

令和2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3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 2 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	5
2.1.	航空機モニタリングシステム	5
2.2.	ヘリコプターの選定	7
2.3.	RSI システムの保守	9
3.	データ取得および解析方法	12
3.1.	データ取得方法	12
3.2.	キャリブレーションフライト方法	16
3.3.	解析のフロー	20
3.4.	空間線量率への換算方法	21
3.4.1	空気中核種および宇宙線由来の計数率	21
3.4.2	高度補正係数の算出方法	23
3.4.3	空間線量率への換算係数の算出方法	23
3.4.4	空間線量率への換算方法	23
3.5.	検出下限値	25
3.6.	不確かさ	25
3.7.	マッピング	25
3.8.	大気中のラドン子孫核種の弁別手法	27
3.8.1	ラドン子孫核種	27
3.8.2	ラドン弁別手法の理論	30
3.8.3	GI の高度補正方法	33
3.9.	天然放射性核種の濃度換算手法	35
4.	モニタリング結果と考察	38
4.1.	換算パラメータ	38
4.2.	地上における測定値との比較	44
4.3.	空間線量率	54
4.4.	天然の放射性核種濃度	66
4.5.	ラドン弁別法の適用結果	80
4.5.2.	パラメータ (RI および GI) の決定	80
4.5.2.	従来手法との比較	82
4.5.2.	ラドン弁別手法の適用	83
4.5.2.	ラドン弁別手法におけるパラメータ設定方法の再検討	92
4.5.2.	再設定したパラメータの適用	94
4.6.	放射性セシウムの沈着量	98

5.	無人飛行機による放射線モニタリングを想定した要素技術試験.....	100
5.1.	原子力災害時における無人機運用の課題.....	100
5.2.	無人機の開発状況.....	102
5.3.	Penguin C のカタログ性能.....	103
5.4.	フライト試験の概要.....	107
5.4.1.	フライト試験までの流れ.....	108
5.4.2.	フライト試験を通じた考察.....	118
5.5.	放射線検出器の搭載方法の検討.....	124
6.	まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理.....	129
	参考文献.....	135

Table list

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL	3
Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧	17
Table 3-2 機体とシステムの組み合わせと平均的な空气中核種由来の計数率および採用した CR-index	22
Table 3-3 ラドン子孫核種の放出する γ 線	29
Table 3-4 天然の放射性核種濃度への換算パラメーター一覧	37
Table 4-1 2020 年度取得した AF データー一覧	41
Table 4-2 2020 年度取得した CD データー一覧	42
Table 4-3 換算パラメーターのまとめ	43
Table 4-4 RI および GI の一覧	80
Table 4-5 バックグラウンド航空機モニタリングにおける RI および GI の一覧	93
Table 4-6 再設定前後の RI および GI	93
Table 5-1 UAV Factory における平均故障間隔計算時の事故分類	105
Table 5-2 Penguin C 機体のカタログスペック	106
Table 5-3 Penguin C 周辺機器のカタログスペック	106
Table 5-4 2020 年に実施したフライト試験	107
Table 5-5 試験 No. 20-01 におけるフライト No. FU1001 のフライト試験の状況	110
Table 5-6 2020 年フライト試験時のデーター一覧	117
Table 5-7 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	119
Table 5-8 Penguin C の TCP/IP 通信を用いた映像転送テストの結果	128

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.....	4
Fig. 2-1 RSI システムのブロック図	6
Fig. 2-2 RSI システムの写真.....	6
Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧	7
Fig. 2-4 美浜・敦賀周辺のモニタリングに使用した機体	8
Fig. 2-5 近大炉・京大炉周辺のモニタリングに使用した機体.....	8
Fig. 2-6 システムの半値幅および Gain の変動 (美浜・敦賀 RSI 3).....	10
Fig. 2-7 システムの半値幅および Gain の変動 (近大炉・京大炉 RSI 3)	11
Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (美浜・敦賀).....	13
Fig. 3-2 予定したフライトの測線 (近大炉・京大炉).....	14
Fig. 3-3 フライトイメージ.....	15
Fig. 3-4 上空からの測定範囲イメージ	15
Fig. 3-5 テストラインフライトのイメージ	17
Fig. 3-6 テストラインおよびテストポイントの場所 (美浜・敦賀).....	18
Fig. 3-7 テストラインおよびテストポイントの場所 (近大炉・京大炉).....	18
Fig. 3-8 テストポイントフライトのイメージ.....	19
Fig. 3-9 宇宙線フライトのイメージ.....	19
Fig. 3-10 空気中核種フライトのイメージ	19
Fig. 3-11 解析のフロー	20
Fig. 3-12 RSI システムにおける地上で取得した γ 線スペクトルと海上でのスペクトル例	22
Fig. 3-13 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例	22
Fig. 3-14 IDW に入力するパラメータとマップの関係.....	27
Fig. 3-15 ウラン系列およびトリウム系列	29
Fig. 3-16 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況	32
Fig. 3-17 大気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ	32
Fig. 3-18 計算体系のイメージ	34
Fig. 3-19 計算体系のベンチマーク	34
Fig. 3-20 シミュレーションによる測定高度と GI の関係.....	34
Fig. 3-21 天然の放射性核種によるピーク解析例	36
Fig. 3-22 天然の放射性核種別の高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション).....	36
Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例.....	38
Fig. 4-2 地上測定による空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) (美浜・敦賀).....	39
Fig. 4-3 地上測定による空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) (近大炉・京大炉).....	40
Fig. 4-4 地上における測定点 (美浜・敦賀).....	45
Fig. 4-5 地上における測定点 (近大炉・京大炉).....	46
Fig. 4-6 地上測定による空間線量率との比較 (美浜・敦賀)	47

Fig. 4-7 地上測定による空間線量率との比較 (近大炉・京大炉).....	47
Fig. 4-8 地上測定による空間線量率との比較 (全データ).....	48
Fig. 4-9 地上測定による空間線量率との比較 (川内).....	48
Fig. 4-10 地上測定による空間線量率との比較 (大飯・高浜).....	49
Fig. 4-11 地上測定による空間線量率との比較 (伊方).....	49
Fig. 4-12 地上測定による空間線量率との比較 (泊).....	50
Fig. 4-13 地上測定による空間線量率との比較 (柏崎刈羽).....	50
Fig. 4-14 地上測定による空間線量率との比較 (玄海).....	51
Fig. 4-15 地上測定による空間線量率との比較 (島根).....	51
Fig. 4-16 地上測定による空間線量率との比較 (浜岡).....	52
Fig. 4-17 地上測定による空間線量率との比較 (東通・六ヶ所).....	52
Fig. 4-18 地上測定による空間線量率との比較 (志賀).....	53
Fig. 4-19 空間線量率マップ (美浜・敦賀).....	62
Fig. 4-20 空間線量率マップ (近大炉・京大炉).....	63
Fig. 4-21 空間線量率マップの比較 (美浜・敦賀).....	64
Fig. 4-22 空間線量率マップの比較 (近大炉・京大炉).....	65
Fig. 4-23 ⁴⁰ K 濃度マップ (美浜・敦賀).....	68
Fig. 4-24 U 系列濃度マップ (美浜・敦賀).....	69
Fig. 4-25 Th 系列濃度マップ (美浜・敦賀).....	70
Fig. 4-26 ⁴⁰ K 濃度マップ (近大炉・京大炉).....	71
Fig. 4-27 U 系列濃度マップ (近大炉・京大炉).....	72
Fig. 4-28 Th 系列濃度マップ (近大炉・京大炉).....	73
Fig. 4-29 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (⁴⁰ K、美浜・敦賀).....	74
Fig. 4-30 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、美浜・敦賀).....	75
Fig. 4-31 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、美浜・敦賀).....	76
Fig. 4-32 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (⁴⁰ K、近大炉・京大炉).....	77
Fig. 4-33 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、近大炉・京大炉).....	78
Fig. 4-34 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、近大炉・京大炉).....	79
Fig. 4-35 海上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係.....	81
Fig. 4-36 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係.....	81
Fig. 4-37 空気中核種フライトから求めた NaI RSI システムの計数率とラドン弁別手法を適用し求めたラドン子孫核種起源の計数率の平均値の比較.....	82
Fig. 4-38 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (美浜・敦賀).....	85
Fig. 4-39 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (近大炉・京大炉).....	86
Fig. 4-40 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (美浜・敦賀).....	87
Fig. 4-41 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (近大炉・京大炉).....	88
Fig. 4-42 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ比較.....	89
Fig. 4-43 従来法とラドン弁別手法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較 (美浜・敦	

賀)	90
Fig. 4-44 従来法とラドン弁別手法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較 (近大炉・京大炉).....	91
Fig. 4-45 再設定後の NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係	93
Fig. 4-46 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ比較 (再設定後).....	96
Fig. 4-47 従来法と再設定後のラドン弁別手法を用いた空間線量率と地上測定値との比較	97
Fig. 4-48 放射性セシウム沈着量マップ	99
Fig. 5-1 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機システムのイメージ...	101
Fig. 5-2 原子力発電所事故を例にした対応シミュレーション.....	101
Fig. 5-3 代表的な無人機の概観とスペック	103
Fig. 5-4 Penguin C の概観	105
Fig. 5-5 FTA 解析例	108
Fig. 5-6 安全教育時の状況.....	109
Fig. 5-7 フライト前機能確認状況	109
Fig. 5-8 データ通信試験	110
Fig. 5-9 フライト試験軌跡例 (試験 No. 20-01 におけるフライト No. FU1001)	111
Fig. 5-10 フライトログ例 (試験 No. 20-01 におけるフライト No. FU1001).....	112
Fig. 5-11 フライト試験風景 (試験 No. 20-01 におけるフライト No. FU1001)	116
Fig. 5-12 CoPilot 操作画面	120
Fig. 5-13 正常位置にあるパラシュートカバーピン	120
Fig. 5-14 CoPilot 動翼インジケーター	121
Fig. 5-15 プリフライトチェックにおけるエンジンチェック箇所.....	122
Fig. 5-16 警告表示箇所 (左四角枠).....	123
Fig. 5-17 耐久テスト及び電源テストに用いた D-P1 の概要	124
Fig. 5-18 通信テストに用いた D-P2 の概要	125
Fig. 5-19 Penguin C を用いた放射線計数率測定の結果.....	127
Fig. 5-20 フライト中の Penguin C からの供給電圧測定結果	128
Fig. 6-1 管制空域に係る情報 (美浜・敦賀).....	132
Fig. 6-2 管制空域に係る情報 (近大炉・京大炉).....	133

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10年経過し、継続的な航空機モニタリングを実施しつつ、手法の改善および体制の整備を行ってきた¹⁾⁻¹⁵⁾。

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およ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¹⁶⁾。

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>

(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¹⁷⁾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・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およ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環境で行っているモニタリングは、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測定・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¹⁸⁾。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、ウランおよ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タル岩) においてそれら元素は比較的高濃度である^{18),19)}。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²⁰⁾について Fig. 1-1 に示す。例えば、このような天然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。バックグラウンドは、 γ 線エネルギースペクトルから除去する手法が考えられるが、スペクトル弁別には計数を一定程度蓄積する必要がある、一般的に時間がかかる。一方、事前にバックグラウンドを調査しておくこと、実際の事故時に迅速かつ正確にバックグラウンドを減算することができる。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およ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あらかじめ取得しておくことは重要である。

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²¹⁾⁻²³⁾。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²⁴⁾⁻²⁶⁾。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²⁴⁾。無人飛行機の特徴は、長距離通信での無人飛行が可能および航続時間が長いことが挙げられ、現在、原子力規制庁が実施してい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、人員の被ばく線量低減に資すると考えられる。

これまでの一連の受託研究成果は以下の通りである。平成 27 年度 (2015 年度) には、鹿児島県にある九州電力川内原子力発電所 (以下、川内) 周辺の $3 \text{ km} \sim 80 \text{ km}$ 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、天然の放射性核種の評価手法等について確立した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) および愛媛県にある四国電力伊方発電所 (以下、伊方) 周辺 $3 \text{ km} \sim 80 \text{ km}$ 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 (以下、柏崎刈羽) およ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) および静岡県にある中部電力浜岡原子力発電所 (以下、浜岡) 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 (以下、東通・六ヶ所) および石川県にある北陸電力志賀原子力発電所 (以下、志賀) 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、機器の選定および仕様の確認のためのフライト試験を実施した¹⁵⁾。

本報告書では、令和 2 年度 (2020 年度) に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) およ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により得られた測定結果を報告する。また、無人飛行機を用いた原子力防災への運用技術開発の一環として、本年度は機体の運用を慣熟することを目的としたフライト試験および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た。本試作機を搭載したフライトを実施することで得られたデータおよ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	

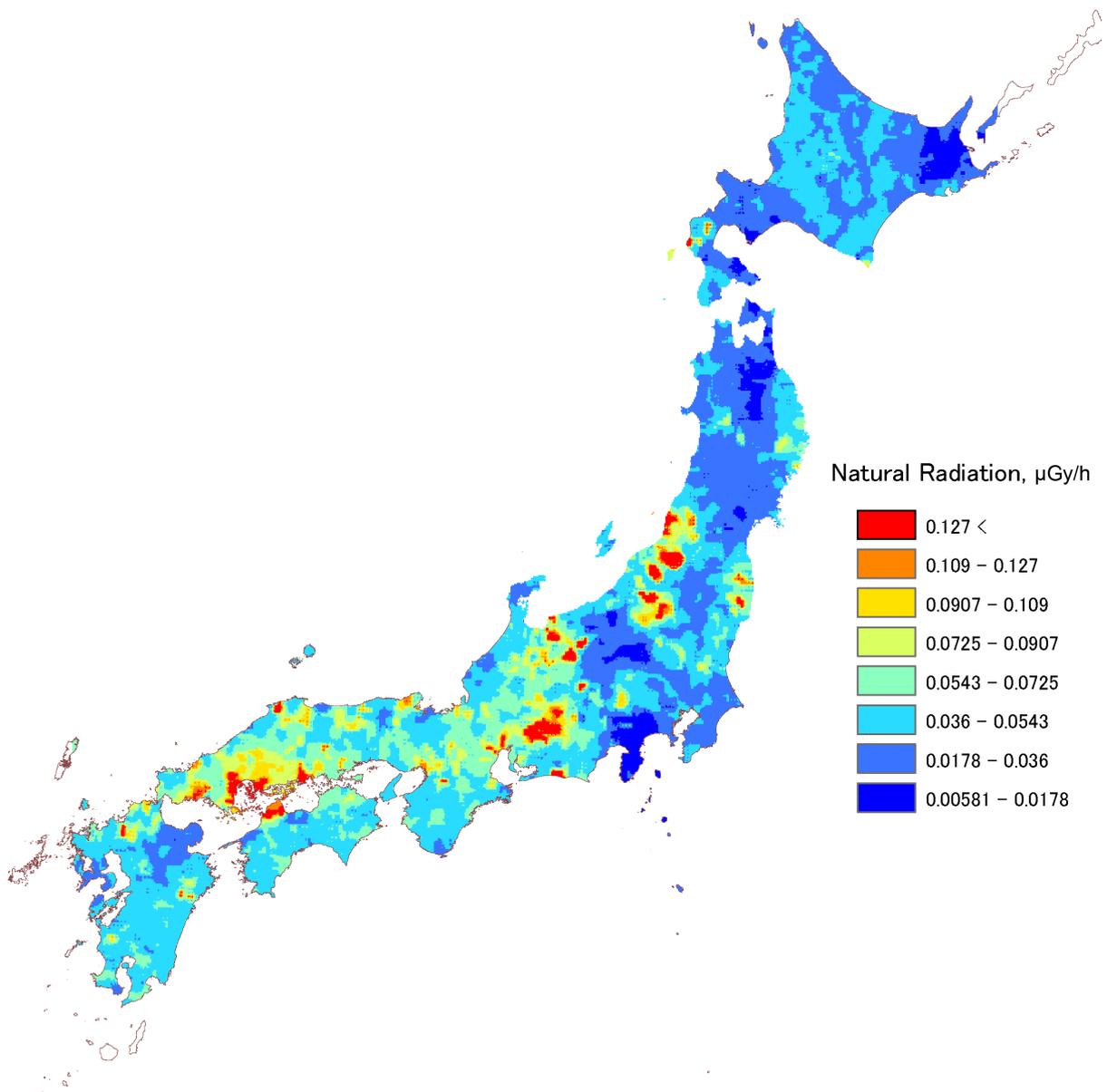


Fig. 1-1 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果
(日本地質学会ホームページ²⁰⁾より)

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 シンチレーション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 Solution Inc. (RSI, Canada)製のシステム (以下、RSI システム) は、原子力規制庁の所有する、機内に装着するタイプの航空機モニタリング機器である。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 (Detector) には、2'×4'×16'の NaI シンチレーション検出器 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)。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、原子力規制庁が所有する機器は複数システムあり、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、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 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 QZNAV) 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 で取得された緯度およ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 で取得された緯度および経度に置換する等の措置を行う。

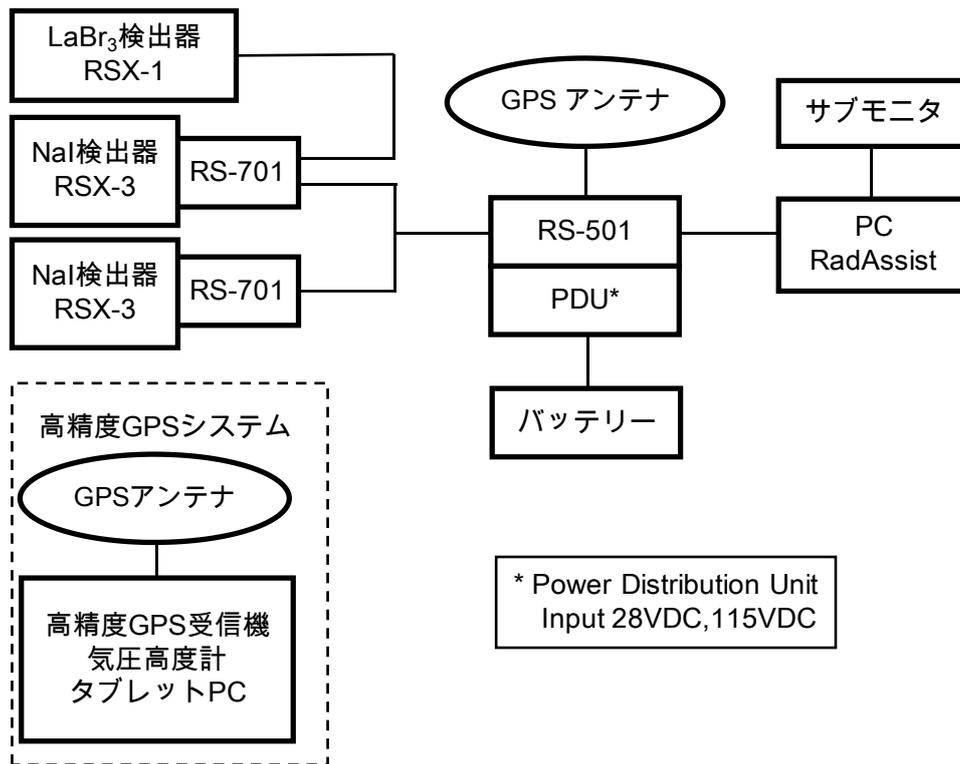


Fig. 2-1 RSI システムのブロック図

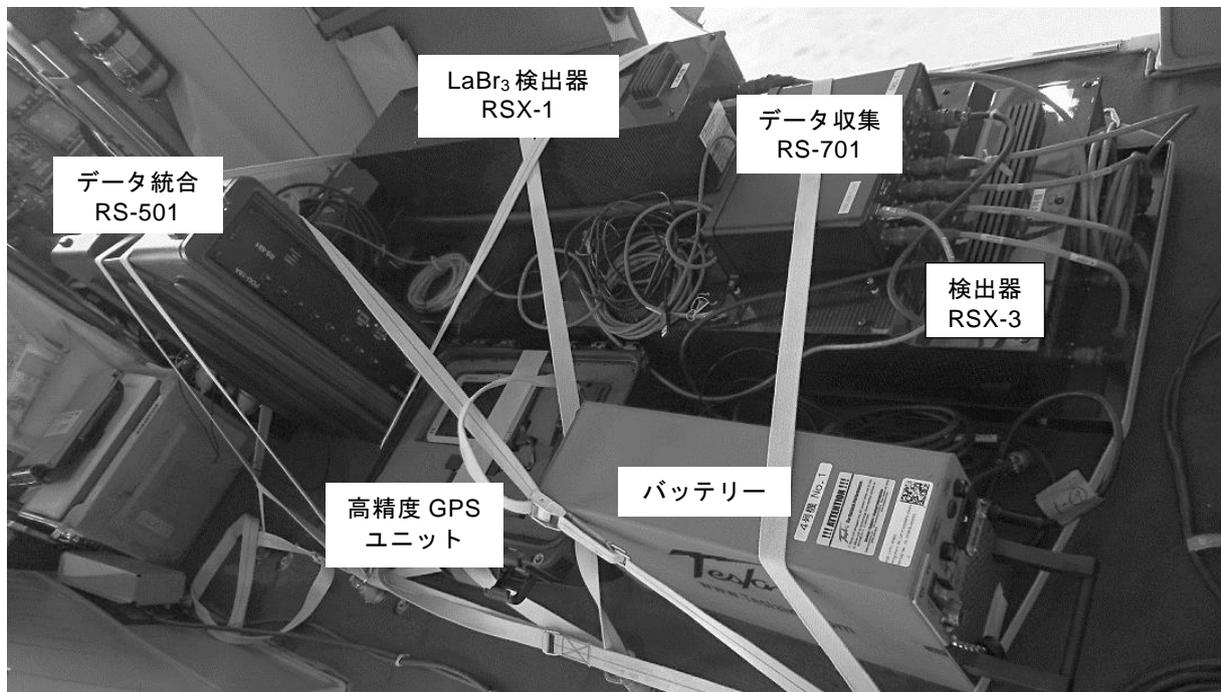


Fig. 2-2 RSI システムの写真

2.2. ヘリコプターの選定

RSIシステムは、機内に搭載するタイプであるため、機体(ヘリコプター)を選ばないというメリットはあるが、ヘリコプターの機底に燃料タンクがある場合、燃料タンクの材料および燃料による放射線の遮へいを無視できず評価が難しくなる。そこで、その評価に伴う誤差の混入を避けるためRSIシステムを使用できる機体は、機底に燃料タンクのない機種に限定している。使用できる機体について、Fig. 2-3 に示す。2020年度は、機体繰りの都合から、Bell 412 を使用した。Fig. 2-4 に使用した機体について示す。



Bell 430
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



Bell 412
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



AS 332
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 美浜・敦賀周辺のモニタリングに使用した機体
(Bell 412 JA9616)**



**Fig. 2-5 近大炉・京大炉周辺のモニタリングに使用した機体
(Bell 412 JA6928)**

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 および 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 ^{208}Tl の 2,614 keV のピークに対する半値幅 (FWHM) 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 のピークに対する半値幅については、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が、2020 年度は再調整を行う必要性が生じなかった。本報告における半値幅とアンプのゲインの推移について Fig. 2-6、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。アンプのゲインに大きな変動は見られなかったものの、使用日数が長くなるにつれ若干上昇傾向にある場合があった。これは、気温の低下により検出器の信号が小さくなることに起因する。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。これらのデータは RSI システムの保守を行う際に参考となる。

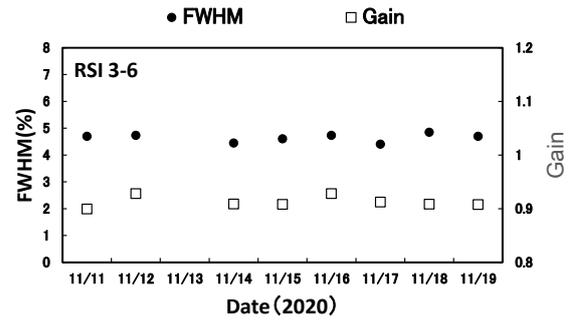
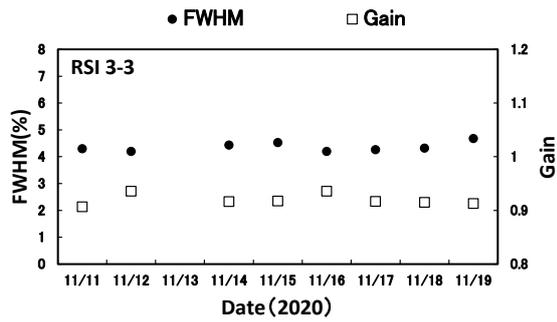
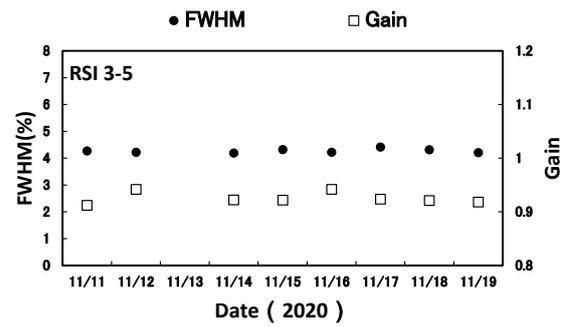
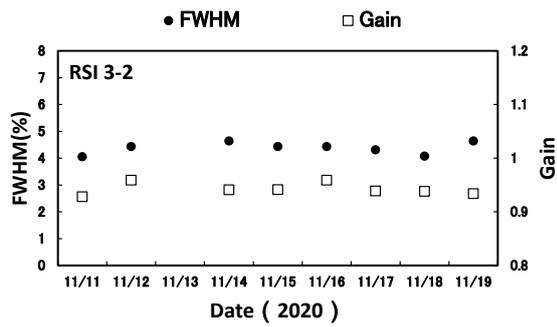
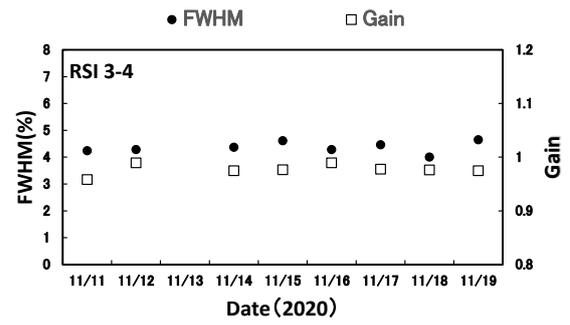
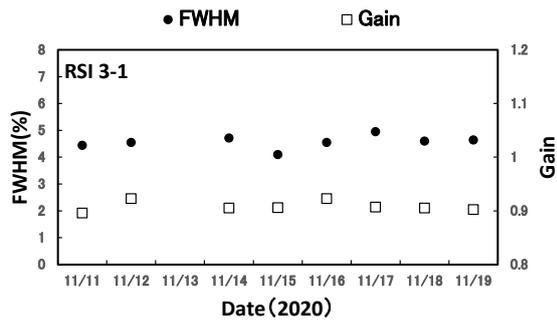


Fig. 2-6 システムの半値幅および Gain の変動 (美浜・敦賀 RSI 3)

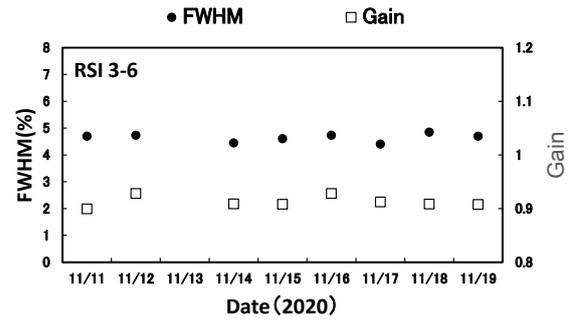
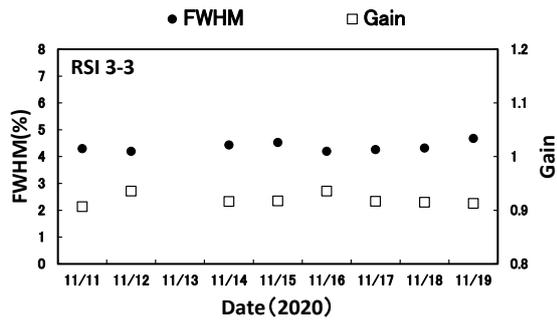
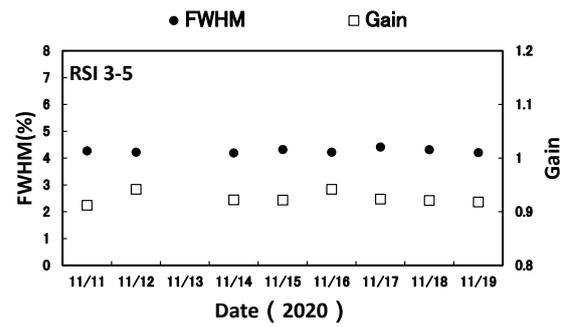
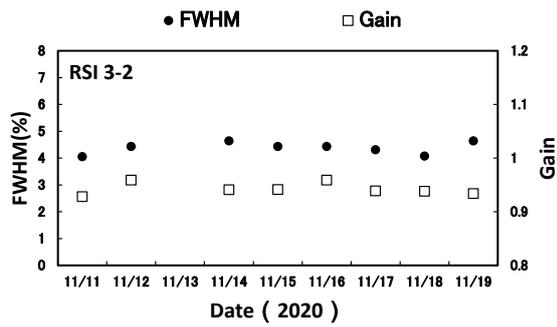
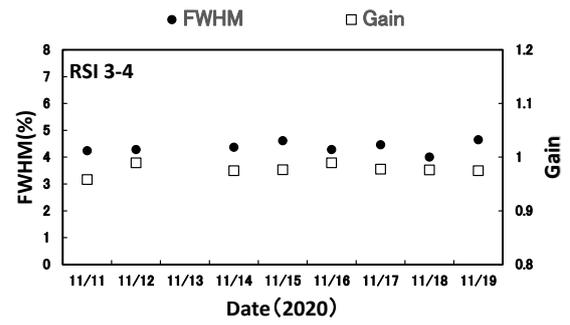
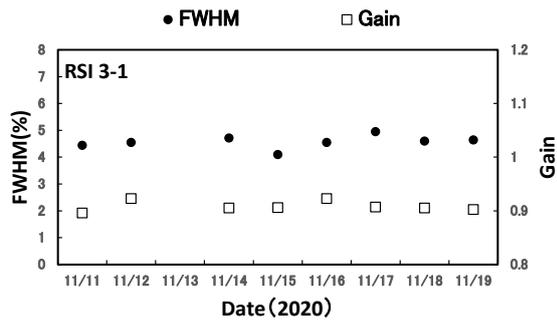


Fig. 2-7 システムの半値幅および Gain の変動 (近大炉・京大炉 RSI 3)

3. データ取得および解析方法

3.1. データ取得方法

データは、下記のようなフライト条件で取得した。この測定条件は、気象条件や地形の高度・勾配によって若干変化する。測定データは、1秒ごとにGPSの位置情報と検出器の γ 線のスペクトルを記録した。Fig. 3-1 (美浜・敦賀)、Fig. 3-2 (近大炉・京大炉) に測定の予定測線について示す。なお、両測定エリアの原子力施設等から半径80 km 圏内における測線の内、2016年度に実施した大飯・高浜におけるバックグラウンドモニタリング測線と重複する箇所は除いた。Fig. 3-3 にデータ取得のイメージを示す。また、美浜・敦賀については、航空機による測定の拠点として若狭ヘリポートを使用し、必要に応じてヘリコプターへの燃料給油地点として福井空港および名古屋空港を利用した。近大炉・京大炉については、航空機による測定の拠点として奈良県ヘリポートおよび南紀白浜空港を使用し、必要に応じてヘリコプターへの燃料給油地点として八尾空港を利用した。

[フライト条件]

- 速度：130 km/h～180 km/h (=70 kn～95 kn)
- 対地高度：300 m (=1,000 ft)
- 測線間隔：5 km

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

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

測定範囲のイメージについて Fig. 3-4 に示す。

[測定に要した期間]

- 美浜・敦賀: (航空機による測定) 2020年7月22日*～8月10日 (のべ14フライト)
(地上測定) 2020年7月31日～8月9日

*天候不良により測定開始日が遅延し、実際にフライトを開始したのは8月1日からである。本報告では、測定開始日を8月1日として取り扱うこととする。

- 近大炉・京大炉: (航空機による測定) 2020年11月12日～11月19日 (のべ11フライト)
(地上測定) 2020年11月12日～11月24日



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。)

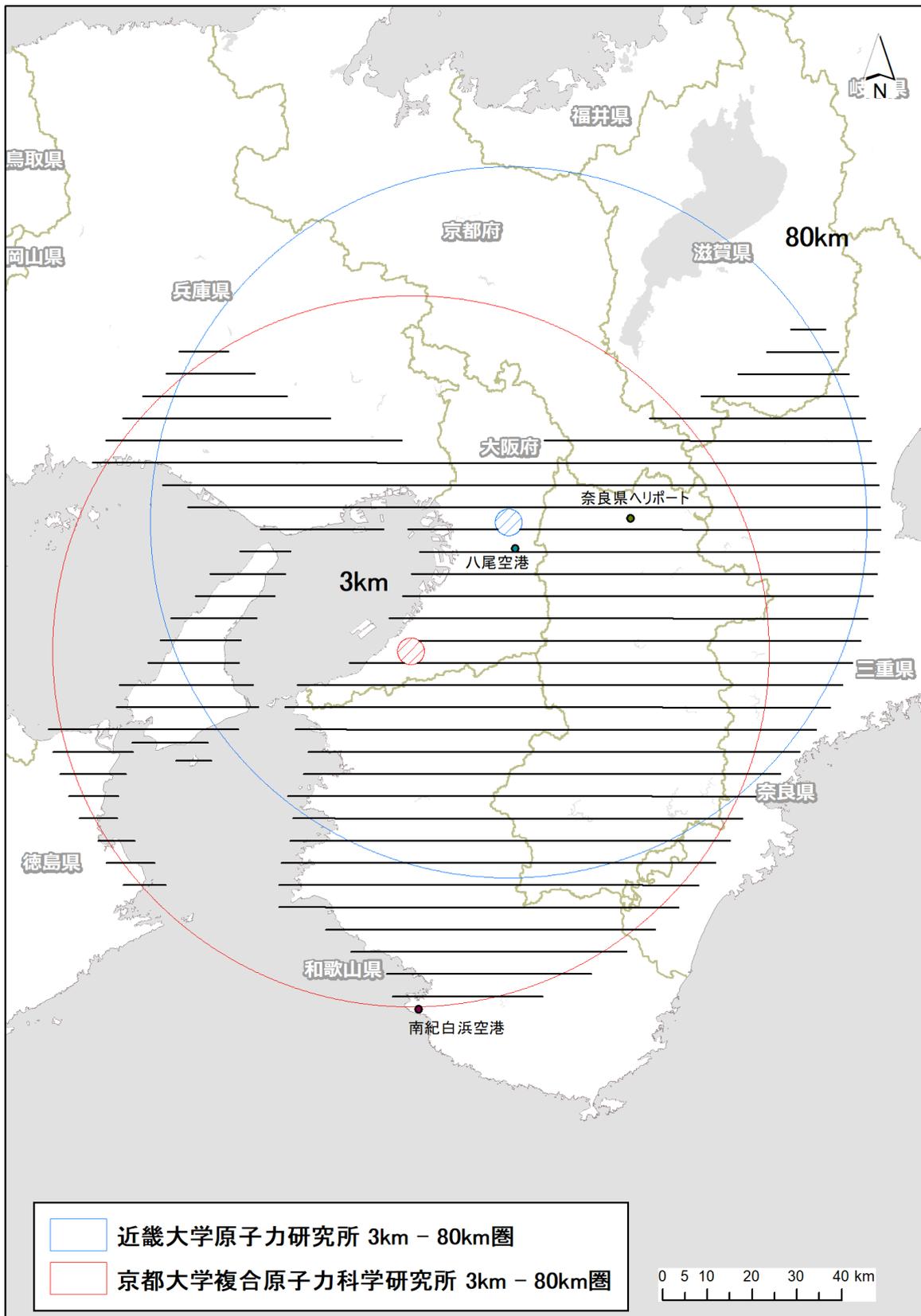


Fig. 3-2 予定したフライトの測線 (近大炉・京大炉)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

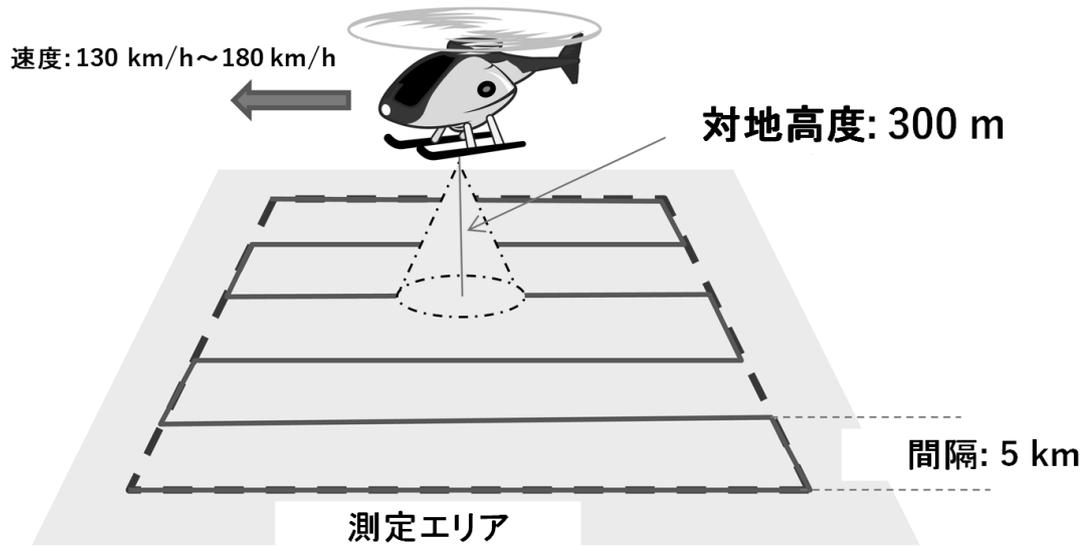


Fig. 3-3 フライトイメージ

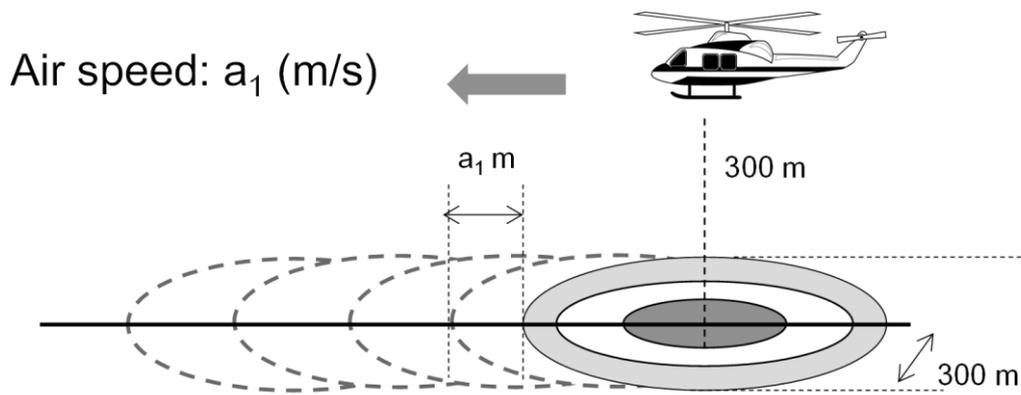


Fig. 3-4 上空からの測定範囲イメージ

3.2. キャリブレーションフライト方法

上空で取得したデータを地表面から 1 m の高さの放射線量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 Table 3-1 に示す。

・テストラインフライト

高度を補正するため、実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor: $AF (m^{-1})$) を求めるためのフライトである。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させながら (300 m、450 m、600 m、750 m、900 m、1,500 m) フライトを実施する。得られたデータは対地高度ごとに平均化し、対地高度と計数率のグラフを作成し、指数近似の傾きによって、高度を補正する。テストラインフライトのイメージを Fig. 3-5 に示す。テストラインフライトの実施場所は、美浜・敦賀においては岐阜県安八郡輪之内町周辺、近大炉・京大炉においては和歌山県岩出市周辺とした。また、テストラインとして選定した具体的な場所について Fig. 3-6 (美浜・敦賀)、Fig. 3-7 (近大炉・京大炉) 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い場所および地形の平坦な地点 (テストポイント) を選定し、そこから半径 1,000 m の範囲内における上空でホバリングすることで、基準高度 (300 m) における地上の空間線量率換算係数 (Conversion factor of Dose-rate: $CD (cps/[\mu Sv/h])$) を求めるためのフライトである。テストポイントでは NaI シンチレーション式サーベイメータ (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) を人手により、半径 1,000 m の範囲内で 60 ポイントを目安に行う。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である。テストポイントとして選定した具体的な場所を Fig. 3-6 (美浜・敦賀)、Fig. 3-7 (近大炉・京大炉) に半径 1,000 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

宇宙線の影響を全計数率から差し引くために、海上を約 300 m~2,400 m まで上昇し、データを取得するものである。宇宙線フライトのイメージを Fig. 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。宇宙線フライトは美浜・敦賀においては若狭湾周辺、近大炉・京大炉においては和歌浦湾周辺で実施した。

・空気中核種フライト

地上からの放射線の影響が極めて少ないと考えられる対地高度約 900 m に保ち、約 3 分のフライトを継続し、機体および検出器周辺の空気中に存在する放射性核種由来の γ 線計数率を取得する。空気中核種フライトのイメージを Fig. 3-10 に示す。空気中核種フライトは美浜・敦賀においては岐阜県広神戸町周辺の陸上および福井空港周辺の海上、近大炉・京大炉においては奈良県ヘリポート周辺の陸上および南紀白浜空港周辺の海上で実施した。

Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧

名称	目的	方法	頻度
テストラインフライト	高度を補正するための空気減弱係数を算出	指定のテストライン上で対地高度 (300 m、450 m、600 m、750 m、900 m、および 1,500 m) を変化させてフライト	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	指定の地点上で、対地高度 300 m で 3 分ホバリング	測定期間中に少なくとも 2 回
宇宙線フライト	宇宙線の影響を調査	海上を海拔高度 300 m ~2,400 m まで上昇	測定期間中に少なくとも 2 回
空气中核種フライト	機体および検出器周辺の空气中に存在する放射性核種の影響を調査	対地高度 900 m を 3 分	毎日

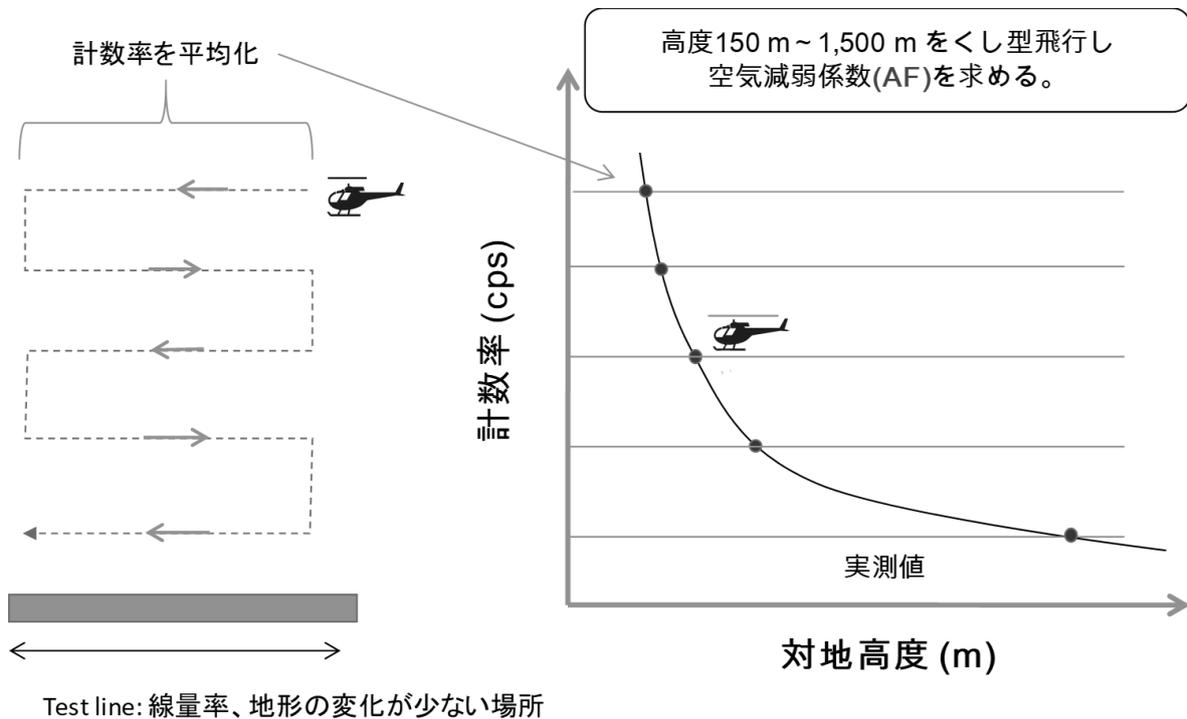


Fig. 3-5 テストラインフライトのイメージ



Fig. 3-6 テストラインおよびテストポイントの場所 (美浜・敦賀)

(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。)

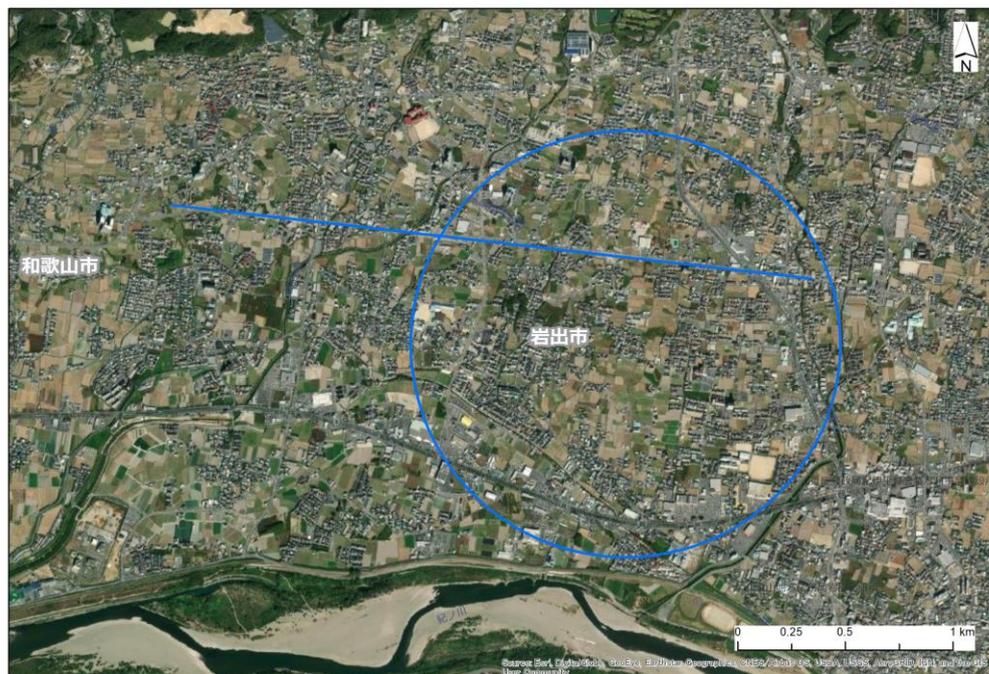
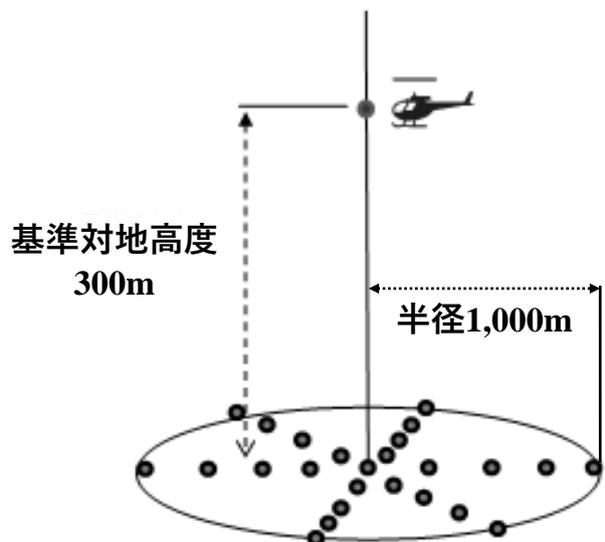


Fig. 3-7 テストラインおよびテストポイントの場所 (近大炉・京大炉)

(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。)



60ポイント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($\mu\text{Sv/h}$)と基準対地高度(300m)の計数率(cps)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

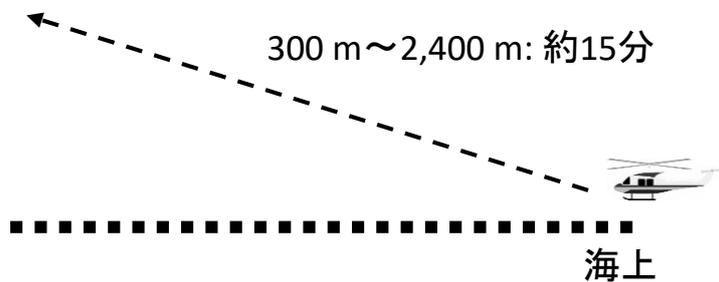


Fig. 3-9 宇宙線フライトのイメージ

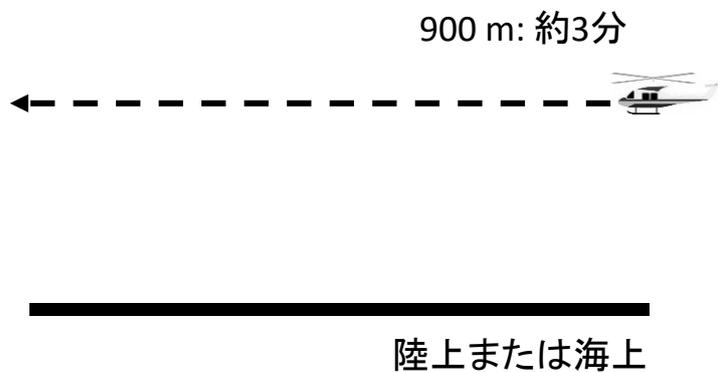


Fig. 3-10 空気中核種フライトのイメージ

3.3. 解析のフロー

本測定法により、計数される放射線は主に以下の4種類に分けられる。

- ① 天然の放射性核種からの γ 線
- ② 自己汚染
- ③ 宇宙線
- ④ 放射性セシウムの γ 線

本報告で測定する地域において、放射性セシウムの影響は無視できるため、①を評価するためには、②および③起源の計数率を測定データ(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。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。

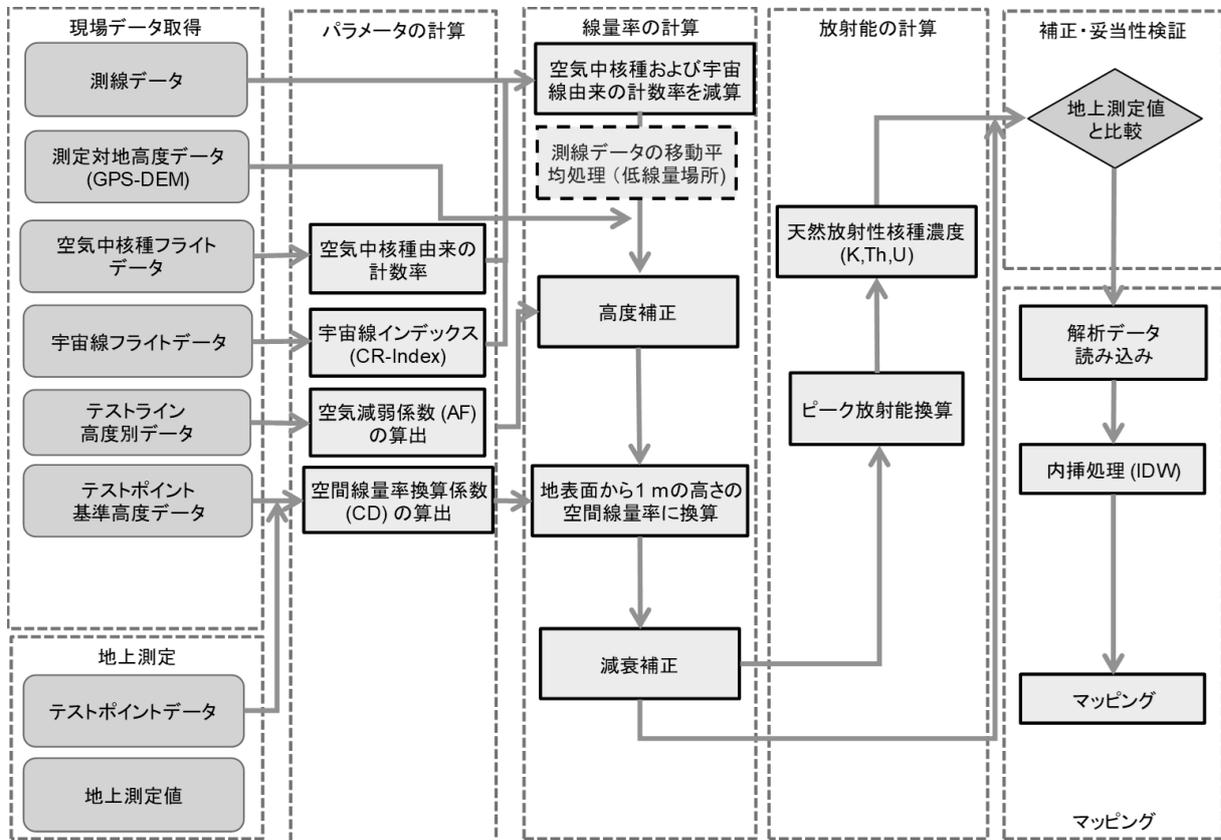


Fig. 3-11 解析のフロー

3.4. 空間線量率への換算方法

3.4.1 空気中核種および宇宙線由来の計数率

航空機モニタリングにおいて、空気中核種および宇宙線由来の計数率は測定データ（全計数率）から減算する必要がある。これらの減算方法について示す。空気中核種由来の計数率については、地上からの放射線が届かないと考えられる 900 m 以上での空気中核種フライトのデータ（もしくは海上でフライトした際のデータ）を用いる。地上で測定したスペクトルと海上で取得したスペクトルの例を Fig. 3-12 に示す。また、平均的な空気中核種由来の計数率を Table 3-2 に示す。

これまでの経験⁵⁾⁻¹⁵⁾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。宇宙線起因の計数率は、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）で計数されるが、²⁰⁸Tl が放出する 2,614 keV の γ 線およびその散乱線の影響により、2,614 keV 以下の計数において、宇宙線による計数を弁別することは難しい。そこで、宇宙線の影響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。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。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、50 m～2000 m の高度で取得したデータの 2,800 keV を超える γ 線の計数率をプロットしたものである。このように、海拔高度と計数率は正の相関にあり、計測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ことから、CR-index を機体と検出器の組み合わせごとに設定した。その後、実際に測定したスペクトルの 2,800 keV 以上の計数率から CR-index を用いて全エネルギーにおける宇宙線起因の計数率を算出し、全計数率から差し引いた。実測したデータを基に算出した CR-index について Table 3-2 に示す。これらのパラメータを実際の解析に使用し、空気中核種および宇宙線由来の計数率の減算を行った。

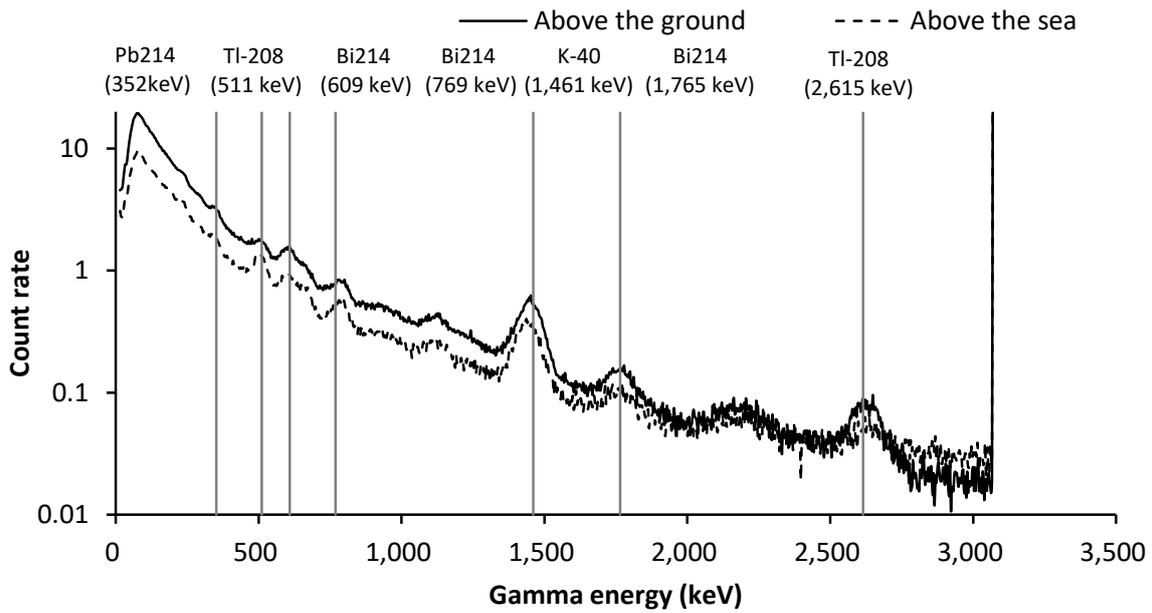


Fig. 3-12 RSI システムにおける地上で取得した γ 線スペクトルと海上でのスペクトル例

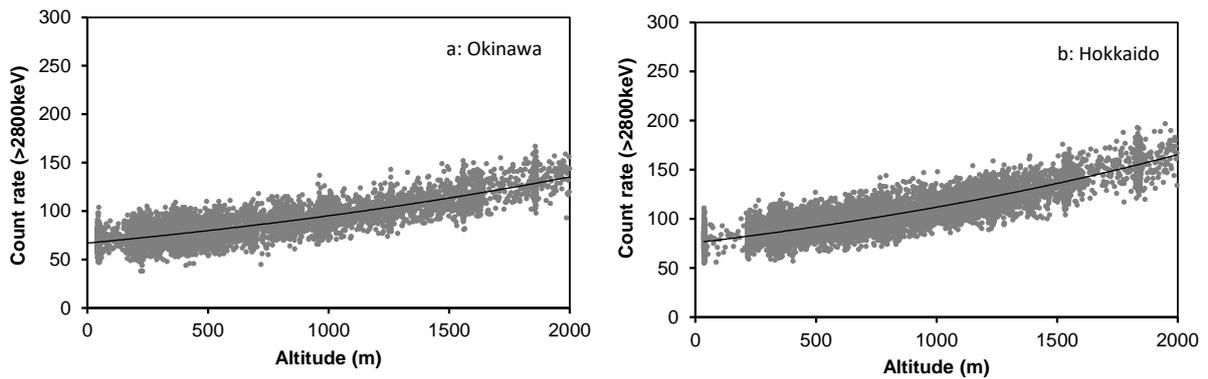


Fig. 3-13 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例

(a: 沖縄海域, b: 北海道海域)

Table 3-2 機体とシステムの組み合わせと平均的な空气中核種由来の計数率および採用した CR-index

Measurement area	Fiscal year	System	ヘリコプター	運航会社	空气中核種由来の計数率(cps)	CR-index
Mihama Tsuruga	2020	RSI3	Bell 412 (JA9616)	AAC	420	3.67
Kindai Univ. Kyoto Univ.	2020	RSI3	Bell 412 (JA6928)	AAC	423	3.12
Fukushima	2020	RSI1	Bell 430 (JA05TV)	NNK	495	2.93
			Bell 412 (JA6767)	NNK	450	2.97
		RSI2	Bell 412 (JA6928)	AAC	430	2.97
			Bell 412 (JA6767)	NNK	505	2.97

※ NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

3.4.2 高度補正係数の算出方法

測定点における対地高度の補正を行うために、式 [1] により高度補正係数を求める。

$$HF = \exp(AF \times (H_{sd} - H_a)) \quad [1]$$

ここで、

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

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

H_{sd} : 基準高度 (300 m)

H_a : 対地高度 (GPS 高度 - DEM - ジオイド高)

対地高度の算出には、GPS で記録した楕円対地高度から、公開されている 10 m メッシュの数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM)²⁷⁾およびジオイド高²⁷⁾を差し引いて求めた*1。対地高度と対応する計数率データは、Microsoft Excel®上で散布図としてプロットし、指数関数フィッティングを行った近似曲線の傾きを AF とする。テストラインで取得したデータを基に AF を求めた。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の算出方法

ヘリコプターによる測定で取得した γ 線計数率から地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するために設定する換算係数 CD (cps/[μ Sv/h]) は、テストポイントの地上における測定点の平均値とその上空 300 m を 3 分間ホバリングして得られた計数率の平均値の比を取って求めた。地上測定値として実際には、3 分間のホバリングにおけるヘリの緯度および経度の平均値を求め、その地点から半径 500 m の円内における平均値を用いた。RSI システムは、機体の中に搭載するため、ヘリコプターの機底の遮へいにより、 CD は変化すると考えられることから、ヘリコプターの機種ごとに数値の設定が必要である。実際に使用した換算パラメータについては、4 章に詳述する。

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] および式 [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_{cos})

*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、測地的に定義されている海水面からの高さ (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。

- ② 式 [2] で用いられる、 C_{net} を算出するために、 C_{cos} に CR-index (I_{cos}) をかけて全エネルギー帯の計数率に対する宇宙線起源の計数率 (BG_{cos}) を計算する。
- 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 (BG_{air}) とする。
- ④ C_{all} から BG_{cos} と BG_{air} を差し引いた計数率を C_{net} とし、 CD および HF を用いて地表面から 1 m の高さの空間線量率 D を算出する。

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

ここで、

HF : 高度補正係数

CD : 空間線量率換算係数 (cps/[μ Sv/h])

$$C_{net} = C_{all} - BG_{cos} - BG_{air}$$

$$BG_{cos} = C_{cos} \cdot I_{cos}$$

および式 [1] を式 [2] に代入すると

$$D = (C_{all} - BG_{air} - BG_{cos}) \times \frac{1}{CD} \times \exp(AF \times [H_{sd} - H_m]) \quad [3]$$

となる。ここで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 (μ Sv/h)

C_{all} : 全計数率 (cps)

BG_{air} : 空气中核種起源の計数率 (cps)

CD : 空間線量率換算係数 (cps/[μ Sv/h])

AF : 空気減弱係数 (m^{-1})

H_{sd} : 基準高度 (300 m)

H_m : 測定高度 (m)

BG_{cos} : 宇宙線起源の計数率 (cps) (= $C_{cos} \times I_{cos}$ [C_{cos} : > 2800 keV の計数率; I_{cos} : CR index])

上空での計数率から地上への空間線量率へ換算する手順は、大まかに以下の手順となる。

- ① 全計数率から空气中核種由来の計数率および宇宙線由来の計数率を減算する。
- ② 高度補正：実際のフライト高度と基準高度とのずれにより生じる γ 線計数率の多寡を高度補正係数により補正する。
- ③ 空間線量率への換算： CD により地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算する。
- ④ スペクトル分析から天然の放射性核種濃度を算出する。

以下では、これら換算のための補正係数等を総称し「換算パラメータ」と呼ぶ。

3.5. 検出下限値

検出下限 (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、検出下限値を計算する。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下限値は BG_{air} と BG_{cos} に影響を受ける。 BG_{cos} はこれまでの測定結果⁵⁾⁻¹⁵⁾を見ると 200 cps~500 cps の範囲となり、 BG_{air} は約 400 cps 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、 $BG_{air} + BG_{cos} = 900$ cps として評価を行った。

一般的に、検出下限値を求める際には、バックグラウンド計数率 (N_B) の標準偏差 (σ) を式 [4] に示した Currie の式²⁸⁾に当てはめ、検出下限値 (N_D) を算出する。

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

ここで、 N_B を 900 cps とすると、 N_D は 142 cps となる。これに、RSI システムの標準的な CD (13,000 cps/[μ Sv/h]) から RSI システムによる空間線量率を計算すると、0.011 μ 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。
- ・ 測定高度の誤差：現在使用している GPS (Global Positioning System) には、衛星の位置等の状況により、高度情報において最大 30 m 程度の誤差が生じる。海拔高度の測定は GPS で実施しており、その誤差による不確かさが存在する。本誤差については、検証にまで至っておらず、今後の課題である。

3.7. マッピング

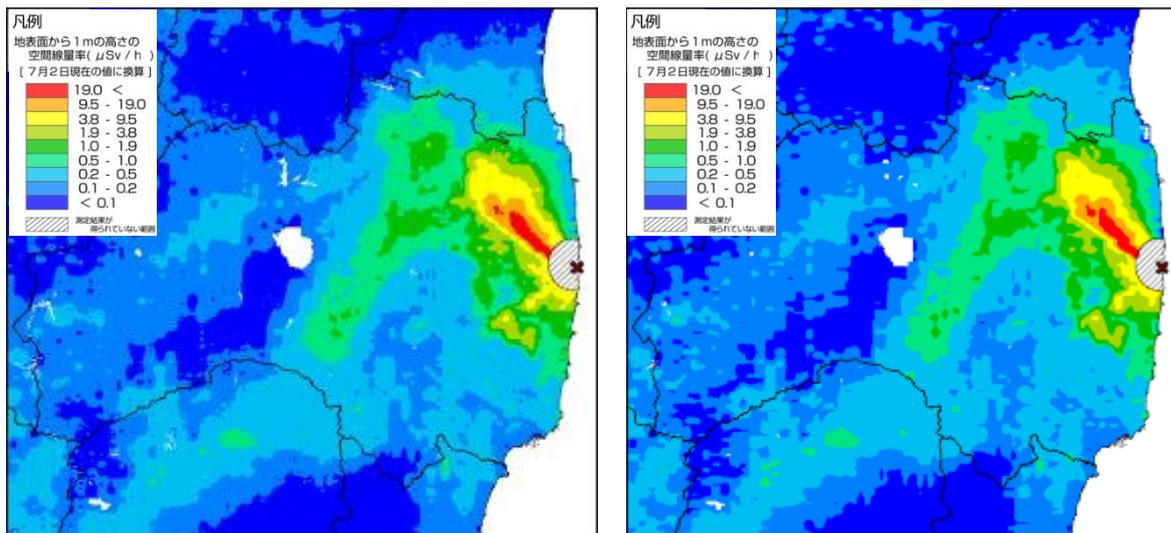
空間線量率や放射性物質のマッピングについては、国際原子力機関 (IAEA) から標準的な方法が示されている³²⁾。補間方法には、IDW (Inverse Distance Weighted: 逆距離加重法)、クリギング (Kriging)、スプライン (Spline)、Natural Neighbor 等の多くの方法が存在する。福島原子力発電所周辺の航空機モニタリングでは、2011 年 4 月 6 日~29 日にかけて実施された第 1 次の解析を担当した DOE が用いた IDW を踏襲している。IDW とはある補間地点の近傍にある複数のサンプル点の測定値を補間地点からサンプル点までの水平距離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、ある補間点における推定値は以下の式 [5] で表わされる²⁹⁾。

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

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り、最低値より小さくなることはない。また、IDW には複雑なパラメータ設定が不要である。必要となるのは、補間地点とサンプル点間の距離に応じて影響度を制御する乗数 λ と内挿処理の対象となるサンプル点数 s の2つである。IDW では λ と s の設定によって結果が異なってくるが、最良の値を決定するための基準が存在していない。 λ が大きいくほど、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。Fig. 3-14のa)と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。そこで、内挿においては測定対象のエリアを250 mメッシュに区切り、実測データから内挿しコンターマップを作成した。



a)乗数 2.3 対象地点数 180

b)乗数 2 対象地点数 12

*第3次航空機モニタリングの測定結果を使用

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. 大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 および Bi などの核種 (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/m^3 程度となっている³⁰⁾。これら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³¹⁾。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⁾。

ラドン子孫核種が放出する γ 線は、地殻にも同じ核種が存在するので、地上からの放射線との γ 線スペクトル上での弁別が困難である。また、放射性セシウムが放出する γ 線エネルギーに近いため、福島原子力発電所事故の影響を受けた地域近傍ではなおさら弁別が困難となる。Table 3-3 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への換算を高精度化する検討を 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～2019 年度に実施した発電所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)}。2020 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」と表記する。

ウラン (^{238}U) 系列

トリウム (^{232}Th) 系列

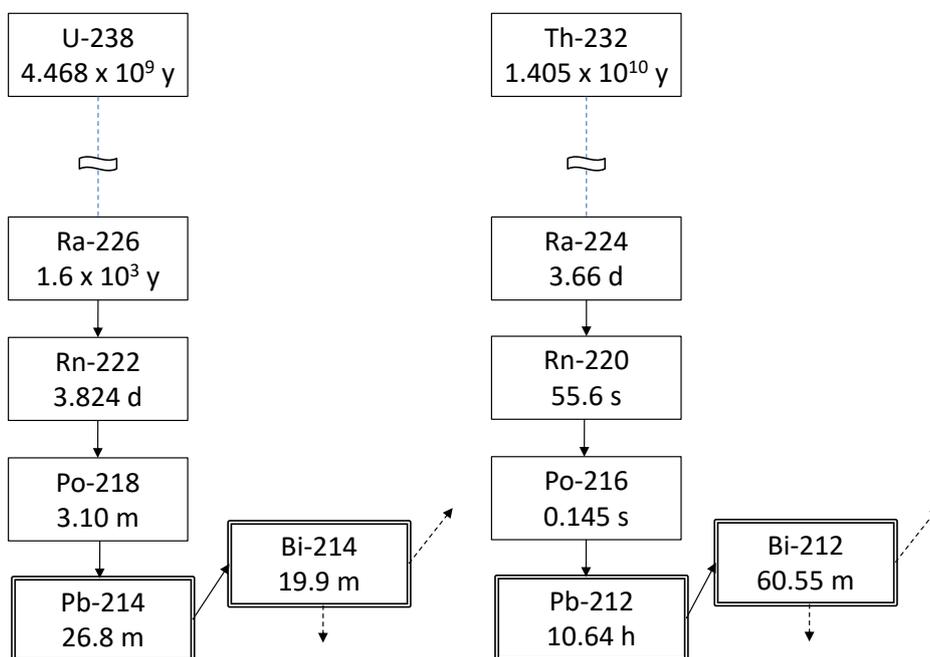


Fig. 3-15 ウラン系列およびトリウム系列

Table 3-3 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、地表面および地殻にも存在することから、 γ 線のエネルギーによって大気中のラドン子孫核種の影響と地上のラドン子孫核種の影響を弁別することは一般に難しい。また、 ^{134}Cs と ^{214}Bi は放出する γ 線エネルギーが似通っているため、福島原子力発電所事故の影響を受けた地域では弁別はさらに困難である。航空機モニタリングにおけるラドン子孫核種の影響を弁別する方法として、航空機モニタリング用の検出器以外にラドン子孫核種測定用の検出器を搭載し、その比較からラドン子孫核種の影響を弁別する方法が知られている³²⁾。

今回、ラドン子孫核種の影響を弁別する手法を検討するため、RSI製LaBr₃シンチレータ(3'×3')を用いた航空機モニタリング機器(以下、LaBr RSIシステム)を採用し、フライトデータの取得および換算パラメータの最適化を行った。採用したLaBr RSIシステムをヘリコプター内に搭載した状況についてFig. 3-16に示す。写真のように、地上からの放射線を遮へいすることを目的とし、通常用いているNaIシンチレーション検出器(NaI RSIシステム)の上方に配置した。

手法としては、空気中のラドン子孫核種からの放射線と地表面からの放射線の距離の差に着目する。Fig. 3-17にヘリコプター内の検出器と線源の位置関係のイメージについて示す。このように、大気中のラドン子孫核種と検出器の距離は地上の放射性核種からの γ 線と比べて近いいため、空気中ラドン子孫核種由来の γ 線はヘリコプター内の検出器で比較的検出されやすいと考えられる。また、空気中ラドン子孫核種由来の γ 線は検出器に等方向より放射されることから、LaBr RSIシステムの下方に置いたNaI RSIシステムの遮へいとしての影響は比較的小さい。一方、地上からLaBr RSIシステムに到達する γ 線は下方から飛来するため、NaI RSIシステムに比較的遮へいされやすいと考えられる。すなわち、大気中のラドン子孫核種を計測したNaI RSIシステムの計数率に対するLaBr RSIシステムの計数率の比(LaBr RSIシステム / NaI RSIシステム)は地上の放射性核種起源の計数率に対する比よりも大きくなると考えられる。

実際には、地上からの γ 線による影響のないと考えられる海上で取得したデータにおけるNaI RSIシステムの計数率に対するLaBr RSIシステムの計数率の比をラドンインデックス(RI)と定義する。一方、ラドン子孫核種の影響が無視できるほど、地上における放射性核種からの γ 線による影響が大きなエリアで取得したデータにおけるNaI RSIシステムの計数率に対するLaBr RSIシステムの計数率の比をグラウンドインデックス(GI)と定義する。これら2つの定数を利用してラドン子孫核種の影響を弁別する。本手法はNaI RSIシステムにおける全計数率およびLaBr RSIシステムにおける全計数率が式[6]および式[7]で表すことができるという仮定に基づいている。また、先述したGIおよびRIは式[8]および式[9]で表される。式[6]~[9]をNaI RSIシステムにおける地上の放射性核種由来の計数率($C_{\text{NaI},g}$)について解くと、式[10]が導かれる。

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

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

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

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

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

ここで、

$C_{NaI,all}$: NaI RSI システムの 30 keV～2800 keV における全計数率

$C_{NaI,g}$: NaI RSI システムの 30 keV～2800 keV における地上の放射性核種由来の計数率

$C_{NaI,a}$: NaI RSI システムの 30 keV～2800 keV における空中の放射性核種由来の計数率

$C_{LaBr,all}$: LaBr RSI システムの 50 keV～700 keV における全計数率

$C_{LaBr,g}$: LaBr RSI システムの 50 keV～700 keV における地上の放射性核種由来の計数率

$C_{LaBr,a}$: LaBr RSI システムの 50 keV～700 keV における空中の放射性核種由来の計数率

GI (グラウンドインデックス): 地上で取得したデータにおける NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比

RI (ラドンインデックス): 海上で取得したデータにおける NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比

である。

ここで重要なパラメータである RI および GI については、機体の遮へい状況により異なるため、陸上や海上で実際にデータを取得し設定した。使用したパラメータについては、5.4.2 項に詳述する。

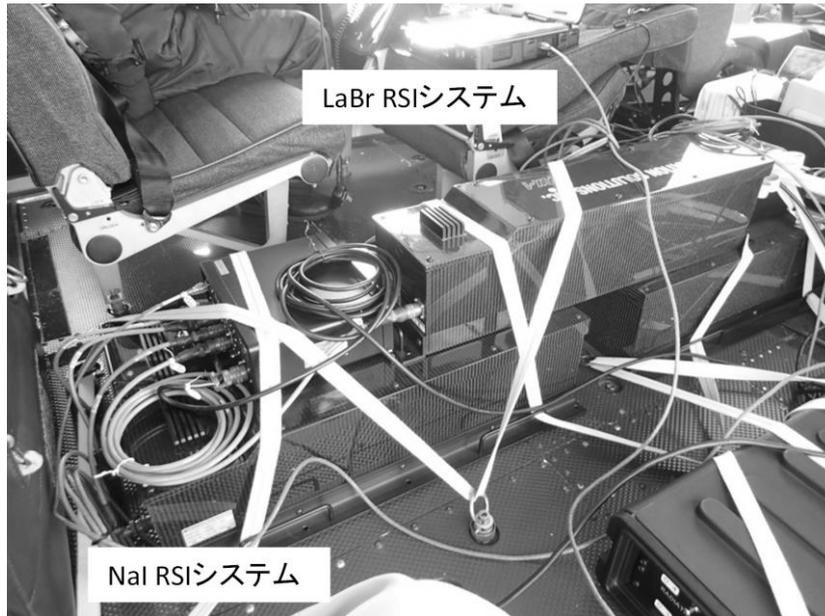


Fig. 3-16 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況

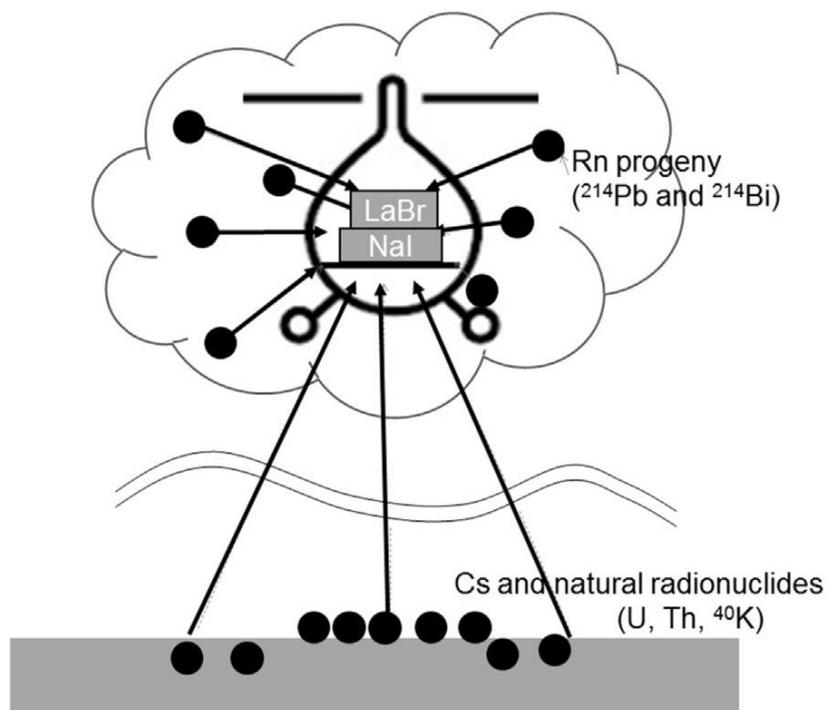


Fig. 3-17 大気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ

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、実測のデータ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ため、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。

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 EGS5³³⁾ (Electron Gamma Shower Version 5) とし、ヘリコプター内の検出器の体系を簡易的に Fig. 3-18 のように模擬した。計算体系の妥当性については、正面およ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を計算した結果と、実際に有人のヘリコプターに検出器 (NaI RSI システム) を搭載した状態で、点線源 (¹³⁷Cs) を照射することによって求めた検出器のレスポンスの結果を比較してベンチマークとした。Fig. 3-19 に計算結果と実測結果の比と線源の照射方向の関係について示す。このように概ねよく一致している。一部値が外れている部分は、計算体系に考慮され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。本体系に対し、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 および 600 m) との関係性を計算により評価した。なお、実際の計算では NaI RSI システムと LaBr RSI システムについてそれぞれ実施した。LaBr RSI システムの計算時には、下部の NaI RSI システムを体系に加えた。線源の模擬体系は、以下の条件を設定した。土壌中の天然放射性核種濃度は、全国的な地上における測定結果から平均値を採用した⁵⁷⁾。

- ・ 空気 (1 km × 1 km × 1.3 km) と土壌 (深さ 1 m, 密度 $\rho: 1.6 \text{ g/cm}^3$)
- ・ 山等の地表面の凹凸を再現せずに地面は平坦とする。
- ・ 地面中の自然放射性核種 (U 系列、Th 系列、⁴⁰K) は水平方向および深さ方向に一様分布する。
- ・ 地面中の人工放射性核種 (¹³⁴Cs、¹³⁷Cs) は表層から深さ方向に指数関数的な分布 (緩衝深度 $\beta = 3 \text{ g/cm}^2$) をする。
- ・ 土壌中の天然放射性核種濃度はそれぞれ、⁴⁰K : 500 Bq/kg、U 系列 : 20 Bq/kg、Th 系列 : 10 Bq/kg、¹³⁴Cs : 50 kBq/m²、¹³⁷Cs : 200 kBq/m² とする。

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。この結果における回帰直線の傾きを 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。

$$GI_{corr} = 0.0333 \times (H_a - H_{sd}) + GI \quad [11]$$

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

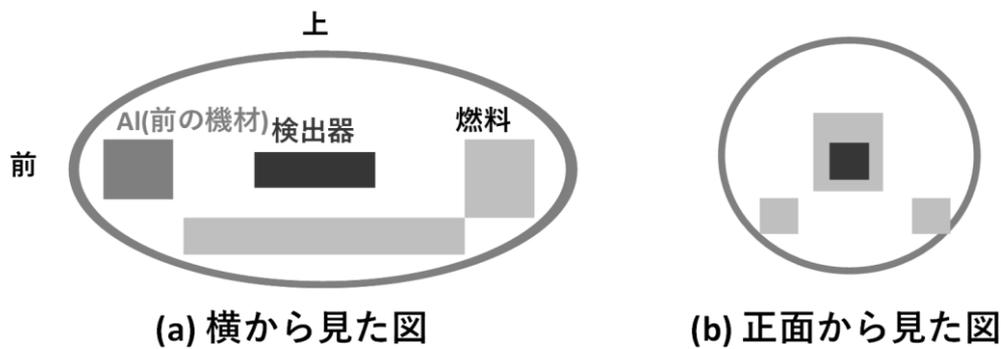


Fig. 3-18 計算体系のイメージ

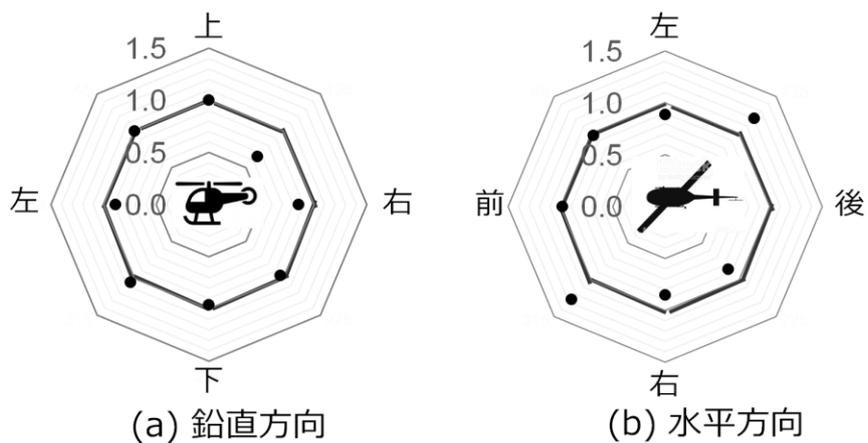


Fig. 3-19 計算体系のベンチマーク
(計算結果と実測結果の比)

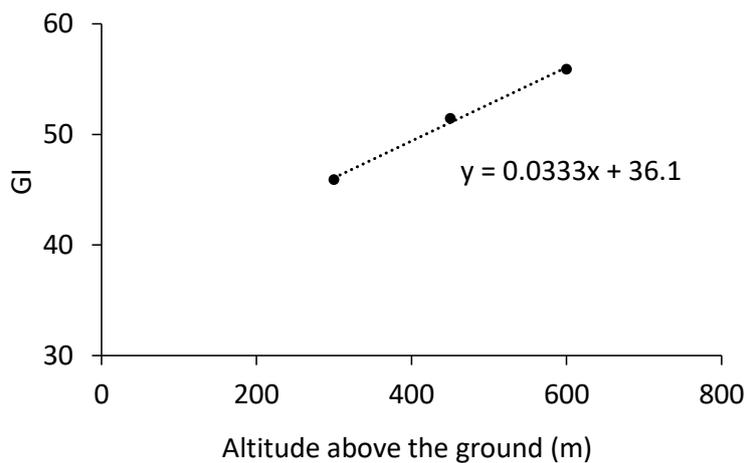


Fig. 3-20 シミュレーションによる測定高度と GI の関係

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、天然の放射性核種ごとに定量が可能である。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、散乱線の影響の少ない高エネルギー領域において ^{40}K (1,461 keV)、U 系列 (^{214}Bi : 1,765 keV、2,204 keV) および Th 系列 (^{208}Tl : 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における線量率の測定には、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 [cps/(Bq/kg)]) を求めるためには、テストライン上における地上測定値について、上空での測定値との比較が必要である。ここでは、Fig. 3-6 (美浜・敦賀)、Fig. 3-7 (近大炉・京大炉) で示した、測定対象エリアごとに設定したテストライン上の 5 地点において可搬型 Ge 検出器により、地表面から 1 m の高さにおいて 30 分間の測定を行い、 ^{40}K 、U 系列および Th 系列の濃度を測定し、その平均値を地上の測定値 (Bq/kg) とした。テストライン上における空中での測定値については測定基準高度である 300 m 上空で移動しながら測定した検出器の計数率データ (cps) を取得し、地上の可搬型 Ge 検出器との比較から CC を求めた。また、式 [1] に示したように高度補正係数評価に必要な空気減弱係数 (AF) については、EGS5 シミュレーションの結果を利用した。計算には、無限平板を模擬した半径 2,000 m の線源を仮定し、その上空 50 m、100 m、150 m、200 m、300 m、400 m および 500 m の計数率を計算した。計算した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、Fig. 3-22 に示す。このように指数関数の関係となり、その指数近似の傾きをそれぞれの AF とした。以上により求めた CC と AF の数値について Table 3-4 に示す。

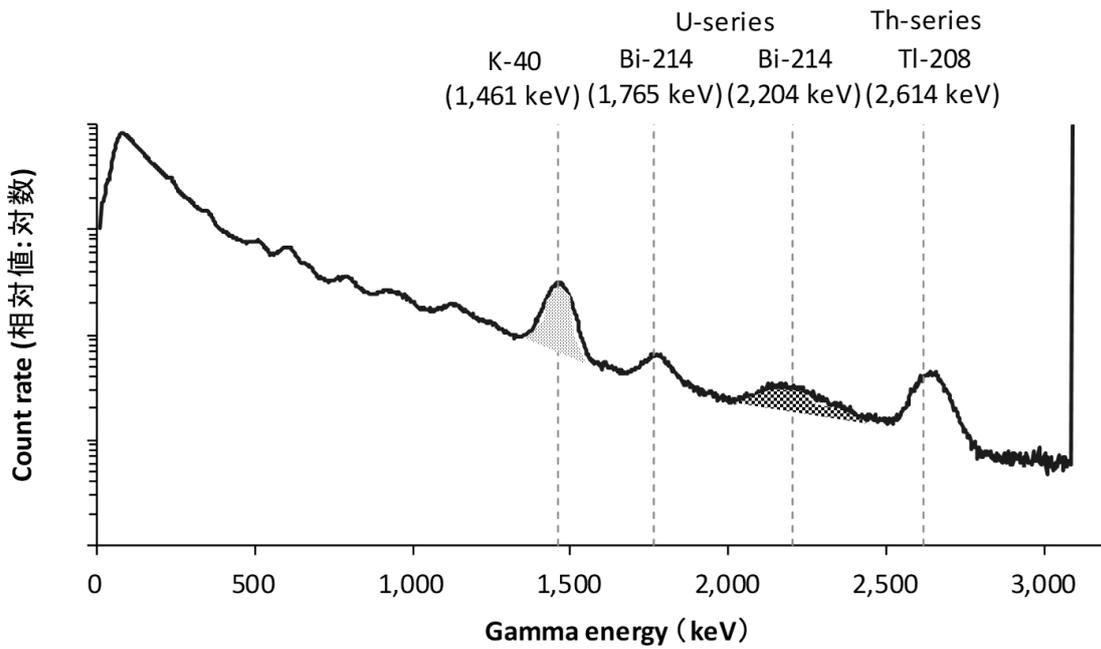


Fig. 3-21 天然の放射性核種によるピーク解析例

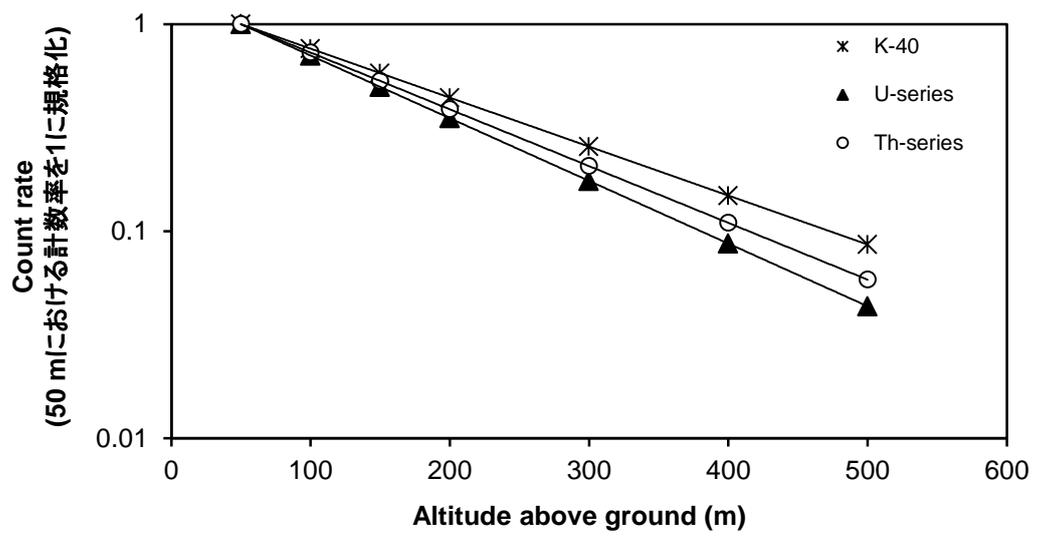


Fig. 3-22 天然の放射性核種別の高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション)

Table 3-4 天然の放射性核種濃度への換算パラメーター一覧

Measurement area	Parameters	⁴⁰ K	U-series	Th-series
Mihama	CC (cps/[Bq/kg])	0.033	0.26	0.10
Tsuruga	AF (m ⁻¹)*	-0.0054	-0.0070	-0.0063
Kindai Univ.	CC (cps/[Bq/kg])	0.044	0.31	0.21
Kyoto Univ.	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の数値は、テストラインで測定したデータから求めた。測定したデータの詳細をTable 4-1に示す。

3.4.3項で示した方法によりCDを求めた。本事業で取得したデータの詳細について、Table 4-2に示す。また、テストポイントの地上におけるCD算出のための地上測定結果について、Fig. 4-2、Fig. 4-3に示す。なお、図に示した空間線量率($\mu\text{Sv/h}$)では、サーベイメータの読み値を比較対象にしているため、天然核種による空間線量率が含まれる。これらの測定結果を基に解析に使用したパラメータについてTable 4-3に示す。同表には比較として福島原子力発電所周辺におけるモニタリングで使用している数値を併記した。このように、AFおよびCDの値は放射性セシウムの存在する福島県における数値と顕著な差は見られず、測定対象となる γ 線エネルギーによる依存性は小さいと言える。

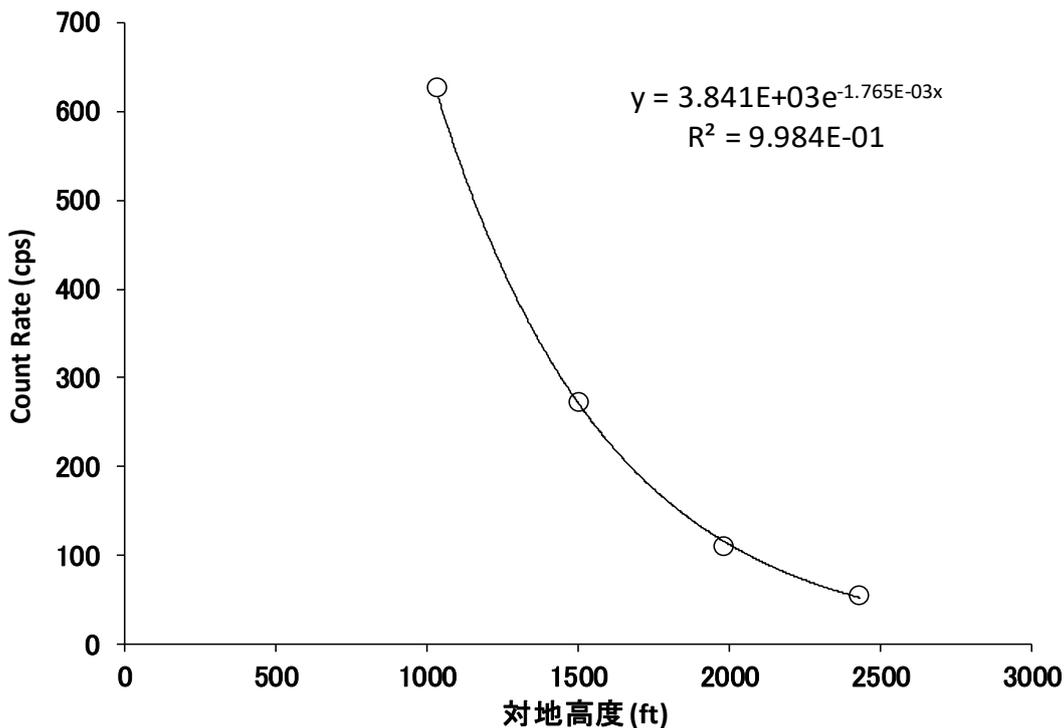


Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例
(Bell 412 JA6928、2016年2月2日実施、Test line)

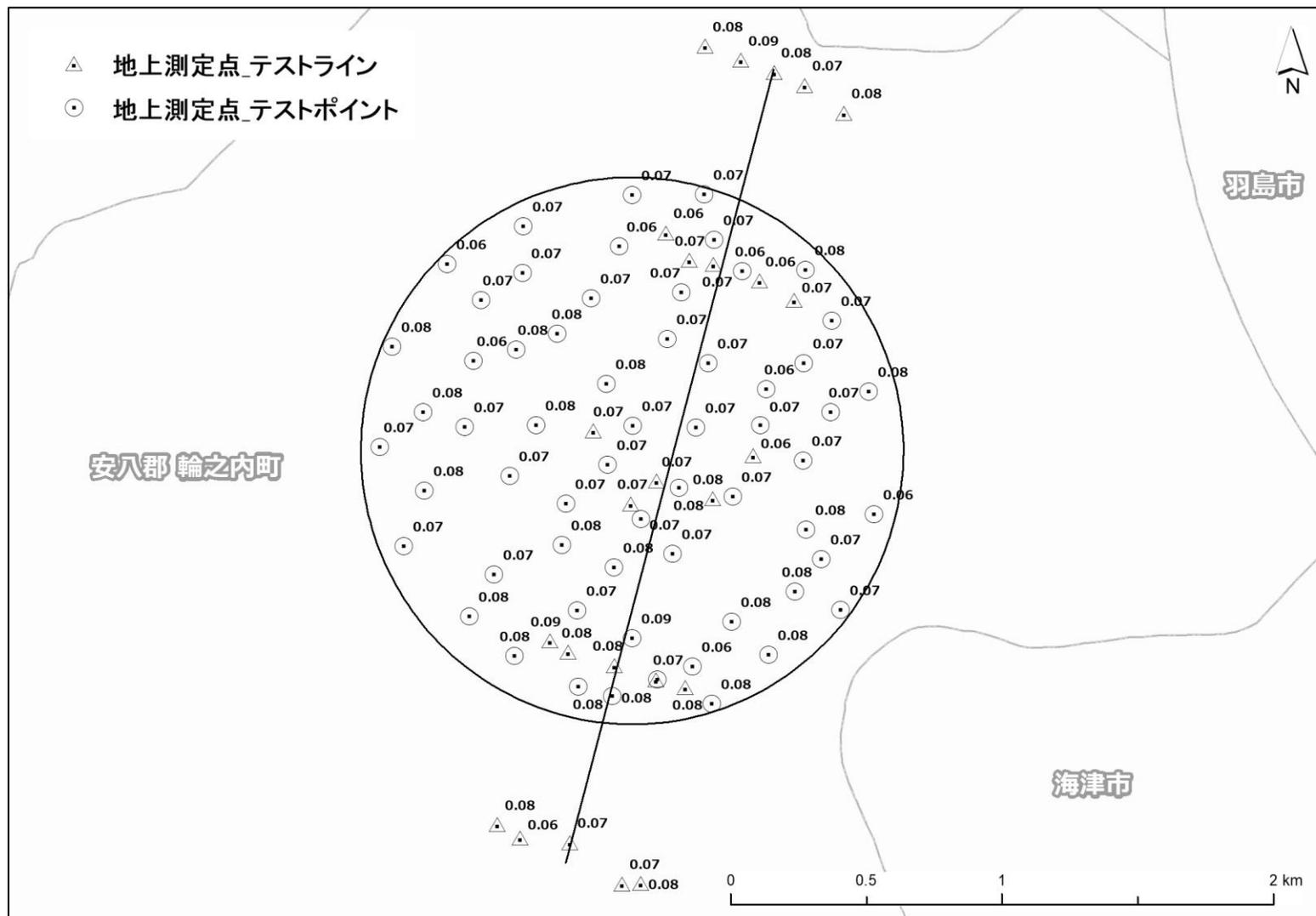


Fig. 4-2 地上測定による空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) (美浜・敦賀)

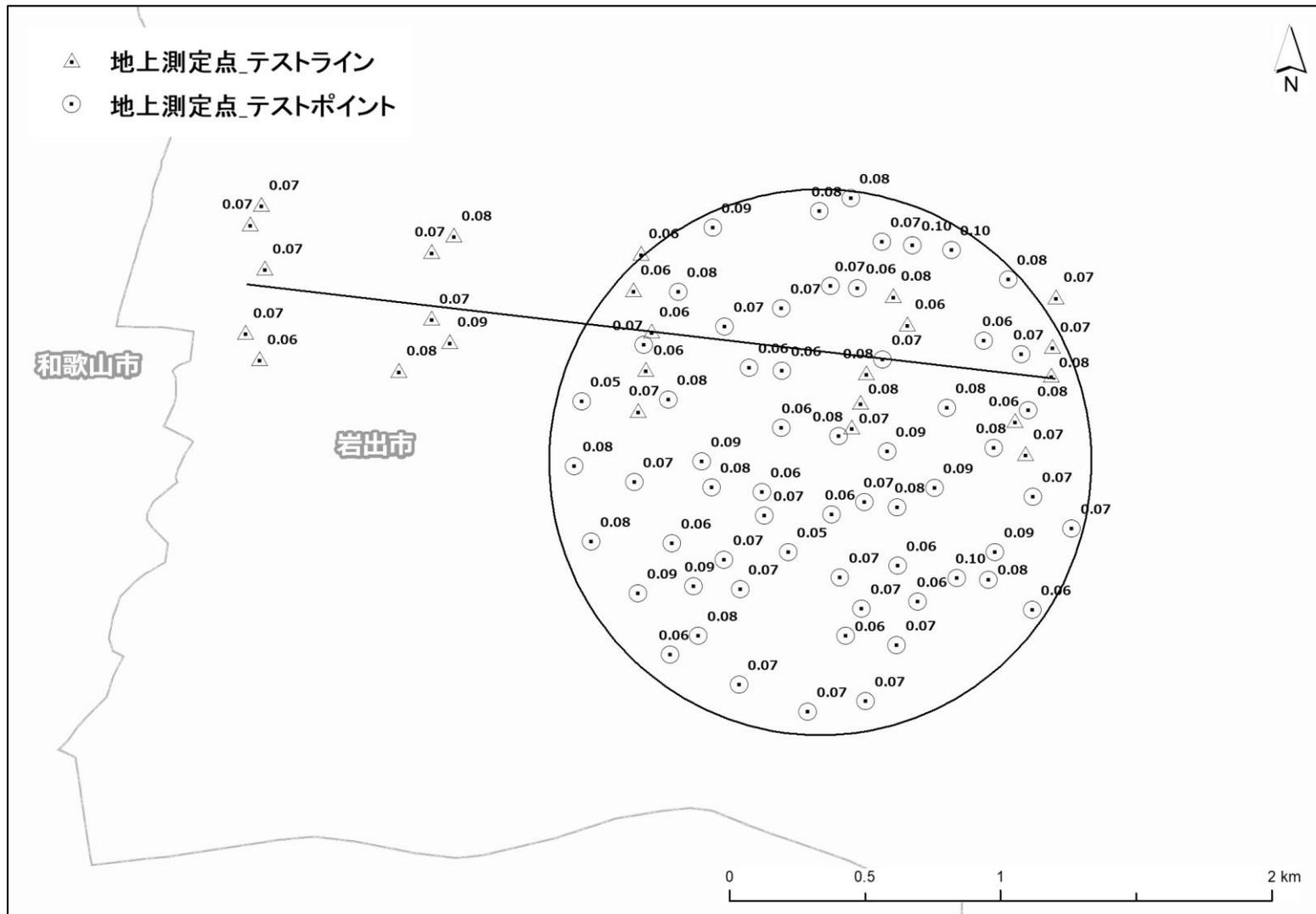


Fig. 4-3 地上測定による空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) (近大炉・京大炉)

Table 4-1 2020 年度取得した AF データ一覧

Monitoring Area	System (Device Serial)	Helicopter		Operation Company	Location	Date	AF	
		Model	Body No.				$\mu(m^{-1})$	R^2
Mihama Tsuruga	5090	Bell412	JA9616	AAC	Wanouchi TestLine	2020/08/01	-0.00613	0.99967
	5090	Bell412	JA9616	AAC	Wanouchi TestLine	2020/08/05	-0.00381	0.99821
Average							-0.00497	
Kindai Univ. Kyoto Univ.	5090	Bell412	JA6928	AAC	Iwade_TestLine	2020/11/12	-0.00529	0.99648
	5090	Bell412	JA6928	AAC	Iwade_TestLine	2020/11/19	-0.00616	1.00000
Average							-0.00572	

※ R^2 : 近似した指数関数曲線の決定係数

※AAC: 朝日航洋株式会社

Table 4-2 2020年度取得したCDデータ一覧

Helicopter Model	Monitoring Area	Date	Body No.	Operation Company	System (Device Serial)	Detector	Location	Ground data (NaI survey)			AMS data			AGL (m)			CD (cps/[μ Sv/h])
								Survey (uSv/h)	SD (2 σ)	RSD (%)	Count rate (cps)	SD (2 σ)	RSD (%)	AGL_GEOID (m)	SD (2 σ : %)	RSD (%)	
Bell 412	Mihama Tsuruga	2020/8/1	JA9616	AAC	SN:5090	DPU1 SN:7306	Wanouchi TestPoint	0.07	0.008	11	1873	113	6	1060	29	3	14600
						DPU2 SN:7307											
		2020/8/5	JA9616	AAC	SN:5090	DPU1 SN:7306	Wanouchi TestPoint	0.07	0.008	11	1860	217	12	1006	60	6	
						DPU2 SN:7307											
Average 14000																	
Bell 412	Kindai Univ. Kyoto Univ.	2020/11/12	JA6928	AAC	SN:5090	DPU1 SN:7306	Iwade TestPoint	0.07	0.020	28	1620	123	8	1048	41	4	13800
						DPU2 SN:7307											
		2020/11/19	JA6928	AAC	SN:5090	DPU1 SN:7306	Iwade TestPoint	0.08	0.026	34	1353	228	17	1087	50	5	
						DPU2 SN:7307											
Average 12600																	

※AAC: 朝日航洋株式会社、SD: 標準偏差、RSD: 相対標準偏差

Table 4-3 換算パラメータのまとめ
(誤差は測定結果の標準偏差 (1 σ))

Monitoring Area	Parameters	Bell412		Bell430	
		Value	Number	Value	Number
Mihama Tsuruga	AF (m^{-1})	-0.0061	2		
	CD (cps/[mSv/h])	14600	2		
Kindai Univ. Kyoto Univ.	AF (m^{-1})	-0.0062	2		
	CD (cps/[mSv/h])	13800	2		
Fukushima	AF (m^{-1})	-0.0072 \pm 0.00042	21	-0.0072 \pm 0.00040	35
	CD (cps/[mSv/h])	11000 \pm 2100	42	13000 \pm 2800	65

4.2. 地上における測定値との比較

航空機モニタリングの妥当性を検証するために、ヘリコプターの測線下の地点から地形的に平坦な場所を選定し、地上測定を実施した。測定点数は美浜・敦賀で 30 点、京大炉・近大炉で 40 点である。地上測定点について Fig. 4-4 (美浜・敦賀)、Fig. 4-5 (近大炉・京大炉) に示す。

航空機モニタリングによる空間線量率換算結果と地上測定値との比較を Fig. 4-6 (美浜・敦賀)、Fig. 4-7 (近大炉・京大炉)、Fig. 4-8 (全データ) に示す。それぞれ散布図および航空機モニタリングによる換算結果と地上測定結果の差を地上測定結果に対する相対誤差のヒストグラムで比較した。散布図を見ると、測定結果は美浜・敦賀においては 93 % (全 30 点中 28 点)、近大炉・京大炉においては 93 % (全 40 点中 37 点)、2016 年度から 2020 年度までの全データにおいては 93 % (全 429 点中 399 点) がファクター 0.5~2.0 に収まり、地上測定値と正の相関関係にあることが分かった。相対誤差ヒストグラムを見ると、美浜・敦賀および近大炉・京大炉については、共に頻度分布はある程度ばらついているものの、0 (航空機と地上測定値が等価) を中心に概ね左右対称な分布を示しており、ピーク位置、平均値および中央値は 0 付近となり、地上測定値とよく一致していると思われる。2016 年度から 2020 年度までの全データについても 0 以下 (航空機モニタリングの方が過小評価) に偏る分布が見られたものの、ピーク位置、平均値および中央値は 0 付近となり、全体として地上測定値とよく一致していると思われる。なお、2019 年度までに測定を実施した川内、大飯・高浜、伊方、泊、柏崎刈羽、玄海、島根、浜岡、東通・六ヶ所および志賀における航空機モニタリングによる換算結果と地上測定値との比較を Fig. 4-9 (川内)、Fig. 4-10 (大飯・高浜)、Fig. 4-11 (伊方)、Fig. 4-12 (泊)、Fig. 4-13 (柏崎刈羽)、Fig. 4-14 (玄海)、Fig. 4-15 (島根)、Fig. 4-16 (浜岡)、Fig. 4-17 (東通・六ヶ所) および Fig. 4-18 (志賀) にそれぞれ示す。地上測定値を指標とした相対誤差のヒストグラムは 0 付近をピークとしてガウス分布に近い分布を示していることから、2019 年度までに実施した各地域における航空機モニタリングの結果についても地上測定値とよく一致していることが分かる。

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

- ①測定の範囲の違い：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に該当する地上の放射線の平均値となる。実際には、測定される範囲は地上の半径 300 m 円内における放射線量の平均値となる。一方、地表面から 1 m の高さにおける測定範囲は半径 30 m 程度の円の放射線量の平均値となる。よって、地上の放射線分布が一樣の場所では地上測定値と航空機モニタリング測定値は整合しやすいが、地上の空間線量率の分布が均一でない場所では、測定結果が整合しにくいと考えられる。
- ②周辺からの影響：地上の測定場所の近傍に大きな建物や森林等がある場合には、建物や樹木に沈着している放射性物質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、本章において、比較用に取得した地上測定値は比較的地形が平坦な場所が多く、条件がよい場所を選定している。

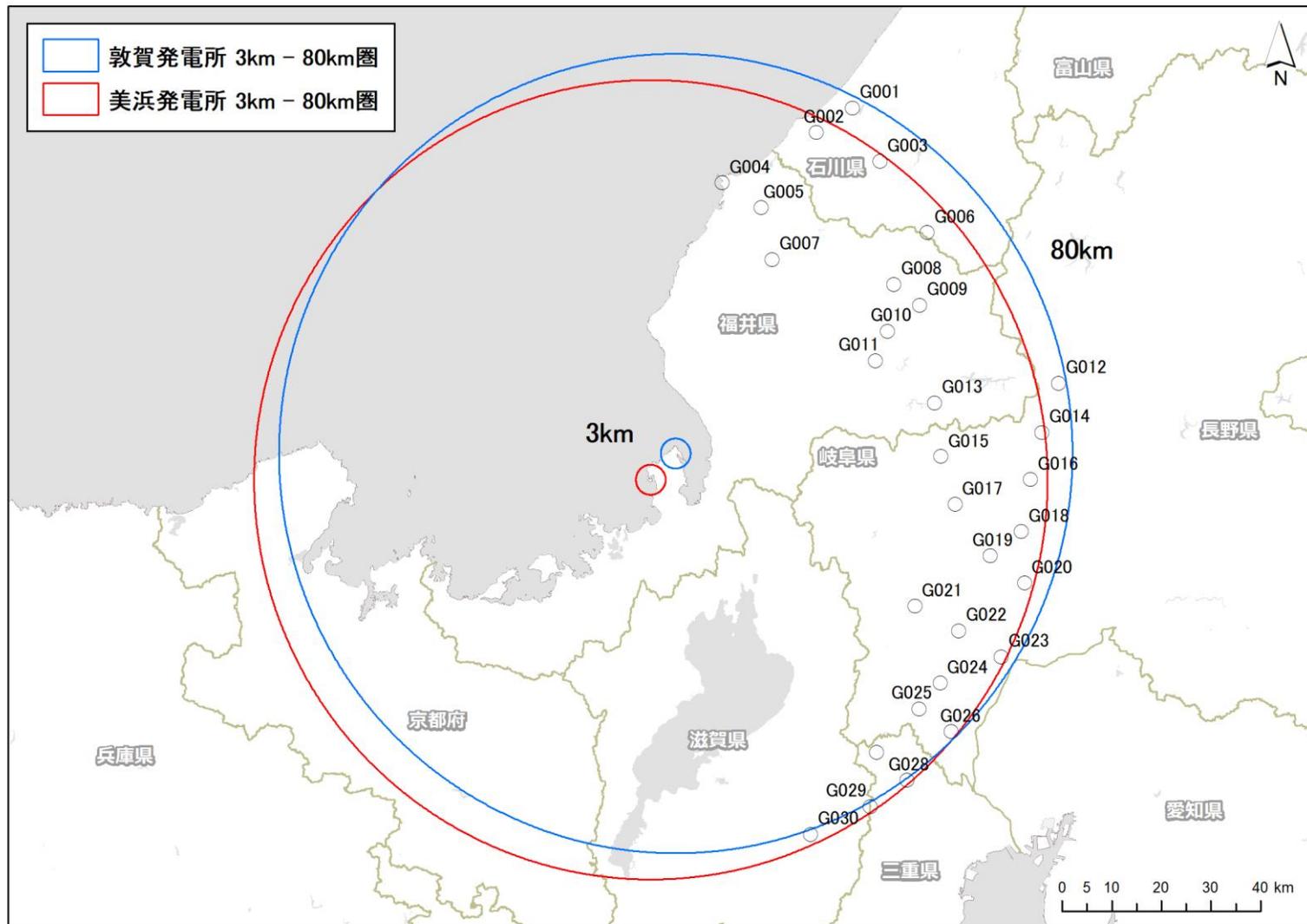


Fig. 4-4 地上における測定点 (美浜・敦賀)

(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. 4-5 地上における測定点 (近大炉・京大炉)

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

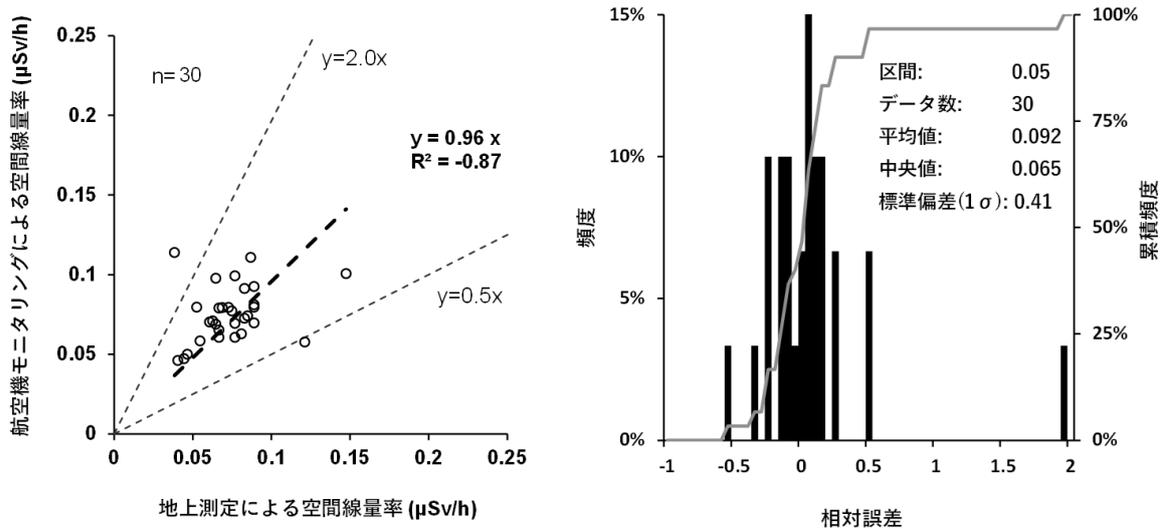


Fig. 4-6 地上測定による空間線量率との比較 (美浜・敦賀)
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

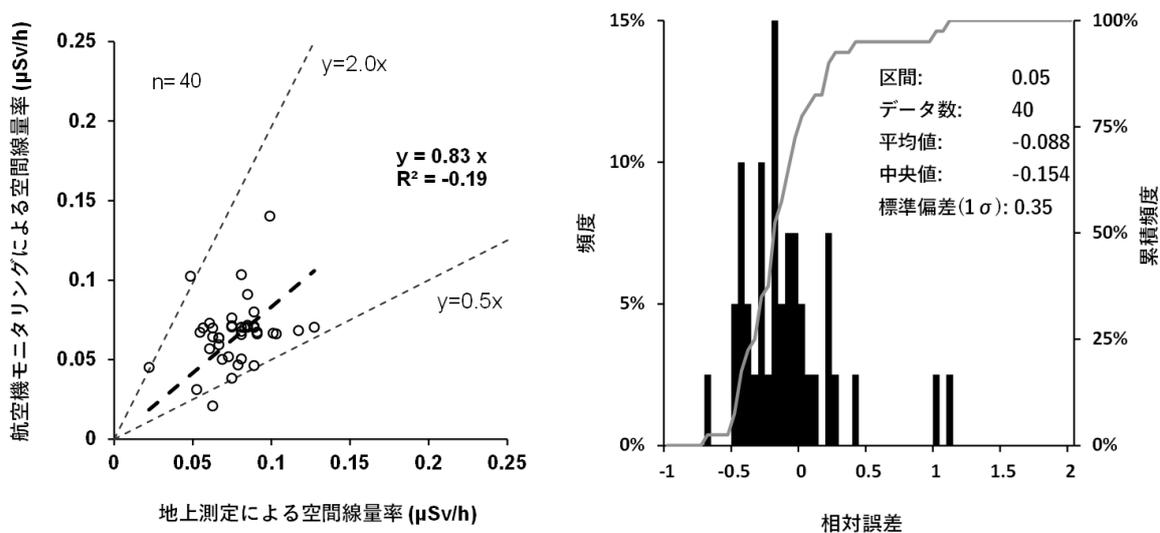


Fig. 4-7 地上測定による空間線量率との比較 (近大炉・京大炉)
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

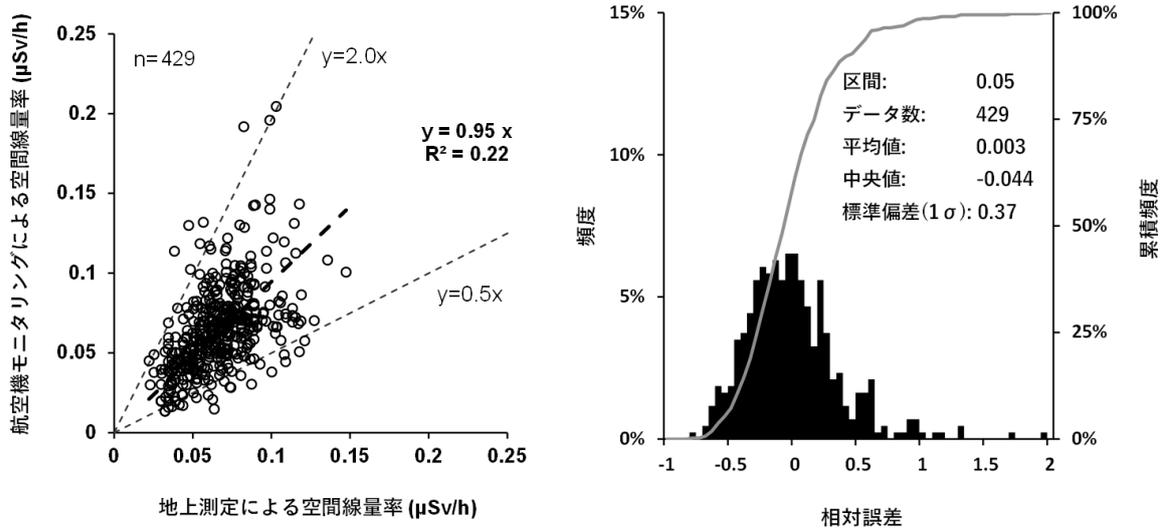


Fig. 4-8 地上測定による空間線量率との比較 (全データ)
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

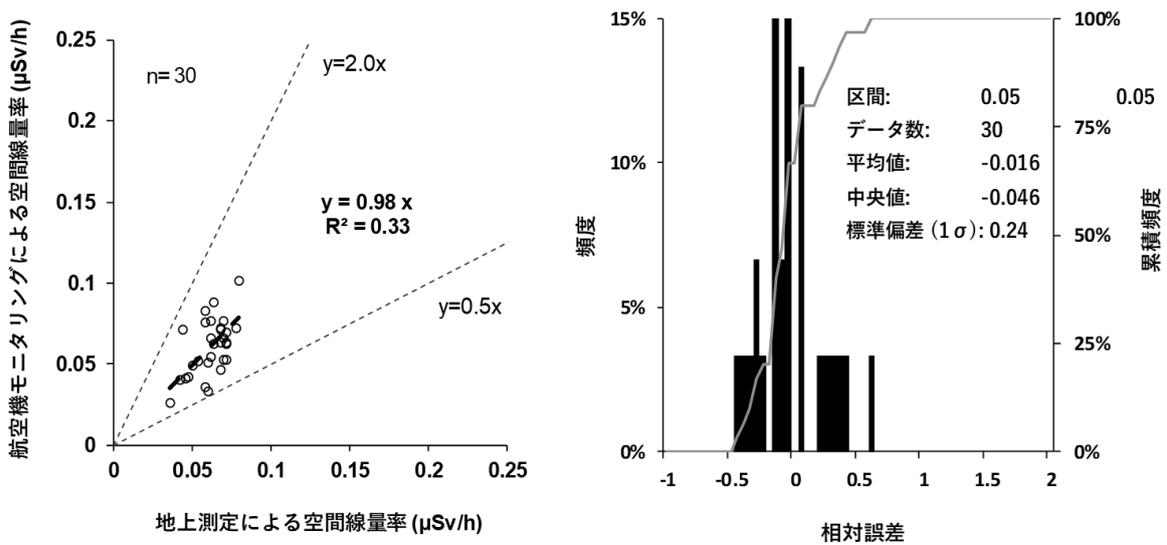


Fig. 4-9 地上測定による空間線量率との比較 (川内)
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

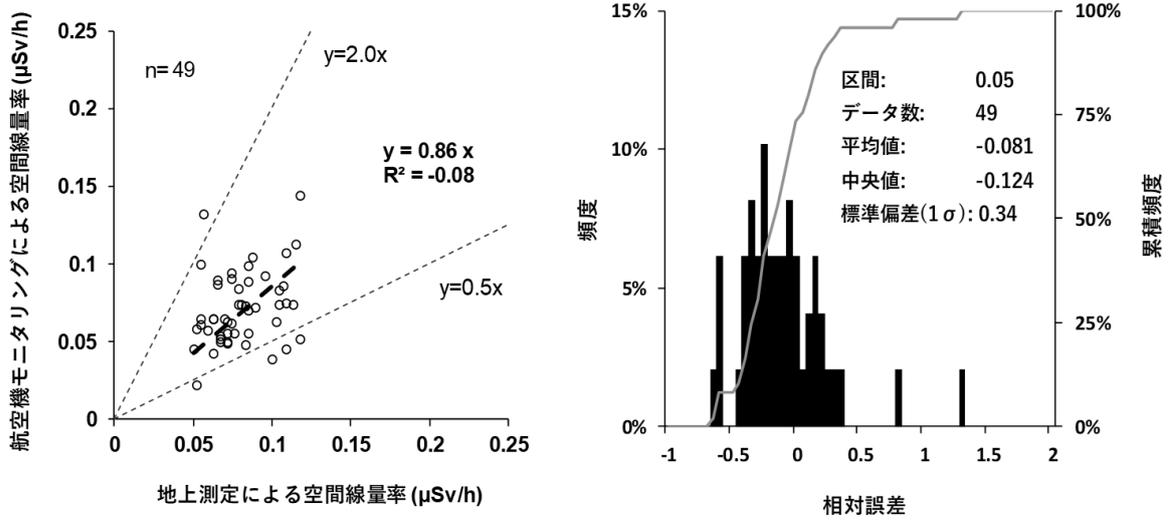


Fig. 4-10 地上測定による空間線量率との比較 (大飯・高浜)
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

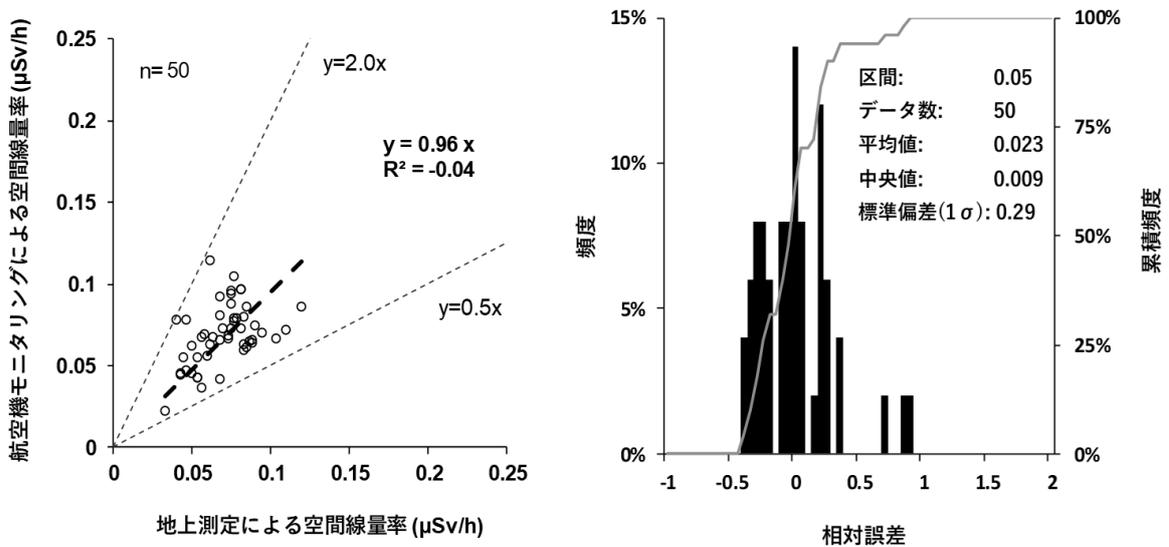


Fig. 4-11 地上測定による空間線量率との比較 (伊方)
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

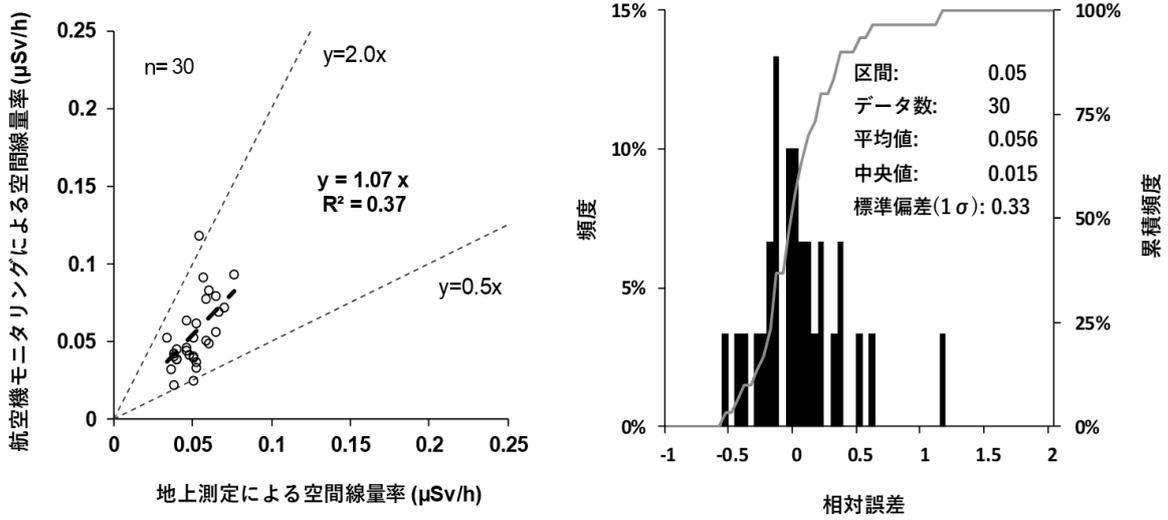


Fig. 4-12 地上測定による空間線量率との比較 (泊)
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

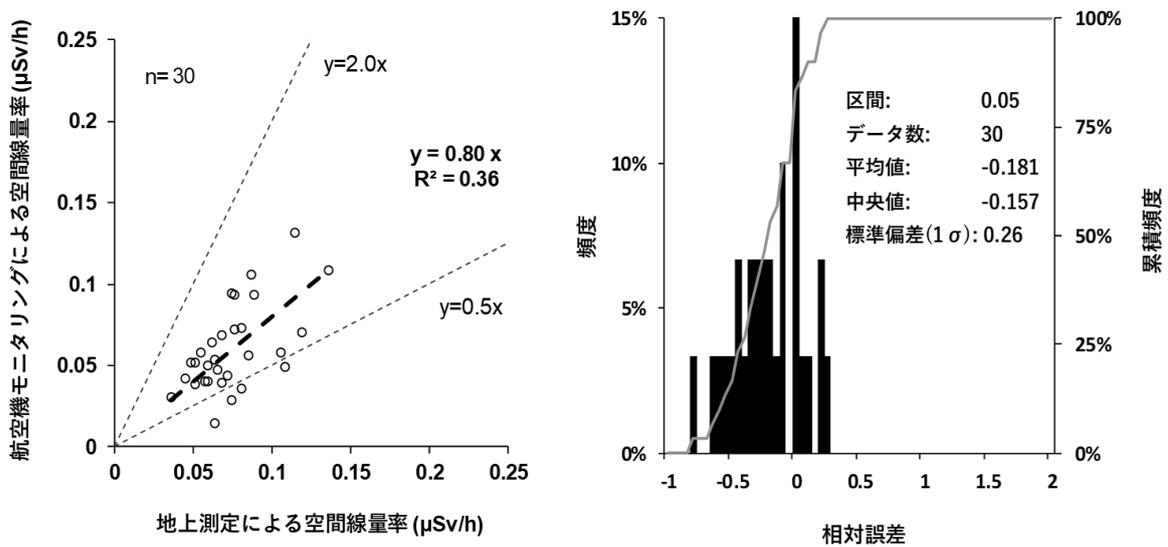


Fig. 4-13 地上測定による空間線量率との比較 (柏崎刈羽)
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

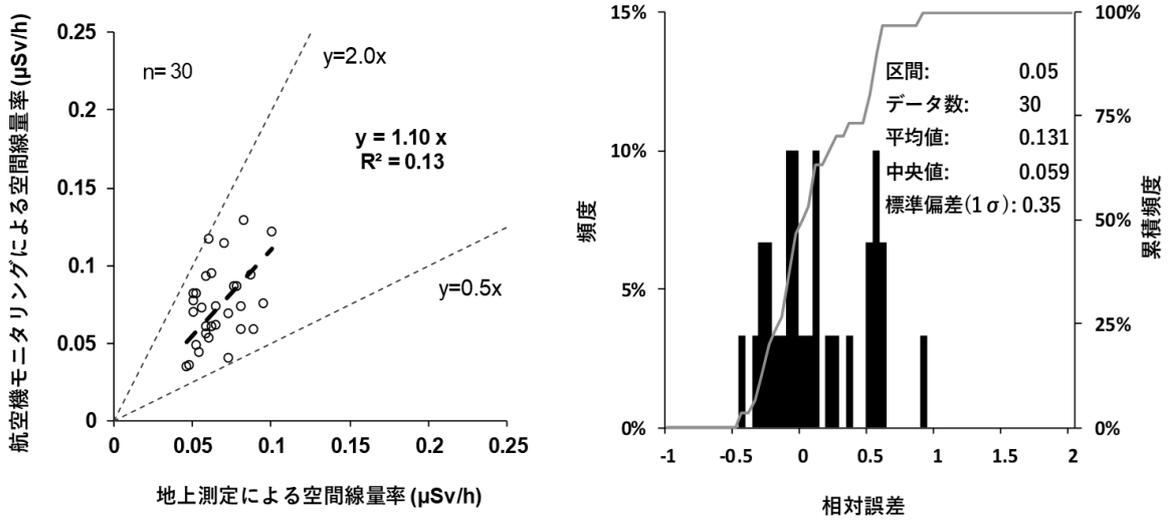


Fig. 4-14 地上測定による空間線量率との比較 (玄海)
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

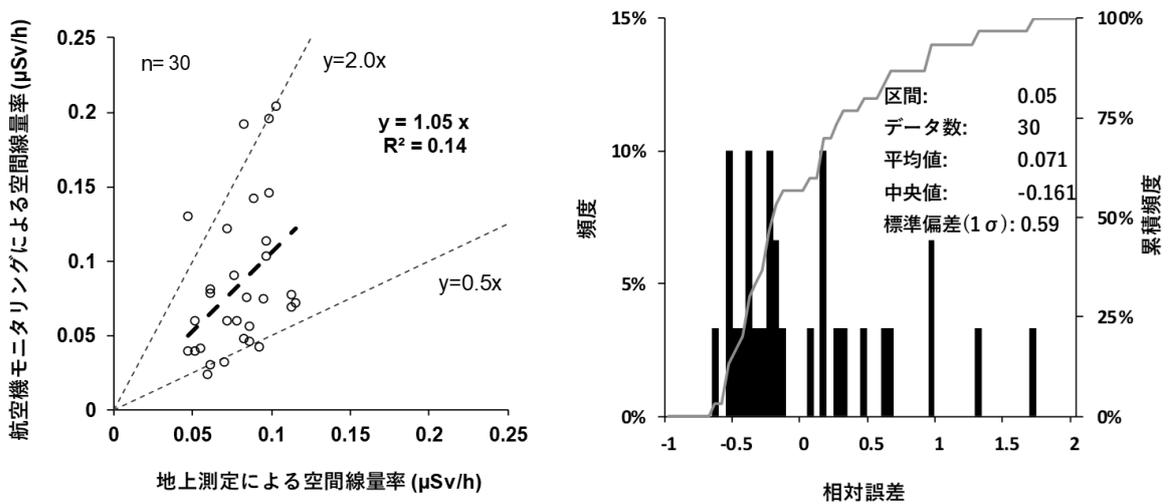


Fig. 4-15 地上測定による空間線量率との比較 (島根)
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

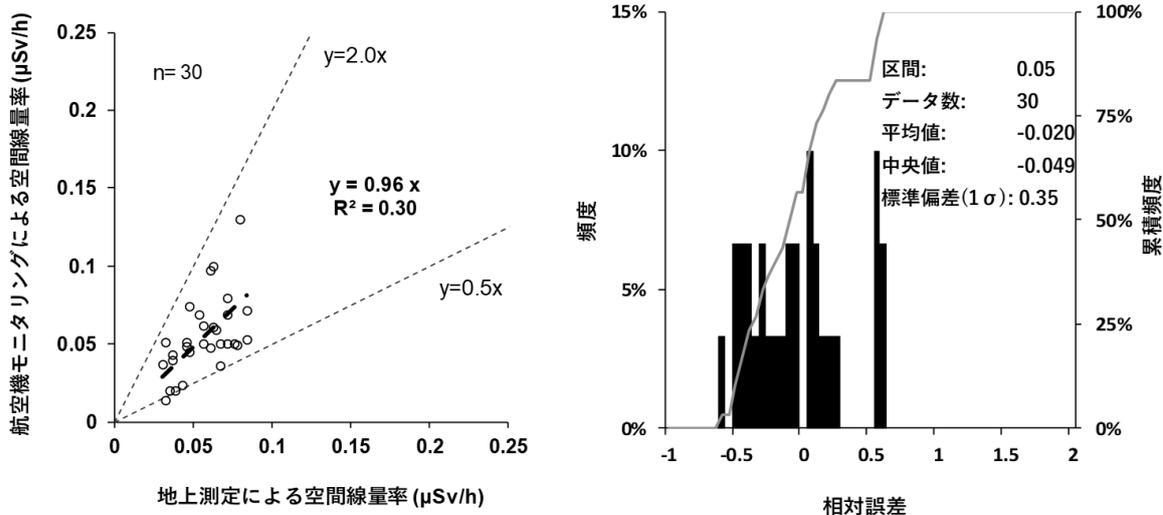


Fig. 4-16 地上測定による空間線量率との比較 (浜岡)
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

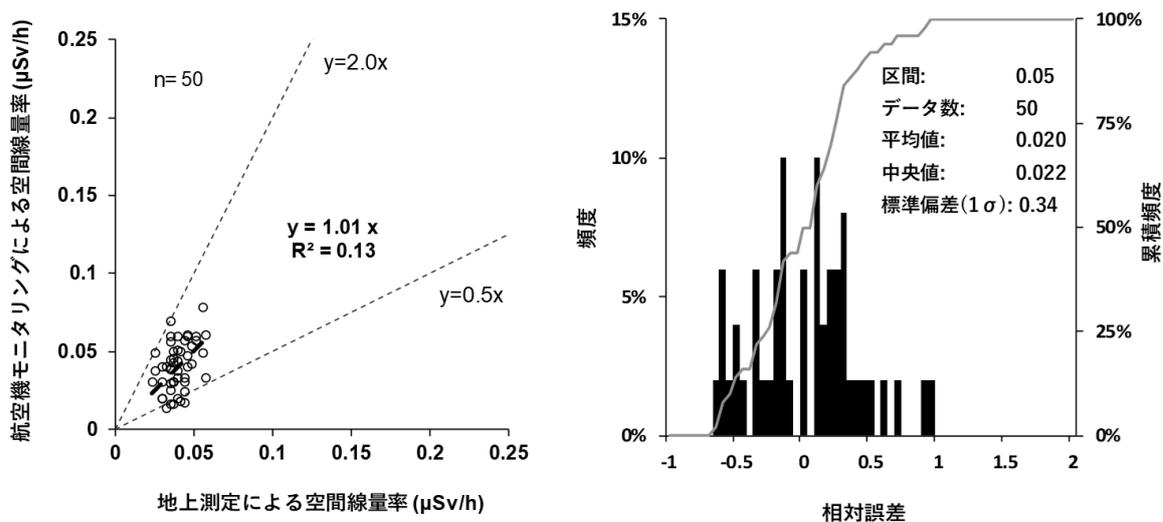


Fig. 4-17 地上測定による空間線量率との比較 (東通・六ヶ所)
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

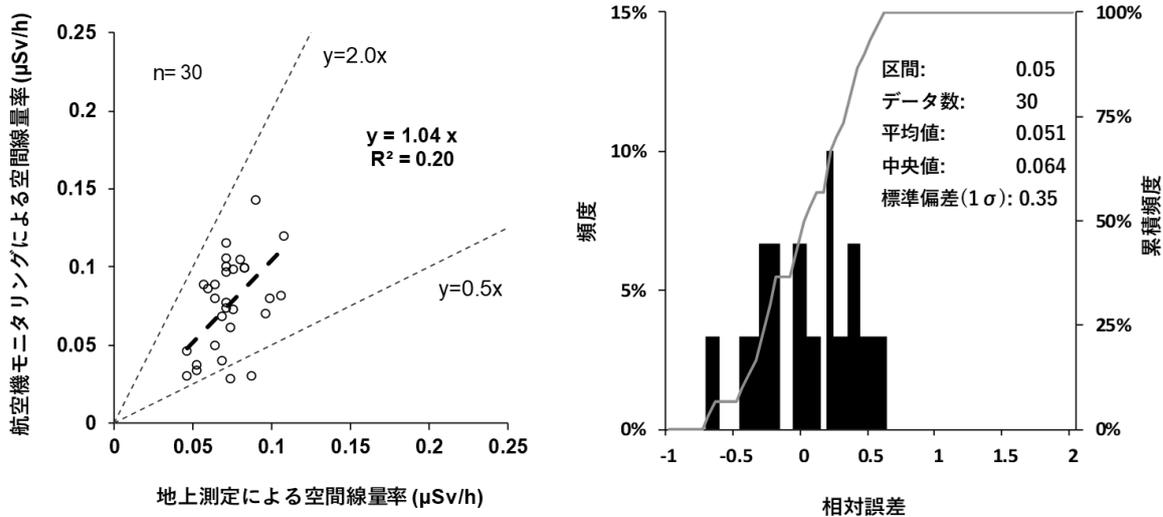


Fig. 4-18 地上測定による空間線量率との比較 (志賀)

(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

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. 4-19 (美浜・敦賀)、Fig. 4-20 (近大炉・京大炉) に示す。なお、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¹⁴⁾に準じた。

本報告における空間線量率の最大値は、美浜・敦賀においては岐阜県関市北部の山岳部で約0.30 $\mu\text{Sv/h}$ 、近大炉・京大炉においては和歌山県東牟婁郡北山村の周辺で約0.30 $\mu\text{Sv/h}$ であった。

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²⁰⁾と、航空機モニタリングによる空間線量率計算結果である Fig. 4-21 (美浜・敦賀) および Fig. 4-22 (近大炉・京大炉) とを比較した。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空間線量率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空間線量率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 および K の濃度をもとに計算によって求める方法¹⁸⁾で作成されている。この計算手法で算出された線量率 ($\mu\text{Gy/h}$) 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」²⁰⁾というコンセプトの下、自然放射線量 ($\mu\text{Sv/h}$) に単位変換を行っていることから、当該空間線量率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、日本地質学会の空間線量率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、日本地質学会の空間線量率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 × 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、空間線量率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。

美浜・敦賀について、航空機モニタリングによる空間線量率マップ (Fig. 4-21 (左)) では、測定範囲の北部から中央部付近の広範囲に渡って0.10 $\mu\text{Sv/h}$ を超える場所が広がっており、南部にも同様な場所が局所的に分布している。0.16 $\mu\text{Sv/h}$ を超えるような比較的高線量率となったのは測定範囲の北側から、石川県については①加賀市・動橋川流域の山間部②白山市白峰村の山間部～三ノ峰・別山周辺、福井県については①大野市・打波川流域の山間部②大野市・三面谷流域の山間部③大野市上秋生・笹生川流域の山間部④大野市・荷暮川流域の山間部、岐阜県については①岐阜県郡上市・長良川流域②関市北部の平家岳・竜波山の周辺③本巣市・魚金山周囲の山岳地帯④関市の板取川流域～山県市の山岳地帯、三重県および滋賀県については①いなべ市および東近江市の境界付近にある竜ヶ岳周辺である。日本地質学会の空間線量率マッ

プ (Fig. 4-21 (右)) においても美浜・敦賀の測定範囲の中央部～南部にかけて比較的高線量率であり、空間線量率の分布傾向は航空機モニタリングによる空間線量率マップと概ね同様であるように思われる。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、日本シームレス地質図³³⁾および各箇所における既往の詳細な地質調査レポート等を基に考察を行った。

・石川県について

① 加賀市・動橋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、本地域には安山岩・デイサイト溶岩・火砕岩等が広く分布しており、飛騨変成岩類に分類される片麻岩類が部分的に分布している。この片麻岩類の分布地帯において比較的高線量率であるが、本岩石体中に空間線量率の上昇に顕著に寄与すると思われる岩石類の存在は確認できない。本地域から数 km 離れた場所に花崗岩-花崗閃緑岩体 (通称: 庄川花崗岩) の存在が認められるが、航空機モニタリングによる空間線量率が高く算出されたこととの相関は不明である。

② 白山市白峰村の山間部～三ノ峰・別山周辺について

本地域には手取層群に含まれる赤岩層 (に相当する大倉層およびアマゴ谷層) が主に分布しており、本層の基質は粗粒のアルコズ質 (長石や石英等の構成鉱物が花崗岩と近い) 砂岩であることが見出されている³⁵⁾。日本シームレス地質図上では、本地域には花崗岩類の分布が見られないが、実際はアルコズ質砂岩が広範囲に渡って分布しており、それに起因する 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。

・福井県について

① 大野市・打波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、本地域には流紋岩・デイサイト火砕岩等が主に分布しており、閃緑岩・石英閃緑岩・トータル岩等を含む花崗岩体および前出のアルコズ質砂岩も局所的に分布している。空間線量率が比較的高くなっているエリアと花崗岩体およびアルコズ質砂岩の分布位置が概ね重なっていることから、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。

② 大野市・三面谷流域の山間部について

日本シームレス地質図によると、本地域には流紋岩-デイサイト溶結凝灰岩および流紋岩溶岩等 (通称: 濃飛流紋岩類) が主に分布している。また、糸生層に含まれる陸上-水底安山岩溶岩の分布も部分的に認められ、この安山岩付近で局所的に $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を上回っているが、本地域における詳細な地質調査レポートは現時点で未公開であり、地質的な要因が航空機モニタリングによる空間線量率に及ぼした影響は不明である。

③ 大野市上秋生・笹生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、本地域には海成層砂岩が主に存在しており、空間線量率の上昇に顕著に寄与すると思われる岩石類の存在は確認できない。一方で、本地域一帯に渡って褶曲構造が確認されており、向斜状構造 (褶曲した地層の谷間にあたる部分) を成している地形の付近で比較的高線量率であることから、地質的な要因よりも地形的な要因が

航空機モニタリングによる空間線量率に大きく影響を及ぼした可能性がある。

④ 大野市・荷暮川流域の山間部について

本地域では塊状砂岩等からなる地層(通称:左門岳層)が主体であり、左門岳層は砂岩・チャート・酸性岩凝灰岩・花崗岩等の礫を伴うことが見出されている³⁶⁾。この花崗岩に起因する 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。

・岐阜県について

① 郡上市・長良川流域について

日本シームレス地質図によると、本地域には前出の濃飛流紋岩類および左門岳層が主に分布している。左門岳層に含まれる花崗岩礫に起因する 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。

② 関市北部の平家岳・竜波山の周辺について³⁶⁾

本地域には珪長質火山岩類およびそれらに密接に伴う貫入岩類(通称:奥美濃酸性岩類)が主に分布している。奥美濃酸性岩類は岐阜県北西部から福井県東部にかけて分布しており、独立した6岩体(洞戸・板取・明石谷・面谷・入谷・八幡)に区分されるが、その内、本地域に分布しているのは明石谷岩体および面谷岩体である。明石谷岩体は主に流紋岩溶岩・デイサイト溶岩等を含む明石谷火山岩類を主体としており、その北東部に花崗岩体(通称:川浦谷花崗岩)、東部には花崗閃緑岩(通称:オリ谷花崗閃緑班岩)が貫入している。面谷岩体は比較的厚い砕屑岩を伴う日ノ谷層と火砕岩を主とする面谷層の二つに区分されているが、竜波山周辺においては面谷層のみが分布している。面谷層は流紋岩ガラス質結晶凝灰岩および結晶ガラス質凝灰岩が主体であり、部分的に流紋デイサイト溶結凝灰岩を伴う。航空機モニタリングによる空間線量率が特に高く算出されたのは川浦谷花崗岩の付近、かつ面谷層に取り囲まれた比較的広範囲なエリアに渡っていることから、これら花崗岩および流紋岩等に起因する γ 線量に応じた空間線量率分布が再現されていると推察される。

③ 本巣市・魚金山周囲の山岳地帯について

本地域に幅広く存在する金山ユニットのサブユニットである根尾メランジ(砂岩・チャート・珪質泥岩等からなる様々な大きさの岩塊を含む地質体)が主体である³⁷⁾。根尾メランジ中に空間線量率の上昇に大きく寄与すると思われる岩石類の存在は確認できず、航空機モニタリングによる空間線量率が高く算出されたことと地質的な要因とを関連付けることは難しい。日本シームレス地質図によると、本地域にはかつてマンガン等の金属資源が採掘されていた金属鉱山が点在しており、これら鉱山の位置と空間線量率が比較的高く算出されたエリアが概ね一致するが、両者の相関は不明である。

④ 関市の板取川流域～岐阜県山県市の山岳地帯について

本地域には前出の奥美濃酸性岩類の内、洞戸岩体が主に分布している。本岩体中に花崗岩体(通称:高賀花崗岩)が貫入しており、本地域の地質調査当時に東西3.8 km、南北2.5 kmの規模で露出していることが確認されている³⁸⁾。この花崗岩体の分布位置と0.16 μ Sv/hを上回ったエリアが重なることから、本花崗岩体に起因する 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。

なお、日本シームレス地質図上では、本巢市の能郷白山周辺において空間線量率上昇に寄与すると思われる花崗閃緑岩が分布しているが、実際は流紋岩および安山岩類によってその表層が覆われており⁴⁰⁾、地表面に露出している花崗閃緑岩の表面積は小さいと思われる。よって、航空機モニタリングによる空間線量率はさほど高く算出されなかった(大部分で 0.06 $\mu\text{Sv/h}$ 以下)と推察される。

・三重県および滋賀県について

① いなべ市および東近江市の境界付近にある竜ヶ岳周辺

本地域にある竜ヶ岳(標高約 1,100 m)は鈴鹿山脈の中部に位置しており、その周囲には玄武岩溶岩および火山砕屑岩や砂岩泥岩互層等、空間線量率の上昇には顕著に寄与すると思われる岩石類の分布が見られないが、竜ヶ岳南方山腹には粗粒黒雲母花崗岩体(通称: 鈴鹿花崗岩)が露出している³⁹⁾。空間線量率が比較的高く算出されたエリアと鈴鹿花崗岩の分布位置が重なることから、本花崗岩体に起因する 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。

近大炉・京大炉について、航空機モニタリングによる空間線量率マップ(Fig. 4-22(左))では、測定範囲の北部の数ヶ所および中央部から南部の広範囲において 0.10 $\mu\text{Sv/h}$ を超える場所が見られた。0.16 $\mu\text{Sv/h}$ を超えるような比較的高線量率となったのは測定範囲の北側から、三重県については①松阪市飯高町木梶・高見トンネル付近の山岳地帯②多気郡大台町の山岳地帯、大阪府については①和泉市と河内長野市の境界付近、奈良県については①吉野郡川上村・北股川流域の山岳地帯②吉野郡迫川村・五条市・吉野郡十津川村の境界付近③吉野郡上北山村・坂本貯水池周辺の山岳地帯④吉野郡十津川村上湯川周辺、和歌山県については①伊都郡かつらぎ町・穴伏川の流域②伊都郡高野町・清川の流域③有田郡有田川町下湯川・下津股谷川流域の山岳地帯④新宮市熊野川町・篠尾川の流域～熊野川町九重・北山川の流域⑤東牟婁郡北山村の周辺である。日本地質学会の空間線量率マップ(Fig. 4-22(右))においては近大炉・京大炉の測定範囲の北部が比較的高線量率である一方で、中央部から南部はさほど高線量率でなく、航空機モニタリングによる空間線量率マップとは空間線量率の分布傾向があまり一致しないように思われる。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、日本シームレス地質図および各箇所における既往の詳細な地質調査レポート等を基に考察を行った。

・三重県について

① 松阪市飯高町木梶・高見トンネル付近の山岳地帯について

日本シームレス地質図によると、本地域には三波川変成岩類の内、三波川結晶片岩類(主に泥質片岩や砂質片岩を伴う)が分布しているが、本岩類中に空間線量率の上昇に顕著に寄与すると思われる岩石類の存在は確認できない。一方で、本地域に褶曲構造が確認されており、シンフォーム状向斜(向斜構造が重ね合わさってできた大きな向斜)を成している地形において比較的高線量率であることから、地形的な要因が航空機モニタリングによる空間線量率に影響を及ぼした可能性がある。

② 多気郡大台町の山岳地帯について

台高山脈東部に位置する江股ノ頭(標高約 1,270 m)付近から父ヶ谷付近にかけて比較的高線

量率である。日本シームレス地質図によると、本地域には砂岩・チャート等が主に分布しており、空間線量率の上昇に顕著に寄与すると思われる岩石類の存在は確認できず、航空機モニタリングによる空間線量率が高く算出されたことと地質的な要因とを関連付けることは難しい。一方で、本地域には中期中新世の大規模な火山活動により、大台カルデラと大峯カルデラとの二重陥没構造という特殊な地形が形成されており⁴¹⁾、地形的な要因が航空機モニタリングにおける空間線量率に影響を及ぼした可能性がある。

なお、日本シームレス地質図によると、亀山市の北部、伊賀市の北西部、伊賀市の南部および名張市の一部、津市の南部および松阪市の中央部にも花崗岩体の存在が認められるが、航空機モニタリングによる空間線量率は大部分で $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 以下であった。亀山市の北部には主に、前出の鈴鹿花崗岩と角閃石黒雲母花崗閃緑岩 (通称: 加太花崗閃緑岩) が分布している。加太花崗閃緑岩は鈴鹿花崗岩に比べて、含有されるカリウム (K_2O) 濃度が比較的低い⁴²⁾ものの、空間線量率の多寡に顕著に影響を及ぼすほどの要因とは考えにくい。伊賀市の北西部には粗粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩 (通称: 柳生花崗岩) が分布しており⁴³⁾、伊賀市の南部および名張市の一部には細粒白雲母含有黒雲母花崗岩 (通称: 阿保花崗岩) や黒雲母角閃石トータル岩および石英閃緑岩から成る花崗岩体 (通称: 城立トータル岩) が分布している⁴⁴⁾。柳生花崗岩および阿保花崗岩はその鉱物組成⁴³⁾から花崗閃緑岩に相当するものであると思われ、純粋な花崗岩と比較して γ 線強度は弱いことが推察されるが、空間線量率の多寡に及ぼす影響の度合いは不明確である。一方、城立トータル岩の中には苦鉄質岩を多く含むものもあり⁴⁴⁾、花崗岩類の中では γ 線強度は比較的低いことが推察される。津市の南部および松阪市の中央部には花崗閃緑岩体および美杉トータル岩の分布が認められるが、詳細な地質調査レポート等は非公開であり、その鉱物組成等に関する情報は不明である。これらの花崗岩類がどの程度の γ 線強度を有しているかを推察することが難しく、航空機モニタリングによる空間線量率の妥当性を検証しきれない部分がある。

・大阪府について

① 和泉市と河内長野市の境界付近について

本地域は和泉山脈に属する槇尾山の近辺であり、領家花崗岩類 (角閃石黒雲母トータル岩・花崗閃緑岩および花崗岩を含む) や泉南流紋岩類 (流紋岩-流紋デイサイト溶結凝灰岩等を含む) が主に分布している⁴⁵⁾。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おける空間線量率が比較的高くなったと思われる。一方で、日本シームレス地質図によると、和泉山脈の北縁一部に花崗岩類の存在が確認されている。航空機モニタリングによる空間線量率は当該エリアの大部分で $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 程度であり、槇尾山近辺でのみ局所的に高線量率となった原因は不明確である。

なお、日本シームレス地質図によると、生駒山地の北部から中央部 (交野市から四条畷市)、高安山 (八尾市) および金剛山の一部にも花崗岩体の存在が認められるが、航空機モニタリングによる空間線量率は大部分で $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 以下であった。四条畷市周辺に分布している花崗岩体 (通称: 四条畷花崗閃緑岩体) は比較的 γ 線強度が高い (空気吸収線量率で 80nGy/h 程度) ことが明らかとなっている⁴⁶⁾。高安山周辺の花崗岩体 (通称: 高安山花崗岩) も岩体中のカリウム (K_2O) 濃度が比較的高い⁴⁷⁾ことから、その γ 線強度は比較的高いものと推察される。明確な原

因は不明であるが、上記のエリアにおいて、航空機モニタリングによる空間線量率は過小評価傾向にあると思われる。一方、金剛山に分布する花崗岩体（通称：葛城石英閃緑岩体）は花崗岩類の中でも γ 線強度が特に弱いことが明らかとなっている⁴⁶⁾。花崗岩中に含まれる斜長石の An 値 ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ の含有割合) と γ 線強度は負の相関にあることが見出されており⁴⁶⁾、葛城石英閃緑岩は An 値が比較的高いことに起因すると思われる。

・奈良県について

① 吉野郡川上村・北股川流域の山岳地帯について

台高山脈西部に位置する弥次平峰（標高約 1,275 m）付近で $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を上回っていた。日本シームレス地質図によると、本地域には砂岩・チャート等が主に分布しており、空間線量率の上昇に顕著に寄与すると思われる岩石類の存在は確認できず、航空機モニタリングによる空間線量率が高く算出されたことと地質的な要因とを関連付けることは難しい。一方で、本地域にも前出の二重陥没構造という特殊な地形が形成されており、地形的な要因が航空機モニタリングにおける空間線量率に影響を及ぼした可能性がある。

② 吉野郡迫川村・五条市・吉野郡十津川村の境界付近について

日本シームレス地質図によると、本地域には四万十川帯に含まれる日高川層群の内、美山層（頁岩および砂岩泥岩互層を含む）が主に分布しており、空間線量率の上昇に顕著に寄与すると思われる岩石類の存在は確認できない。しかしながら、本地域一帯では 2011 年 9 月の台風 12 号による影響で大規模斜面崩壊が起きた⁴⁸⁾関係で、既往の地質情報と異なる地層が露出している可能性がある。

③ 吉野郡上北山村・坂本貯水池周辺の山岳地帯について

日本シームレス地質図によると、本地域には四万十帯付加複合体の内、的矢層群（厚層理砂岩や砂岩泥岩細互層から成る）が主に分布しており、空間線量率の上昇に顕著に寄与すると思われる岩石類の存在は確認できない。本地域における詳細な地質調査レポートは未公開であり、地質等の要因が航空機モニタリングによる空間線量率に及ぼした影響は不明である。

④ 吉野郡十津川村上湯川周辺について

本地域には日高川層群の内、砂岩等から成る竜神累層が主に分布しており、本層の砂岩は流紋岩質岩等の酸性火山岩片に富み、花崗岩質岩の存在も認められている⁵⁰⁾。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おける空間線量率が比較的高く算出されたと思われる。

なお、日本シームレス地質図によると、奈良市、高市郡高取町および明日香村周辺の一帯にも花崗岩体の存在が認められるが、航空機モニタリングによる空間線量率は大部分で $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 以下であった。奈良市周辺には前出の城立トータル岩および阿呆花崗岩が分布している⁴⁴⁾。一方、高取町および明日香村に分布する花崗岩は先述した葛城石英閃緑岩体に含まれ、 γ 線強度が特に弱いことが明らかとなっている⁴⁶⁾。また、奈良県内の地表 γ 線量率を測定した結果によると、奈良県に分布する花崗岩の γ 線量率の平均値は空気吸収線量率で 50 nGy/h 前後であり⁴⁹⁾、日本全国の花崗岩の γ 線量率の算術平均値（空気吸収線量率で 80 nGy/h 前後¹⁸⁾）に比べてかなり低い傾向にある。この要因として、一般的な花崗岩中にはペグマタイト等の鉱物結晶が

含まれるのに対し、奈良県に分布する花崗岩中にはこのような鉱物結晶がほとんど含まれないためであると考えられている⁴⁹⁾。以上のことから、これらの地域は花崗岩類が分布しているが、その γ 線強度が非常に弱いため、航空機モニタリングによる空間線量率がさほど高く算出されなかったと推察される。

・和歌山県について

① 伊都郡かつらぎ町・穴伏川の流域について

本地域には和泉層群に含まれる粉河層（主に砂岩・泥岩層や酸性凝灰岩から成る）が主に分布している⁵²⁾が、粉河層には空間線量率上昇に顕著に寄与すると思われる岩石類の存在は確認できない。空間線量率が特に高く算出された位置は中央構造線の内、五条谷断層の直上である。断層の存在と空間放射線量率の上昇にはある程度の相関があり、断層中に存在する鉱物の帯磁率が関与することが示唆されている⁶¹⁾。しかしながら、本地域における詳細な地質調査レポートは未公開であり、五条谷断層の存在が航空機モニタリングによる空間線量率に及ぼした影響は不明である。

② 伊都郡高野町・清川の流域について

紀伊半島北西部一帯に広がる花園層が主に分布しており、特に本地域においては、頁岩を主体とし、砂岩、玄武岩等を伴うことが見出されている⁵⁴⁾。花園層中には空間線量率上昇に顕著に寄与する岩石類の存在は確認できず、航空機モニタリングによる空間線量率が高く算出されたことと地質的な要因とを関連付けることは難しい。一方で、日本シームレス地質図によると、本地域一帯に褶曲構造が確認されており、シンフォームおよび向斜構造を成している地形において比較的高線量率であることから、地形的な要因が航空機モニタリングによる空間線量率に影響を及ぼした可能性がある。

③ 有田郡有田川町下湯川・下津股谷川流域の山岳地帯

日本シームレス地質図によると、本地域には前出の美山層が主に分布しているが、本層中には空間線量率上昇に顕著に寄与すると思われる岩石類の存在は確認できない。本地域における詳細な地質調査レポートは未公開であり、地質等の要因が航空機モニタリングによる空間線量率に及ぼした影響は不明である。

④ 新宮市熊野川町・篠尾川の流域～熊野川町九重・北山川の流域について

日本シームレス地質図によると、本地域には音無川群層に含まれる羽六累層上層部（砂岩や礫岩から成る）や熊野層群に含まれる敷屋累層および下里累層（砂岩泥岩等から成る）が主に分布している。加えて、石英斑岩および花崗斑岩から成る大峯火成岩類（に類似する岩体）も点在しており、航空機モニタリングによる空間線量率の上昇に寄与した可能性がある。しかしながら、本地域においても2011年9月の台風12号に起因する熊野層群の崩壊・土石流の流下があり⁵⁵⁾、地層分布が既往の地質調査レポート等と異なる可能性があることに留意する必要がある。

⑤ 東牟婁郡北山村の周辺

日本シームレス地質図によると、本地域には前出の竜神累層が主に分布しているが、十津川村における竜神累層とは岩相が若干異なることが示唆されている⁵⁰⁾。しかしながら、詳細な地質調査レポート等は未公開であり、具体的に岩相がどのように異なるかは不明であ

る。十津川村から北山村にかけて、竜神累層が分布しているエリアは概ね、航空機モニタリングによる空間線量率が $0.10 \mu\text{Sv/h}$ を上回っていることから、北山村周辺の竜神累層中にも流紋岩質岩等の酸性火山岩片に加え、花崗岩質岩が含まれていると推察される。

なお、日本シームレス地質図によると、兵庫県の淡路島北部(淡路市)および中央部(洲本市)にも花崗岩類の分布が確認できるが、航空機モニタリングによる空間線量率は大部分で $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 程度であった。淡路島において地表 γ 線量率を測定した結果によると、北部および中央部で 70 nGy/h 以上の場所が局在している⁵⁶⁾。しかしながら、淡路島の花崗岩分布エリアにおける平均値は約 56 nGy/h であり、上述した日本全国の花崗岩の γ 線量率の算術平均値と比べて低い傾向にある。当該測定結果と航空機モニタリングによる空間線量率の計算結果は、必ずしも1対1で比較できるものではないが、概ね一致していると思われる。

以上のように、美浜・敦賀における航空機モニタリングの空間線量率マップについては、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(を含む岩石体)の存在が関連していることが推察された。一方、近大炉・京大炉における航空機モニタリングの空間線量率マップでは、地質的な要因によって空間線量率が比較的高く算出されたと思われる場所は少なく、大部分において地形的な要因が関連する可能性がある。また、関西地方に分布する花崗岩類の中には、一般的な花崗岩よりも γ 線強度が低いものがあり、花崗岩の存在が航空機モニタリングにおける空間線量率の上昇に直結するわけではないことが明らかとなった。近大炉・京大炉測定エリアにおいて、空間線量率が比較的高く算出された場所のほとんどが紀伊山地の起伏が激しく険しい地形であった。3.1 節にも記述したように、航空機モニタリングでは測定対象とする地表が平坦であるという仮定に基づいて γ 線の計数率を取得し、空間線量率等の解析・評価を行うことから、複雑な地形においては不確かさが比較的大きくなると思われる。このような地形の起伏が激しい地域においては、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングで取り入れてきている、地形の起伏を考慮に入れた解析手法^{12),14)}が有効に働くことが期待され、本手法の適用を検討することが望ましい。

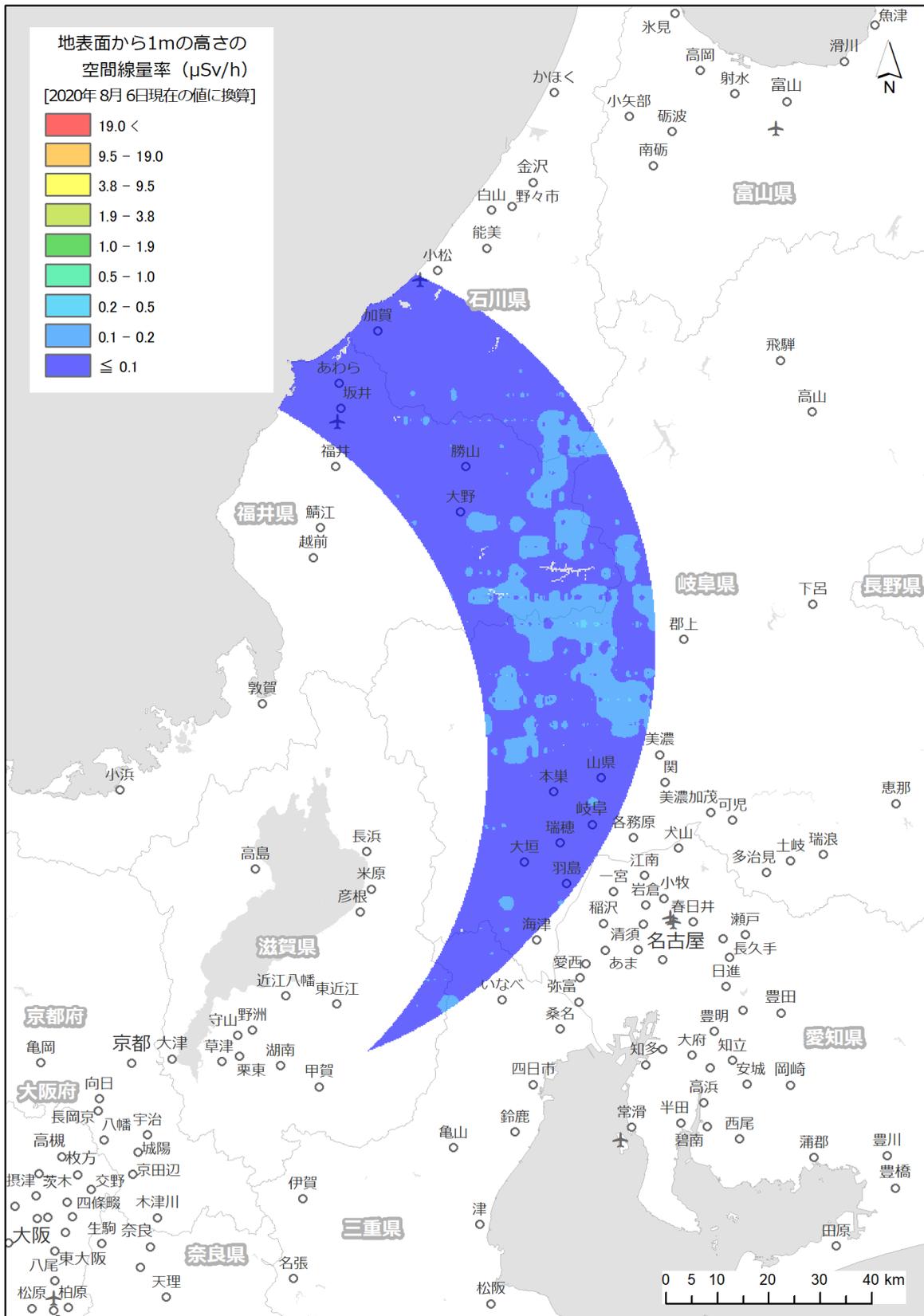


Fig. 4-19 空間線量率マップ (美浜・敦賀)

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

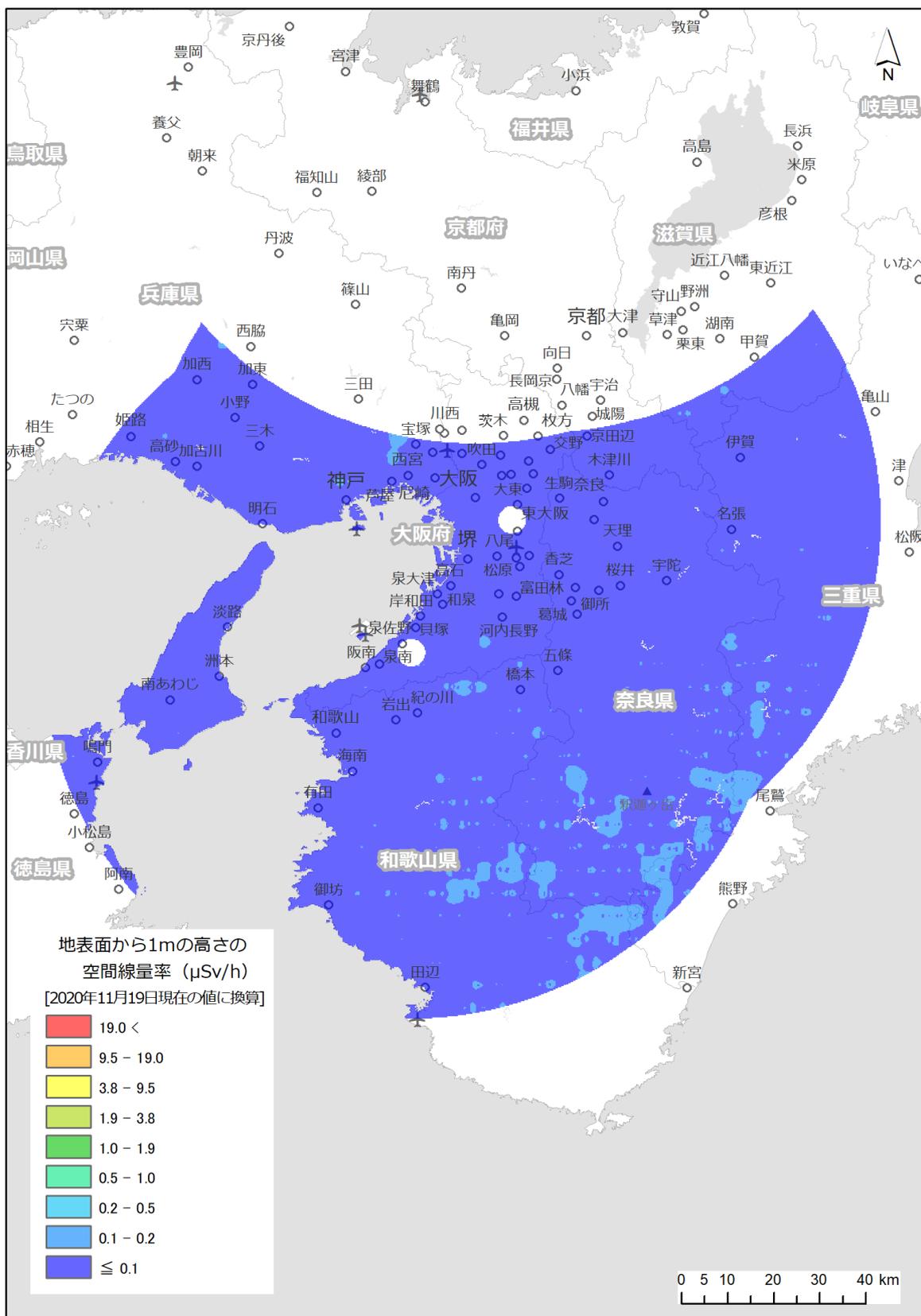


Fig. 4-20 空間線量率マップ (近大炉・京大炉)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

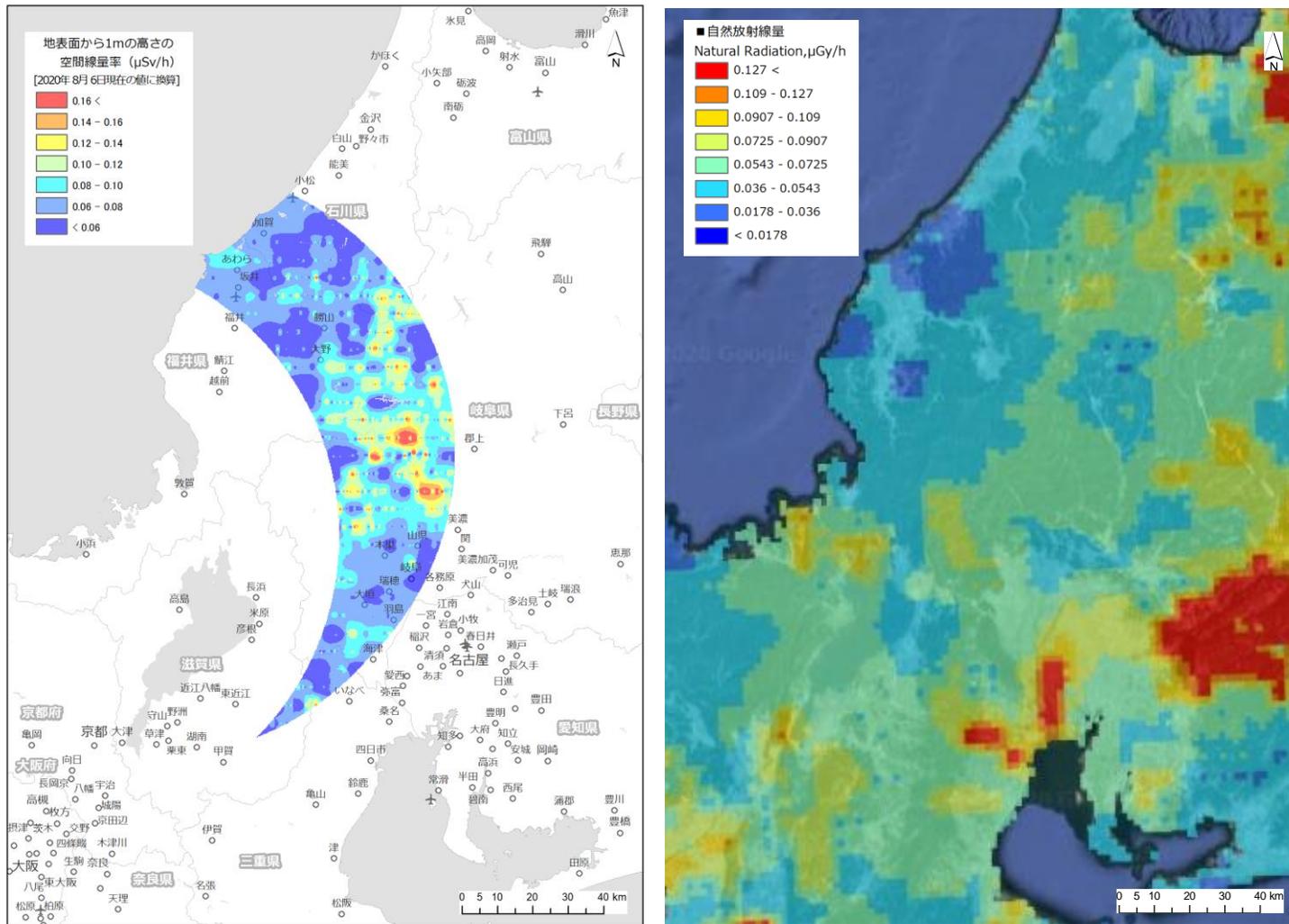


Fig. 4-21 空間線量率マップの比較 (美浜・敦賀)

(左: 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、©2021 TerraMetrics を使用)

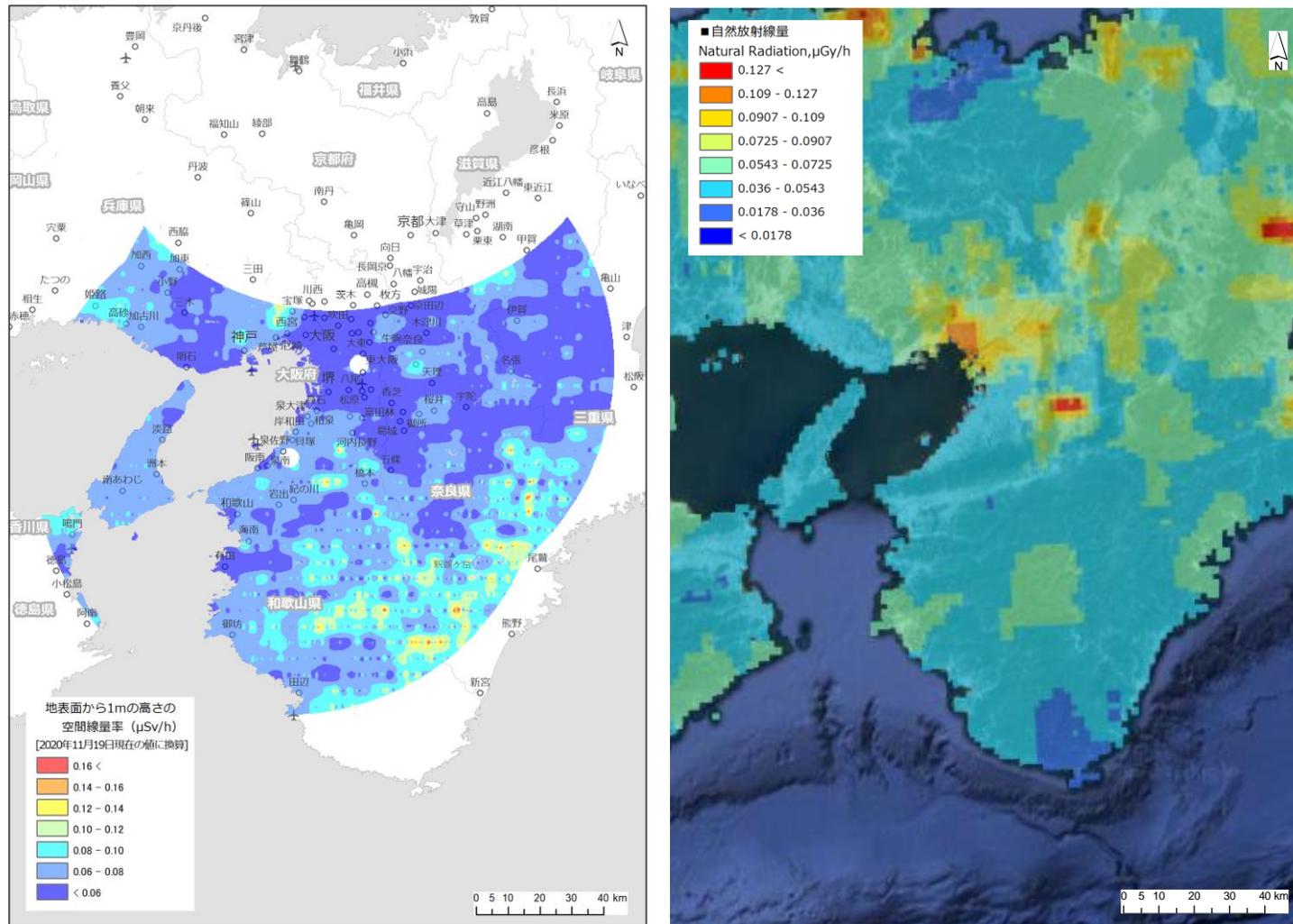


Fig. 4-22 空間線量率マップの比較 (近大炉・京大炉)

(左: 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、©2021 TerraMetrics を使用)

4.4. 天然の放射性核種濃度

Table 3-4 に示したパラメータを利用し、地上値に換算し内挿して放射性核種濃度をマップ化した結果を美浜・敦賀および近大炉・京大炉について ^{40}K 、U 系列および Th 系列の順に、それぞれ Fig. 4-23～Fig. 4-25 および Fig. 4-26～Fig. 4-28 に示す。 ^{40}K 、U 系列および Th 系列の各最大濃度については、美浜・敦賀においては約 1,350 Bq/kg、約 100 Bq/kg および約 160 Bq/kg となり、近大炉・京大炉においては約 800 Bq/kg、約 65 Bq/kg および約 50 Bq/kg となった。また、測定エリア全体における ^{40}K 、U 系列および Th 系列の各平均濃度については、美浜・敦賀においては約 470 Bq/kg、約 20 Bq/kg および約 30 Bq/kg となり、近大炉・京大炉においては約 330 Bq/kg、約 15 Bq/kg および約 15 Bq/kg となった。一般的に、日本におけるそれらの核種の濃度は、 ^{40}K 、U 系列および Th 系列について、それぞれ 100 Bq/kg～700 Bq/kg、10 Bq/kg～50 Bq/kg および 7 Bq/kg～50 Bq/kg とされており⁵⁹⁾、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。

それら核種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⁵⁷⁾を利用した。航空機モニタリングによる天然放射性核種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美浜・敦賀および近大炉・京大炉について ^{40}K 、U 系列、Th 系列の順に Fig. 4-29～Fig. 4-31 および Fig. 4-32～Fig. 4-34 に示す。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.⁵⁸⁾の換算係数を適用して作成されており、その中でも ^{40}K 、U 系列および 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、このような地域の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 (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・敦賀については中央部から南部にかけて各元素ともに比較的高濃度であるという点で分布傾向は一致している。近大炉・京大炉については、U 系列と Th 系列マップにおいて、海と陸の地球化学図の元素濃度マップでは大阪湾周辺で比較的高濃度であるという点で、航空機モニタリングによる元素濃度マップとは差異が見られた。

美浜・敦賀について、 ^{40}K 、U 系列および Th 系列の濃度が測定範囲の中央部から南部にかけて比較的高くなるという全体的な傾向は両マップで一致していた (Fig. 4-29～Fig. 4-31)。海と陸の地球化学図による元素濃度マップ作成に使用された河川堆積物試料の元素濃度測定結果⁵⁷⁾を見ると、岐阜県揖斐郡揖斐川町内で採取された二つの試料で各元素濃度が比較的高く、 ^{40}K (K_2O) で約 2.5 % 程度、U 系列で 2 ppm～3 ppm 程度、Th 系列で 8 ppm～12 ppm 程度であった。一方、航空機モニタリングによる元素濃度マップでは、同町付近において、 ^{40}K で 500 Bq/kg～1000 Bq/kg、U 系列で 20 Bq/kg～70 Bq/kg、Th 系列で 30 Bq/kg～50 Bq/kg と、ばらつきは見られるものの、測定エリアの中でもかなり高レベルな濃度分布が再現されている。美浜・敦賀における元素濃度マップは、陸の地球化学図における元素濃度マップの分布傾向と概して一致していると思われる。

近大炉・京大炉について、 ^{40}K に関しては、兵庫県の尼崎市付近、紀伊半島の中央部一帯で

比較的高濃度であるのに対し、大阪府南部から奈良県北部では比較的低濃度であるという、大まかな分布傾向は両マップ間で一致していた。前項に記した通り、大阪府南部および奈良県北部には花崗岩類が分布しているが、それらの γ 線強度は比較的弱く、従って ^{40}K 濃度も低いことが推察される。U系列およびTh系列の濃度については、航空機モニタリングによる元素濃度マップ (Fig. 4-33 (左) および Fig. 4-34 (左)) では局所的に高濃度な領域はほとんど見られないが、海と陸の地球化学図ではU系列およびTh系列濃度マップ (Fig. 4-33 (右) および Fig. 4-34 (右)) において大阪湾周囲で比較的高濃度な領域が見られる。当該マップ作成に使用された河川堆積物試料の元素濃度測定結果⁵⁷⁾を見ると、兵庫県では尼崎市、大阪府では守口市および寝屋川市で採取された試料で比較的高く、U系列濃度が4 ppm~5 ppm程度、Th系列濃度が20 ppm~25 ppm程度である。しかしながら、海と陸の地球化学図上で一番高濃度な領域 (U系列では6.27 ppm以上、Th系列では30 ppm以上) である大阪府南部地域においては、例えば泉北郡忠岡町で採取された試料でU系列濃度が約1.3 ppm、Th系列濃度が約5.0 ppm、貝塚市で採取された試料でU系列濃度が約1.0 ppm、Th系列濃度が約6.7 ppmであり、当該図に示されているような濃度分布になるとは考えにくい。上記の地域から30 km程度離れてはいるが、奈良県磯城郡三宅町の高田川付近で採取された試料では、U系列濃度が約7.0 ppm、Th系列濃度が約45.0 ppmであり、近大炉・京大炉測定エリア内にある河川堆積物試料の中でも際立って高濃度である。元素濃度マップ作成の際に行った内挿補間計算により、当該試料の局所的な影響が周囲に拡大されたものと推察される。一方、航空機モニタリングによる元素濃度マップでは、兵庫県尼崎市周辺から大阪府守口市および寝屋川市周辺にかけて比較的高濃度な領域が点在しているものの、測定エリア内の濃度平均値に近い領域の方が広く、海と陸の地球化学図における元素濃度分布傾向と一致しているとは言い難い。

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、本手法により一定の信頼性をもつ、航空機モニタリングによる天然放射性核種濃度マップ作成が可能であると考えられる。

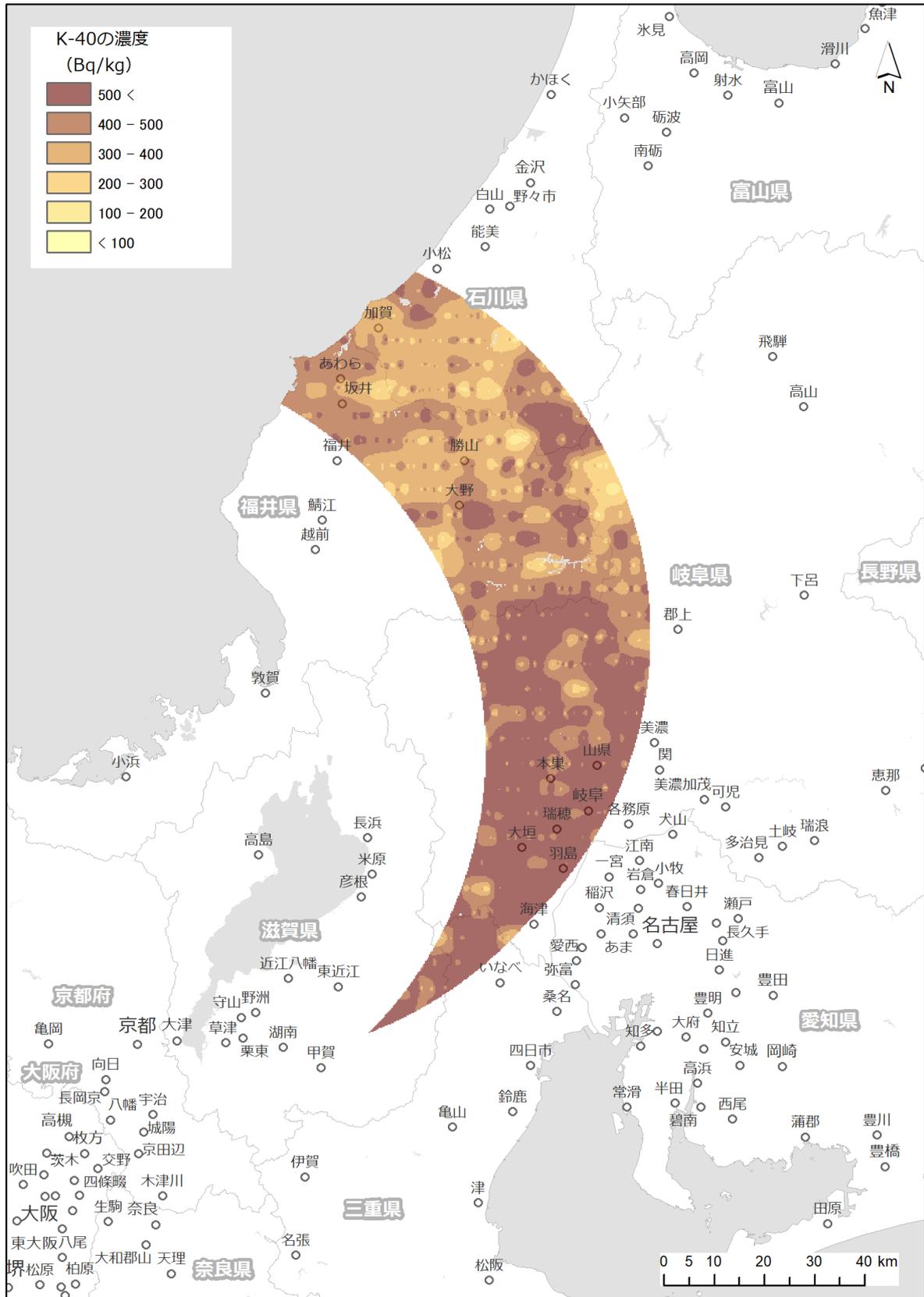


Fig. 4-23 ^{40}K 濃度マップ (美浜・敦賀)

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

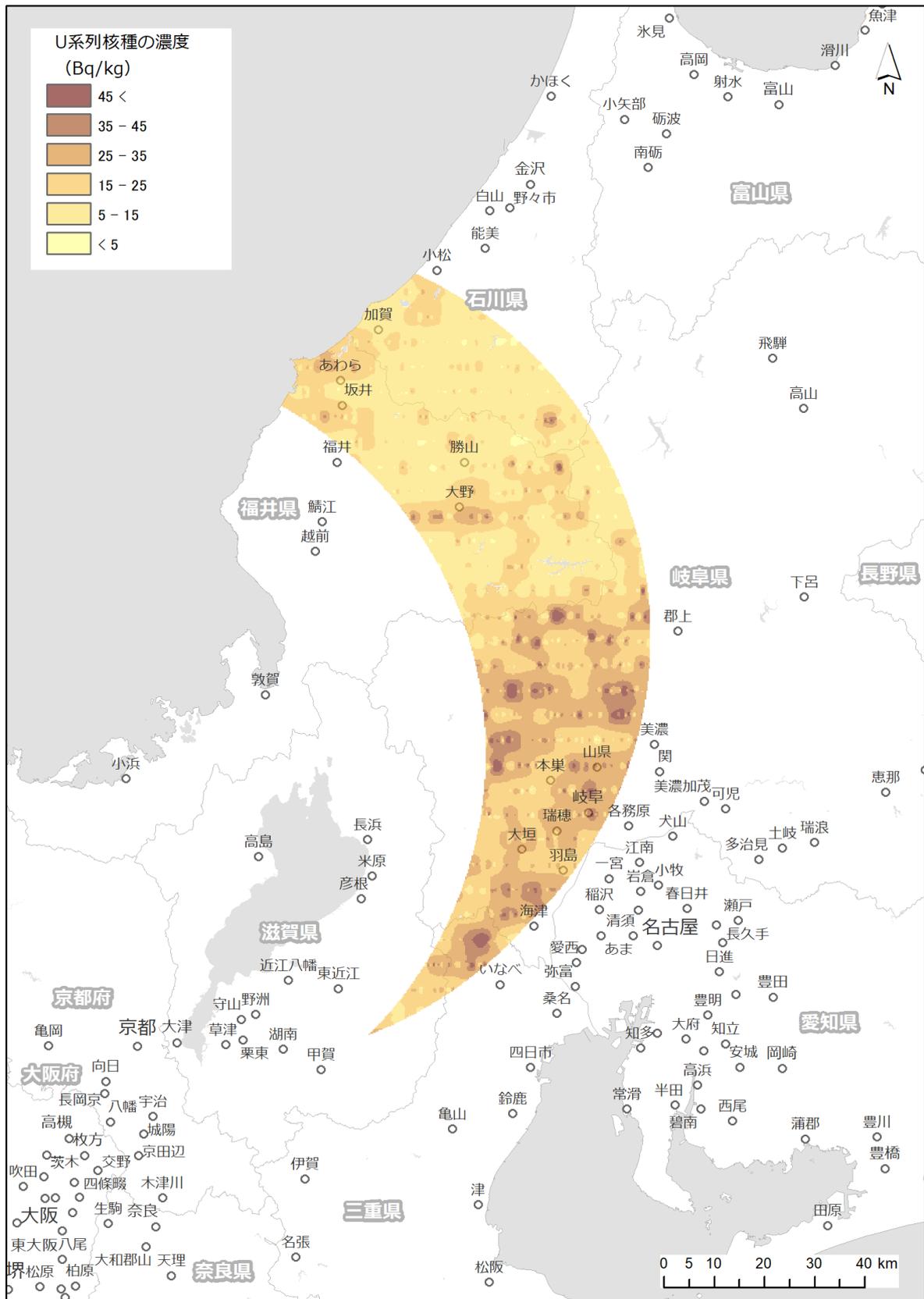


Fig. 4-24 U系列濃度マップ (美浜・敦賀)

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

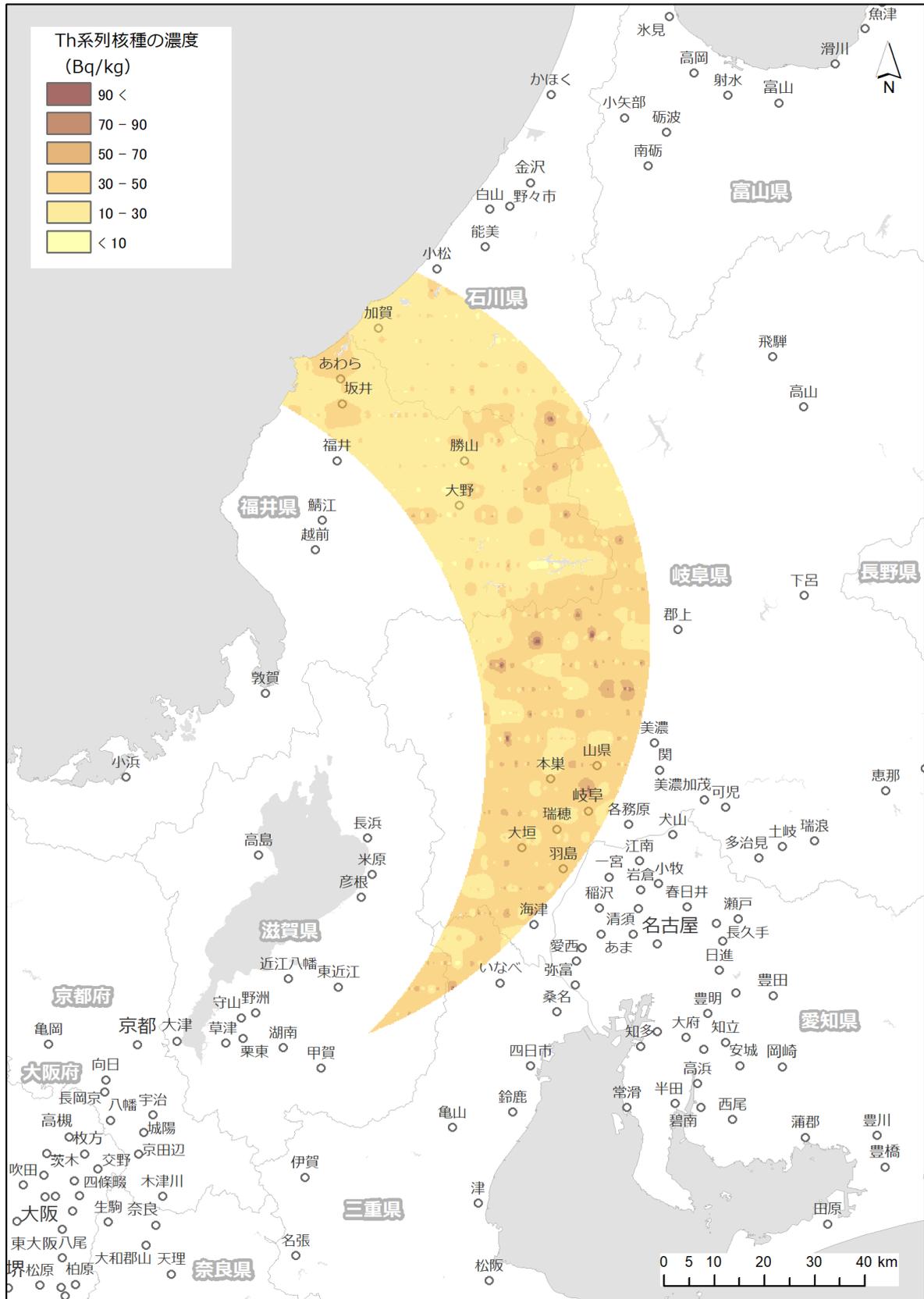


Fig. 4-25 Th 系列濃度マップ (美浜・敦賀)

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

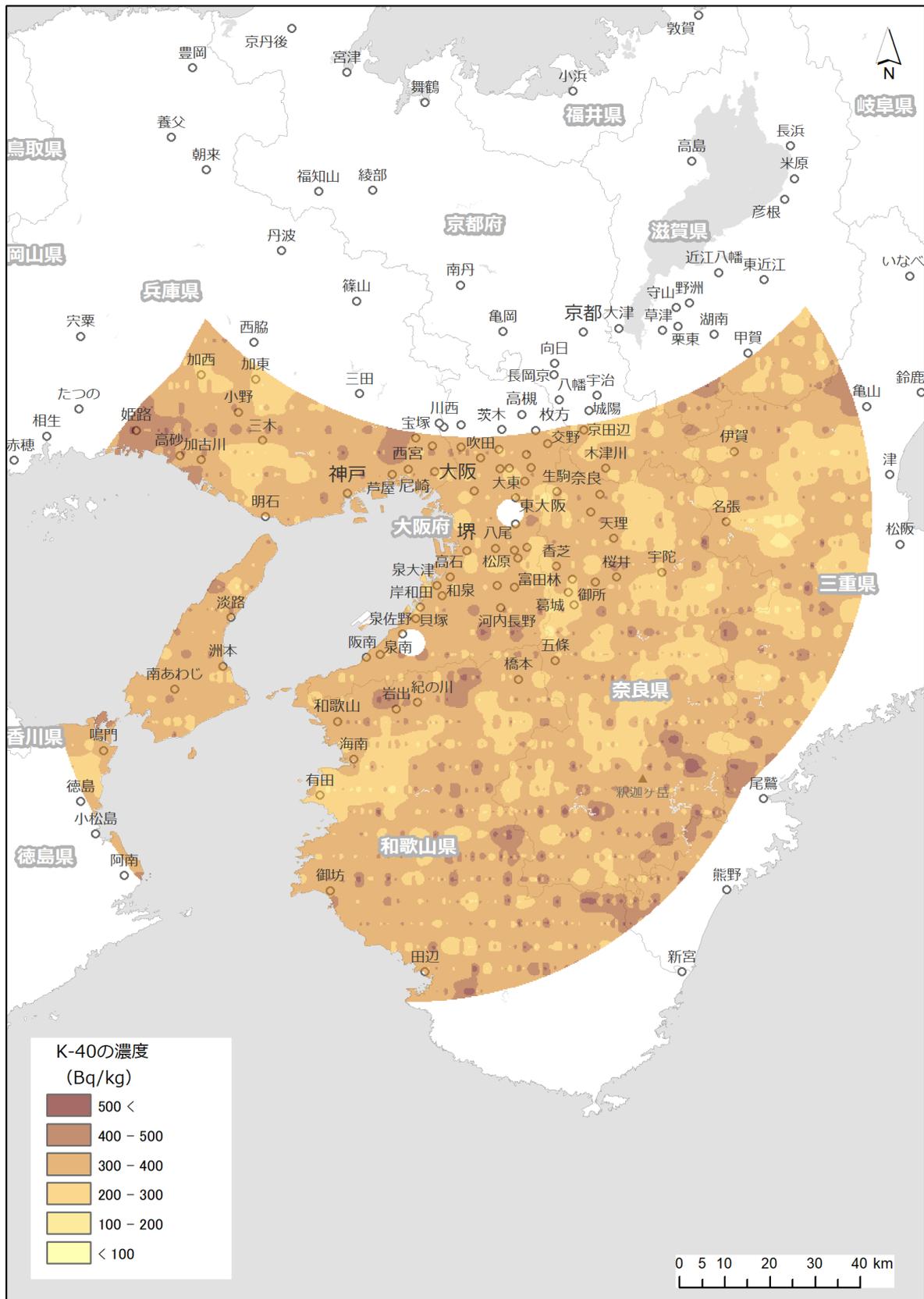


Fig. 4-26 ^{40}K 濃度マップ (近大炉・京大炉)

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

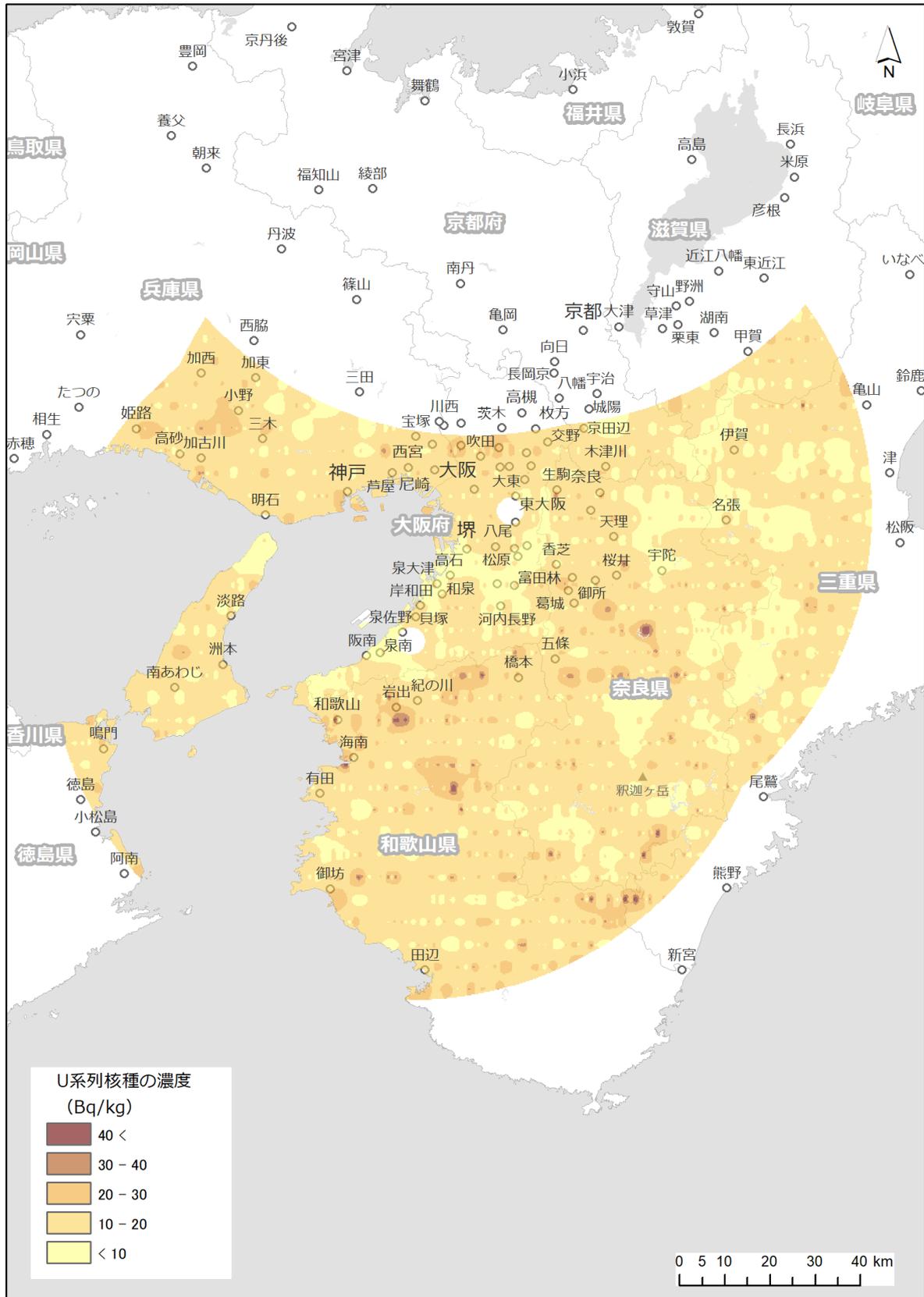


Fig. 4-27 U 系列濃度マップ (近大炉・京大炉)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

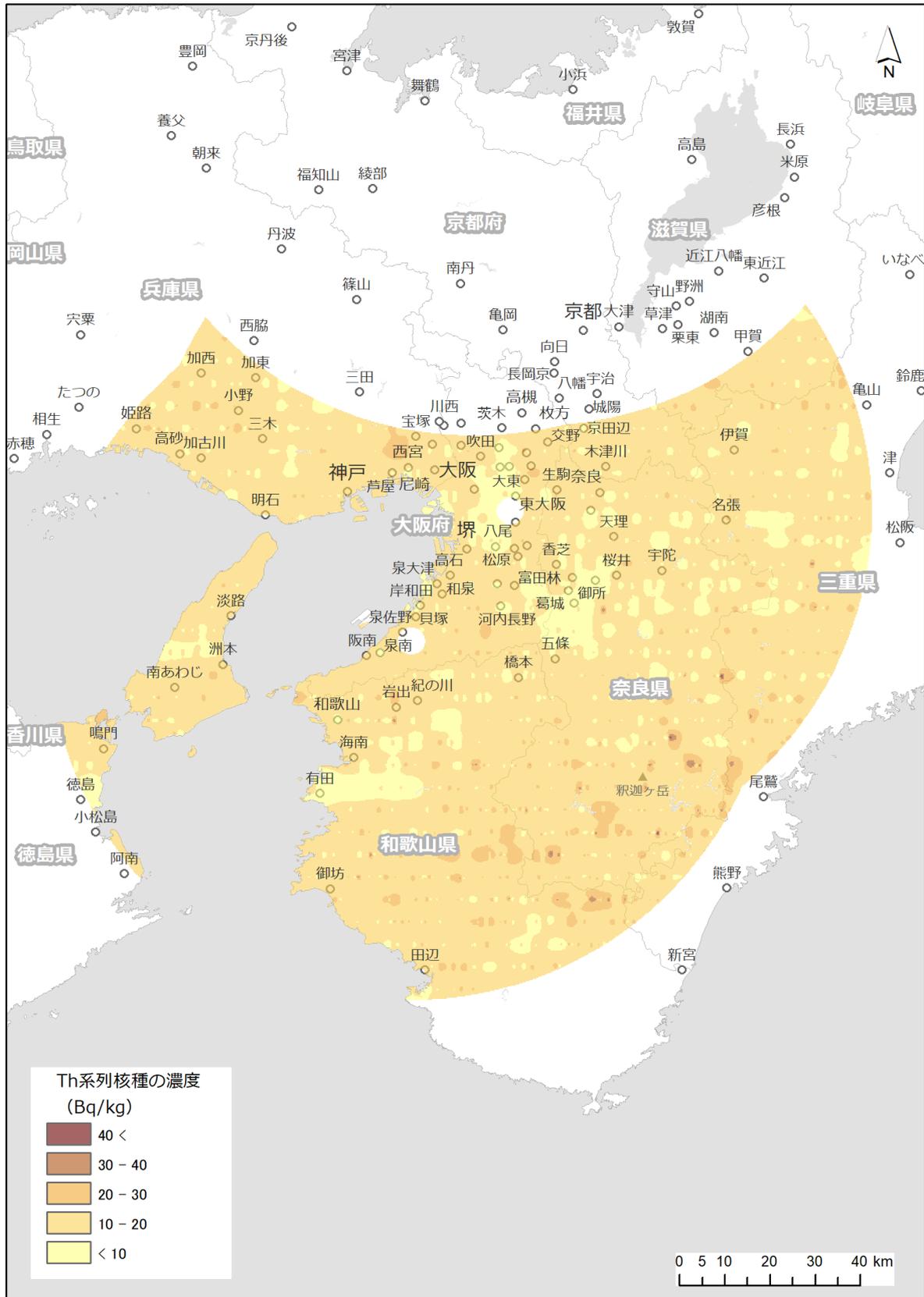


Fig. 4-28 Th 系列濃度マップ (近大炉・京大炉)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

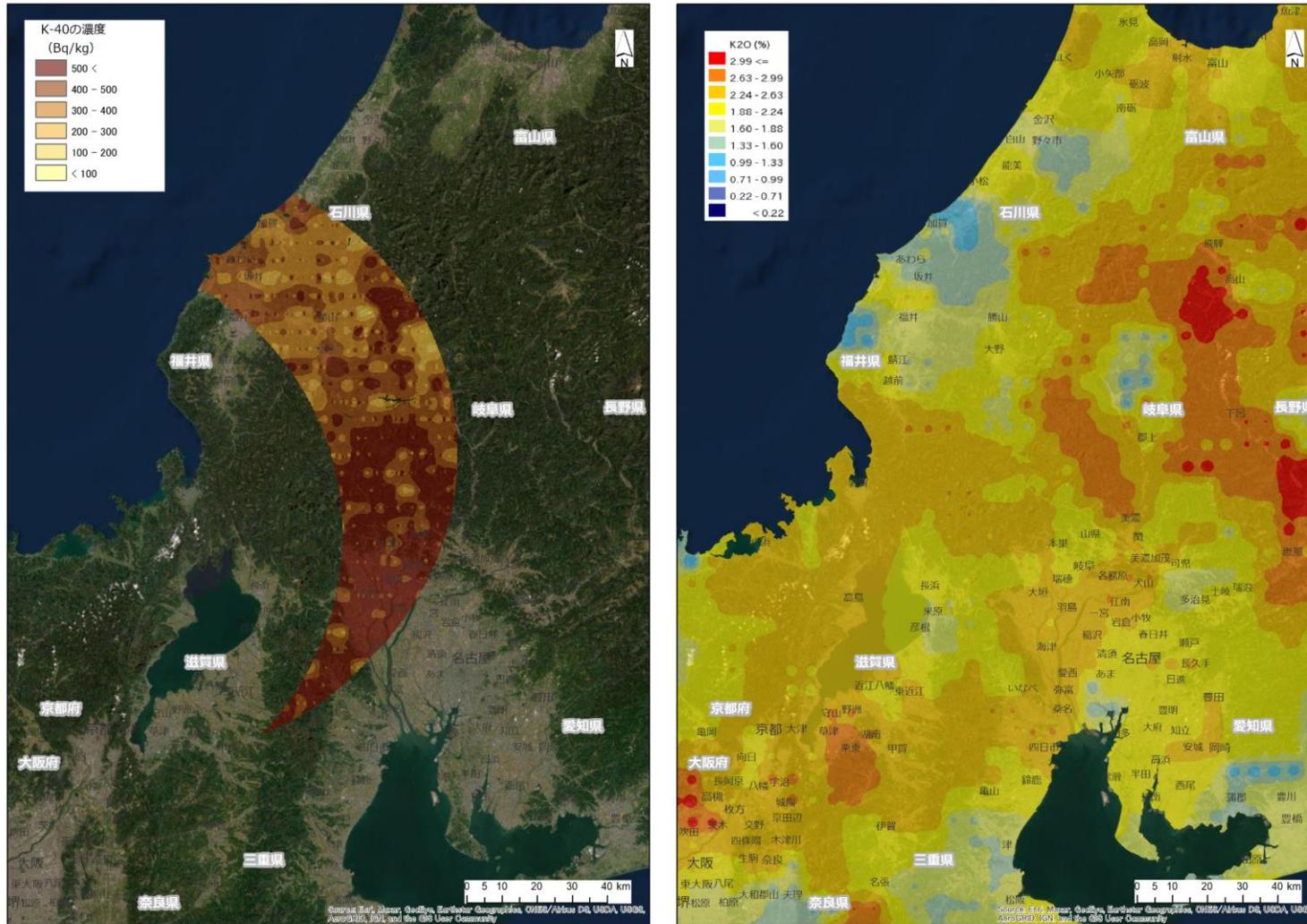


Fig. 4-29 放射性核種濃度測定結果(左)と地球化学図(右)の比較(^{40}K 、美浜・敦賀)

(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。)

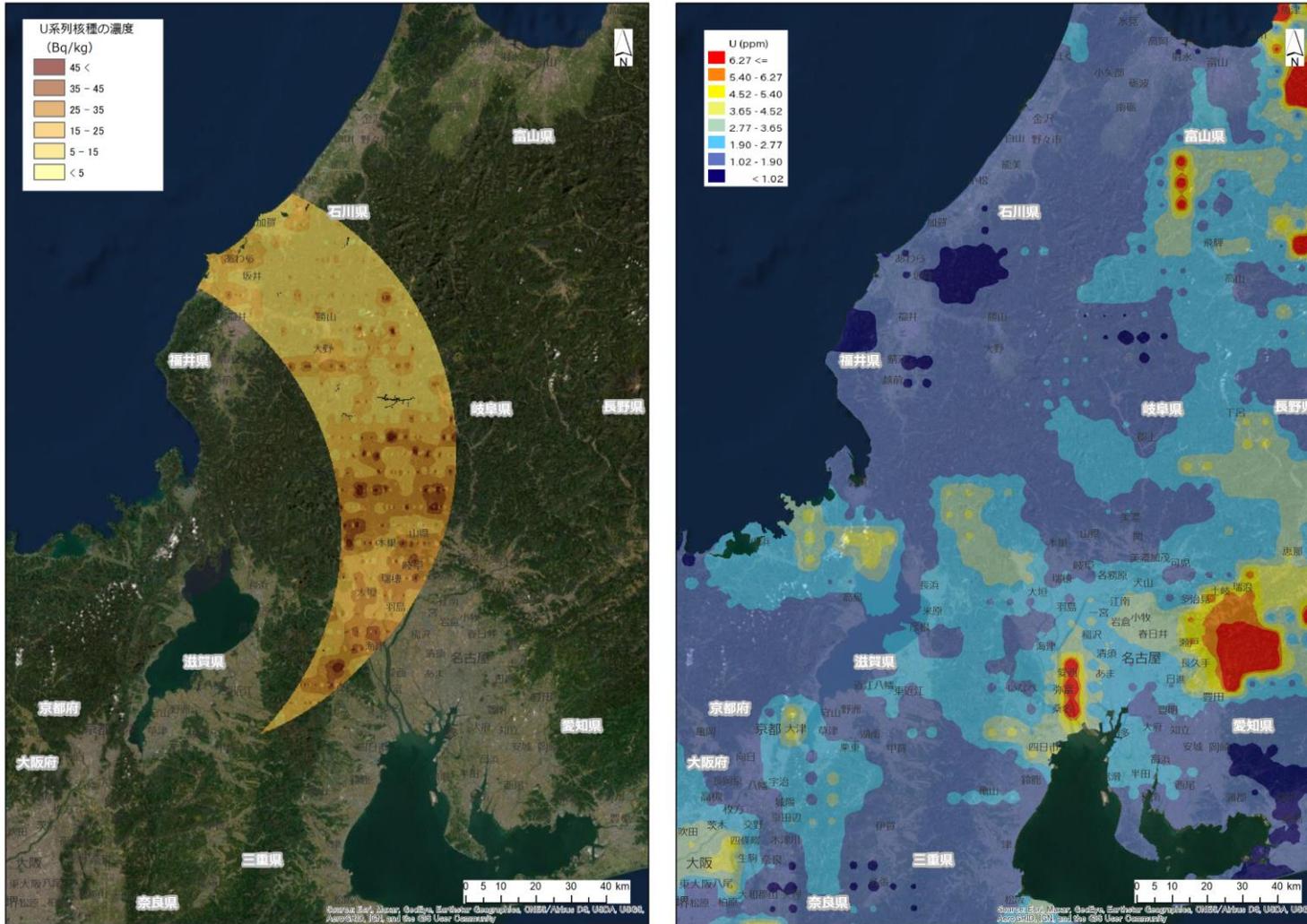


Fig. 4-30 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (U 系列、美浜・敦賀)

(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。)

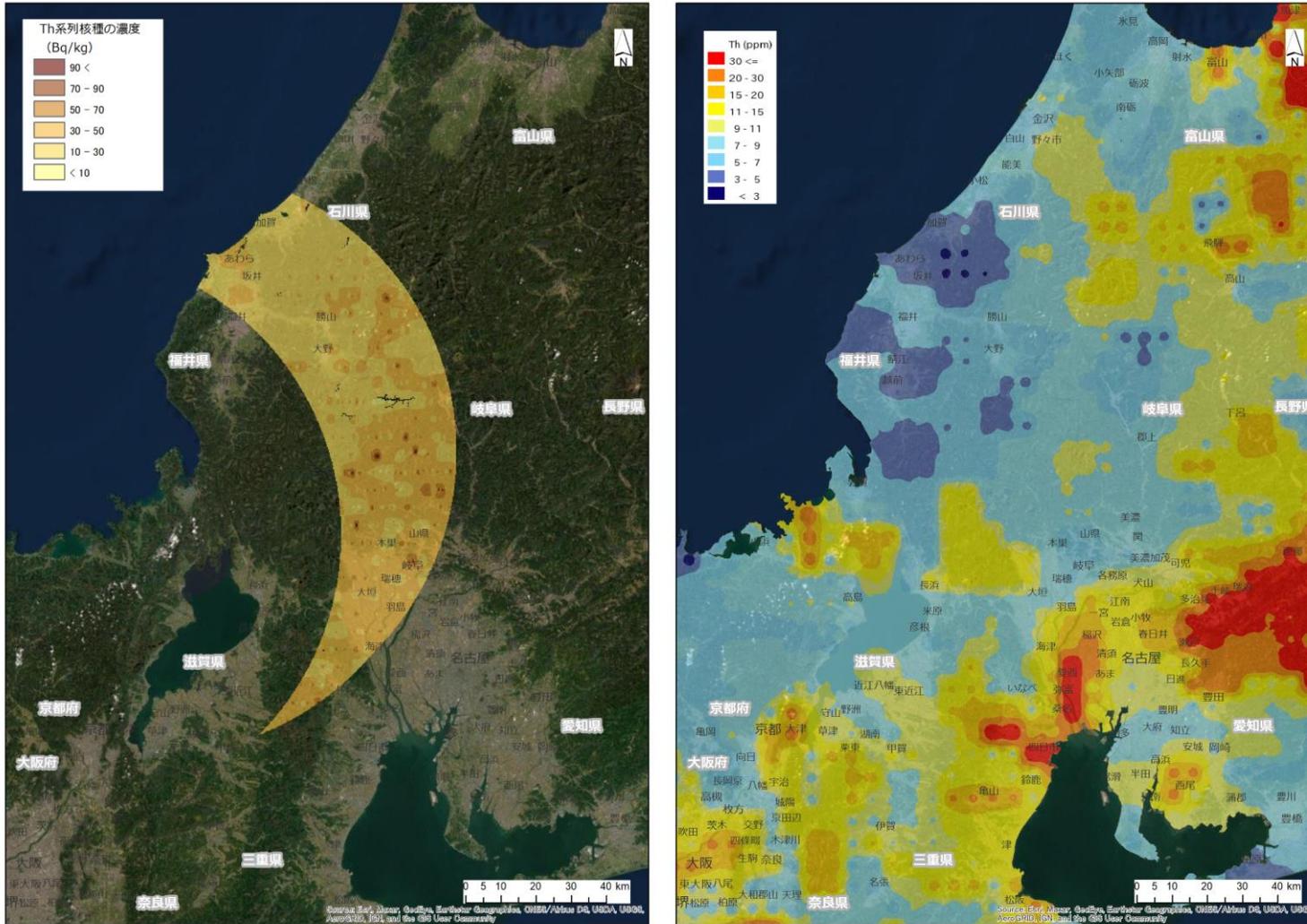


Fig. 4-31 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (Th 系列、美浜・敦賀)

(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。)

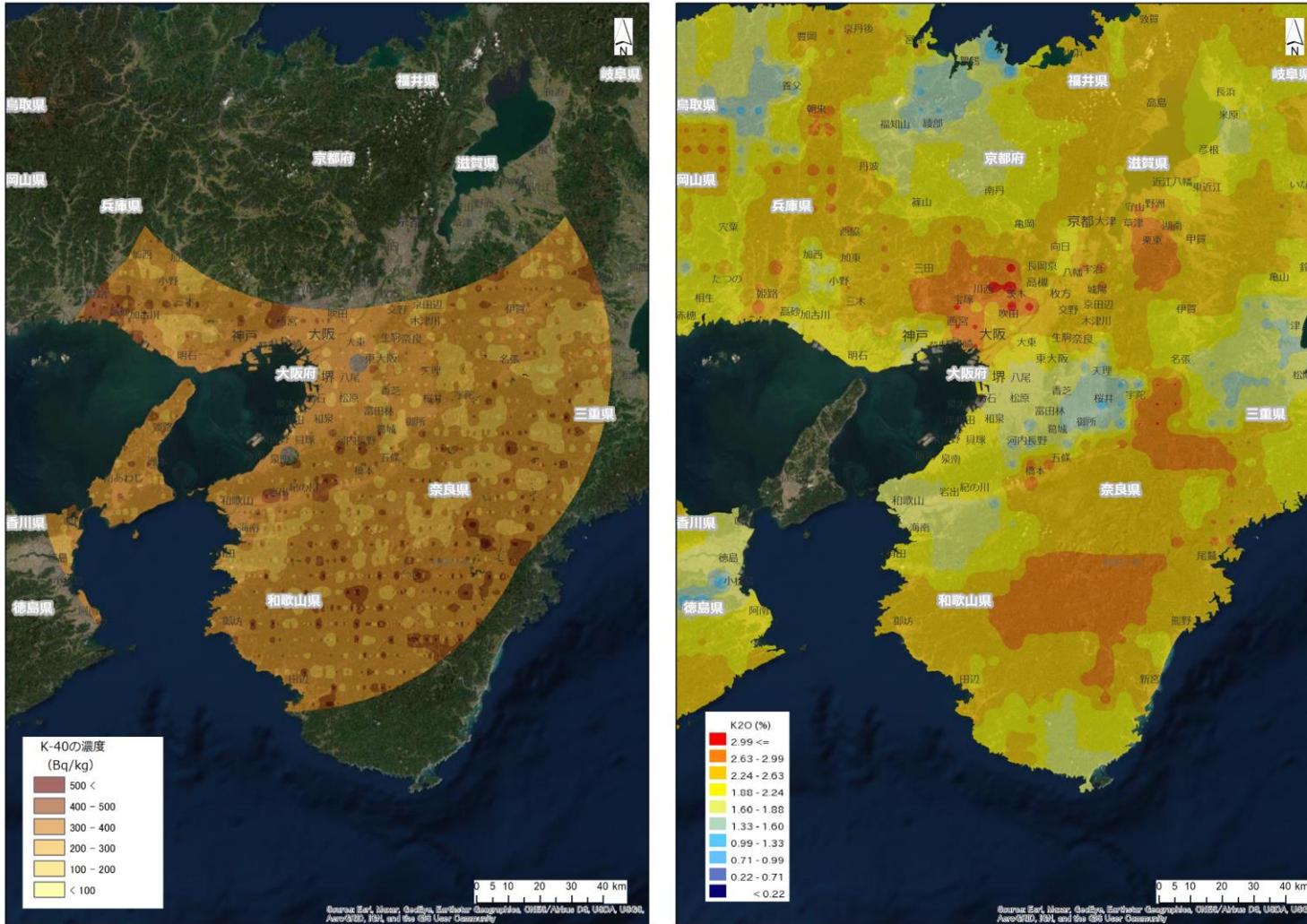


Fig. 4-32 放射性核種濃度測定結果(左)と地球化学図(右)の比較(^{40}K 、近大炉・京大炉)

(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。)

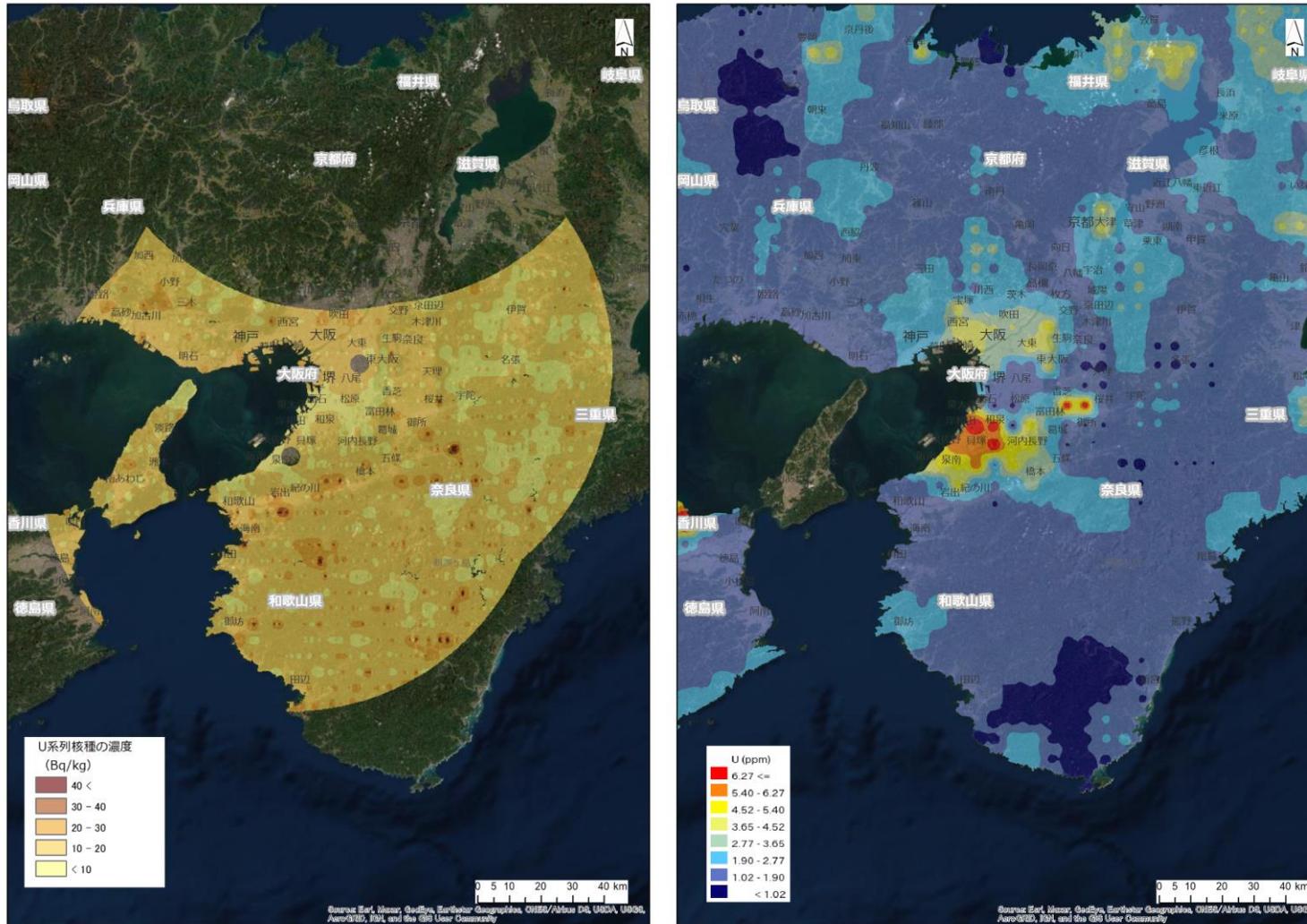


Fig. 4-33 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (U 系列、近大炉・京大炉)

(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。)

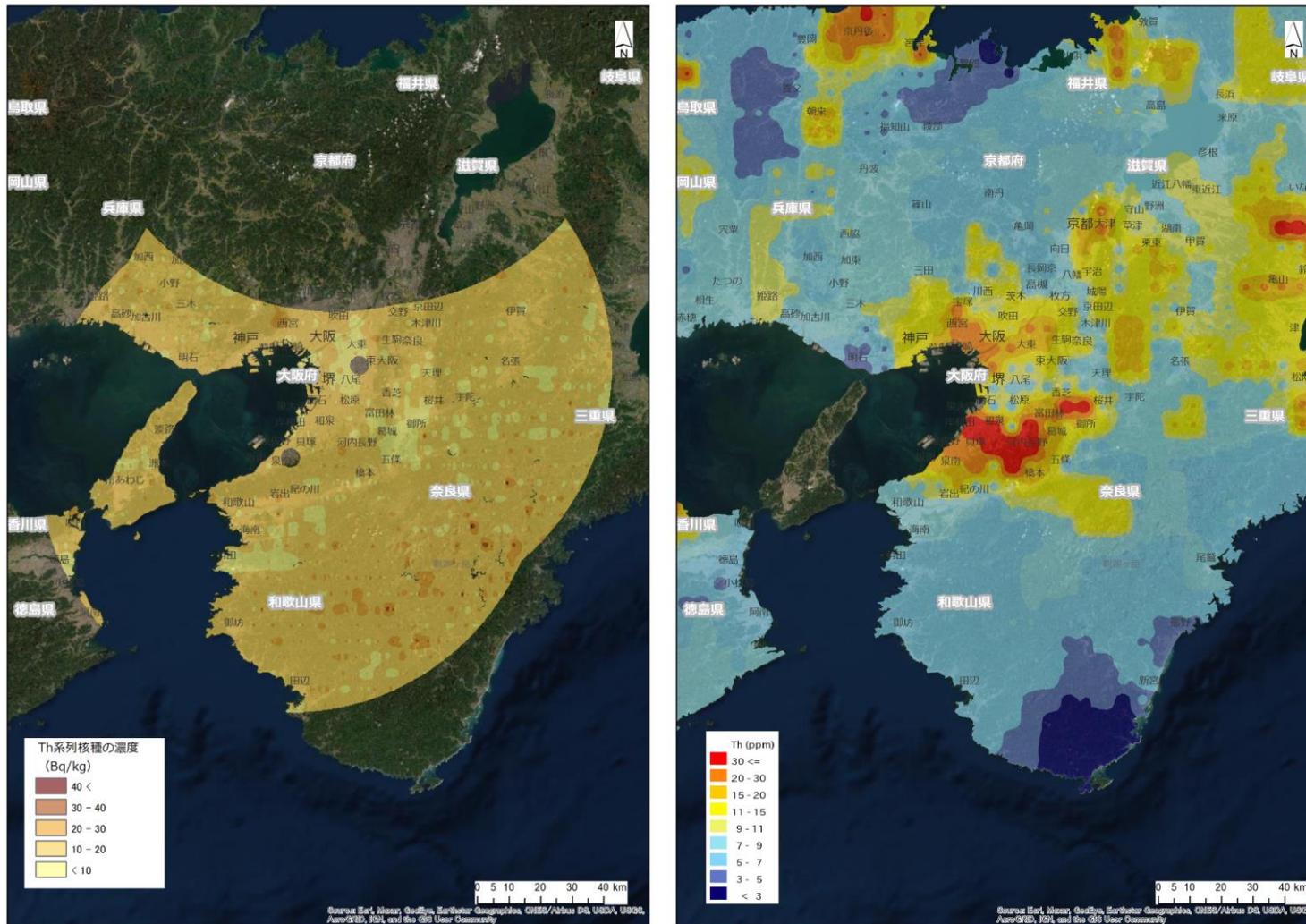


Fig. 4-34 放射性核種濃度測定結果(左)と地球化学図(右)の比較(Th系列、近大炉・京大炉)

(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. ラドン弁別法の適用結果

5.4.2. パラメータ (RI および GI) の決定

前述したように、ラドン弁別法の信頼性は、RI と GI の設定精度に依存する。RI と GI については、ヘリコプターの遮へいによって変化するため、各バックグラウンドモニタリングエリアで使用したヘリコプターごとに実測データから数値を決定した。測定データは 40 秒ごとに取得した計数率を積算した。積算したデータから宇宙線および自己汚染の寄与分を差し引き、RI および GI の算出に使用した。GPS データ (緯度、経度および飛行高度) については 40 秒間で取得したデータの平均値を使用した。

RI の算出に際しては、海上をフライトした際に取得したデータの内、海拔高度 150 m～450 m で取得したものを抽出し、宇宙線および自己汚染の寄与分を差し引いた計数率データを用いた。美浜・敦賀および近大炉・京大炉で使用した各ヘリコプターにおける NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係を Fig. 4-35 (a) および (b) に示す。本散布図における近似直線の傾きを RI と定義した。

一方、GI の算出に際しては、陸上をフライトした際に取得したデータの内、対地高度 290 m～320 m で取得したものを抽出し、宇宙線および自己汚染の寄与分を差し引いた計数率データを用いた。美浜・敦賀および近大炉・京大炉で使用した各ヘリコプターにおける NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係を Fig. 4-36 (a) および (b) に示す。本散布図における近似直線の傾きを GI と定義した。これらのデータにはラドン子孫核種の影響が含まれているが、完全にラドン子孫核種の影響のない環境でのデータ取得は困難であることから、GI の数値は不確かさが比較的大きいと推察される。

本解析に使用した RI および GI と使用したヘリコプター機種について Table 4-4 に示す。なお、本表には、2020 年度の福島原子力発電所から 80 km 圏外における航空機モニタリング (東日本第 11 次モニタリング) で用いたパラメータおよびヘリコプター機種も参考情報として併記した。

Table 4-4 RI および GI の一覧

モニタリング名	開始日	終了日	RI	GI	ヘリコプター機種	
美浜・敦賀	2020/8/1	2020/8/6	34.4	33.1	Bell412	JA9616
東日本11次モニタリング(A班)	2020/9/29	2020/10/30	21.7	30.4	Bell430	JA05TV
東日本11次モニタリング(B班)	2020/9/22	2020/10/5	26.9	30.5	Bell412	JA6928
	2020/10/5	2020/10/27			Bell412	JA6767
近大炉・京大炉	2020/11/12	2020/11/19	31.6	33.8	Bell412	JA6928

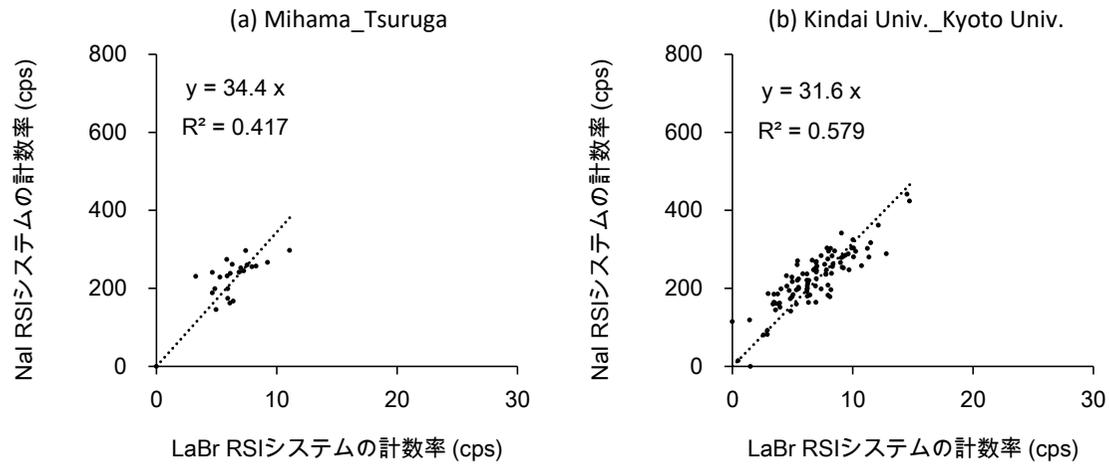


Fig. 4-35 海上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係

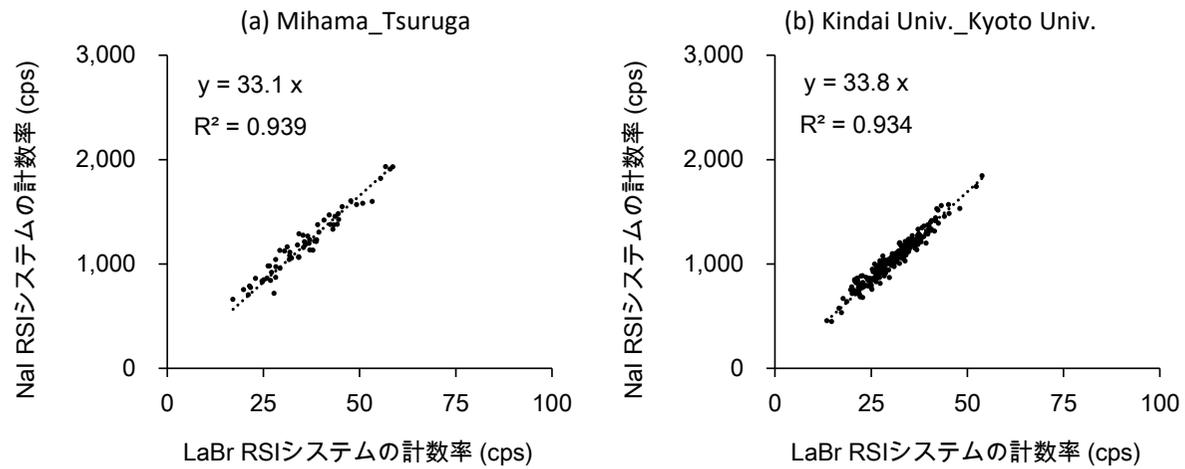


Fig. 4-36 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係

5.4.2. 従来手法との比較

Fig. 3-11 のフロー図に則った従来手法においては測定日ごとに空气中核種フライトとして対地高度約 900 m に機体を保ち約 3 分のフライトを継続し得られたデータを、地上の放射性核種由来の計数率の影響が無視できるものと見なし、全計数率から差し引いている。当該フライトで得られる計数率にはラドン子孫核種由来の計数率も含まれていると考えられ、ある程度ラドン子孫核種の影響を差し引くことができていると思われる。従来手法によるラドン子孫核種弁別の効果と上記の新たなラドン弁別手法の有効性を評価するために、Fig. 3-11 で示した従来手法に基づいた計数率と、Table 4-4 に示したヘリコプター機種毎の RI および GI 値を設定した場合におけるラドン弁別手法により求めたラドン子孫核種起源の計数率の比較を行った。測定日ごとの空气中核種フライトデータから求めた計数率と同日におけるラドン弁別手法で求めた計数率の平均値の比較を Fig. 4-37 に示す。本図には比較のため、東日本第 11 次モニタリングに適用した結果についても示している。このように一定の正の相関関係にあるものの、ばらつきが大きいことが分かる。プロット自体は、福島原子力発電所事故由来の放射性セシウムの有無に関わらず同様なばらつきを示しており、従来手法でもラドン子孫核種の弁別はある程度できることが示唆される。しかしながら、従来手法は大気中のラドン子孫核種濃度が 1 日を通して測定範囲で一定である場合のみ有効である。よってラドン子孫核種由来の計数率の減算手法により普遍性を持たせるために、ラドン弁別手法の精度を向上させていく必要があると考える。

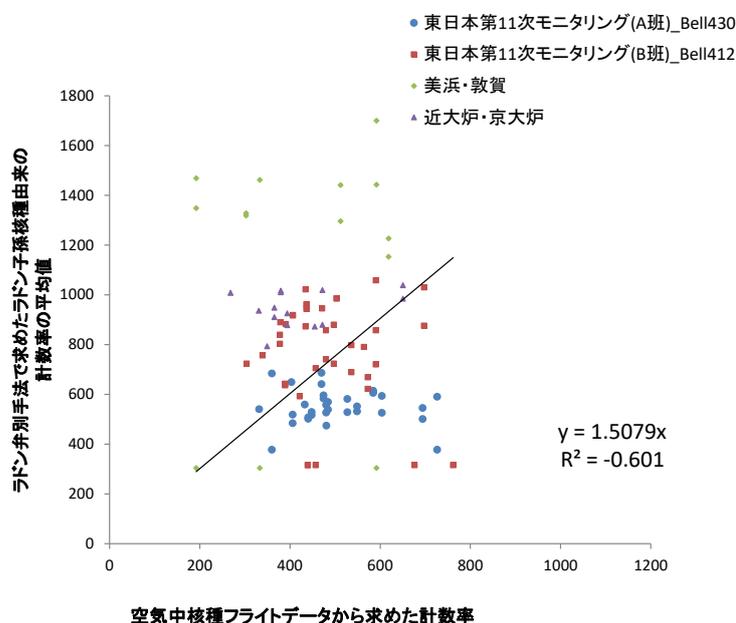


Fig. 4-37 空气中核種フライトから求めた NaI RSI システムの計数率とラドン弁別手法を適用し求めたラドン子孫核種起源の計数率の平均値の比較

5.4.2. ラドン弁別手法の適用

ラドン弁別手法を 2020 年度の測定結果に適用し、空間線量率マップ等を作成した。今までの経験から、本手法の精度には GI の数値が特に強く影響を及ぼすと考えられるため、Table 4-4 に示したヘリコプター機種毎の GI の数値を基準値とし (GI = ± 0 と表記)、基準値から -1 および -2 した場合 (GI = -1 および -2 と表記) についても解析した。得られた結果を地上測定値 30 点 (美浜・敦賀) および 40 点 (近大炉・京大炉) と比較し、その妥当性について考察した。なお、3 章で示した従来の空間線量率換算手法においては、これまでの経験から Table 3-1 で示したように、測定日ごとに空気中核種フライトとして対地高度約 900 m に機体を保ち約 3 分のフライトを継続し、得られたデータを差し引いている。当該フライトで得られる計数率にはラドン子孫核種由来の計数率も含まれていると考えられ、ある程度ラドン子孫核種の影響を差し引くことができていると思われる。本手法の検証には、空気中核種フライトで取得した計数率を減算せずにラドン弁別手法を適用する。よって、本項で示す「ラドン弁別なし」の空間線量率マップは Fig. 4-19、Fig. 4-20 に示したマップとは異なる。

GI の数値を変化させながらラドン弁別手法を適用した空間線量率マップを Fig. 4-38 (美浜・敦賀)、Fig. 4-39 (近大炉・京大炉) に示す。ラドン弁別なしの場合、両測定エリアともに大部分で $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を上回っており、通常では考え難い空間線量率分布を示した。美浜・敦賀については、GI = ± 0 の場合、中央部の空間線量率が大部分で $0.06 \mu\text{Sv/h}$ を下回っていた。本マップにおける空間線量率分布の傾向は従来手法で得られたものとは真逆の傾向であり、妥当性に疑問が残る。近大炉・京大炉についても、ラドン弁別手法を適用した空間線量率マップでは、測定エリア全体に渡って $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を上回る場所が点在しており、空間線量率の変動が激しい不自然な分布を示した。

さらに、ラドン子孫核種の影響の高い地域について考察するために、全計数率データからラドン子孫核種に起因する γ 線計数率を抽出して作成したマップを Fig. 4-40 (美浜・敦賀)、Fig. 4-41 (近大炉・京大炉) に示す。本マップは測定時刻が場所により異なるので、その時の測定により検出された空気中のラドン子孫核種由来の計数率が時間的につぎはぎ状でマップとして表現されている。美浜・敦賀については、ラドン子孫核種由来の計数率が最も大きく算出される GI = ± 0 の場合、500 cps を上回る地域がほとんどを占め、測定範囲の北部では比較的計数率が低く算出された。一方、近大炉・京大炉の測定結果に適用した場合においても、GI = ± 0 の場合、計数率が 500 cps を超える地域が多く、特に中央部から南部に渡って比較的高く算出された。ただし、ラドン子孫核種の起源としては中国大陸からの輸送と、測定地域近傍における地殻からの放出が考えられ、後者由来のものは濃度の時間変化は小さいと考えられる。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。

従来手法と Table 4-4 に示したヘリコプターごとの GI の数値を用いてラドン弁別手法を適用した空間線量率のマップを Fig. 4-42 (美浜・敦賀および近大炉・京大炉) に示す。このように、両マップ間で空間線量率の計算値および分布傾向が著しく異なっていた。空間線量率の計算結果の妥当性を評価するために、地上測定値との比較を行った。比較結果を Fig. 4-43 (美浜・敦

賀)、Fig. 4-44 (近大炉・京大炉) に示す。ファクター 0.5~2 の範囲に収まっているプロットの数に着目すると、美浜・敦賀については従来手法で 93 % (全 30 点中 28 点) であったのに対し、ラドン弁別後では $GI = \pm 0$ で 53 % (全 30 点中 16 点)、 $GI = -1$ で 60 % (全 30 点中 18 点)、 $GI = -2$ で 67 % (全 30 点中 20 点) であり、収まりが著しく悪くなった。近大炉・京大炉についても、従来手法で 93 % (全 40 点中 37 点) であったのに対し、ラドン弁別後では $GI = \pm 0$ で 65 % (全 40 点中 26 点)、 $GI = -1$ で 65 % (全 40 点中 27 点)、 $GI = -2$ で 73 % (全 40 点中 29 点) であり、収まりが悪くなった。以上のことから、美浜・敦賀および近大炉・京大炉における、ラドン弁別手法による空間線量率マップは従来手法によるものと比較して妥当性に劣ると結論される。

ラドン弁別手法を航空機モニタリング解析システムに組み込み運用してきた 2016 年度から、2019 年度までの福島原子力発電所から 80 km 圏外における航空機モニタリングおよび全国の原子力関連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⁷⁾⁻¹⁵⁾において、本手法は従来手法と同等以上の精度で空間線量率の評価が可能であることが示されてきた。前述の通り、ラドン弁別手法の精度は RI および GI の精度に依存すると考えられることから、これらパラメータの設定方法についての再検討が必要であると思われる。パラメータの設定方法について再検討し、ラドン弁別手法を再適用した結果について次項に詳述する。

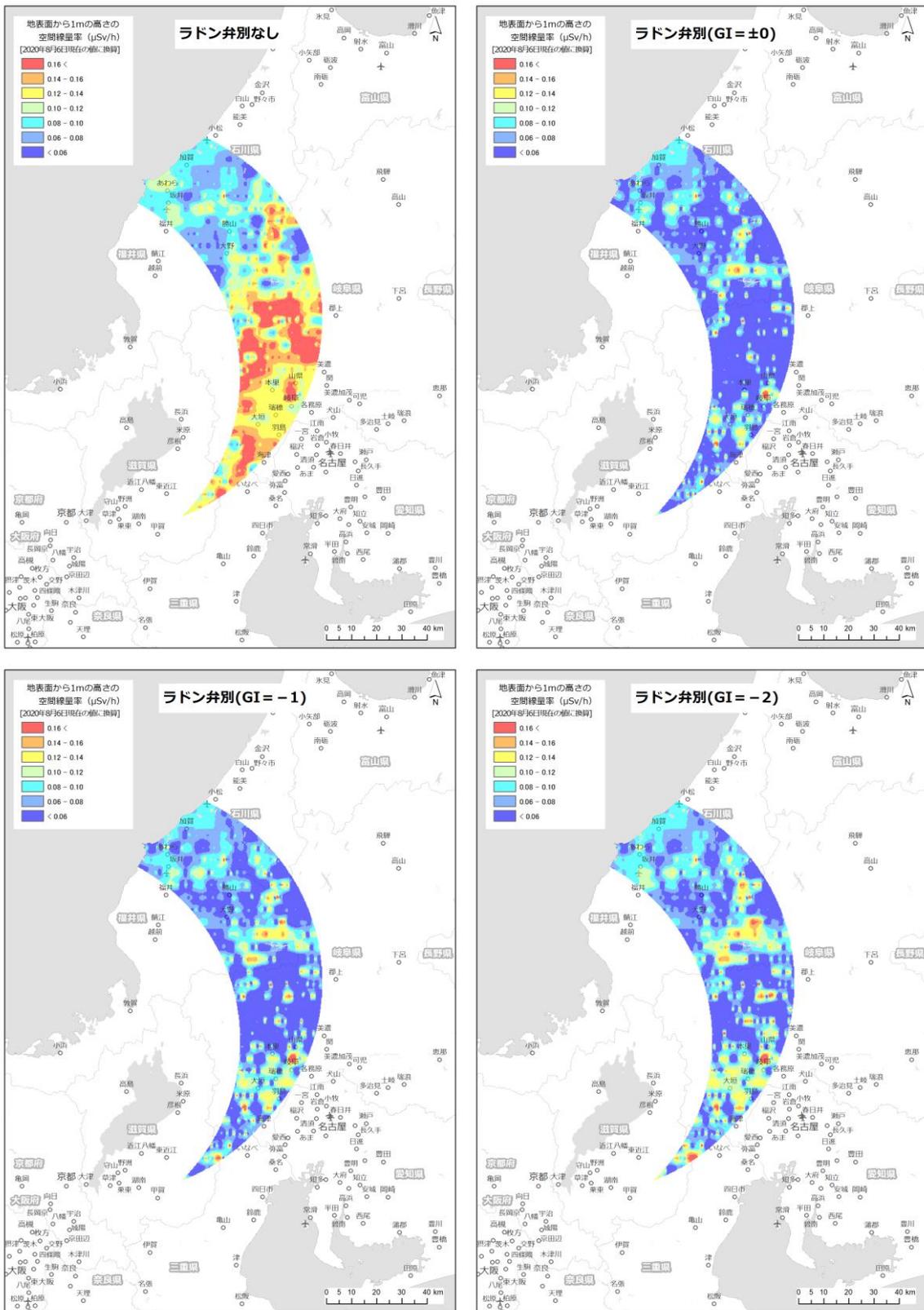


Fig. 4-38 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (美浜・敦賀)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (© Esri Japan) を使用。)

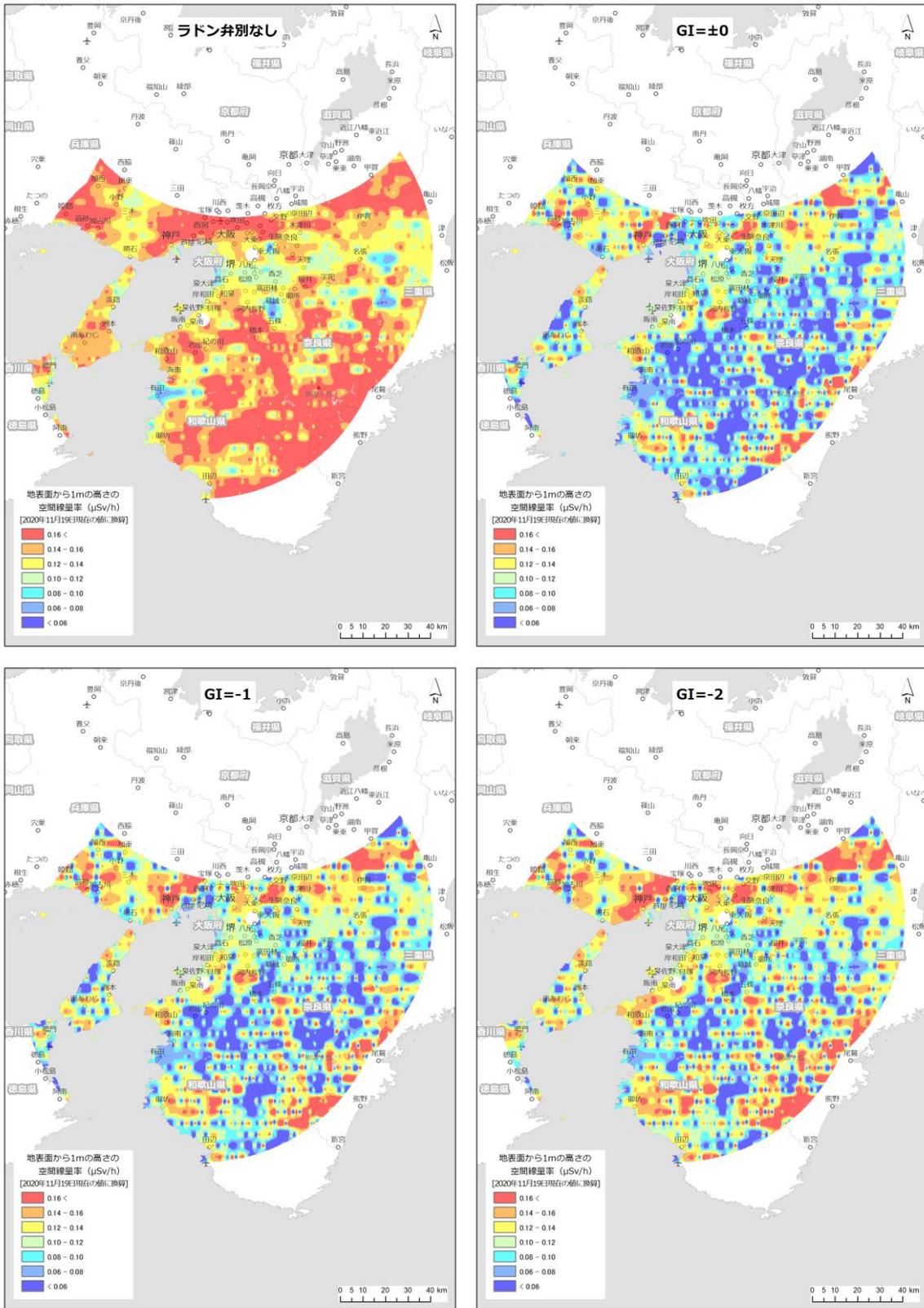


Fig. 4-39 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (近大炉・京大炉)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

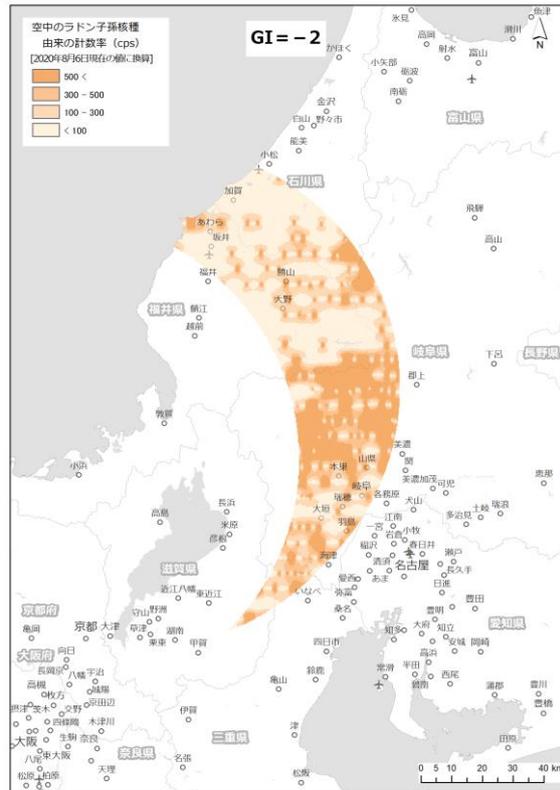
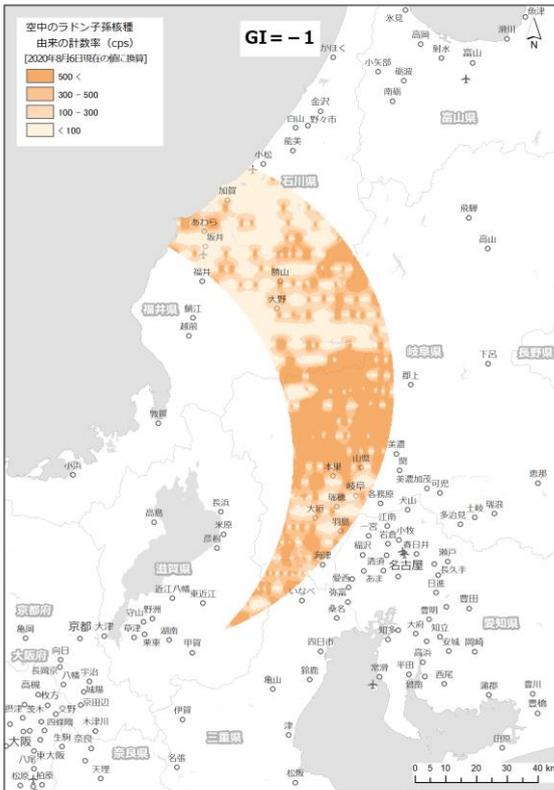
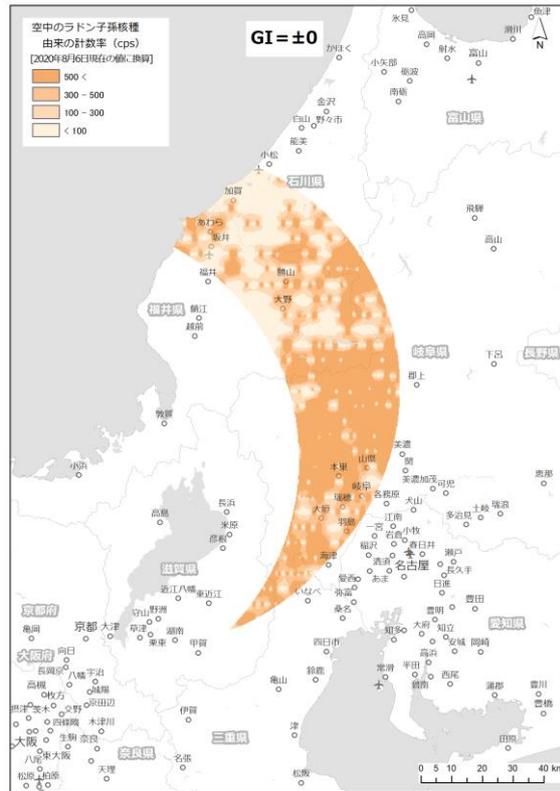
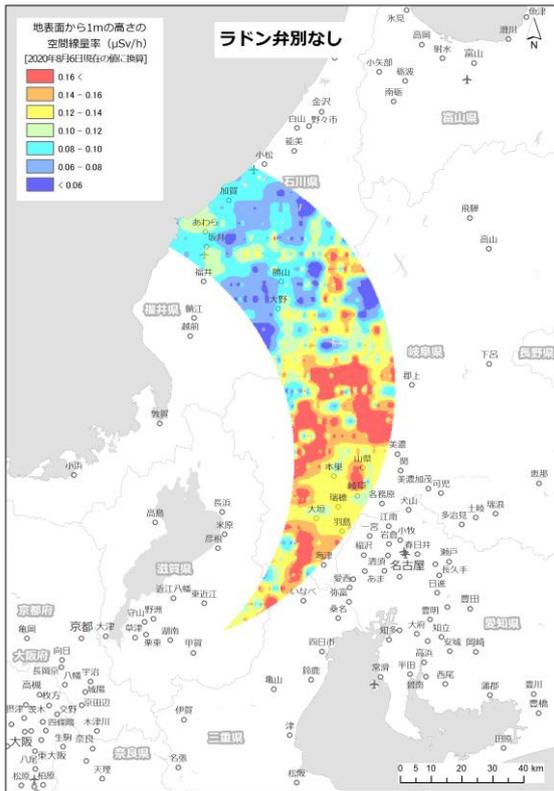


Fig. 4-40 空气中的ラドン子孫核種起源の計数率マップ (美浜・敦賀)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

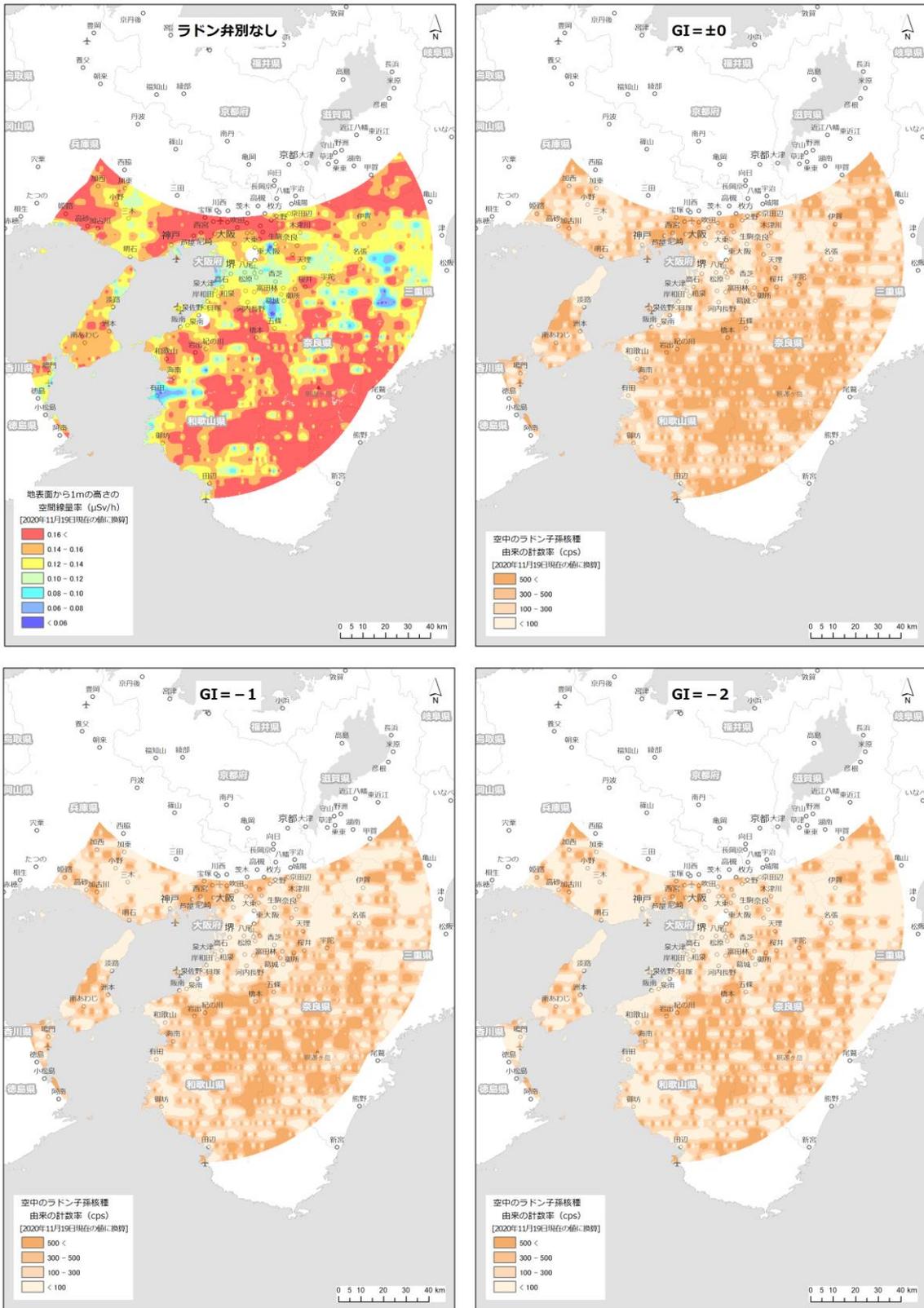


Fig. 4-41 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (近大炉・京大炉)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

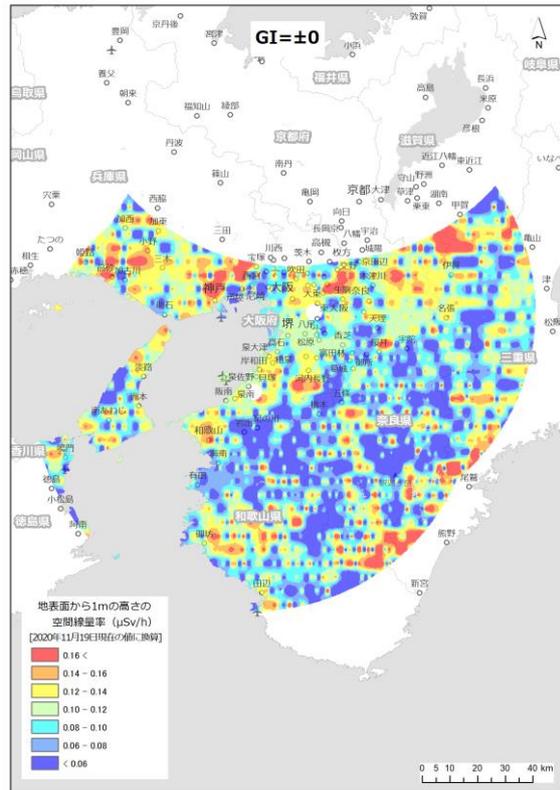
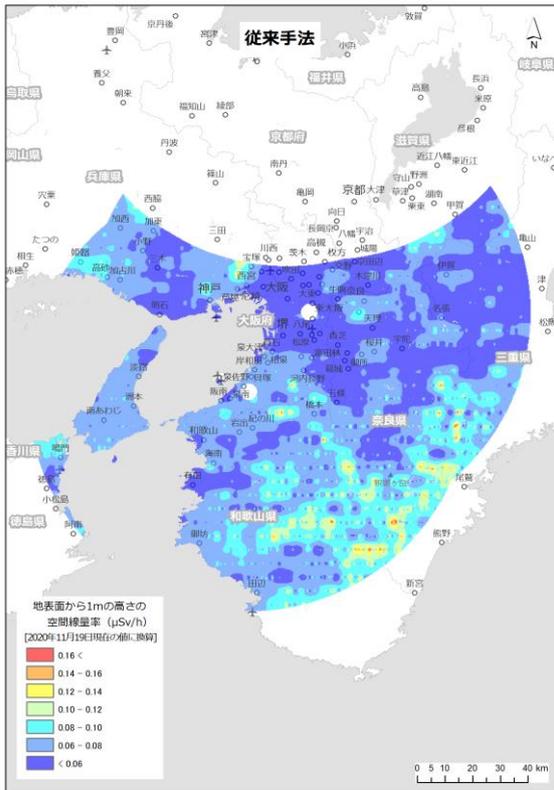
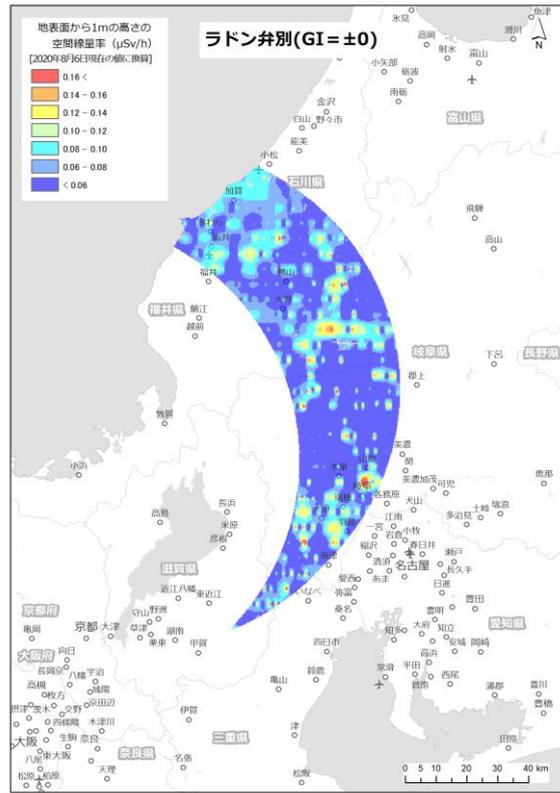
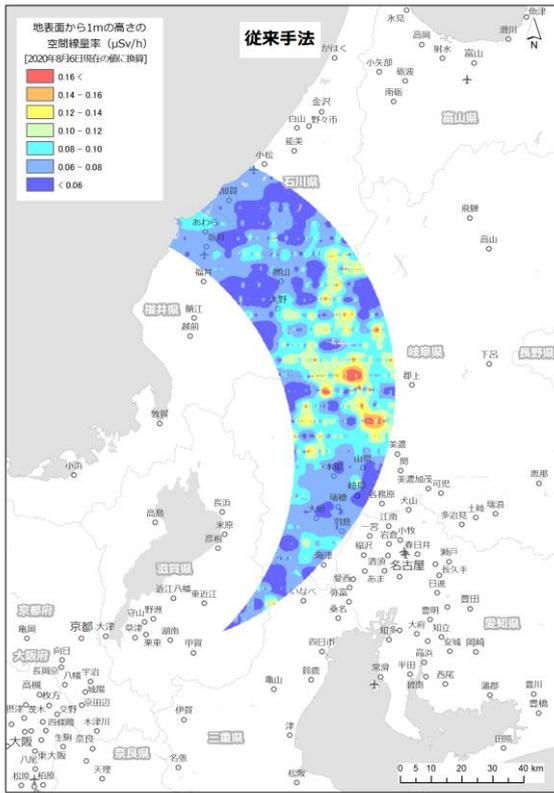


Fig. 4-42 ラドン井別手法適用前後の空間線量率マップ比較

(上段: 美浜・敦賀、下段: 近大炉・京大炉)

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

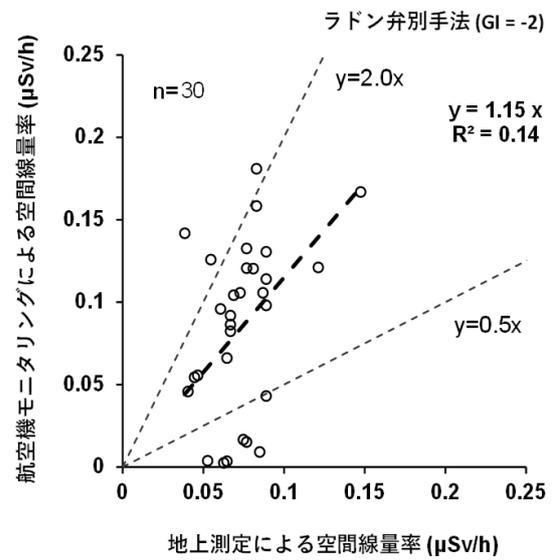
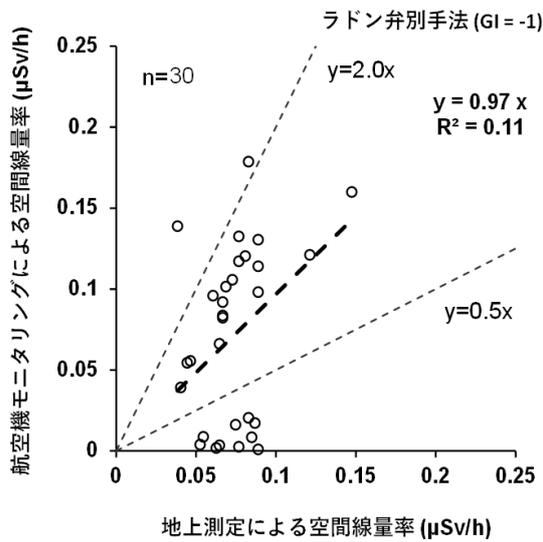
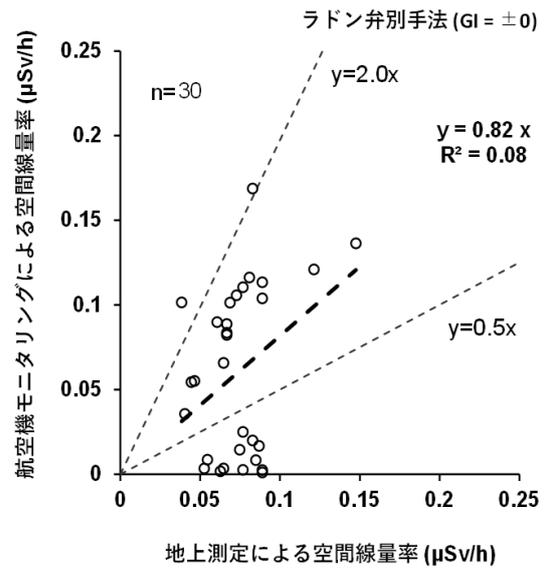
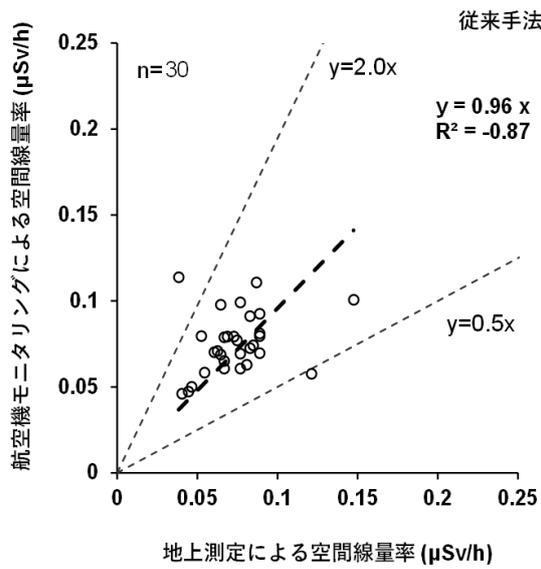


Fig. 4-43 従来法とラドン弁別手法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較 (美浜・敦賀)

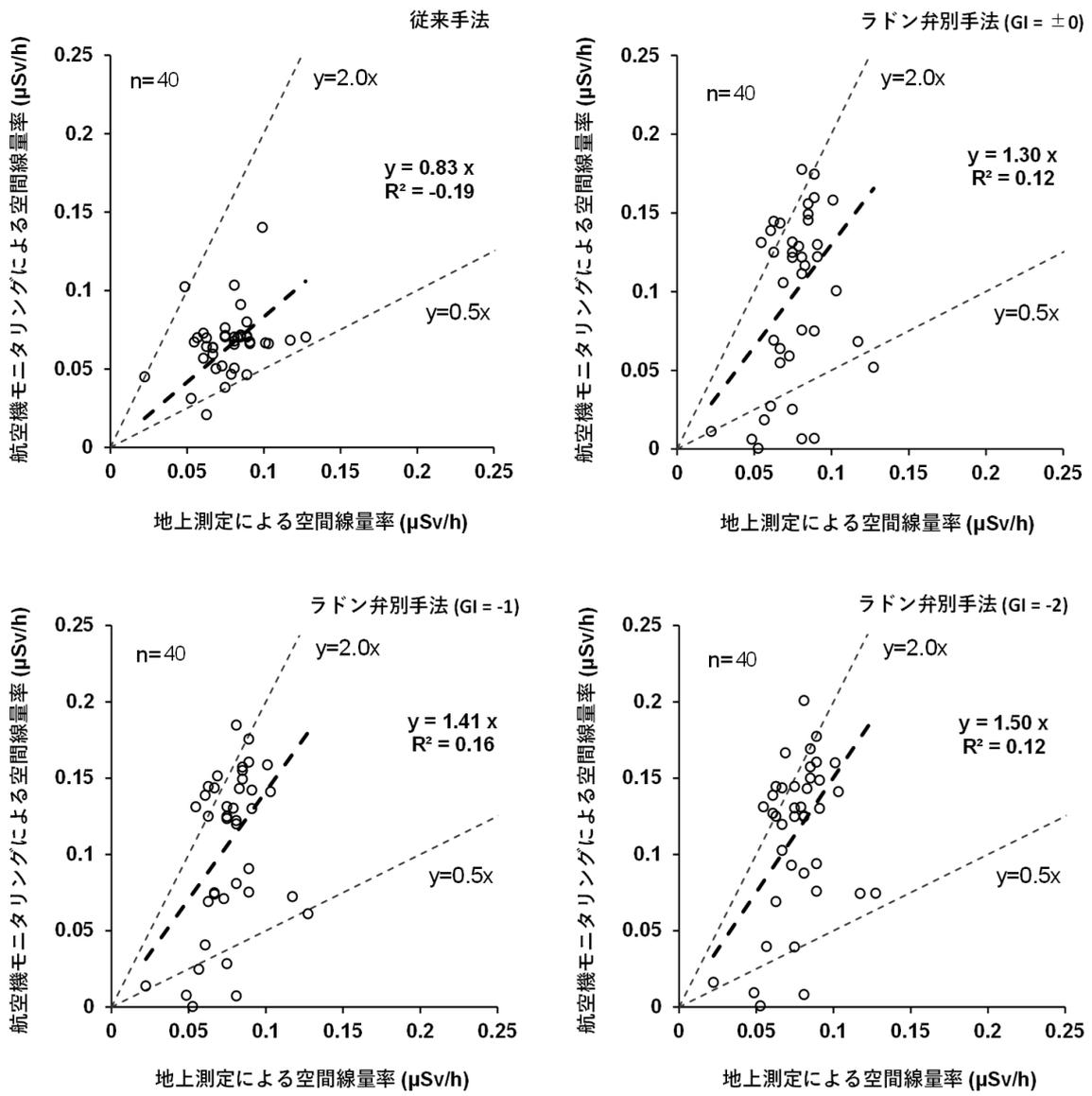


Fig. 4-44 従来法とラドン弁別手法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較 (近大炉・京大炉)

5.4.2. ラドン弁別手法におけるパラメータ設定方法の再検討

ラドン弁別手法の精度向上に資するため、本手法で用いるパラメータの設定方法について再検討を行った。始めに、2016年度から2019年度までに実施した全国の原子力関連施設等の周辺におけるバックグラウンドモニタリング^{7),9),11),13),15)}および本年度のデータに、ラドン弁別手法を適用した際に用いたRIおよびGIの一覧をTable 4-5に示す。これらRIおよびGIを見ると、モニタリングエリアおよびヘリコプター機種によって若干の変動は見られるものの、RIについては概ね20~25前後、GIについては概ね30前後に収まっている。また、Table 4-4に参考データとして示した、東日本第11次モニタリングにおけるRIおよびGIも概ねこの範囲に近い値である。以上のことから、RIおよびGIはモニタリングエリアやヘリコプター機種に大きく依存することなく、概ね一定の値に収まることが示唆される。一方で、本年度に実施した美浜・敦賀および近大炉・京大炉においては、GIは概ね30前後であるものの、RIが30を上回っており他のモニタリングエリアにおける数値と大きく異なっていた。そこで、美浜・敦賀および近大炉・京大炉においてラドン弁別手法の精度が従来手法よりも劣った主要因がRIの値にあると考え、RIの設定方法について再検討を行った。

3.8.2項に記載したように、今まではRIの算出に際して、海上をフライトした際に取得したデータの内、海拔高度150 m~450 mで取得したものを抽出し、宇宙線および自己汚染の寄与分を差し引いて得られた計数率データを用いてきた(以下、再設定前)。そこで、RIの精度に悪影響を及ぼす可能性のある計数率データを除去するために、以下の手順に従い、RIを再設定した(以下、再設定後)。

- ① 海上をフライトした際に取得したデータの内、海拔高度150 m~450 mで取得したものを抽出する(再設定前と同様)。
- ② ①で得られたデータから宇宙線による寄与分を差し引いた後の計数率を対象に、NaI RSIシステムおよびLaBr RSIシステムにおける計数率の平均値と標準偏差(σ)を算出し、それぞれのシステムにおいて計数率が平均値 $\pm 2\sigma$ 以内に収まっているデータのみを抽出する。
- ③ ②で得られたデータから自己汚染による寄与分を差し引き、RIの算出を行う。

なお、本報告においては、再設定後のRIを用いることでラドン弁別手法の精度が向上するかを検証することを主目的とするため、GIに対しては上記の手順をあえて適用していない。また、NaI RSIシステムおよびLaBr RSIシステムにおける自己汚染の寄与分として用いているのは、RI算出に用いる計数率の最小値である。再設定前では上記の手順①を適用して得られるデータを対象とした最小値に相当するが、再設定後では②を適用して残ったデータを対象とした最小値である。よって、再設定前後で自己汚染の寄与分として差し引く数値が異なる場合があることに注意を要する。さらに、自己汚染の寄与分の差し引きに使用する計数率はRIとGIの算出で共通しているため、GIに対して再設定手順を適用しない場合であっても、自己汚染による寄与として差し引く数値が異なれば、再設定前からGIが変化することがある。

美浜・敦賀および近大炉・京大炉における、再設定後のNaI RSIシステムの計数率とLaBr RSIシステムの計数率の関係をFig. 4-45 (a) および (b) に示す。本散布図における近似直線の傾きを再設定後のRIとした。再設定前後のRIおよびGIをTable 4-6に示す。再設定後では、

両測定エリアにおいて RI が 25 前後になり、Table 4-5 に示した他のモニタリングエリアにおける RI と概ね近い値となった。再設定前後で GI が若干変化したが、これは上記したように、再設定手順を適用した結果、自己汚染による寄与として差し引く数値が変化したことによる。

Table 4-5 バックグラウンド航空機モニタリングにおける RI および GI の一覧

モニタリングエリア	測定開始日	測定終了日	RI	GI	ヘリコプター機種	
川内	2016/2/1	2016/2/7	29.8	34.0	Bell412	JA6928
大飯・高浜	2016/7/20	2016/8/1	23.1	32.6	Bell412	JA9584
伊方	2016/11/29	2016/12/11	22.3	30.5	Bell430	JA05TV
泊	2017/7/24	2017/8/2	23.7	30.7	Bell412	JA6767
柏崎刈羽	2017/7/26	2017/10/1	23.5	28.5	Bell430	JA05TV
玄海	2017/11/28	2017/12/5	26.1	31.4	S-76	JA6655
島根	2018/7/20	2018/7/27	25.3	30.5	Bell430	JA6900
浜岡	2018/11/27	2018/12/9	20.8	29.0	Bell430	JA05TV
東通・六ヶ所	2019/6/26	2019/7/10	21.9	27.5	Bell430	JA6900
志賀	2019/11/21	2019/11/29	21.8	29.2	Bell430	JA6900
美浜・敦賀	2020/8/1	2020/8/6	34.4	33.1	Bell412	JA9616
近大炉・京大炉	2020/11/12	2020/11/19	31.6	33.8	Bell412	JA6928

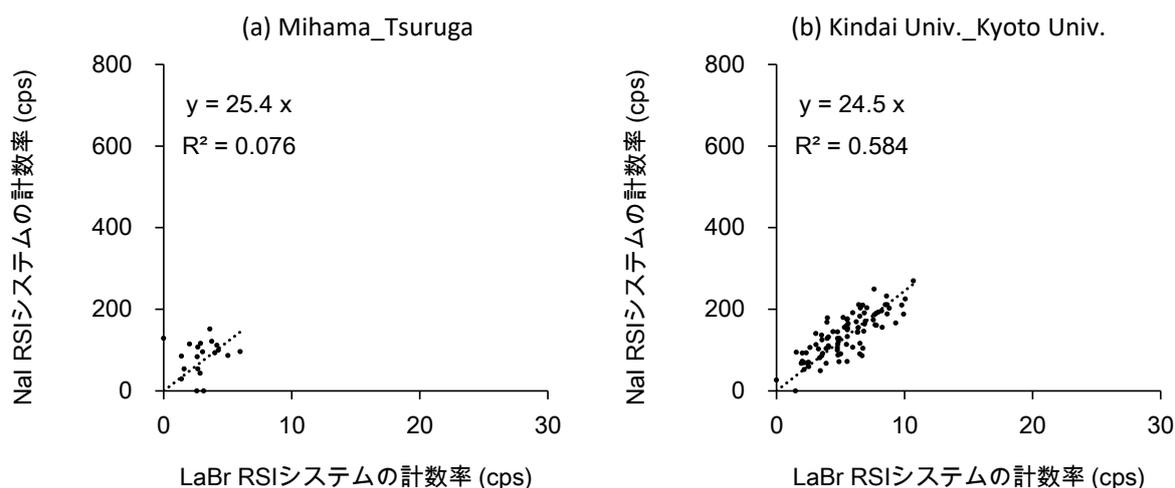


Fig. 4-45 再設定後の NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係

Table 4-6 再設定前後の RI および GI

モニタリングエリア		RI	GI
美浜・敦賀	再設定前	34.4	33.1
	再設定後	25.4	32.0
近大炉・京大炉	再設定前	31.6	33.8
	再設定後	24.5	32.4

5.4.2. 再設定したパラメータの適用

Table 4-6 に示した RI および GI を適用し、空間線量率マップ等を作成した。Fig. 4-46 に美浜・敦賀および近大炉・京大炉における従来手法とラドン弁別手法（再設定後）の空間線量率マップを比較する。

美浜・敦賀については、両マップ間で空間線量率の全体的な分布が顕著に異なることはないが、従来手法と比べてラドン弁別手法（再設定後）では全体的に空間線量率が低く算出される傾向にあった。一方で、この傾向が逆転している箇所が、ごく局所的ではあるものの、測定エリアの南部で見られた。一例として、岐阜県揖斐郡池田町の周辺および濃尾平野西方に位置する養老山地（養老郡養老町）の周辺に注目する。本地域においては、従来手法による空間線量率マップでは概ね $0.10 \mu\text{Sv/h}$ 前後であったが、ラドン弁別手法（再設定後）による空間線量率マップでは $0.10 \mu\text{Sv/h}$ を上回るエリアの面積が広がった。本地域には温泉地が点在しており、温泉分析表によると養老温泉中に含まれるラドン濃度は比較的高く⁶¹⁾、本地域の地上一帯に分布するラドン子孫核種に起因する γ 線を捉えた可能性がある。ラドン弁別手法は、対地高度約 300 m を飛行するヘリコプター（に搭載している検出器）周辺に存在するラドン子孫核種に起因する γ 線計数率を除去するものである。上記のような自然環境中におけるラドン濃度が比較的高いと思われる地域の上空を飛行した場合、ラドン子孫核種に起因する γ 線は主にヘリコプターの下から照射されるため、大部分が NaI RSI システムにより計数され、LaBr RSI システムではほとんど計数されない可能性が高い。そのため本手法では、自然環境中のラドン濃度が比較的高く、局所的な影響をもたらすような地域の上空で取得したデータに対しては、ラドン子孫核種に起因する γ 線計数率を上手く弁別できないことが示唆される。

近大炉・京大炉については両マップ間で空間線量率の全体的な分布が異なり、従来手法と比べてラドン弁別手法（再設定後）が高く算出される傾向にあった。4.3 節で記述したように、従来手法では γ 線強度が比較的高いと思われる大阪府の四条畷花崗岩、和泉山脈北縁一帯での空間線量率が大部分で $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 以下であった。ラドン弁別手法（再設定後）の空間線量率マップでは、これら花崗岩体の分布地帯の大部分で $0.10 \mu\text{Sv/h}$ を上回り、特に四条畷花崗岩周辺では $0.16 \mu\text{Sv/h}$ を上回る程に空間線量率が高く算出された。他にも、兵庫県の六甲山地や淡路島の北部および中央部、滋賀県と三重県の境界付近に位置する信楽山地等、花崗岩体が存在するものの、従来手法では $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 程度であったエリアにおいて、ラドン弁別手法（再設定後）では大部分で $0.10 \mu\text{Sv/h}$ を上回っており、花崗岩体の分布と空間線量率分布の対比が良くなったように思われる。また、花崗岩体の分布地帯ではあるが γ 線強度が比較的弱いとされる、大阪府の金剛山周辺や奈良県の葛城石英閃緑岩の分布エリアにおいては、大部分で $0.06 \mu\text{Sv/h}$ 以下のままであり、花崗岩体の γ 線強度に応じた空間線量率分布が従来手法よりも良好に表現できていると思われる。

ラドン弁別手法（再設定後）における空間線量率の計算結果の妥当性を評価するために、地上測定値との比較を行った。比較結果を Fig. 4-47 に示す。ファクター 0.5～2 の範囲に収まっているプロットの数に着目すると、美浜・敦賀については従来手法で 93 %（全 30 点中 28 点）であったのに対し、ラドン弁別手法（再設定後）では 97 %（全 30 点中 29 点）、近大炉・京大炉

については、従来手法で 93 % (全 40 点中 37 点) であったのに対し、ラドン弁別手法 (再設定後) では 100 % (全 40 点中 40 点) であった。再設定後の計算結果は再設定前と比べて飛躍的に精度が向上し、少なくとも地上測定を実施した地域周辺においては、従来手法と同等以上の精度を有した空間線量率の計算が可能であることが示された。

以上のことから、本報告で検討・適用した RI の再設定手法がラドン弁別手法の精度向上に資すると思われる。GI への同様の再設定手法の適用の検討、本再設定手法が普遍的にラドン弁別手法の精度向上をもたらすか否かについての調査等が今後の課題として挙げられる。ラドン弁別手法を主要な解析手法として用いた場合、原則として毎日行っている空气中核種フライトが不要になり、航空機モニタリングの効率化に大きく寄与する等メリットが大きい。ラドン弁別手法が従来手法と同等以上の精度を確実に有するためには、どのようなデータスクリーニングを適用しパラメータの設定を行うべきか、引き続き検討していくことが望ましい。

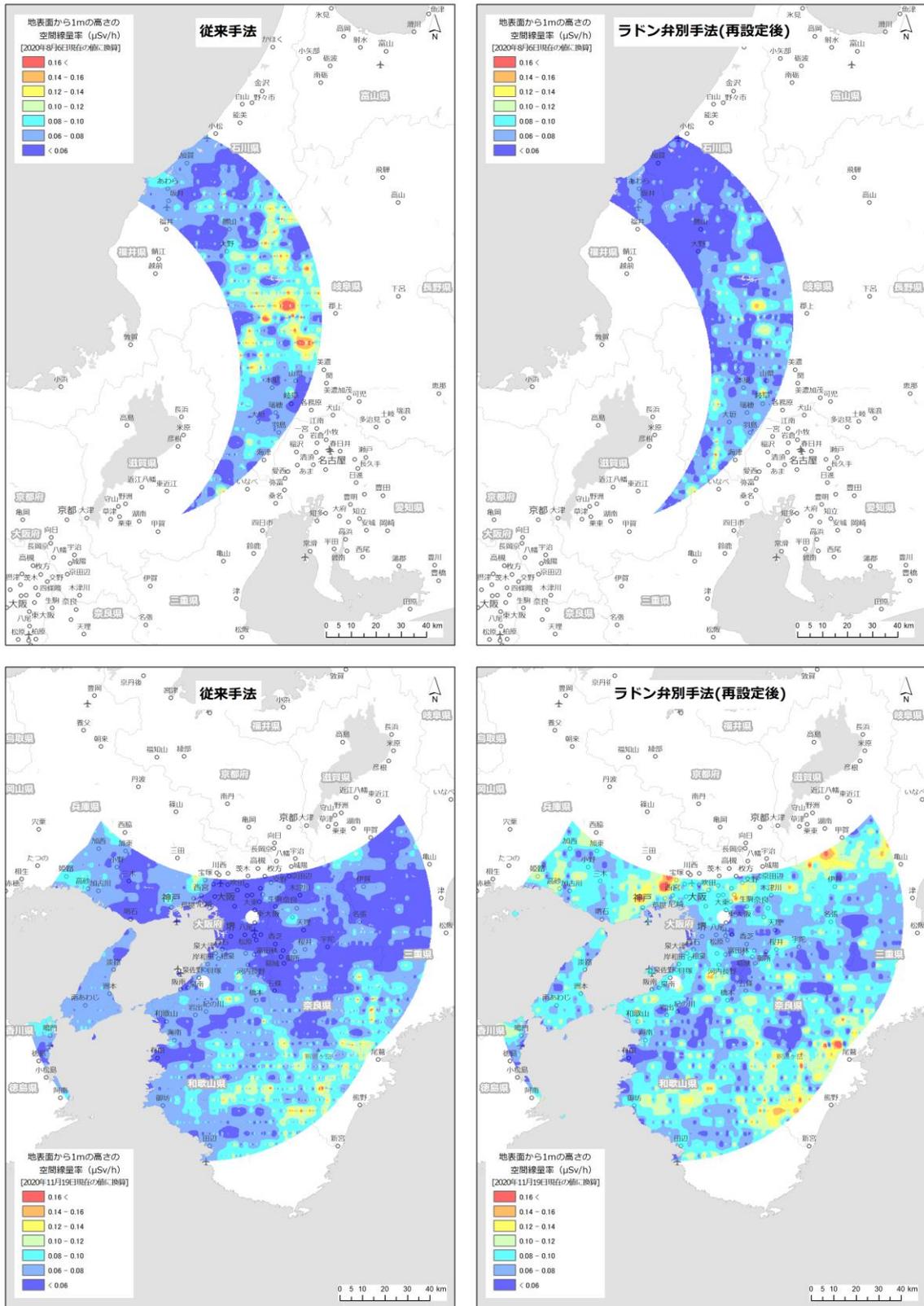


Fig. 4-46 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ比較 (再設定後)

(上段: 美浜・敦賀、下段: 近大炉・京大炉)

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

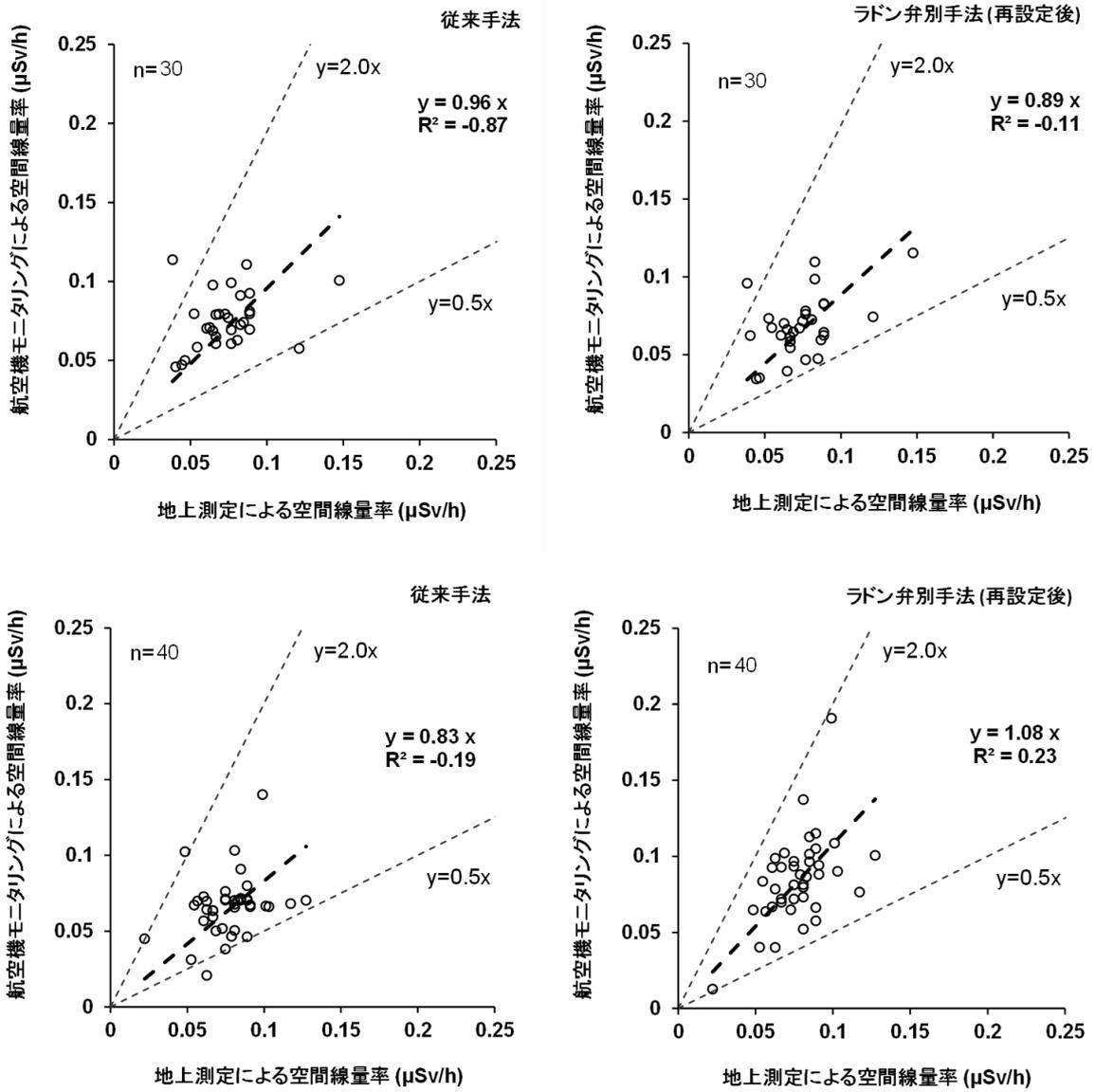


Fig. 4-47 従来法と再設定後のラドン弁別手法を用いた空間線量率と地上測定値との比較
(上段: 美浜・教賀、下段: 近大炉・京大炉)

4.6. 放射性セシウムの沈着量

美浜・敦賀および近大炉・京大炉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. 4-48 に示す。このように、すべての地点において検出下限値未満となり、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と同様の手法¹⁴⁾に則った。

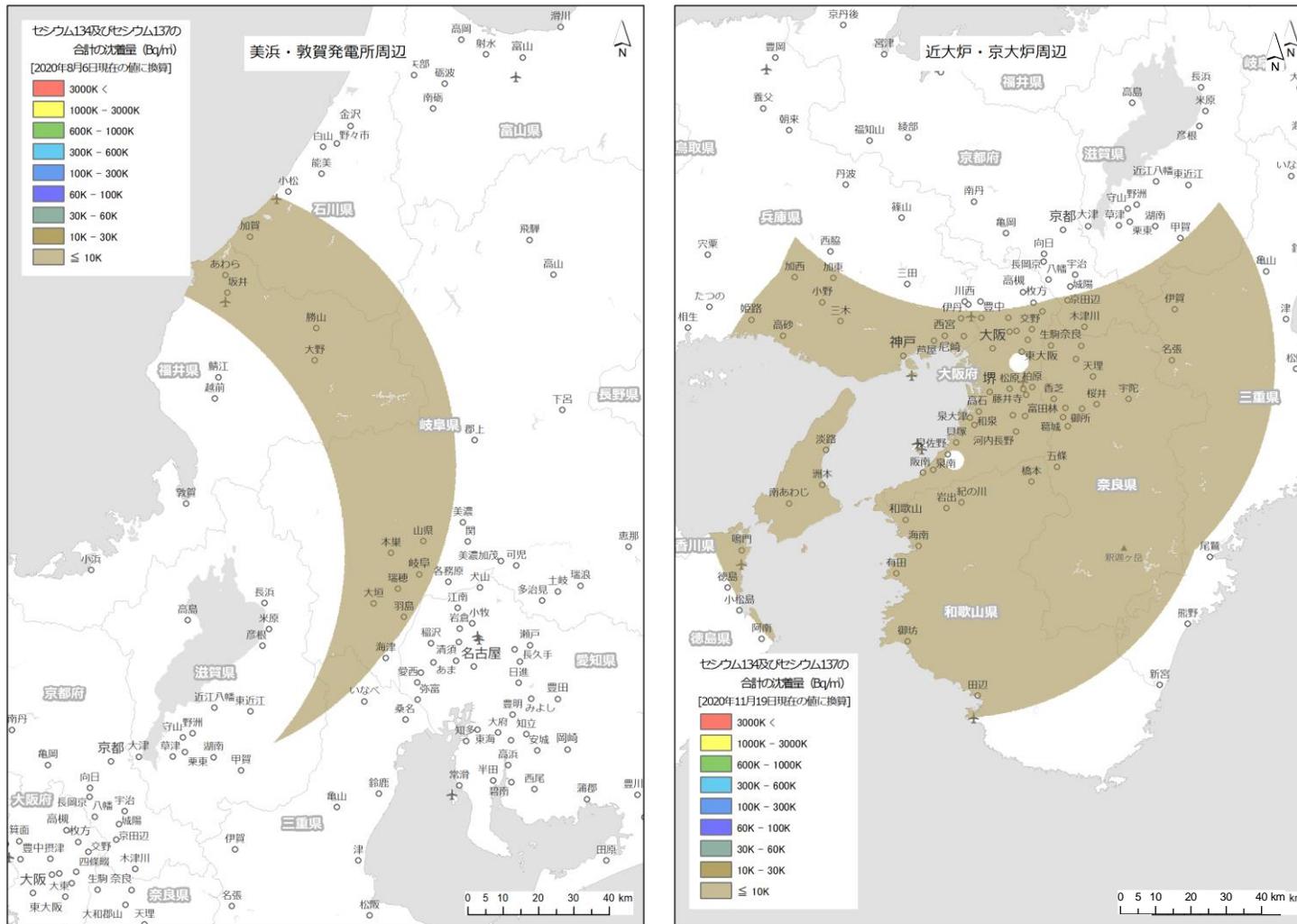


Fig. 4-48 放射性セシウム沈着量マップ
 (左：美浜・敦賀、右：近大炉・京大炉)

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

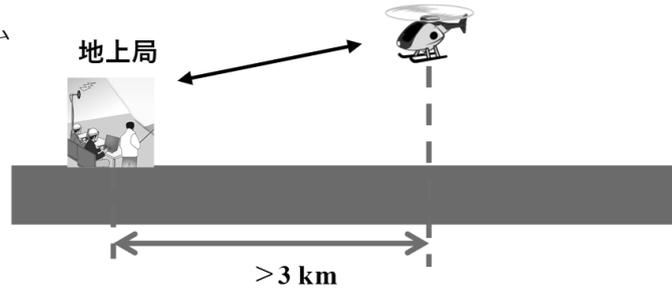
5. 無人飛行機による放射線モニタリングを想定した要素技術試験

5.1. 原子力災害時における無人機運用の課題

福島原子力発電所事故後、「原子力災害対策マニュアル¹⁶⁾」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機が活用されている^{21),22)}。また、無人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⁶²⁾。無人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、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。しかしながら、現状として、無人機によるモニタリング技術は原子力災害時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. 5-1)。また、時系列な対応課題の抽出も重要である。Fig. 5-2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および理想的な無人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、上空の空気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、これらの原子力災害時の運用を想定し、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。本年度は、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。

- ★既存の一般的なシステム
- ・2.4 GHz帯の電波使用
- ・目視内飛行



- ★原子力防災時に備えておくべきシステム
- ・冗長通信の検討
- ・目視外飛行の運航技術
- ・情報共有システム

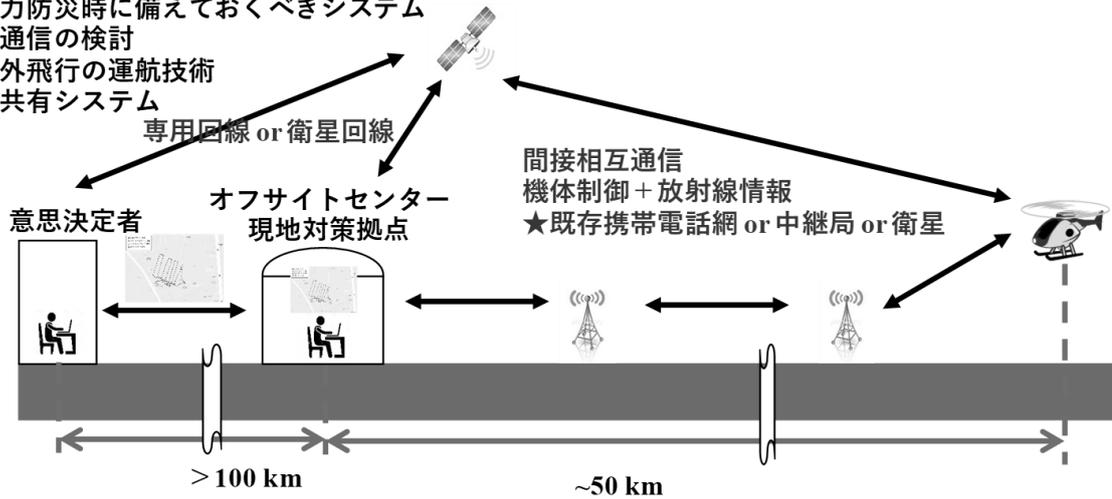


Fig. 5-1 既存の無人機によるシステムと原子力災害時に備えるべき無人機システムのイメージ

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 20h			★OIL1, 2区域の特定			UPZ内のフライト 20h		

※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. 5-2 原子力発電所事故を例にした対応シミュレーション

5.2. 無人機の開発状況

近年無人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。
- 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機の例を Fig. 5-3 に示す。無人機の種類は、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 JAEA 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ところに強みがある。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・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も高いことも魅力である。

原子力防災時におけ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。ただし、2021年3月現在では日本国内での運用実績がない。

今回、国内外の無人航空機で最も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 Penguin C について、実際に飛行試験などを通じて性能評価を試みるとともに、国内での運用の課題について抽出を行った。



名称	Penguin C	UARMS	Fazer R G2
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

Fig. 5-3 代表的な無人機の概観とスペック

5.3. Penguin C のカタログ性能

選定した Penguin C の概観およびカタログ性能について、それぞれ Fig. 5-4 および Table 5-2 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・オイルの混合燃料が用いられる。飛行時間はペイロードや気象条件にもよるが、カタログでは 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。Table 5-3 に周辺機器のスペックを示す。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、原子力防災時に必要となるであろう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行われたものである。
- (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・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および離陸重量が変わるため、最大値である 5 kg までは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・離陸される。
- (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。
Cloud Cap Technology 製オートパイロット「Piccolo Command Center」で事前に作成したフライトプランにより飛行可能である。
- (5) 同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 の通常のフライトおよ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 5-1 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 程度の雨天時でもオペレーションは可能とされている。

Table 5-1 UAV Factory における平均故障間隔計算時の事故分類

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の対象として分類されるもの	MTBFの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 ・ アビオニクス系の故障 ・ 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 ・ 不可抗力：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。

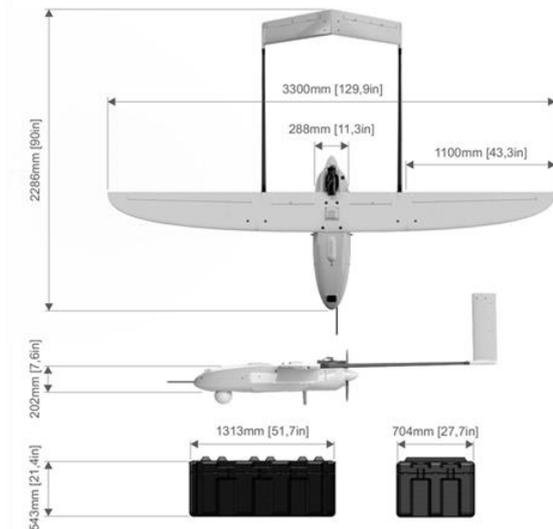


Fig. 5-4 Penguin C の概観

Table 5-2 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
ペイロード重量	最大 5 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	完全自動・空気式カタパルト
最大離陸高度	3,000 m (10,000 ft) (海拔高度)
機体の回収	パラシュートおよびエアバッグ
動作温度	-25°C~+50°C
凍結防止機能	加熱式ピトー管
環境対応	雨天時のオペレーション可能 (1 時間の降水量 5 mm 程度まで)
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・オイル混合燃料
オイルタイプ	UAV Factory 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

Table 5-3 Penguin C 周辺機器のカタログスペック

周辺機器	仕様
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」および UAV Factory 製「CoPilot」
地上局 (GCS)	タイプ 携帯型 GCS、タッチスクリーン型 2 画面タイプ
アンテナ	タイプ 指向性・無指向性アンテナ自動切換式トラッキングアンテナ
カタパルト	タイプ 携帯型空気式カタパルト 発射エネルギー 6,000 J

5.4. フライト試験の概要

Penguin C を用いた地上試験及びフライト試験について、実施日及び試験内容を Table 5-4 に示す。フライト試験の標準的な流れについて、試験 No. 20-01 を例に概説する。なお、試験の実施にあたっては、UAV Factory が発行する、フライトのための免許を有する株式会社 JDRONE の助勢を受けた。

Table 5-4 2020 年に実施したフライト試験

試験 No.	試験日	実施場所	試験内容	フライト時間 (hour)	フライト No.	備考
20-01	5/7	南相馬 SB	機体準備		-	
	5/8	南相馬 SB	フライト手順確認		-	
	5/11	南相馬 SB	フライト手順確認		-	
	5/12	浪江	カタパルト動作試験		-	
	5/13	浪江	エンジン動作試験 電波伝播		-	
	5/14	南相馬 SB	フライト手順確認		-	
	5/15	浪江	地上試験 1時間フライト	1.0	FU1001	
20-02	8/17	RTF	エンジン動作試験		-	
	8/18	RTF	エンジン動作試験		-	
	8/19	RTF	カタパルト動作試験		-	
	8/20	RTF	地上試験 1時間フライト	1.0	FU1002	
	8/21	RTF	カタパルト動作試験 1時間フライト	1.0	FU1003	
20-03	11/24	RTF 北側	地上試験 1時間フライト	1.0	FU1004	
	11/25	RTF	地上試験 1時間フライト×2回	1.0	FU1005	雨天フライト
				1.0	FU1006	
	11/26	RTF	カタパルト動作試験		-	
	11/27	南相馬 SB	機体健全性確認試験		-	
	11/30	RTF 北側	地上試験 6時間フライト	6.0	FU1007	
	12/1	RTF 北側	地上試験 1時間フライト	1.0	FU1008	
	12/2	RTF	地上試験 1時間フライト	1.0	FU1009	
	12/3	RTF 北側	地上試験 1時間フライト×2回	1.0	FU1010	
1.0				FU1011		
12/4	RTF 北側	地上試験		-		
計				16.0	(11 回)	

※南相馬 SB: (株) JDRONE 南相馬サービスベース

※浪江: 請戸川河川敷

※RTF: 福島ロボットテストフィールド

5.4.1. フライト試験までの流れ

① 事前計画準備

- ・ 原子力機構の定める「飛行安全手順書」に準拠した計画書を作成した。
- ・ 試験 No. 20-01 においては、国内初のフライト試験であることを考慮し、廃炉環境国際共同センター内に設置されている「安全専門委員会」での承認を得た。
- ・ 試験計画には、試験日程やフライトプランおよび重大な緊急時の手順を検討するための FTA (Fault Tree Analysis: フォルトツリー解析) を実施した。解析例について Fig. 5-5 に示す。
- ・ 今回、新型コロナウイルスの感染拡大下での実施となったため、福島県外からの参加者の移動記録やマスク着用などの感染防止対策を徹底した。
- ・ 試験間にメーカーの保守要領に則った安全教育を行い、フライトまでの手順をモックアップした安全教育時の状況について、Fig. 5-6 に示す。

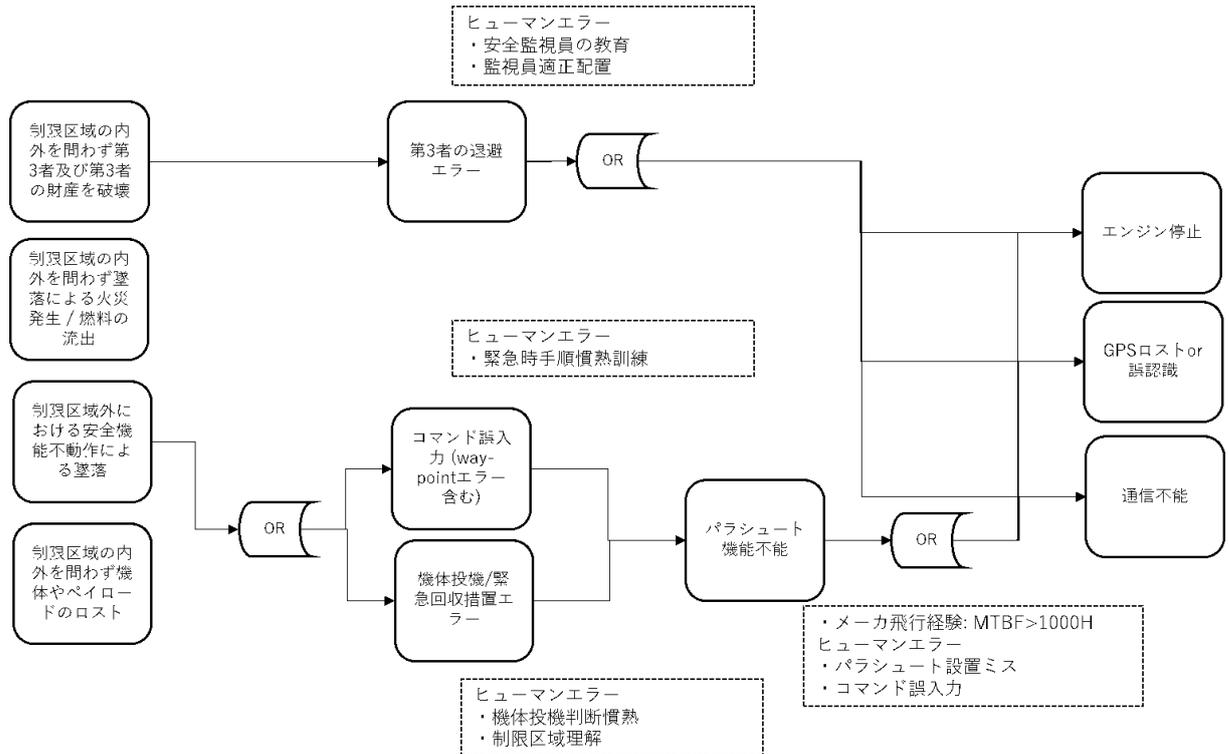


Fig. 5-5 FTA 解析例



Fig. 5-6 安全教育時の状況

② フライト前機能確認

- ・ カタパルト動作試験: 離陸時に使用するカタパルトの動作チェックを行う。確認にはモックアップのウエイトを実際に発出させ、カタパルトの性能を確認した。確認時の状況について、Fig. 5-7 a) に示す。
- ・ エンジン性能試験: エンジンの動作確認を実施する。実施には、UAV Factory の「Ground Run Checklist」に則って実施する。確認時の状況について、Fig. 5-7 b) に示す。
- ・ データ通信試験 (電波伝搬試験): 実際のフライトエリアにおいて、地上を車両で移動しつつ、データ通信の状況について確認する。通信状況は電波強度 (dBm) を指標としつつ、妨害電波の有無についても確認する。確認時の状況及び電波試験の結果について、Fig. 5-8 示す。
- ・ 令和2年度に実施したフライト試験の全データについて Table 5-6 にまとめる。



a) カタパルト発出試験

b) エンジン性能試験

Fig. 5-7 フライト前機能確認状況



a) データ通信試験状況

b) データ通信試験結果

Fig. 5-8 データ通信試験

③ 飛行試験

- ・ 試験 No. 20-01 におけるフライト No. FU1001 の試験状況について Table 5-5 に示す。
- ・ フライト試験における軌跡およびデータログ例についてそれぞれ Fig. 5-9 および Fig. 5-10 に示す。また、フライト試験時の写真について Fig. 5-11 に示す。

Table 5-5 試験 No. 20-01 におけるフライト No. FU1001 のフライト試験の状況

項目	内容
実施日	2020年5月15日(金)
実施場所	福島県浪江町 請戸川高瀬川合流部エリア付近
気象	曇り 21℃
離陸時刻および重量	15時46分 離陸時重量 18.59 kg
着陸時刻および重量	16時54分 着陸時重量 18.16 kg
飛行時間	68分(消費燃料 0.43 kg)
フライト時の風速	平均風速 2.0 m/s (最大風速 3.0 m/s)



Fig. 5-9 フライト試験軌跡例 (試験 No. 20-01 におけるフライト No. FU1001)

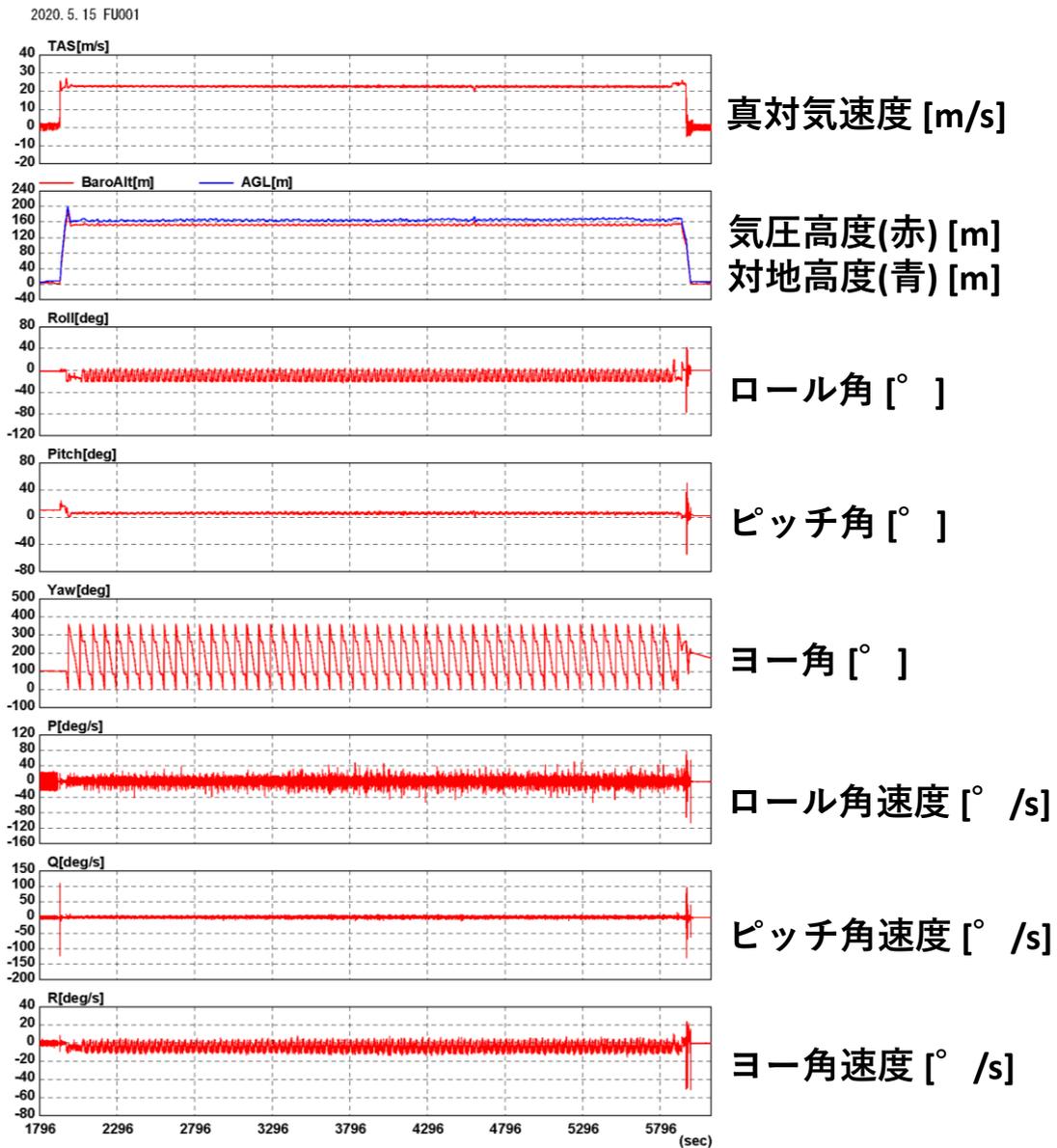


Fig. 5-10 フライトログ例 (試験 No. 20-01 におけるフライト No. FU1001)

(1/4)

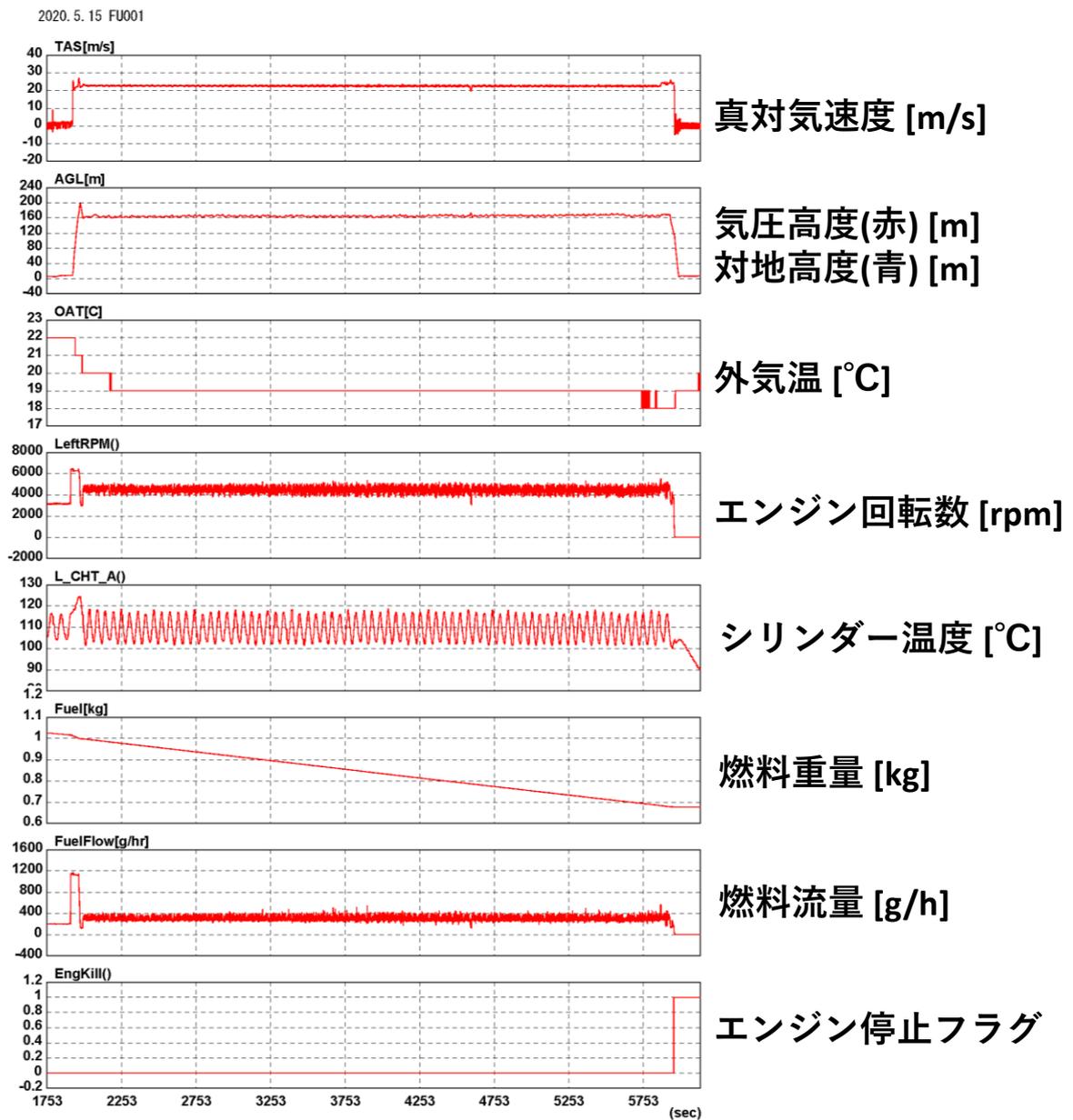


Fig. 5-10 フライトログ例 (試験 No. 20-01 におけるフライト No. FU1001)

(2/4)

2020. 5. 15 FU001

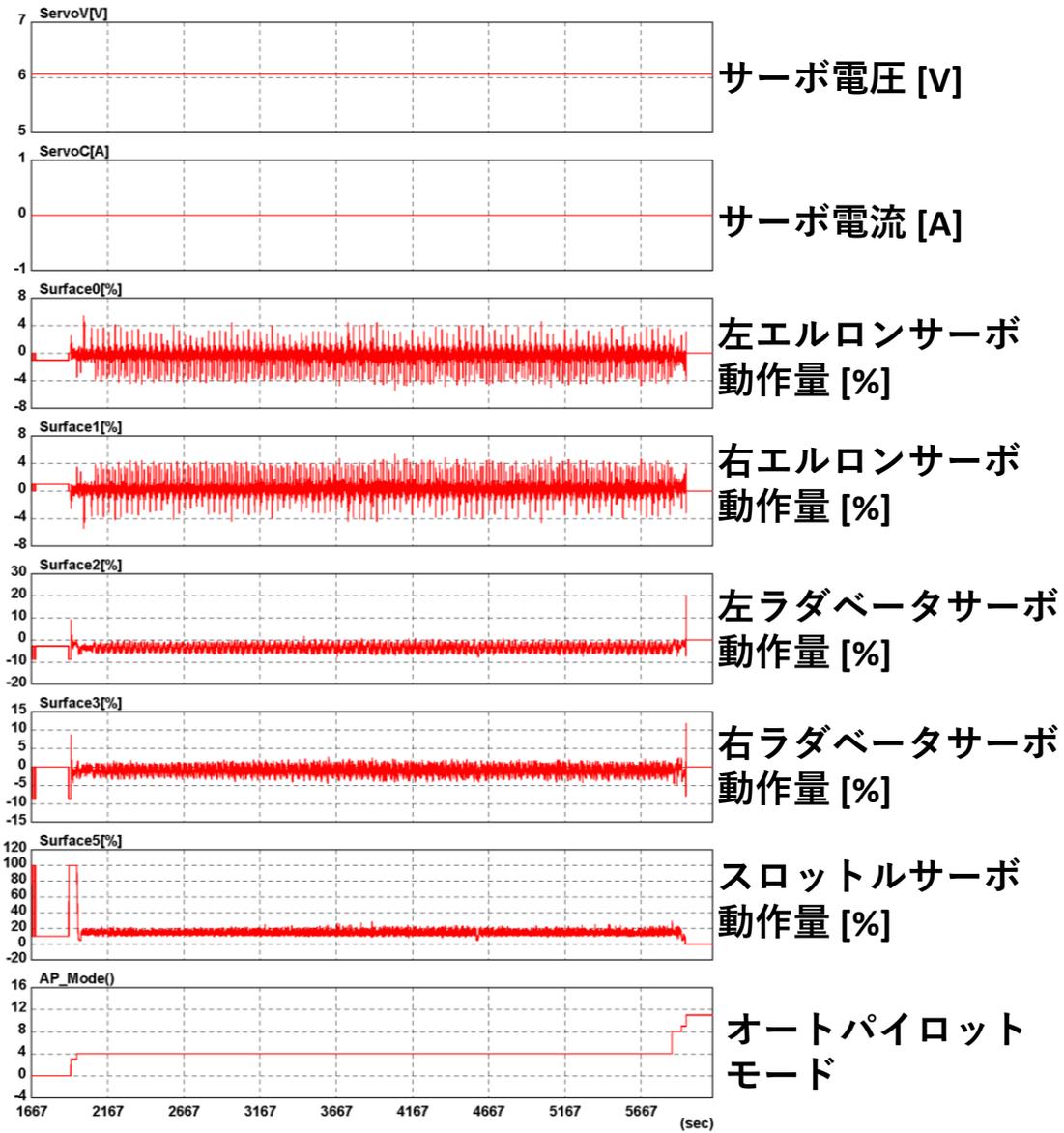


Fig. 5-10 フライトログ例 (試験 No. 20-01 におけるフライト No. FU1001)

(3/4)

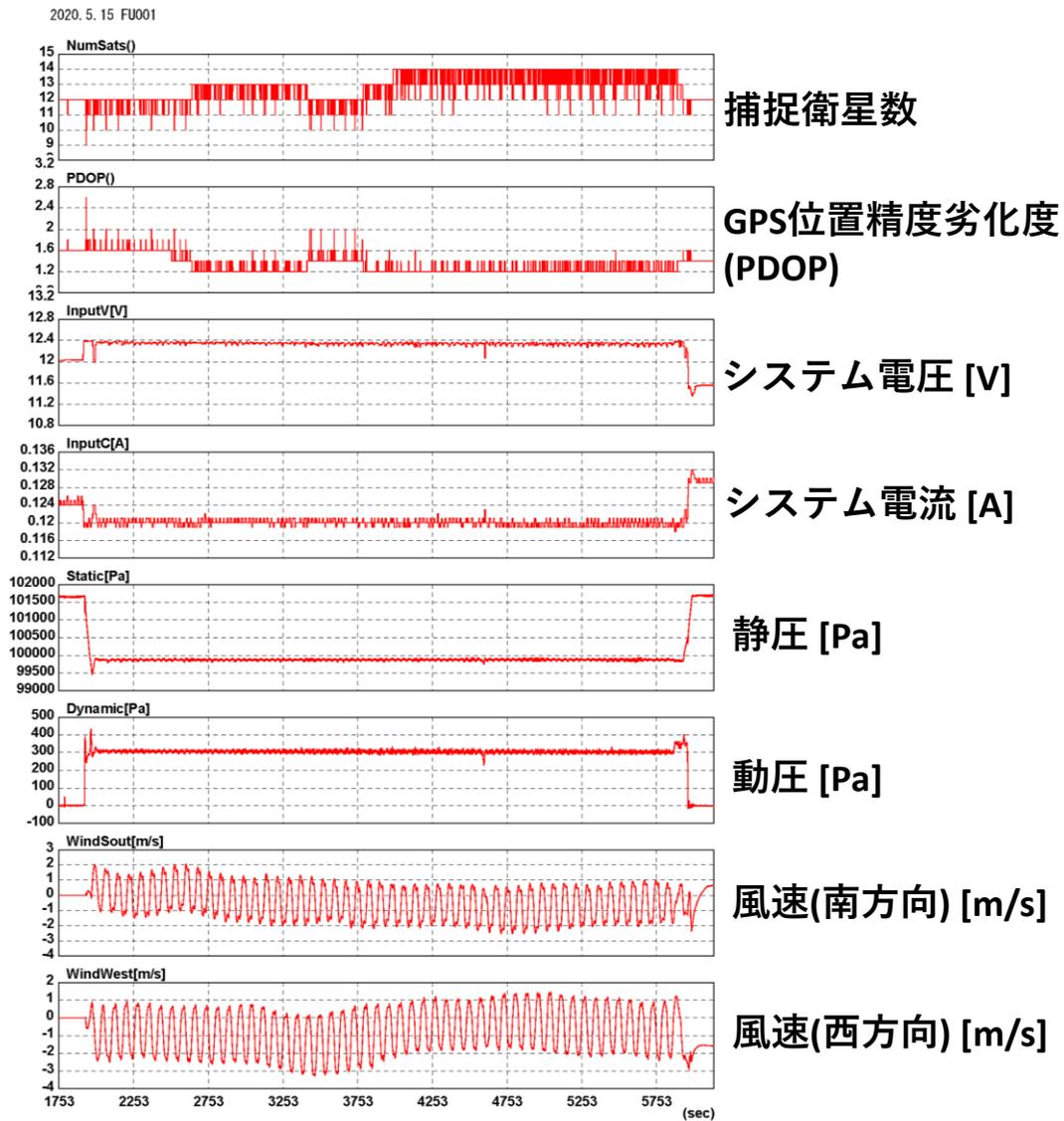


Fig. 5-10 フライトログ例 (試験 No. 20-01 におけるフライト No. FU1001)

(4/4)



Fig. 5-11 フライト試験風景 (試験 No. 20-01 におけるフライト No. FU1001)

Table 5-6 2020年フライト試験時のデータ一覧

フライトNo.	日付	場所	離陸時間	着陸時間	フライト時間	離陸重量	着陸重量	消費燃料	平均燃費	天候	外気温	平均風速	最大風速	風向	降水量	QNH
単位	YYYY:MM:DD	-	HH:MM	HH:MM	Min	kg	kg	kg	kg/h	-	°C	m/s	m/s	Deg (Mag)	mm	hPa
FU1001	2020.05.15	浪江	15:46	16:54	68	18.59	18.16	0.43	0.38	曇天	21	2.0	3.0	88	0.0	1017
FU1002	2020.08.20	RTF	09:55	11:02	67	18.79	18.42	0.37	0.33	晴天	32	2.0	4.0	113	0.0	1011
FU1003	2020.08.21	RTF	11:02	12:08	66	18.84	18.46	0.38	0.35	晴天	34	2.0	3.0	80	0.0	1013
FU1004	2020.11.24	RTF北側	15:27	16:17	50	18.59	18.30	0.29	0.35	晴天	13	4.0	6.0	320	0.0	1021
FU1005	2020.11.25	RTF	10:55	12:08	73	20.34	19.79	0.55	0.45	雨天	9	1.0	2.0	313	0.5	1021
FU1006	2020.11.25	RTF	14:46	15:47	61	19.79	19.41	0.38	0.37	雨天	9	0.5	2.0	6	1.0	1018
FU1007	2020.11.30	RTF	09:55	16:02	367	20.54	18.70	1.84	0.30	晴天	8	4.0	6.0	80	0.0	1022
FU1008	2020.12.01	RTF北側	10:06	11:26	80	19.54	19.08	0.46	0.35	晴天	11	3.0	5.0	332	0.0	1027
FU1009	2020.12.02	RTF	11:34	12:37	63	19.79	19.33	0.46	0.44	晴天	11	3.0	5.0	337	0.0	1024
FU1010	2020.12.03	RTF	10:34	11:39	65	19.69	19.34	0.35	0.32	晴天	8	2.5	4.0	345	0.0	1016
FU1011	2020.12.03	RTF	13:30	14:37	67	19.34	19.01	0.33	0.30	晴天	10	3.0	5.0	348	0.0	1013

※データはすべて地上で計測した値である。

5.4.2. フライト試験を通じた考察

(1) データ通信

Penguin C については、GCS 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 (周波数オプション: 2.405 GHz~2.470 GHz、送信出力: 20 dB~30 dB (100 mW~1.0 W) チャンネル帯域幅: 4/8 MHz)、同モデムが技術基準適合証明を受けている (技術基準適合証明番号: R210-130451)。また、無線局について、同モデムの仕様は携帯局陸上移動局に該当する。ドローン等で用いられる無線通信システムと許認可について Table 5-7 に示す。GCS およ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。

実際にフライト試験中に、データ通信の強度を確認したところ、GCS と機体のデータ通信については、地上試験中は GCS によって制御されていた。試験中、通信の確立および相互通信における長時間の中断やコマンド送信時の機体の作動異常は見られず、通信が正常に機能していることを確認した。また、データ通信量については、機体にカメラ等のペイロードが搭載されていない状態で 10 Hz の通信を行った場合、毎秒 2 kbit 程度であった。

5 月 13 日に浪江町試験の実施地付近にて、電波伝播試験を実施した。GCS を実際のフライトを想定した設置場所に固定し、Penguin C を車両に載せ、GCS からの距離を 0 m、350 m、1,100 m、1,300 m と順に離れるように移動し、各地点で機体および車両間の通信が異常なく行えるか否かを確認した。各地点では、パラシュートカバーピンの挿抜をコマンドとして使用し、4 地点にてピンの正常な作動を確認した。加えて、福島ロボットテストフィールドで実施した地上試験およびフライト試験の際は、実際に GCS と機体を概ね 200 m 以上離して設置した。当日の風向きと風速、離陸時に使用するカタパルト設置のためアンカーペグを地中に固定できる場所を優先して選択した結果ではあるが、フライト前の最終確認であるプリフライトチェックにおいて、地上における通信異常によってチェックが中断される事象が発生することはなかった。

以上のことから、GCS と機体のデータ通信は両者離隔距離 200 m 以上において利用可能であるといえる。

Table 5-7 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
		920 MHz 帯	20 mW	操縦用	920 MHz 帯テレメータ用、テレコントロール用特定小電力無線局	
		2.4 GHz 帯	10 mW /MHz	操縦用 画像伝送用 データ伝送用	2.4 GHz 帯小電力データ通信システム	
携帯局	要	1.2 GHz 帯	最大 1 W	画像伝送用	アナログ方式限定	
携帯局陸上移動局	要	169 MHz 帯	10 mW	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	最大 1 W	操縦用 画像伝送用 データ伝送用		
		5.7 GHz 帯	最大 1 W	操縦用 画像伝送用 データ伝送用		

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

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) パラシュートの動作

パラシュートの作動についてソフトウェア (CoPilot) からコマンド (Fig. 5-12) が送られているのは、パラシュートカバーピンの挿抜である。フライト前に実施するプリフライトチェックにおいて、GCS からの手動操作によるこれらの動作確認を必ず実施する。内容はピンを駆動するサーボの異常音の有無のチェックと、目視によるピンの挿抜の確認である。目視については、ピンがカバー上のホールを遅滞なく抜き差しすることおよびカバーが閉じられている状態において左右のピンが均等に突出していることを確認する (Fig. 5-13)。

同様に、エアバッグも CoPilot からコマンドが送られる。内容はエアバッグカバーピンの挿抜に加え、エアバッグへの空気送入口に取り付けられているインペラーの駆動確認である。ピンについてはパラシュートカバーピンと同じく挿抜と突出を目視にて確認する。駆動については、機体を点検するテクニシャンが駆動音のオンオフを聞いて確認する。

試験実施期間中すべての試験においてパラシュートおよびエアバッグの動作確認を実施した結果、ピンが動かない等の異常は見られず、GCS からの操作信号により正常に作動することを確認した。

なお、フライト中および通常の離陸の際にはこれらの制御は機体のオートパイロットへと切り替わっており、緊急着陸時のパラシュート展開を除いて、GCS にいるオペレーターから手動で操作する必要はない。

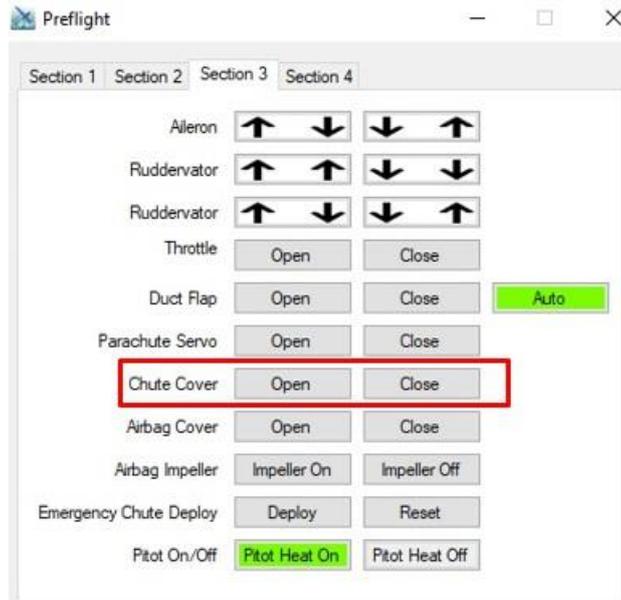


Fig. 5-12 CoPilot 操作画面



Fig. 5-13 正常位置にあるパラシュートカバーピン

(3) GCS からの操縦

Penguin C においては、一般的な飛行機のように主翼にエルロンが取り付けられているが、本機は V テールが採用されているため、ラダーとエレベーターが一体化したラダーベーターが尾翼に取り付けられている。そのため、本機に係る「ラダー」との名称は「ラダーベーター」と読み替えるものとする。

エルロンおよびラダーベーターの操縦については、CoPilot を使用する。前項のパラシュートおよびエアバッグと同様にプリフライトチェックにて手動による動作確認を実施し、フライト中はオートパイロットによる制御へと切り替わる。手動での動作確認時には、GCS を操作しているオペレーターが動翼を動かすコマンドを発し、機体を点検しているテクニシャンが該当の動翼を指で掴み、作動が確認されたときにオペレーターへ報告する。オペレーターはコマンドと作動箇所的一致を確認し、次の動翼の確認へと移る。このとき、

CoPilot 上では各動翼の電流がインジケータに示されており (Fig. 5-14)、電流が正常範囲内に収まっていることを同時に確認する。試験実施期間中すべての試験において、エルロンおよびラダーペーターの GCS からの操縦を実施した結果、指示された動翼が動かない等の異常は見られず、GCS からの操作により正常に作動することを確認した。

GCS からのエンジンの操作は CoPilot を通して行う。フライト前のプリフライトチェックの際に、エンジンのアイドル (2,900 rpm~3,100 rpm) とフルスロットル (5,900 rpm~6,800 rpm) 状態を交互に 3 回繰り返し、この間、オペレーターは rpm 上昇および下降とその値が正常であるかインジケータにて確認する。同時に、rpm の最高値を書き留め、フライトデータとして記録に残しておく。テクニシャンはエンジンに異音が混ざっていないか、駆動しているエンジンから部品の脱落がないか注視し、異常が認められた場合にはオペレーターへ報告し、点検作業へと入る (Fig. 5-15)。なお、エンジンもフライト中は自動制御に切り替わる仕組みになっている。試験実施期間中すべての試験において、GCS からの操作によるエンジン回転数の上昇および下降について動作確認を行ったところ数値異常は認められず、正常に作動することを確認した。

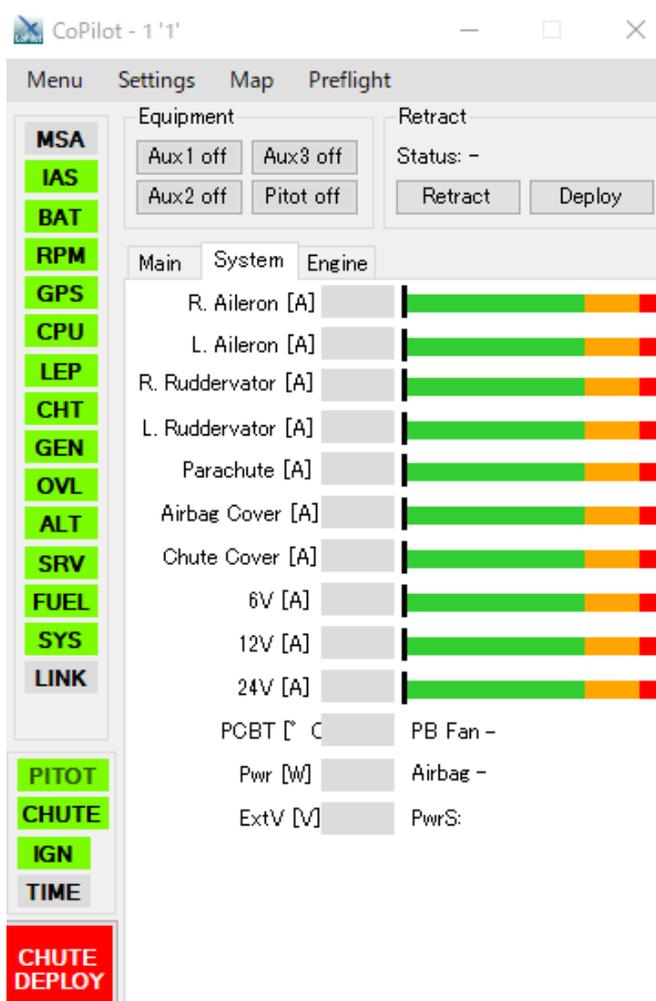


Fig. 5-14 CoPilot 動翼インジケータ

220	ENGINE START-UP		STARTING ENGINE
		Wait for engine to reach operational temperature (~110° C)	
		Set RPM on idle settings (2900-3100 acceptable) by adjusting "Manual Throttle position [%]"	
230	READY FOR ENGINE STRANGE NOISE CHECK		READY
	REPORT ENGINE NOISE		ENGINE SOUNDS
		Set RPM on highest settings (5900 – 6800 acceptable) by setting: Throttle Position [%] 100 	
	REPORT ENGINE NOISE		ENGINE SOUNDS
		Set RPM on idle settings (2900-3100 acceptable) by adjusting "Manual Throttle position [%]"	
		Check CHT between 110 and 120	
		Set RPM on highest settings (5900 – 6800 acceptable) by setting: Throttle Position [%] 100 	
	REPORT ENGINE NOISE		ENGINE SOUNDS
		Set RPM on idle settings (2900-3100 acceptable) by adjusting "Manual Throttle position [%]"	
		Check CHT between 110 and 120	
		Set RPM on highest settings (5900 – 6800 acceptable) by setting: Throttle Position [%] 100 	
	REPORT ENGINE NOISE		ENGINE SOUNDS
		Set RPM on idle settings (2900-3100 acceptable) by adjusting "Manual Throttle position [%]"	
		Check "Alt B. [m]" and "IAS [m/s]" is set to auto in PFD (In Piccolo Command Center)	
		Press 'Go To Waypoint 0' set in Piccolo Command Center	

Fig. 5-15 プリフライトチェックにおけるエンジンチェック箇所

(4) 異常時の警告

機体に異常が生じた場合には、CoPilot に列挙されている重要機器を示すインジケータの色が、正常を示す緑色から警告を示す赤色へと変わり、同時に該当機器を読み上げる音声（「エンジン」等）が流れる（Fig. 5-16）。これは、オペレーターへ視覚的かつ聴覚的に二重に警告を発することで警告の見逃しを防ぎ、迅速に対応策を取るためである。警告については、プリフライトチェック実施時に、機体と GCS の通信が確立された時点でいくつかの警告が発せられる。このとき、オペレーターは警告表示箇所および何を原因とする警告であるか（エンジンがかかるまでは rpm とジェネレーターの警告が示されている等）を理解し、また、警告の表示と音声に異常のないことを確認する。プリフライトチェック中に表示される警告は、手順を経て機体の離陸態勢を整えるうちに異常なしの状態へ戻り、離

陸直前に改めて全ての警告表示が消失していることを確認する工程となっている。

試験実施期間中すべての試験において、プリフライトチェックとともに警告の表示および音声の発出を確認し、いずれの試験においても警告が遅滞なくかつ誤りなく表示されることを確認した。

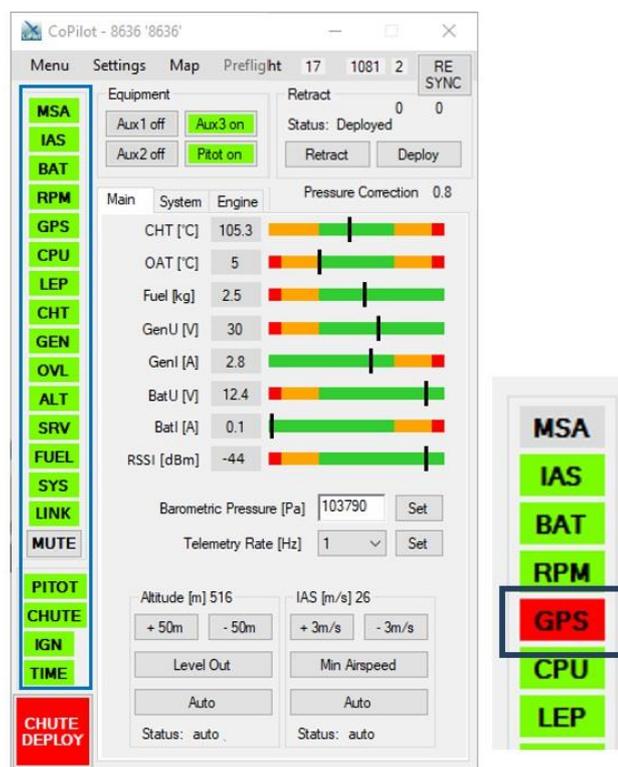


Fig. 5-16 警告表示箇所 (左四角枠)

(5) 手順書の整備状況および定期保守手順書

Penguin C の機体が正常に機能していることを確認することを目的とした「機体健全性確認の点検手順書」を作成した。本手順書に従い、カタパルト、トラッキングアンテナ、GCS およ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。本手順書に従った点検は時間的余裕をもって行うものとし、フライト実施予定日の前週を目安として実施する。点検の結果を見て、必要に応じて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、機体をフライト可能な状態へと仕上げる。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、同チェックは機体の詳細な点検等が完了した後の最終確認であり、点検自体に重きを置く本点検とは主旨の異なるものである。内容の詳細については、Appendix 4-1「Penguin C 機体健全性確認の点検手順書」を参照されたい。

Penguin C の定期保守点検については、UAV Factory が作成した「Penguin C Maintenance Manual」に点検頻度や内容が記されている。同書をベースに、点検工程の更なる詳細手順

等を加味した Appendix 4-2「定期保守点検手順書」を作成した。本書は、機体のカバーおよび電気系統やエンジン等内部部品、翼に加え、周辺機器であるパラシュート、エアバッグ、カタパルト、GCS、トラッキングアンテナまで Penguin C 運用に関する機器の点検手順を網羅している。機体の点検頻度は、UAV Factory の指定通り、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毎月とする。点検手順の詳細については、Appendix 4-2「定期保守点検手順書」を参照されたい。

5.5. 放射線検出器の搭載方法の検討

Penguin C に搭載する放射線検出器の試作機を製作し、実用機における要求事項の洗い出しを行った。特に、Penguin C は離発着時にカタパルトでの離陸やパラシュートでの着陸に大きな負荷がかかると予想される。また、地上との通信についても混信などが懸念される。

(1) 試作機の製作

Fig. 5-17 に耐久テスト、電源テストで使用した放射線検出器 (以下、D-P1) の概要を示す。D-P1 の大きさは、搭載場所である Penguin C のペイロードスペース (220 mm × 200 mm × 100 mm) を考慮し、設計した。D-P1 の検出部には CsI シンチレータ検出器 (38 mm L × 38 mm W × 25 mm H: 浜松ホトニクス社製 C12137-01) を用いた。なお、D-P1 の総重量は約 1.2 kg である。D-P1 の計数率データおよび Penguin C から得られる供給電圧は、Arduino Uno を用いて連続的にデータを保存した。計数率 (エネルギー帯: 0.03 MeV ~ 2 MeV) は 2 秒ごとに保存され、GNSS (SAM-M8Q: u-blox 社製) から得られた位置情報と紐付けされる。Penguin C から得られる供給電圧は約 4 Hz の周期でデータを取得した。D-P1 等の機材は ABS 樹脂で作成した架台に搭載し、Penguin C に取り付けた。

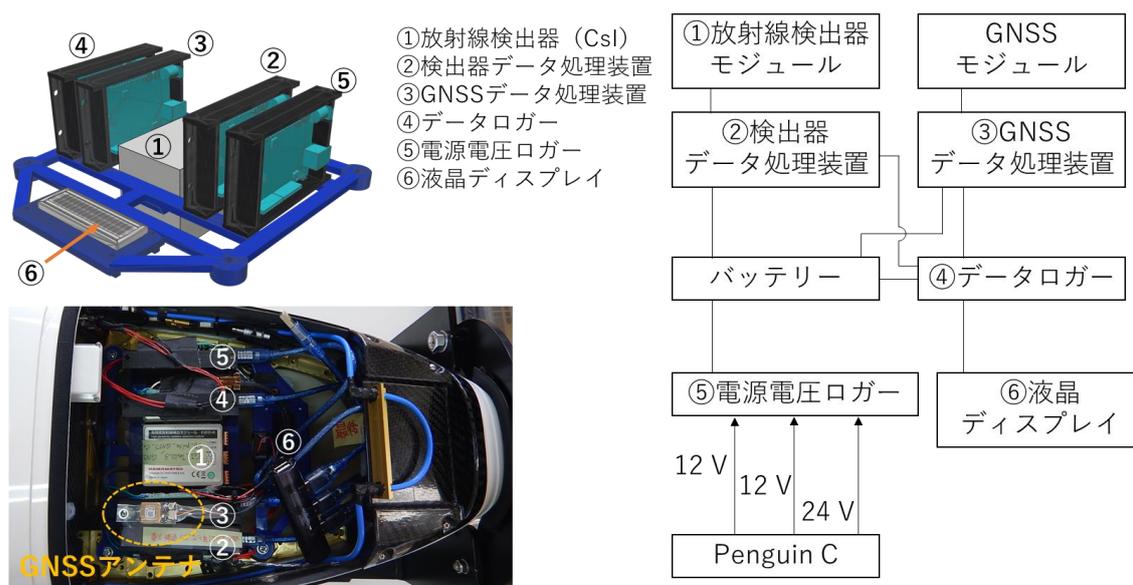


Fig. 5-17 耐久テスト及び電源テストに用いた D-P1 の概要

(2) 基礎性能試験の概要

原子力災害時の緊急時放射線モニタリングにおいて、Penguin C に D-P1 を搭載することを想定し、以下の点を確認するため試験を行った。

・耐久テスト

カタパルトを用いた離陸時およびパラシュートを用いた着陸時の衝撃によって搭載する機器等が破損しないか確認するため、D-P1 の試作機を作製し、Penguin C に搭載しフライト試験を実施した。本試験は 2020 年 8 月に実施したフライト No. FU1002 で実施した。

・電源テスト

Penguin C から得られる電源供給 (12 V: 2 個、24 V: 1 個) が安定しているか確認するため電圧ロガーを作成し、Penguin C に搭載しフライト試験を実施した。

・通信テスト

Penguin C のユーザーインターフェースの TCP/IP 通信を用いて、GCS とデータ通信を安定して行えるか確認するため、上空で撮影した動画を GCS に転送し、リアルタイムに映像を見ることができるか確認を行った。

Fig. 5-18 に通信テストで使用した機器 (D-P2) の概要を示す。データ処理 PC には Raspberry Pi 4 を使用し、カメラは HQ Camera 6 mm 広角レンズを使用した。なお、D-P2 の総重量は約 0.5 kg である。カメラから得られた映像は TCP/IP 通信を用いて GCS へ映像が転送され、GCS の PC において映像を確認できる。通信テストでは上空で撮影する映像のフレームレートおよび映像解像度を変更し、GCS に送られてくる映像状態の確認を行った。



Fig. 5-18 通信テストに用いた D-P2 の概要

(3) 基礎性能試験結果

耐久テスト、電源テストとして行った D-P1 を搭載したフライトでの放射線計数率測定の結果を Fig. 5-19 に示す。複数回フライト試験を行ったが、試験で使用した D-P1 は離陸時および着陸時の衝撃により結晶等が破損することはなく、正常に測定することができた。フライト時の Penguin C からの供給電圧を Fig. 5-20 に示す。Penguin C からの供給電圧についてバラつき

はあるものの、カタパルトを用いた離陸時において瞬停等せず、安定して供給されることが分かった。

通信テストの結果を Table 5-8 に示す。上空で撮影した映像はフレームレートが多く、解像度が大きいほど、GCS で見られる映像はコマ送りの状態となり、リアルタイムでの映像確認は難しくなった。本試験においては、フレームレートを 12 fps、映像解像度を 640 × 480 に設定することで、コマ送りの状態となることなく、リアルタイムで映像を確認することができた。Penguin C の機体向きの違いにより、映像通信速度の変化が見られたが、これは機体通信機のアンテナ向きの変化に伴うデータ受信量の変化が原因と考えられる。本試験において、離陸時および着陸時の衝撃により、D-P2 が破損することはなかったが、着陸時のパラシュート展開時に電源が落ちる現象が見られた。これは D-P2 の消費電力が大きいため、着陸時にエンジンが停止することで Penguin C からの電源供給量が不足し、電源が落ちたと考えられる。

耐久テストの結果から、Penguin C に機器を搭載する場合には、専用架台に機器等をしっかりと固定することで、離陸時および着陸時の衝撃による破損は防ぐことができると考えられる。しかし、気温が高く機体が直射日光を浴びるような環境下では、Penguin C の機器搭載部の温度は 40°C 近くまで上昇する。また、カメラ搭載時に Penguin C の機器搭載部の下部を開く必要があり、機器搭載部に塵や水滴が入り込む可能性がある。よって、Penguin C に搭載する機器は防塵・防滴仕様とし、ある程度の耐熱性を有する必要があると考えられる。

電源テストの結果では、Penguin C からの供給電圧は離陸時および着陸時においても安定しているが、着陸におけるパラシュート展開時に消費電力が大きい機器の電源が落ちることが分かった。パラシュート展開時の電力不足に備えるために、搭載する機器にはバックアップの電源を搭載するなどの機能等を付加する必要があると考えられる。

通信テストの結果では Penguin C のユーザーインターフェースの通信機能はフレームレート 12 fps、解像度 640 × 480 程度の映像であれば問題なくリアルタイムで通信できることが分かった。放射線計数率データ等の数値データは問題なく、リアルタイム通信できると考えられる。

以上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、搭載機器が最低限具備すべき条件・性能を以下に示す。

- ・総重量は 2 kg 以下、大きさはおおよそ 220 mm × 200 mm × 100 mm 以内であること。
- ・防塵・防滴仕様であり、目安として外気温 -10°C ~ 50°C においても動作すること。
- ・電源は 12 V または 24 V を用いたものであること。
- ・突然の電源喪失においても、機器が破損等しないようなハード設計にすること。
- ・遠隔で機器の電源 ON/OFF ができること。
- ・TCP/IP 通信によるデータ通信ができること。
- ・GNSS 受信機を保持し、取得データが GNSS 時刻とリンク付けされていること。

以上の機器性能に加えて、原子力災害時の運用を想定した場合には、高線量率下における測定、周辺環境中における放射線核種を同定するための連続的な γ 線スペクトル測定、および機体の自己汚染状況を把握するための連続的な β 線測定が可能であること等が、放射線検出器が備えるべき性能として挙げられる。

原子力災害時における緊急時放射線モニタリングでは、上記の性能を保持した放射線検出器、上空から地上の様子を把握できるカメラ、またそれらの機器データを処理および転送する小型 PC および専用ソフトウェア、これらを一体化したシステムの開発が必要である。

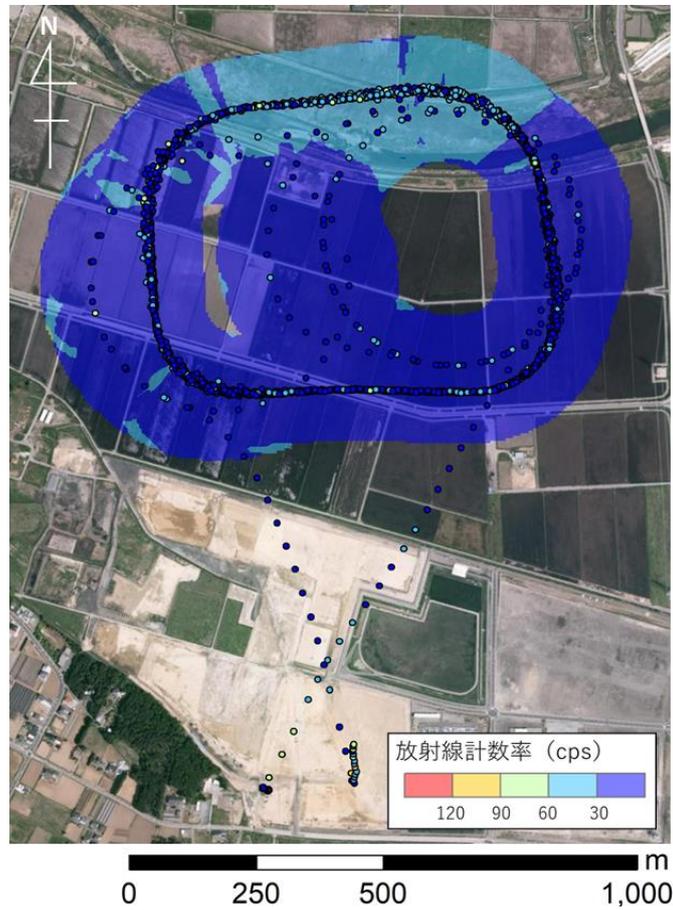


Fig. 5-19 Penguin C を用いた放射線計数率測定の結果
(測定日: 2020 年 8 月 20 日 放射線計数率は上空における計数率である。)

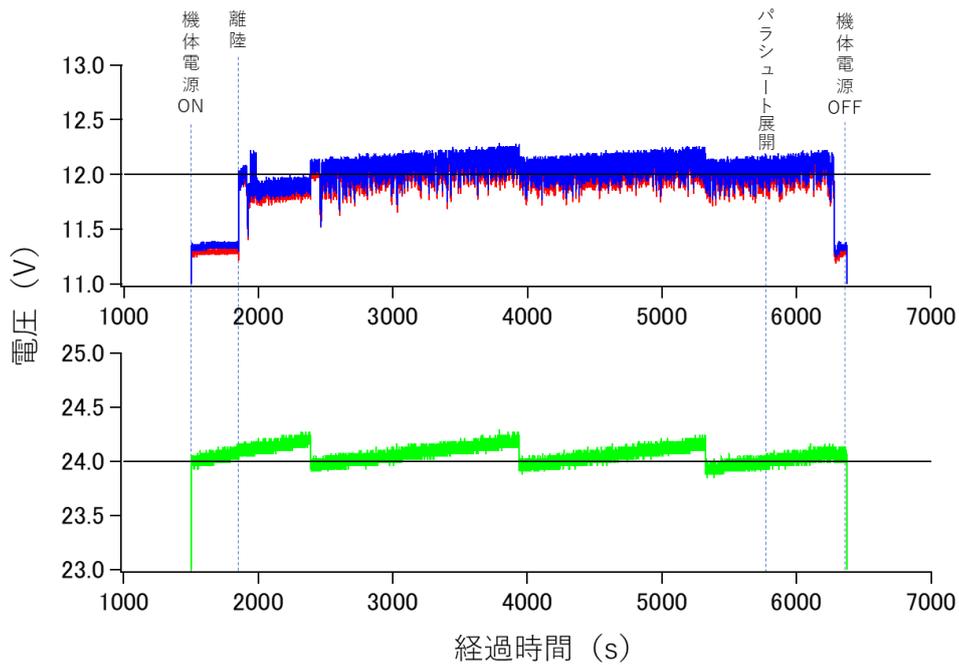


Fig. 5-20 フライト中の Penguin C からの供給電圧測定結果

Table 5-8 Penguin C の TCP/IP 通信を用いた映像転送テストの結果

フレームレート (fps)	映像解像度	基地局における映像
30	1280 × 960	×
30	1024 × 768	×
30	640 × 480	△
24	1280 × 960	×
24	1024 × 768	△
24	640 × 480	△
12	1280 × 960	△
12	1024 × 768	△
12	640 × 480	○

○：リアルタイムの映像を見ることができる

△：コマ送りの状態だが映像を見ることができる

×：数秒ごとに写真が送られてくるような形で映像を見ることができる

6. 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。

・測定結果について

美浜・敦賀および近大炉・京大炉について、3 km～80 km 圏における天然核種由来の空間線量率および核種別濃度マップを作成した。作成したマップの信頼性については、地上の測定データ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。

・測定の日程について

測線は5 km 間隔で東西方向に設定した。ただし、2016 年度に実施した大飯・高浜におけるバックグラウンド航空機モニタリング測線と重複する箇所は除くものとした。測定の期間は、美浜・敦賀では航空機による測定については2020年7月22日～8月9日(のべ14フライト)の19日間(ただし、天候不良のため、フライトを実施したのは8月1日からである。)、地上測定については2020年7月31日～8月9日の10日間、近大炉・京大炉では航空機による測定については2020年11月12日～11月19日(のべ11フライト)の8日間、地上測定については2020年11月12日～11月24日の13日間を要した。

・解析手法について

天然核種由来の空間線量率および核種別濃度の換算手法を整備した。本手法に用いているパラメータについては、今後もデータを蓄積し、最適化する必要がある。

・RSIシステムの保守方法について

原子力規制庁所有のRSIシステムについて、月例保守の方法を定型化し、確実に実施した。実施の結果、特に異常は見られなかった。

・測定エリアの管制空域、空港等の特徴および気候・地形等に関する特徴について

Fig. 6-1 に美浜・敦賀(P1・P2)から半径80 km 圏内(以下、美浜・敦賀測定エリア)における管制空域に係る情報を円および多角形の枠で示す。美浜・敦賀測定エリアの北部に航空自衛隊小松基地(A1)、北東部には自衛隊の高高度訓練/試験空域(B1)が隣接しており、当該空域を飛行する場合には関係機関との事前調整が必要となる。また、美浜・敦賀を取り囲むようにして自衛隊の低高度訓練/試験空域(B2)があり、若狭ヘリポートを測定拠点とした場合には、測線に向かうためにB2を通過する場合もあり、事前の調整を行う必要性が生じることがある。美浜・敦賀測定エリア南部にある航空自衛隊岐阜基地(A5)および民間訓練/試験空域(C1～C3)では飛行訓練等が行われている場合があるため、測定当日毎に当該空域の使用状況を確認し、必要に応じて事前調整を行う必要がある。若狭ヘリポートは測線までの距離が最短でも65 km 程度あり、効率的な測定を行う観点からは拠点としては不向きであるものの、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、利便性が非常に高いことから、本報告における美浜・敦賀測定エリアの拠点として利用した。福井空港(A2)は資機材の搬出入に係る手続き等が煩雑であるため利便性が比較的低く、測定拠点としては不向きであると考え、美浜・敦賀測定エリア北部を測定する際の給油地点として活用した。名古屋空港(A3)は非常に利便性が高いものの、長期に渡って駐機スポットを確保することが難しく、測定拠点として運用するには難点があったため、美浜・敦賀測定エリア南部を測定す

る際の燃料給油地点として活用した。また、美浜・敦賀測定エリア外ではあるが、北東部には富山空港 (A5)、南部には中部国際空港 (A6) もあり、燃料給油地点等として利用する際には、駐機スポットを確保するための事前調整を要する。美浜・敦賀測定エリアにおける天候および地形について、石川県、福井県は日本海側気候に属し、偏西風が日本海の対馬暖流で水蒸気を蓄え、両白山地にあたって降水・降雪をもたらすことが多い。梅雨の時期においては太平洋側と比べると降水量は顕著に多くはないが、冬には豪雪になることもある。年間の日照時間は短く、特に冬の日照時間が極端に少ない。岐阜県は内陸県のため風は比較的弱く、北部の飛騨地方は日本海側気候に、南部の美濃地方は太平洋側気候に分類される。飛騨地方は梅雨時期に降水量がピークをむかえ、標高が高いため夏は比較的涼しい。美濃地方は夏の暑さが特に厳しく、国内でもトップクラスの高温を観測するところもある。また、石川県・福井県・岐阜県の三県境付近は山岳地帯であり、急峻な地形が広がっているため、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。滋賀県は琵琶湖があるため、夏の暑さと冬の寒さは比較的穏やかであり、梅雨の前半は曇りや雨の日が多く、日照時間が少なく気温の上昇が抑えられる。美浜・敦賀測定エリアにおいては、全体的に年間降水量が比較的多く、特に梅雨時期で降水が続く傾向にあり、航空機モニタリングには不向きな時期である。

Fig. 6-2 に近大炉・京大炉 (P1・P2) から半径 80 km 圏内 (以下、近大炉・京大炉測定エリア) における管制空域に係る情報を円および多角形の枠で示す。近大炉・京大炉測定エリア中央部には伊丹空港 (A1)、神戸空港 (A2)、八尾空港 (A3) および関西国際空港 (A4) の航空交通管制圏が密集しており、その周囲は特別管制空域 (黄緑枠で囲った領域) に指定されている。本エリアにおいては常に管制を受けながら飛行することとなり、特に特別管制空域内では原則として計器飛行方式による飛行が義務付けられており、ヘリコプター等が有視界飛行方式にて当該空域を飛行する場合には必ず事前に管制機関と通信を行い、通過の許可を得る必要がある。さらに、民間訓練/試験空域 (C1、C2) では飛行訓練等が行われている場合があるため、測定当日毎に当該空域の使用状況を確認し、事前調整を行う必要がある。近大炉・京大炉測定エリアは広域に渡るため、測定を効率的に行うために測定拠点を 2ヶ所設けることとし、本報告においては中央部に位置する奈良県ヘリポートおよび南部に位置する南紀白浜空港を利用した。奈良県ヘリポート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等、利便性が非常に高い。南紀白浜空港 (A6) は現地測定作業員の待機場所の確保が難しく、空港利用者と共用の待合スペースを利用せざるを得ない場合がある。また、ヘリコプターの駐機スポットへの人員の出入りや資機材の搬出入の制限が厳しい等、利便性は比較的低いものの、近大炉・京大炉測定エリアの南部を測定するには良い位置にある。近大炉・京大炉測定エリア南西部には徳島飛行場 (A5) が位置し、淡路島等を測定する際の燃料給油地点等として活用できるが、海上自衛隊小松島空港 (A7) が隣接し、事前調整を要する。近大炉・京大炉測定エリアにおける主だった天候および地形について、大阪府の気候は瀬戸内海式気候に分類され、年間を通じて天気が安定する傾向にある。降水量は梅雨時期と 9 月頃に比較的多くなり、大阪湾では雨雲が急に発生して平地に降雨をもたらす場合があるものの、年間降水量は比較的少ない。奈良県の気候は概ね温暖で、北部の大和盆地は内陸性気候、北東部の大和高原は内陸性気候と山岳性気候の特徴を有し、気温の日較差が大きい。一方、南部の山岳部では山

岳性気候の特徴を有し、特に大台ヶ原山周辺は日本屈指の多雨地帯であり、夏の雨量が極めて多く、冬は厳しい冬山の様相となる。和歌山県は南北の距離が長く北部と南部で気候が異なる。北部は瀬戸内海式気候に属し、年間を通じて天気や湿度が安定しており、降水量も少ない。一方、南部は太平洋岸式気候に属し、黒潮の影響を受け温暖で台風の影響を受けやすく極めて降水量の多い地域もある。また、日照時間が長く、夏は比較的涼しく冬は暖かい傾向がみられる。近大炉・京大炉測定エリアの中央部から南部にかけて紀伊山地が広がっており、地形が急峻なため、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。また、紀伊山地一帯に木材を運搬するための索道が点在しており、索道に接触する危険性を低減するために、地元で航空機を運用する航空会社等から索道の位置に関する情報を入手しておくことが望ましい。本測定エリアにおける航空機モニタリングに際してはコーパイロットや測定要員による周囲の常時監視が必須である。

・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

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の、原子力災害を想定した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を中心に、計 11 回のフライト試験 (総フライト時間: 1,000 分) を実施した。試験には、雨天時の飛行試験および 6 時間の耐久フライト試験を含めた。試験は予定通り完遂でき、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、体の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、放射線検出器の試作機の製作および試作機を搭載してフライト試験を実施した。本試作機は、離発着の衝撃による損傷等もなく、飛行中もノイズによる影響は見られなかった。今後、サブマージョン (プルーム) 線源の測定に対応可能な実用機の開発を進めていく予定である。

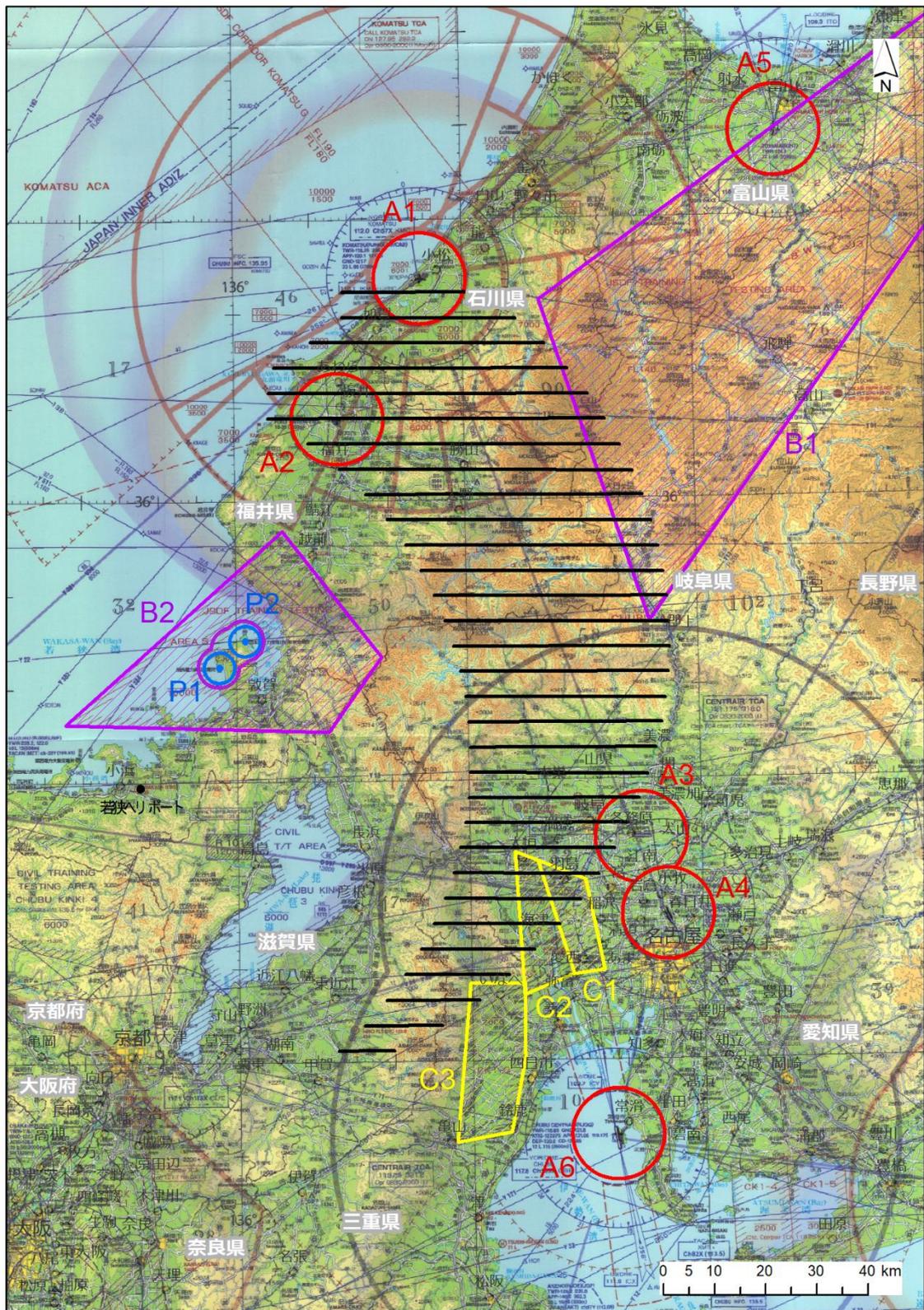


Fig. 6-1 管制空域に係る情報 (美浜・敦賀)

A: 空港・航空基地、B: 自衛隊訓練/試験空域、C: 民間訓練/試験空域、P: 原子力関連施設
 (背景地図は、区分航空図 中部・近畿 ((公社) 日本航空機操縦士協会) を使用。)

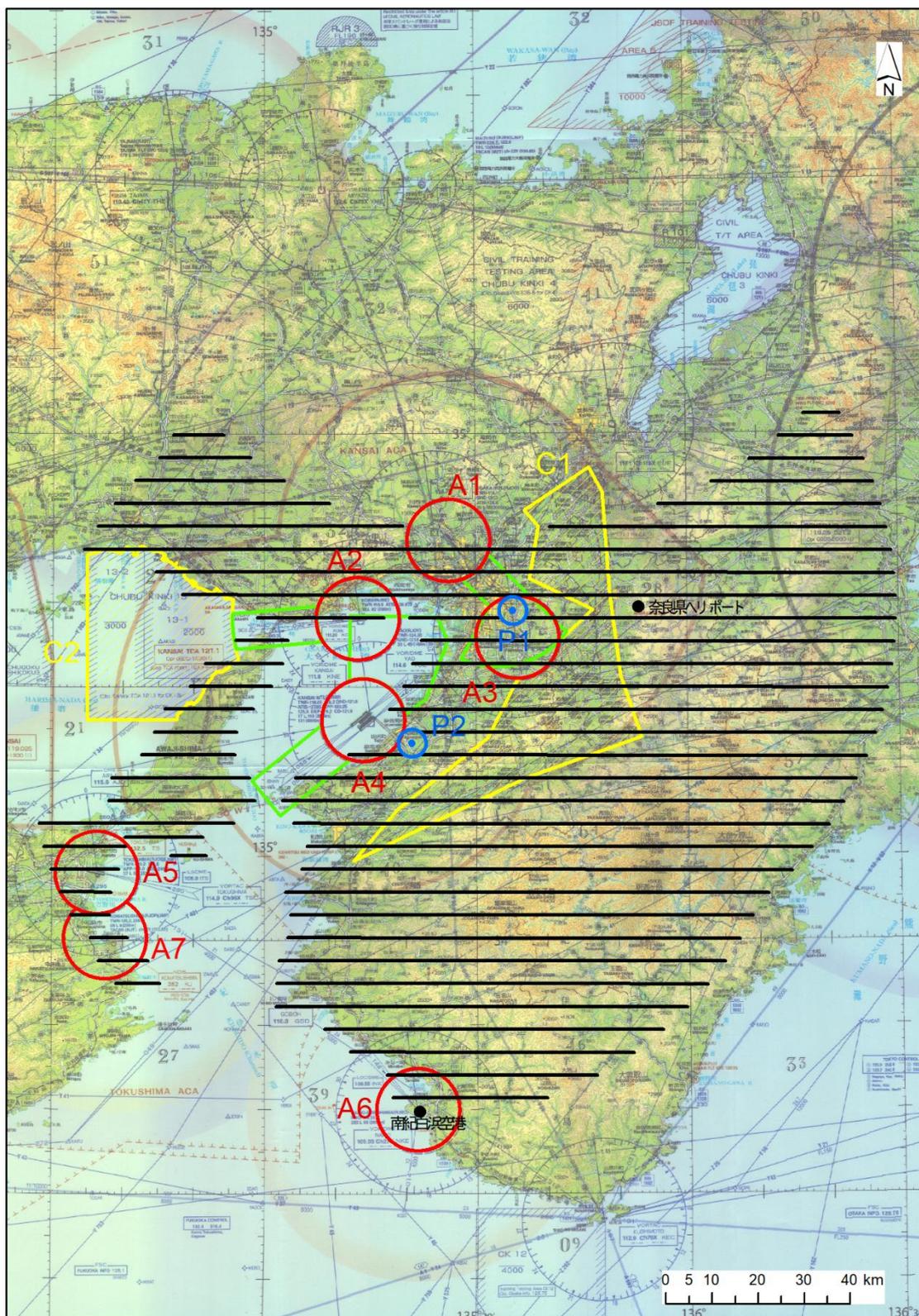


Fig. 6-2 管制空域に係る情報 (近大炉・京大炉)

A: 空港・航空基地、B: 自衛隊訓練/試験空域、C: 民間訓練/試験空域、P: 原子力関連施設
 (背景地図は、区分航空図 中部・近畿 ((公社) 日本航空機操縦士協会) を使用。)

謝辞

本調査研究は、原子力規制庁による「令和 2 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。無人飛行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。ここに本事業に参加された皆様に謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 鳥居建男, 眞田幸尚, 杉田武志, 田中圭, 航空機モニタリングによる東日本全域の空間線量率と放射性物質の沈着量調査, 日本原子力学会誌(ATOMOS), 54(3), 2012, pp.160-165.
- 2) 眞田幸尚, 近藤敦也, 杉田武志, 鳥居建男, 航空機モニタリングによる放射性セシウムの汚染分布, 放射線, 38 (3), 2012, pp.137-140.
- 3) 眞田幸尚, 日本全域における航空機モニタリング, FB news, (432), 2012, pp.7-11.
- 4) 鳥居建男, 眞田幸尚, 杉田武志, 近藤敦哉, 志風義明, 高橋昌樹, 石田睦司, 西澤幸康, 卜部嘉, 広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査, JAEA-Technology 2012-036, 2012, 182p.
- 5) 眞田幸尚, 西澤幸康, 卜部嘉, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 土田清文, 石橋聖, 前島正道, 結城洋一, 鳥居建男, 平成 25 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2014-012, 2014, 110p.
- 6) 眞田幸尚, 森愛理, 石崎 梓, 宗像雅広, 中山真一, 西澤幸康, 卜部嘉, 中西千佳, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 土田清文, 石橋聖, 吉田真美, 前島正道, 結城洋一, 鳥居建男, 平成 26 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2015-006, 2015, 81p.
- 7) 眞田幸尚, 宗像雅広, 森愛理, 石崎梓, 嶋田和真 廣内淳, 西澤幸康, 卜部嘉, 中西千佳, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 佐々木美雪, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 宮本賢治, 岩井毅行, 松永祐樹, 豊田政幸, 飛田晋一郎, 工藤保, 中山真一, 平成 27 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2016-016, 2016, 131p.
- 8) 眞田幸尚, 森愛理, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一郎, 平賀祥吾, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 廣内淳, 工藤保, 平成 28 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2017-034, 2017, 117p.
- 9) 眞田幸尚, 森愛理, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一郎, 平賀祥吾, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 廣内淳, 工藤保, 平成 28 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2017-035, 2018, 69p.
- 10) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一郎, 平賀 祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 工藤保, 平成 29 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2018-015, 2019, 120p.
- 11) 普天間章, 眞田幸尚, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一郎, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 工藤保, 平成 29 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2018-016, 2019, 98p.
- 12) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 古宮友和, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 萩野谷仁, 平賀 祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成 30

- 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-016, 2019, 116p.
- 13) 普天間章, 眞田幸尚, 古宮友和, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 萩野谷仁, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成30年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-017, 2019, 95p.
 - 14) 普天間章, 眞田幸尚, 石崎梓, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 廣内淳, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和元年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-018, 2021, 121p.
 - 15) 普天間章, 眞田幸尚, 川崎義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 石崎梓, 廣内淳, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和元年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-019, 2021, 128p.
 - 16) 原子力防災会議幹事会, 原子力災害対策マニュアル, 令和2年7月27日一部改訂.
 - 17) 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2年10月28日一部改正).
 - 18) 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.
 - 19) 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.
 - 20) 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> (2021年3月1日閲覧).
 - 21) 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.
 - 22) 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.
 - 23) 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.
 - 24) 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.
 - 25) 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.
 - 26) 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.

- 27) 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> (2021年3月1日閲覧).
- 28) Currie, L. A., Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry., *Anal. Chem*, 40(3), 1968, pp.586-593.
- 29) 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.
- 30) 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.
- 31) 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.
- 32) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, pp.81-101.
- 33) 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.
- 34) 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/> (2021年3月1日閲覧).
- 35) 松川正樹, 小荒井千人, 塩野谷奨, 新海拓也, 中田恒介, 松井哲也, 青野宏美, 小林典夫, 大久保敦, 林慶一, 伊藤慎, 石川県手取川上流域及び関連地域の手取層群, 手取川流域中生代手取層群調査報告書, 2002, 15p.
- 36) 脇田浩二, 八幡地域の地質, 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅 金沢(10)第70号, 1984, 89p.
- 37) 脇田浩二, 谷汲地域の地質, 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅 金沢-第81号, 1991, 53p.
- 38) 脇田浩二, 美濃地域の地質, 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅 金沢 第82号, 1995, 36p.
- 39) 原山智, 宮村学, 吉田史郎, 三村弘二, 栗本史雄, 御在所山地地域の地質, 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅 京都(11)第30号, 1989, 139p.
- 40) 河合正虎, 5万分の1地質図幅説明書 根尾, 金沢 第69号, 1964, 66p.
- 41) 佐藤隆春, 大和大峯研究グループ, 大峯・大台コールドロン –紀伊山地中央部にみられる弧状および半円形の断層・岩脈群と陥没構造-, *地球科学*, 60, 2006, pp.403-413.
- 42) 宮村学, 吉田史郎, 山田直利, 佐藤岱生, 寒川旭, 亀山地域の地質, 地域地質研究報告 5万分の1図幅 京都(11)第42号, 1981, 138p.
- 43) 川辺孝幸, 高橋祐平, 小村良二, 田口雄作, 上野地域の地質, 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅 京都(11)第53号, 1996, 99p.
- 44) 西岡芳春, 尾崎正紀, 寒川旭, 山元孝広, 川辺孝幸, 名張地域の地質, 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅 京都(11)第65号, 1998, 72p.
- 45) 市原実, 市川浩一郎, 山田直利, 岸和田地域の地質, 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅 京都(11)第73号, 1986, 148p.

- 46) 柴山元彦, 地表 γ 線強度と地質条件について -特に累帯深成岩体と γ 線強度-, 大阪市立大学理学研究科生物地球専攻博士論文, 2003.
- 47) 宮地良典, 田結庄良昭, 吉川敏之, 寒川旭, 大阪東南部地域の地質, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 京都(11)第 63 号, 1998, 113p.
- 48) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2011 年 9 月台風 12 号による紀伊半島の土砂災害(地質概要), (2021 年 3 月 1 日閲覧).
- 49) 湊進, 池田正, 柴山元彦, 平賀章三, 奈良県の地表ガンマ線量率調査, RADIOISOTOPES, 52, 2003, pp.44-53.
- 50) 徳岡隆夫, 原田哲朗, 井内美郎, 石上知良, 木村克己, 公文富士夫, 仲條健次, 中屋志津男, 坂本隆彦, 鈴木博之, 谷口純造, 龍神地域の性質, 地域地質研究報告 5 万分の 1 図幅 京都(11)第 96 号, 1981, 69p.
- 51) 西岡芳春, 尾崎正紀, 寒川旭, 山元孝広, 宮地良典, 桜井地域の地質, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 京都(11)第 64 号, 2001, 141p.
- 52) 牧本博, 宮田隆夫, 寒川旭, 粉河地域の地質, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 京都(11)第 81 号, 2004, 89p.
- 53) 吉村辰朗, 大野正夫, 断層破碎帯における帯磁率以上に伴う γ 線量の変化, BUTSURI-TANSA, 65(3), 2012, pp.151-160.
- 54) 栗本史雄, 木村克己, 竹内誠, 紀伊半島北西部、高野山地域の上部白亜系花園層の地質と放射虫化石, 地質調査研究報告, 66(3/4), 2015, pp.41-79.
- 55) 後誠介, 江種伸之, 紀伊半島の地形・地質と平成 23 年斜面災害, 和歌山大学防災教育センター紀要, 第 1 号, 2015, pp.5-12.
- 56) 柴山元彦, 平岡由次, 池田正, 寺戸真, 淡路島の地表 γ 線量率と地質, 大阪教育大学紀要 III 部門, 53(1), 2004, pp.9-16.
- 57) 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/> (2021 年 3 月 1 日閲覧).
- 58) Beck, H. L., DeCampo, J. and Gogolak, C., In situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry, USAEC Report HASL-258, New York, N.Y. 10014, 1972.
- 59) 原子力百科事典 ATOMICA, 天然の放射性核種, https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_09-01-01-02.html (2021 年 3 月 1 日閲覧).
- 60) 国土地理院, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2021 年 3 月 1 日閲覧).
- 61) 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.
- 62) 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.

リサイクル適性 

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。