要因が潜在している可能性がある。

また、伊方エリア東部において 2016 年度で空間線量率が 0.16 $\mu\text{Sv/h}$ 以上であったのに対し、2022 年度で 0.06 $\mu\text{Sv/h}$ 未満であったのは、吾川郡仁淀川町、越知町、津野町に跨る山間部域であった。日本シームレス地質図によると、本地域は様々な岩石類が複雑に入り組んで分布しており、空間線量率の上昇に寄与すると思われる岩石類は、吾川郡仁淀川町近辺のごく狭小な範囲に花崗岩類が認められるに留まる。2016 年度当時に伊方エリア東部に空間線量率の比較的高いエリアが広がった理由は判然としない。

以上のように、一部で既往の地質調査レポート等との関連付けが難しい場所があったものの、空間線量率が比較的高く算出された場所のほとんどで花崗岩類 (を含む岩石体) の存在が関連していることが推察された。

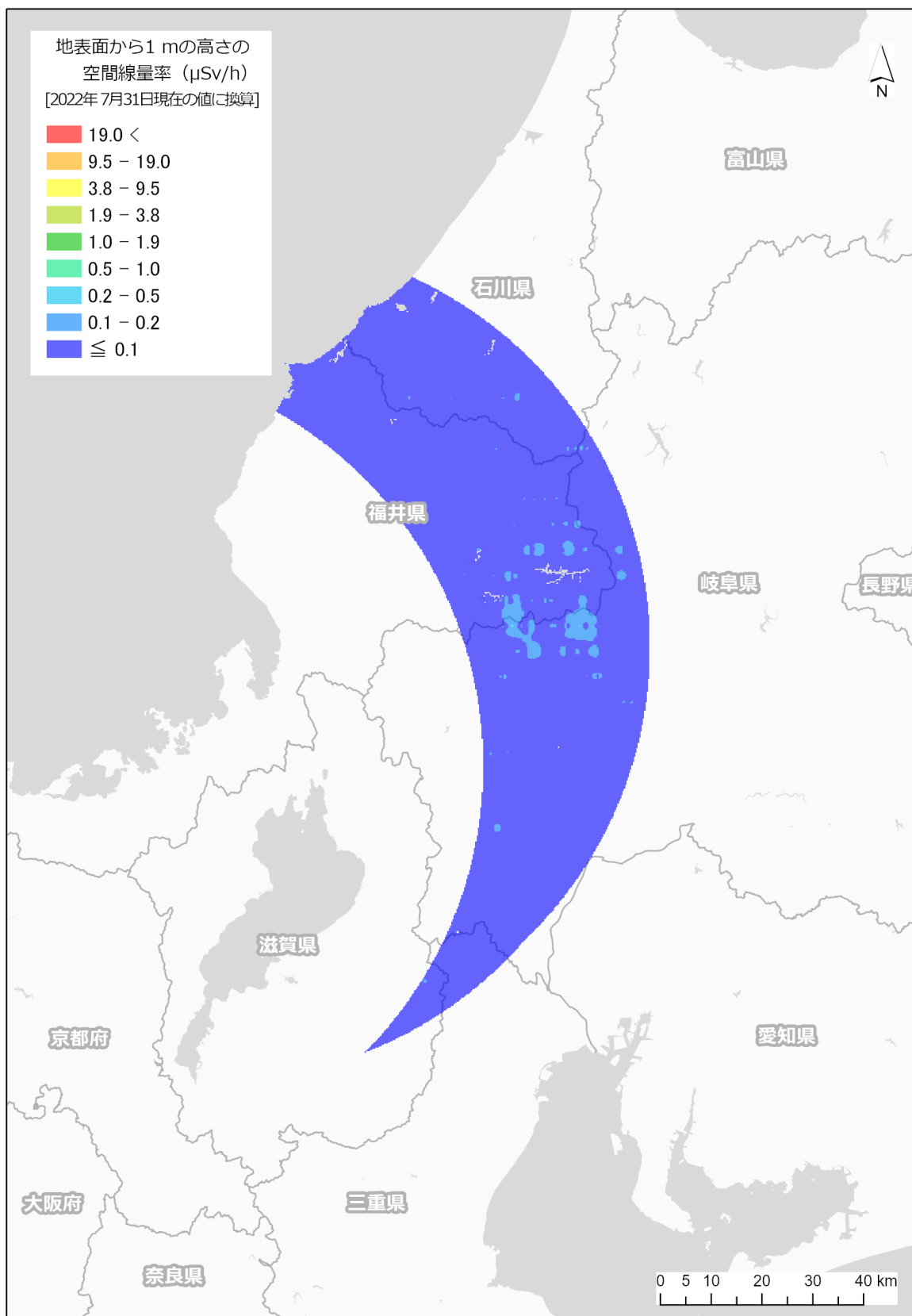


Fig. 4-9 美浜・敦賀における空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

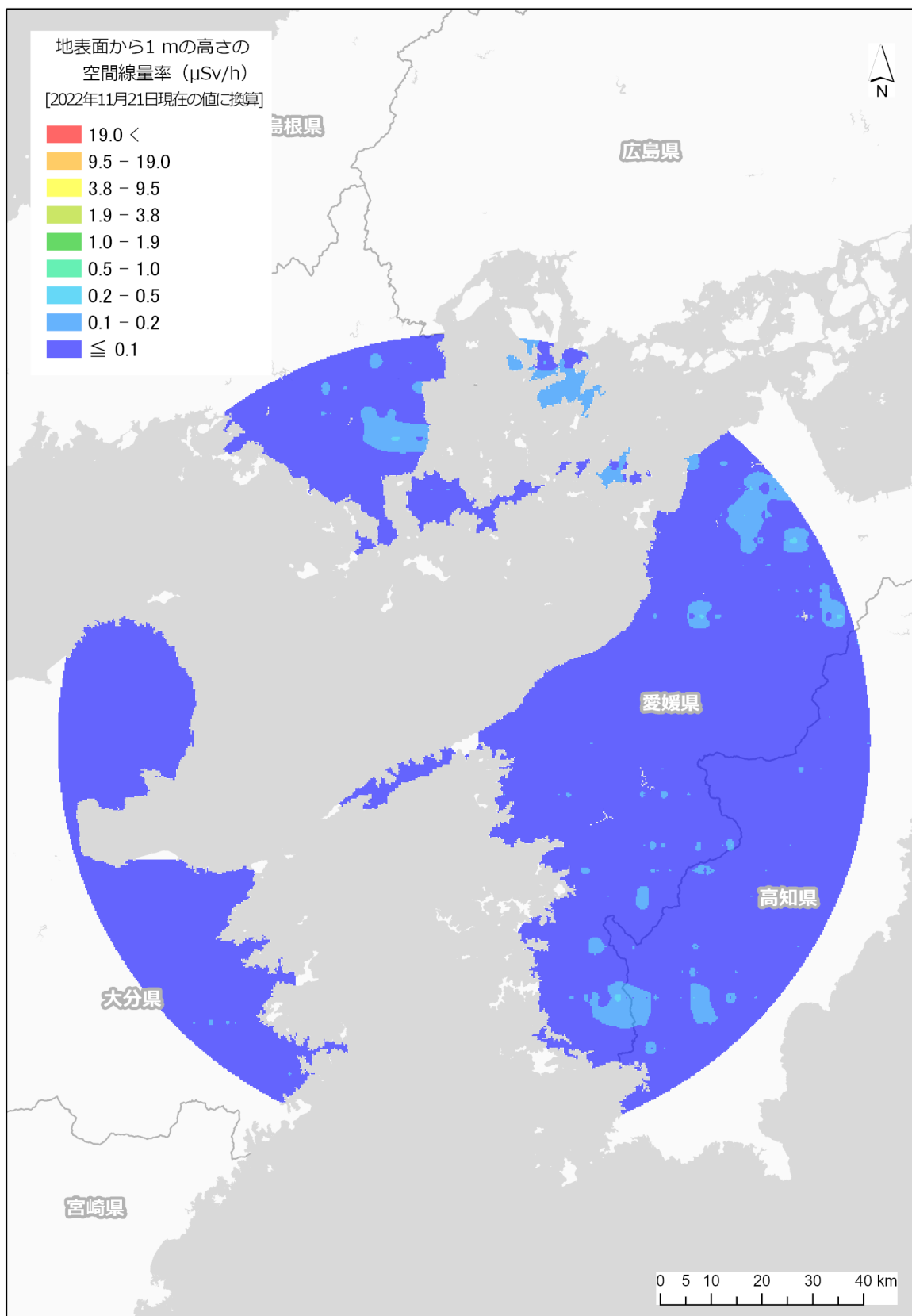


Fig. 4-10 伊方における空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

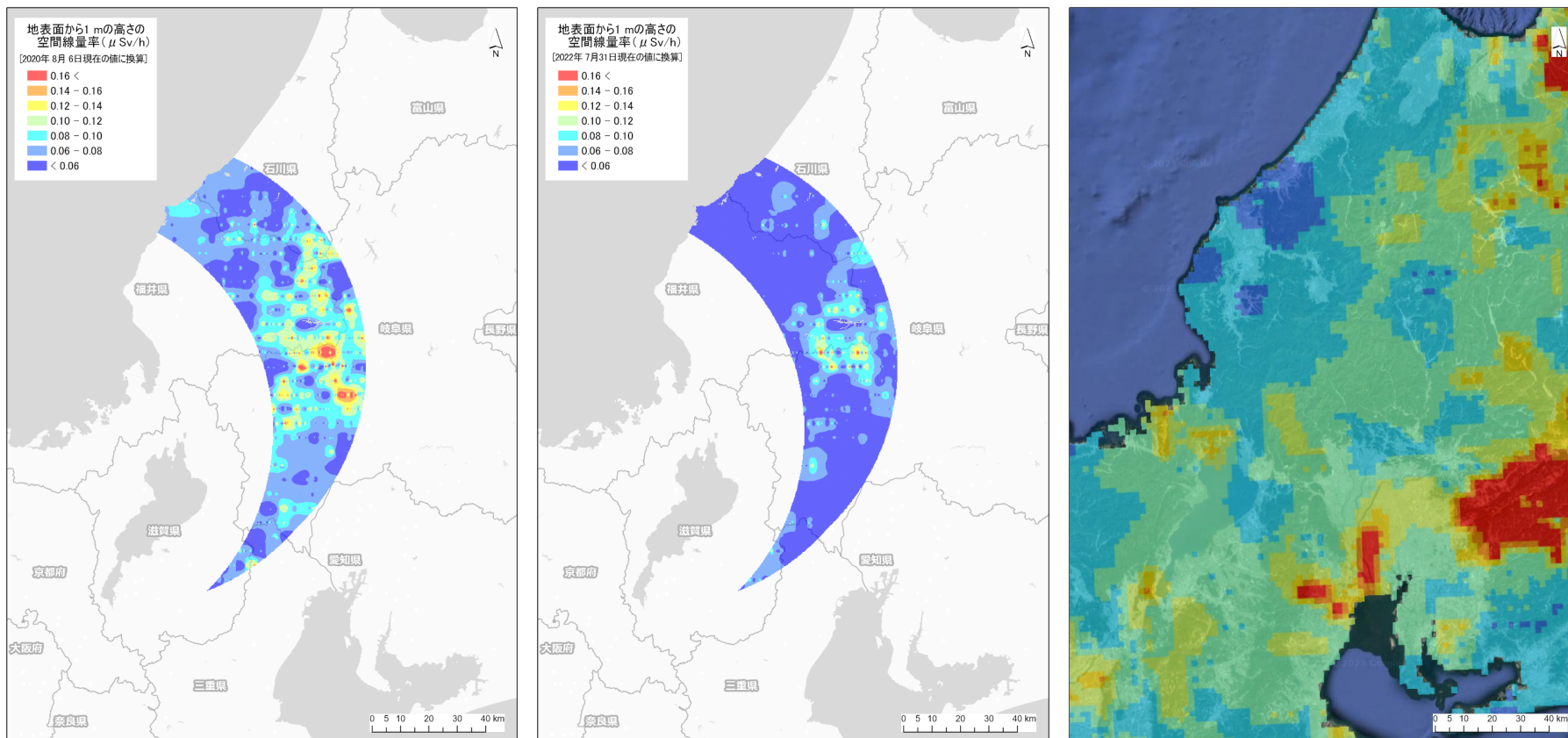


Fig. 4-11 美浜・敦賀における空間線量率マップの比較

(左：2020年度¹⁷⁾、中央：2022年度、右：日本地質学会による空間線量率マップ)

(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)

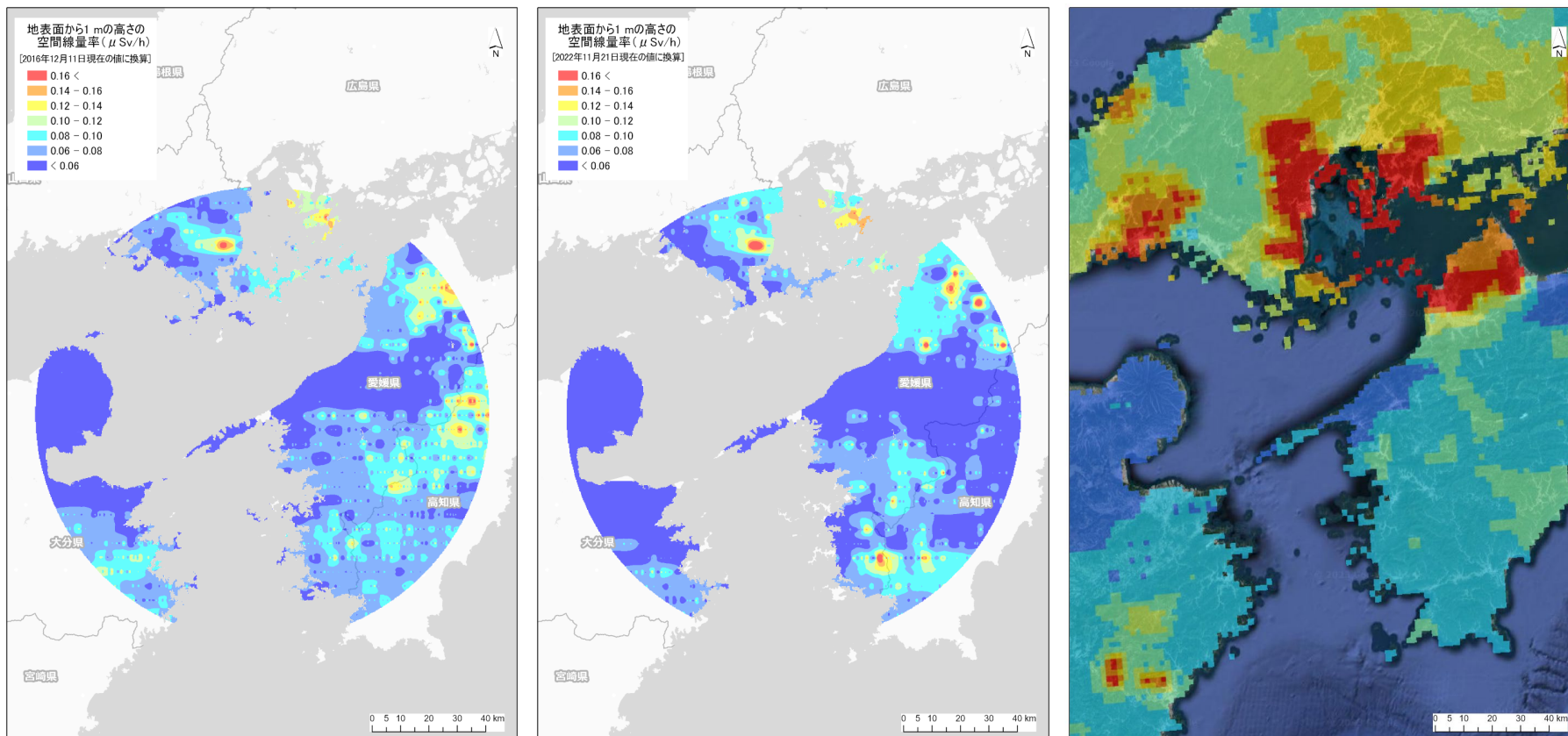


Fig. 4-12 伊方における空間線量率マップの比較

(左：2016年度⁹⁾、中央：2022年度、右：日本地質学会による空間線量率マップ)

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

4.4. 天然放射性核種の濃度

Table 3-5 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 K-40、U 系列及び Th 系列の順に、美浜・敦賀について Fig. 4-13～Fig. 4-15、伊方について Fig. 4-16～Fig. 4-19 に示した美浜・敦賀における K-40 の濃度マップについて、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、測定エリアの中央部から南部にかけて比較的高濃度であり、概ね同様な分布傾向であった。次に、Fig. 4-20 に示した U 系列濃度マップについて、測定エリアの中央部と南部に比較的高濃度な領域が広がっている点で、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同様な分布傾向であった。他方で、測定エリアの北端において、航空機モニタリングによるマップでは比較的高濃度な領域が見られたのに対し、海と陸の地球化学図によるマップでは低濃度であるという点で相違が見られた。本地域は 4.3 節に記した「②福井県坂井市とあわら市の境界付近の市街地部」を含み、玄武岩質安山岩や段丘堆積物が主体であるが、日本シームレス地質図によると、その東方にデイサイトや流紋岩類が主体の岩体が広く分布している。航空機モニタ Fig. 4-18 にそれぞれ示す。K-40、U 系列及び Th 系列の各最大濃度については、美浜・敦賀で約 1,600 Bq/kg (岐阜県本巣市根尾越波の中水谷の近辺)、約 100 Bq/kg (石川県小松市の中央部の山岳地帯、五百峠の周辺) 及び約 130 Bq/kg (岐阜県本巣市根尾上大須の上大須ダムの近辺)、伊方で約 1,700 Bq/kg (愛媛県宇和島市津島町山財の山財ダム北方)、約 185 Bq/kg (愛媛県西条市丹原町の中山川溪谷付近) 及び約 120 Bq/kg (南宇和郡愛南町の北部に位置する篠山周辺の山岳部) となった。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、美浜・敦賀で約 560 Bq/kg、約 36 Bq/kg 及び約 33 Bq/kg、伊方で約 500 Bq/kg、約 36 Bq/kg 及び約 28 Bq/kg となった。一般的に、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 とされており⁴⁵⁾、本報告で得られた各元素の平均濃度レベルと概ね整合する。

これら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³⁸⁾を利用した。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、美浜・敦賀について Fig. 4-19～Fig. 4-21、伊方について Fig. 4-22～Fig. 4-24 にそれぞれ示す。なお、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.³⁹⁾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。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が、美浜・敦賀については測定エリアの中央部と南部で各元素ともに比較的高濃度であり、伊方については測定エリア北方で各元素とも特に高濃度であったという点で大まかな分布傾向は一致しており、また、Fig. 4-9(美浜・敦賀)及び Fig. 4-10(伊方)に示した空間線量率マップにおいて空間線量率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。

以下に比較の詳細を記述する。

リングによる U 系列濃度マップで比較的高濃度であったのは、このデイサイトや流紋岩体の分布エリアであり、本岩体による U 系列核種に起因する γ 線強度は比較的強かったことが推察される。一方、海と陸の地球化学図マップの基となった河川堆積物試料の U 系列濃度は、本地域ではいずれも 2 ppm 以下であるが、そのほとんどが段丘堆積物の分布領域のものであることから、デイサイトや流紋岩体に起因する U 系列濃度が当該マップに反映されていない可能性が高い。Fig. 4-21 に示した Th 系列濃度マップについても、U 系列濃度マップの場合と同様に、測定エリアの中央部と南部に比較的高濃度な領域が見られる点で、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同様な分布傾向であるが、測定エリアの北端においては分布傾向に相違が見られた。この相違が生じた理由は上記と同様であると思われる。

Fig. 4-22 に示した伊方における K-40 の濃度マップについて、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全体的に高濃度である一方で、測定エリアの中央西部 (大分県国東市の周辺) から中央部 (愛媛県八幡浜市及び伊方町の周辺) にかけて比較的低濃度な領域が見られる点で、概ね同様な分布傾向であった。Fig. 4-23 に示した U 系列濃度マップについて、海と陸の地球化学図マップでは測定エリア北部以外のほとんどの領域で 2 ppm 以下と低濃度である。一方で、航空機モニタリングによるマップでは、測定エリア北部以外にも愛媛県中央部とその以南及び大分県東部の大部分において 30 Bq/kg 以上の比較的高濃度な領域が広がっており、海と陸の地球化学図によるマップと分布傾向がやや異なる。愛媛県中央部は四国山地或いはその辺縁、その以南は山岳地帯であり、海と陸の地球化学図の基となった河川堆積物試料の採取地点が限定的であるため、濃度の変化を細かに表現できていないものと思われる。対して、航空機モニタリングではこれら山岳地帯を飛行して取得した γ 線計数率データを基に濃度マップを作成したため、U 系列核種に起因する計数率の多寡に応じた濃度変化が表現できているものと思われる。ただし、日本シームレス地質図で確認できる範囲でも、本エリアには様々な地質体が複雑に入り組んだ形で分布しており、実環境に沿った濃度分布を再現できているかは不確実である。大分県東部に関しては、航空機モニタリングによる U 系列濃度が 60 Bq/kg 以上の高濃度になったのは、例えば、津久見湾周囲、豊後大熨から臼杵市に渡る山岳部、佐伯市の番匠川の流域と米水津湾の周囲であるが、いずれも近辺にデイサイトまたは花崗閃緑岩が存在しており、これらの岩体が U 系列濃度の上昇に寄与したものと思われる。海と陸の地球化学図の基となった河川堆積物試料の採取地点に、このデイサイトの分布領域に位置するものが幾つか含まれるものの、いずれの試料についても U 濃度は 2 ppm 以下であり、航空機モニタリングによる U 系列濃度マップとは齟齬が生じる。Fig. 4-24 に示した Th 系列濃度マップの分布傾向は U 系列濃度と概ね同様であるが、航空機モニタリングによる U 系列濃度マップにおいて、四国山地或いはその辺縁で見られた高濃度な領域は Th 系列濃度マップにはない。このことから、実測で得られた γ 線スペクトルからコベル法によって、ある程度上手く自然放射性核種を弁別できていると思われる。

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 系列濃度の方が高く、互いに逆転している。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 年であることから、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。航空機モニタリングによって、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。

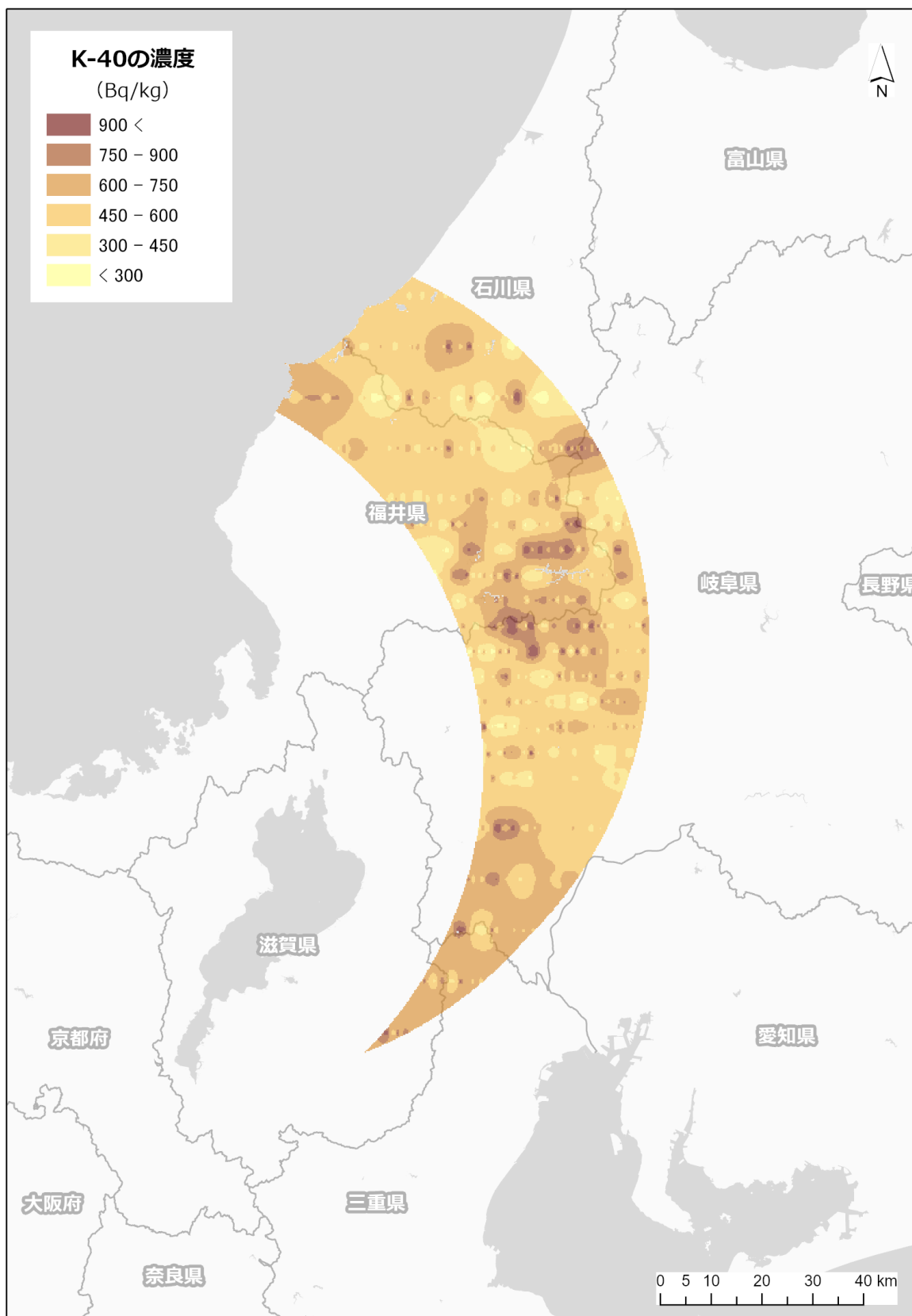


Fig. 4-13 K-40 濃度マップ (美浜・敦賀)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

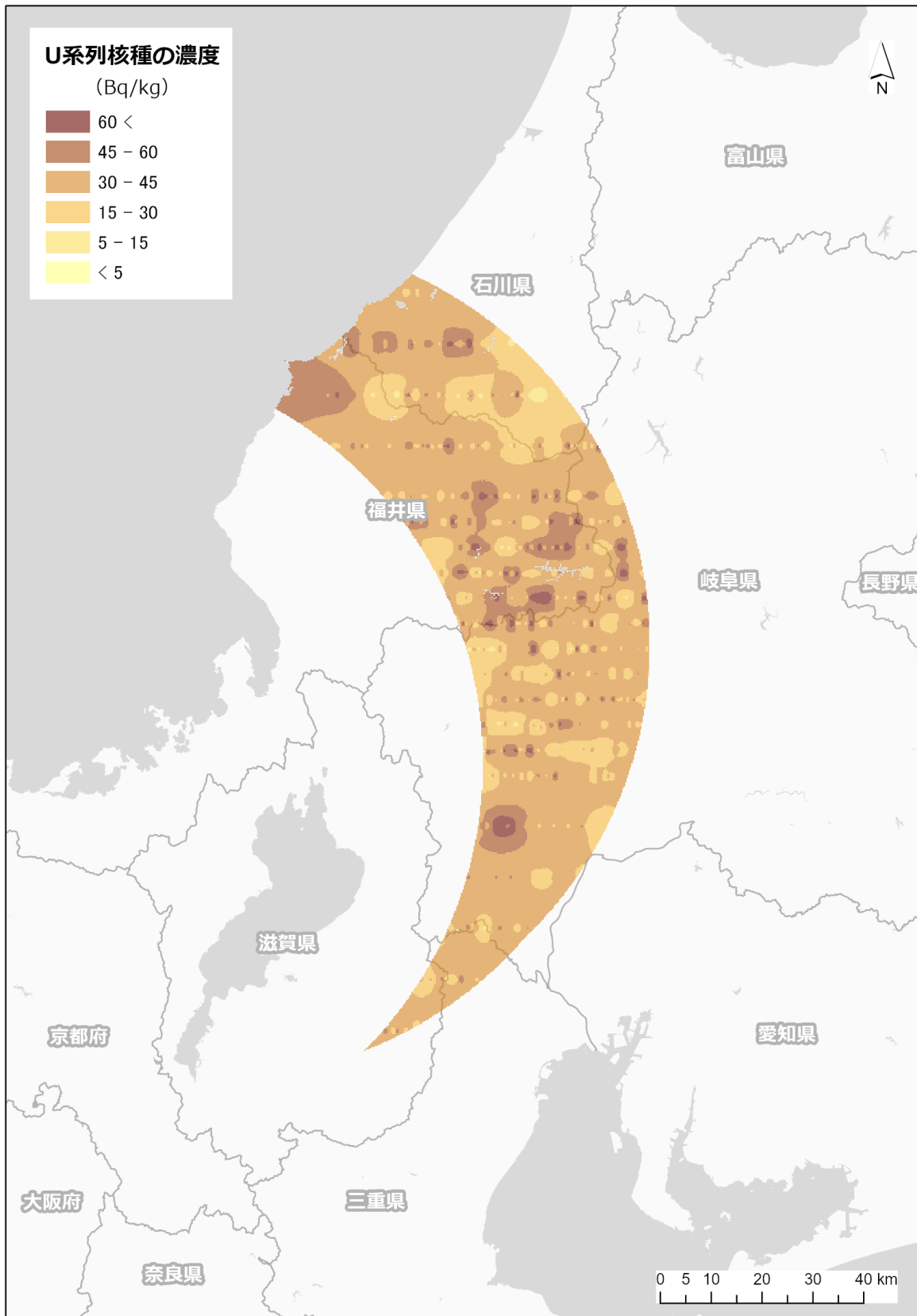


Fig. 4-14 U 系列濃度マップ (美浜・敦賀)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

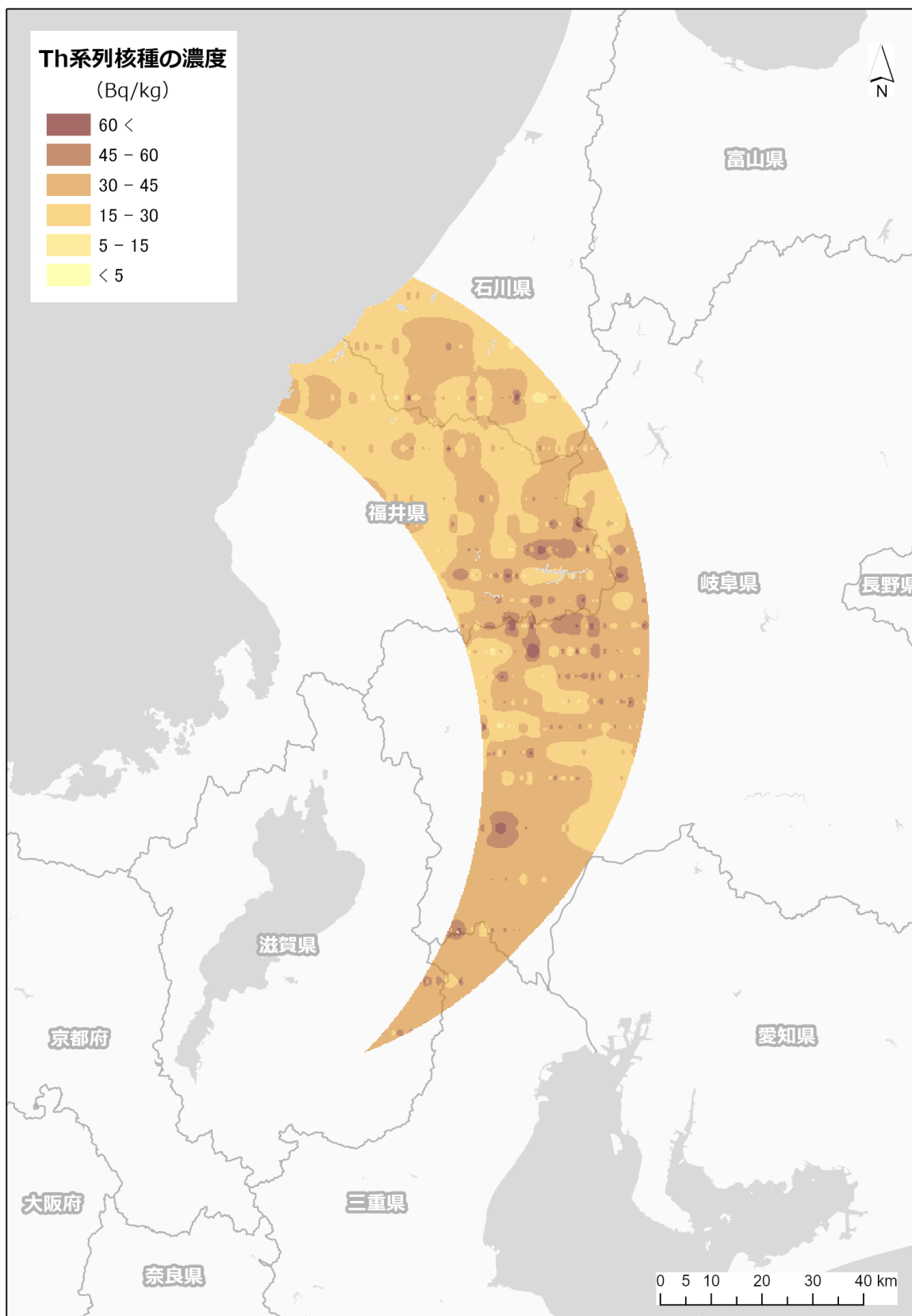


Fig. 4-15 Th 系列濃度マップ (美浜・敦賀)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

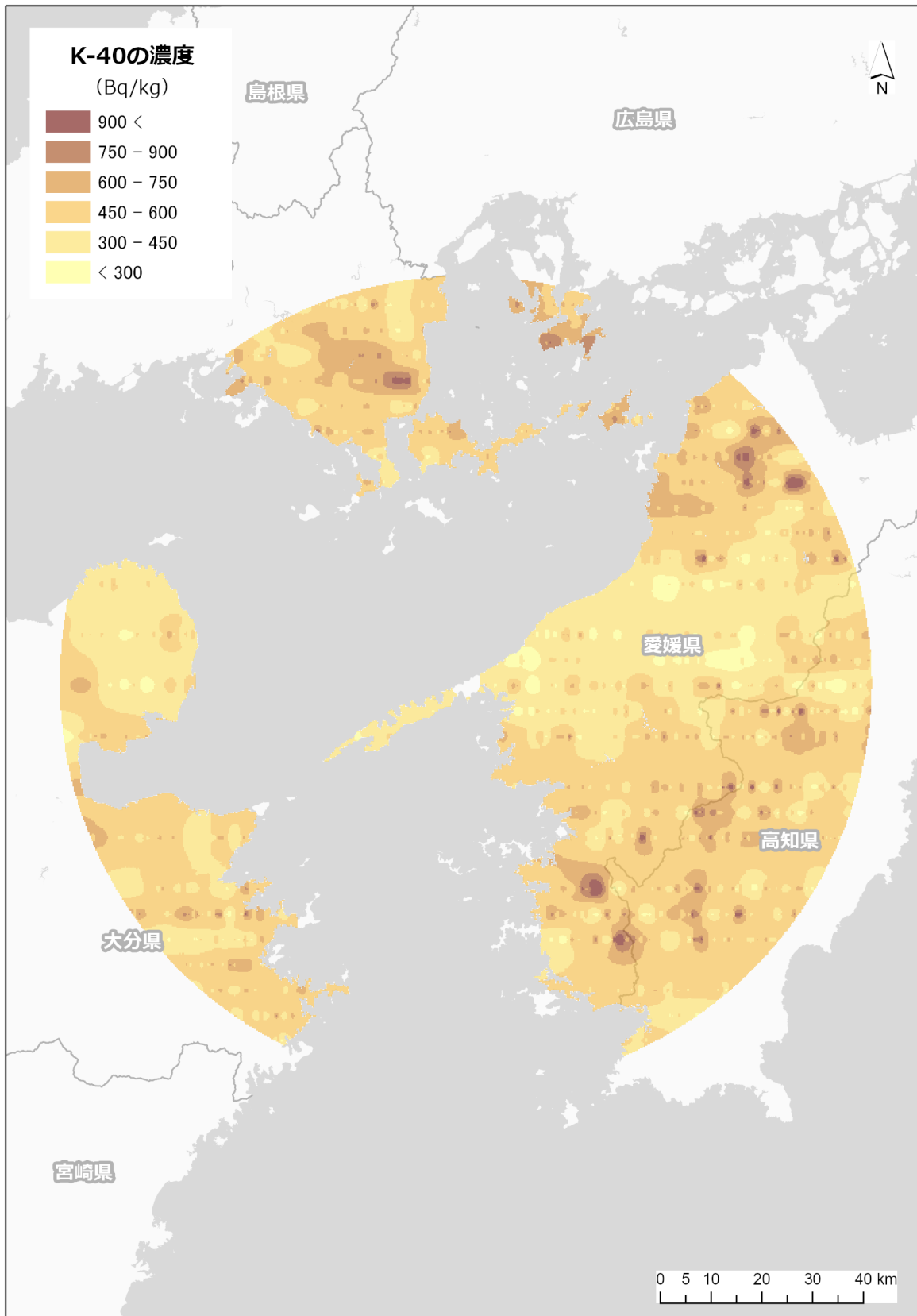


Fig. 4-16 K-40 濃度マップ (伊方)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

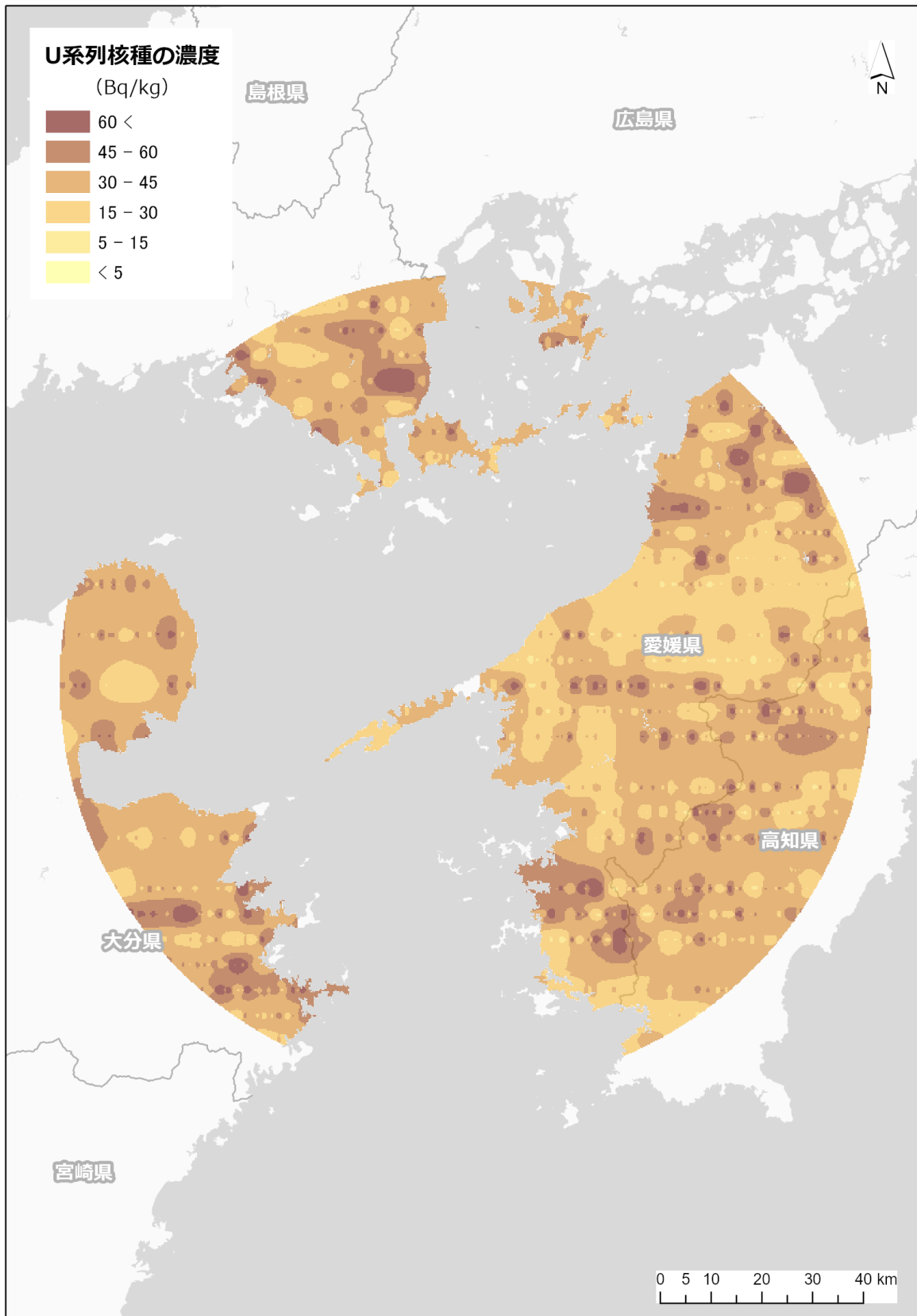


Fig. 4-17 U 系列濃度マップ (伊方)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

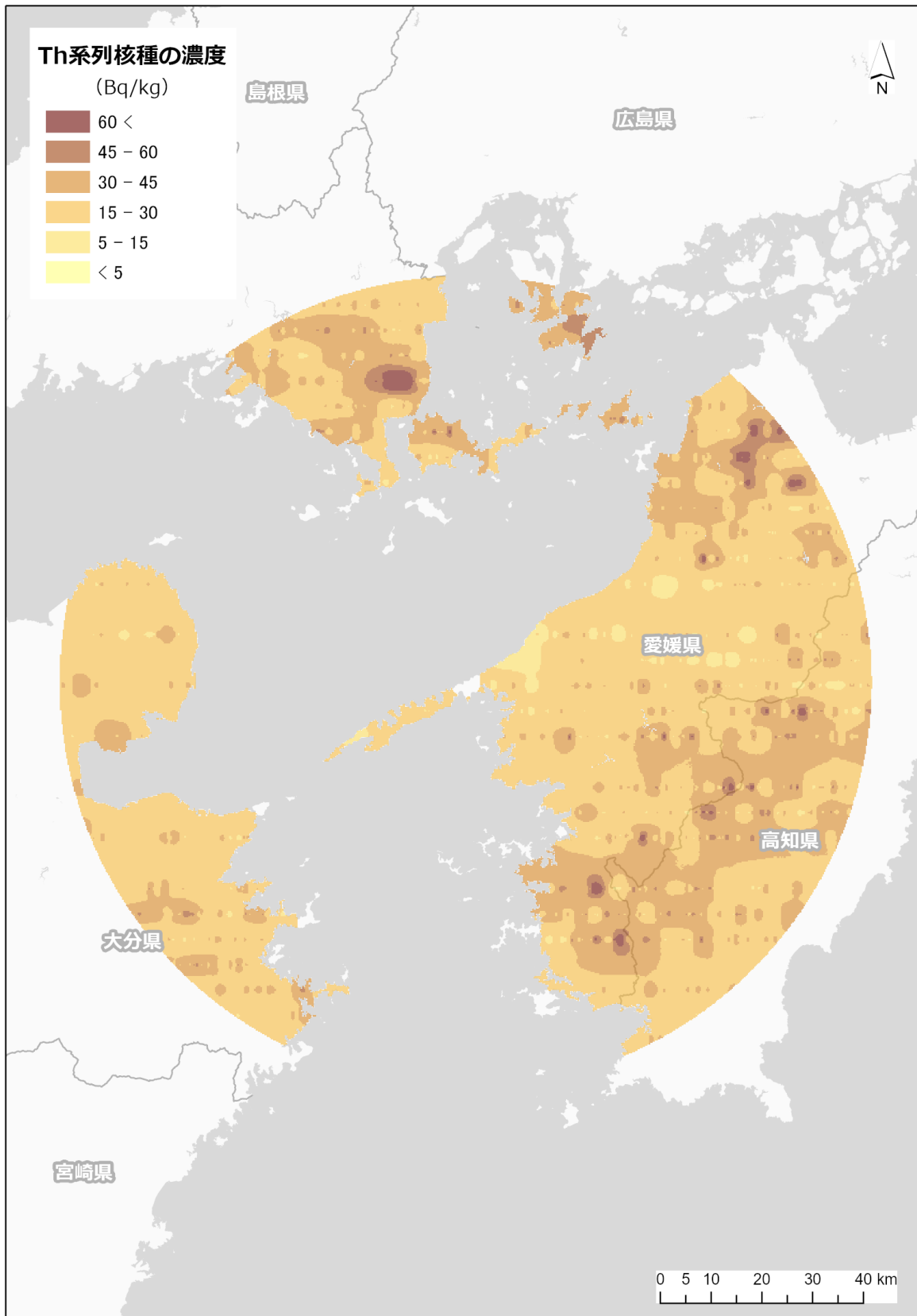


Fig. 4-18 Th 系列濃度マップ (伊方)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

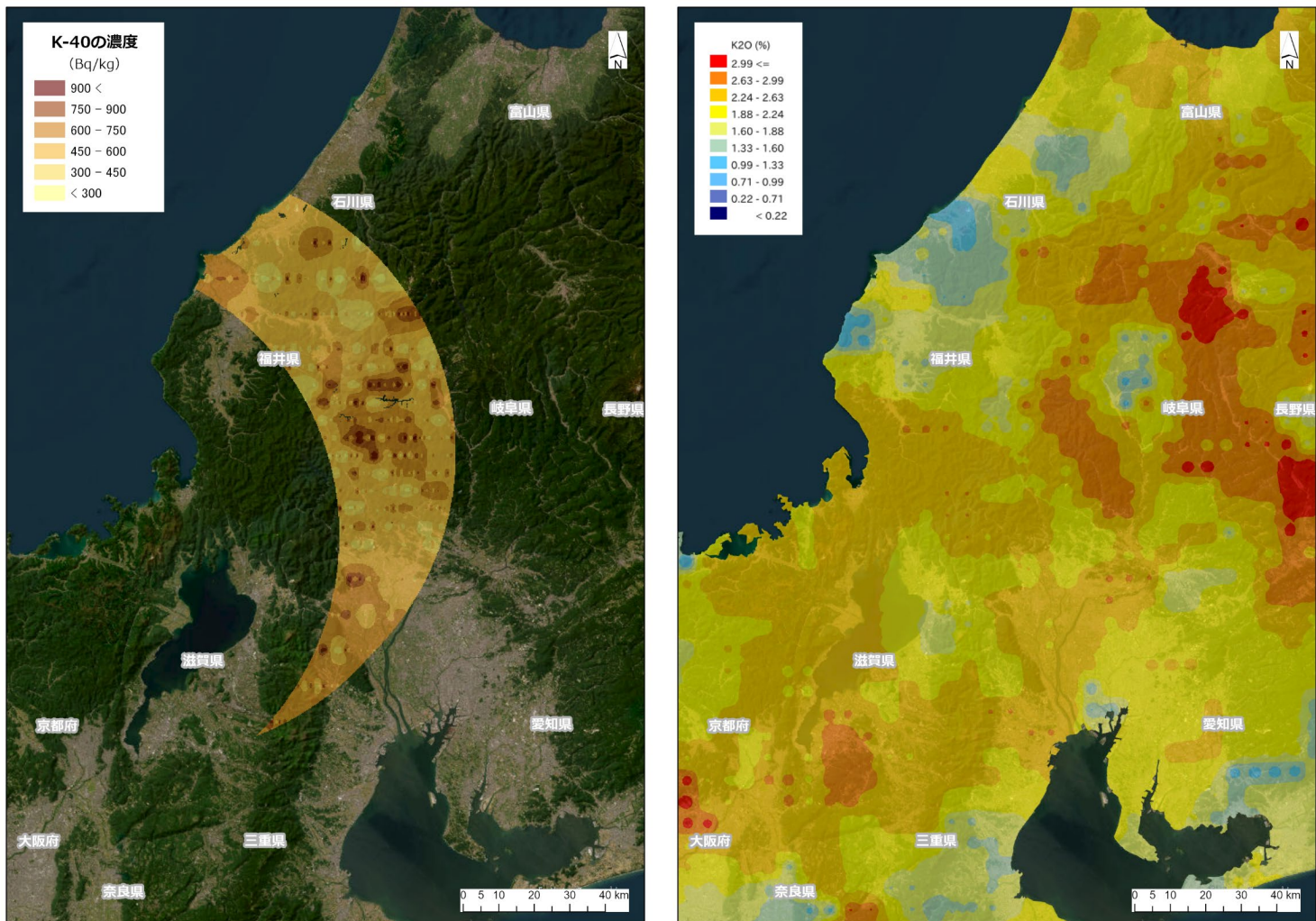


Fig. 4-19 美浜・敦賀の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (K-40)

(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。)

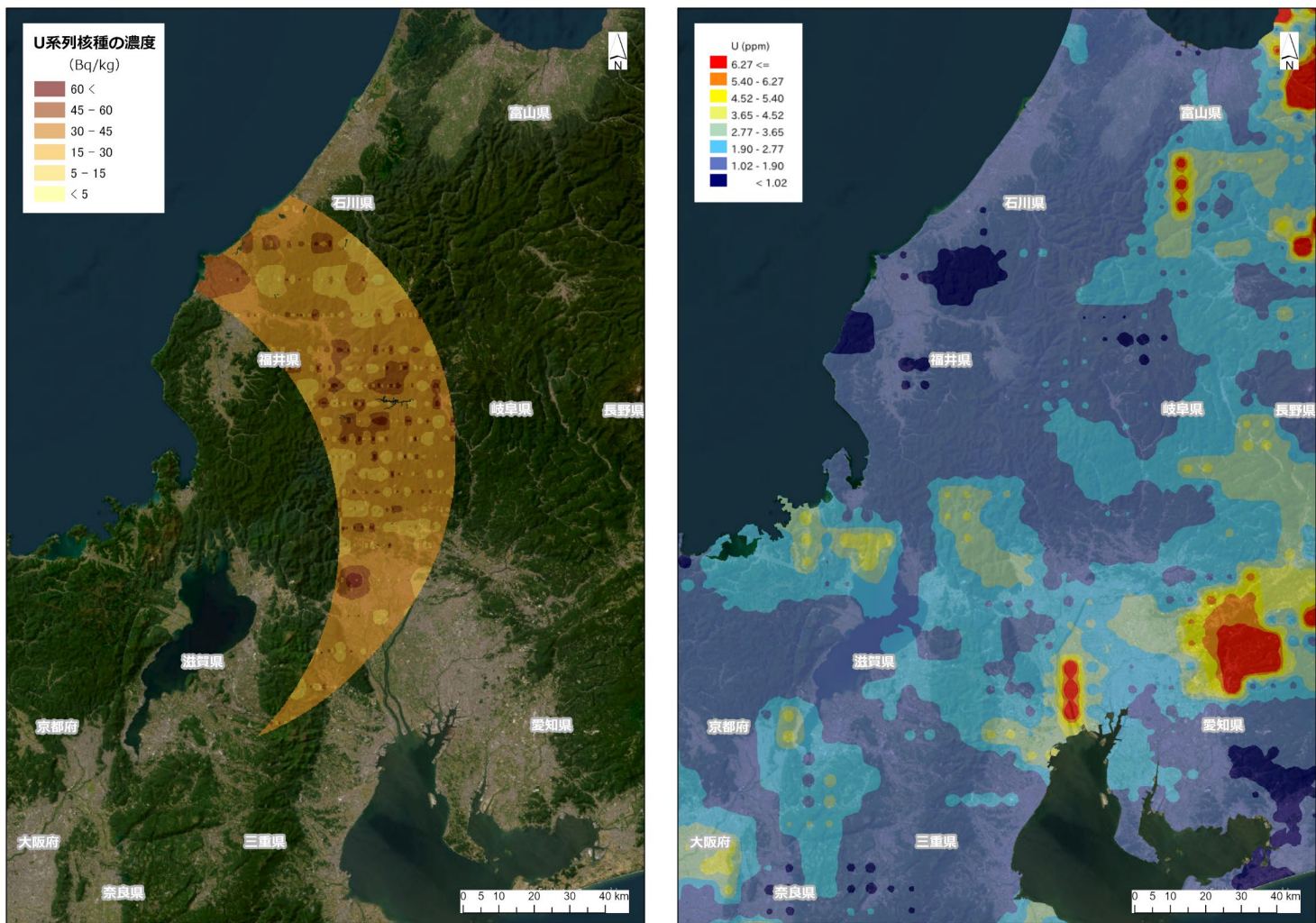


Fig. 4-20 美浜・敦賀の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (U 系列)

(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。)

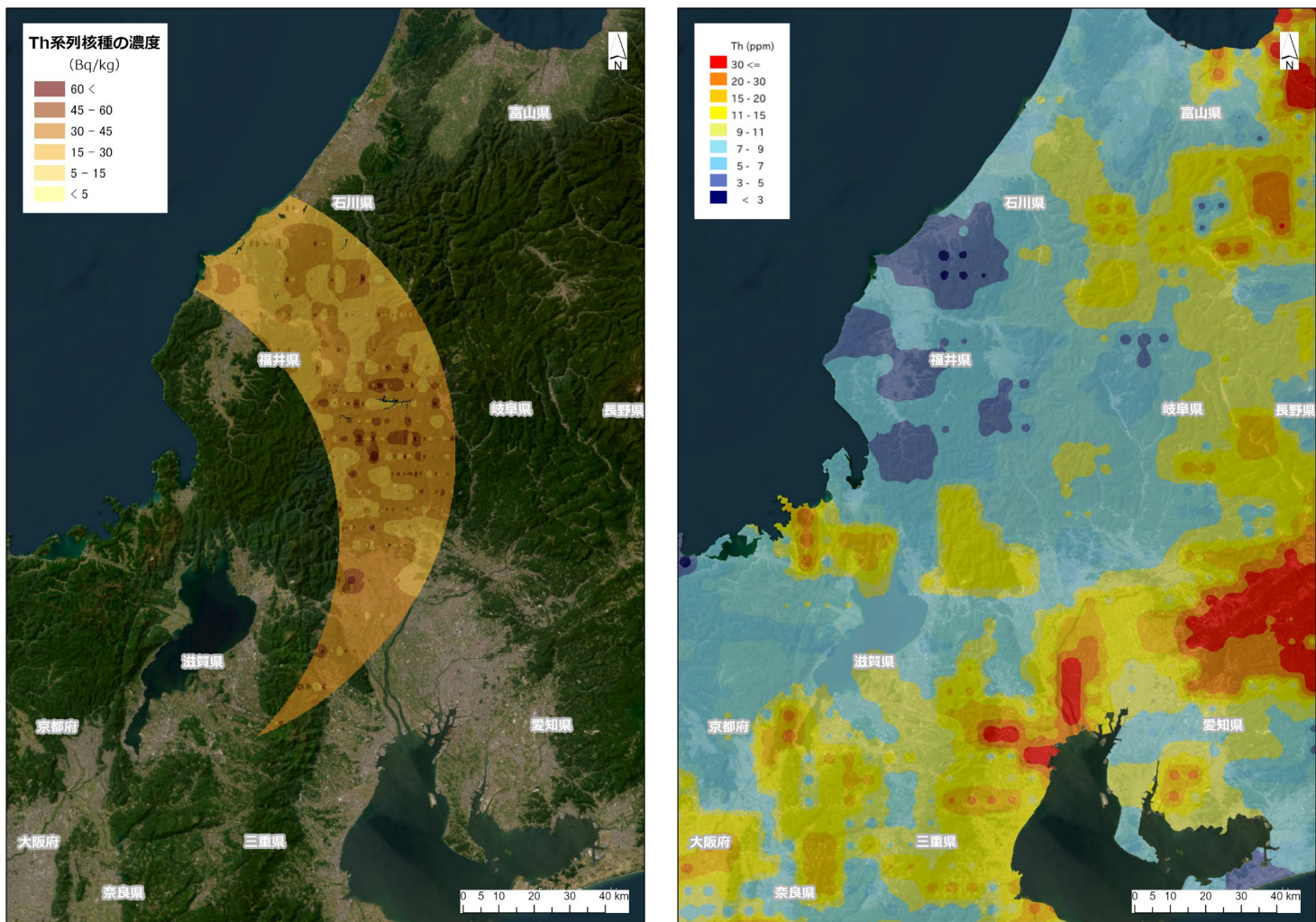


Fig. 4-21 美浜・敦賀の放射性核種濃度測定結果(左)と地球化学図(右)の比較(Th系列)

(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。)

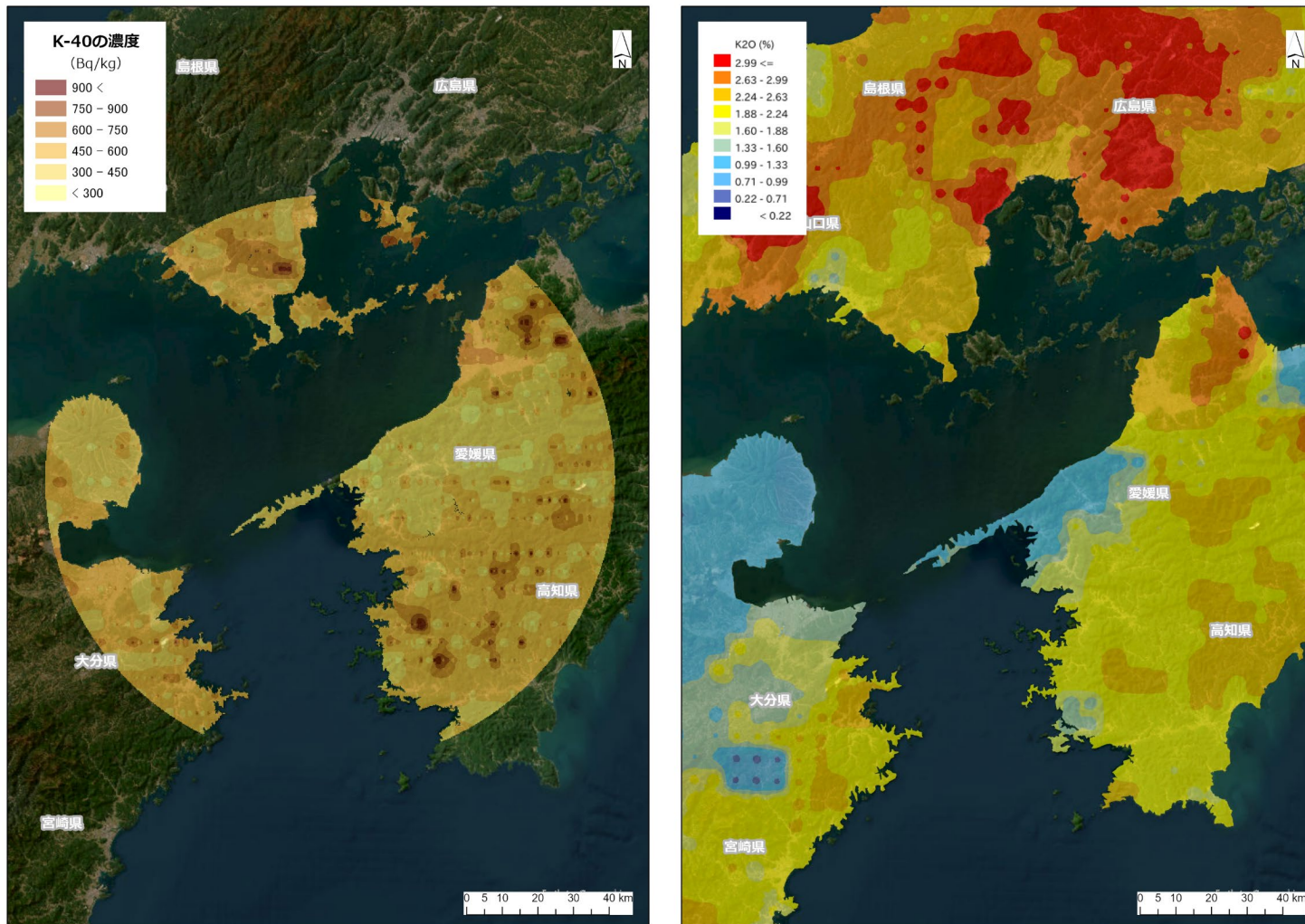


Fig. 4-22 伊方の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (K-40)

(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。)

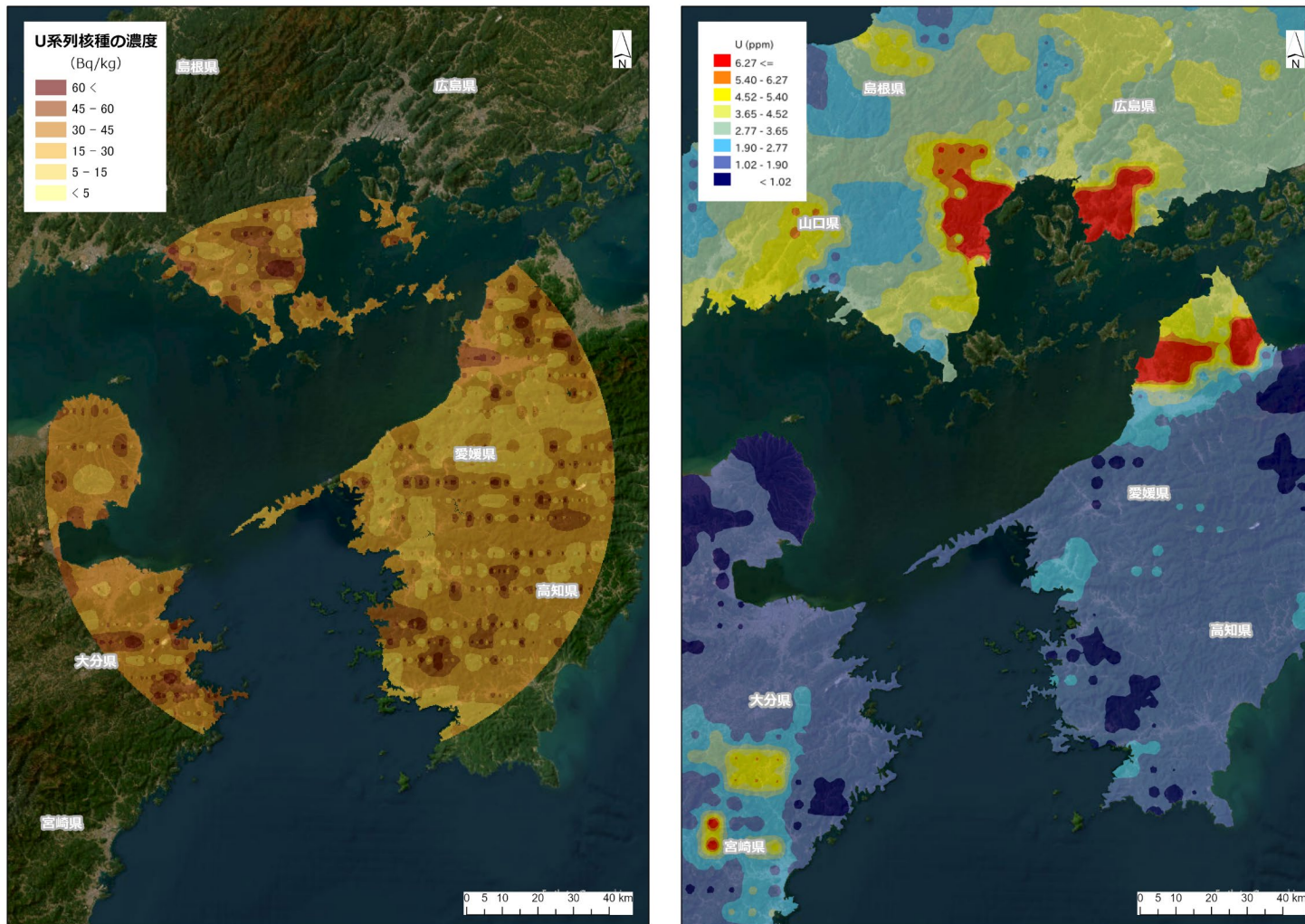


Fig. 4-23 伊方の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (U 系列)

(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。)

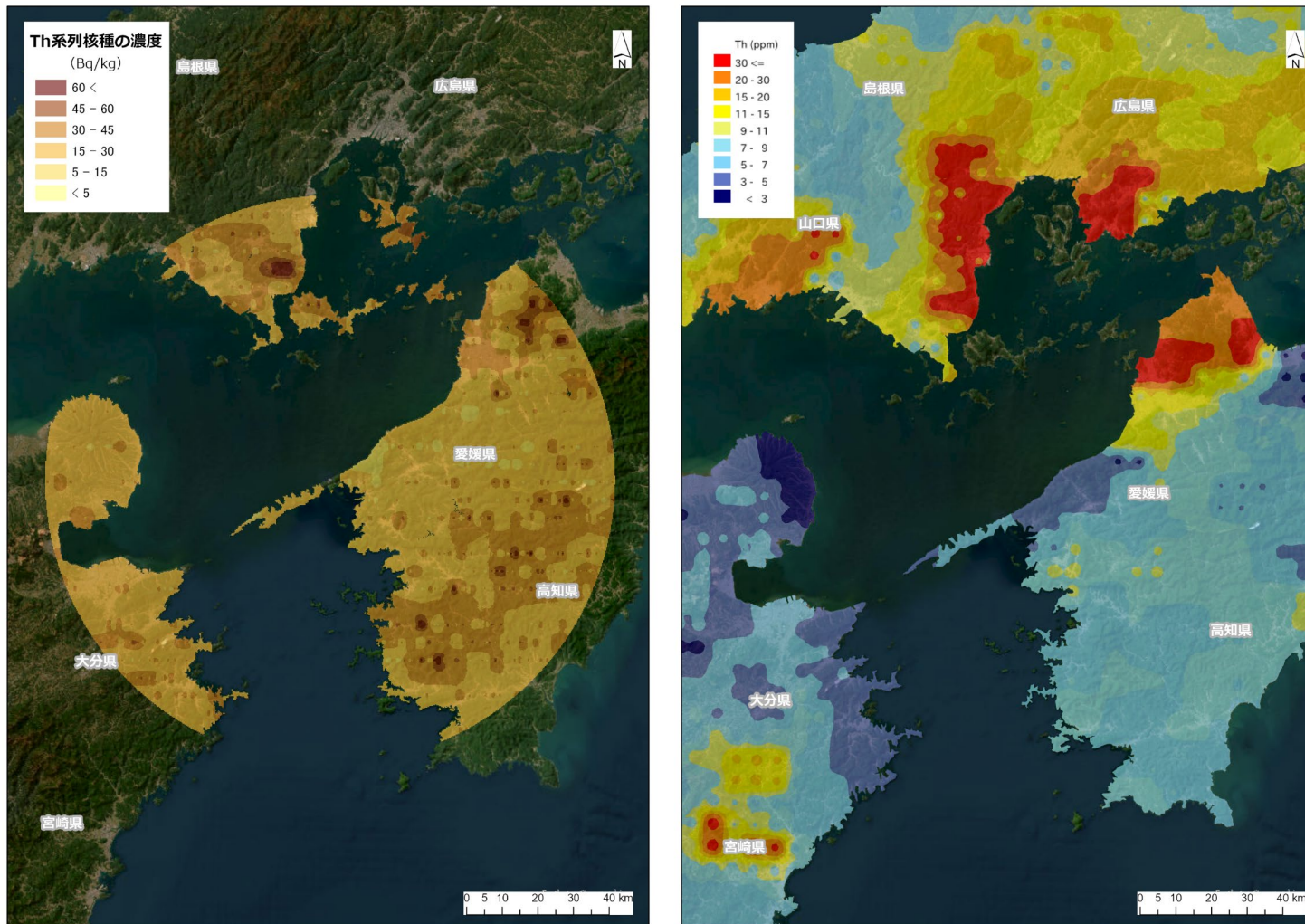


Fig. 4-24 伊方の放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (Th 系列)

(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。)

4.5. ラドン弁別手法の適用

4.5.1. パラメータ (*RI* 及び *GI*) の決定

式 [10] に記載したように、ラドン弁別法の信頼性は *GI* と *RI* の設定精度に依存する。ヘリコプターの遮蔽による γ 線計数率の変化に付随して、これらのパラメータも変化すると考えられるため、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、美浜・敦賀及び伊方における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 GPS データ (緯度、経度及び飛行高度) を 40 秒平均し、全計数率から宇宙線及びヘリコプター機体に起因する γ 線計数率の寄与をバックグラウンドとして減算したうえで *RI* 及び *GI* の算出に用いた。このとき、*RI* については海上でフライトしたデータの内、海拔高度が $300 \text{ m} \pm 150 \text{ m}$ (実際のフライト海拔高度が $150 \text{ m} \sim 450 \text{ m}$) で取得したデータを抽出対象とし、*GI* については陸上で取得したデータの内、対地高度が 300 m 前後 (実際のフライト対地高度が $290 \text{ m} \sim 320 \text{ m}$ のデータ) のデータのみを抽出対象とした。*RI* 及び *GI* の算出に係る NaI(Tl) 検出器の計数率と LaBr₃ 検出器の計数率の関係を Fig. 4-25 に示す。本図において線形回帰 (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¹⁷⁾。最小二乗法では実測値と予測値との二乗誤差を最小にする回帰係数を決定するため、外れ値が生じた場合の影響が大きく、回帰係数が外れ値側に偏った値に近似されてしまうためである。そこで、外れ値を含むデータに対しても適切な回帰係数を得ることを目的として、ロバスト回帰を試行的に導入することを検討した。本報告では、ロバスト回帰の中でも比較的単純で導入が容易な最小絶対値法を用いることとした。最小絶対値法では実測値と予測値との絶対値誤差を最小にする回帰係数を決定するため外れ値の影響を比較的受けにくいことが知られている。一方で、データに外れ値が含まれない (実測値と予測値の誤差が正規分布に従う) 場合には、最小二乗法の方が最小絶対値法よりも信頼度の高い回帰係数を与える⁴⁰⁾。以上のことを勘案すると、*RI* 及び *GI* の算出に際しては、最小二乗法及び最小絶対値法による回帰係数を取得し、それぞれの数値がほとんど同一である場合には最小二乗法による回帰係数を用い、明らかに異なる場合には最小絶対値法による回帰係数を用いるのがより適切と思われる。

RI 及び *GI* の算出に係る NaI(Tl) 検出器の計数率と LaBr₃ 検出器の計数率の関係を Fig. 4-25 に示す。本図には最小二乗法及び最小絶対値法による線形回帰で得られた近似直線と回帰式を併記した。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. 4-25 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。

本報告においては、美浜・敦賀及び伊方の *RI*、*GI* ともに外れ値が生じず、最小二乗法と最小絶対値法とで回帰係数はほとんど同一であった。よって、解析に使用する *RI* 及び *GI* は最小二乗法により得られたものに統一した。

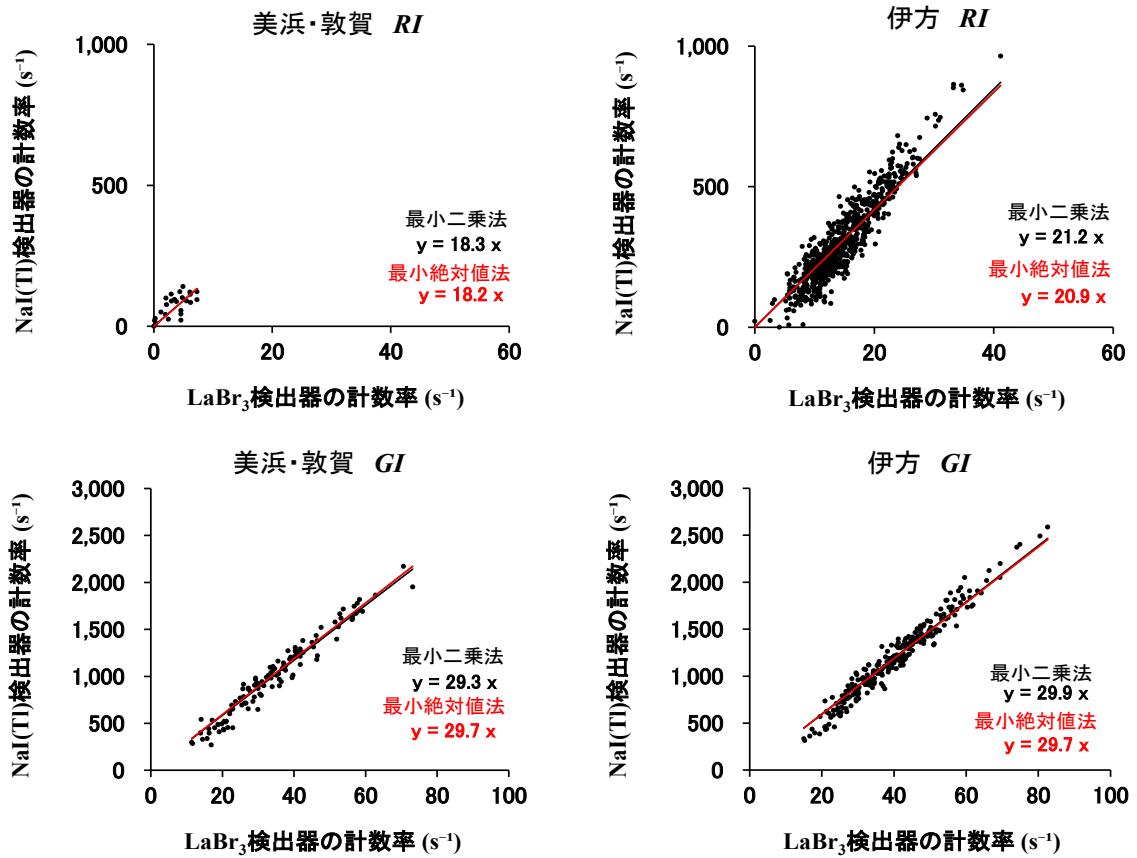


Fig. 4-25 海上及び陸上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr₃ 検出器の計数率の関係

Table 4-4 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>
美浜・敦賀	2022/07/26	2022/07/31	Bell430 (JA02AX)	18.3	29.3
伊方	2022/11/11	2022/11/21	Bell412 (JA9616)	21.2	29.9
東日本13次モニタリング	2022/09/30	2022/10/21	Bell430 (JA05TV)	19.1	28.0
	2022/09/13	2022/10/03	Bell412 (JA6928)	15.6	30.1
	2022/10/03	2022/10/19	Bell412 (JA412N)		

4.5.2. 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

ラドン弁別手法を美浜・敦賀及び伊方における航空機モニタリングデータに適用し、空間線量率マップ及び空气中ラドン子孫核種の計数率マップを作成した。なお、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、空間線量率の計算値が地上測定値とよく整合するという知見が得られている。このことが普遍的に成立するかを検証するために、前節で示した 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、美浜・敦賀の場合は 29.3、伊方の場合は 29.9 をそれぞれ GI の基準値とし、 GI を 28.3 及び 27.3、28.9 及び 27.9 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。次に、ラドン弁別手法を適用して作成した空間線量率マップと地上測定値 20 点とを比較し、ラドン弁別手法による空間線量率の計算値の妥当性について検証した。この時、Fig. 4-6 (美浜・敦賀) 及び Fig. 4-7 (伊方) に示した標準的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計算結果の妥当性向上をもたらすかを検証した。最後に、標準的解析手法において空气中核種フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空气中ラドン子孫核種由来の計数率を比較し、空間線量率マップを作成するにあたって評価対象外となる γ 線計数率の除去効果の有効性を検証した。

美浜・敦賀について、ラドン弁別手法を適用して作成した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 Fig. 4-26 及び Fig. 4-27 に示す。空間線量率マップについては比較のため、Fig. 4-9 に示した標準的解析手法によるマップも掲載した。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が比較的高い領域の面積が明らかに減少した。また、ラドン弁別手法において、空間線量率の計算値は GI を基準値から減じるほど大きくなる傾向にあった。これは式 [10] 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、 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。この計数率は式 [10] で求めた $C_{\text{NaI,g}}$ を式 [6] に代入して $C_{\text{NaI,a}}$ を計算し求めた。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^{41),42),52)}。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. 4-27 について、美浜・敦賀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 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 s^{-1} 以上の領域が広がり、この領域と空間線量率が比較的大きく算出された領域とが概ね重なった。このことから、美浜・敦賀の航空機モニタリングにおいて空間線量率が比較的高く算出された領域においては、全計数率の内、空气中ラドン子孫核種由来の γ 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したと推察される。次に伊方につ

いて、ラドン弁別手法を適用して作成した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美浜・敦賀の場合と同様にして Fig. 4-28 及び Fig. 4-29 に示す。空間線量率マップについては、標準的解析手法とラドン弁別手法の両方で空間線量率の分布傾向は概ね同様であり、伊方エリアの北東部及び南東部において $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を上回る領域が一部消失した。空气中ラドン子孫核種の計数率マップについては、伊方エリアの西部及び東部で $300 \text{ s}^{-1} \sim 500 \text{ s}^{-1}$ の計数率が比較的高い領域が広がった。この領域と空間線量率が比較的高く算出された領域はほとんど重ならず、むしろ空間線量率が $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 未満の領域と重なった。このことから、伊方の航空機モニタリングにおいて空間線量率が比較的高く算出された領域においては、全計数率の内、地表面の放射性核種から放出される γ 線計数率が占める割合が支配的であり、空气中ラドン子孫核種の影響は比較的小さかったため、標準的解析手法とラドン弁別手法とで空間線量率マップにさほど差異が生じなかったと思われる。

次に、標準的解析手法とラドン弁別手法における空間線量率の計算値の妥当性を比較検証するため、標準的解析手法と上記した各 GI の数値を用いてラドン弁別手法を適用した場合の間線量率の計算値と地上測定値との比較結果を Fig. 4-30 (美浜・敦賀) 及び Fig. 4-31 (伊方) に示す。美浜・敦賀については、Fig. 4-26 の空間線量率マップでも見られた通り、ラドン弁別手法を適用したとき、標準的解析手法よりも空間線量率が低く算出された。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 85 % (全 20 点中 17 点) であったのに対し、ラドン弁別手法では $GI = 29.3$ 及び $GI = 28.3$ で 60 % (全 20 点中 12 点)、 $GI = 27.3$ で 65 % (全 20 点中 13 点) であり、ラドン弁別手法では収まりが悪化した。また、ラドン弁別手法を適用した結果同士で比較すると、今までの知見通り、 GI を基準値よりも小さく設定した方が、地上測定値との整合が僅かではあるものの良くなる傾向にあった。相対誤差については、標準的解析手法では平均値が -0.25 、中央値が -0.30 、1 標本標準偏差が 0.27 であったのに対し、ラドン弁別手法では GI をいずれの値に設定しても、平均値、中央値ともに -0.4 以下、1 標本標準偏差は 0.15 程度であった。ラドン弁別手法では相対誤差のばらつきを小さく抑えることができているものの、標準的解析手法の場合よりもさらに空間線量率を過小に評価したことが示された。また、式 [12] に基づいて $RMSE$ を計算したところ、標準的解析手法で $0.027 \mu\text{Sv/h}$ であったのに対し、ラドン弁別手法では $GI = 29.3$ のとき $0.035 \mu\text{Sv/h}$ 、 $GI = 28.3$ のとき $0.034 \mu\text{Sv/h}$ 、 $GI = 27.3$ のとき $0.033 \mu\text{Sv/h}$ であり、地上測定値との乖離がやや大きくなった。伊方についても同様に比較すると、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、標準的解析手法で 75 % (全 20 点中 15 点) であったのに対し、ラドン弁別手法では $GI = 29.9$ のとき 75 % (全 20 点中 15 点)、 $GI = 28.9$ 及び $GI = 27.9$ で 80 % (全 20 点中 16 点) であり、互いにほとんど同等であった。相対誤差については、標準的解析手法では平均値は -0.23 、中央値は -0.19 、1 標本標準偏差は 0.37 であったのに対し、ラドン弁別手法では平均値は $-0.3 \sim -0.2$ 程度、中央値は $-0.2 \sim -0.1$ 程度、1 標本標準偏差は 0.3 前後であり、両者は概ね同等であった。 $RMSE$ については、標準的解析手法で $0.032 \mu\text{Sv/h}$ であったのに対し、ラドン弁別手法では $GI = 29.9$ のとき $0.030 \mu\text{Sv/h}$ 、 $GI = 28.9$ のとき $0.029 \mu\text{Sv/h}$ 、 $GI = 27.9$ のとき $0.028 \mu\text{Sv/h}$ であり、標準的解析手法と比べて地上測定値との整合が僅かながら改善される傾向にあったものの、有

意な差とは言い難い。

最後に、ラドン弁別手法で求めた空气中ラドン子孫核種由来の γ 線計数率が、空間線量率マップを作成する際に評価対象外となる計数率を除去するのに有効な数値となり得るかを検証するため、標準的解析手法において空气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. 4-32)。いずれも、標準的解析手法において空气中核種フライトを実施した時刻及び場所で取得した計数率データを基に算出したものである。3.2 節「空气中核種フライト」の項目に記載した通り、空气中核種フライトは美浜・敦賀については琵琶湖上または若狭湾上、伊方については安芸灘周辺の海上で実施した。また、本図には比較のため、2022年9月13日～10月21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13次モニタリング) のデータを同様に比較した結果についても示した。東日本第13次モニタリングでは、空气中核種フライトは海域だけでなく、陸域で行っている場合もあり、Bell412 (JA6928) については鹿島灘、群馬県伊勢崎市の周辺、Bell412 (JA412N) については福島県須賀川市の周辺、栃木県芳賀郡芳賀町、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、栃木県さくら市の周辺、栃木県芳賀郡益子町の周辺において実施された。美浜・敦賀及び伊方について、空气中核種フライトで取得した計数率よりもラドン弁別手法で求めた計数率の方が1.7倍及び1.3倍程度高くなった。このことから、ラドン弁別手法では全計数率から除去した計数率がやや過剰であり、従って標準的解析手法よりも空間線量率が低く算出されたことが解される。一方、東日本第13次モニタリングにおいては、いずれのヘリコプター機体についても、標準的解析手法で用いた空气中核種由来の計数率よりもラドン弁別手法で求めた計数率の方が低くなる傾向にあった。例えば、Bell412 (JA6928 及び JA412N) では約0.7倍、Bell430 (JA02AX) では約0.9倍程度であった。このように、美浜・敦賀及び伊方と東日本第13次モニタリングとで、ラドン弁別手法で求めた空气中ラドン子孫核種由来の γ 線計数率と標準的解析手法で用いた計数率における多寡の関係がほとんど真逆であった。空气中ラドン子孫核種由来の γ 線計数率の多寡は地域や季節により変動するため、航空機モニタリングによってこれを正確に捉え、空間線量率マップする際に評価対象外となる計数率を除去するのに、より有効たらしめるためには、ラドン弁別手法で用いるパラメータ RI 及び GI の算出方法を改良する必要があると考える。

以上をまとめると、本報告において、ラドン弁別手法による空間線量率の計算値は標準的解析手法によるものより小さくなり、特に美浜・敦賀においては地上測定値との整合性が明らかに悪化する程であった。また、ラドン弁別手法で求めた空气中ラドン子孫核種由来の計数率は、標準的解析手法において空气中核種フライトで取得した計数率よりも大きくなる傾向にあり、美浜・敦賀で1.7倍、伊方で1.2倍程度であった。今までの経験から、ラドン弁別手法では RI 及び GI の算出に用いるデータに外れ値が含まれる等して、これら数値パラメータに悪影響が及ばない限り、標準的解析手法と同等以上に妥当性のよい空間線量率マップが作成可能であることが分かっている。本報告において、 RI 及び GI を最小二乗法と最小絶対値法により算出したところ、両者でほとんど差異は生じず、外れ値による悪影響はないものと思われた。しかしながら、美浜・敦賀のケースではラドン弁別手法が従来通りに機能せ

ず、その理由は判然としない点があり、本原因を検証する必要がある。標準的解析手法では、地表面に分布する放射性核種由来の γ 線計数率を算出するために、測定日ごとに空气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。空气中核種フライトで取得される計数率には空气中ラドン子孫核種由来の計数率も含まれており、ある程度正確に空气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、空气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气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、空气中ラドン子孫核種（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、空气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ると考えられる。本手法に関しては RI 及び GI の算出方法について、今後も知見を蓄積し、更なる改良に向けた検討を行っていく必要がある。例えば、最小絶対値法や最小二乗法では縦軸データまたは横軸データ（本報告ではそれぞれ、 NaI(Tl) 検出器の計数率または LaBr_3 検出器の計数率）のどちらか一方にのみ誤差が含まれるという仮定の下に回帰係数を求めるため、 RI 及び GI を求めるには適切な回帰アルゴリズムであるとは言い難い。そこで、縦軸データ及び横軸データの両方に誤差が含まれることを考慮した回帰アルゴリズムである最小距離二乗法を取り入れ、これとロバスト回帰とを組み合わせることで、外れ値が生じた場合においても適切に RI 及び GI を安定的に算出できる方法の導入を検討したい。

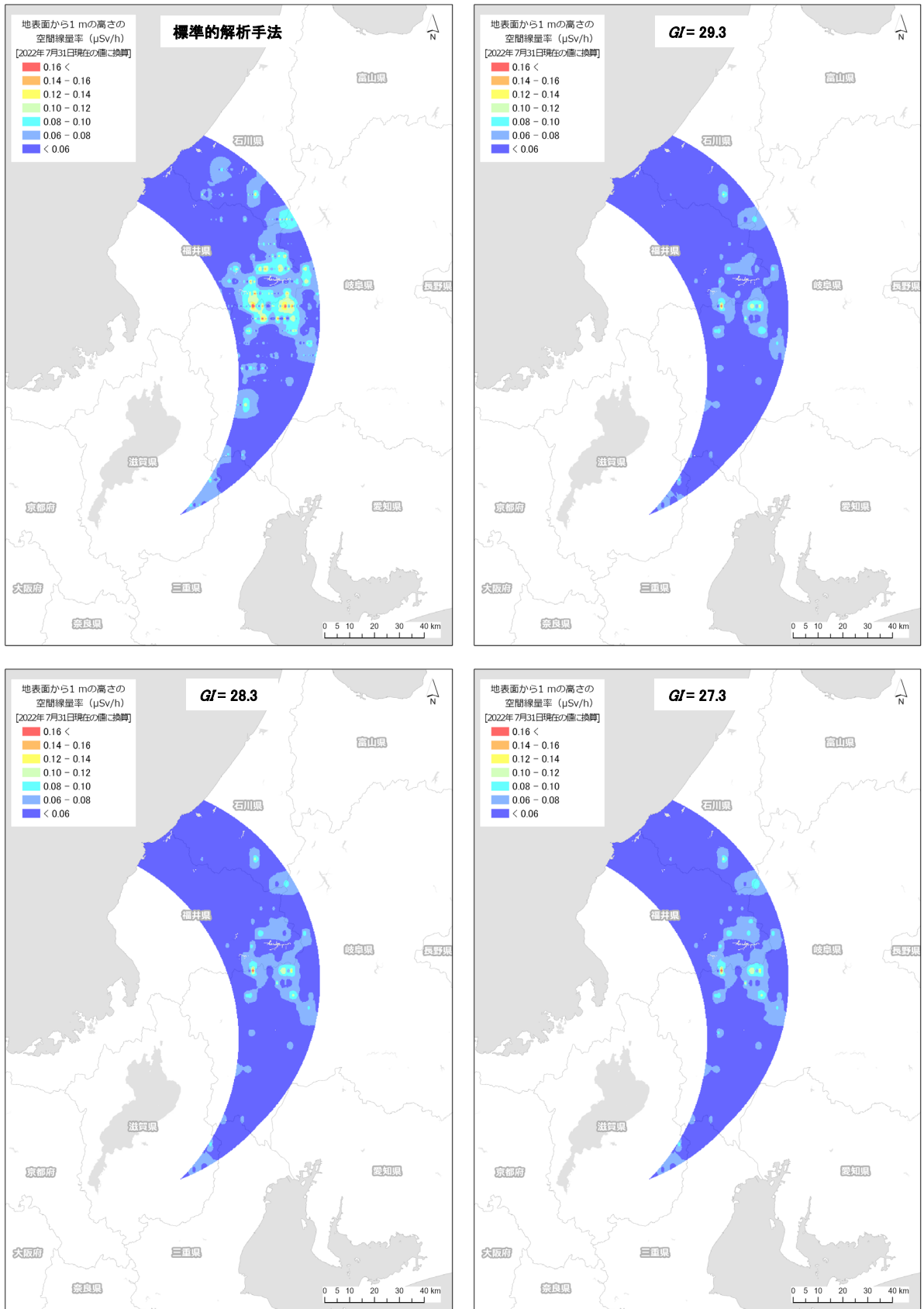


Fig. 4-26 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (美浜・敦賀)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

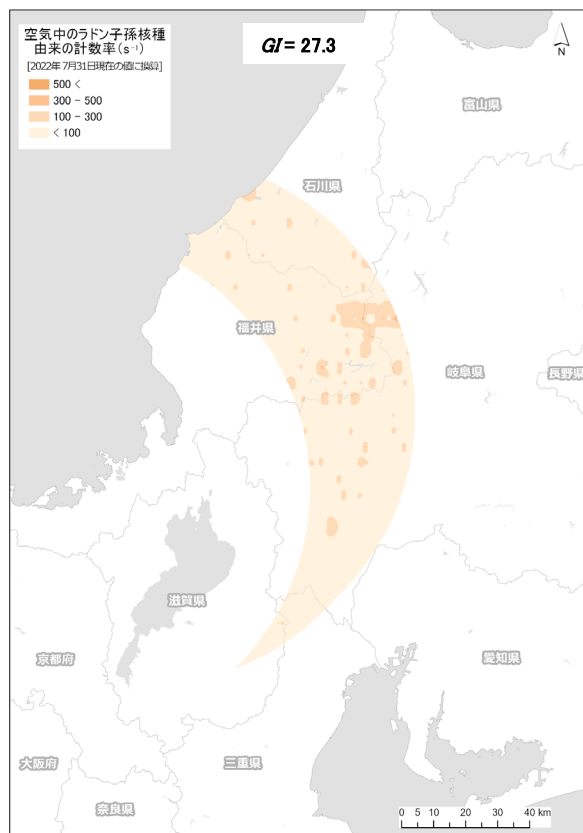
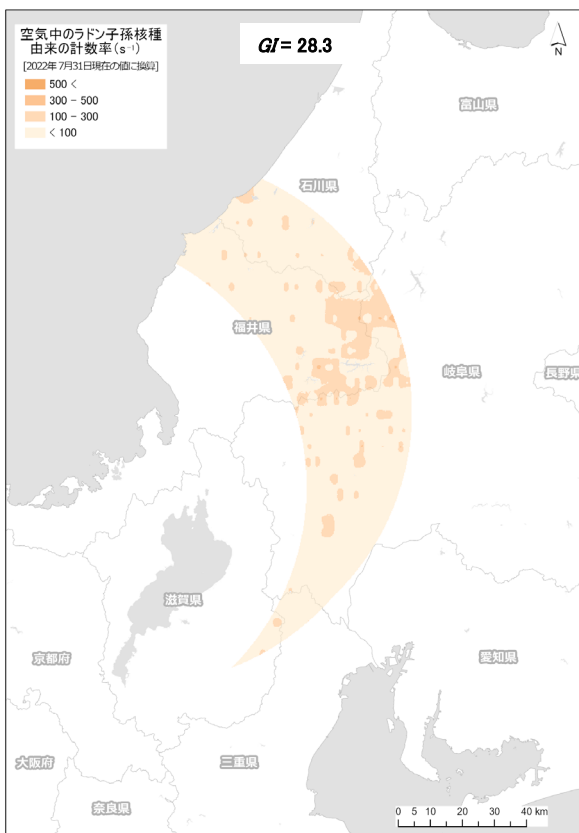
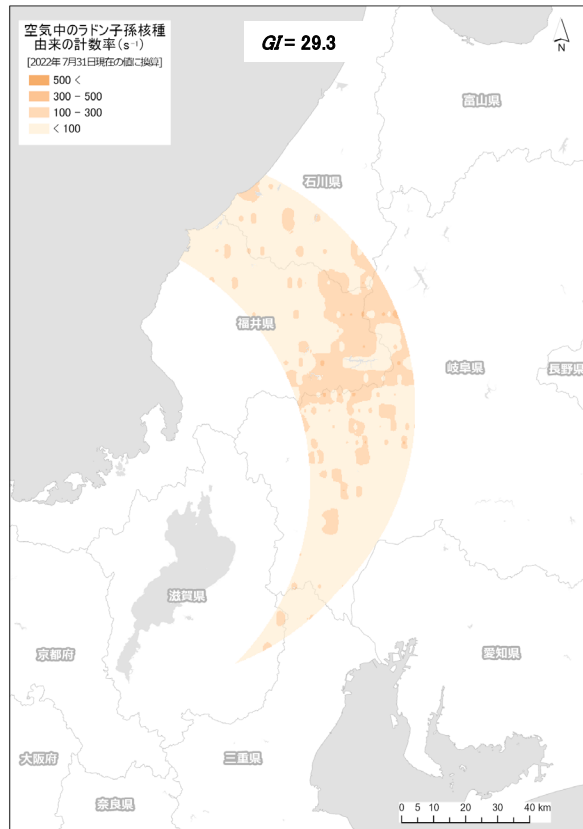
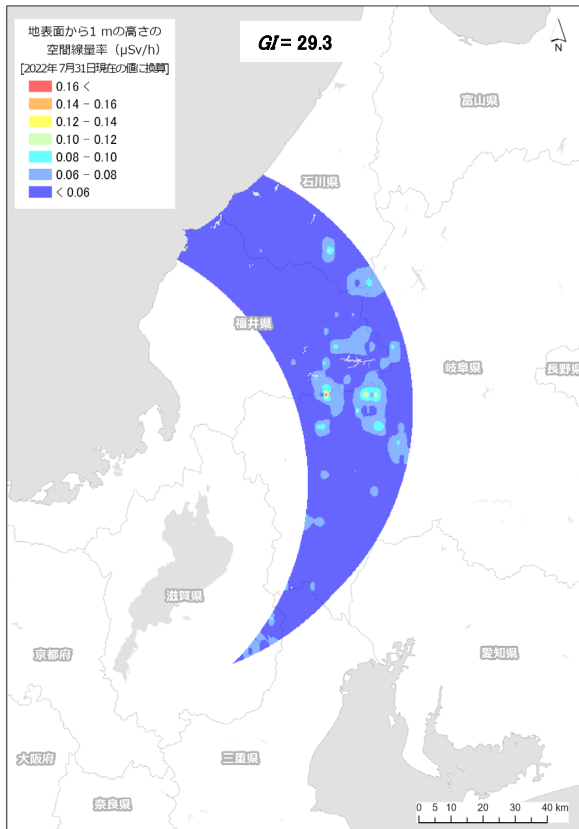


Fig. 4-27 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (美浜・敦賀)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

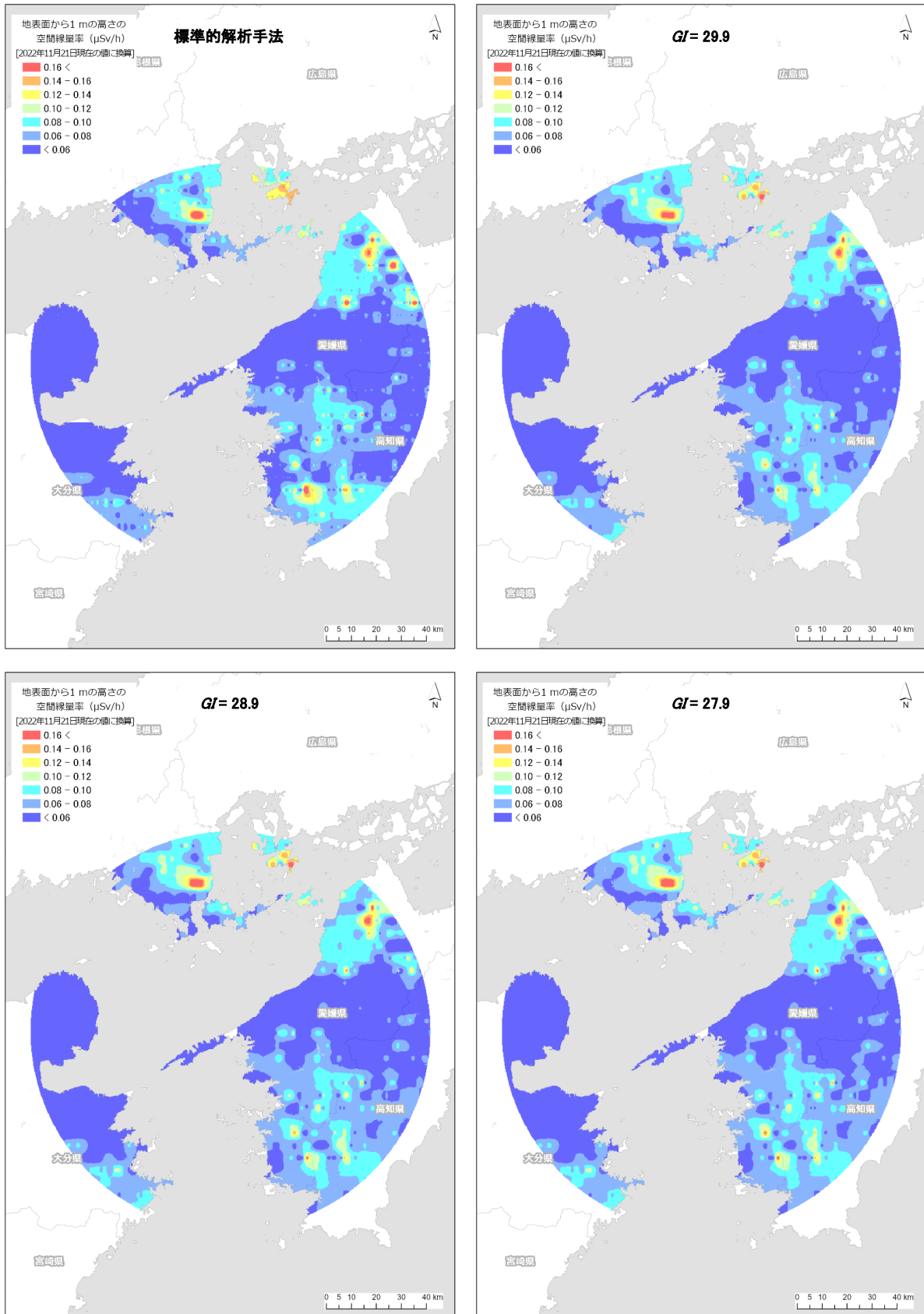


Fig. 4-28 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (伊方)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

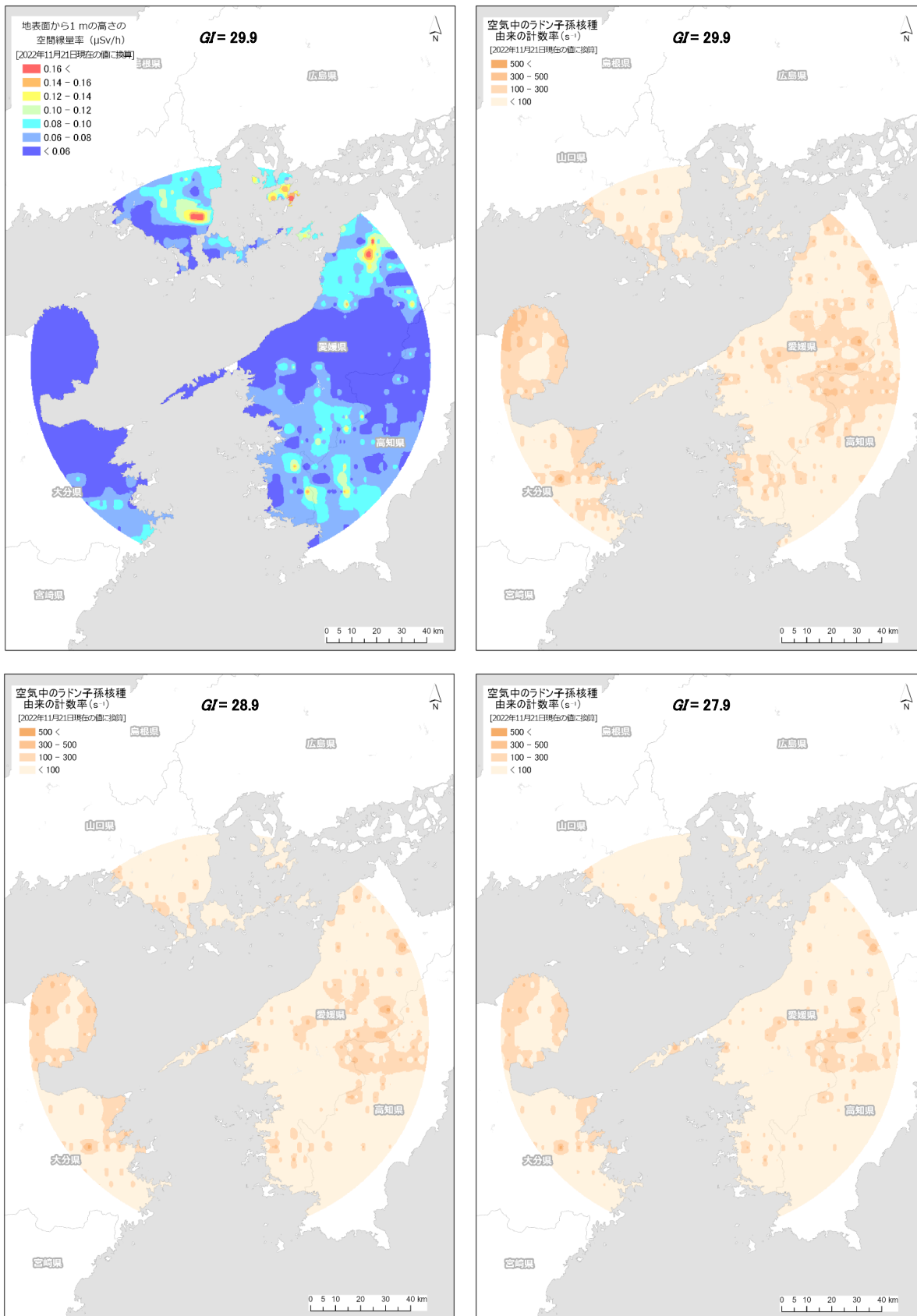


Fig. 4-29 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (伊方)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

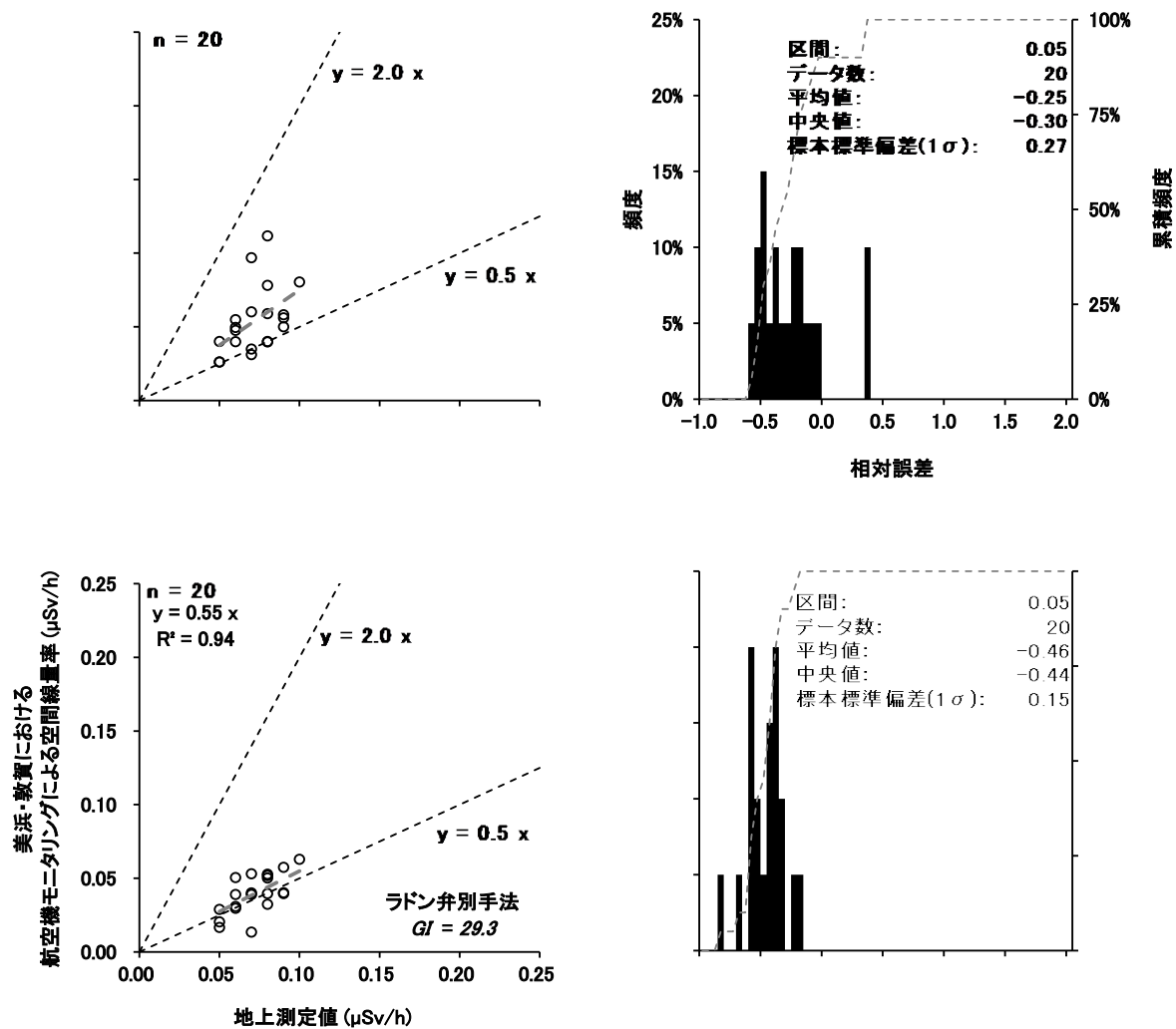


Fig. 4-30 標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (美浜・敦賀)

(1/2)

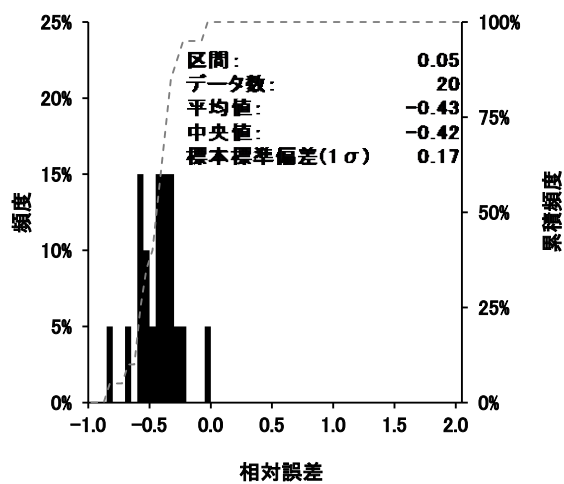
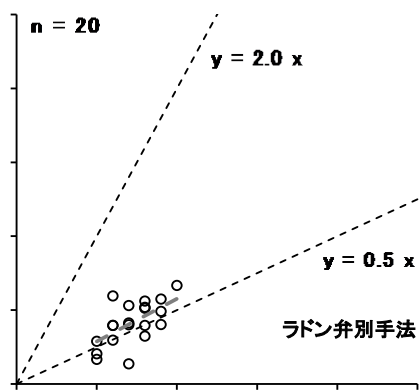
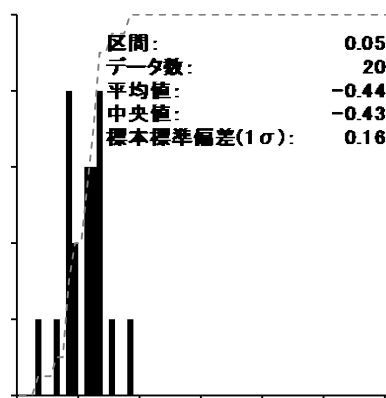
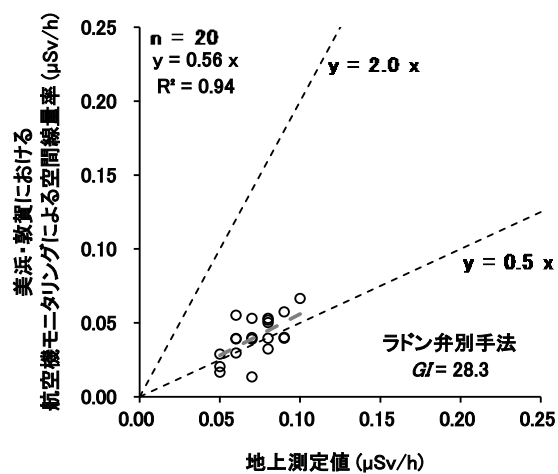


Fig. 4-30 標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (美浜・敦賀)

(2/2)

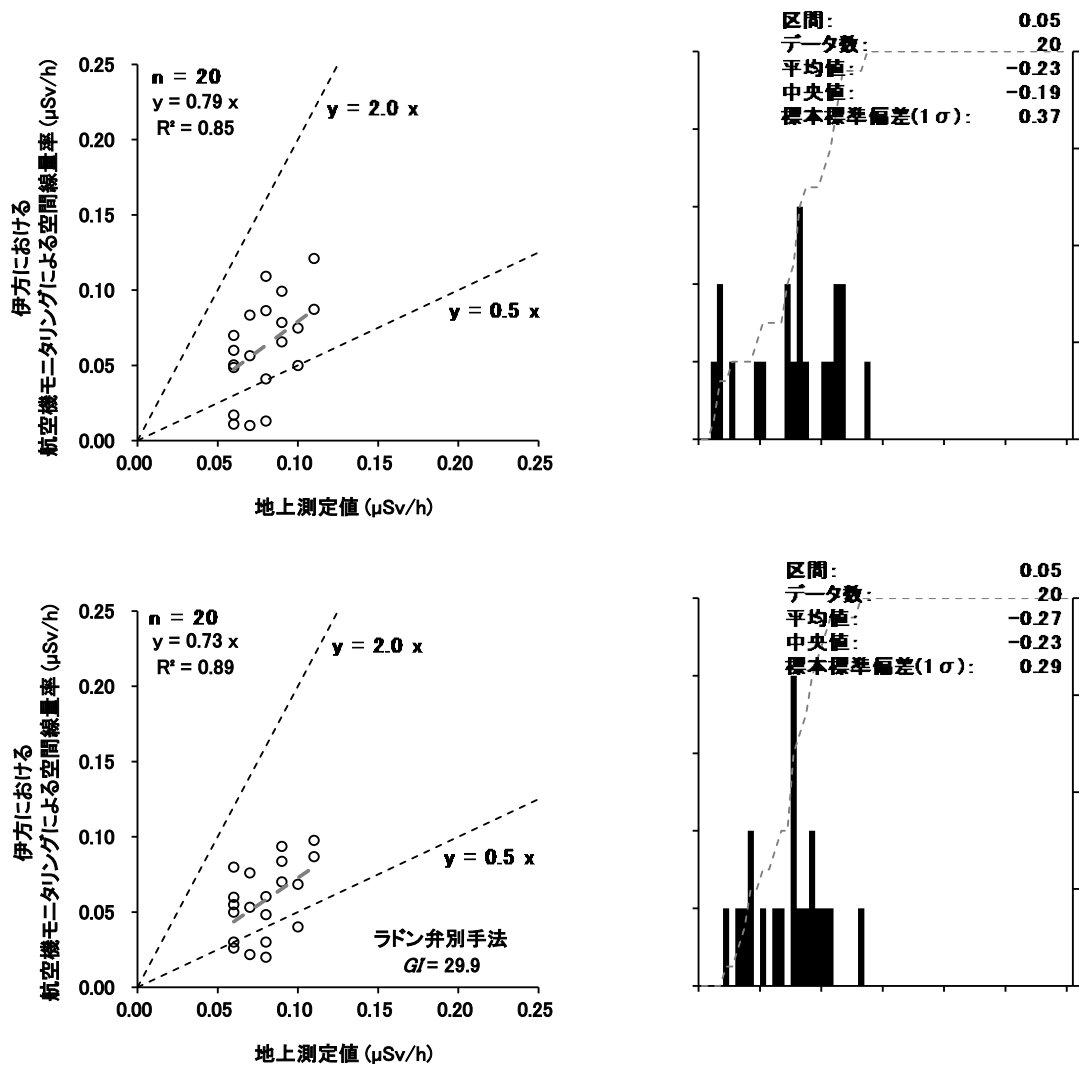


Fig. 4-31 標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (伊方)

(1/2)

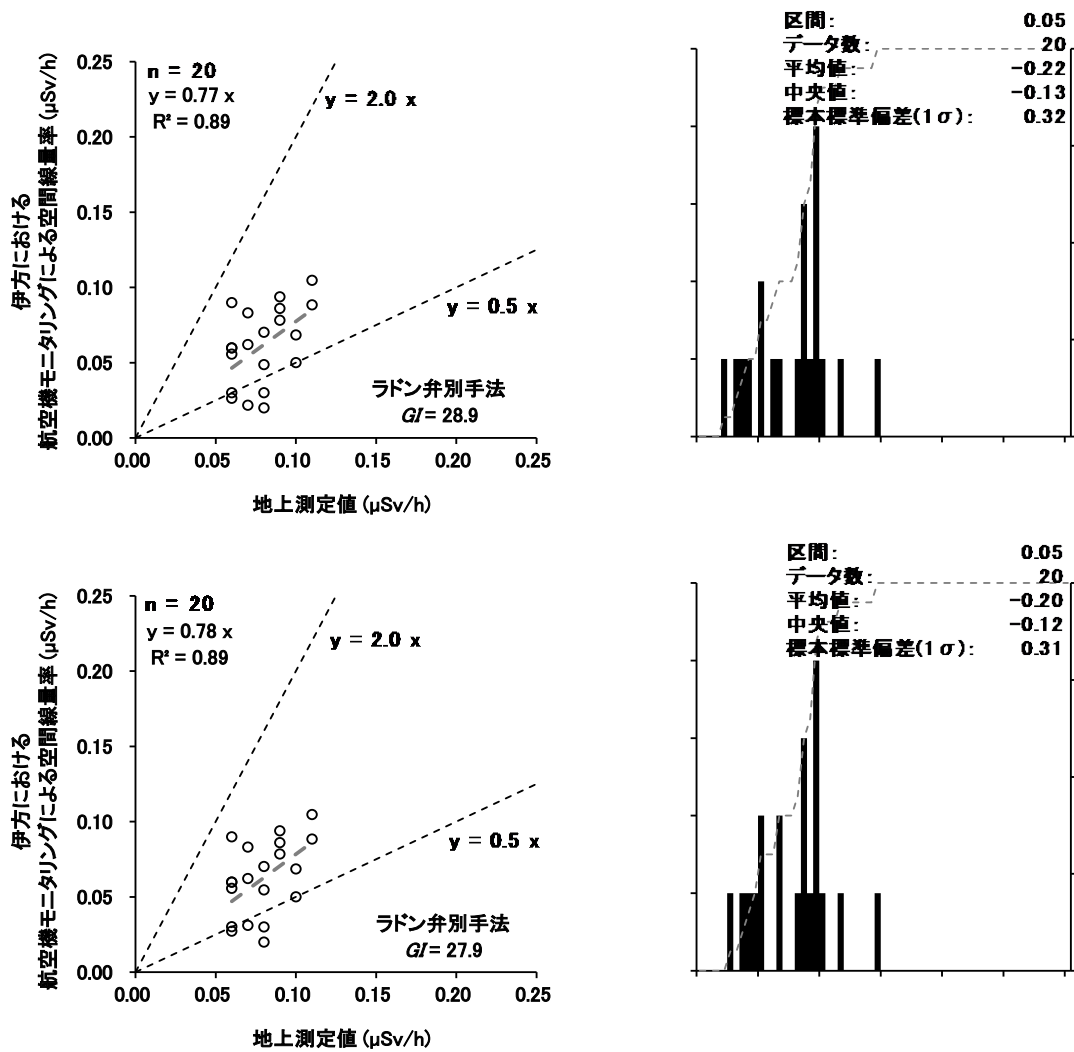


Fig. 4-31 標準的解析手法及びラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較 (伊方)

(2/2)

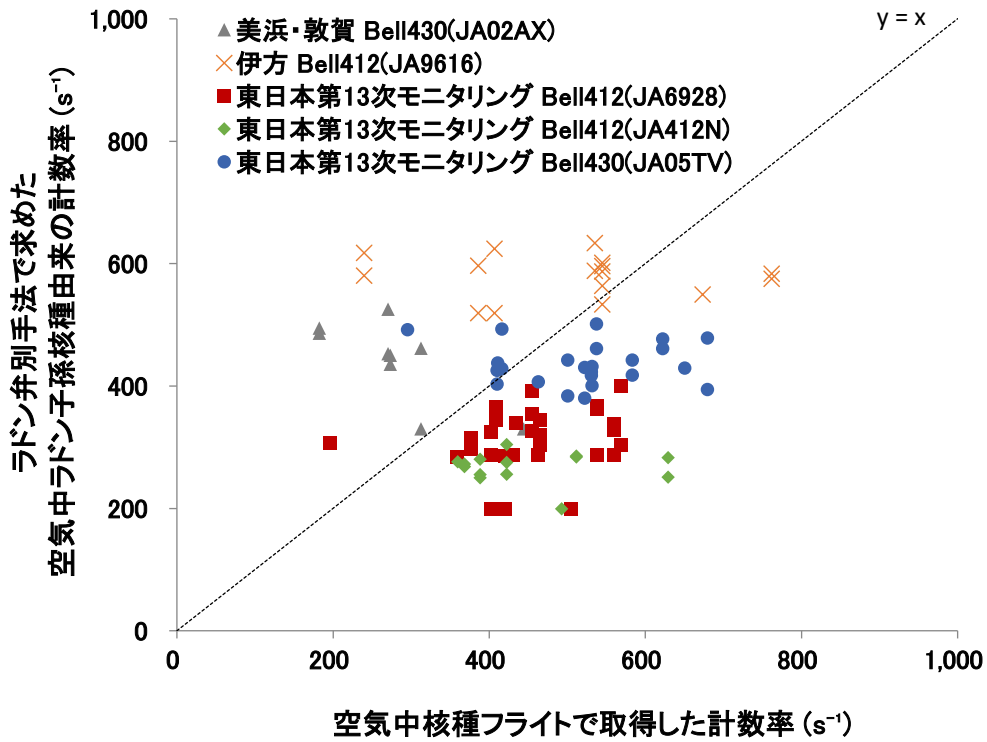


Fig. 4-32 空気中核種フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子孫核種由来の計数率の比較

4.6. 放射性セシウムの沈着量

美浜・敦賀及び伊方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の算出を行った。放射性セシウムの沈着量マップを Fig. 4-33 及び Fig. 4-34 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¹⁸⁾と同様とした。

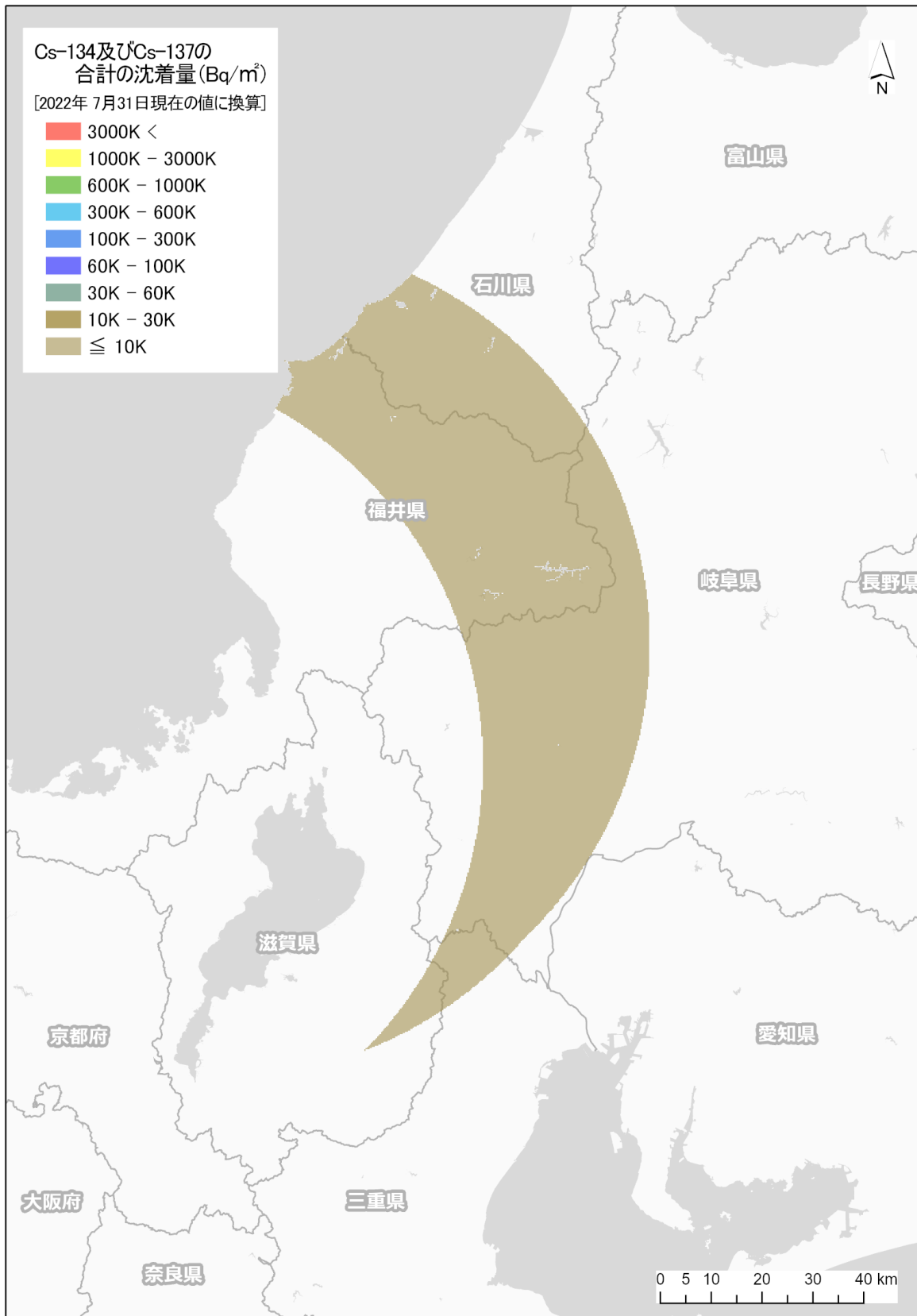


Fig. 4-33 放射性セシウム沈着量マップ (美浜・敦賀)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

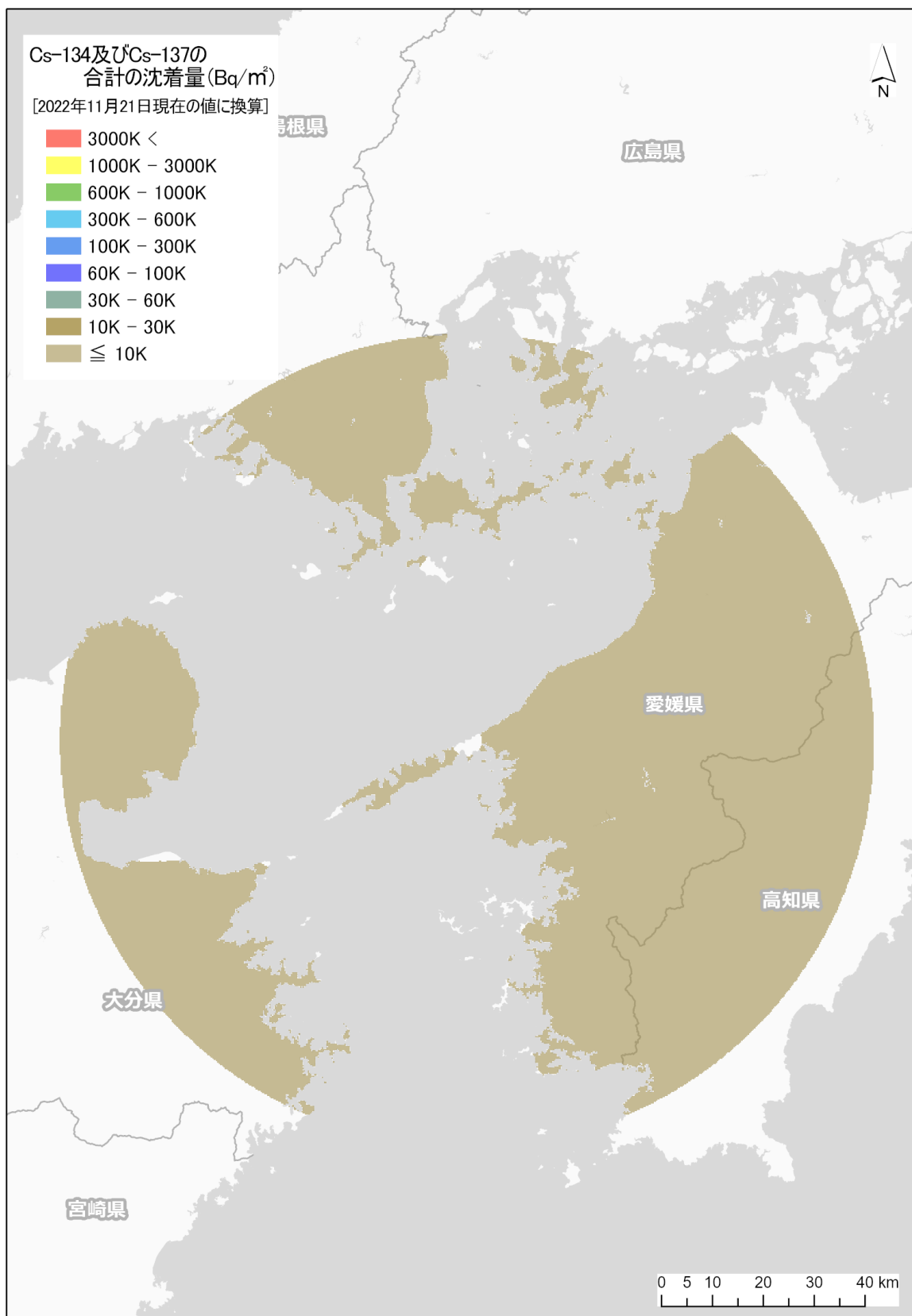


Fig. 4-34 放射性セシウム沈着量マップ (伊方)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

5. 原子力防災訓練における緊急時航空機モニタリング

5.1. 概要

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。緊急時における実効性のある原子力防災対策の基盤整備に貢献するため、原子力機構は内閣府が主導する原子力総合防災訓練等に参画してきた。1章で触れたとおり、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、原子力機構は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を実施してきた（Table 5-1）。平成28年度（2016年度）には、航空機モニタリング訓練として千葉県富津市において航空機モニタリングを実施した。平成29年度には原子力総合防災訓練において玄海を対象サイトとして長崎県壱岐市周辺をモニタリングした。平成30年度には原子力総合防災訓練及び北海道原子力防災訓練において大飯・高浜及び泊を対象サイトとして、滋賀県高島市周辺及び北海道小樽市周辺においてモニタリングを実施した。令和元年度には原子力総合防災訓練において島根を対象サイトとして、鳥取県米子市、西伯郡南部町及び島根県安来市周辺をモニタリングした。なお、令和2年度については、原子力総合防災訓練において、東北電力女川原子力発電所（以下、女川）を対象サイトとして宮城県登米市南部から宮城県松島町周辺にかけてモニタリングする予定であったが、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、当該訓練自体が中止となった。令和3年度については、北海道原子力防災訓練及び原子力総合防災訓練（対象サイト：女川）の2件で緊急時航空機モニタリングの実施要請があった。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。原子力総合防災訓練については防衛省（航空自衛隊）から航空機モニタリングシステムの使用許可が得られており、モニタリングを実施する予定であったものの、当該訓練の実施日の直前に、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実施を見送った。

本章では、令和4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美浜発電所であり、航空自衛隊小牧基地を離発着点として、岐阜県の揖斐郡揖斐川町、滋賀県の米原市、長浜市及び高島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 (モニタリング地域)	使用機体 (所有部隊)	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 (長崎県杵岐市)	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郡 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 (2021年2月11日～12日)	女川 (宮城県登米市から宮城郡 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

5.2. 原子力防災訓練等における航空機モニタリングに係る全体概要

令和4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⁵³⁾を以下に示す。

『福井県嶺南を震源とした地震が発生する。これにより、運転中の美浜発電所3号機は緊急停止する。さらには、原子炉冷却材の漏えいが発生するとともに、設備の故障が重なり、蒸気発生器冷却機能、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東

方向に拡散したと想定し、航空自衛隊小牧基地を離発着点として、琵琶湖上を通過して測線①の東端から進入し、以降は測線②から測線⑦まで順番に飛行するプランとした (Fig. 5-1)。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¹⁾に取付け、11月2日に NEAT から小牧基地へ輸送した。11月4日に小牧基地で航空機モニタリングシステムを受領し、本訓練における使用ヘリコプターである UH-60 (Fig. 5-2) 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の外観を Fig. 5-3 に示す。また同日、航空機モニタリング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 2 機の UH-60 に対して実施し、いずれに対しても問題がないことを確認した。

緊急時航空機モニタリングによって取得したデータを基に作成する空間線量率マップの妥当性の確認に資するため、Fig. 5-1 に黄色丸点で示した 4 地点 (G1~G4) において、3.1.1 項に記した方法に則り、11月5日に地上測定を実施した。ただし、NaI(Tl)検出器には旧日立アロカメディカル製 TCS-171B を用いた。本地上測定を実施した具体的な位置情報及び空間線量率を Table 5-2 に示す。これらの空間線量率と本訓練で作成す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とを比較することとした。

上記したフライトプランに基づき、11月6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。NEAT 航空機モニタリング要員として 3 名が現地対応し、内 2 名が機体に搭乗して 2.5 時間程度モニタリングを行った (Fig. 5-4)。残りの 1 名は地上に待機し、緊急時航空機モニタリング終了後にデータ解析及びマッピングを行った。データ解析には航空機モニタリングデータ専用の解析ソフトウェア「AMS Total System」を用いた。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 年に福島第一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. 5-5 に示す。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、本マップの色分けは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)
- ・ 青色：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、約 15 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。空間線量率分布マップと Table 5-2 に示した地上測定値との比較結果については次節に記す。

Table 5-2 地上測定地点の位置情報及び空間線量率の値

測定地点	緯度	経度	住所	備考	空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
G1	35.512521	136.214867	滋賀県長浜市木之本町黒田	空地	0.05
G2	35.471356	136.290773	滋賀県長浜市谷口町921	公園	0.09
G3	35.427991	135.996800	滋賀県高島市今津町日置前4201	ゴンドラ山麓駅空地	0.06
G4	35.423400	136.266630	滋賀県長浜市宮部町	虎姫運動広場横の空地	0.07

Table 5-3 令和4年度原子力総合防災訓練に係るタイムテーブル (2022年11月6日)

時刻	実施内容
6:50	小牧基地に入域
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	小牧基地を離陸
8:23~10:10	測線①~測線⑦をフライト
10:30	小牧基地に着陸、航空機モニタリングシステムの取り外し
10:45~11:00	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
11:30	小牧基地から航空機モニタリング機材の搬出作業
11:45	小牧基地から退域

Table 5-4 UH-60 に対する換算パラメータの一覧

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

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

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

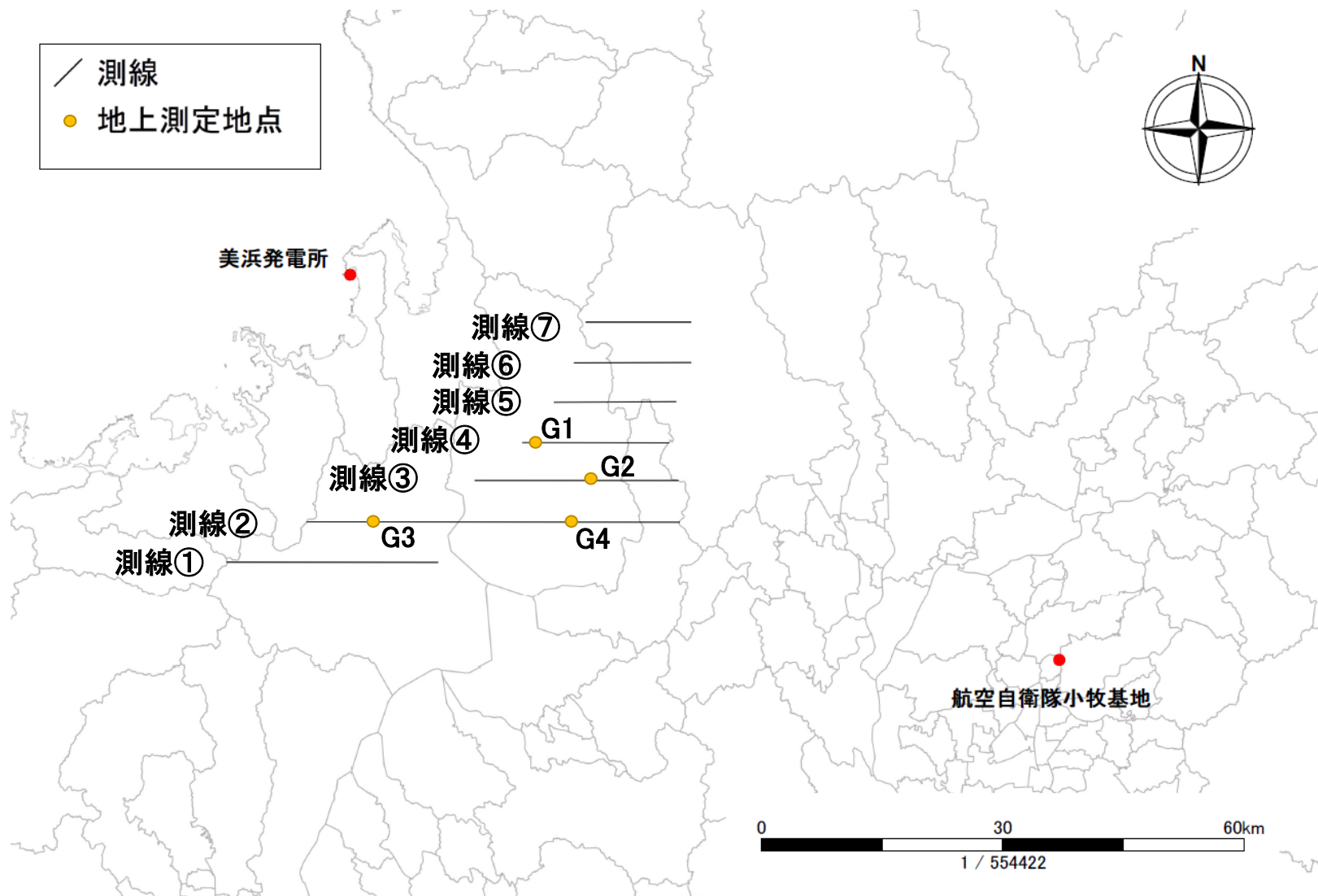


Fig. 5-1 令和4年度原子力総合防災訓練におけるフライトプラン
(背景地図は、地理院タイル白地図(国土地理院⁵⁰⁾)を加工して作成した。)



Fig. 5-2 令和4年度原子力総合防災訓練において使用したヘリコプター (UH-60)



Fig. 5-3 航空機モニタリングシステムの搭載状況



Fig. 5-4 緊急時航空機モニタリング中の様子

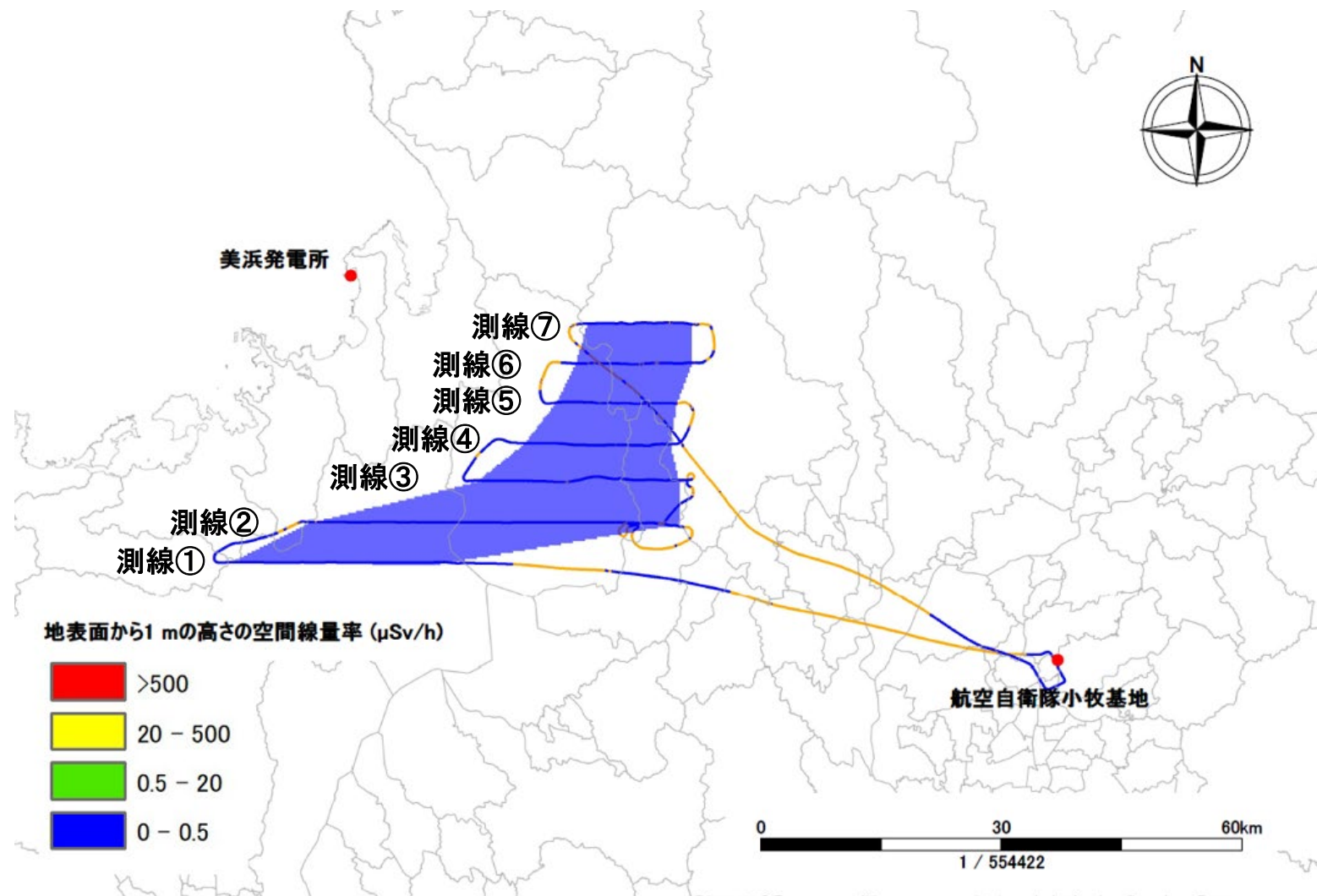


Fig. 5-5 令和4年度原子力総合防災訓練における緊急時航空機モニタリングによる空間線量率分布マップ
(背景地図は、地理院タイル白地図(国土地理院)⁵⁰⁾を加工して作成した。)

(図中の色付き線はUH-60の飛行軌跡であり、対地高度について青色が1,750 ft以下、オレンジ色が1,750 ftを超えたことを意味する。)

5.3. 訓練の総評と課題の抽出

令和4年度原子力総合防災訓練で実施した各作業の総評と抽出した課題を以下にまとめる。

• 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より測定機材等の輸送を実施した。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、原子力機構が航空機モニタリングシステムをヘリコプターの離発着地点まで輸送する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り、小牧基地の隊員からのご協力を得て、概ね30分程度で設置及び動作確認が完了した。より迅速に本作業を完了するために、以下の点について検討を加える必要がある。

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るため、ラックにフィットするスタッドボルトの位置が一見で確定できず、ラックの設置作業がやや難航した。また、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締めを迅速に行うのにやや難があった。よって、UH-60にラックを取り付ける際のスタッドボルトの設置場所を予め特定しておき、ラックの設置手順書として取りまとめておくことで、現地で試行錯誤することなく、設置作業を完了できるよう備えておく必要がある。また、ボル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積み重ねることが重要と考える。また、NEAT航空機モニタリング要員はインチ工具の取り扱いの習熟に努めることが必要である。さらに、リアルタイムデータ通信システム¹³⁾を搭載及び使用する場合、作業時間が増加する可能性が高いため、適宜、各種機材の設置要領を再確認すべきと考える。

• 電磁干渉試験について

本訓練では航空機モニタリングシステムの内、RSIシステム及び高精度GPSシステムのみを使用することとしたため、簡易的な電磁干渉試験のみを実施した。一方、リアルタイムデータ通信システムを使用する場合には、より精密な電磁干渉試験が必須であり、具体的にどのような試験を、どれくらいの時間をかけて行うのかについての情報を収集しておく必要がある。

• 緊急時航空機モニタリングにおけるフライトについて

本訓練では、小牧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。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. 5-6に示す。測線上では基準対地高度である1,000ft付近を概ね維持しながらフライトできており、1,750ftを上回ることはほとんどなかった。一方で、測線②の東端付近で1,750ftを超えた状態で1km以上フライトする場面も見られた。このような状態で取得された測定データは解析に用いるのに望ましくないため、即時、NEAT航空機モニタリング要員から当該箇所を再測定するよう指示を行った。当該箇所は山岳地帯(伊吹山)であり、地形の起伏の変化が激しい場所であったため、対地高度を一定に保持することが困難であったことが窺われる。

• データ解析、空間線量率マッピング及び地上測定値との比較について

AMS Total System により、測定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 15 分程度で完了した。しかしながら、UH-60 に適用すべき換算パラメータの選択を誤ってしまい、本来算出されるべき空間線量率よりも 2.5 倍～3.0 倍程度過大に評価された空間線量率分布マップを作成し、報告してしまう事象が起きた。本事象の再発を防ぐために、空間線量率分布マップを作成する前に、適用される換算パラメータを視認できるような機構を AMS Total System に設けることが必要である。

次に、本訓練で作成した空間線量率分布マップと Table 5-2 に示した地上測定による空間線量率とを比較した結果を Table 5-5 に示す。概して、緊急時航空機モニタリングによる空間線量率の方が 0.02 $\mu\text{Sv/h}$ 以上小さく算出され、特に測定地点 G2 において 0.06 $\mu\text{Sv/h}$ とやや乖離が大きくなった。4.2 節に述べた通り、空間線量率がバックグラウンドレベルの地域においては、航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定による空間線量率とは、概ね 0.03 $\mu\text{Sv/h}$ 前後の誤差が生じる。それに鑑みると、本表に示した差分は決して大きなものではないものの、この差分をなるべく小さくできるよう、換算パラメータの見直しを適宜検討すべきである。前述した通り、UH-60 に適用した数値パラメータは平成 30 年度原子力総合防災訓練及び 2011 年に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で取得したものであり、限られたパラメータセットの中から選定せざるを得ないのが現状である。UH-60 による緊急時航空機モニタリングによって、より正確な空間線量率分布マップを作成するためには、換算パラメータを改めて取得し、その設定について再検討を施すことが必要と考える。

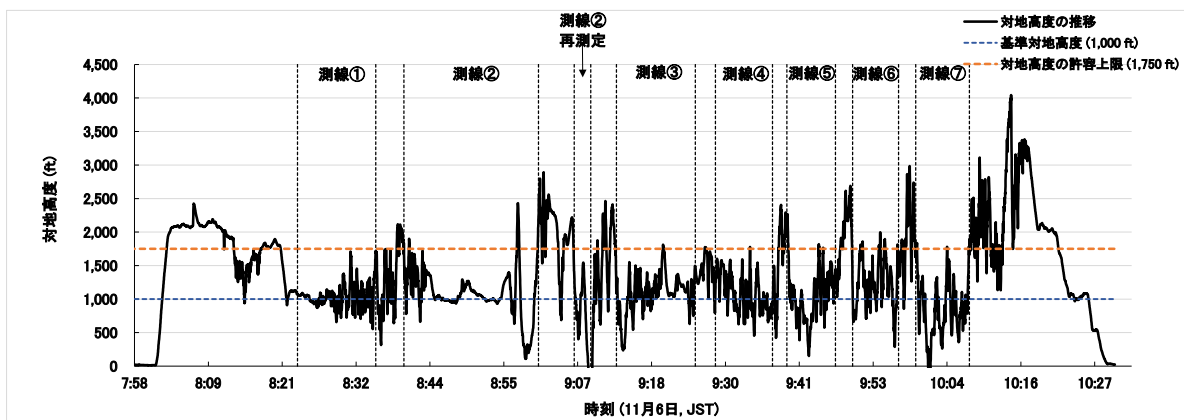


Fig. 5-6 緊急時航空機モニタリング中の対地高度の推移

Table 5-5 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と地上測定による空間線量率の比較

測定地点	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 ($\mu\text{Sv/h}$)	地上測定による空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	空間線量率比 (航空機モニタリング/地上測定)	空間線量率の差分 (航空機モニタリング-地上測定)
G1	0.03	0.05	0.60	-0.02
G2	0.03	0.09	0.33	-0.06
G3	0.04	0.06	0.67	-0.02
G4	0.03	0.07	0.43	-0.04

6. 無人航空機による放射線モニタリングを想定した要素技術試験

6.1. 原子力災害時における無人航空機運用の課題

福島原子力発電所事故後、「原子力災害対策マニュアル²⁰⁾」が改定され、原子力災害時における事故後の対応について大幅な改定が行われた。事故後初期段階における緊急時モニタリングは、オフサイトセンター内に設置される緊急時モニタリングセンターが実施することとなっており、対応のための資材準備等が行われている。OILの区域設定やスクリーニングの重要性分類のための放射線モニタリング(緊急時モニタリング)は、迅速かつタイムリーに行われる必要がある。福島原子力発電所事故後の対応において、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^{25),26)}。また、無人航空機を用いた放射性プルームの計測技術について要素技術開発が行われてきた⁵⁴⁾⁻⁵⁶⁾。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ほか、陸路を用いないため住民の避難との干渉を防ぐことができ、モニタリングポストのような点での測定と比較して面的な放射線分布の評価が可能である等の特長がある。しかしながら、現状として、無人航空機によるモニタリング技術は原子力災害時における緊急時モニタリングにすぐ運用できる状況にはなく、上記の「原子力災害対策マニュアル」の枠組みを考慮し、活用シーンに合わせた要素技術開発が必要である。

原子力施設敷地外に放射性物質が放出された場合、数時間以内にUPZ(Urgent Protective action planning Zone, 原子力施設から概ね5 km~30 km 圏内)のOIL1区域の住民は避難もしくは屋内退避が必要になる。OIL1区域の特定のためモニタリング要員が安全に無人機を運用するためには、少なくともUPZ外からの遠隔操縦が必要になる(Fig. 6-1)。また、時系列な対応課題の抽出も重要である。Fig. 6-2に想定される原子力発電所事故の例と福島原子力発電所周辺で運用されているヤマハ発動機社製の無人ヘリコプターに想定される対応及び理想的な無人航空機システムによる運用の想定を示す。このように、既存の無人航空機システムは、現状データをリアルタイムに地上にリンクするシステムがないこと、上空からの測定では地上における空間線量率への換算に距離補正の処理が必要であることから、測定結果の共有まで時間がかかることが課題として挙げられる。さらに、上空の空气中放射性物質濃度を計測することは初期の内部被ばく線量評価に重要な情報となる。また、フライトの時間が短いこと、長距離通信による運用が難しいことも課題となる。

令和元年度には、原子力災害時における緊急時モニタリングでの運用を想定し、商用化された飛行機型の無人飛行機の中で最も稼働時間の長いUAV-Factory(ラトビア)製のPenguin Cについて、フライト試験を通じた基礎性能試験を実施した。令和2~3年度は、福島ロボットテストフィールドでのフライト試験を通して、Penguin Cの運用のための手順確認や放射線検出器の搭載方法の検討を実施した。令和4年度は、引き続き、福島ロボットテストフィールドでのフライト試験を通してPenguin Cの運用のための慣熟訓練を実施するとともに、原子力災害時における緊急時モニタリングに運用する際に必要となる機能等について検討を行った。

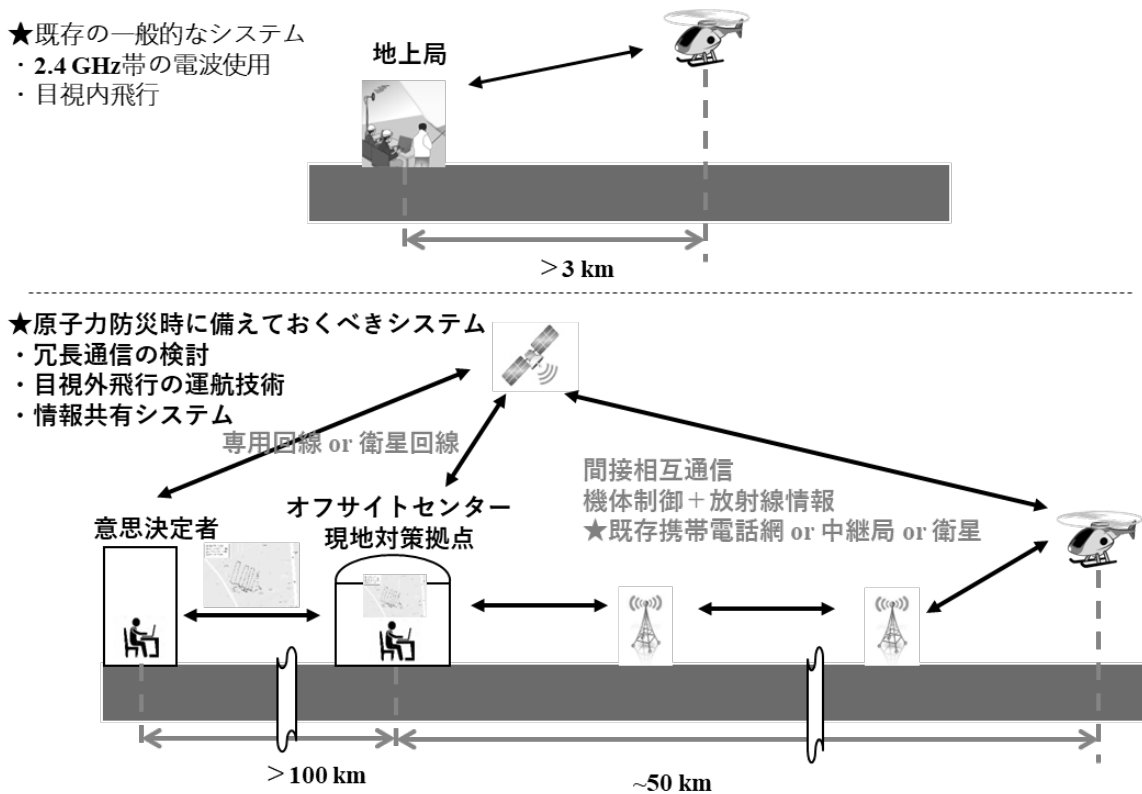


Fig. 6-1 既存の無人機によるシステムと原子力災害時に備えるべき無人航空機システムのイメージ

時間	1日目			2日目			3日目		
	12-18	18-24	0-6	6-12	12-18	18-24	0-6	6-12	12-18
原子力施設事故対応例	▽14:00 地震発生 ▽16:00 施設敷地緊急事態 PAZ避難準備・実施			★敷地外への放射性物質放出の確認 ▽16:00 全面緊急事態 UPZ屋内退避準備・実施					
既存の無人航空機システムによる運用想定	→ 移動・飛行準備 1h → 敷地境界のフライト 1h → データ解析 2h ※リアルタイムのデータ解析不可能			※夜間飛行不可能 (雨天時飛行不可能) ※屋内からの操縦不可能 (目視内飛行) ※UPZ外からの操縦不可能 (操縦範囲2 km ~ 3 km)					
理想的な無人航空機システムによる運用想定	→ 移動・飛行準備 1h 敷地境界のフライト 20 h			★OIL1, 2区域の特定 UPZ内のフライト 20 h			リアルタイムのデータ解析 + 共有		

※PAZ (Precautionary Action Zone, 原子力施設から概ね5 km圏内)

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

Fig. 6-2 原子力発電所事故を例にした対応シミュレーション

6.2. 無人航空機の開発状況

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

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

これらの性能に近い国内外の代表的な無人航空機の例を Table 6-1 に示す。無人航空機の種類は、固定翼機 (飛行機タイプ) と回転翼機 (ヘリコプタータイプ) に分けられる。両タイプの一般的な利点・欠点は以下のとおりである。

・固定翼機

(利点) 燃費が良く航続時間が長い。

(欠点) 離着陸のための滑走路が必要 (カタパルト方式で離陸できる機体もある)。

・回転翼機

(利点) ホバリングできるため、固定点での長時間測定等が可能。

(欠点) 固定翼機に比べると燃費が悪い。

固定翼機としては国内で原子力機構と JAXA が共同開発している UARMS があり、航続時間 6 時間で中継器を用いた 20 km 以遠からのオートパイロットの操縦実績があり、原子力防災への適用機種として有力候補である。本機体は実用機の試験段階で製品化はされていないが、日本のメーカーが開発に一から携わっていることから細かい部分のカスタマイズが可能などに強みがある。回転翼機では、すでに福島原子力発電所事故後の環境放射線モニタリング等に利用されているヤマハ発動機社の Fazer R G2 が挙げられる。航続距離は、固定翼機に及ばないものの、1 時間 30 分のフライトが可能であり、既存のバッテリー駆動のドローンと比べると様々なミッションに適用可能である。また、全国の農薬散布業務に国内で 1,000 台以上が運用されていること、操縦者の免許制度や保守及びメンテナンスの工場が全国に配備されていることなど、実運用面で優位な点が多い。本機はヤマハ発動機社が独自に、10 年以上前から開発を重ねてきたものであり、製品としての完成度が高く福島原子力発電所事故後の環境放射線モニタリングの運用において 100 時間以上のフライトを行っているが、人的ミス以外の事故がなく信頼性が高いことも魅力である。

原子力防災時における緊急時モニタリングに求められる必要性能を最も満たす機種は、UAV Factory の Penguin C である。Penguin C は固定翼機であり、20 時間に渡り航続可能である。また、中東を中心とした国外に数多くの納入実績を持ち、オプションとして衛星通信を使

えることやカタパルト方式の離陸が可能な製品である。

今回、国内外の無人航空機で最も原子力災害時における緊急時モニタリングに適用可能な性能を有すると考えられる Penguin C について、実際に飛行試験などを通じて性能評価を試みるとともに、国内での運用の課題について抽出を行った。

Table 6-1 代表的な無人航空機の概観とスペック

名称	Penguin C	UARMS	Fazer R G2
開発メーカー (国)	UAV Factory Ltd. (ラトビア)	JAEA-JAXA開発中 (日本)	ヤマハ発動機社 (日本)
大きさ	3.3 m (翼長)	4 m (翼長)	4 m (ローター長)
離陸重量 (kg)	22.5	50	81
燃料	ガソリン	混合油	ガソリン
航続時間 (min)	1,320	360	100
巡航速度 (m/s)	22	25	20 (最大速度)
離陸方法	カタパルト+ パラシュート	滑走のみ	-
最大離隔距離 (km)	∞ (衛星通信対応)	5 km (中継器を用いると20km)	∞ (衛星通信対応)
最大積載量 (ペイロード: kg)	5	10	35

6.3. Penguin C のカタログ性能

選定した Penguin C の概観及びカタログ性能について、それぞれ Fig. 6-3 及び Fig. 6-4 に示す。翼長は 3.3 m、機長は 2.3 m の大きさで、専用ケースに収納可能である。燃料として、ガソリンとオイル (UAV Factory 製 2-STROOKE ENGINE OIL) の混合燃料が用いられる。飛行時間はペイロードや気象条件にもよるが、カタログでは 20 時間以上とされている。ペイロードスペースにカメラ等の搭載が可能であり、最大積載重量は 5 kg である。また、機体は防水仕様となっており、5 mm/h 程度の雨天時でも運用可能である。離陸には空圧のカタパルトを使用し、着陸にはパラシュートを利用する。機体制御には専用のソフトウェアを用いており、離発着を含めてマニュアルの操縦は必須ではない。カタログスペック上において、原子力災害時における緊急時モニタリングに適用するにあたって必要となる以下の性能があることを確認した。

- (1) 長時間 (20 時間以上) のフライトが可能であること。

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

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

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

- (3) 離陸のための滑走路を要しないこと。

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

- (4) あらかじめ設定したプログラムにより飛行可能であること。

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

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

Penguin C の通常のフライト及びテストフライト実績はどちらも 1,000 時間を超え、UAV Factory 内で MTBF が評価されている。実際の数値については社外秘となっているが、評価の方法として事故の分類を Table 6-3 のようにし、運用の結果をデータベース化することで評価を行っている。

- (6) 風速 10 m/s 以下でのフライトが可能であること。

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

- (7) 雨天時のフライトが可能であること。

5 mm/h 程度までならば雨天時でもオペレーションは可能とされている。

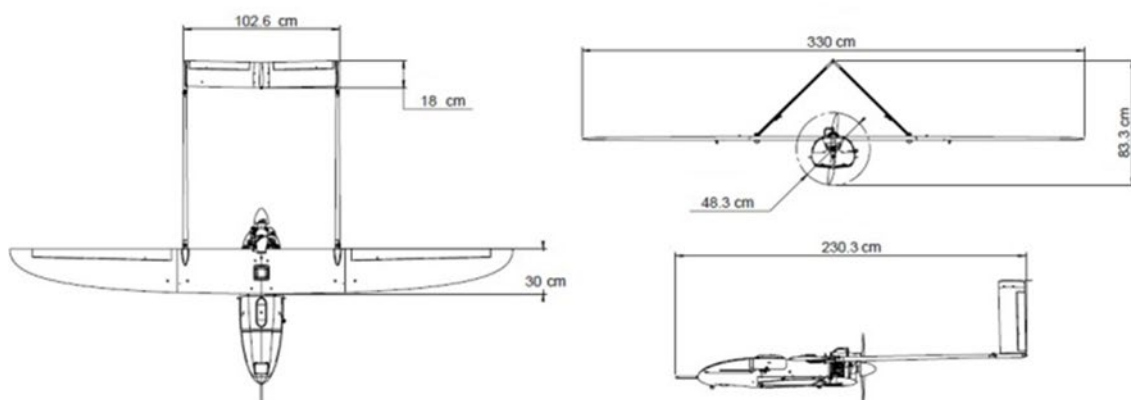


Fig. 6-3 Penguin C の概観

Table 6-2 Penguin C 機体のカタログスペック

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

Table 6-3 UAV Factory における平均故障間隔 (MTBF) 計算時の事故分類

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

6.4. フライト試験概要及び結果

Penguin C を用いた試験について、実施日および各試験内容を Table 6-4 に示す。試験では以下の項目を重点的に評価するために、各種フライト試験を実施した。

- (1) 機体基本性能及び信頼性の確認及び評価
- (2) 夜間フライトに必要となる機能及び運用体制の確認評価
- (3) 無線通信距離の評価

フライト試験は、フライト試験 1 時間を 6 回、夜間想定フライト試験 1 時間を 3 回、フライト試験 6 時間を 1 回、合計 10 回実施した。各フライトの詳細情報を Table 6-5 に示す。なお本試験は、UAV Factory が発行する Penguin C フライトのための免許を有する、株式会社 JDRONE に試験実施を委託した。

フライト試験の工程を Fig. 6-4 に示す。フライト前の機体の健全性確認は Penguin C 用の「機体健全性確認の点検手順書」に従って実施した。この点検手順書はメーカーのマニュアルを基に本事業で作成されたものであり、機材の更新履歴やフライト試験で得られた知見を反映し、常に最新版となるようアップデートしている。健全性確認では点検手順書に従い、カタパルト、トラッキングアンテナ、地上局 (以下、GCS) 及び機体の組み立てとエンジン動作確認までを行い、部品の脱落や摩耗がないか、各機器との通信に異常は見られないかどうかを確認する。点検はフライト実施予定の前週などフライトまでに余裕をもって行った。点検の結果、必要があれば部品の交換を実施し、該当箇所に係る点検工程を再度実施して問題なく作動することを確認し、フライト試験を実施した。なお、フライト直前にもプリフライトチェックにて機体の状態確認は実施するが、プリフライトチェックは機体の詳細な点検等を事前に完了していることを前提とした飛行前の最終確認という位置付けである。

フライト前の事前確認の他に、機体の定期保守点検も実施した。定期保守点検については、Penguin C のメーカーである EDGE AUTONOMY 社が作成している各機器専用マニュアルに点検頻度や内容が記されており、本マニュアルを基にして「定期保守点検手順書」を作成し、保守点検を実施した。定期保守点検手順書の内容は、メーカーのマニュアル更新や、試験経験を踏まえて追加が必要な部分があれば、随時更新を行っている。定期保守点検頻度は、メーカー指定の通り、5 回のフライト毎に 1 回、または対象機体を用いてフライトを行っていない場合には月に 1 回とした。

Table 6-4 試験日及び試験内容一覧

試験日 (2022年)		実施場所	試験内容	フライト No.
7月19日	(火)	福島ロボットテストフィールド (福島県南相馬市)	フライト試験 1時間 1回	2022-1
7月21日	(木)		フライト試験 6時間 1回	2022-2
7月25日	(月)		夜間想定フライト 1時間 1回	2022-3
8月22日	(月)		夜間想定フライト試験 1時間 1回 無線通信距離評価試験	2022-4
8月23日	(火)		夜間想定フライト試験 1時間 1回 無線通信距離評価試験	2022-5
8月24日	(水)		フライト試験 1時間 1回	2022-6
10月11日	(火)		フライト試験 1時間 1回 アンテナデータ取得試験	2022-7
12月12日	(月)		フライト試験 1時間 2回	2022-8 2022-9
12月13日	(火)		フライト試験 1時間 1回	2022-10

Table 6-5 各フライト試験の詳細情報

項目	観測値									
日付	2022/07/19	2022/07/21	2022/07/25	2022/08/22	2022/08/23	2022/08/24	2022/10/11	2022/12/12	2022/12/12	2022/12/13
フライト No.	2022-1	2022-2	2022-3	2022-4	2022-5	2022-6	2022-7	2022-8	2022-9	2022-10
試験場所	RTF*1	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF
天候	雨	晴れ	晴れ	曇り	晴れ	曇り	晴れ	晴れ	晴れ	曇り
外気温 (度)	24	26	26	25	28	25	22	11	9	9
風速/離陸時 (m/s)	1	2.5	1.7	2.2	1.1	3.8	2.5	4	3	1
風速/着陸時 (m/s)	1	2.9	2	2	3	2.9	3	3	2.5	3
風向/離陸時 (°)*2	90	100	60	50	130	43	300	10	0	210
風向/着陸時 (°)*2	100	175	105	50	125	30	250	0	0	220
気圧 (hpa)	1,003	1,007	1,012	1,010	1,006	1,008	1,012	1,024	1,022	1,012
離陸時間	11:45	10:27	10:41	12:55	10:34	10:50	11:13	11:14	13:55	11:11
着陸時間	12:55	16:28	11:49	14:00	11:41	11:56	12:18	12:39	15:21	12:17
飛行時間	1時間 10分	6時間 01分	1時間 08分	1時間 05分	1時間 07分	1時間 06分	1時間 05分	1時間 25分	1時間 26分	1時間 06分
機体番号	PNC0056	PNC0094	PNC0094	PNC0094	PNC0094	PNC0094	PNC0056	PNC0056	PNC0094	PNC0056
エンジン番号	EFI-1	1044	1044	1044	1044	1044	EFI-1	EFI-1	1044	EFI-1
ペイロード	放射線 検出器	カメラ	カメラ	カメラ	カメラ	カメラ	放射線 検出器	放射線 検出器	カメラ	放射線 検出器
離陸時重量 (kg)	20.08	20.78	19.78	19.6	19.62	19.62	19.84	19.89	19.59	19.89
搭載燃料 (kg)	2.04	3.04	2.04	2.00	2.02	2.02	2.04	2.00	2.00	2.00
消費燃料 (kg)	0.46	1.68	0.38	0.42	0.4	0.36	0.36	0.56	0.5	0.46

*1 RTF : 福島ロボットテストフィールド (福島県南相馬市)

*2 北を 0°、東を 90° とする。



Fig. 6-4 フライト試験の工程

6.4.1. 機体の基本性能及び信頼性の確認及び評価

Penguin C 機体の基本性能及び信頼性の確認を行うため、計 10 回のフライト試験を行い、フライト中の飛行位置、機体姿勢、エンジン、機体システム等の情報を記録した。フライトデータの記録情報の一例 (2022 年 7 月 19 日の試験結果) について、飛行軌跡を Fig. 6-5 に、フライト中に取得した一連のデータログを Fig. 6-6 に示す。

フライト試験の結果、どの試験においてもフライト中の機体の動作異常やシステム異常等は見られなかった。ただし、機体の離陸に使用するカタパルトの部品交換や機体の部品交換及び修理を途中、何度か行った。Table 6-6 に今年度に交換及び修理した部品一覧を示す。Penguin C の部品はラトビアからの輸入となるため、部品の調達には数か月を要する場合もあった。Penguin C を運用する際には、各予備パーツをあらかじめ保持しておくことで、スムーズな運用が可能となる。

Table 6-6 10 回のフライト試験において修理交換した部品一覧

対応日	対応	部品名前
2022/06/16	交換	PNC0056 パラシュートサーボ 1 式
2022/07/05	交換	PNC0056 アビオニクス 1 式
2022/07/12	交換	PNC0094 プロペラ 1 枚
2022/07/19	交換	ピトー管 1 本
2022/07/20	修理	パイロットシュート
2022/07/22	交換	センターウィング ワッシャー 2 枚
2022/07/25	交換	カタパルト A1 ジョイント部 O リング 1 個 カタパルト 連結部ネジ 1 本
2022/09/16	交換	カタパルト ダンパー 2 個
2022/11/01	交換	カタパルト キャリッジ用パーツ 1 式
	修理	センターウィング 1 式
2022/12/13	交換	センターウィング 1 式 左テールウィング 1 式 テールブーム 1 式
	修理	エアバッグ
2022/12/14	修理	PNC0056 ダクトテープ
		PNC0094 ダクトテープ

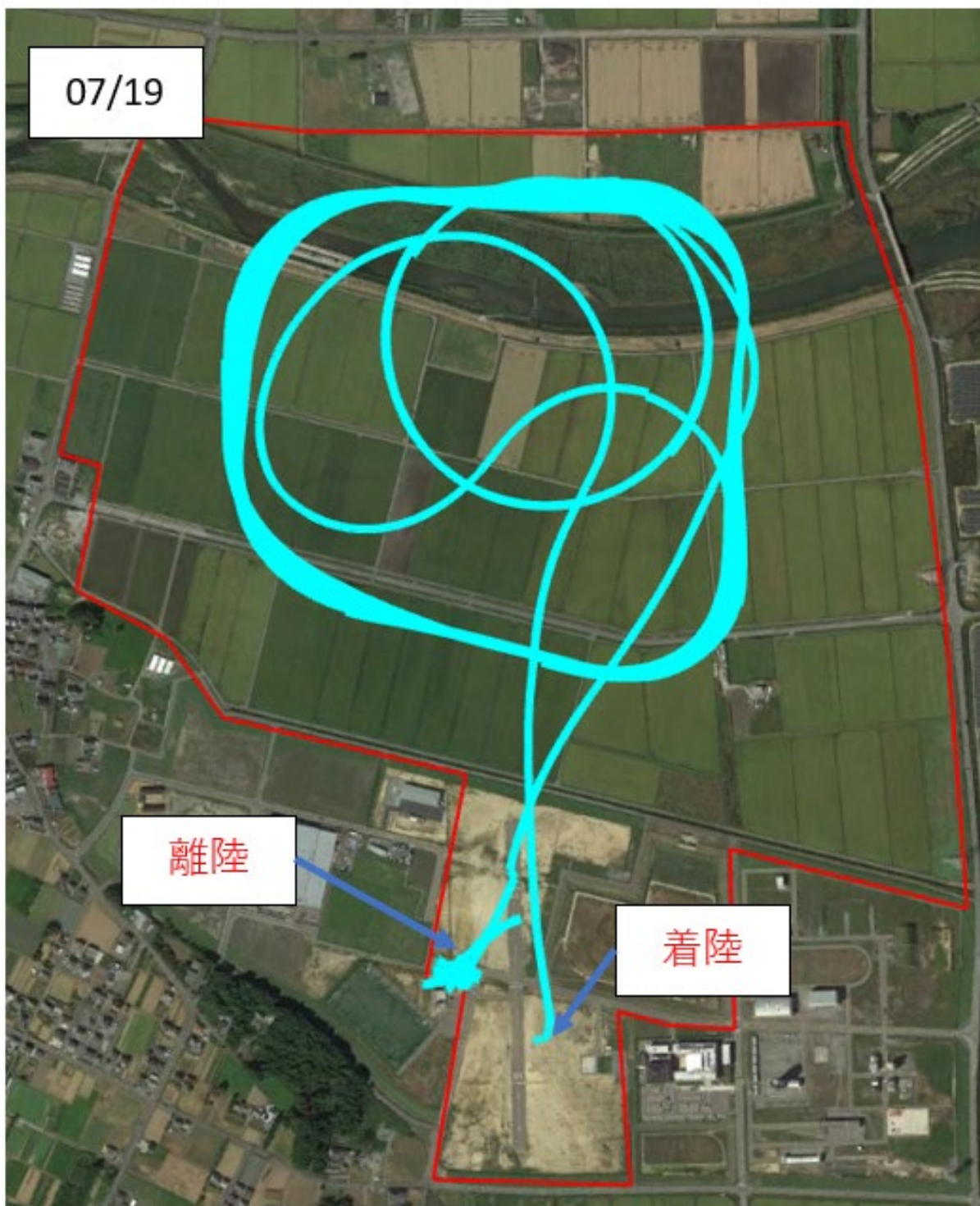
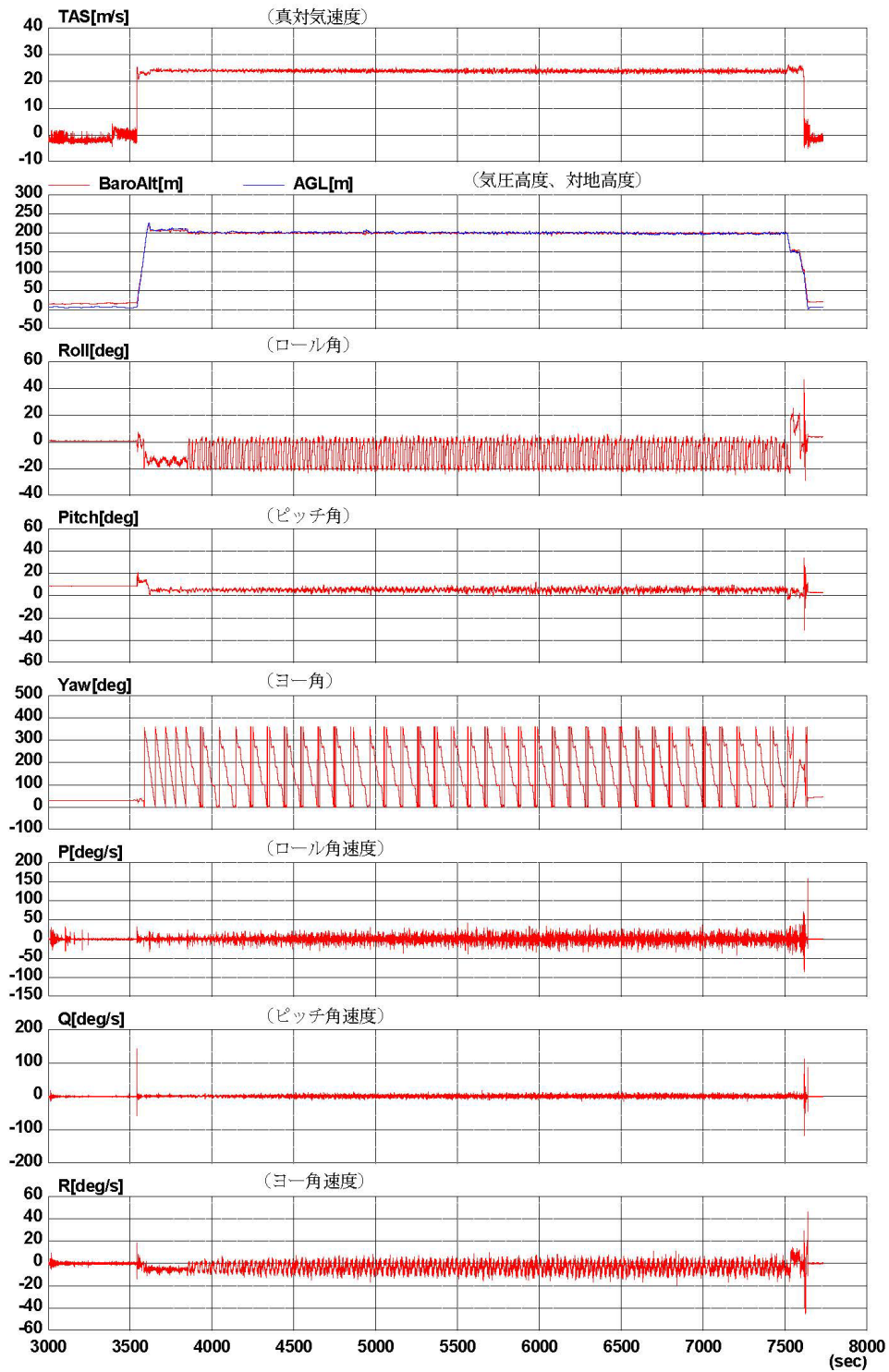


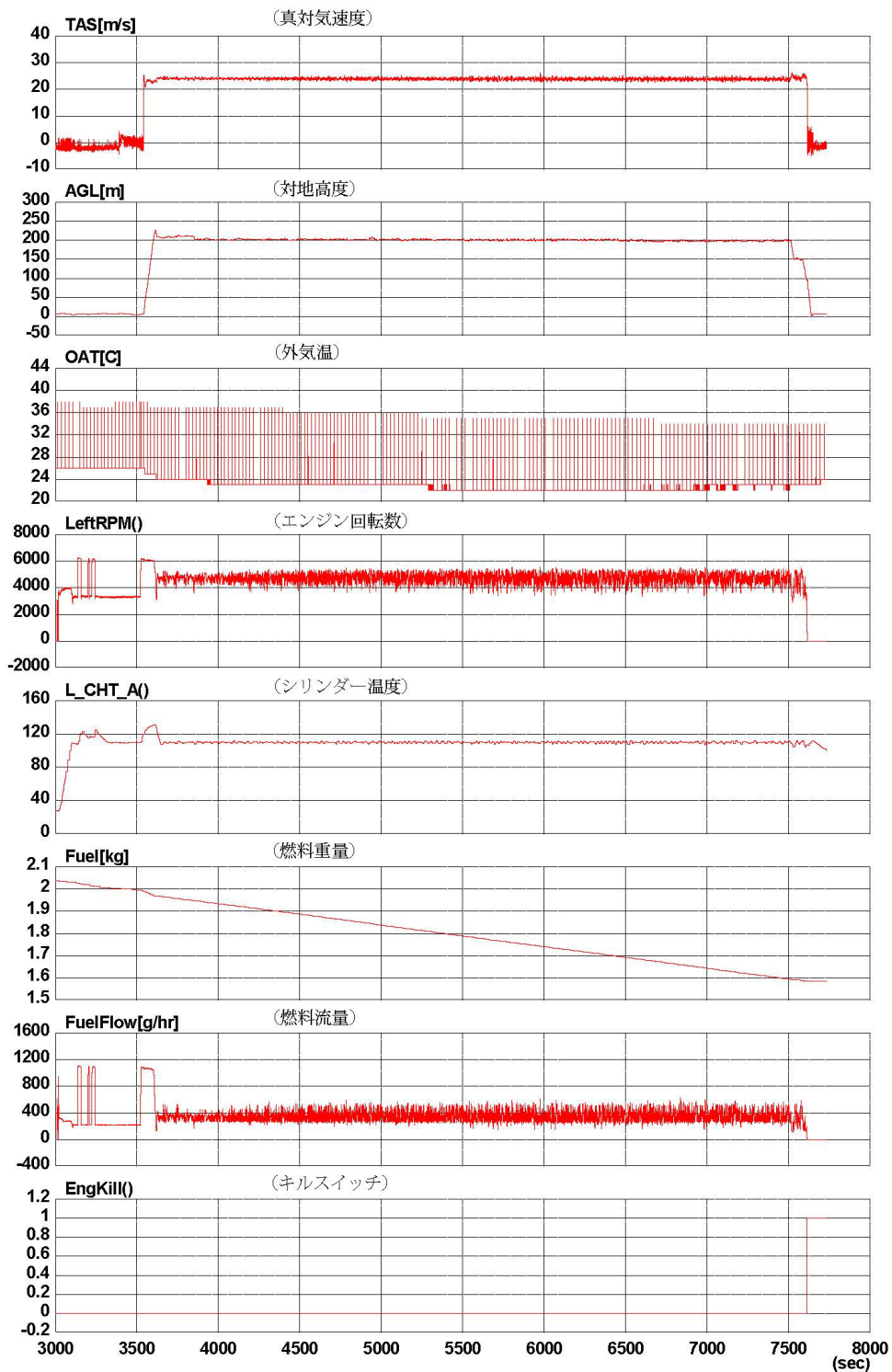
Fig. 6-5 Penguin C のフライト軌跡 (2022年7月19日)
(赤線で示した枠内は立入制限監視区域である。)



[Piccolo 8249 Tue Jul 19 10:37:08 2022pd.dhs] Start: 00:50:00 End: 02:08:51 [2023/01/31 10:26:00]

Fig. 6-6 Penguin C のフライト試験時の飛行ログ(2022年7月19日)

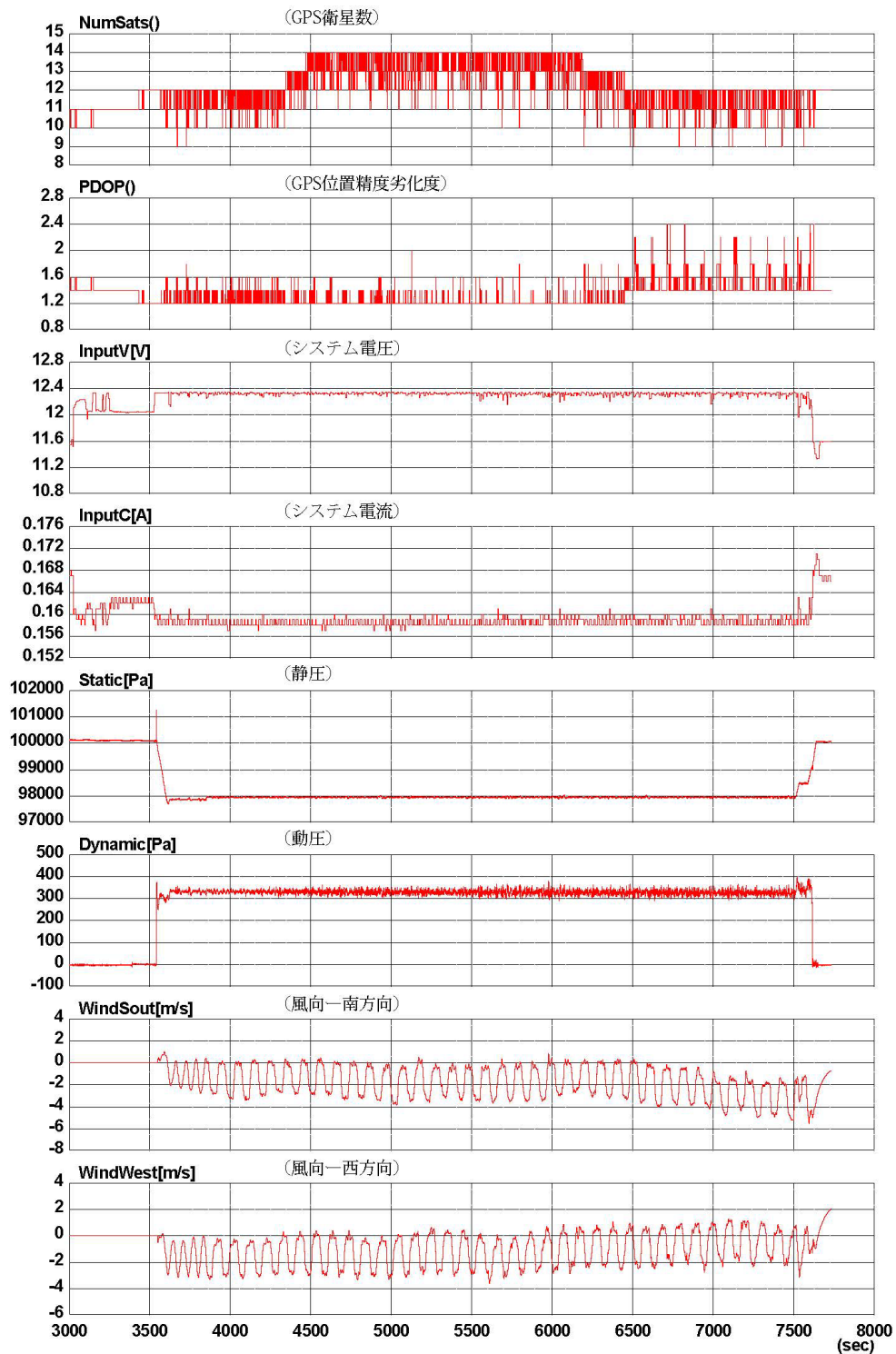
(1/4)



[Piccolo 8249 Tue Jul 19 10:37:08 2022pd.dhs] Start: 00:50:00 End: 02:08:51 [2023/01/31 10:26:21]

Fig. 6 6 Penguin C のフライト試験時の飛行ログ (2022年7月19日)

(2/4)



[2023/01/31 10:26:40]

Start: 00:50:00 End: 02:08:51

[Piccolo 8249 Tue Jul 19 10:37:08 2022pd.dh#]

Fig. 6 6 Penguin C のフライト試験時の飛行ログ (2022年7月19日)

(3/4)

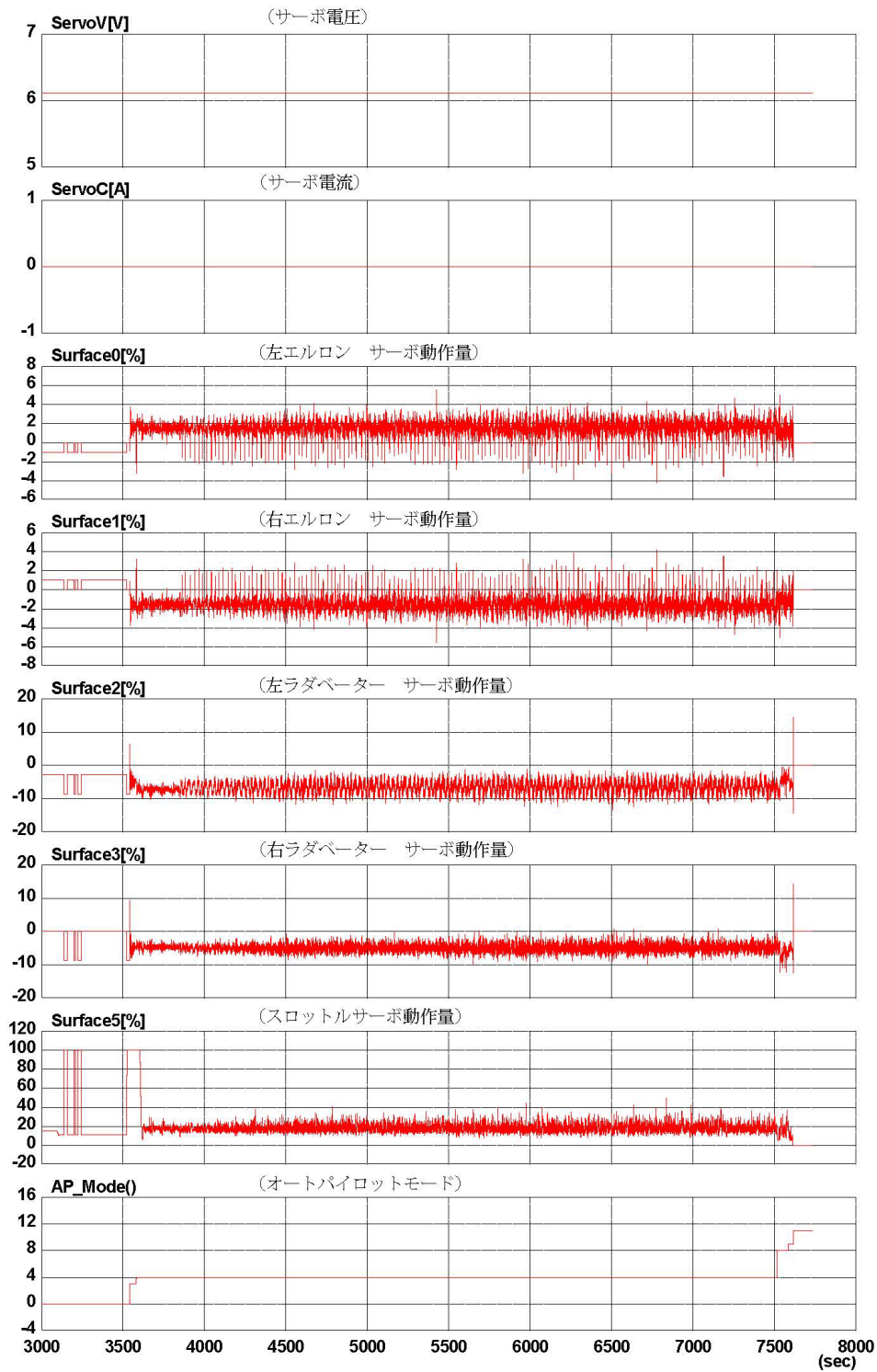


Fig. 6 6 Penguin C のフライト試験時の飛行ログ (2022年7月19日)

(4/4)

6.4.2. 夜間フライトに必要となる機能及び運用体制の確認評価

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

航空法	
第九章 無人航空機 (飛行の方法) 第百三十二条の八十六 無人航空機を飛行させる者は、次に掲げる方法によりこれを飛行させなければならない。 (略) 2 無人航空機を飛行させる者は、技能証明を受けた者が機体認証を受けた無人航空機を飛行させる場合(立入管理措置を講ずることなく無人航空機を飛行させるときは、一等無人航空機操縦士の技能証明を受けた者が第一種機体認証を受けた無人航空機を飛行させる場合に限る。)を除き、次に掲げる方法により、これを飛行させなければならない。 一 日出から日没までの間において飛行させること。 (略) 5 前三項の規定は、次の各号のいずれかに該当する場合には、適用しない。 (略) 二 前号に掲げるもののほか、国土交通省令で定めるところにより、あらかじめ、第二項各号に掲げる方法のいずれかによらずに無人航空機を飛行させることが航空機の航行の安全並びに地上及び水上の人及び物件の安全を損なうおそれがないことについて国土交通大臣の承認を受けて、その承認を受けたところに従い、これを飛行させる場合	(以下、略)

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

無人航空機飛行マニュアル

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

場所を特定した申請について適用 国土交通省航空局標準マニュアル①

令和4年12月5日版

3-7 夜間飛行を行う際の体制

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

夜間の離発着場所において車のヘッドライトや撮影用照明機材等で機体離発着場所に十分な照明を確保する。

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

夜間フライト想定試験では、灯火機能として LED ライトを機体の両翼裏面に装着させ、フライト時における地上からのライト視認性確認を行った。LED ライトは航空機と同様に、左翼に赤いライト、右翼に緑のライトとした。Fig. 6-7 に試験時の機体の様子を示す。試験を行った結果、日中の明るい中、対地高度 300 m で飛行している最中でも LED の発光及び機体の向きを視認できた。よって LED ライトを両翼裏面に装着させることで、夜間飛行時に必要となる視認性は確保できると考えられる。

また、夜間でも周囲の状況を確認できる暗視カメラ (Epsilon140: UAV Factory Ltd. Europe) を機体に搭載した場合においてもフライト試験を実施した。Fig. 6-8 は暗視カメラで日中に撮影した赤外線 (IR) 画像である。夜間フライト時は、暗視カメラを搭載することで、フライトの安全性をさらに向上させることができると考えられる。

運用体制については、操縦者の夜間飛行に対する技能向上、また夜間における周囲監視の方法や、機体特性の再確認が必要である。2023年2月の現時点において、日本での Penguin C による夜間フライトの実績はなく、「航空局標準マニュアル」に則った夜間フライトの運用体制は整えられていない。今後、海外や国内のテストフィールド等において、夜間フライトの経験を積むことで、運用体制を整えられることができると考えられる。

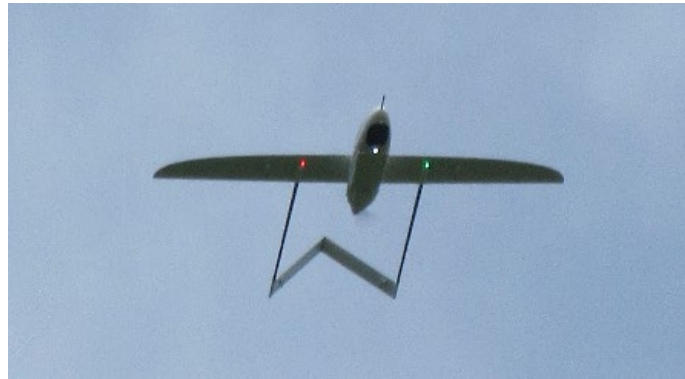


Fig. 6-7 LED ライトを装着した状態で行ったフライト時の様子



Fig. 6-8 日中に撮影したフライト時の IR カメラ画像

6.4.3. 無線通信距離の評価

現在の Penguin C の無線通信システムの最大通信距離は 1 km 程度であるが、通信距離はアンテナ周辺の地形や設置状況により変化する。アンテナの設置状況で通信電波強度がどのように変化するのかが確認するために、福島ロボットテストフィールド (RTF) においてアンテナ設置高さを変えてフライト試験を行った。GCS において、機体と通信するアンテナを地面に設置した場合と、RTF 内にある建物の 2 階に設置した場合の 2 つの高さで飛行試験を行った。地上からアンテナの先端までの高さはそれぞれ、2.9 m、9.2 m である。機体の飛行エリアは RTF とし、半径 250 m 円を反時計回りに、対地高度 150 m、200 m、250 m の 3 パターンで各 5 分間、通信電波強度のデータを取得した。飛行場所、アンテナ設置場所を Fig. 6-9 に示す。またアンテナの設置状況を Fig. 6-10 に示す。

Table 6-7 と Table 6-8 にそれぞれの通信試験の結果得られた、GCS と機体間の無線通信の電波強度の値を示す。地上から機体への通信強度を意味する Ground Link (地上→機体) は両者ともに差は見られなかったが、機体から地上への通信強度を意味する Air Link (機体→地上) は、アンテナを 9.2 m に設置した場合の方が、電波強度が大きくなった。Ground Link (地上→機体) の電波強度が変化しなかった理由としては、アンテナを地面に設置した時の地面からの高さ、施設 2 階に設置した時の床面からの高さと同じであることが原因であると考えられる。高所作業車等でアンテナを地面から離すことで、Ground Link (地上→機体) の通信強度を増強できる可能性がある。

Penguin C のアンテナにはオムニダイレクショナルアンテナ (無指向性アンテナ) とダイレクショナルアンテナ (指向性高利得アンテナ) が取り付けられており、GCS 側のアンテナと Penguin C 側のアンテナの距離に応じて自動的に切り替わる仕組みになっている。現在オムニアンテナとダイレクショナルアンテナの出力は 0.56 W であり、近距離で使用する場合はオムニアンテナ、長距離で使用する場合はダイレクショナルアンテナが対応する。本試験はオムニアンテナを用いており、その最大通信距離は約 1 km である。ダイレクショナルアンテナを使用することで、さらに通信距離を延ばすことができるが、現状、ダイレクショナルアンテナの使用は、電波法に基づいた総務省の使用許可を得ることができていないため、使用することができない。オムニアンテナを用いて長距離通信を行おうとする場合、Penguin C 機体側及び GCS 側のアンテナにアンプを搭載し、電波の出力を上げて通信距離を延ばすことが一案として挙げられる。しかしながら、現在使用している無線通信は、2.4 GHz 帯の電波を使用しており、電波の出力を上げると一般で使用されている Wi-Fi などの通信に悪影響を及ぼすため、現状として電波の高出力使用許可を総務省から得るのは困難であると思われる。また、長距離通信を行う場合、電波出力だけでなく、地球の丸みを考慮する必要があり、電波の直線通信距離とフレネルゾーンを満たすために、機体の高度とアンテナの高さを上げる必要がある (Fig. 6-11～Fig. 6-13)。フレネルゾーンとは、無線通信などで電力損失をすることなく電波が到達するために必要となる領域のことである。この領域内に障害物があると電波強度が確保できなくなる。Fig. 6-12 及び Fig. 6-13 はフレネルゾーンを考慮し、通信距離に伴い必要となる機体高度補正値を算出した結果である。現在使用しているアンテナを地上 3 m 地点に設置した場合、

30 km 先を飛行させるためには、機体の高度を約 300 m～400 m にする必要がある。

以上のことより、アンテナ設置高度を上げ、高出力電波の無線通信機を使用することで長距離通信が可能となるが、現在の通信システム (2.4 GHz 帯の電波通信) を高出力にして運用することは、現状の日本では難しいという課題がある。今後、現無線システムだけではなく、衛星通信や LTE 通信等の様々な無線通信を用いた試験を通して、最適な通信システムを構築する必要があると考えられる。



Fig. 6-9 通信試験アンテナ設置場所



Fig. 6-10 通信試験アンテナ設置状況

Table 6-7 アンテナ高が 2.9 m の結果

高度 [m]	平均電波切断秒数 [sec]	Ground Link Rssi [dBm]			Air Link Rssi [dBm]		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均
150	1.8	-71	-95	-77	-72	-88	-80
200	3	-70	-93	-77	-72	-85	-78
250	4.4	-70	-95	-76	-71	-84	-78
300	4.75	-71	-93	-77	-72	-86	-78

Table 6-8 アンテナ高が 9.2 m の結果

高度 [m]	平均電波切断秒数 [sec]	Ground Link [dBm]			Air Link Rssi [dBm]		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均
150	2.75	-71	-92	-78	-69	-86	-76
200	2.25	-71	-92	-78	-68	-86	-76
250	1.75	-71	-93	-77	-69	-88	-75

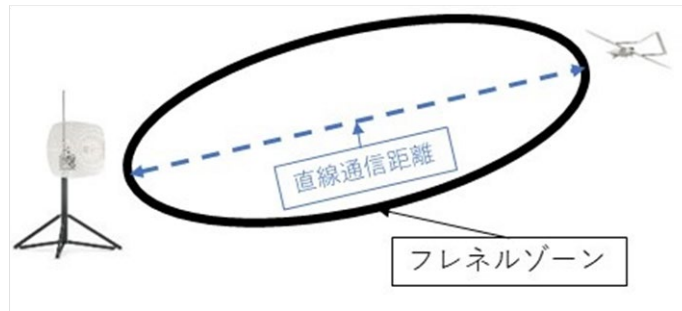
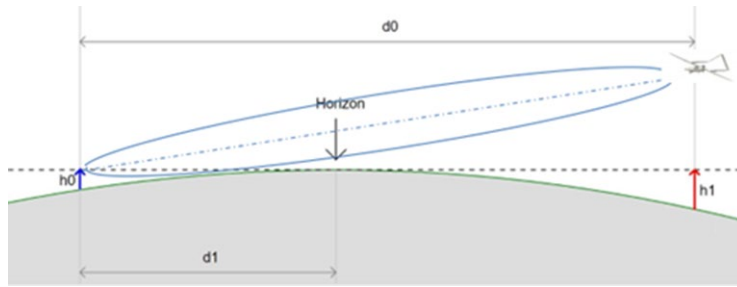


Fig. 6-11 直線通信距離とフレネルゾーンについて

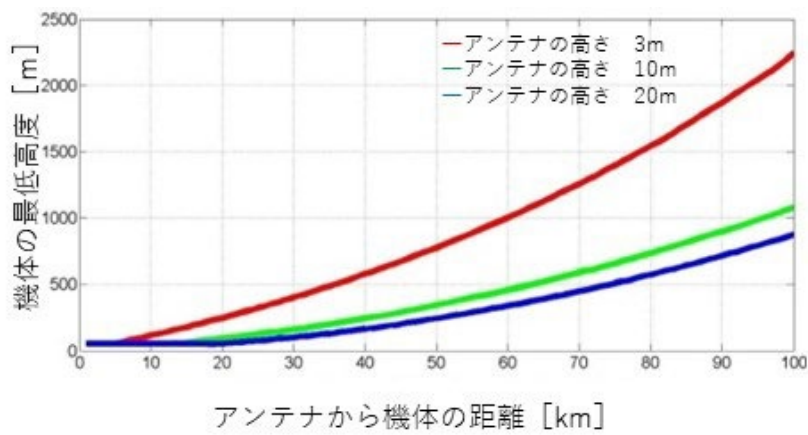


Fig. 6-12 フレネルゾーンを 100 %確保するための高さ相関

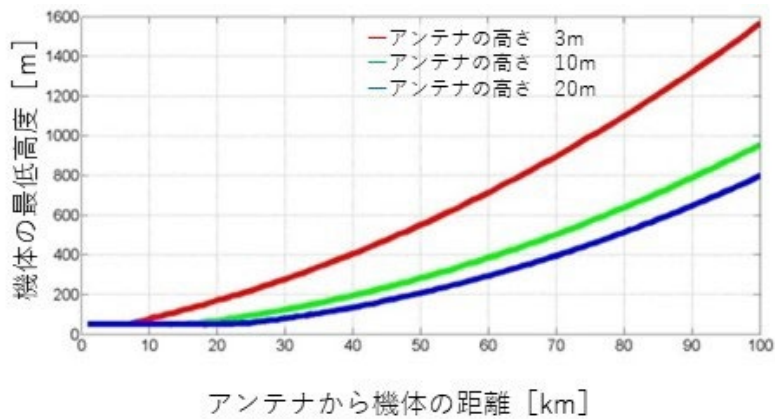


Fig. 6-13 フレネルゾーンを 80 %確保するための高さ相関図

6.5.原子力災害時に想定される無人航空機放射線モニタリング対応について

各種試験の結果と Penguin C の性能を踏まえ、原子力災害時における緊急時モニタリングを実施するために必要となる下記の項目について、同機が対応可能であるか評価した結果を以下に示す。(1)～(7)については6.3節に示した項目と同一で、Penguin C機体が有する性能について評価したものであり、(8)～(13)についてはPenguin Cを原子力災害時における緊急時モニタリングのツールとして運用するにあたり具備すべき条件を独自に追加し、評価したものである。

(1) 長時間(20時間以上)のフライトが可能であること

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

今年度のフライト試験 No.2022-02において、6時間フライトを実施した際の燃料消費率は0.28 kg/hであった。5.6 kgの燃料を搭載した場合、約20時間の連続フライトが可能である。

(2) 放射線検出器を搭載するため5 kg程度のペイロードが確保されること

Penguin Cの最大離陸重量は23 kgであり、機体自体の重さは15.64 kgである。よって搭載可能な重量は、燃料と搭載機器合わせて、7.64 kgである。燃料搭載量を2 kgとした場合に5 kg程度のペイロード搭載が可能である。

(3) 離陸のための滑走路を要しないこと

Penguin Cの離陸には可搬型空気圧式カタパルトを使用するため、滑走路は必要としない。ただし、アンカーペグによりカタパルトを地面に固定できる場所が必要となる。また、カタパルトからの離陸方向に障害物がないこと、Fig. 6-14に示した緑の方向からの風向きである必要がある。なお風速0 m/sの場合は、離陸方向にある障害物との距離を200 m以上確保することができれば、方向に制限はない。

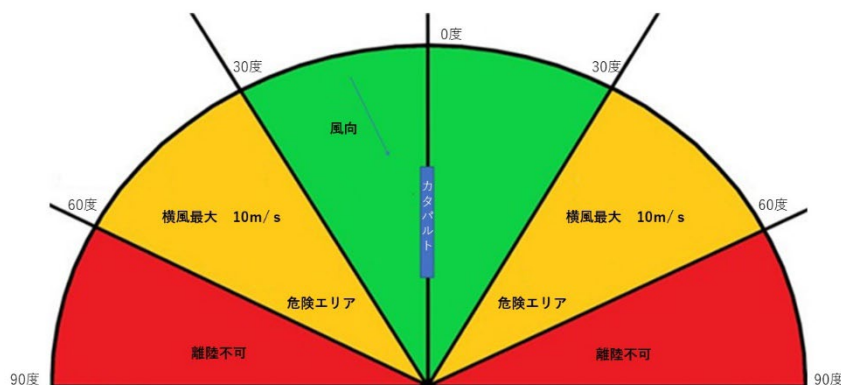


Fig. 6-14 カタパルトに対する打ち上げ時の風向

(4) あらかじめ設定したプログラムにより飛行可能であること

Penguin C を制御する地上管制ソフトウェア PCC を使用し、フライトプラン作成することで、あらかじめ設定したフライトルートのプログラム飛行が可能である。

ただし飛行高度に対して対地高度が最低高度を下回らないことと、最高高度を超えないことを事前に確認する必要がある。本事業のフライト試験結果より、機体は飛行中に目標高度から最大 10 m 程度上下することが分かった。よって、最低及び最高高度から 10 m 以上余裕を持たせて飛行経路や高度を設定する必要がある。なお、100 m 以下の高度になると、機体のパラシュートが開く設定となっているため、100 m 以下のフライト運用はできない。

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

メーカー公表値で Penguin C のテストフライト実績は 9,000 時間を超え、様々な環境下におけるフライト試験を通じて、機体の耐久性及び堅牢性が実証されている。実際に、本事業において無人飛行機の運用技術開発に着手してから今年度に至るまでの 3 年間で、延べ約 60 時間のフライト試験を行ったが墜落事故及び墜落事故に至るような機器異常は見られていない。また、MTBF については、メーカー内にて一定の基準を設け、各事象に対する評価が行われている。実際の数値については公表されていないが、事故分類基準については Table 6-3 に示した。

(6) 風速 10 m/s 以下でのフライトが可能であること

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

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

(7) 雨天時のフライトが可能であること

Penguin C のカタログスペック上、5 mm/h 程度の雨量までフライト可能である。雨や霧等湿度の高い環境における機体の耐久性を高めるため、機体には静圧ポートを覆うプロテクターが導入されている。今年度の No.2022-01 のフライト試験が雨天 (約 1 mm/h) であったが、問題なくフライトを行っている。

(8) 事故発生から 1 時間以内に離陸が可能であること

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

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

フライト中、機体と GCS は常時相互通信可能な状態にある。GCS では、PCC を通じて機体位置情報を、CoPilot を通じてエンジン等のステータス情報をリアルタイムに確認することができる。また、ペイロードとしてカメラを搭載した場合には、上空

でカメラが撮影している映像も同時に GCS にて受信及び確認が可能である。

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

現状、Penguin C の無線通信システムの最大通信距離は約 1 km であり、UPZ の外側からのデータ通信は難しい。

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

その他の通信方法として、衛星通信があるが、UAV で使用されている衛星通信機材は小型のもの (例えば、株式会社日本デジコム製 AVIATOR UAV200) でも重量が約 1.5 kg あり、サイズは 24 cm×16 cm×6 cm 程度である。よって Penguin C への搭載は難しく、通信機を搭載できたとしても、放射線モニタリングに必要な機材等を搭載するスペースが非常に小さくなるという課題がある。またその他の無線通信機として、近年、ドローン用の SIM を用いることで、上空での LTE 利用が可能となっている。しかし LTE 通信は山間部等の電波がないところでは運用ができないという課題があり、また高高度 (80 m~100 m 以上) では LET の電波を受信できないという事例も報告されている。合わせて衛星通信や LTE による通信システムは、Penguin C で対応していないため、適用する場合はメーカーに改造発注をしなければならない。

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

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

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

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

機体前方のペイロードベイにはユーザーの用途に応じたペイロードを搭載すること

ができ、本試験ではメーカー推奨の Octopus ISR Systems 製 UAV 用カメラ Epsilon を搭載したフライトを行っている。同機はカラーカメラと赤外線カメラを備えており、夜間のフライトにおいても赤外線カメラを利用した対象物の確認等が可能である。ただし、同機材を機体に搭載すると、放射線モニタリングに必要となる機器が搭載できなくなる課題がある。放射線モニタリングに必要となる機材と暗視カメラを併用する場合、両者を一体化させる必要がある。

(12) 国内での規定基準類に準拠していること

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

① 電波法

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

Penguin C については、地上局と機体の通信に UAV IP Data link を使用している。同器は Microhard Systems Inc. 製 pMDDL2450 無線モデムを利用しており、同モデムが技術基準適合証明を受けている。また、無線局について、同モデムの仕様 (Table 6-9) は Table 6-10 のとおり携帯局に該当する。GCS 及び機体各々に無線局免許状を申請し、免許を付与されている。

Table 6-9 UAV IP Data Link 仕様

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

Table 6-10 ドローン等での使用が想定される主な無線通信システム

分類	無線局 免許	周波数帯	送信 出力	利用形態	備考	無線従事 者資格
免許及び 登録を要 しない無 線局	不要	73 MHz 帯 等	※1	操縦用	ラジコン 用微弱無 線局	不要
	不要※2	920 MHz 帯	20mW	操縦用	920MHz 帯テレメ ータ用、 テレコン トロール 用特定小 電力無線 局	
		2.4 GHz 帯	10mW /MHz ※3	操縦用 画像伝送用 データ伝送用	2.4GHz 帯 小電力デ ータ通信 システム	
携帯局	要※4	169 MHz 帯	10 mW※5	操縦用 画像伝送用 データ伝送用	無人移動 体画像伝 送システ ム	第三級陸 上特殊無 線技士以 上の資格
		2.4 GHz 帯	1 W	操縦用 画像伝送用 データ伝送用		
		5.7 GHz 帯	1 W	操縦用 画像伝送用 データ伝送用		

*太文字：Penguin C 該当箇所

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

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

※3：変調方式や占有周波数帯幅によって出力の上限は異なる。

※4：運用に際しては、運用調整を行うこと。

※5：地上から電波発射を行う無線局の場合は最大 1 W。

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

② 高圧ガス保安法

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

高圧ガス保安法 第三条（適用除外） 八 その他災害の発生のおそれがない高圧ガスであつて、政令で定めるもの
--

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

高圧ガス保安法施行令 （適用除外） 第二条 3 法第三条第一項第八号の政令で定める高圧ガスは、次のとおりとする。 一 圧縮装置（空気分離装置に用いられているものを除く。次号において同じ。）内における圧縮空気であつて、温度三十五度において圧力（ゲージ圧力をいう。以下同じ。）五メガパスカル以下のもの
--

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

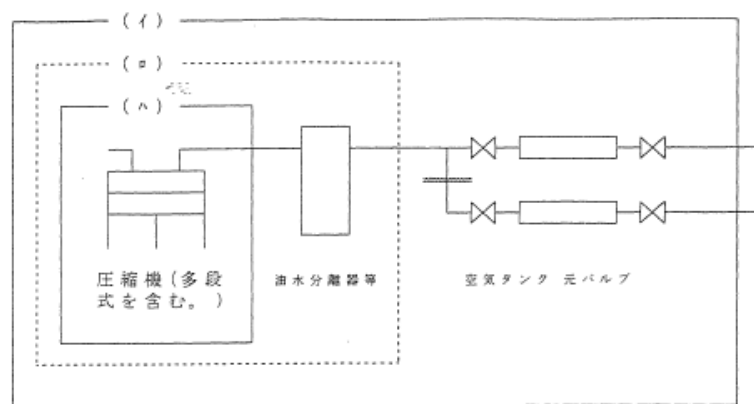
高圧ガス保安法及び関係政省令等の運用及び解釈について（内規）

20200715保局第1号

II.政令関係

第2条関係（適用除外）

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



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

①法の適用を受ける場合

容器等への充填行為等高圧ガスの製造をするとき

（略）

②法の適用を受けない場合

気密試験用等消費をするとき

本機器のカタパルトはエアータンク、コンプレッサー、バルブが一体として管理されている装置である。また、エアータンクから放出された圧縮空気は大気中に放たれて消費される。以上のことから、高圧ガス保安法及び関係政省令等の運用及び解釈について（内規）からも法の適用を受けない場合に該当する。

(13) 少人数 (2～3名) での運用が可能であること

Penguin C は離陸地点までの機器一式 (機体、アンテナ、GCS 及びカタパルトを指す) の運搬、機器組立、離陸、ミッションフライト並びに着陸までの一連の作業を最少数 2 名で遂行することが可能である。しかしながら、災害時の迅速な対応を最優先事項とすると、運搬から離陸までの過程は人手を増やすことで時間短縮が可能となることから、2 名以上の作業員を配置することが望ましい。また、少人数での運用をする場合、使用している機材は重量物も多く、安全性と効率を考慮して、機材積み降ろし用のリフターを備えた運搬車を準備しておくことが望ましい。

6.6. 無人飛行機搭載用放射線測定システムの設計製作及び動作試験結果

本節では、これまでの本事業におけるフライト試験等の結果を踏まえ、無人飛行機搭載用放射線測定システムに対して改良を施した試作機 (以下、改良試作機) を用いて試験評価を行った結果を述べる。また本年度の試験結果を踏まえ、Penguin C を用いた緊急時放射線モニタリングを行う上で必要となる無人飛行機搭載用放射線測定システムの性能及び今後の課題を述べる。

6.6.1. 本試験で使用した無人飛行機搭載用放射線測定システムについて

原子力災害時の放射線モニタリングを想定し、無人飛行機 (Penguin C) に搭載する改良試作機の設計製作及び改良試作機による測定試験を実施した。Fig. 6-15 に本試験で設計及び製作した改良試作機の概要を示す。当試作機には放射線検出器モジュール (日本放射線エンジニアリング株式会社製)、カメラ (Panasonic 製 WV-S3130)、GNSS センサー (u-blox 製 GlobalSat BU-353W10: M8M) が搭載されており、それらのデータはデータロガー PC (エスティータラボ製 Raspberry Pi 3B) によって USB メモリに保存されると同時に、機体通信を用いて GCS にデータが送信される (コントレイルズ製のシステムソフトウェア)。データは全て、GNSS から得られた時刻情報で関連付けされており、1 秒ごとに日時情報、緯度、経度、高度情報、気圧、温湿度情報、 β 線及び γ 線計数率、 γ 線スペクトル情報が得られる。放射線検出器にはゲルマニウム酸ビスマス (BGO) とプラスチックシンチレータを用いたホスウィッチ型検出器を採用した。ホスウィッチ型検出器とは、複数の異なるシンチレータを用いることで、放射線の種別 (改良試作機では γ 線と β 線) に得られるパルス形状に変化を与えることで、それぞれを弁別できるようにした検出器である。ホスウィッチ型検出器は二つの検出器を搭載することなく二種類の放射線を計測でき、小型軽量であるため、搭載スペース及び重量に制限のある今回のような測定状況において最適であると考え、本試験で採用した。

Fig. 6-16 に本試験で使用したホスウィッチ型検出器の外観図面を示す。試験で使用した検出器は、表面に遮光用のアルミ蒸着マイラ膜、次にプラスチックシンチレータ (25 mm ϕ \times 1 mm H)、そして BGO (25 mm ϕ \times 25 mm H) といった積層構造になっている。 β 線はプラスチックシンチレータで、 γ 線は BGO で検出するシステムとなっている。原子力災害時における緊急時

モニタリングにおいて、放射線測定時の機体の自己汚染をどのようにして把握するのが計測における一つの課題である。本システムでは、ホスウィッチ型検出器を用いることで機体表面の汚染状況をβ線のカウントで把握できるようにした。

令和3年度の試験では、機体のエンジン回転による振動の影響により、ホスウィッチ型検出器のβ線計数率が不自然な変動を示す現象（以下、ノイズ現象）が見られ、本現象の解決が課題として挙げられた¹⁹⁾。今年度はノイズ現象を抑制するために、放射線検出器に対するインシュレーター（防振ゴム）の取付け、シールドメッシュによる被覆の他に、システム全体をシンプルな形状に一体化し、ノイズ現象を抑えるための専用架台を作成した。機体への放射線検出器システム搭載図面を Fig. 6-17 に示す。

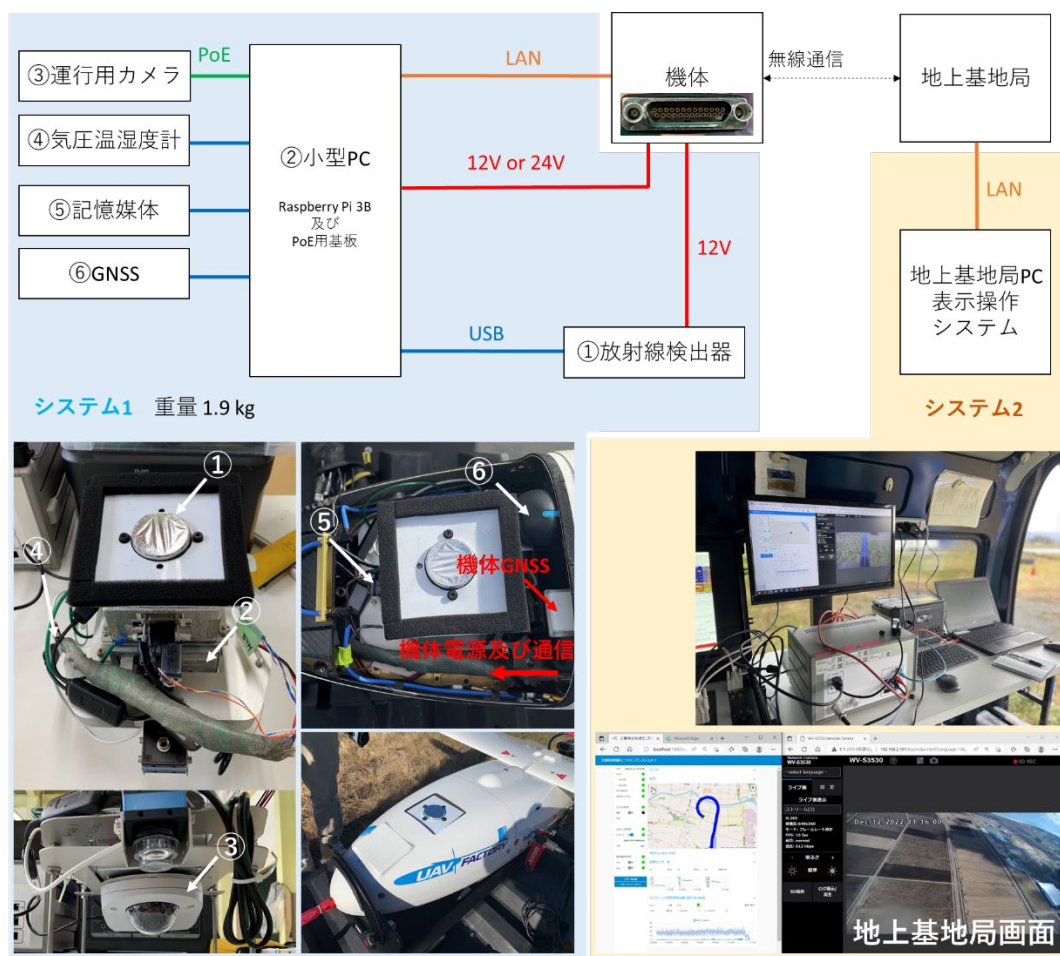
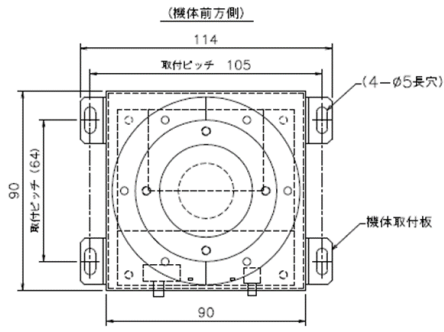


Fig. 6-15 放射線測定システム試作機 (改良試作機) の概要



主材質：アルミ、樹脂
 塗装色：白色系（マンセルN9 相当）
 質量：600g以下
 長さ単位：mm

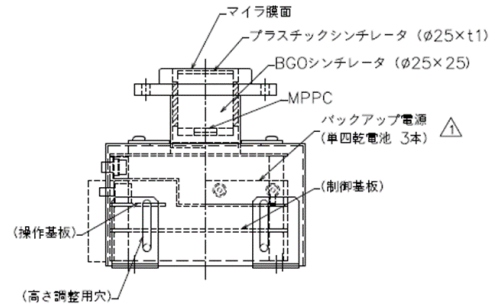
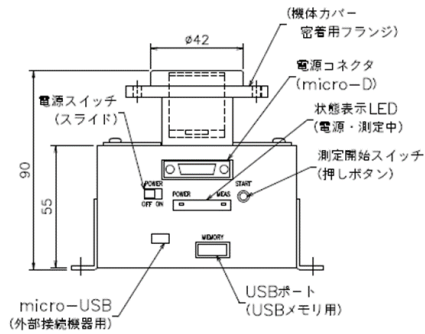


Fig. 6-16 ホスウィッチ型検出器の外観図面

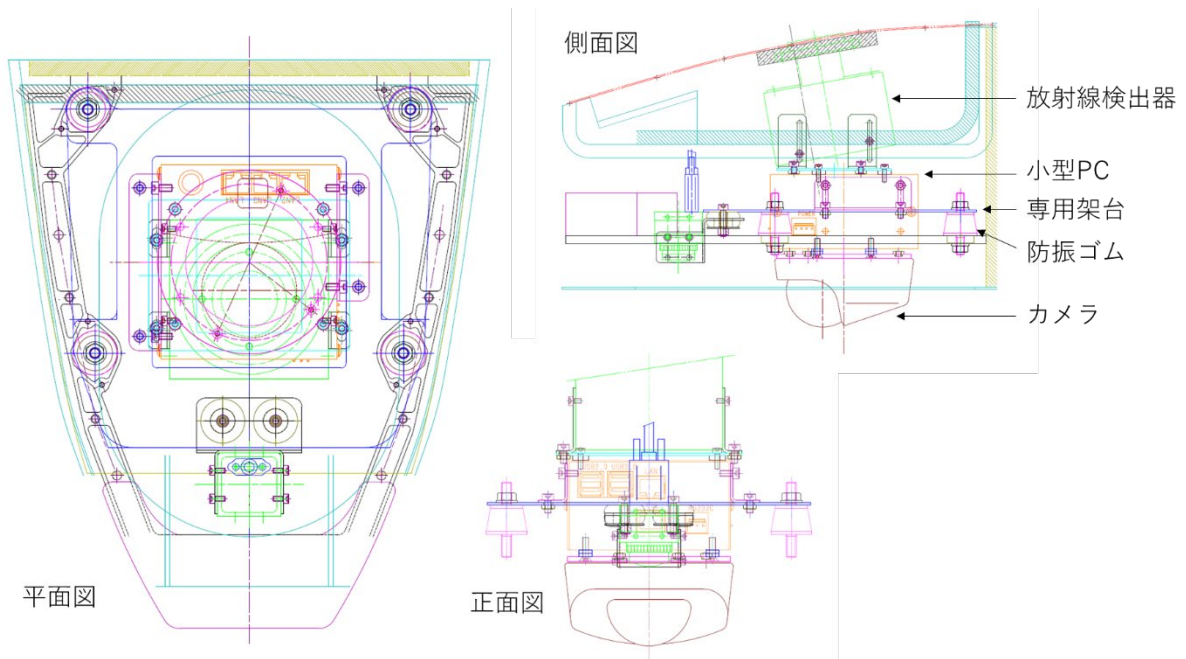


Fig. 6-17 放射線測定システム機体搭載図面

6.6.2. 地上試験の結果

改良試作機を Penguin C に搭載し、地上において動作試験を行った。地上で機体のエンジンを動かし、放射線検出器の測定結果にどのような影響があるのか確認した。試験結果を Fig. 6-18 に示す。ノイズ現象への対策を施した結果、 γ 線計数率については、従来通りノイズ現象は見られなかった。一方、 β 線計数率については、エンジン回転数が 3,500 rpm 以上の領域でノイズ現象は見られなかったものの、カバー無しの状態のとき、3,000 rpm 付近で β 線計数率が不自然に上昇するノイズ現象が見られた。しかしながら、地上試験においては、ノイズ現象はカバーを装着することで解消できたため、フライト試験時には必ずカバーを装着することとした。

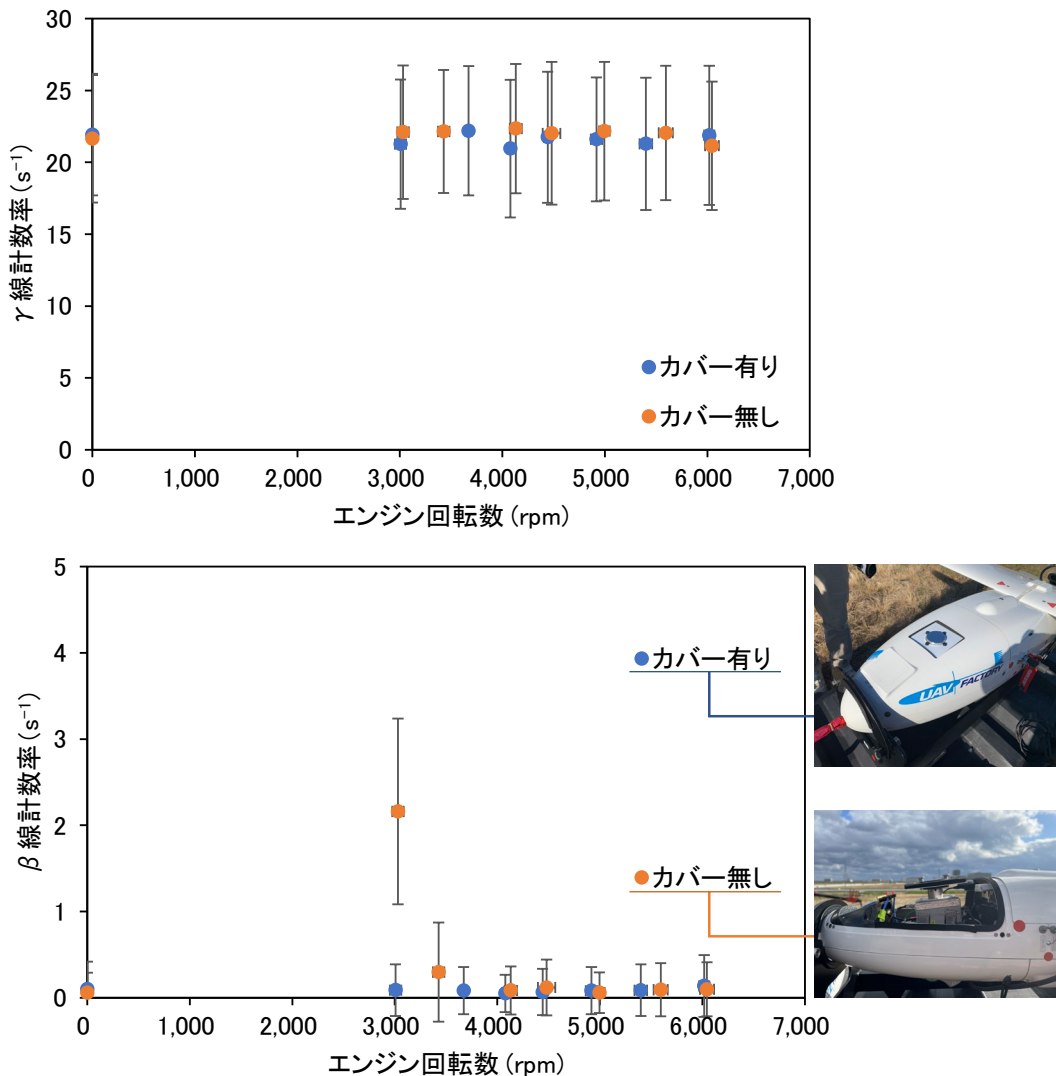


Fig. 6-18 エンジン回転数 3,000 rpm 付近で見られるノイズ現象 (地上試験)
(本図中のエラーバーは標本標準偏差を表している。)

6.6.3. フライト試験の結果

改良試作機を Penguin C に搭載し、フライト試験を行った。Fig. 6-19 に改良試作機を Penguin C に搭載し、フライト試験を行った結果の一例を示す。Fig. 6-19 (a) は対地高度約 200 m における γ 線計数率、Fig. 6-19 (b) はフライトと同時期に歩行式サーベイメータ (日本遮蔽技研社製 ホットスポットファインダー) で地表面から 1 m の高さの空間線量率を測定した結果である。各分布は、内挿法 (クリギング法) を用いて内挿補間した結果である。フライト試験時の γ 線測定結果と地表面から 1 m の高さの空間線量率の測定結果は、同様の分布傾向を示した。

Fig. 6-20 は Fig. 6-19 に示したフライト試験時の β 線及び γ 線計数率とエンジン回転数を時系列で示したものである。離陸直後に途中検出器が動作停止しているが、これはカタパルト発射時の衝撃により電源系統にエラーが発生したためである。 γ 線については離陸以降、計数率は概ね一定レベルで安定しており、ノイズ現象は見られなかった。一方、 β 線については離陸以降、計数率が不安定であり、特に、12:00~12:15 の領域で計数率が不自然なまでに大きく変動し、ノイズ現象が見られた。前項に示した地上試験は台座に機体を固定して試験を行うため、フライト試験に比べて、機器への振動影響が少なかったが、フライト試験時は地上試験のシチュエーションと異なり、機器への振動の影響が大きくなり、 β 線計数率にノイズが混入したと考えられる。

本試験において、シールドメッシュによる被覆、グラウンドの設置、インシュレーターの設置、専用架台の作成等、様々なノイズ対策をホスウィッチ型検出器に対して適用してきたが、ホスウィッチ型検出器の β 線計数率に見られるノイズ現象を完全に解消することはできなかった。

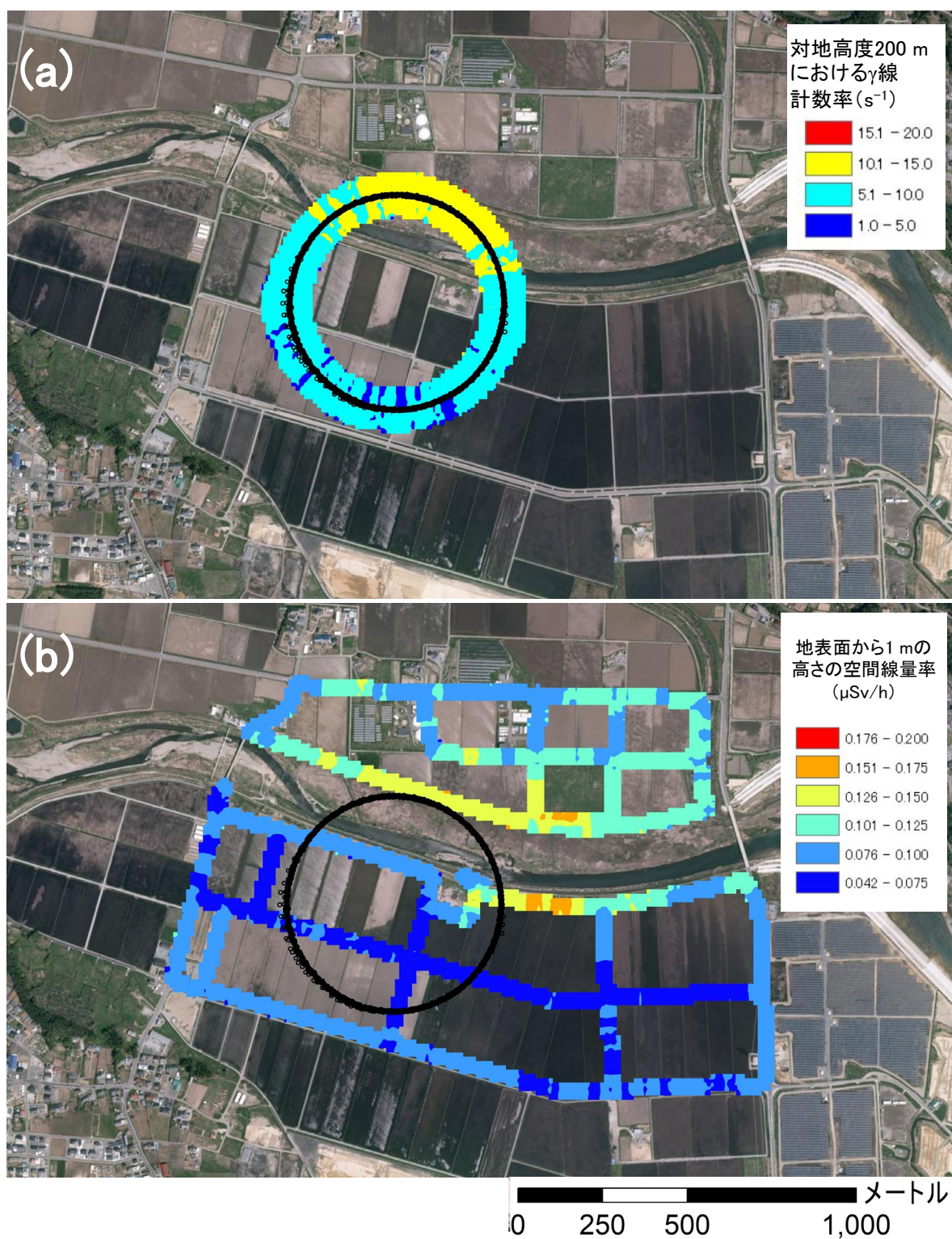


Fig. 6-19 フライト試験時の γ 線計数率及び地表面から1 mの高さの空間線量率

(a) ホスウィッチ型検出器で得られた対地高度200 mにおける γ 線計数率(2022年12月12日、
図中に黒線で示した円周上をフライトして測定した)

(b) 歩行式サーベイメータで得られた地表面から1 mの高さの空間線量率(2022年12月14日
測定)

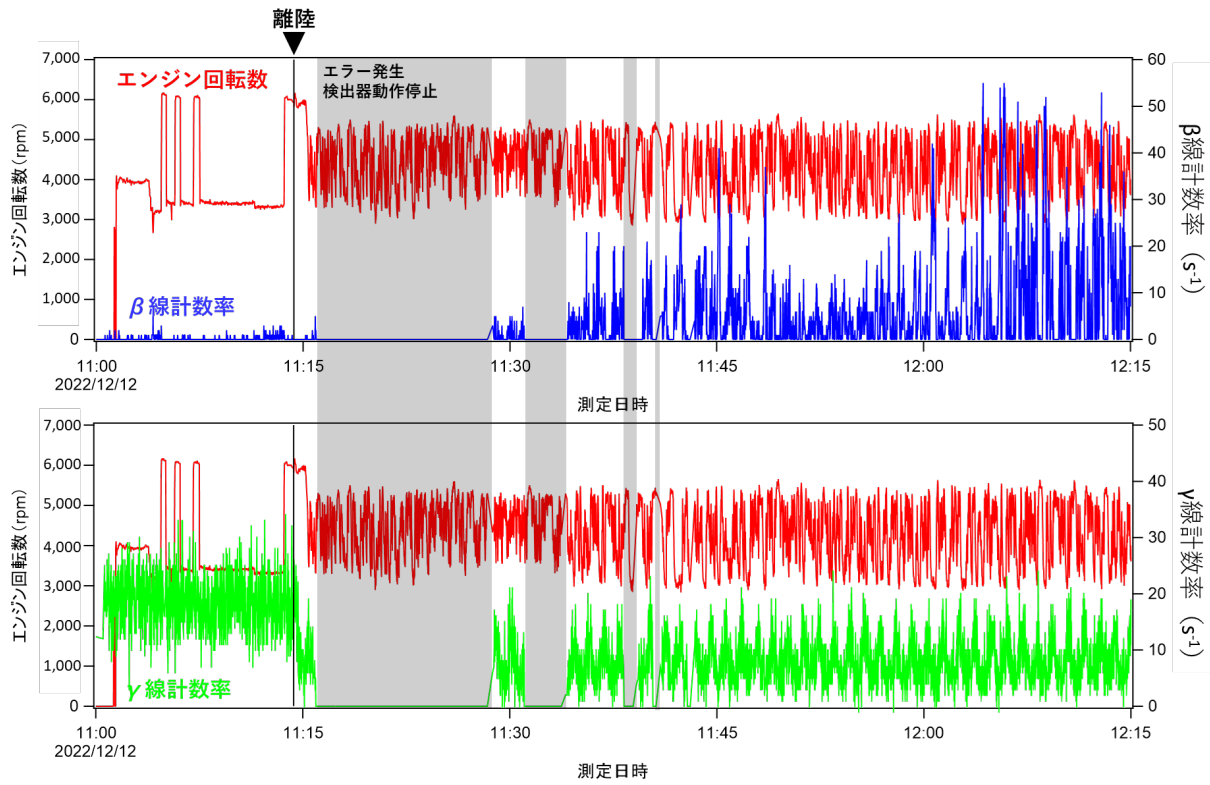


Fig. 6-20 フライト試験時のエンジン回転数とβ線及びγ線計数率
(2022年12月12日に実施したフライト試験の一例)

6.6.4. 無人飛行機搭載用放射線測定システムの必要性能及び課題について

以上の改良試作機を用いた試験結果及び試験時の経験を踏まえ、Penguin C を用いた緊急時放射線モニタリングを行う上で必要となる無人飛行機搭載用放射線測定システムの搭載機器の条件、性能を以下にまとめた。

- 機体への搭載物総重量は 2 kg 未満、大きさはおおよそ 220 mm × 200 mm × 100 mm 以下であること。2 kg 以上の重量では、6 時間以上の無人飛行機運用が難しくなる。
- 機体への搭載物は防塵、防滴仕様であり、目安として-10℃～50℃において動作すること。
- 機体への搭載物の電源は機体からの供給電源 (12 V × 2 個、24 V × 1 個) を用いたものであること。
- 機体への搭載物は 20 時間以上、安定的に動作すること。
- 機体への搭載物は突然の電源消失時においても機器が破損しないように、機器設計を行うこと。機体からの供給電圧を安定的にするため、可能であればバッテリー等により電源を放射線検出器等に供給することが望ましい。
- 機体への搭載物はカタパルト発射時の衝撃に備え、架台等にしっかりと固定されていること。
- 機体への搭載物の取得データは TCP/IP 通信を用いて、リアルタイムで GCS において状況確認が可能であり、データ受信が可能であること。機体への搭載物は衝撃により、機能が停止する可能性がある。よって機体への搭載物は遠隔で電源の ON/OFF が可能であり、再起動を実施できることが望ましい。
- 機体への搭載物は各機器が故障しても直ぐに交換できるように、シンプルな構造にすること。機体への搭載物はフライト時の振動や、離着陸の衝撃により、コネクタ接続部等が故障しやすい。できれば、ねじ止め等が可能なコネクタが望ましい。併せて、緊急時放射線モニタリングでは搭載物自体が汚染する可能性もあるため、各機器のストックが常にある状態が望ましい。
- 機体への搭載物による取得データは、機体搭載物内及び GCS の両方に保存されるシステムであること。
- 機体への搭載物は GNSS 受信機を保持するか、又は Penguin C の機体から GNSS 情報を受信し、取得データの全てを GNSS 時刻で関連付けできること。
- 機体には最低限、放射線検出器とそのデータをログ、送受信するための PC、前方又は下方確認用のカメラを搭載すること。カメラは機体を目視外飛行させるために必須の機能である。また Penguin C の機体から緯度経度高さ情報、時刻情報を取得できない場合、GNSS 受信機を搭載する必要がある。
- 機体へ搭載する放射線検出器は地上からの放射線影響と、機体周辺汚染による放射線影響を区別できるシステムであること。
- 機体への搭載物が取得する数値情報は 1 秒ごとにデータを連続して保存が可能であること。

- 機体への搭載物には機体からの電磁パルス (EMP) ノイズを防止する処理 (シールドメッシュによる被覆等) を施すこと。
- 機体への搭載物には機体への影響 (GNSS 電波への干渉等) を防止する処理を施すこと。
- 機体への搭載物には振動ノイズの影響を防止する処理 (専用架台の作成、インシュレーターの設置等) を施すこと。
- 搭載機器の稼働状況を確認できる LED ランプ等が搭載されていること。これは無人航空機の運用時に、迅速な機器確認を行うためのものである。

無人飛行機搭載用放射線測定システム構築にあたって一番の課題となる部分は、機体搭載物の内、放射線検出器の β 線計数率データに見られるノイズ現象の防止である。改良試作機には可能な限り様々なノイズ現象の防止策を施したが、ノイズ現象を解消することができなかった。ノイズ現象が誘起される原因として、①振動により β 線で得られるパルス形状に近い電磁パルスが発生している、②機体や放射線検出器が振動により静電気を保持し、 β 線を誤検出していることが挙げられる。また、本検出器は Penguin C へ搭載するために軽量化されているため、振動の影響を受けやすい可能性がある。

本試験では、軽量化及び機体汚染の計数率を分離するために、 β 線と γ 線を同時に計測可能なホスウィッチ型検出器による試験を行ったが、試験結果を踏まえると、本試験で使用した小型軽量化したホスウィッチ型検出器を Penguin C を用いた測定システムに適用するのは難しいと思われる。現段階では Penguin C を用いた緊急時放射線モニタリングを行う上で、搭載する放射線検出器を開発する際は、振動の影響を受けにくい、単体結晶のシンチレータ放射線検出器や、複数の結晶を用いた放射線検出器を採用した方が望ましい。なお、無人ヘリコプター (ヤマハ発動機製 FAZER R G2) に対しても同ホスウィッチ型検出器を搭載し測定試験を実施してみたところ、 β 線計数率にノイズ現象が同様に見られた。このことから、フライト中に一定レベル以上の振動を生ずる無人航空機に対して、軽量化したホスウィッチ型検出器を搭載することは、ノイズ現象を解消できないという観点から、困難であることが示唆される。

「平成 28 年度～平成 30 年度 無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立」⁵⁴⁾⁻⁵⁶⁾においても、無人航空機に搭載する放射線検出器の開発を行っている。上記のシステムは、ホスウィッチ型検出器の他に、三つのシンチレータを用いることで、プルームからの放射線、機体に付着した放射性核種からの放射線、地上からの放射線、これら三つの影響の弁別を可能としている。上記の開発においても、無人ヘリコプターへの搭載測定試験を行っているが、 β 線のノイズに関しては報告されていない。上記の放射線検出器は約 10 kg 程度であり、本事業で作製した検出器に比べて重量が約 5 倍ある。上記の例では、重量があったために検出器本体が安定し、振動の影響が少なかったため、ノイズが見られなかったのではないかと推察される。

現状の測定システムで、 β 線計数率においてノイズ現象を誘起する原因が、パルス形状弁別方式を用いているためか、静電気等で β 線を誤検出しているためか、その他の理由であるのか、判然としない。ノイズ現象の原因を明らかにするために、アルミ蒸着マイラ膜で検出器表面を覆った単体結晶のシンチレーション式検出器を用いて、本報告で実施したような地上試験及びフライト試験を行い、ノイズ現象が見られる否かを確認する必要がある。単体結晶の検出器に

においてもノイズ現象が見られる場合、Penguin C に搭載する放射線検出器に軽量化したホスウィッチ型検出器は採用すべきでない。

以上の点を踏まえ、ホスウィッチ型検出器を使用せず、機体周辺と地表面からの放射線影響を弁別可能であり、Penguin C へ搭載可能な小型の測定システム案を 6.6.5 項に示す。当該項に示す案は、2つのシンチレータを用いた放射線測定システムである。

なお、本報告書に詳細は記載していないが、機体に搭載するデータログ用の小型パソコンや、各種機器が電波ノイズを発生し、機体側が受信する GNSS 電波へ影響を及ぼす事象が発生している。機体に搭載する機器に関してはあらかじめ、スペクトラムアナライザ等で各種機器が電波を発生していないか、確認する必要があることをここで述べておく。

6.6.5. 無人飛行機搭載用放射線測定システム案

試験結果を踏まえ作成した、Penguin C に搭載する放射線測定システム案を Fig. 6-22 及び Fig. 6-23 の 2 パターン示す。本報告書ではこれらのシステムを「マルチ検出システム」と呼称する。

マルチ検出システムは、二つの検出部 (A、B とする。) 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る。個々の結晶から γ 線計数率を取得し、遮蔽率の違いから、各寄与からの放射線計数率を推定する。

Fig. 6-22 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。

$$y_A = A_c + A_g \quad [13]$$

$$y_B = B_c + B_g \quad [14]$$

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[15]が成り立つ。

$$B_g = SC_1 \times A_g \quad [15]$$

ここで、 SC_1 は遮蔽係数であり、遮蔽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[16]が成り立つ。

$$B_c = SC_2 \times A_c \quad [16]$$

ここで、 SC_2 は遮蔽係数であり、遮蔽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[17]から A_c, A_g を推定することが可能となる。

$$\begin{cases} y_A = A_c + A_g \\ y_B = SC_2 A_c + SC_1 A_g \end{cases} \quad [17]$$

$$A_g = \frac{SC_2 y_A - y_B}{SC_2 - SC_1}, \sigma_g = \sqrt{\left(\frac{SC_2}{SC_2 - SC_1}\right)^2 y_A + \left(\frac{1}{SC_2 - SC_1}\right)^2 y_B} \quad [18]$$

$$A_c = \frac{SC_1 y_A - y_B}{SC_1 - SC_2}, \sigma_c = \sqrt{\left(\frac{SC_1}{SC_1 - SC_2}\right)^2 y_A + \left(\frac{1}{SC_1 - SC_2}\right)^2 y_B} \quad [19]$$

ここで、 σ_g と σ_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。 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[20]により算出される。

$$N_g = A_c + 3\sigma_c \quad [20]$$

マルチ検出システムの計数率の推定精度を評価するために、モンテカルロ計算コードPHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System: Ver. 3.290)⁵⁷⁾を用いて放射線検出のシミュレーションを行った。遮蔽体や各検出部の配置によって、 A_g の推定精度がどのように変化するのかが評価するために、Fig. 6-22 のモデル 1 と、Fig. 6-23 のモデル 2 の 2 パターンのモデルを用いて、シミュレーションを行った。各モデルとも、遮蔽体を 1 mm と 3 mm の厚さに設定し、 γ 線源 (Cs-137 : Cs-134 : I-131 = 1 : 1 : 1) を球表面全体に分布させ、 A_c 及び B_c を取得した。また球の中央から 5 m 離れた箇所に 10 m × 10 m の平面 γ 線源 (Cs-137 : Cs-134 : I-131 = 1 : 1 : 1) を設置し、これを地表面からの γ 線の影響と仮定し、 A_g 及び B_g を取得した。

Table 6-11 は PHITS によるシミュレーションにより、各モデルの SC_1 と SC_2 を算出した結果である。これらの値を用いて、各モデルの周辺汚染による検出部 B のカウントが上昇したとき ($y_B = SC_2 A_c$ のとき) の、 A_g の検出限界値 N_g を算出した結果が Fig. 6-24 である。

本結果より、遮蔽体の厚さを変化させることで、周辺汚染による検出部 B のカウントの上昇に伴う A_g の検出限界値の上昇が抑えられていることが確認できる。また、モデル 1 とモデル 2 を比較すると、モデル 2 の方が検出限界値の上昇が小さい。これは、 SC_1 と SC_2 の差がモデル 2 の方が大きいためと考えられる。

これらの結果から、遮蔽体及び検出部の配置、各結晶サイズ等の最適化を行うことにより、マルチ検出システムにおける A_g の推定精度を向上させることができることが分かった。ただ

マルチ検出システムは、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は難しいという課題がある。マルチ検出システムの検出部Bをホスウィッチ型検出器に変更する、又はもう一つβ線測定用の放射線検出器を追加することで、放射性プルームからの寄与と機体に付着した放射性核種からの寄与を弁別することは可能となるが、β線計数率におけるノイズ現象が未解決であり、今後、β線計測の評価研究を行う必要がある。また、マルチ検出システムでは、放射線スペクトルを活用して放射性核種の弁別を行うことは可能だが、それぞれの放射性核種濃度を算出することは難しい。

上記で示したマルチ検出システムの他に、二つの検出器の同時計数率を取得する方法(複数の入力端子に、ある一定時間内に到達したパルスだけを計数する方法)で地表面の放射性核種による影響を評価する手法も考えられるが、無人航空機で放射線モニタリングを行うというシチュエーションでは、γ線を二つの検出器で同時計数する確率は非常に低く、 A_g の検出限界が大きくなることが予想される。なお、「平成28年度～平成30年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立」⁵⁴⁾⁻⁵⁶⁾においては1"×1"のシンチレータを3つ用いて、同時計数率を取得していたが、その値は最大0.5%程度であった。

なお本章で示したマルチ検出システムは、簡易的なシミュレーションの結果のみを示しており、実際の機体へ搭載した際は、結果が異なってくると考えられる。機体への搭載には、検出器配置等に様々な制限があるため、マルチ検出システムの詳細な性能評価には、実機による検出器及び遮蔽体の配置の最適化や、フィールド測定による性能試験評価が必要となる。

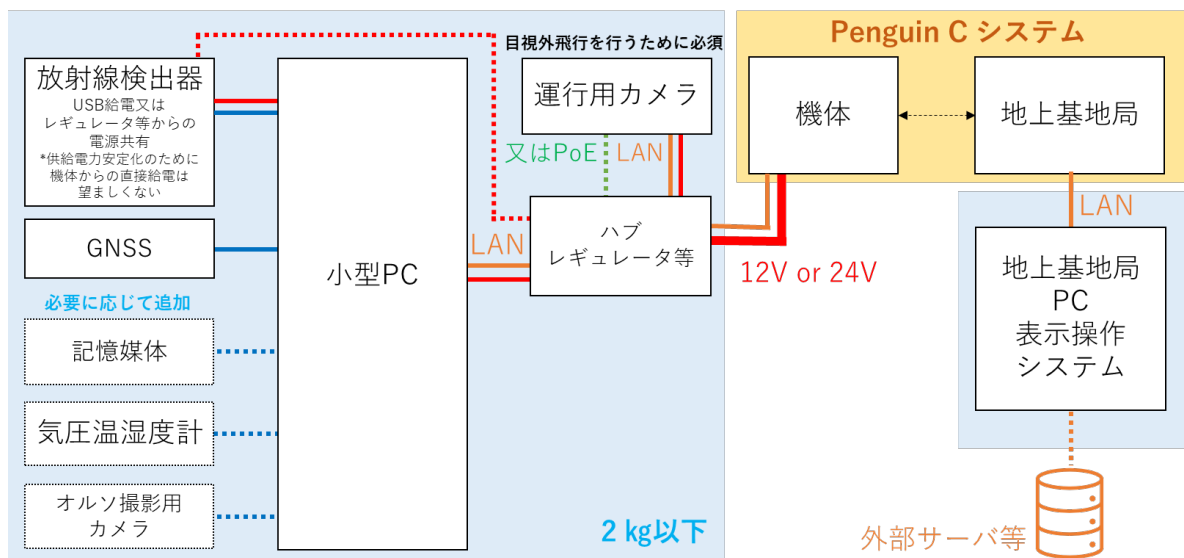


Fig. 6-21 無人飛行機 Penguin C 搭載用放射線測定システム設計案

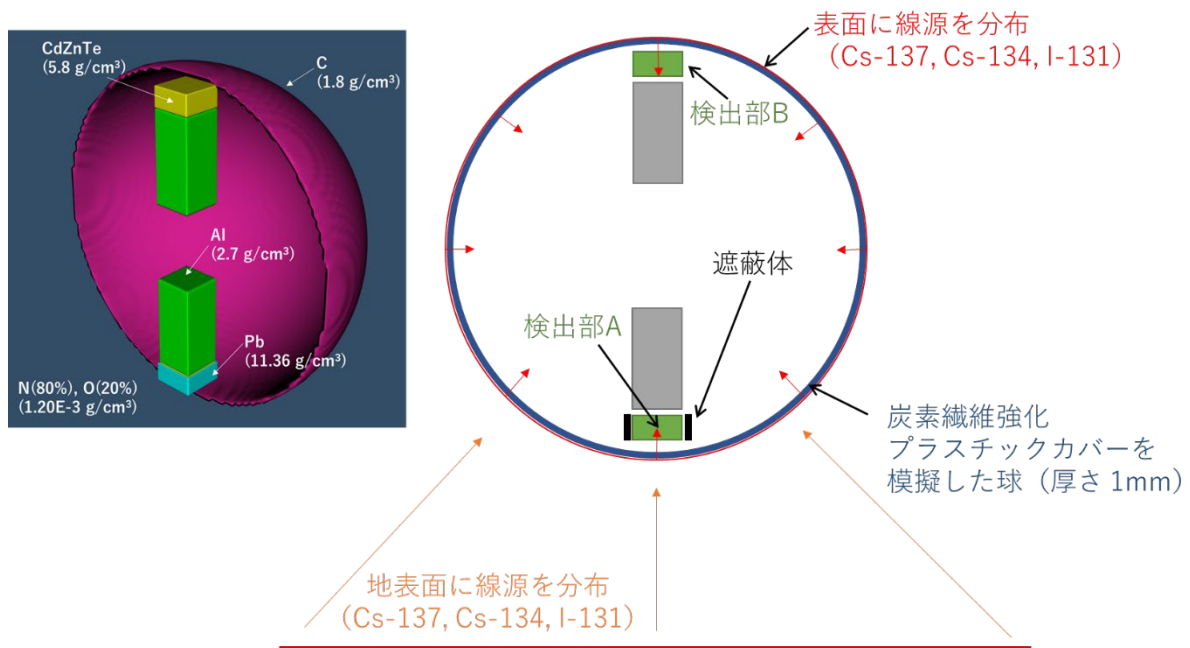


Fig. 6-22 マルチ検出システムのシミュレーションモデル 1

実際の計算モデルは、左図のピンク色の半球が球状 (半径 10 cm) である。遮蔽体は鉛 (50 mm × 50 mm × 厚さ 1~3 mm)、検出部は CdZnTe (25 mm × 25 mm × 13 mm)、検出モジュールは Al (25 mm × 25 mm × 58 mm) を用いた。

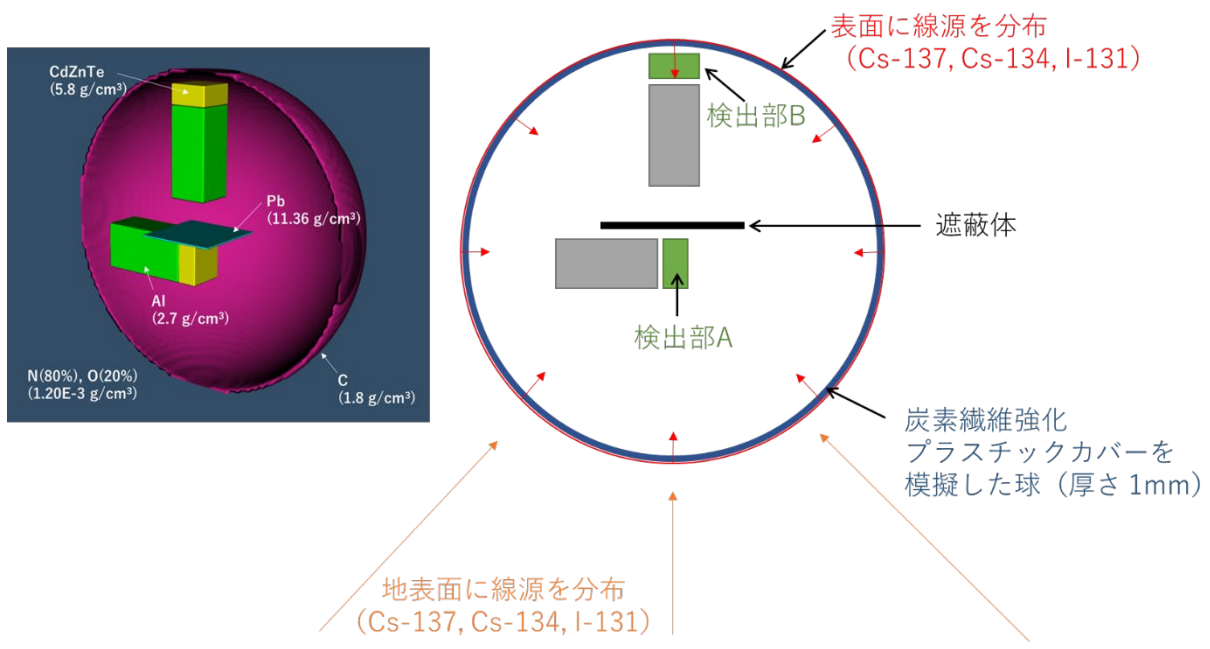


Fig. 6-23 マルチ検出システムのシミュレーションモデル 2

Table 6-11 各モデルの SC_1 と SC_2 の算出結果

モデル	遮蔽体厚さ	SC_1	SC_2
1	1 mm	0.869	1.112
	3 mm	0.916	1.267
2	1 mm	0.726	1.361
	3 mm	0.717	1.444

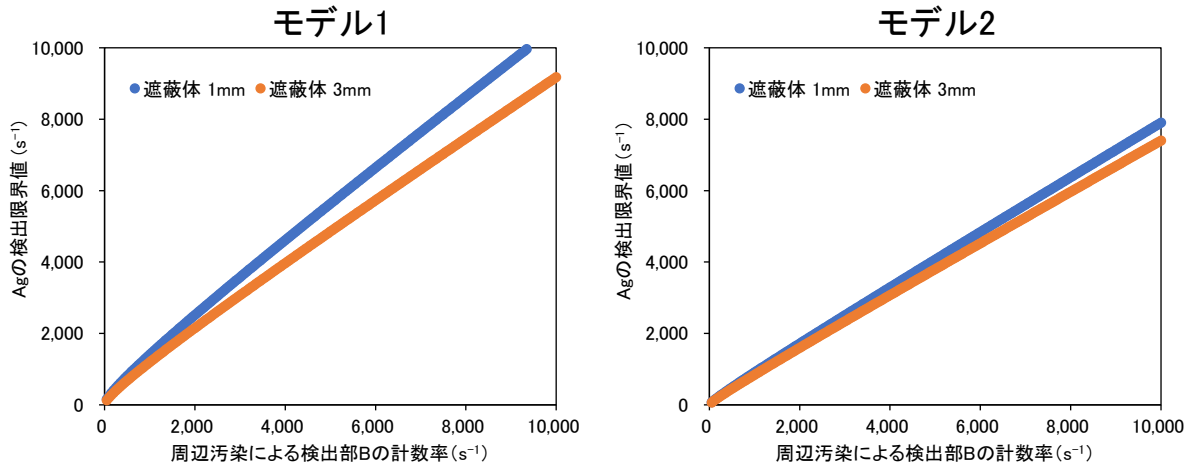


Fig. 6-24 各モデルの周辺からの影響に応じた A_g の検出限界

7. 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

美浜・敦賀及び伊方について、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。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二種類を作成した。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 $0.03 \mu\text{Sv/h}$ 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、一部で既往の地質調査レポート等との関連付けが難しい場所があったものの、空間線量率が比較的高く算出された場所のほとんどで花崗岩類の存在が関連していることが推察され、地質の分布との対比は概ね良好に思われた。これらのことから、標準的解析手法に基づく γ 線計数率から空間線量率への換算方法を今後も運用するにあたって、特段の問題はないと思われる。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气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。このことから、航空機モニタリングデータに対してコベル法が有効に機能しており、一定の信頼性を持った自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 または 10 km で東西方向に設定した。美浜・敦賀については、航空機による測定期間は 2022 年 7 月 26 日～7 月 31 日 (延べ 9 フライト) の 6 日間、地上測定の測定期間は 2022 年 7 月 26 日～7 月 30 日の 5 日間であった。伊方については航空機による測定期間は 2022 年 11 月 11 日～11 月 21 日 (延べ 16 フライト) の 11 日間、地上測定の測定期間は 2022 年 11 月 11 日～11 月 18 日の 8 日間であった。美浜・敦賀、伊方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。しかしながら、伊方の測定期間中、11 月 11 日に愛媛県東温市周辺でテストポイントフライトを実施した際、住民の方から愛媛県庁に対してヘリコプターの騒音苦情に係る連絡が寄せられた。テストポイントフライトは対地高度 300 m を保った状態で 3 分間ホバリングを行うという性質上、騒音の発生は不可避である。航空機モニタリングを実施する地域の住民の方々と地方自治体の職員にご迷惑を掛けることのないよう、テストポイントの場所の選定にあたっては、住宅密集地を避ける等の配慮を行う必要がある。

・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について

対象サイトを美浜発電所とした令和4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を実施した。本訓練では、美浜発電所から南東方向に放射性核種が拡散したと想定し、航空自衛隊小牧基地を離発着点として岐阜県の北西部及び滋賀県北部域をモニタリングし、得られた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。本ラックをUH-60の機体床に固定するためのポイントを確定させるまでに時間を要したため、固定ポイントをすぐに確定し搭載完了までの時間をより短縮できるよう、ラック搭載マニュアルを視覚的に分かりやすい形で整備する必要がある。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。データ解析については、航空機モニタリング専用の解析システムであるAMS Tottal Systemが有効に機能し、データ解析に着手してから結果の共有まで、約15分程度であった。しかしながら、UH-60に適用すべき解析パラメータとは異なる数値を適用した解析結果を報告してしまう事象が発生した。本事象の再発を防止するため、適用する解析パラメータを視認できるような機構を本システムに設ける必要がある。作成した空間線量率マップと本訓練の期間中に取得した地上測定値を比較したところ、やや大きな乖離が見られる場合があった。現状ではUH-60に適用できる数値パラメータが限られており、より正確な空間線量率マップを作成できるよう、今後、本機体を用いて改めて一連の換算パラメータを取得し、その妥当性の検証に取り組む必要がある。

- ・測定エリアの管制空域、空港等の特徴及び気候、地形等に関する特徴について

美浜・敦賀については、2020年度に航空機モニタリングを実施した際に本項目についてまとめた¹⁷⁾。当該内容から特段の変更点はないため、本報告では割愛する。

Fig. 7-1に伊方(P1)から半径80km圏内(以下、伊方測定エリア)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、伊方測定エリアの拠点として広島ヘリポートを使用した。広島ヘリポートは伊方測定エリア外ではあるが、そのすぐ北方に位置しており、離陸してから測線に到達するまで多少のロスが生じるものの、測定の進捗に顕著な影響が出る程ではない。この他、伊方測定エリアの拠点候補として広島空港(A1)、松山空港(A2)及び大分空港(A3)があるが、いずれも資機材の搬出入に係る手続き等が煩雑であり、現地測定作業員の待機場所が確保できない等、利便性が比較的低いため、測定エリアの西部または東部をモニタリングする際の燃料給油地点として利用するのがよい。伊方測定エリア北部域にある米海兵隊岩国航空基地(A4)には軍民共用の岩国錦帯橋空港が併設されていることもあり、航空管制が特に厳格に行われている。当該航空基地の管制圏内を飛行する許可が下りるまでに比較的時間が掛かるため、事前調整には十分な時間的余裕をもって臨む必要がある。また、伊方測定エリア外ではあるが、北西部の測線の延長線上に位置する航空自衛隊防府北基地(A5)では定期的に飛行訓練が行われており、近辺を飛行するには航空管制を

受ける可能性があることに留意する必要がある。伊方測定エリア中央部及び南部には民間訓練/試験空域 (B1 及び B2) が広い範囲で設定されており、不定期で飛行訓練が実施されることがあるため、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。

伊方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⁵⁸⁾を参考に以下に記述する。伊方測定エリアの大部分は瀬戸内海式気候に区分され、梅雨時期を除いて年間の降水量は比較的少なく、晴天の日が多い傾向にあるが、春から梅雨時期にかけては瀬戸内海を中心に濃霧の(移流霧)発生が見られ、秋から初冬にかけては内陸部や盆地で濃霧(放射霧)の発生が見られる。瀬戸内海側と宇和海側とで気候は異なり、例えば、冬期には一般に北西の季節風が卓越するが、瀬戸内海側では中国山地が障壁となり季節風の影響を受けにくいのに対し、宇和海側では季節風が海門海峡を吹き抜けてくるため強風が吹くことがある。伊方測定エリアにおける通年の気象情報を総合すると、梅雨の明けた頃(平年では7月中旬以降)から、冬期に入る前までの12月の間が航空機モニタリングに適していると思われる。

伊方測定エリアにおける地形的な特徴として、愛媛県と高知県の県境付近には西日本で最高峰の標高(1,982 m)を誇る石鎚山を筆頭に、標高1,500 m級の山々が東西50 kmに渡って連峰を成す急峻な山岳地帯が広がっている。測線を東西方向に設定した場合、このような地形の変化が激しいエリアにおいて対地高度を約300 m付近に維持して飛行するには、熟練したヘリコプターパイロットを手配するとともに、本報告で用いたBell 412のようなパワーがあり上昇力に余裕のある機種を航空機モニタリングに用いることが望ましい。

・原子力災害時における無人飛行機の運用技術開発について

原子力災害時等の緊急時モニタリングにおける、有人ヘリ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無人飛行機について運用技術開発を行った。2019年度に選定した無人飛行機(Penguin C)について福島ロボットテストフィールドにて、計10回のフライト試験(総フライト時間約930分)を実施した。本試験には6時間に渡る長時間のフライト試験及び夜間想定フライトを含めた。全試験を予定通り完遂でき、システムの異常などは確認されなかった。以上のことより、Penguin Cのフライト性能に対する信頼性は高いものと考えられる。次年度以降も引き続き、機体の運用を慣熟する試験を継続していく必要がある。また、放射線測定システムを搭載してフライト試験を実施した。当該システムの放射線検出器は、放射性プルームによる機体の汚染とそれ以外の線源による計数率を弁別するのに資するため、プラスチックシンチレータによりβ線、BGOによりγ線をそれぞれ測定できるよう、ホスウィッチ型検出器とした。フライト試験中、β線の計数率が不自然な変動を示すノイズ現象が見られたが、本現象は機体のエンジンを駆動させたときに生じる電磁ノイズや振動が原因と思われる。本現象を防止するため、シールドメッシュによる被覆、グラウンド線の設置、インシュレーターの設置等により可能な限りのノイズ対策を施したところ、ノイズ現象がある程度緩和されたが、完全に解消することはできなかった。本現象の根本的な原因は未だ解明できておらず、解消に至らない場合、本検出器を無人航空機用の放射線測定システムに用いるべきでない。そこで、ノイズ現象が解消されない場合に備えた代替案として、二つの異なる検出部を用いたマルチ検出システムを考案した。モンテカルロ計算コードPHITSにより、本システムの放射性

プルームによる機体の汚染とそれ以外の線源による計数率を弁別する能力について評価した。結果として、地表面の放射性核種からの計数率と、機体周辺の放射性核種からの計数率とに大まかな弁別は可能であることが示唆された。しかしながら、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は困難であるという課題が残された。本課題を解決するために、マルチ検出システムの構成を再検討する必要がある。

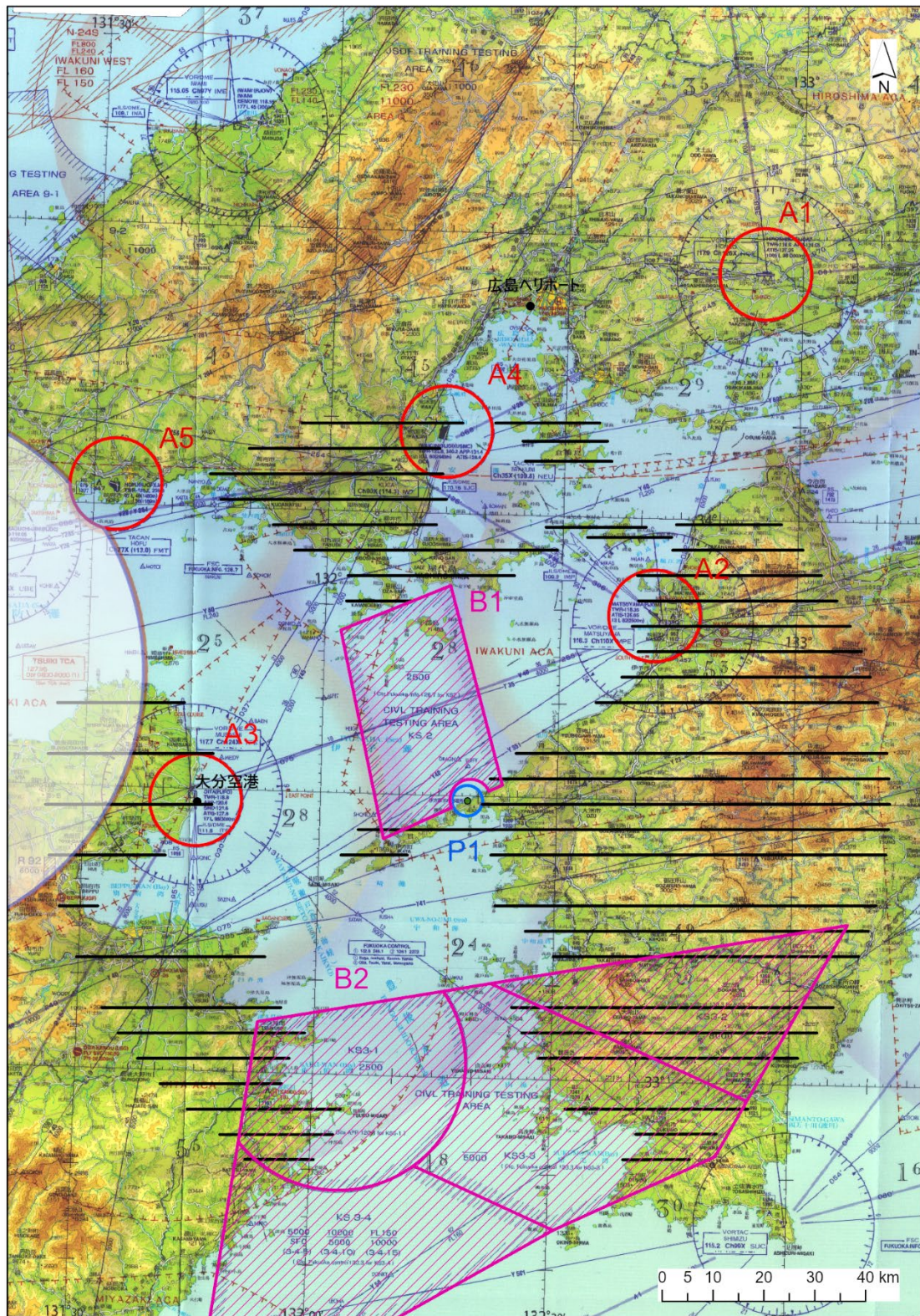


Fig. 7-1 伊方周辺における管制空域に係る情報

A : 空港及び航空基地、B : 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 中国・四国 ((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4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4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、航空自衛隊小牧基地救難教育隊の皆様にご協力を頂いた。無人航空機の運用技術開発に係る試験の実施にあたり、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(ATOMOΣ), 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, 坪雄一郎, 卜部嘉, 工藤保, 令和3年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2022-027, 2023, 148p.
 - 19) 普天間章, 眞田幸尚, 佐々木美雪, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 萩野谷仁, 松永祐樹, 坪雄一郎, 外間智規, 平岡大和, 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) 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).
 - 21) 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).
 - 22) 湊進, 日本における地表 γ 線の空間線量率分布, 地学雑誌, 115, 2006, pp.87-95.
 - 23) 湊進, 日本列島における地表 γ 線量率分布の地学的背景, RADIOISOTOPES, 64(8), 2015, pp.535-548.
 - 24) 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> (2023年3月1日閲覧).
 - 25) 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.

- 26) 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.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) UARMS 開発チーム, 無人飛行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.
- 30) 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.
- 31) 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> (2022 年 3 月 1 日閲覧).
- 32) Currie, L. A., Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry., *Anal. Chem*, 40(3), 1968, pp.586-593.
- 33) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, pp.81-101.
- 34) 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.
- 35) 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.
- 36) 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.
- 37) 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.
- 38) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 海と陸の地球化学図, <https://gbank.gsj.jp/geochemmap/> (2023 年 3 月 1 日閲覧).
- 39) 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.
- 40) 末吉俊幸, 最小絶対値法による回帰分析, *J. Oper. Res. Soc. Jpn*, 40(2), 1997, pp.261-275.
- 41) 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.
- 42) 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.

- 43) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 20万分の1日本シームレス地質図 2015年5月29日版, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (2023年3月1日閲覧).
- 44) 松浦浩久, 倉橋島及び柱島地域の地質, 地質調査所, 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅高知(13)第25,26号, 53p, 1997.
- 45) 東元定雄, 濡木輝一, 原郁夫, 佃栄吉, 中島隆, 岩国地域の地質, 地質調査所, 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅高知(13)第24号, 79p, 1983.
- 46) 八島隆一, 浜口浩一, 古火山の復元-松山市西部の第三紀火山岩類-, 福島大学理科報告37号, pp.29-43, 1986.
- 47) 吉田武義, 村田守, 山路敦, 石鎚コールドロンの形成と中新世テクトニクス, Mem. Geol. Soc. Japan, No.42, pp297-349, 1993.
- 48) 寺岡易司, 池田幸雄, 鹿島愛彦, 宇和島地域の地質, 地質調査所, 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅高知(13)第77号, 91p, 1986.
- 49) 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 (2023年3月1日閲覧).
- 50) 国土地理院, 地理院タイル一覧, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2023年3月1日閲覧).
- 51) 高田康秀, 近藤善教, 宮村学, 津島地域の地質, 地質調査研究報告 5万分の1図幅京都(11)第19号, 1979, p.56.
- 52) 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.
- 53) 内閣府, 令和4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_r4jissi.pdf (2023年3月1日閲覧).
- 54) 石崎梓, 眞田幸尚, 西澤幸康, 普天間章, 宗像 雅広, 平成28年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立, JAEA-Research 2017-012, 2018, 58p.
- 55) 眞田幸尚, 西澤幸康, 越智康太郎, 結城洋一, 石崎梓, 長田直之, 平成29年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立, JAEA-Research 2018-009, 2019, 48p.
- 56) 眞田幸尚, 越智康太郎, 石崎梓, 平成30年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立, JAEA-Research 2020-006, 2020, 60p.
- 57) Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita, Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 2018, pp.684-690.
- 58) 気象庁ホームページ, 愛媛県の気象特性, https://www.jma-net.go.jp/matsuyama/tokusei/kishou_tokusei.html (2023年3月1日閲覧).