

令和3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4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3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	6
2.1.	航空機モニタリングシステム	6
2.2.	ヘリコプターの選定	8
2.3.	RSIシステムの保守	10
3.	データ取得および解析方法	12
3.1.	航空機モニタリングの方法	12
3.1.1.	データ取得方法	12
3.1.2.	ヘリコプターによるフライト実績	14
3.2.	キャリブレーションフライト方法	15
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 γ 線計数率	21
3.4.2.	対地高度補正係数 HF の算出方法	23
3.4.3.	空間線量率への換算係数 CD の算出方法	23
3.4.4.	空間線量率への換算方法	24
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.	空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	29
3.8.3.	GI の高度補正方法	32
3.9.	天然放射性核種の濃度換算手法	34
4.	モニタリング結果と考察	36
4.1.	換算パラメータ	36
4.2.	地上測定値との比較	40
4.3.	空間線量率	45
4.4.	天然放射性核種の濃度	53
4.5.	ラドン弁別手法の適用	61
4.5.1.	パラメータ(RI および GI)の決定	61
4.5.2.	ラドン弁別手法の適用結果および従来手法との比較	63
4.6.	放射性セシウムの沈着量	71
5.	原子力防災訓練における緊急時航空機モニタリング	73

5.1.	概要.....	73
5.2.	原子力防災訓練等における航空機モニタリングに係る全体概要	74
5.3.	訓練の総評と課題の抽出.....	79
6.	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.....	80
6.1.	原子力災害時における無人機運用の課題.....	80
6.2.	無人機の開発状況.....	82
6.3.	Penguin C のカタログ性能.....	83
6.4.	地上試験および飛行試験の実績.....	87
6.5.	地上における機体の基礎データ取得試験.....	88
6.5.1.	地上における機体基礎データ取得試験結果	88
6.5.2.	機体健全性確認の点検手順書.....	94
6.5.3.	定期保守点検手順書.....	94
6.6.	フライト中の機体データ取得のための試験.....	94
6.6.1.	気象データ	96
6.6.2.	飛行ログ	97
6.7.	夜間フライトに必要となる機能および運用体制の確認	102
6.8.	原子力災害時に想定される無人航空機放射線モニタリング対応	104
6.9.	無人飛行機に搭載する放射線測定システムの設計、製作および動作試験	110
6.9.1.	放射線測定システムについて.....	110
6.9.2.	放射線測定システムの動作試験結果について	112
6.9.3.	放射線測定システムの性能および課題について.....	118
7.	まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理	120
	謝辞.....	123
	参考文献.....	124

Table list

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL	4
Table 3-1 ヘリコプターのフライト距離および速度とフライト回数.....	15
Table 3-2 キャリブレーションフライトの一覧	17
Table 3-3 RSI システムと機体組み合わせと空气中核種由来の計数率平均値および <i>CR-index</i>	22
Table 3-4 ラドン子孫核種の放出する γ 線	28
Table 3-5 天然放射性核種濃度への換算パラメーター一覧	35
Table 4-1 2021 年度取得した <i>AF</i> データー一覧	38
Table 4-2 2021 年度取得した <i>CD</i> データー一覧	38
Table 4-3 換算パラメータのまとめ.....	39
Table 4-4 解析に用いた <i>RI</i> および <i>GI</i> の一覧	62
Table 5-1 原子力総合防災訓練等における航空機モニタリング実施状況	74
Table 5-2 令和 3 年度北海道原子力防災訓練に係るタイムテーブル (2021 年 10 月 28 日)	75
Table 6-1 代表的な無人機の概観とスペック	83
Table 6-2 Penguin C 機体のカタログスペック	85
Table 6-3 Penguin C 周辺機器のカタログスペック	86
Table 6-4 UAV Factory における平均故障間隔計算時の事故分類	86
Table 6-5 2021 年度に実施した飛行試験	87
Table 6-6 飛行試験のデーター一覧.....	95
Table 6-7 UAV IP Data Link の仕様.....	107
Table 6-8 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.....	108

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. 1-2 2015年度から2020年度までのバックグラウンド航空機モニタリング結果.....	5
Fig. 2-1 RSIシステムのブロック図.....	7
Fig. 2-2 RSIシステムの外観.....	7
Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧.....	8
Fig. 2-4 大飯・高浜周辺の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell412 (JA6928)).....	9
Fig. 2-5 システムのエネルギー分解能および Gain の推移.....	11
Fig. 3-1 予定したフライトの測線.....	13
Fig. 3-2 航空機モニタリングデータ取得のイメージ.....	14
Fig. 3-3 航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージ.....	14
Fig. 3-4 テストラインフライトのイメージ.....	17
Fig. 3-5 テストラインおよびテストポイントの場所 (福井県敦賀市内).....	18
Fig. 3-6 テストポイントフライトのイメージ.....	18
Fig. 3-7 宇宙線フライトのイメージ.....	19
Fig. 3-8 空気中核種フライトのイメージ.....	19
Fig. 3-9 解析のフロー.....	20
Fig. 3-10 空気中核種フライトで取得した陸上と海上での γ 線スペクトル例.....	22
Fig. 3-11 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例.....	22
Fig. 3-12 IDW に入力するパラメータとマップの関係.....	27
Fig. 3-13 ウラン系列およびトリウム系列.....	28
Fig. 3-14 空気中ラドン子孫核種測定用の検出器とヘリコプターへの搭載状況.....	31
Fig. 3-15 空気中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ.....	31
Fig. 3-16 計算体系のイメージ.....	33
Fig. 3-17 計算体系のベンチマーク.....	33
Fig. 3-18 シミュレーションによる測定高度と GI の関係.....	33
Fig. 3-19 天然放射性核種によるピークの解析例.....	35
Fig. 3-20 天然放射性核種ごとの対地高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション).....	35
Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例.....	36
Fig. 4-2 テストポイントにおける地上測定値 ($\mu\text{Sv/h}$).....	37
Fig. 4-3 測線近傍における地上測定値 ($\mu\text{Sv/h}$).....	42
Fig. 4-4 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値との比較 (大飯・高浜 2021).....	43
Fig. 4-5 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値との比較 (大飯・高浜 2016).....	43
Fig. 4-6 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値との比較 (2016年から2020年までの全データ).....	44
Fig. 4-7 空間線量率マップ (大飯・高浜 2021年).....	50
Fig. 4-8 空間線量率マップ (大飯・高浜 2016年).....	51

Fig. 4-9 空間線量率マップの比較	52
Fig. 4-10 K-40 濃度マップ	55
Fig. 4-11 U 系列濃度マップ	56
Fig. 4-12 Th 系列濃度マップ	57
Fig. 4-13 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (K-40).....	58
Fig. 4-14 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).....	59
Fig. 4-15 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).....	60
Fig. 4-16 陸上および海上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr ₃ 検出器の計数率の関係	62
Fig. 4-17 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ	66
Fig. 4-18 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ	67
Fig. 4-19 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ比較	68
Fig. 4-20 従来手法およびラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較	69
Fig. 4-21 空気中核種フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子孫核種 由来の計数率の比較.....	70
Fig. 4-22 放射性セシウム沈着量マップ	72
Fig. 5-1 令和 3 年度北海道原子力防災訓練におけるフライトプラン.....	76
Fig. 5-2 令和 3 年度北海道原子力防災訓練において使用したヘリコプター (UH-1J).....	77
Fig. 5-3 航空機モニタリングシステムの搭載状況	77
Fig. 5-4 NEAT の訓練対応者の装備	78
Fig. 5-5 ヘリコプターの汚染検査および除染作業的一幕	78
Fig. 6-1 既存の無人機によるシステムと原子力災害時に備えるべき無人機システムのイメージ.....	81
Fig. 6-2 原子力発電所事故を例にした対応シミュレーション.....	81
Fig. 6-3 Penguin C の概観	85
Fig. 6-4 通信試験の実施地点	89
Fig. 6-5 飛行試験時の離隔距離	89
Fig. 6-6 CoPilot 操作画面	90
Fig. 6-7 正常位置にあるパラシュート	90
Fig. 6-8 CoPilot 舵面インジケーター	91
Fig. 6-9 CoPilot RPM 表示箇所	92
Fig. 6-10 警告表示箇所 (青色の四角枠)	93
Fig. 6-11 警告表示の例	93
Fig. 6-12 飛行試験期間中に取得した気象データの例.....	96
Fig. 6-13 フライトの軌跡例 (2021 年 6 月 8 日 RTF).....	97
Fig. 6-14 フライトログ例 (2021 年 6 月 8 日 RTF).....	98
Fig. 6-15 空虚重量測定例	104
Fig. 6-16 放射線測定システム試作機の概要および外観.....	111
Fig. 6-17 ホスウィッチ型検出器の図面.....	112
Fig. 6-18 ホスウィッチ型検出器で得られたスペクトル.....	112

Fig. 6-19 エンジン回転数上昇に伴うノイズの影響 (地上試験時).....	114
Fig. 6-20 カバーの有無による電磁ノイズの影響.....	115
Fig. 6-21 飛行測定試験時の計数率の変化 (2021年8月24日).....	116
Fig. 6-22 フライト試験時の γ 線スペクトル (2021年8月24日).....	116
Fig. 6-23 飛行測定試験時の γ 線計数率および地表面から1 mの高さの空間線量率.....	117
Fig. 6-24 Penguin Cに搭載する放射線測定システム設計案.....	119
Fig. 7-1 大飯・高浜周辺における管制空域に係る情報.....	122

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11年が経過し、継続的な航空機モニタリングを実施しつつ、手法の改善および体制の整備を行ってきた¹⁾⁻¹⁷⁾。

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¹⁸⁾。

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¹⁹⁾に定められている防護措置の実施の判断基準(Operational Intervention Level: OIL)を踏まえて位置づけられることが望ましい。Table 1-1 に原子力災害対策指針における OIL について示す。また、機能的かつ効率的にフライトするには、事前に想定される地域を訓練として実際にフライトし、地域的な特性(飛行場から原子力発電所までの距離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で行っている航空機モニタリングは、周辺環境に沈着した放射性セシウムから放出される γ 線の測定を目的としている。放射性セシウムの影響が天然放射性核種からの影響に比べて比較的高い場所を測定する場合には、天然放射性核種の影響

は無視できるが、福島原子力発電所事故よりも比較的小さな事故を想定した場合は、天然放射性核種の影響を考慮しなければならない。福島原子力発電所事故以前に実施された測定により推定された天然の放射性核種由来の空間線量率分布をみると、西日本で高い傾向にあり、最大 0.13 $\mu\text{Gy/h}$ 程度の場所もあるとされている²⁰⁾。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^{20),21)}。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²²⁾について Fig. 1-1 に示す。例えば、このような天然放射性核種由来の空間線量率(以下、バックグラウンド)は、Table 1-1 に示した飲食物に係るスクリーニングを実施するための基準となる 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ を評価する場合には、無視できない大きさである。バックグラウンドの影響を除いた空間線量率を算出するには、 γ 線エネルギースペクトルからバックグラウンド計数率を減算する手法が考えられるが、スペクトル弁別には計数を一定程度蓄積する必要があり、一般的に時間がかかる。一方、原子力災害時等の緊急時にモニタリング対象となることが想定される地域のバックグラウンドを事前に調査しておく、緊急時に迅速かつ正確にバックグラウンドを減算したうえで空間線量率の評価が可能となる。また、事前にフライトすることによって、地域特有の航空管制の情報、測定拠点として用いることのできる空港等の特徴や利用方法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予め整備できることは重要な利点である。

近年、ドローン等の無人飛行体(UAV)の開発は著しく、福島原子力発電所事故後、放射線検出器と組み合わせたシステムが開発されている。原子力機構では、福島原子力発電所周辺のモニタリングや河川敷のモニタリングにヤマハ発動機社製の自律型無人ヘリコプターを活用している²³⁾⁻²⁵⁾。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²⁶⁾⁻²⁸⁾。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²⁶⁾。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、有人ヘリコプターを用いた航空機モニタリングの代替技術として期待されているほか、将来的には原子力防災への適用が可能と考えられている。UAV を用いると放射線計測を遠隔地から実施できるため、本技術を原子力防災のツールとして適用することで、乗組員の被ばく線量低減に資すると考えられる。以上のことから、UARMS の開発および運用実績に基づき、我が国の原子力防災に適用可能な能力があると考えられる無人飛行機 Penguin C について、性能評価を行い、国内での運用の課題について抽出することは有用である。

これまでの受託事業で得られた成果は以下の通りである。平成 27 年度(2015 年度)には、鹿児島県にある九州電力川内原子力発電所周辺の 3 km~80 km 圏内について航空機を用いたバックグラウンドモニタリングを実施し、フライト時の地域特性を踏まえた注意点を抽出し

た。また、天然放射性核種の放射能濃度マップの作成手法を整備した⁷⁾。

平成 28 年度 (2016 年度) には、福井県にある関西電力大飯発電所並びに高浜発電所 (以下、大飯・高浜) および愛媛県にある四国電力伊方発電所周辺 3 km～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した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および佐賀県にある九州電力玄海 (以下、玄海) 原子力発電所周辺 3 km～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した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および石川県にある北陸電力志賀原子力発電所周辺 3 km～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した。また、当年度より、無人飛行機を用いた原子力防災への運用技術開発に着手し、機器の選定および仕様の確認のためのフライト試験を実施した¹⁵⁾。

令和 2 年度 (2020 年度) には、福井県にある関西電力美浜発電所並びに日本原子力発電敦賀発電所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、無人飛行機 Penguin C の原子力防災への運用技術開発の一環として、機体の運用を慣熟することを目的としたフライト試験を実施するとともに機体に搭載する放射線検出器や通信システム等を試作し、本試作機を搭載したフライトを実施して得られたデータ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を取りまとめた¹⁷⁾。

これらの受託事業で実施した、原子力施設周辺における航空機モニタリングにより作成した空間線量率マップを Fig. 1-2 に示す。空間線量率の分布傾向は近畿地方および中国地方で比較的高い傾向にあり、これは花崗岩類を含む珪長質火成岩が西日本側に広く分布していることに起因すると推察される。また、本マップの空間線量率の分布傾向は Fig. 1-1 で示した地殻中の元素濃度の測定データを基に作成された空間線量率マップと同様であり、航空機モニタリングによって地上測定ベースのものと遜色なく空間線量率を評価することが可能であると言える。原子力災害時における緊急時モニタリングにおいて、航空機モニタリングを適切に活用するためには、平常時から航空機モニタリングを実施することによってデータ解析の経験や知見を蓄積し、技術維持および品質向上に努めることが肝要である。

本報告書では、令和 3 年度 (2021 年度) に実施した大飯・高浜の周辺 3 km～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングにより得られた測定結果を報告する。また、原子力災害時の緊急時モニタリングにおける無人飛行機 Penguin C の運用技術開発の一環として、本年度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緊急時モニタリングへの運用に際しての今後の課題等について報告する。

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL

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

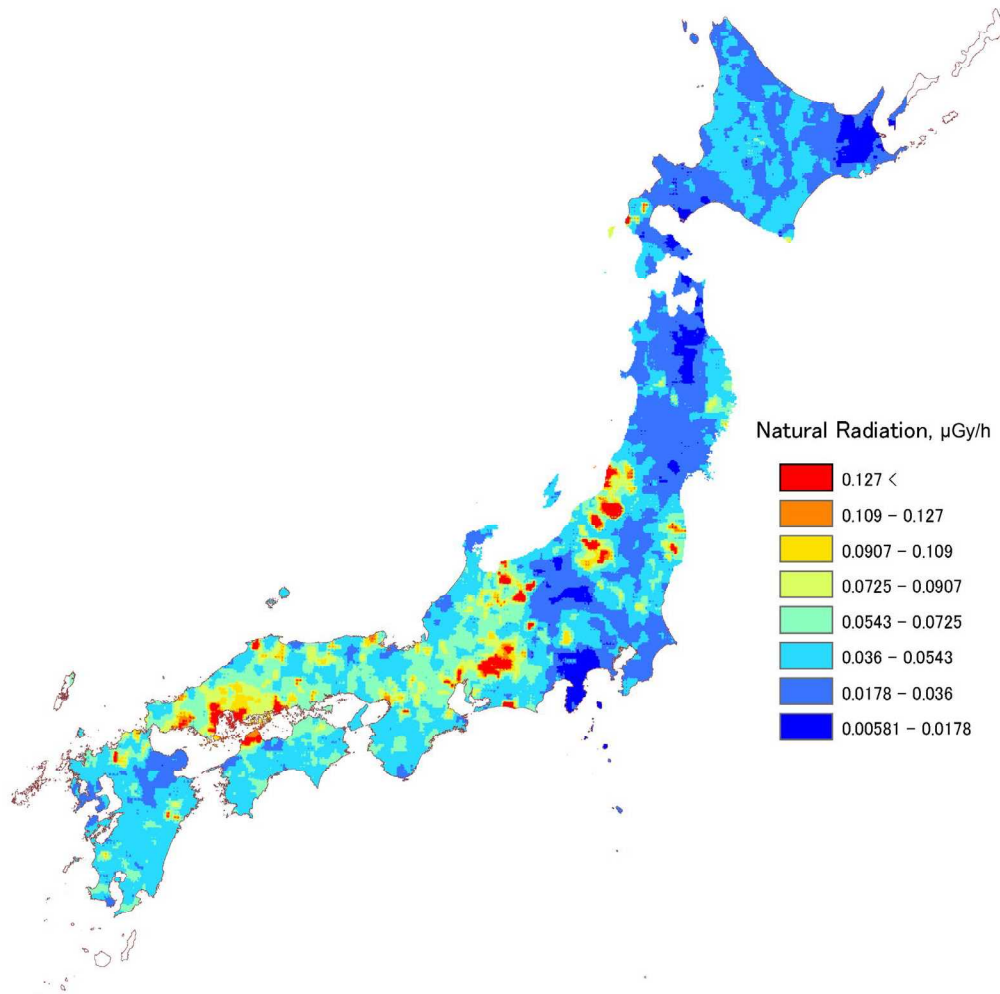


Fig. 1-1 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果
(日本地質学会ホームページ²²⁾より)

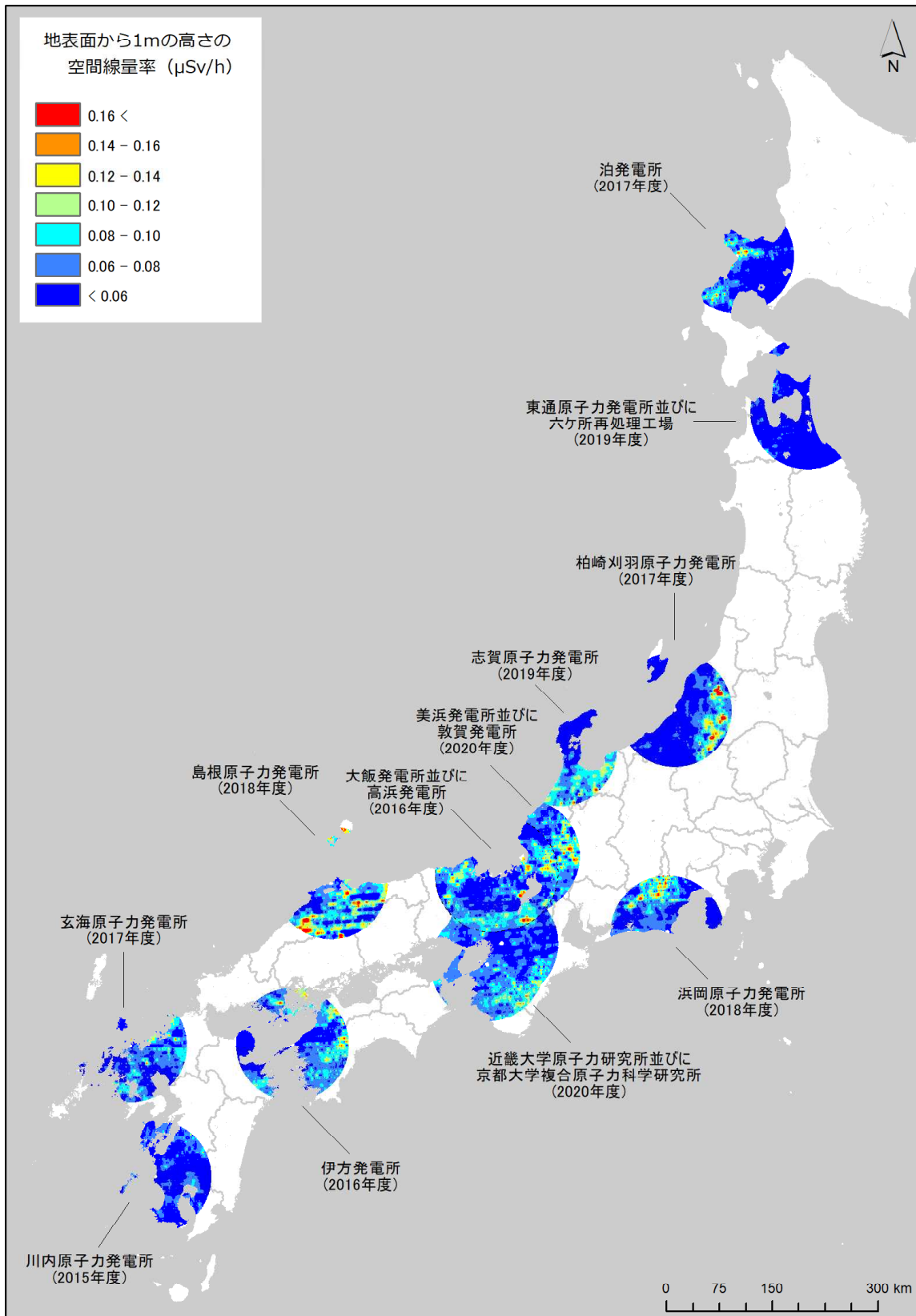


Fig. 1-2 2015年度から2020年度までのバックグラウンド航空機モニタリング結果

2. モニタリングシステムとヘリコプター

2.1. 航空機モニタリングシステム

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

今回のモニタリングで使用した Radiation Solutions Inc. (RSI, Canada) 製のシステム (以下、RSI システム) は、機内に装着するタイプである。RSI システムのブロック図を Fig. 2-1 に示し、外観を Fig. 2-2 に示す。検出部には、2" × 4" × 16" の NaI(Tl)検出器 3 本を組み込んだ検出器のユニットを 2 台使用している (合計: 12.6 L)。なお、NaI(Tl)検出器の上部に設置してある LaBr₃(Ce)シンチレーション式検出器 (3" × 3"、以下、LaBr₃ 検出器) は空気中ラドンの子孫核種に起因する γ 線計数率の弁別 (3.8 に詳述する) に使用する。検出器で計測した 1,024 ch (0 ch~1023 ch) の γ 線のスペクトルは 1 秒毎に同期する GPS による位置データとともに、RS-701 と呼ばれる NaI(Tl)検出器上部に取り付けてあるデータ収集装置に保存される。検出器 2 台のデータは RS-501 という装置で統合される。RS-501 は PC と接続でき、PC にインストールされている専用のソフトウェア (RadAssist) を使用することによって GPS による位置情報や γ 線の計数率情報をリアルタイムに確認できる。また、全体は外付けのバッテリーで駆動し、完全充電で 5 時間の稼働が可能である。

現在、航空機モニタリングで用いられている機器は複数あり、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングで主に使われている 2 システム (RSI 1 および RSI 2) と区別するため、本報告書では RSI 3 と表記する。

また、RSI システムの GPS 受信機とは独立して高精度 GPS システムも機内に搭載している。当該システムでは高精度 GPS 受信機 (CORE 社製 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。

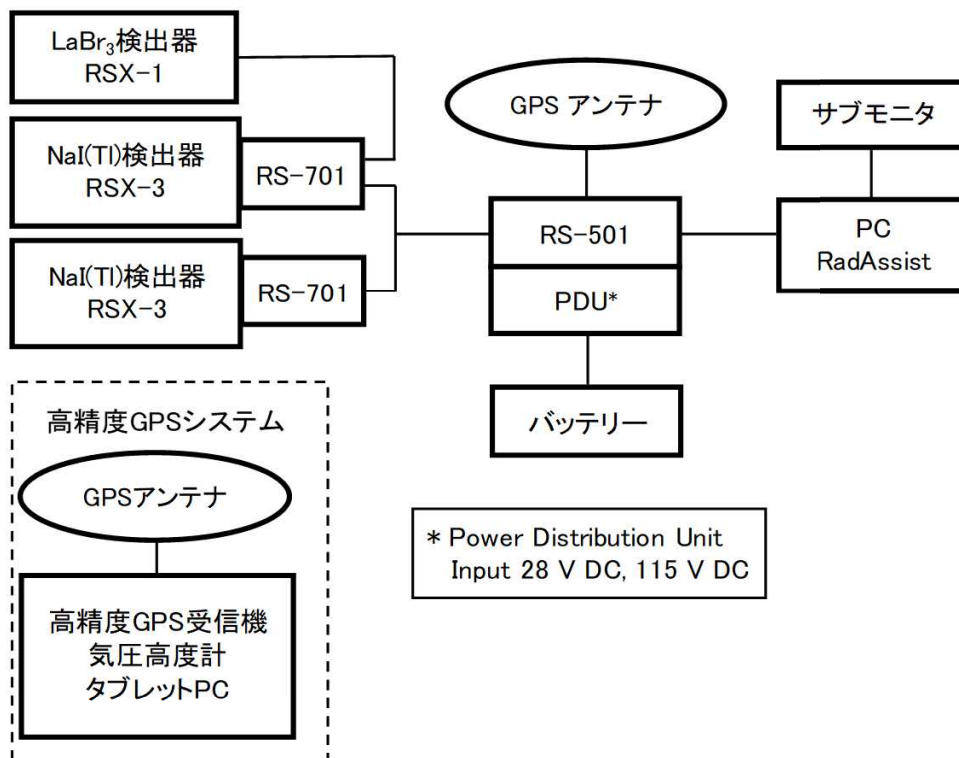


Fig. 2-1 RSI システムのブロック図

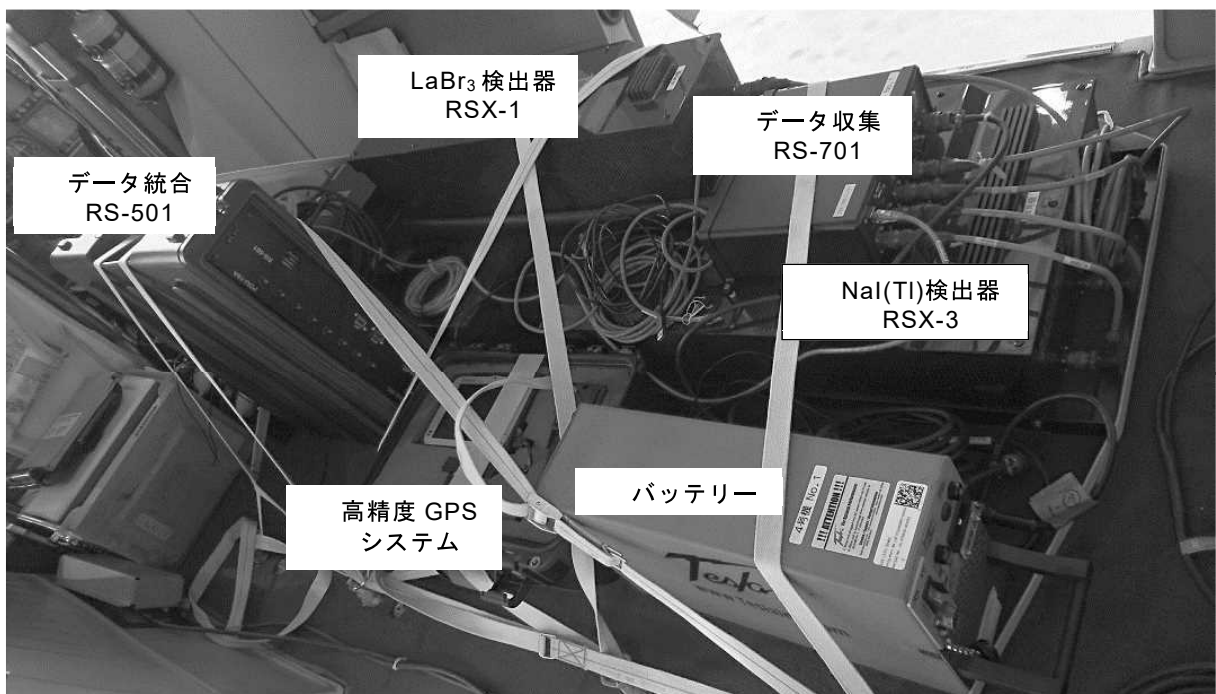


Fig. 2-2 RSI システムの外観

2.2. ヘリコプターの選定

RSI システムはヘリコプター機内に搭載するタイプであるため、ヘリコプターの機底に燃料タンクがある場合、燃料タンクの材料および燃料による γ 線の遮へい効果を考慮する必要がある。そこで、 γ 線の測定値への誤差の混入を避けるため、ヘリコプター機体は機底に燃料タンクのないものに限定了。使用できる機種のを Fig. 2-3 に示す。2021 年度は機体操りの都合から Bell412 (JA6928) を使用した。Fig. 2-4 に使用したヘリコプター機体を示す。



Bell430
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



Bell412
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



AS332
アエロスパシアル社製



S-76
シコルスキー・エアクラフト社製

Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧



Fig. 2-4 大飯・高浜周辺の航空機モニタリングに使用した機体 (Bell412 (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 Tl-208 の 2,614 keV のピークに対するエネルギー分解能 (Energy Resolution) と信号増幅回路 (Amplifier: アンプ) の振幅利得 (Gain: ゲイン) をチェック)

2,614 keV のピークに対するエネルギー分解能については、メーカーから 6 %以下という保守の推奨値が示されている。日常の点検で常に数値を確認し、この推奨値を超えた場合には高圧電源の電圧を変更するなど再調整を実施する。また、アンプのゲインについても同様にメーカーから示されている推奨値である 0.8 を下回る場合に再調整を行うこととしている。本報告におけるエネルギー分解能とアンプのゲインの推移について Fig. 2-5 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。大飯・高浜のモニタリング期間を通じて、エネルギー分解能は安定しており、RSI 3-4 のゲインが他の NaI(Tl)結晶と比べてやや高い傾向にあったものの安定はしており、双方とも再調整を行う必要性は生じなかった。今までの経験から気温が低下した場合にゲインが若干上昇する傾向にあることが分かっている。これは周囲の気温が低下するにつれて RSI システム自体の温度上昇も鈍くなることで、光電子増倍管に使用される電子素子のインピーダンスが減少しゲインが上昇するという、温度特性が反映されていると考えられる。このことから、気温の低い時期のモニタリングの際には注意が必要であり、ヘリコプター機内はなるべく気温が下がらないように対策を講じることが望ましい。RSI システムには一定期間ごとに自動でゲインを補正する機能があり、この温度特性はある程度までは補正可能である。

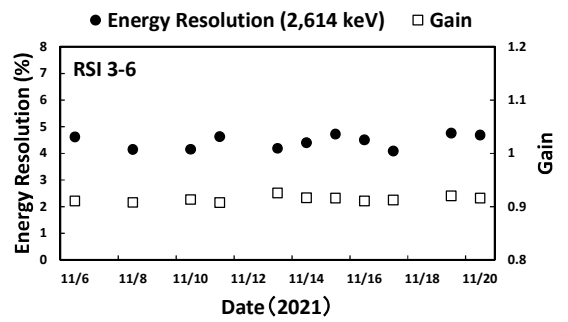
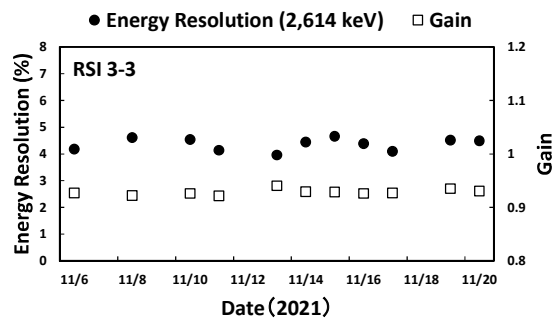
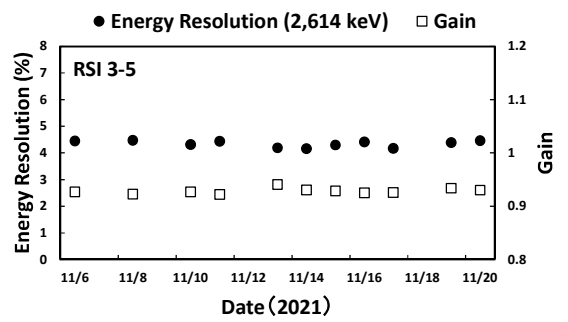
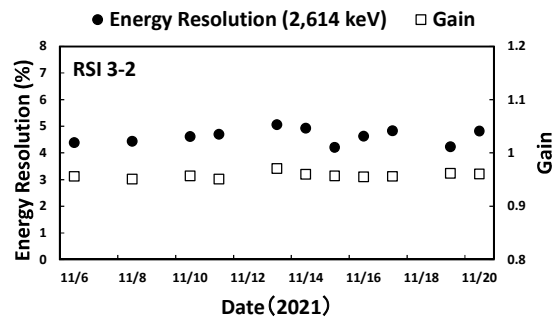
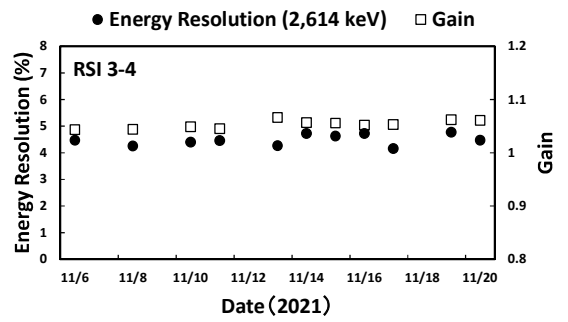
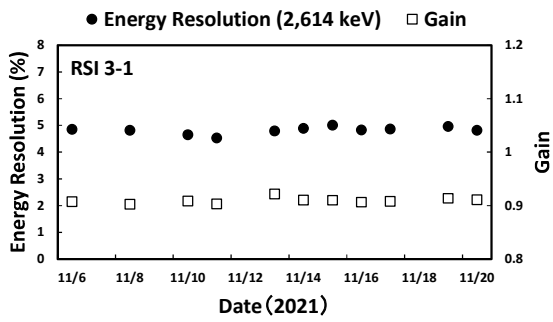


Fig. 2-5 システムのエネルギー分解能および Gain の推移

3. データ取得および解析方法

3.1. 航空機モニタリングの方法

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

3.1.1. データ取得方法

航空機モニタリングによる測定データは下記のようなフライト条件で取得した。なお、これらの条件は気象状況や地形の高度勾配によって若干変化する。測定データは1秒ごとにGPSによる位置情報と検出器の γ 線の計数率を記録し、下記の許容範囲から逸脱した測定データは不確かさが比較的大きく含まれるため、空間線量率等の算出には用いないこととした。Fig. 3-1に大飯・高浜における予定測線を黒実線で示す。本測線は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と同一である。航空機モニタリング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または但馬飛行場を利用した。なお、航空機モニタリングによる測定は以下のような仮定に基づいている。Fig. 3-2に航空機モニタリングデータ取得のイメージを示し、Fig. 3-3に航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージについて示す。また、航空機モニタリングにより評価する空間線量率の妥当性を検証するため、Fig. 3-1に示した測線の近傍 (黄色丸点) の20地点において、NaI(Tl)検出器 (日立製作所製 TCS-172B) を用いて、地表面から1 mの高さの空間線量率の測定 (以下、地上測定) を行った。地上測定地点には周囲に建物等の遮へい物がなく、地形的に平坦な場所を選定した。

[フライト条件]

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

[航空機モニタリングにおける仮定]

- 航空機モニタリングで計測される計数率は、上空を頂点とし対地高度を高さとした円錐の底面部分に該当する地表面範囲における平均値とする。
- 測定対象となる地表面は、平坦かつ放射線の分布は一様とする。

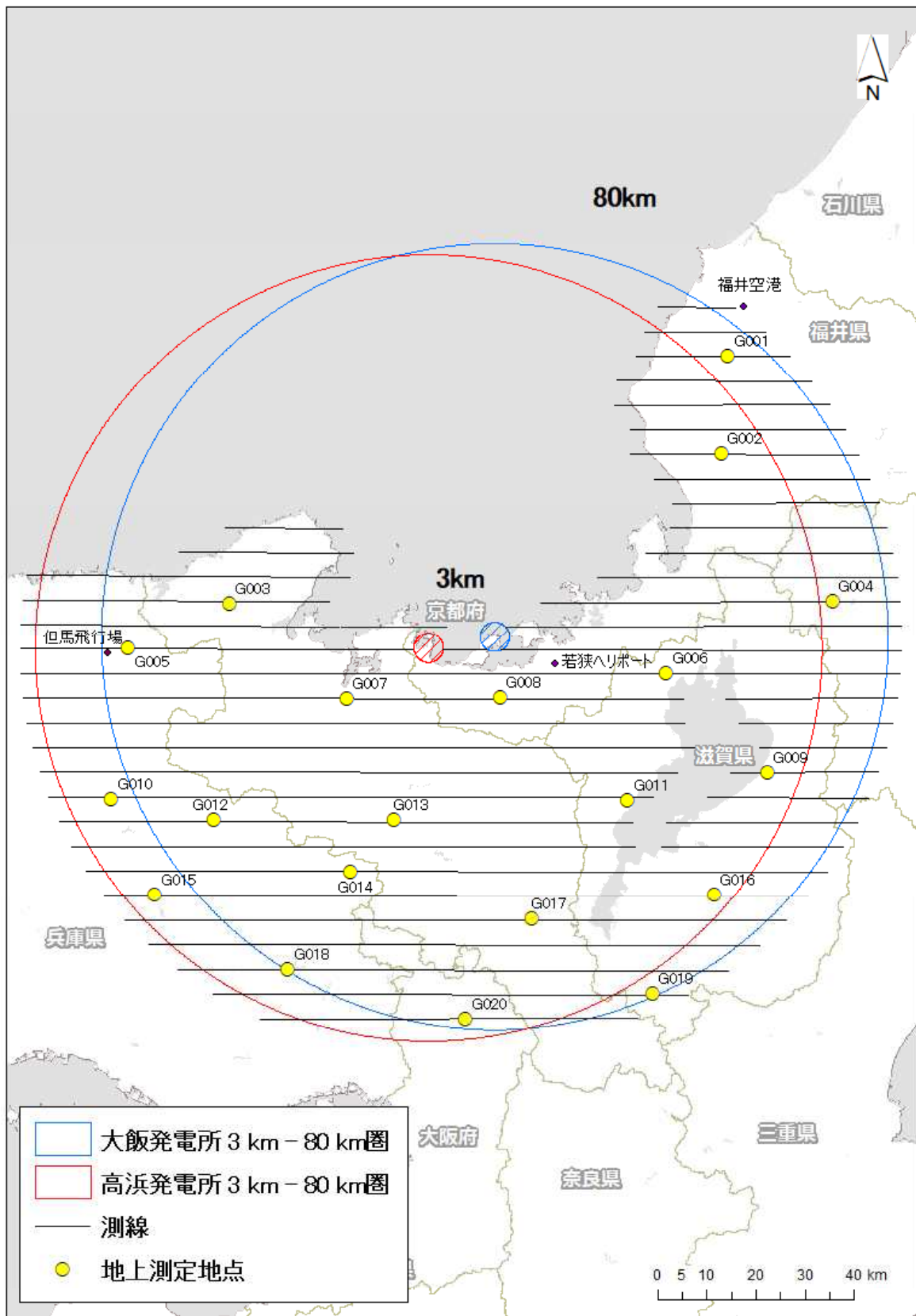


Fig. 3-1 予定したフライトの測線
 (背景地図は、ESRI ジャパンデータ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

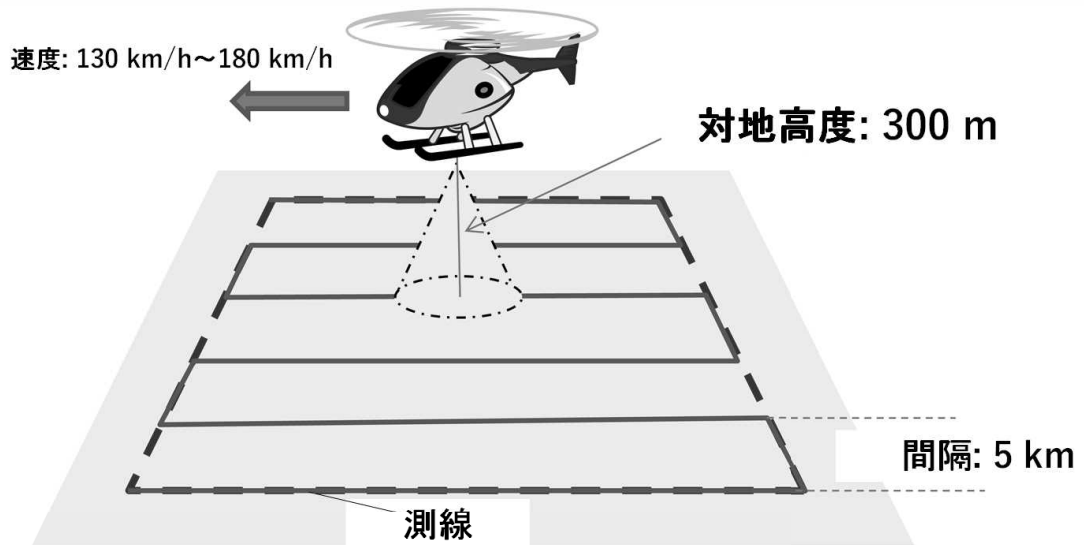


Fig. 3-2 航空機モニタリングデータ取得のイメージ

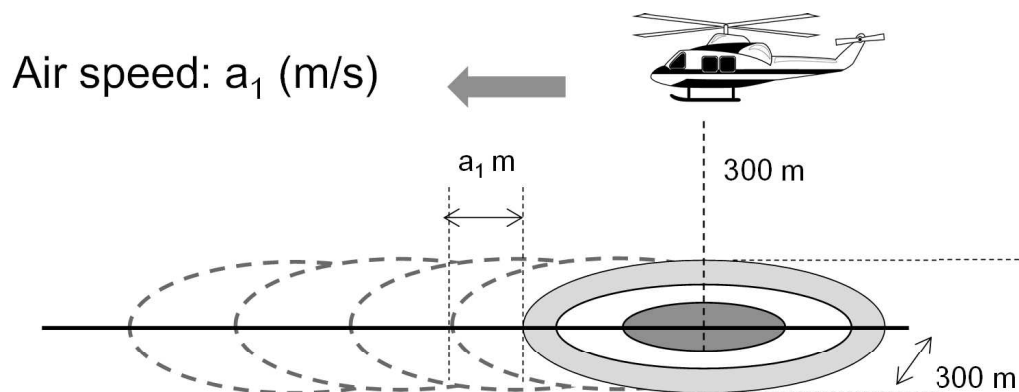


Fig. 3-3 航空機モニタリングにおける測定範囲のイメージ

3.1.2 ヘリコプターによるフライト実績

2.2 節に記述した通り、大飯・高浜の航空機モニタリングでは Bell412 (JA6928) を使用した。フライトに要した期間は以下の通りである。また、ヘリコプターごとにフライトした距離や平均フライト速度、回数等をまとめた表を Table 3-1 に示す。測線上をフライトしたときに取得した GPS データを基に、ヘリコプターの飛行平均速度を算出したところ、前項で示した速度の範囲内であった。また、地上測定に要した期間についても以下に示した通りであり、航空機モニタリングとほとんど同時期に実施した。

[フライトに要した期間]

- 航空機モニタリング : 2021年11月6日～11月20日 (延べ18フライト)
- 地上測定 : 2021年11月9日～11月13日

Table 3-1 ヘリコプターのフライト距離および速度とフライト回数

モニタリング名	Bell412(JA6928)					
	測線フライト距離 (km)	総飛行距離※ (km)	平均速度 (km/h)	測定開始	測定終了	延べ フライト回数
大飯・高浜モニタリング	3,228	6,374	134	2021年11月6日	2021年11月20日	18

※測線フライト以外の、空輸やキャリブレーションフライト等による飛行距離も含む。

3.2. キャリブレーションフライト方法

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

・テストラインフライト

実際のフライト対地高度と基準対地高度とのずれによって生じる γ 線計数率の多寡を補正するための実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor: $AF (m^{-1})$) を求めるフライトである。本フライトは、線量や地形の変化が少ない地点において距離が約3 kmのラインを設定し、その上空において対地高度を変化(300 m、450 m、600 m、750 m、900 mおよび1,500 m)させてフライトを実施する。上記の各対地高度でフライトした際の対地高度の平均値と γ 線計数率の平均値をプロットし、それらプロットに対する指数近似曲線の傾きを AF とする。テストラインフライトのイメージをFig. 3-4に示す。本報告において、テストラインフライトの実施場所は福井県敦賀市周辺とした。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. 3-5に直線で示す。

・テストポイントフライト

空間線量率の勾配が小さく、かつ地形の平坦な地点(テストポイント)を選定し、テストポイントから半径1,000 mの範囲内において、対地高度300 mを維持して3分間ホバリングして γ 線計数率を取得するものである。また、テストポイントでは半径500 mの範囲内で30地点を目安にNaI(Tl)検出器を用いて地上測定を行う。本フライトとテストポイントにおける地上測定値を相互比較することにより、基準対地高度(300 m)における γ 線計数率を地表面から1 mの高さの空間線量率に換算するための係数 (Conversion factor of Dose-rate: $CD ([s^{-1}]/[\mu Sv/h])$) が求まる。本報告において、テストポイントフライトの実施場所はテストラインフライトと同様とした。テストポイントとして選定した具体的な場所をFig. 3-5に半径500 mの円で示す。テストポイントフライトのイメージをFig. 3-6に示す。

・宇宙線フライト

宇宙線の影響を差し引くため、地上からの γ 線の影響が極めて少ないと考えられる海上を約300 m~2,400 mまで上昇し、宇宙線に起因する γ 線計数率データを取得するものである。宇宙線フライトのイメージをFig. 3-7に示す。フライト場所は、陸地から十分に離れた海上であれば場所は問わないので、天候等を見ながら海上の適当な位置で実施する。本報告において、宇宙線フライトは若狭湾周辺で実施した。

- ・ 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地上における対地高度（または海上における海拔高度）約 900 m に保ち、約 3 分間のフライトを継続し、ヘリコプター機体およびその周辺の空気中に存在する放射性核種由来の γ 線計数率を取得する。空気中核種フライトのイメージを Fig. 3-8 に示す。本報告において、空気中核種フライトは若狭湾周辺の海上で実施した。

Table 3-2 キャリブレーションフライトの一覧

名称	目的	方法	頻度
テストライン フライト	空気減弱係数を算出	テストライン上で対地高度を変化 (300 m、450 m、600 m、750 m、900 m、および1,500 m) させてフライト	測定期間中に少なくとも2回
テストポイント フライト	空間線量率換算係数を算出	テストポイント範囲内で、対地高度 300 m で3分間ホバリング	測定期間中に少なくとも2回
宇宙線 フライト	宇宙線の影響を調査	海上を海拔高度 300 m ~2,400 m まで上昇	測定期間中に少なくとも2回
空気中核種 フライト	ヘリコプター機体およびその周辺の空気中に存在する放射性核種の影響を調査	対地高度 (または海拔高度) 900 m を3分間フライト	毎日

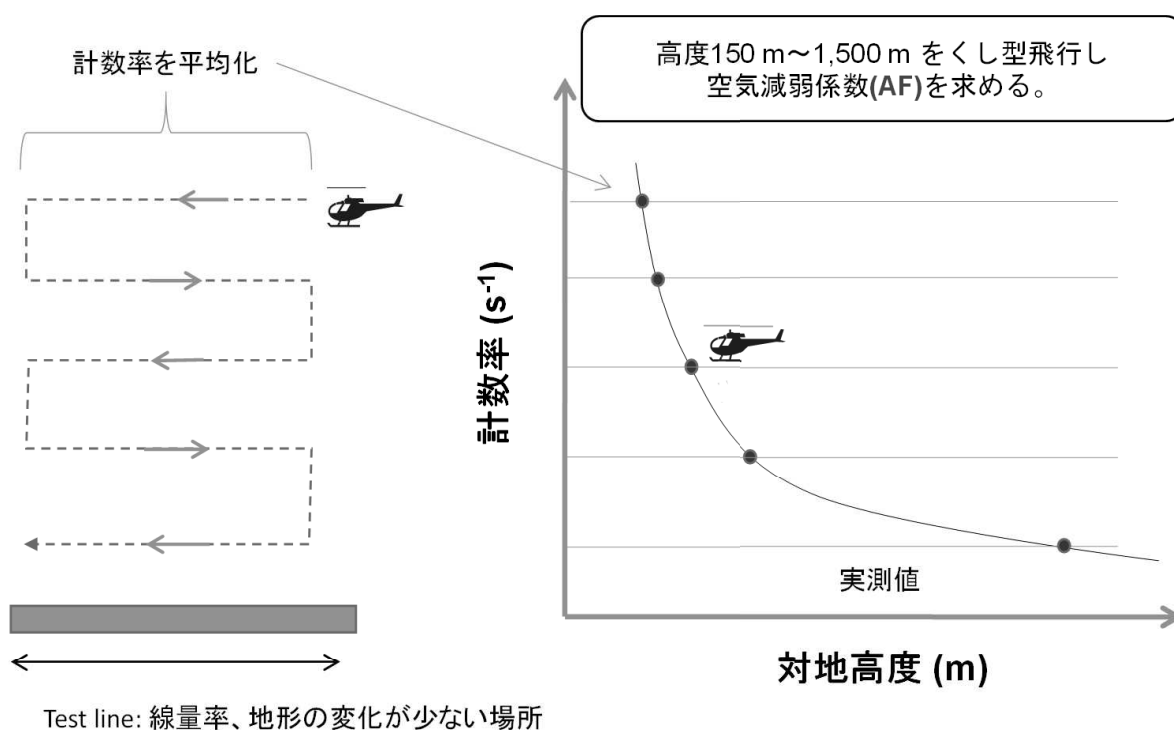
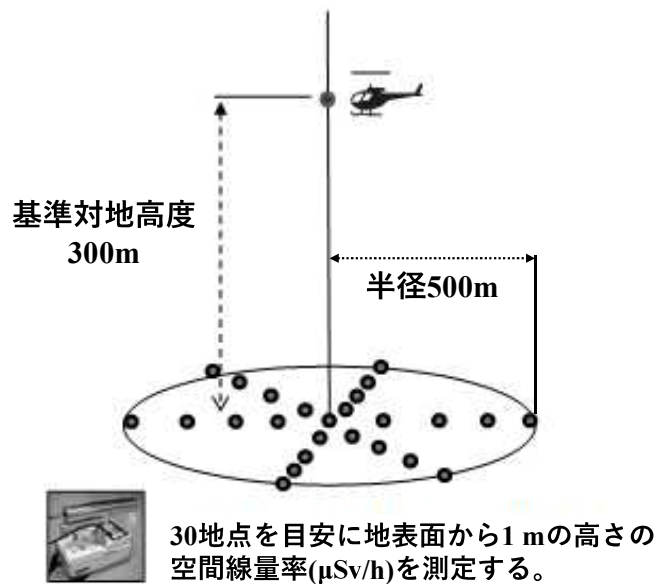


Fig. 3-4 テストラインフライトのイメージ



Fig. 3-5 テストラインおよびテストポイントの場所 (福井県敦賀市内)
 (背景地図は、ESRI, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community を使用。)



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

Fig. 3-6 テストポイントフライトのイメージ

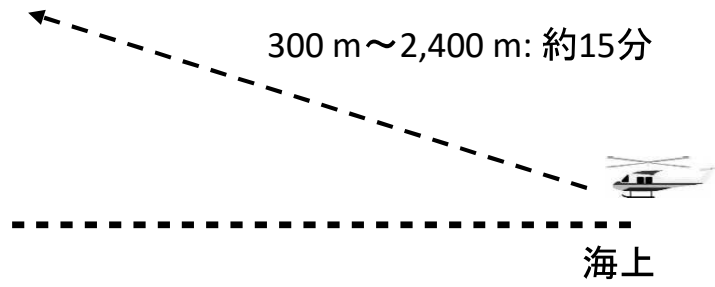


Fig. 3-7 宇宙線フライトのイメージ

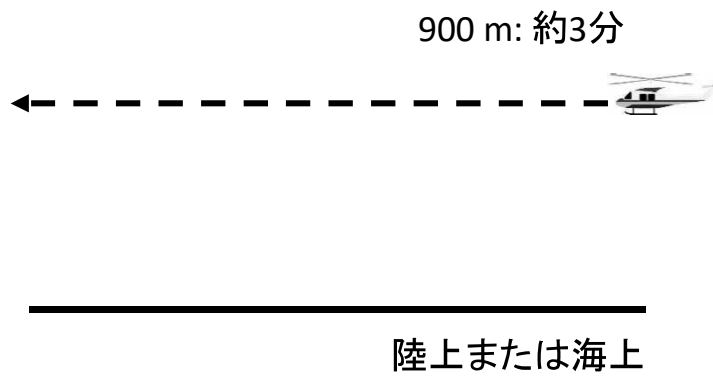


Fig. 3-8 空気中核種フライトのイメージ

3.3. 解析のフロー

本測定法により、計数される γ 線は主に以下の 4 種類に分けられる。

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

本報告で測定した大飯・高浜においては④の影響は非常に小さく無視できるため、①を評価するためには、②および③起源の計数率を全計数率から減算する必要がある。これらを考慮した解析のフローを Fig. 3-9 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。

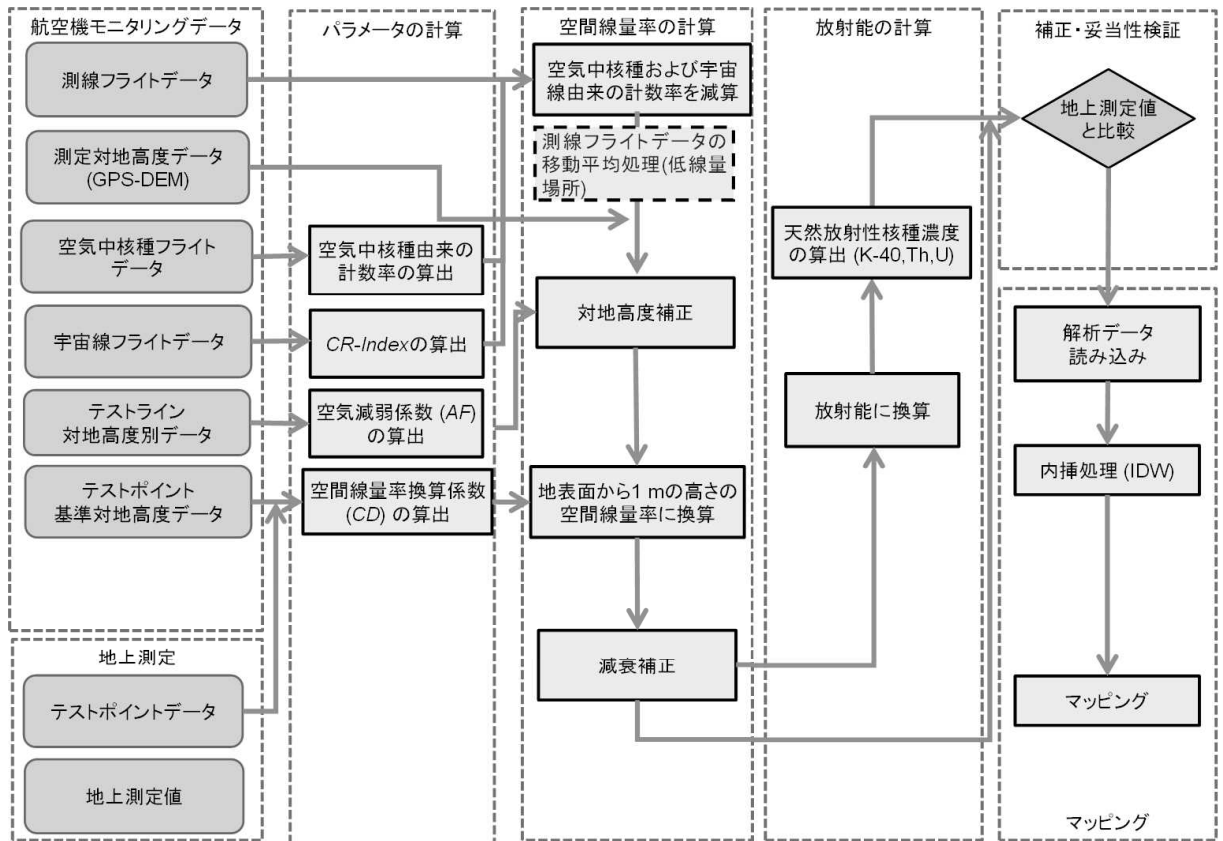


Fig. 3-9 解析のフロー

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 γ 線計数率

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全計数率から減算する必要がある。本項では、これらの減算方法について示す。

空気中核種由来のからの γ 線計数率については、空気中核種フライト（地上からの放射線がほとんど届かないと考えられる対地高度（または海拔高度）900 m 以上で取得したデータを用いる。空気中核種フライトによって陸上および海上で取得したスペクトルの例を Fig. 3-10 に示す。このように、空気中核種フライトで得られるスペクトルには陸地と海上とで顕著な差異はなく、対地高度を十分に取れば陸地で得られたデータでも空気中核種からの γ 線計数率の減算に用いることが可能である。本報告においては、若狭湾周辺で空気中核種フライトのデータを取得した。空気中核種フライトで取得した計数率の算術平均値を Table 3-3 に示す。なお、空気中核種フライトのデータを用いることなく、空気中ラドン子孫核種による計数率を減算する手法（ラドン弁別手法）については 3.8 節に詳述する。

これまでの経験⁵⁾⁻¹⁷⁾から海拔高度が上昇すると宇宙線起因の計数率が上昇することが分かっている。宇宙線起因の γ 線は RSI システムが測定している全エネルギー範囲（30 keV～3,000 keV）で計数されており、Tl-208 が放出する 2,614 keV の γ 線およびその散乱線の影響により、2,614 keV 以下の計数から宇宙線による計数を弁別することは難しい。そこで、宇宙線だけを計数していると考えられる 2,800 keV 以上の計数に着目した。Fig. 3-11 に海拔高度と宇宙線の計数率の関係例を示す。この例は、沖縄と北海道での海上において、海拔高度 50 m～2,000 m で取得したデータのうち、2,800 keV 以上の γ 線の計数率をプロットしたものである。なお、RSI システムにおいて、3,000 keV 以上の計数は最終チャンネル（1,023 ch）に積算される。このように、海拔高度と 2,800 keV 以上の γ 線の計数率は正の相関にあり、計測する場所に影響されない。また、2,800 keV を超える γ 線の計数率と 2,800 keV 以下の γ 線の計数率の比（*CR-index*）は、高度に依存せず一定の数値を示す。*CR-index* は機体と検出器の組み合わせごとに設定し、測定データにおける 2,800 keV 以上の γ 線計数率に *CR-index* を乗じることで全エネルギーにおける宇宙線起因の計数率を推定し、全計数率から差し引いた。実測したデータを基に算出した *CR-index* について Table 3-3 に示す。

これらのパラメータを実際の解析に使用し、空気中核種および宇宙線由来の計数率の減算を行った。具体的な減算方法は 3.4.4 項に示す。

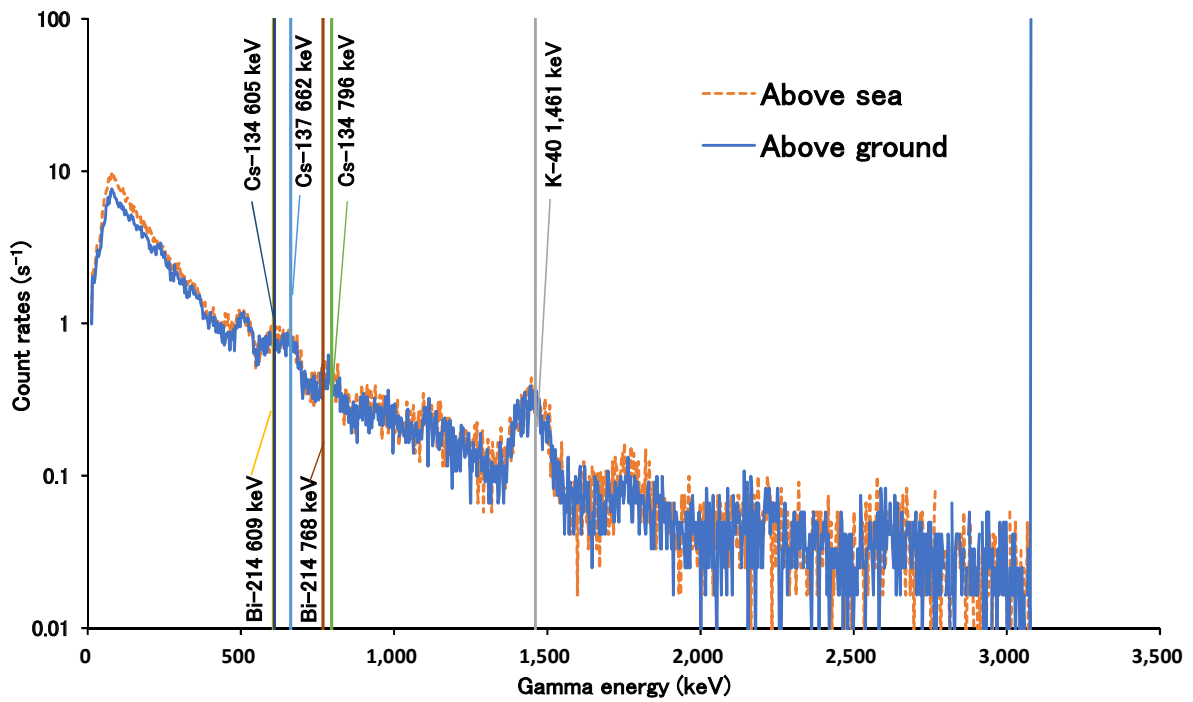


Fig. 3-10 空气中核種フライトで取得した陸上と海上での γ 線スペクトル例

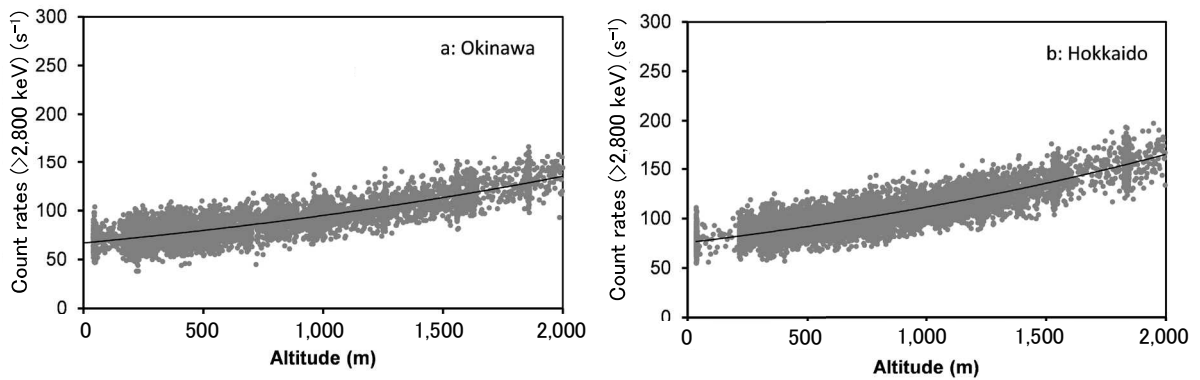


Fig. 3-11 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例

(a: 沖縄海域, b: 北海道海域)

(図中の曲線は、測定データの指数関数による近似曲線である。)

Table 3-3 RSI システムと機体組み合わせと空气中核種由来の計数率平均値および CR-index

測定エリア	年度	RSIシステム	ヘリコプター 機種(機体番号)	運航会社	空气中核種由来の 計数率平均値(s^{-1})	CR-index
大飯・高浜	2021	RSI 3	Bell412 (JA6928)	朝日航洋 株式会社	517	2.74

3.4.2 対地高度補正係数 HF の算出方法

各測定点における対地高度と基準対地高度とのずれによって生じる γ 線計数率の多寡を補正するために、テストラインで取得したデータを基に、実効的な空気減弱係数 AF を求め、計算式 [1] から対地高度補正係数 HF を算出した。

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

ここで、

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

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

H_{std} : 基準対地高度 (300 m)

H_a : 対地高度 (GPS 高度 - DEM - ジオイド高)

である。

対地高度の算出には、GPS で記録した楕円対地高度から、10 m メッシュの数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM)²⁹⁾およびジオイド高²⁹⁾を差し引いて求めた*¹。テストラインフライトで取得した対地高度および計数率データの平均値を Microsoft Excel® 上で散布図としてプロットし、指数関数近似して得られた傾きを AF とした。なお、Microsoft Excel® による指数近似は非線形回帰でなく、目的関数の両辺を対数変換して線形回帰した結果であることに留意する必要がある。実際に使用した換算パラメータについては、4.1 節に詳述する。

3.4.3 空間線量率への換算係数 CD の算出方法

航空機モニタリングによる γ 線計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するための換算係数 CD ($[\text{s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$) は、テストポイントにおける地上測定値の平均値とテストポイントの対地高度 300 m を 3 分間ホバリングして得られた計数率の平均値との比から求めた。地上測定値として、3 分間のホバリング中の緯度および経度の平均値を求め、その地点から半径 500 m 円内における平均値を用いた。テストポイントにおける地上測定値および算出した CD については 4.1 節に詳述する。

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

3.4.4 空間線量率への換算方法

上記したパラメータを用いて空間線量率に換算する方法について以下に示す。また、計算式を式 [2] 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})
- ② 式 [2] で用いられる、 C_{net} を算出するために、 C_{cos} に *CR-index* を乗じて全エネルギー領域に対する宇宙線起源の計数率 (BG_{cos}) を推定する。
- ③ 空气中核種フライトで取得したデータを空气中核種起源の計数率 (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正味の計数率 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。

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

ここで、

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

C_{net} : 正味の計数率 (s^{-1}) ($= C_{\text{all}} - BG_{\text{cos}} - BG_{\text{air}}$ (ただし、 $BG_{\text{cos}} = C_{\text{cos}} \text{CR-index}$))

HF : 対地高度補正係数 (m^{-1})

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

である。式 [1] を式 [2] に代入すると式 [3] が得られる。

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

定義した各記号の凡例を改めて以下に示す。

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

AF : 空気減弱係数 (m^{-1})

H_{std} : 基準対地高度 (300 m)

H_{m} : 測定対地高度 (m)

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

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

3.5. 検出下限値

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⁾⁻¹⁷⁾を見ると $200 \text{ s}^{-1} \sim 500 \text{ s}^{-1}$ の範囲となり、 BG_{air} は約 400 s^{-1} であることから、ここでは、標準的な検出下限値を求めることを目的とし、 $BG_{air} + BG_{cos} = 900 \text{ s}^{-1}$ 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³⁰⁾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 s^{-1} とすると、 N_D は 142 s^{-1} となる。これに、RSI システムの標準的な CD ($13,000 \text{ [s}^{-1}\text{]}/[\mu\text{Sv/h}]$) から RSI システムによる空間線量率を計算すると、 $0.011 \mu\text{Sv/h}$ となった。

3.6. 不確かさ

航空機モニタリングの手法において、不確かさの要因としては、式 [1] から、以下の事項が挙げられる。

- 検出器の計数誤差：一般的に、計数率に対して統計的な誤差が生じる。
- CD の選択：キャリブレーションのためのデータ取得には、測定条件により 20 % 程度の誤差が生じる。本測定の経験を重ねてきた現在では、その不確かさは小さくなってきている。
- 高度補正係数の選択： CD と同様に、キャリブレーションのためのデータ取得の状況により係数の選択時の不確かさが生じる。
- 高度情報に係る誤差：航空機モニタリングにおいて海拔高度は GPS で測位しているが、衛星の位置等の測位状況によっては、海拔高度に最大 30 m 程度の誤差が生じる。本誤差を低減する手法について検討できておらず、今後の課題である。

3.7. マッピング

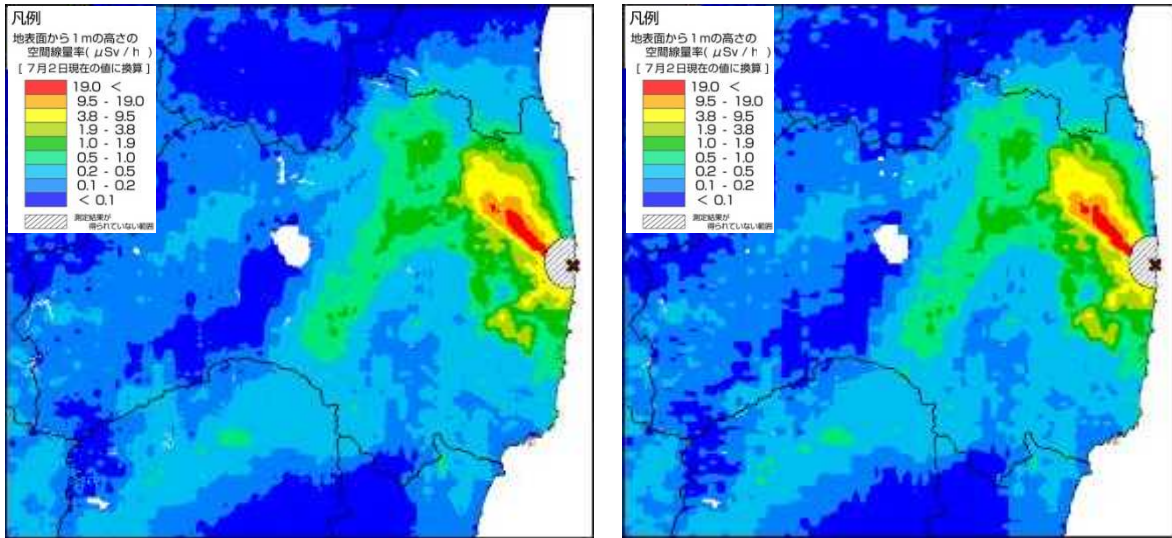
空間線量率や放射性物質のマッピングについては、国際原子力機関 (IAEA) から標準的な方法が示されている³¹⁾。補間方法には、IDW (Inverse Distance Weighted: 逆距離加重法)、クリギング (Kriging)、スプライン (Spline)、Natural Neighbor 等の多くの方法が存在する。福島原子力発電所周辺の航空機モニタリングでは、2011 年 4 月 6 日～29 日にかけて実施された第 1 次の解析を担当した DOE が用いた IDW を踏襲している。IDW とはある補間地点の

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³²⁾。

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

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. 3-12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. 3-12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。空間線量率等のマッピングにおいては、地域基準メッシュ(1 km)をベースとしつつ、上記の測定範囲を考慮して250 mにメッシュサイズを決定した。



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

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

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

Fig. 3-12 IDWに入力するパラメータとマップの関係
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

3.8. 空気中のラドン子孫核種の弁別手法

3.8.1. ラドン子孫核種

地殻中に存在するウランやトリウムの変遷系列には、気体であるラドンが存在し、ラドンの一部は大気中に散逸する。Fig. 3-13 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 などのラドン子孫核種に変遷し、大気中の微粒子に吸着して大気中を浮遊する。航空機モニタリングにおける基準測定高度である対地高度約 300 m 付近におけるラドン子孫核種濃度の測定例はほとんど無いものの、地上におけるラドン濃度は広く測定されており、日本の屋外における濃度レベルは 6 Bq/m³ 程度となっている³³⁾。このラドンの濃度レベルは比較的低いものの、航空機モニタリングにおいてはヘリコプターの周辺に存在するような場合、測定される計数率に一定の影響があると考えられる。また、日単位や季節単位で空気中におけるラドン子孫核種濃度が変動することが知られており、航空機モニタリングの測定データに及ぼす影響も常に一定とは限らないと推察される³⁴⁾。これまでの航空機モニタリングの経験においても、ラドン子孫核種の影響により、航空機モニタリングによる γ 線計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算した際に過大評価となる例が報告されている⁵⁾⁻⁷⁾。そのため、航空機モニタリングによる空間線量率を適切に算出する観点から、ラドン子孫核種由来の γ 線計数率を適切に除去することが望ましい。

Table 3-4 にラドン子孫核種が放出する γ 線エネルギーについて示す。これらのラドン子孫核種の影響を除去し、航空機モニタリングによる空間線量率の計算を高度化することを目指

した検討を 2015 年度に実施した⁷⁾。2016 年度は、開発した手法を大量のデータに適用できるように既存の航空機モニタリング解析システムに組み込んだ⁸⁾。また、組み込んだ解析プログラムを使用して 2016 年度～2020 年度に実施した原子力施設周辺におけるモニタリングデータを解析し、大気中のラドン子孫核種の影響について考察した^{9),11),13),15),17)}。2021 年度も引き続き各原子力施設周辺の測定データに本手法を適用した。以下、大気中のラドン子孫核種の影響の除去手法を「ラドン弁別手法」と呼称する。

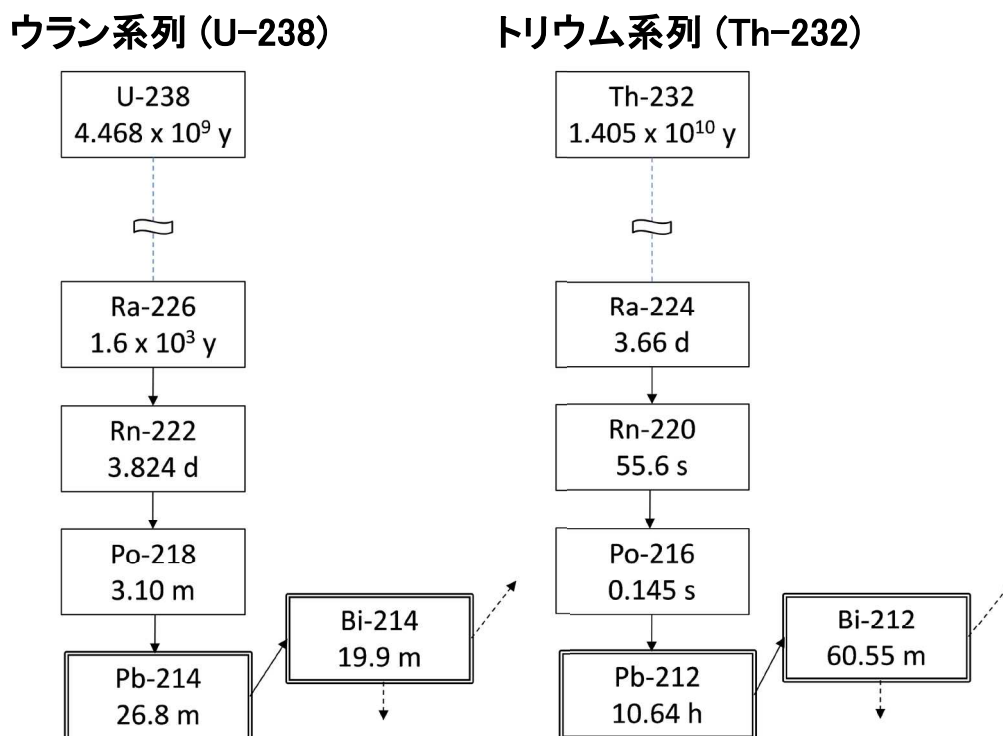


Fig. 3-13 ウラン系列およびトリウム系列

Table 3-4 ラドン子孫核種の放出する γ 線

Nuclide	Series	Gamma energy (keV)	Blanching ratio (%)	Note
Pb-212	Th	239	43.3	
Pb-214	U	352	37.6	
Tl-208	Th	583	84.5	Cs-134: 569 keV (15.4 %)
Bi-214	U	609	46.1	Cs-134: 605 keV (97.6 %)
Bi-214	U	768	4.94	Cs-134: 796 keV (85.5 %)
Bi-214	U	1,120	15.1	
Bi-214	U	1,765	15.4	
Tl-208	Th	2,615	99.2	

3.8.2. ラドン弁別手法の理論

前述したように、ラドン子孫核種は大気中だけでなく地表面および地殻にも存在し、その γ 線エネルギー領域が広範である。よって、航空機モニタリングで取得される全計数率から、ラドン子孫核種に起因する γ 線計数率のみをスペクトル分析によって弁別することは一般に難しい。航空機モニタリングにおいて空气中ラドン子孫核種に起因する γ 線計数率を推定する方法として、全計数率を取得する検出器に加え、空气中のラドン子孫核種から放出される γ 線を測定するための検出器を使用し、両者の計数率とそれらを基にして算出される換算パラメータを用いる方法の例が示されている³¹⁾。原子力機構では当該手法を参考にして、空气中のラドン子孫核種に起因する γ 線を測定する検出器に LaBr_3 検出器を採用してラドン弁別手法を実施するための測定体系の構築を行い、 NaI(Tl) 検出器と LaBr_3 検出器の γ 線計数率を基にした換算パラメータの設定方法について検討と改良を重ねてきた。本項では、ラドン弁別手法の概略を示す。

LaBr_3 検出器をヘリコプター内に搭載した状況を Fig. 3-14 に示す。本図のように、地表面の放射性核種から放出される γ 線をなるべく遮へいし、空气中ラドン子孫核種の γ 線のみを測定できるようにするために、 LaBr_3 検出器は NaI(Tl) 検出器の上方に配置する。ラドン弁別手法では、空气中のラドン子孫核種および地表面の放射性核種とヘリコプター機内に搭載した NaI(Tl) 検出器および LaBr_3 検出器との位置関係によって生じるであろう、両検出器間の計数率の差異に着目する。Fig. 3-15 にヘリコプター機内の検出器と γ 線放出核種の位置関係のイメージを示す。このように、地表面の γ 線放出核種は常にヘリコプターの下方に存在するのに対し、大気中のラドン子孫核種はヘリコプターの周囲に存在する。つまり、地表面の放射性核種から放出される γ 線はヘリコプター下方から飛来することから、 NaI(Tl) 検出器に遮へいされて LaBr_3 検出器では比較的計数されにくい。一方で、空气中のラドン子孫核種由来の γ 線は等方的に飛来することから、 NaI(Tl) 検出器による遮へいの影響を受けにくく、 LaBr_3 検出器の計数率にさほど影響を及ぼさないと考えられる。以上のことから、地表面の放射性核種由来の γ 線に着目した場合における LaBr_3 検出器の計数率に対する NaI(Tl) 検出器の計数率の比(NaI(Tl) 検出器計数率 / LaBr_3 検出器計数率)は、空气中のラドン子孫核種由来の γ 線に着目した場合における NaI(Tl) 検出器計数率 / LaBr_3 検出器計数率よりも大きくなると推察される。このような、 NaI(Tl) 検出器と LaBr_3 検出器における γ 線計数率に見られるであろう差異を利用し、全計数率から空气中ラドン子孫核種由来の γ 線計数率を弁別するための換算パラメータを設定する。以下のように2つの換算パラメータを定義し、ラドン弁別手法のコンセプトを数式化した。

地表面の放射性核種から放出される γ 線による影響が支配的な陸地で取得したデータにおける LaBr_3 検出器の計数率($C_{\text{LaBr,g}}$)に対する NaI(Tl) 検出器の計数率($C_{\text{NaI,g}}$)の比($C_{\text{NaI,g}} / C_{\text{LaBr,g}}$)をグラウンドインデックス(以下、 GI)と定義する。一方、地表面の放射性核種から放出される γ 線による影響がないと考えられる海上で取得したデータにおける LaBr_3 検出器の計数率($C_{\text{LaBr,a}}$)に対する NaI(Tl) 検出器の計数率($C_{\text{NaI,a}}$)の比($C_{\text{NaI,a}} / C_{\text{LaBr,a}}$)をラドンインデックス(以下、 RI)と定義する。これら2つのパラメータを利用して全計数率から

ラドン子孫核種由来の γ 線計数率を弁別する。本手法は NaI(Tl)検出器における全計数率および LaBr₃ 検出器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、 GI および RI は式 [8] および式 [9] で表される。式 [6]~[9] を $C_{\text{NaI,g}}$ について解くと、式 [10] が導かれる。

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

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

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

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

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

ここで、

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

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

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

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

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

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

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

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

である。

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

ては 4.5.1 項に詳述する。

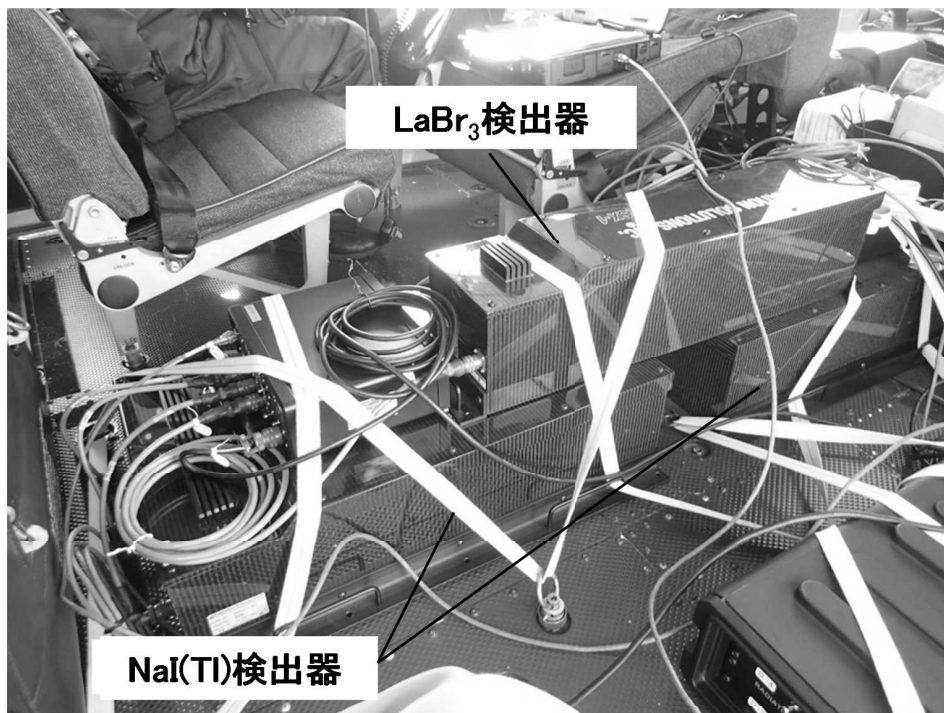


Fig. 3-14 空气中ラドン子孫核種測定用の検出器とヘリコプターへの搭載状況

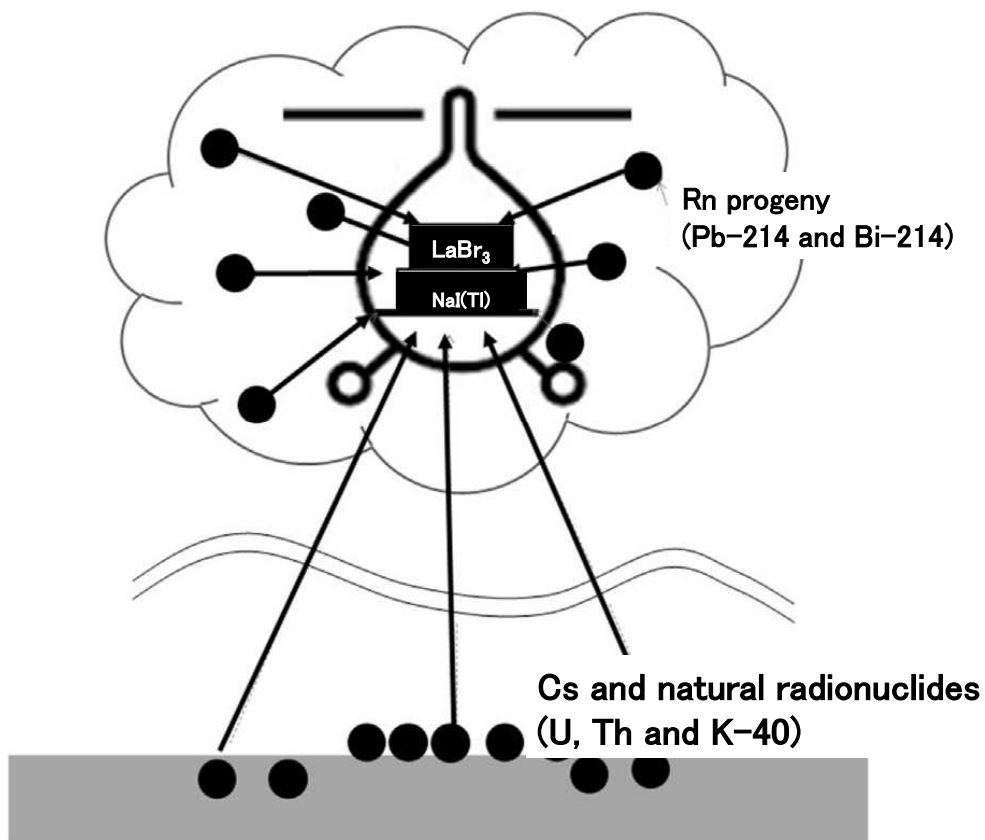


Fig. 3-15 空气中のラドン子孫核種と地表面からの放射線のイメージ

3.8.3. *GI* の高度補正方法

GI については、2015 年度に実施した予備的な調査により、対地高度に依存して数値が変化することが分かっている。しかしながら、実環境中ではラドン子孫核種の寄与がないデータを取得することは不可能である。そこで、2017 年度に計算シミュレーションにより実際の測定体系を模擬し、*GI* の高度補正手法について検討した⁸⁾。以下では、その検討内容について簡単に記述する。

当該シミュレーションに用いた計算コードは、モンテカルロ計算コードの一種である電磁カスケードモンテカルロコード EGS5³⁵⁾ (Electron Gamma Shower Version 5) であり、ヘリコプター内の検出器の体系が簡易的に Fig. 3-16 のように模擬された。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計算値と、実際に有人ヘリコプターに検出器を搭載した状態で、点線源 (Cs-137) を照射することによって求めた検出器のレスポンス計算値の比較結果がベンチマークとなった (Fig. 3-17)。一部値が外れている部分は、計算体系で考慮していない局所的な構造物が影響していると考えられるが、全体として構築した体系は検出器のレスポンスを再現するのに十分な精度を有すると思われる。当該計算体系に対し、地上の無限平板線源を模擬し、距離を変化させることにより *GI* と測定高度 (300 m、450 m および 600 m) との関係が計算により評価された。線源の模擬体系には、以下の条件が設定された。なお、土壌中の天然放射性核種濃度は全国の地上測定結果の平均値³⁶⁾が採用された。

- ・ 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である。
- ・ 地面中の天然放射性核種 (U 系列、Th 系列、K-40) 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 (Cs-134、Cs-137) は表層から深さ方向に指数関数的な分布 (重量緩衝深度 $\beta = 3 \text{ g/cm}^2$) をする。
- ・ 土壌中の天然放射性核種濃度はそれぞれ、K-40 : 500 Bq/kg、U 系列 : 20 Bq/kg、Th 系列 : 10 Bq/kg、Cs-134 : 50 kBq/m²、Cs-137 : 200 kBq/m² である。

検出器と線源の距離 (測定高度) に対する *GI* の計算結果を Fig. 3-18 に示す。このように測定高度と *GI* は正の相関関係にあることが見出された。

本報告において、Fig. 3-18 に示した回帰直線の傾き (0.0333) を *GI* の高度補正係数として採用し、式 [11] に基づいて各測定高度で取得したデータに対して高度補正を施した *GI* を用いた。

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

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_{std} は基準対地高度 (300 m)、*GI* は高度補正前の *GI* である。

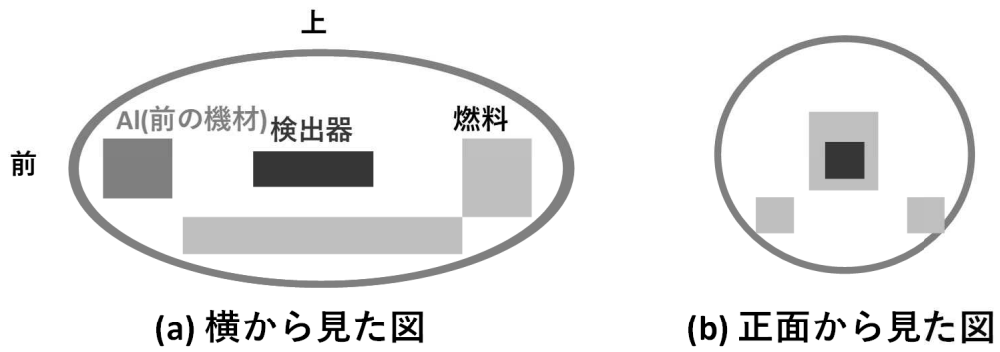


Fig. 3-16 計算体系のイメージ

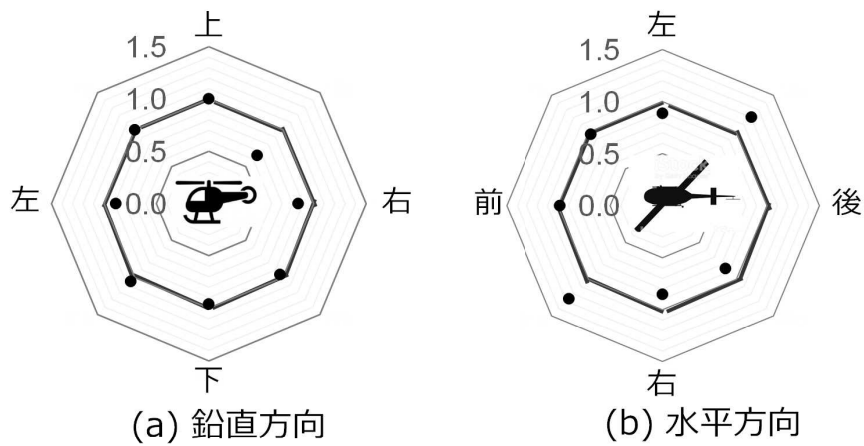


Fig. 3-17 計算体系のベンチマーク
(計算結果と実測結果の比)

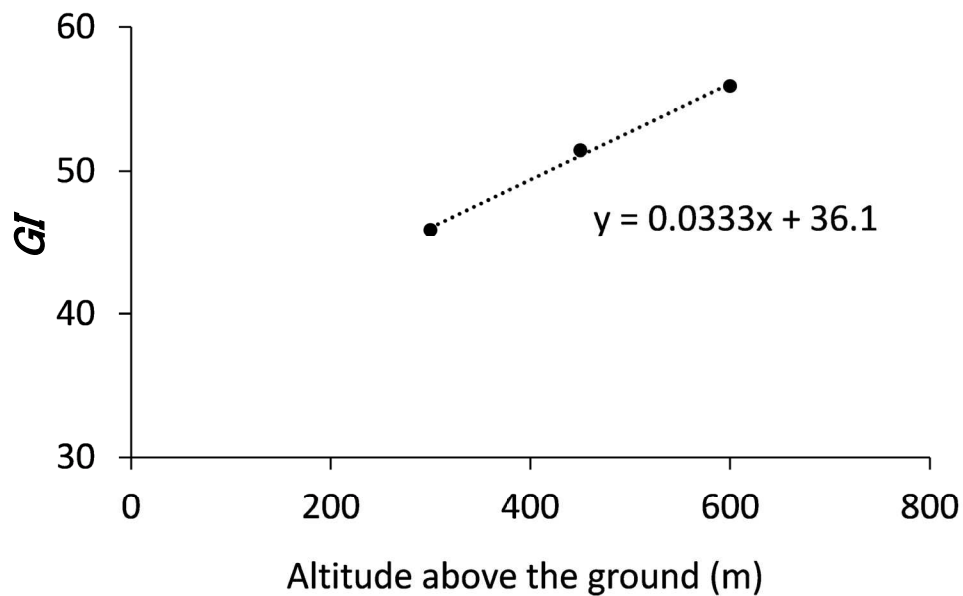


Fig. 3-18 シミュレーションによる測定高度と GI の関係

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、天然放射性核種ごとに定量が可能である。Fig. 3-19 に対地高度 300 m で取得できる典型的な γ 線スペクトル例を示す。このように、散乱線の影響の比較的少ない高エネルギー領域において K-40 (1,461 keV)、U 系列 (Bi-214 : 1,765 keV、2,204 keV) および Th 系列 (Tl-208 : 2,614 keV) が検出される。1,000 keV 以上の比較的高エネルギーの γ 線は低エネルギー側と比較して検出効率が悪いため、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 ($CC [(s^{-1})/(Bq/kg)]$) 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. 3-5 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ゲルマニウム半導体検出器 (以下、可搬型 Ge 検出器) により、地表面から 1 m の高さにおいて 30 分間の測定を行い、K-40、U 系列および Th 系列の濃度を測定し、その平均値を地上測定値 (Bq/kg) として取り扱った。テスト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 (s^{-1}) を取得し、可搬型 Ge 検出器による地上測定値との比を取って CC を求めた。また、式 [1] に示したように高度補正係数の評価に必要な空気減弱係数 (AF) については、EGS5 シミュレーションの結果 ⁷⁾ を利用した。当該計算には、無限平板を模擬した半径 2,000 m の線源が仮定され、その上空 50 m、100 m、150 m、200 m、300 m、400 m および 500 m の計数率が計算された。計算した対地高度と計数率の関係について、上空 50 m で得られた結果を 1 に規格化したものを Fig. 3-20 に示す。このように対地高度と計数率は指数関数の関係となり、指数関数近似して得られた傾きをそれぞれの天然放射性核種に対する AF とした。以上により求めた CC と AF の数値について Table 3-5 に示す。

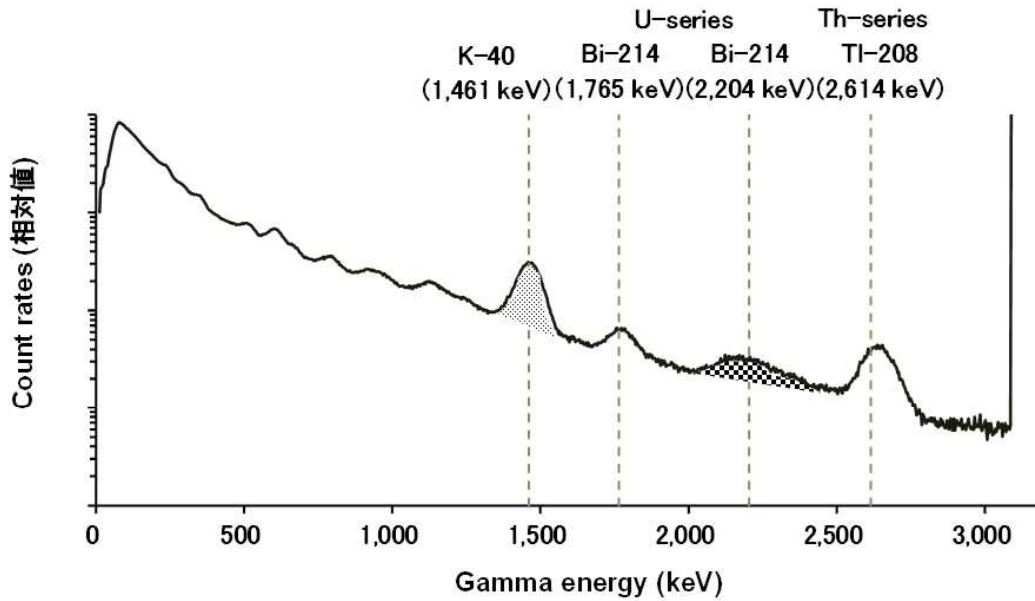


Fig. 3-19 天然放射性核種によるピークの解析例

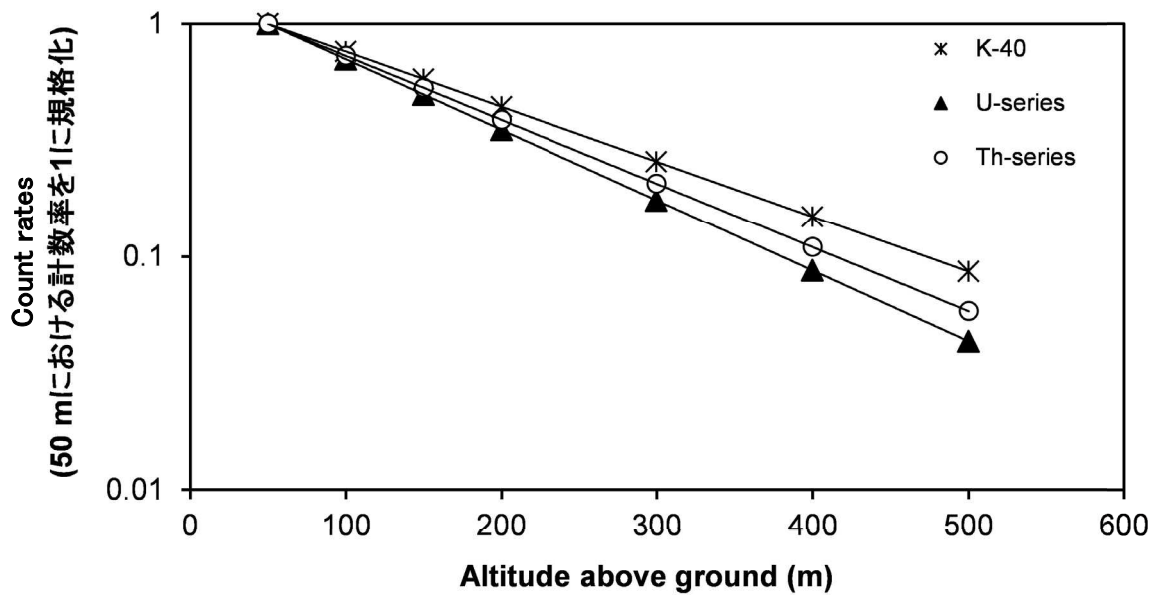


Fig. 3-20 天然放射性核種ごとの対地高度と計数率の関係
(EGS5によるシミュレーション)

Table 3-5 天然放射性核種濃度への換算パラメーター一覧

Measurement area	Parameters	K-40	U-series	Th-series
大飯・高浜	CC (s ⁻¹ /[Bq/kg])	0.018	0.165	0.061
	AF (m ⁻¹)*	-0.0054	-0.0070	-0.0063

*EGS5によるシミュレーション結果より

4. モニタリング結果と考察

4.1. 換算パラメータ

3.4.2 項で示した方法により HF を求めた。Fig. 4-1 に対地高度と計数率の関係を例示する。 HF を求めるために必要な AF は、テストラインフライトで取得したデータを基に求めた (Table 4-1)。また、テストポイントフライトで取得したデータを基に、3.4.3 項で示した方法により CD を求めた (Table 4-2)。また、 CD を算出するために用いたテストポイントにおける地上測定値を Fig. 4-2 に示す。なお、本図に示した空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) は NaI(Tl) 検出器の指示値である。

以上で求めた AF および CD の内、テストラインフライトデータおよびテストポイントフライト中の γ 線計数率および対地高度等の一定性を評価し、最も信頼できるパラメータを 1 組選定した。選定したパラメータを Table 4-3 に示す。 AF については指数関数近似の決定係数が最も良好な 11 月 8 日に取得した数値、 CD については γ 線計数率および対地高度が最も安定して取得できていた 11 月 8 日に取得した数値を採用した。また本表には参考として、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングで使用している換算パラメータを併記した。このように、 AF および CD の値は福島原子力発電所由来の放射性セシウムによる影響を受けた地域において得られたデータを基に決定された数値とやや差異があり、測定対象となる γ 線の平均エネルギーの多寡に多少の影響を受けることが示唆される。

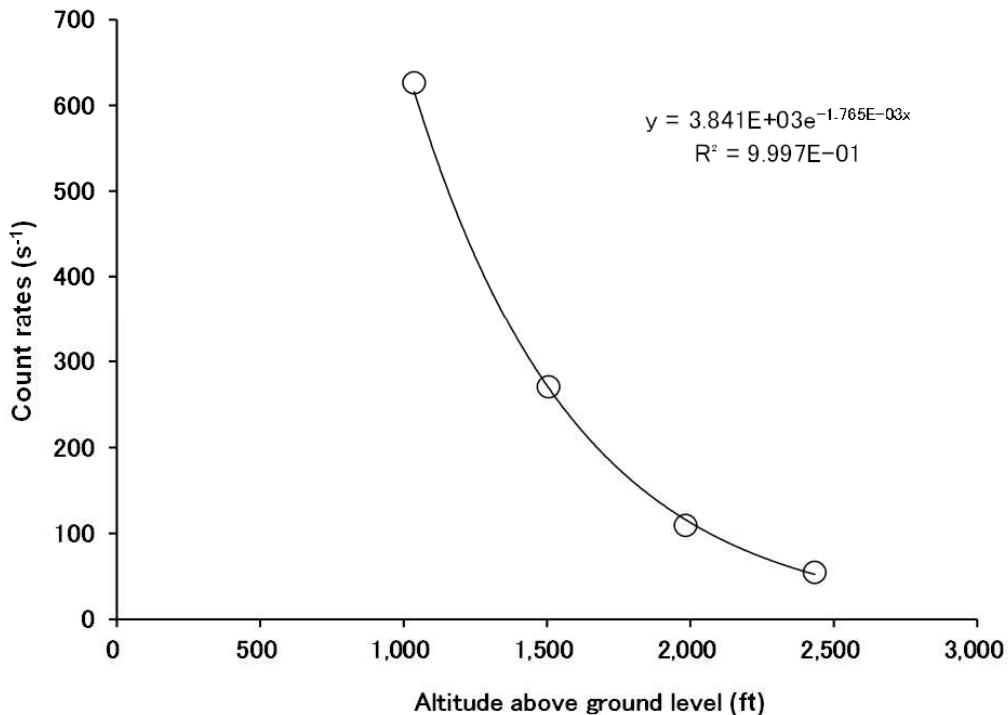


Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例
(Bell412 JA6928、2016年2月2日実施、Test line)

Table 4-1 2021 年度取得した AF データ一覧

Monitoring Area	Helicopter (Body No.)	Operation Company	RSI System	Location	Date	AF	
						$\mu(m^{-1})$	R^2
大飯・高浜	Bell412 (JA6928)	AAC	RSI 3	Tsuruga TestLine	2021/11/08	-0.00499	0.99993
					2021/11/20	-0.00549	0.99735
Average						-0.00524	

※AAC: 朝日航洋株式会社
 ※ R^2 : 指数関数の両辺を対数変換した後に線形回帰して求めた決定係数

Table 4-2 2021 年度取得した CD データ一覧

Monitoring Area	Helicopter (Body No.)	Operation Company	RSI System	Location	Date	Na(I) Ground Survey Data		AMS Data		Flight Data		CD ($s^{-1}/[\mu Sv/h]$)
						Dose rate ($\mu Sv/h$)	SD (2σ)	Count Rates (s^{-1})	SD (2σ)	Altitude Above Ground Level (m)	SD (2σ)	
大飯・高浜	Bell412 (JA6928)	AAC	RSI 3	Tsuruga TestPoint	2021/11/8	0.13	0.03	2,990	287	292	71	17,700
					2021/11/20	0.13	0.03	3,033	490	277	80	15,600
Average						16,700						

※AAC: 朝日航洋株式会社
 SD: 標本標準偏差、RSD: 相対標本標準偏差

Table 4-3 換算パラメータのまとめ
(表中のSDは標本標準偏差(1σ)である。)

Monitoring Area	Parameters	Bell412		Bell430	
		Value	Number of Data	Value	Number of Data
大飯・高浜	AF (m ⁻¹)	-0.00499	/	/	/
	CD (s ⁻¹ /[μSv/h])	17,700			
福島原子力発電所	AF (m ⁻¹)	-0.00720 ± 0.00042	21	-0.00720 ± 0.00040	35
	CD (s ⁻¹ /[μSv/h])	11,000 ± 2,100	42	13,000 ± 2,800	65

4.2. 地上測定値との比較

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

航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値との比較を Fig. 4-4 に示す。それぞれ散布図および相対誤差のヒストグラムで比較した。なお、相対誤差は (航空機モニタリングによる空間線量率 - 地上測定値) / (地上測定値) により算出した。散布図を見ると、航空機モニタリングによる空間線量率が地上測定値のファクター2 に収まっていた割合は 65 % (全 20 点中 13 点) であった。また、相対誤差のヒストグラムを見ると、0 以下 (航空機モニタリングの空間線量率の方が地上測定値よりも小さい) に分布が偏っており、平均値および中央値は-0.302 および-0.392 であったことから、航空機モニタリングによる空間線量率は地上測定値よりも概ね 30 %~40 %程度過小評価したことが伺える。さらに、航空機モニタリングによる空間線量率が地上測定値に対して、絶対値としてどの程度乖離しているのかを知るために、地上測定値に対する航空機モニタリングによる空間線量率の平方根平均二乗誤差 (Root Mean Squared Error : RMSE) を以下の式 [12] に従って算出した。

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

ここで、

$RMSE$: 平方根平均二乗誤差 ($\mu\text{Sv/h}$)

n : データ数

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

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

である。

$RMSE$ は非負であり、0 に近いほど航空機モニタリングによる空間線量率が地上測定値とよく合致することを意味する。2021 年の大飯・高浜の $RMSE$ は約 $0.043 \mu\text{Sv/h}$ となり、バックグラウンド空間線量率を評価したという観点からは、地上測定値との乖離がやや大きいように思われる。

ここで、2016 年に実施した大飯・高浜周辺の航空機モニタリングによる空間線量率および地上測定値との比較結果を Fig. 4-5 に示す。散布図より、ファクター2 に収まった割合は 90 % (全 49 点中 44 点) であり、相対誤差の平均値および中央値ともに 0 に近く、航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値との整合は良好であった。また、 $RMSE$ は約 $0.027 \mu\text{Sv/h}$ となり、異なるデータセット間で一概に比較できるものではないが、2021 年の大飯・高浜周辺における航空機モニタリング結果は 2016 年のものに比べると、やや妥当性に劣るように思われる。原子力施設等周辺におけるバックグラウンド航空機モニタリングを開始した 2016 年から 2020 年までに取得した全データについて同様にまとめた結果を Fig.

4-6に示す。散布図を見ると、93 % (全 429 点中 399 点) がファクター2に収まり、相対誤差は0付近をピークとした正規分布に近い形をしており、その平均値および中央値は0に近く、*RMSE* は 0.025 $\mu\text{Sv/h}$ であった。これらのことから、航空機モニタリングにより評価されるバックグラウンド空間線量率は地上測定値に対して 0.030 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の誤差が生じると見込まれ、*RMSE* がこれを下回るか否かが航空機モニタリングによる空間線量率の計算結果の良し悪しを判断する指標の一つとなろう。

以上のことから、2021年の大飯・高浜周辺における航空機モニタリングで評価したバックグラウンド空間線量率は、少なくとも地上測定を実施した地点周辺において、やや妥当性に乏しいと結論される。ただし、比較対象である地上測定地点が20点と少なく、適切な評価をできているとは言い難いため、地上測定地点はある程度多くとることが望ましい。

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

- ①測定の範囲の違い：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(半径約300 m)に該当する地上の放射線量の平均値となる。一方、地表面から1 mの高さにおける測定範囲は半径30 m程度の円の放射線量の平均値となる。よって、地上の放射線分布が一様な場所では地上測定値と航空機モニタリング測定値は整合しやすいが、地上の空間線量率の分布が均一でない場所では、測定結果が整合しにくいと考えられる。
- ②周辺からの影響：地上の測定場所の近傍に大きな建物や森林等がある場合には、建物や樹木に沈着している放射性核種が地上測定値に影響する可能性がある。また、上空で測定する場合においては、建物や森林等が地表面からの放射線を遮へいするため、単純に比較できない場所がある。なお、本報告において、比較用に取得した地上測定値は比較的地形が平坦な場所が多く、条件がよい場所を選定している。

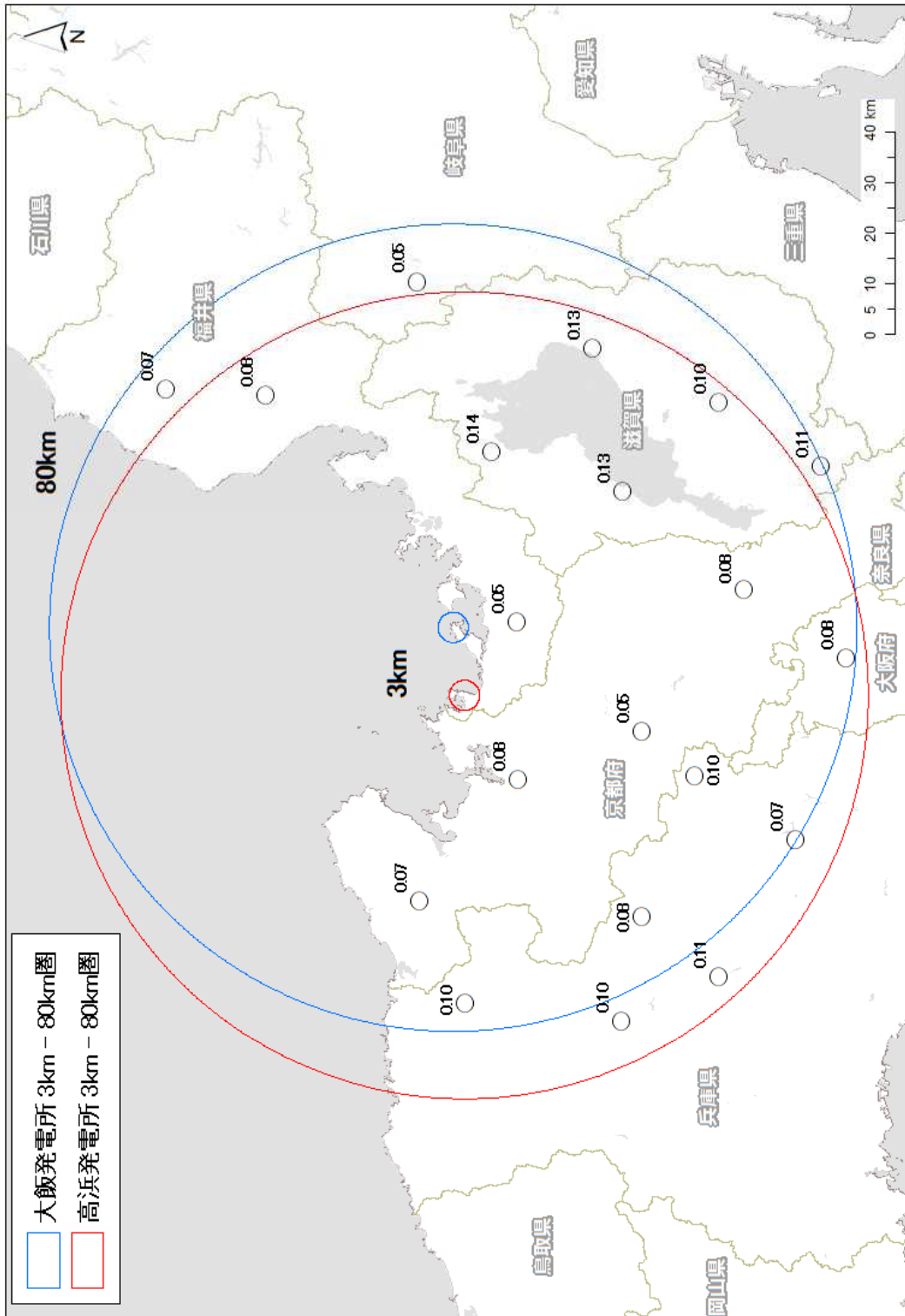


Fig. 4-3 測線近傍における地上測定値 ($\mu\text{Sv/h}$)
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

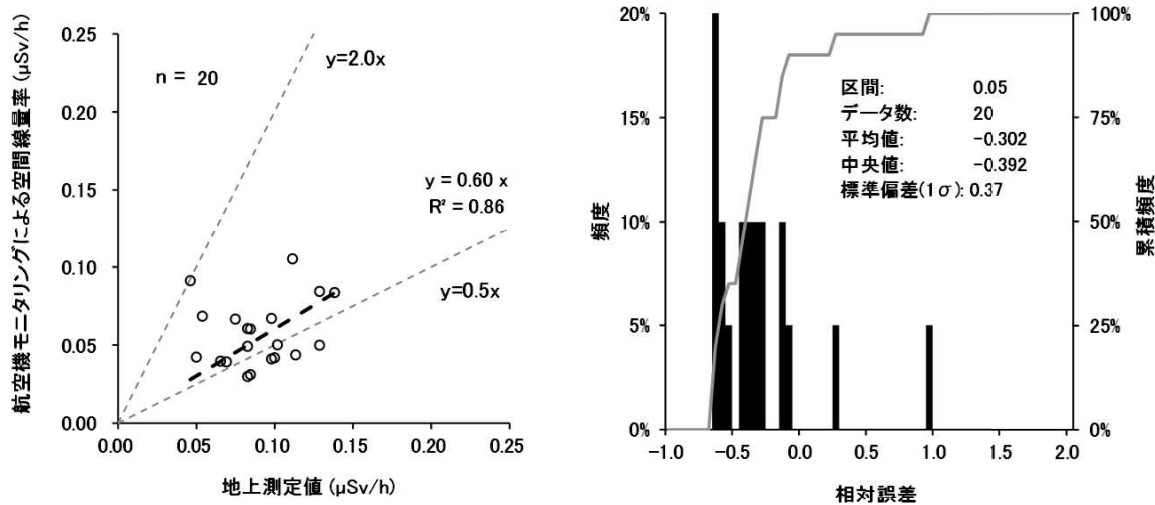


Fig. 4-4 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値との比較 (大飯・高浜 2021)
(左: 散布図、右: 相対誤差の頻度分布)

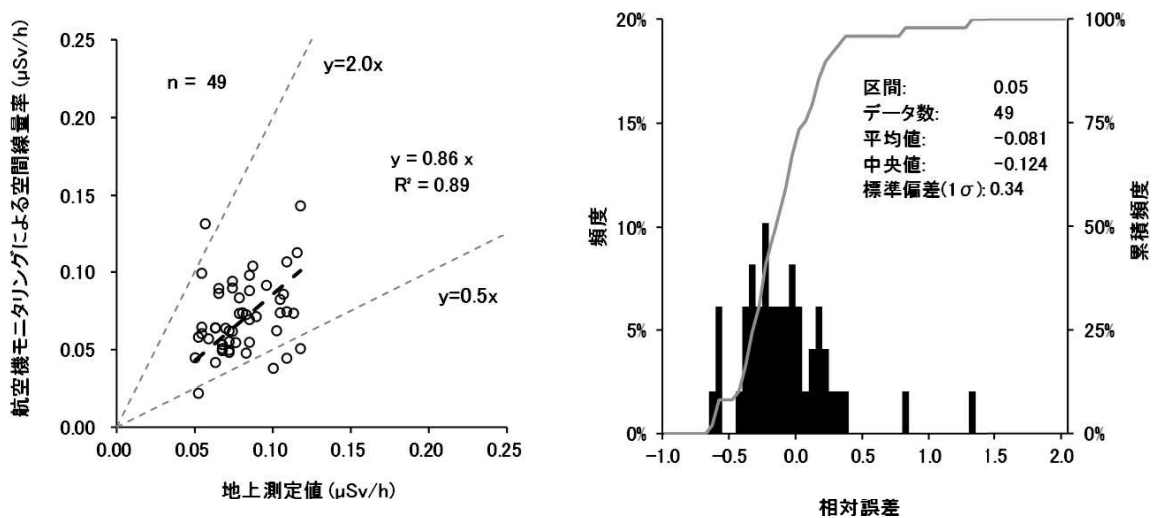


Fig. 4-5 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値との比較 (大飯・高浜 2016)
(左: 散布図、右: 相対誤差の頻度分布)

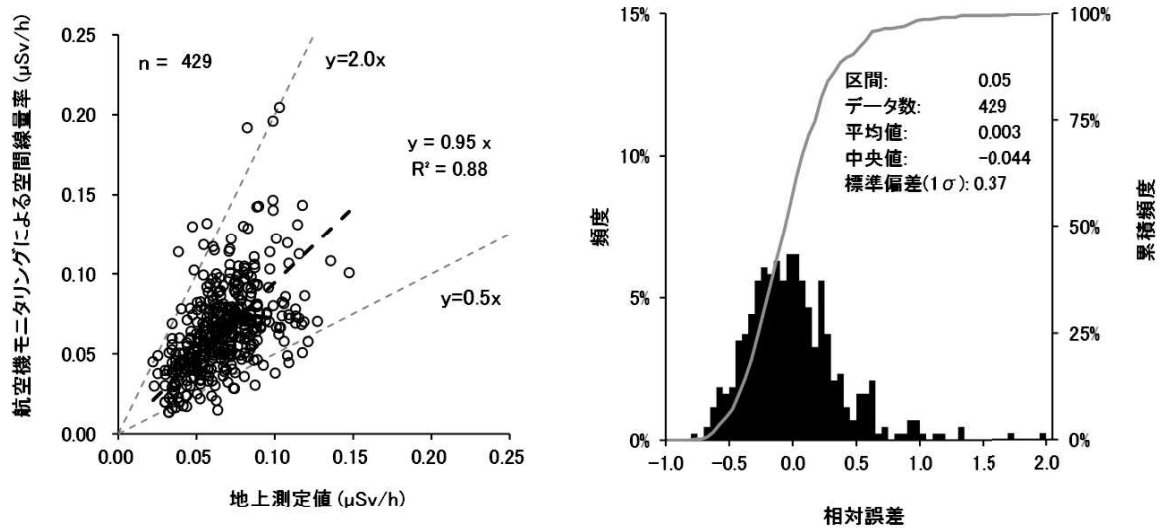


Fig. 4-6 航空機モニタリングによる空間線量率と地上測定値との比較
 (2016年から2020年までの全データ)
 (左:散布図、右:相対誤差の頻度分布)

4.3. 空間線量率

航空機モニタリングの測定結果を基に、地表面から1 mの高さの空間線量率の分布状況を示した「空間線量率マップ」を Fig. 4-7 に示す。大飯発電所および高浜発電所から半径3 km圏内は航空機モニタリングの対象範囲外であるためマッピングを行っていない。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。なお、大飯・高浜の周辺における空間線量率の最大値は滋賀県大津市南東部で約0.16 $\mu\text{Sv/h}$ であった。また参考として、2016年における大飯・高浜の空間線量率マップを Fig. 4-8 に示す。2021年の大飯・高浜周辺における航空機モニタリングによる空間線量率は2016年のものと比較して全体的に低く算出される傾向にあり、平均的に約30%程度低かった。両方でモニタリングの測線および使用ヘリコプター機種はBell412で同一であり、解析に使用した換算パラメータにも顕著な差異は見られなかった。一方、2021年に航空機モニタリングで取得した γ 線計数率が、大飯・高浜の測定エリア全体で低い傾向にあり、従って空間線量率も低く算出されたと思われる。測定時期について、2021年は11月上旬～下旬(秋季～冬季)、2016年は7月下旬～8月上旬(夏季)という違いがあり、季節依存性が示唆される。しかしながら、大飯・高浜のような日本海側においては秋季から冬季にかけて空気中ラドン子孫核種濃度が高くなり、従って空間線量率も高くなるという従来の知見^{38),39)}とは真逆の結果であり、2021年の大飯・高浜における航空機モニタリング結果が明らかに低くなったことの明確な要因は判然としない。より詳細な考察を行うためには、大飯・高浜周辺における航空機モニタリングの実施期間中の気象状況に基づいてラドン子孫核種の輸送事象を解析する必要がある。

次に、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²²⁾と、航空機モニタリングによる空間線量率 (Fig. 4-9) 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³⁷⁾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」²²⁾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。

航空機モニタリングによる空間線量率マップ (Fig. 4-9) では、0.10 $\mu\text{Sv/h}$ を超えるような比較的高線量率な領域が測定エリアの東部 (とりわけ琵琶湖の周辺) および北西部から南西部にかけて広がっている。比較的高線量率となった領域は測定範囲の北側から、福井県については、①丹生郡越前町の日本海沿岸部、②越前市と南条郡越前町の山間部、③敦賀市の北西部から中央部、④若狭町北部の雲谷山の付近であった。岐阜県については、①揖斐郡揖斐川町の北部、②揖斐郡揖斐川町の中央部、③揖斐郡揖斐川町坂内および日坂の近辺、④大垣市南西部の幾里谷周辺であった。滋賀県については、①高島市の琵琶湖西方、②犬上郡多賀町の犬上川ダムの南方、③大津市南東部の山岳地帯であった。京都府、大阪府および兵庫県については、①京都市左京区の比叡山地の西方、②茨木市北部の佐保川流域および③養父市東部の建屋川流域から朝来市北西部の山間部、④多可郡多可町南部の野間川流域から篠山市西部の黒石川流域であった。日本地質学会の空間線量率マップ (Fig. 4-9 (右)) においても大飯・高浜の測定エリアの東部および西部から南西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⁴⁰⁾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。

・福井県について

① 丹生郡越前町の日本海沿岸部について

日本シームレス地質図によると、本地域にはデイサイト、流紋岩、花崗閃緑岩およびトータル岩が分布している。これら岩石類に起因する γ 線を捉えたため、航空機モニタリングによる空間線量率が比較的高く算出されたと推察されるが、本地域の詳細な地質調査レポート等は非公開であり、地質等の要因が空間線量率に与えた影響は不明確な点の一部ある。

② 越前市と南条郡越前町の山間部について

日野山 (標高 794 m) 付近で比較的高線量率であった。日本シームレス地質図によると、本地域にはデイサイト、流紋岩、花崗閃緑岩およびトータル岩が分布している。これら岩石類に起因する γ 線を捉えたため、航空機モニタリングによる空間線量率が比較的高く算出されたと推察されるが、本地域の詳細な地質調査レポート等は非公開であり、地質等の要因が空間線量率に与えた影響は不明確な点の一部ある。

③ 敦賀市の北西部から中央部について

本地域には広範囲にわたり花崗岩体 (通称：江若花崗岩) の分布が認められている⁴¹⁾。江若花崗岩は敦賀平野を境界に分断されているが、各領域において粗粒黒雲母花崗岩、中粒黒雲母花崗岩および細粒斑状花崗岩の 3 種類が広く含まれ、それぞれ岩石学的特徴に顕著な相違は認められていない^{41),42)}。本地域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おける空間線量率が比較的高く算出されたと推察される。

④ 若狭町北部の雲谷山の付近について

雲谷山 (標高 786.6 m) 近辺で比較的高線量率であった。雲谷山は主に中粒で等粒状の花崗岩 (通称: 雲谷山花崗岩) から構成されており、雲谷山花崗岩は三方町東部から美浜町の南西部にかけて西約 6 km・南北約 10 km に渡って分布し、その周縁相には中粒白雲母花崗岩および両雲母花崗岩、主部相には中粒黒雲母花崗岩が認められている⁴³⁾。これら花崗岩のほとんどがアダメロ岩であり、カリウム含有量が比較的高い。以上のことから、本地域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おけ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、敦賀市杉津から針伏山近辺にかけて花崗岩体 (通称: 杉津花崗閃緑岩) が分布するにも関わらず、大部分で航空機モニタリングによる空間線量率は 0.06 μ Sv/h 前後であった。本岩体は花崗閃緑岩が主体であり、ごく一部に斑れい岩が露出しており、花崗閃緑岩の南東部、東縁部および南西縁部においてトーナル岩が認められている⁴²⁾。花崗閃緑岩は純粋な花崗岩と比べて γ 線強度が低く、また、本岩体におけるトーナル岩はその組成⁴²⁾から、花崗岩類の中でも γ 線強度が比較的弱い石英閃緑岩に近いと思われる。このことから、本地域には花崗岩類が存在するものの、純粋な花崗岩が存在する地域に比べて、空間線量率は比較的低下することが推察される。しかしながら、本地域の空間線量率が花崗岩類の存在しない地域と同程度に低く算出された理由は判然とせず、航空機モニタリングでは本地域の花崗岩に起因する γ 線を捉えられなかった何らかの要因があると思われる。

・岐阜県について

① 揖斐郡揖斐川町の北部について

徳山湖周辺において比較的高線量率であった。本地域には美濃帯に含まれる徳山コンプレックスが分布しており、本コンプレックスは主に砂岩及び砂岩泥岩互層から構成されている⁴⁴⁾が、空間線量率の上昇に寄与する岩石類は確認できず、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与えた影響は不明確である。一方で、本地域には冠山や若丸山といった標高 1,000 m 級の稜線が形成されており、褶曲構造が広く確認されているような起伏の激しい地形であることから、地形的な要因が航空機モニタリングによる空間線量率に影響を及ぼした可能性がある。また、本地域一帯に地すべりおよび大規模崩落の崩落崖が認められており⁴⁴⁾、既往の地質情報とは異なる岩体が露出している可能性があることにも留意する必要がある。

② 揖斐郡揖斐川町の中央部について

五蛇池山 (標高 1,147 m) から天狗山 (標高 1,149 m) にかけて比較的高線量率であった。本地域には層状チャートや様々な岩石体が混合したメラングジュ基質を主体とする舟伏山ユニットが広く分布している⁴⁵⁾が、本ユニット中には空間線量率の上昇に寄与する岩石類は確認できず、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与えた影響は不明確である。本地域のほとんどが山地であり、急峻な地形であることから、地形的な要因が航空機モニタリングによる空間線量率に影響を及ぼした可能性がある。また、各所で小規模な斜面崩落が確認されており⁴⁵⁾、既往の地質情報とは異なる岩体が露出している可能性があることにも留意する必要がある。

③ 揖斐郡揖斐川町坂内および日坂の近辺について

本地域には広く粗粒角閃石含有黒雲母花崗岩および花崗閃緑岩体 (通称：貝月山花崗岩) が分布しており⁴⁵⁾、本地域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おける空間線量率が比較的高く算出されたと推察される。しかしながら、空間線量率が比較的高く算出された範囲は貝月山花崗岩の分布範囲のごく一部に過ぎず、航空機モニタリングによる空間線量率分布と本花崗岩体の分布との対比が良好でないように思われる。貝月山花崗岩体の組成⁴⁵⁾から、その大半は分類上純粋な花崗岩として扱われるものの、花崗閃緑岩に近い性質を持つことが推察される。よって、貝月山花崗岩は純粋な花崗岩ほどに γ 線強度を有していない可能性が示唆される。加えて、貝月山花崗岩では全体的に真砂化が進み斜面崩壊や浸食が起きており、土砂流出が激しいことが確認されている⁴⁵⁾ことから、貝月山花崗岩の分布範囲が本地域における地質調査当時から大きく異なっている可能性に留意する必要がある。

④ 大垣市南西部の幾里谷周辺について

本地域には砂岩、粘土岩、チャートおよび石灰岩から成る幾里谷層群が分布している中に、湖東流紋岩類に含まれる黒雲母角閃石花崗斑岩 (通称：犬上花崗斑岩) が局所的に貫入している⁴⁶⁾。この犬上花崗岩に起因する γ 線を捉えたため、航空機モニタリングにおける空間線量率が比較的高く算出された可能性がある。

・滋賀県について

① 高島市の琵琶湖西方について

比良山地一帯において比較的高線量率であり、特に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のは岳山周辺であった。本地域には細粒等粒状一斑状黒雲母花崗岩、中粒等粒状黒雲母花崗岩、中-粗粒等粒状 (一部斑状) 花崗岩および細-中粒斑状黒雲母花崗岩の4種類の花崗岩 (通称：比良花崗岩) が存在しており、とりわけ岳山周辺には細粒等粒状一斑状黒雲母花崗岩が分布している⁴⁷⁾。上記のいずれの花崗岩とも、その組成から純粋な花崗岩に分類されており⁴⁷⁾、本花崗岩に起因する γ 線を捉えたため、航空機モニタリングにおける空間線量率が比較的高く算出されたと推察される。

② 犬上郡多賀町の犬上川ダムの南方について

本地域にはチャートや砂岩に加え、溶結凝灰岩層や石英斑岩から成る湖東流紋岩類が主に分布しているが、湖東流紋岩類に角閃石含有黒雲母花崗斑岩および角閃石黒雲母斑状花崗岩 (通称：犬上花崗斑岩) が貫入している⁴⁸⁾。この犬上花崗斑岩の直上で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から、本花崗岩に起因する γ 線を捉えたことと推察される。

③ 大津市南東部の山岳地帯について

笹間ヶ岳 (標高 433 m)、堂山 (標高 384 m)、太神山 (標高 600 m) および鶏冠山 (標高 491 m) の周囲に渡る広い範囲において比較的高線量率であった。本地域には、細粒-細粒斑状黒雲母花崗岩、中-粗粒斑状黒雲母花崗岩および中-粗粒黒雲母花崗岩 (通称：田上花崗岩体) が広く分布しており、本花崗岩体の化学分析結果からカリウム (K_2O) に加え U および Th の含有量が比較的高いことが見出されている^{49),50)}。このことから、田上花崗岩

体に起因する γ 線を捉えたため、航空機モニタリングにおける空間線量率が比較的高く算出されたと推察される。

・京都府、大阪府および兵庫県について

① 京都市左京区の比叡山地の西方について

比叡山地 (標高 848 m) 西方に位置する花折断層の直上において比較的高線量率であった。断層の存在と空間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⁵¹⁾。一方、比叡山地一帯には斑状黒雲母花崗岩および黒雲母花崗岩 (通称：比叡花崗岩) が広く分布する⁵²⁾が、比叡花崗岩上のほとんどで航空機モニタリングによる空間線量率は 0.06 $\mu\text{Sv/h}$ 以下であった。比叡花崗岩はその組成⁵²⁾から、花崗閃緑岩に近い性質を有すると思われ、純粋な花崗岩と比較して γ 線強度は弱いと推察される。しかしながら、比叡山地一帯と花崗岩が分布しないエリアとで空間線量率に差異が見られなかった理由は判然とせず、航空機モニタリングでは本地域の花崗岩に起因する γ 線を捉えられなかった何らかの要因があると思われる。

② 茨木市北部の佐保川流域について

本地域には細粒斑状花崗岩、細粒-中粒斑状花崗岩、細粒斑状花崗閃緑岩および粗粒花崗閃緑岩 (通称：能勢花崗岩) が複雑に入り組んで分布している。能勢花崗岩を構成する花崗岩のいずれも、鉱物組成⁵³⁾から純粋な花崗岩またはそれに近い性質を有していることが推察され、本岩体に起因する γ 線を捉えたため、航空機モニタリングにおける空間線量率が比較的高く算出されたと推察される。

③ 養父市東部の建屋川流域から朝来市北西部の山間部について

建屋川流域から大路山 (標高 603 m)、金梨山 (標高 464 m) および朝来市中央部の多々良木川流域の広範囲に渡り、比較的高線量率であった。本地域一帯に粗粒の花崗岩や流紋岩が分布しており⁵⁴⁾、本岩体に起因する γ 線を捉えたため、航空機モニタリングにおける空間線量率が比較的高く算出されたと推察される。

④ 多可郡多可町南部の野間川流域から篠山市西部の黒石川流域について

多可郡多可町においては黒雲母流紋岩溶結凝灰岩および火山礫凝灰岩から成る妙見山層および主に流紋岩-デイサイト凝灰岩および火山礫凝灰岩から成る鴨川層⁵⁵⁾、篠山市においては主に黒雲母流紋岩溶結ガラス質結晶-結晶ガラス質凝灰岩から成る平木溶結凝灰岩⁵⁶⁾の分布位置に概ね沿って、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。以上のことから、これら凝灰岩中に含まれる流紋岩が空間線量率の上昇に寄与したと推察される。

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

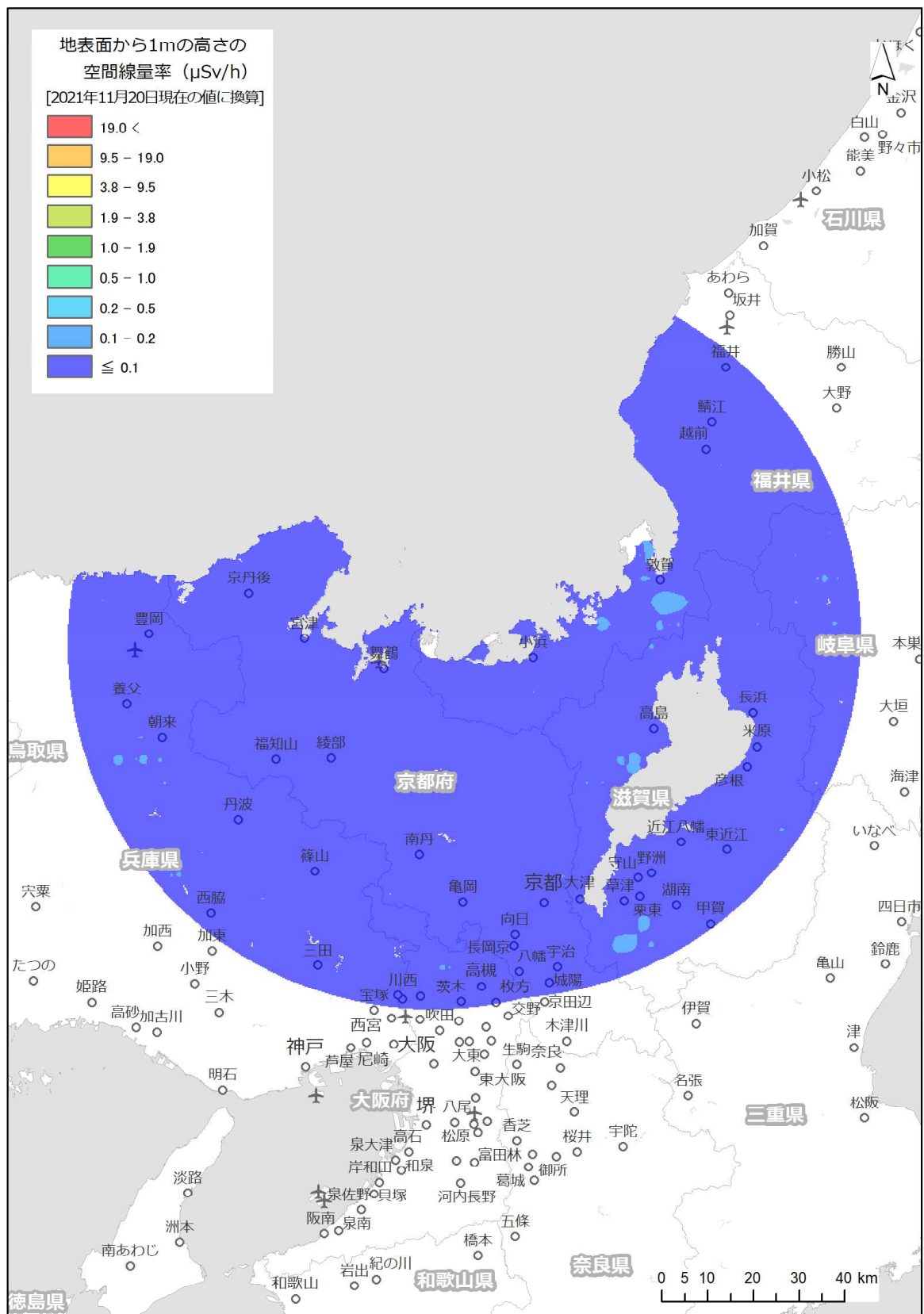


Fig. 4-7 空間線量率マップ (大飯・高浜 2021年)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

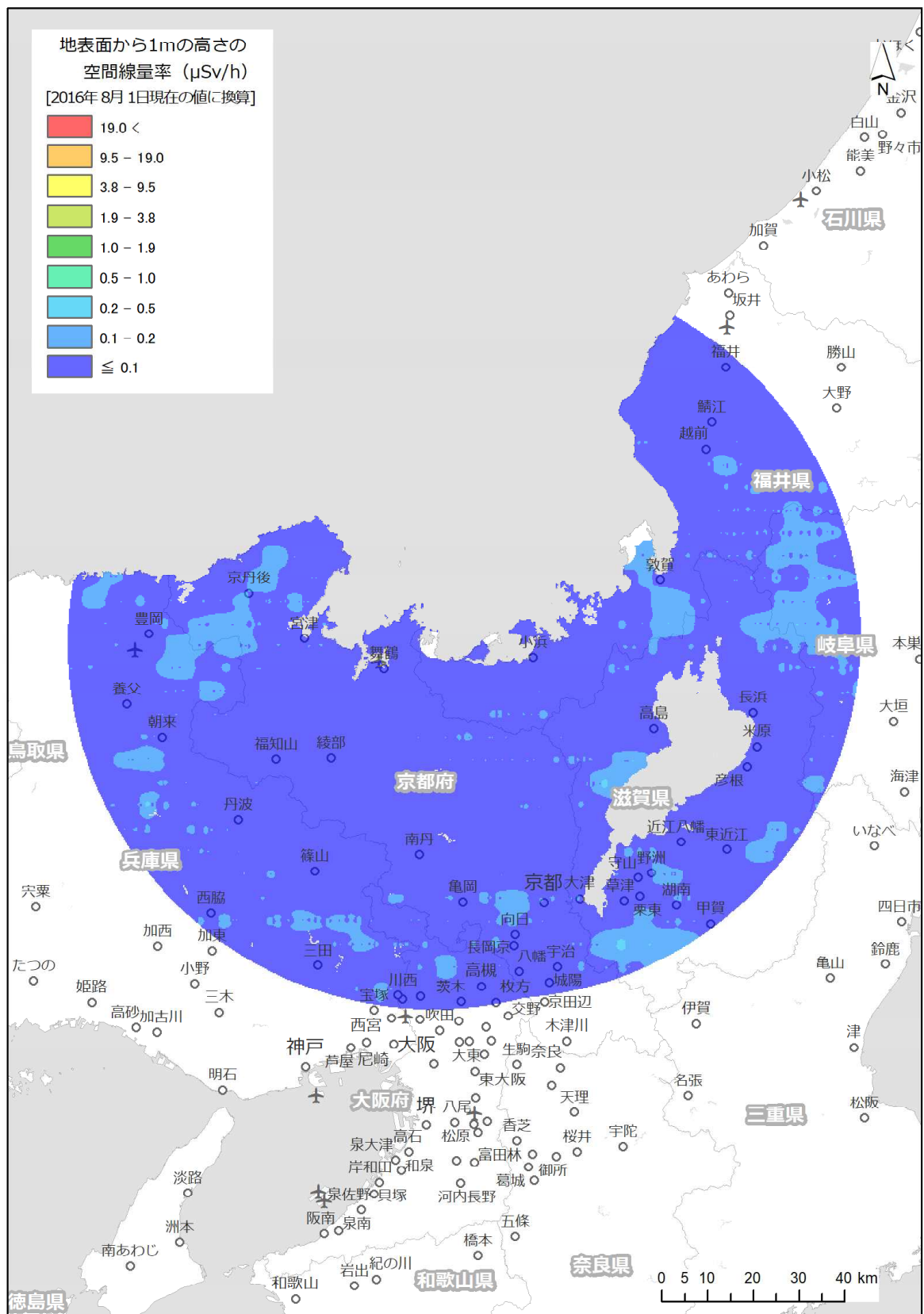


Fig. 4-8 空間線量率マップ (大飯・高浜 2016年)
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

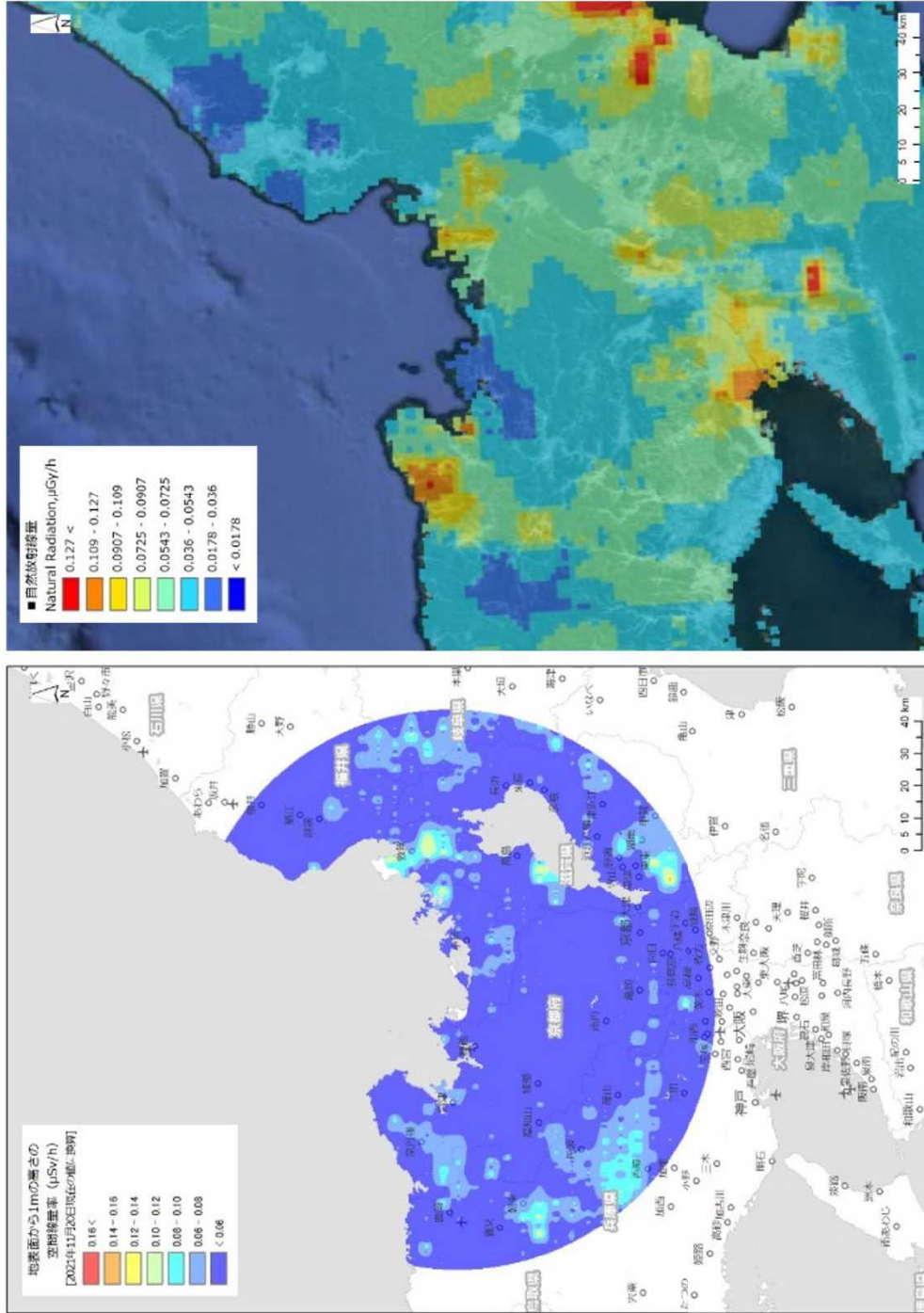


Fig. 4-9 空間線量率マップの比較

(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、©2022 TerraMetrics を使用)

4.4. 天然放射性核種の濃度

Table 3-5 に示したパラメータを利用し、地上における放射性核種濃度に換算しマップ化した結果を K-40、U 系列および Th 系列の順に、それぞれ Fig. 4-10～Fig. 4-12 に示す。K-40、U 系列および Th 系列の各最大濃度については、約 2,600 Bq/kg、約 140 Bq/kg および約 180 Bq/kg となった。また、測定エリア全体における K-40、U 系列および Th 系列の各平均濃度については、約 800 Bq/kg、約 30 Bq/kg および約 50 Bq/kg となった。一般的に、日本における K-40、U 系列および Th 系列の核種濃度は、それぞれ 100 Bq/kg～700 Bq/kg、10 Bq/kg～50 Bq/kg および 7 Bq/kg～50 Bq/kg とされており⁵⁷⁾、本報告で得られた各元素の平均濃度レベルと概ね整合する。

これら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³⁶⁾を利用した。航空機モニタリングによる天然放射性核種濃度マップと海と陸の地球化学図による元素濃度マップの比較を K-40、U 系列、Th 系列の順に Fig. 4-13～Fig. 4-15 にそれぞれ示す。なお、海と陸の地球化学図の元素濃度マップは日本各地における河川堆積物試料の元素濃度測定結果に対して Beck et al.³⁷⁾の換算係数を適用して作成されており、その中でも K-40、U 系列および 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、比較にあたっては注意が必要である。海と陸の地球化学図では河川堆積物試料中の元素濃度(%または ppm)を示しており、航空機モニタリングによる計算結果(Bq/kg)との単純な比較は難しいが、大飯・高浜測定エリアの東部(とりわけ琵琶湖の周辺)および北西部から南西部にかけて、各元素ともに比較的高濃度であるという点で大まかな分布傾向は一致しており、また、Fig. 4-7 に示した空間線量率マップにおいて空間線量率が比較的高く算出された箇所との対比も良好に思われる。以下に比較の詳細を記述する。

K-40 濃度について、航空機モニタリングによる核種濃度マップ(Fig. 4-13 (左))と海と陸の地球化学図の元素濃度マップ(Fig. 4-13 (右))の双方において、大飯・高浜測定エリアのほぼ全域に渡り高濃度である。一方で、Fig. 4-13 (右)において K₂O 濃度が比較的低い場所が、①福井県福井市南西部の日本海沿岸域、②福井県大飯郡高浜町の高浜漁港から内浦湾の周囲、③京都府舞鶴市の舞鶴湾周囲から綾部市と福知山市の境界付近および④京都府与謝郡伊根町から京丹後市に及ぶ丹後半島の沿岸域の大まかに 4 箇所で見受けられる。当該マップの作成に使用された、河川堆積物試料の元素濃度測定結果³⁷⁾を見ると、大飯・高浜測定エリア内に位置する試料のほとんどで K₂O 濃度は 2.0 %を上回っているのに対し、上記した 4 箇所の近辺で採取された試料の K₂O 濃度は 0.9 %から 1.5 %程度と比較的低濃度であった。Fig. 4-13 (左)においても、全体的に K-40 が高濃度(平均値が約 800 Bq/kg)である中で上記した 4 箇所の周辺では比較的低濃度であり、概ね 500 Bq/kg 前後であった。次に、U 系列および Th 系列濃度について、海と陸の地球化学図の元素濃度マップ(Fig. 4-14 (右)および Fig. 4-15 (右))において特に高濃度である場所は同様であり、①福井県若狭町のほぼ全域から滋賀県高島市と長浜市の境界付近に渡る領域、②滋賀県大津市と京都府京都市左京区の境界付近、③京都府宮津市から京丹後市に渡る領域および④兵庫県養父市と朝来市の境界付近の大まかに 4 箇所である。航空機モ

モニタリングによる核種濃度マップ (Fig. 4-14 (左) および Fig. 4-15 (左)) においても、U 系列および Th 系列核種濃度が比較的高くなる領域は概ね同様であった。一方で、U 系列濃度については京都府福知山市と丹波市の境界付近において、Fig. 4-14 (右) で 1.0 ppm 程度とさほど高濃度でないのに対し Fig. 4-14 (左) では約 40 Bq/kg～70 Bq/kg と比較的高濃度であった点、Th 系列濃度については滋賀県大津市と高島市の境界付近において Fig. 4-15 (右) で 5.0 ppm 前後とさほど高濃度でないのに対し Fig. 4-15 (左) では約 80 Bq/kg～約 150 Bq/kg と比較的高濃度であった点で両マップ間に差異が見られた。ここで、両マップ間で核種濃度の分布傾向に差異が見られたエリアに着目して日本シームレス地質図で詳細な情報見てみると、京都府福知山市と丹波市の境界付近については主に段丘堆積物や非海成堆積岩類が主であり、また大きな斑レイ岩体も確認できるが、いずれも U 系列核種濃度が顕著に高いとは考えにくく、航空機モニタリングにより U 系列核種濃度が高く評価された理由が判然としない点がある。一方、滋賀県大津市と高島市の境界付近については、大きな花崗岩体 (前出の比良花崗岩) の分布位置に概ね沿って航空機モニタリングによる Th 系列核種濃度が高く評価されたのに対し、海と陸の地球化学図の作成に使用された河川堆積物試料の採取ポイントは比良花崗岩から 10 km 前後離れた、滋賀県高島市の安曇川流域の 2 点のみであり、比良花崗岩の由来の Th 系列核種濃度がマップに反映されていない可能性が高い。

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の作成が可能であると考えられる。

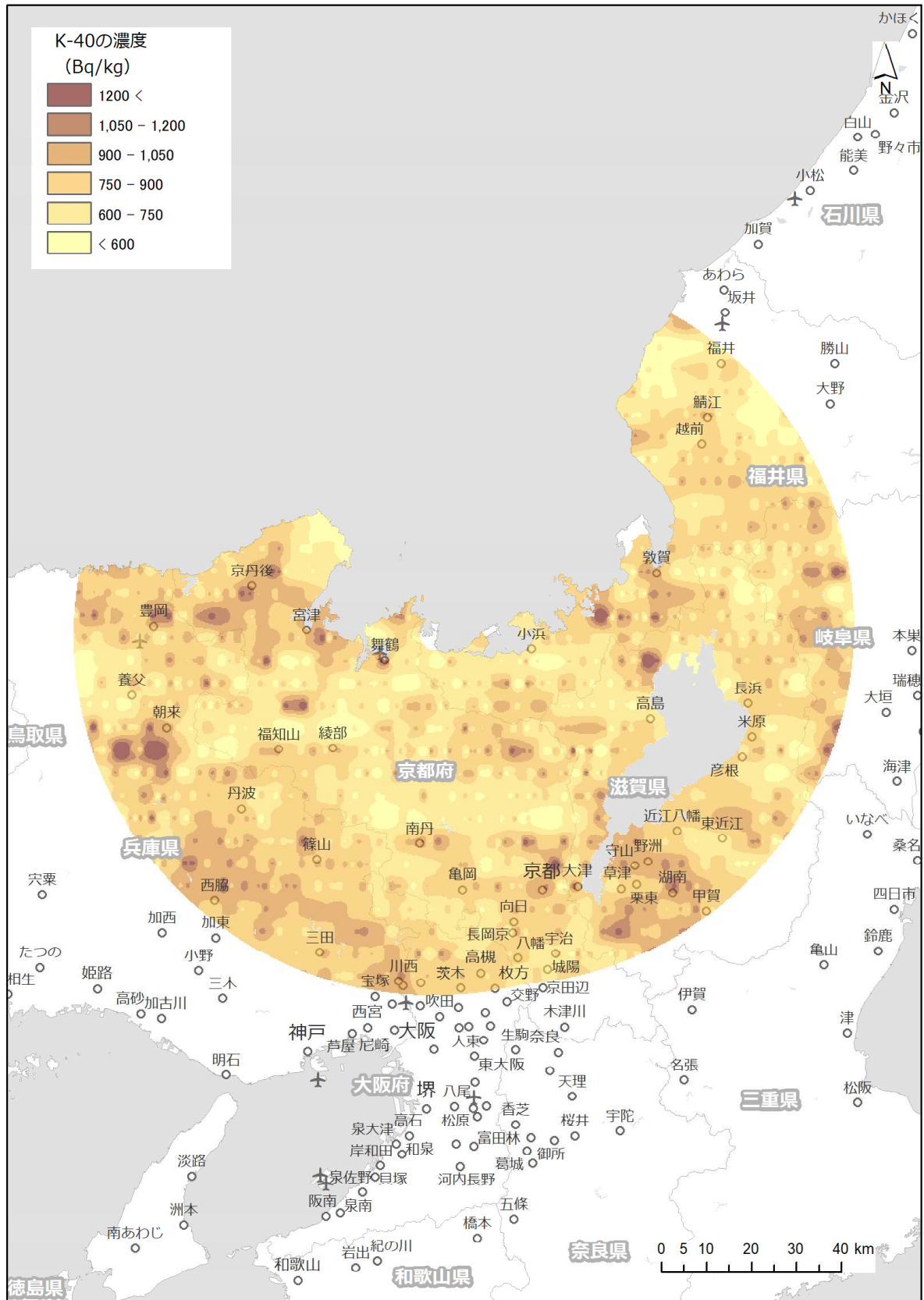


Fig. 4-10 K-40 濃度マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパンデータ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

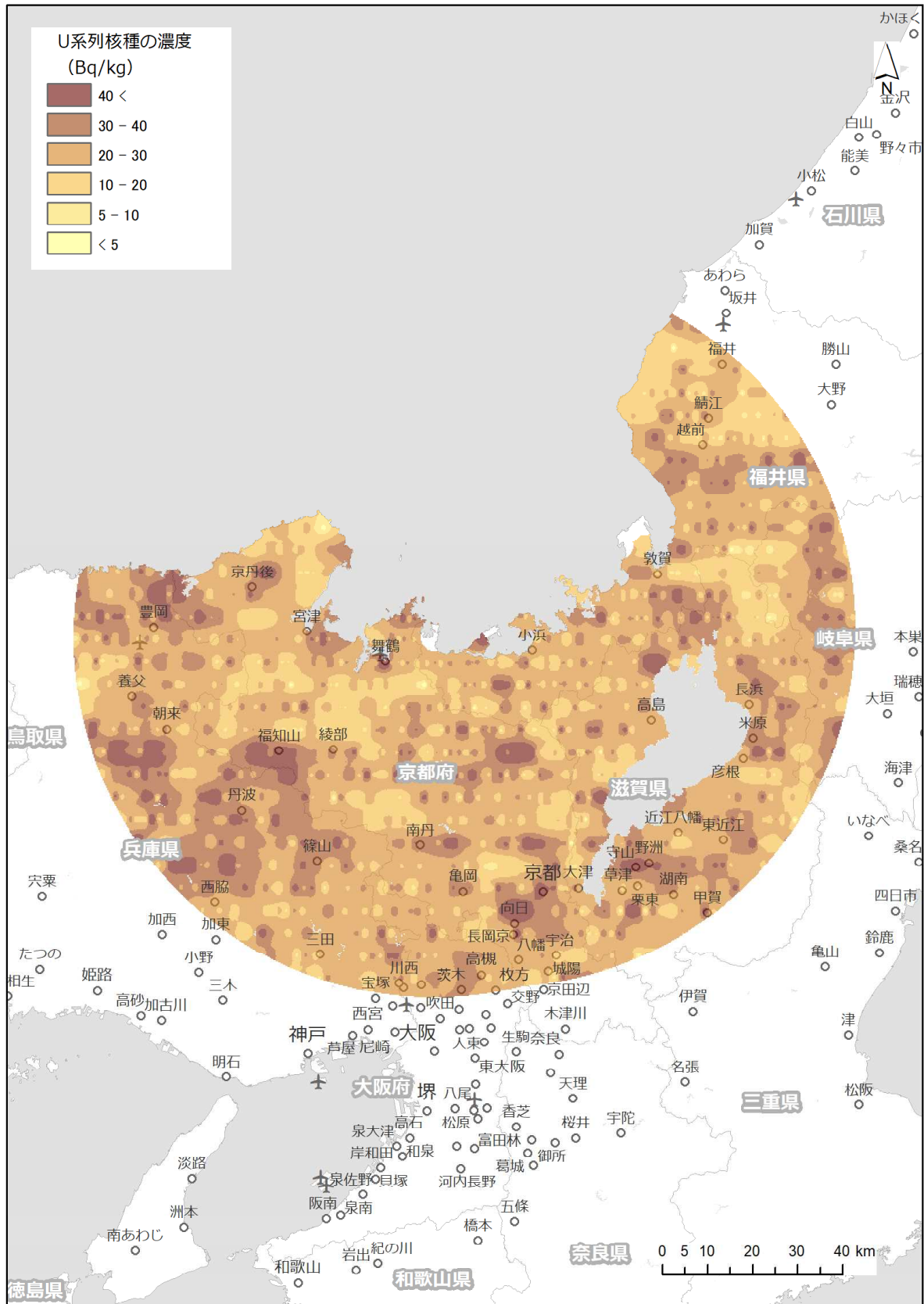


Fig. 4-11 U 系列濃度マップ

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

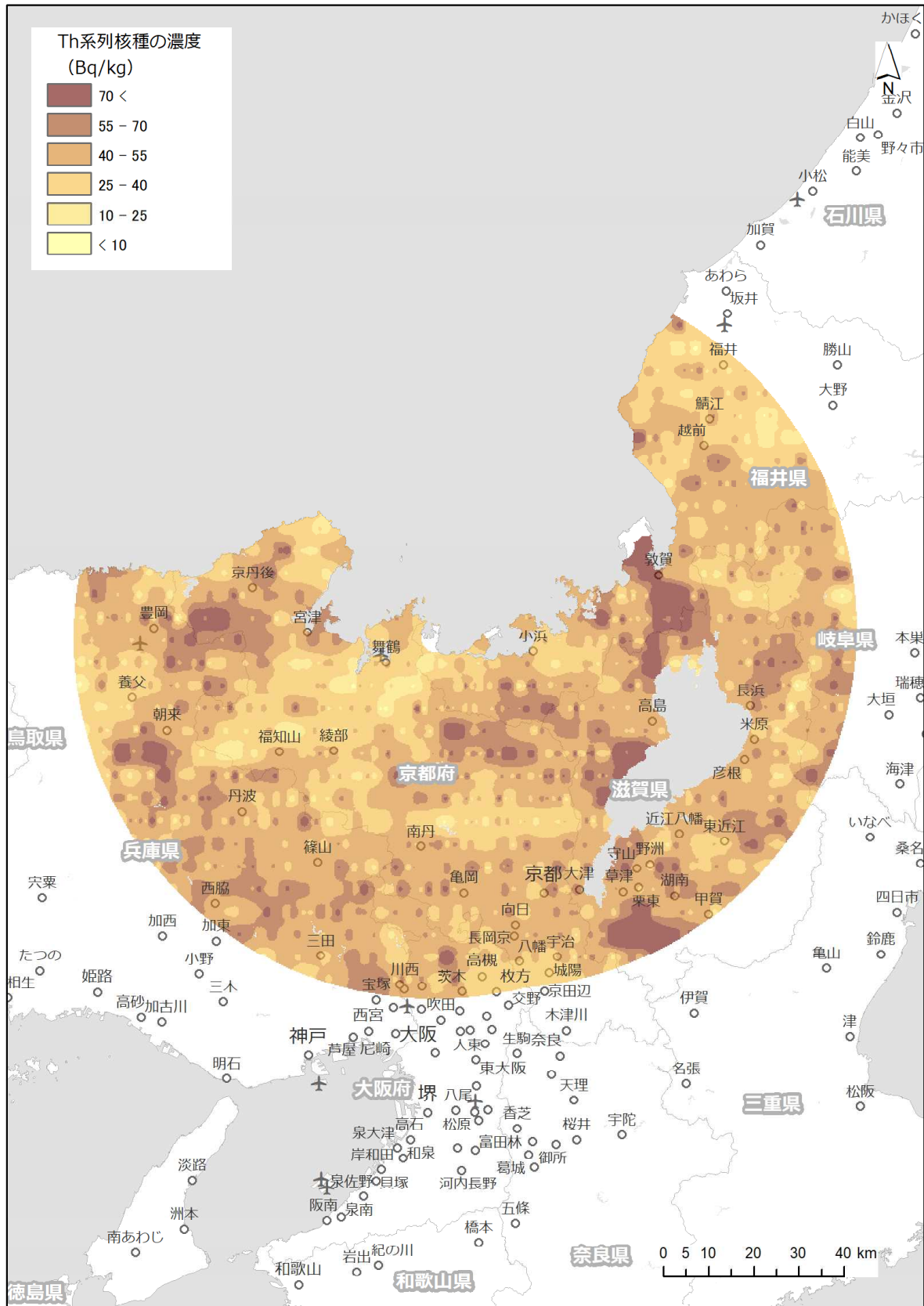


Fig. 4-12 Th 系列濃度マップ

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

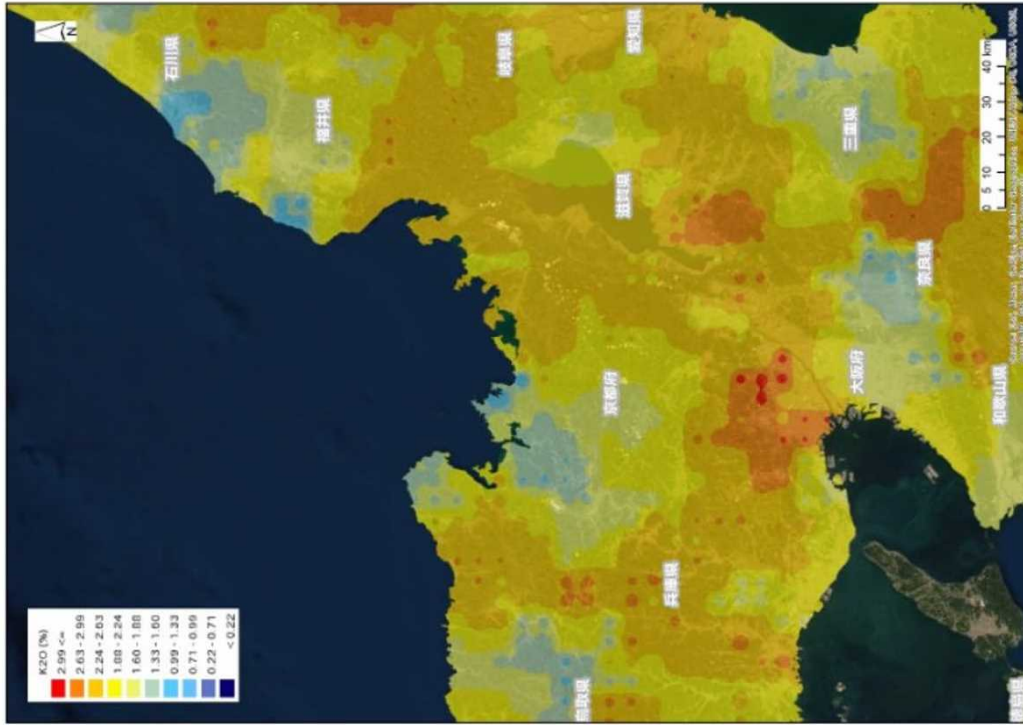
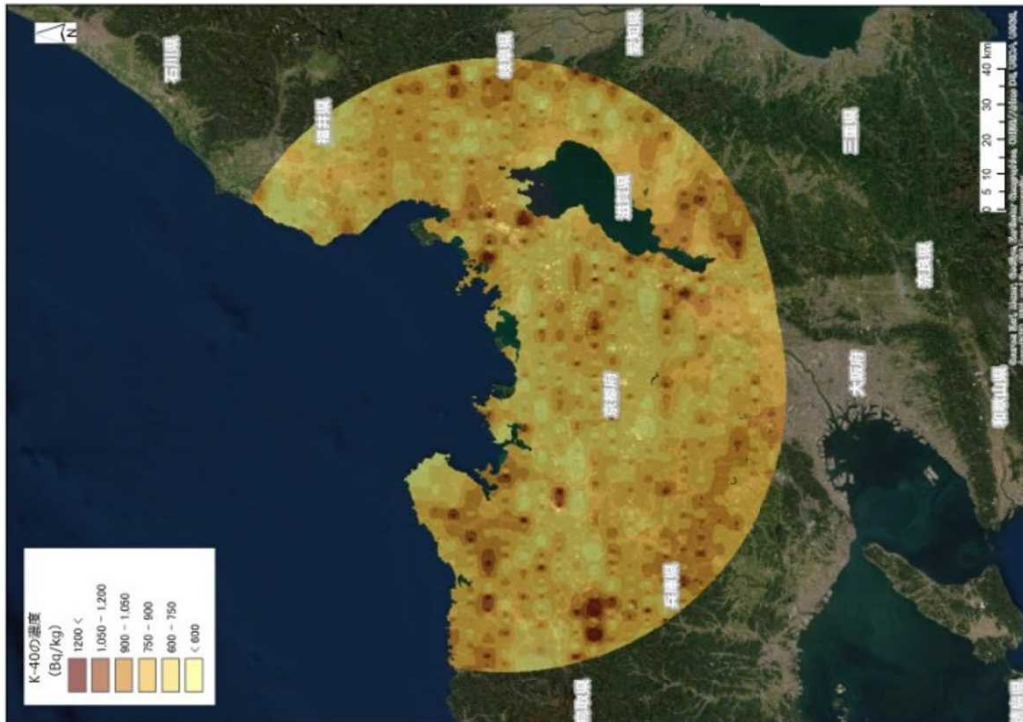


Fig. 4-13 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (K-40)

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

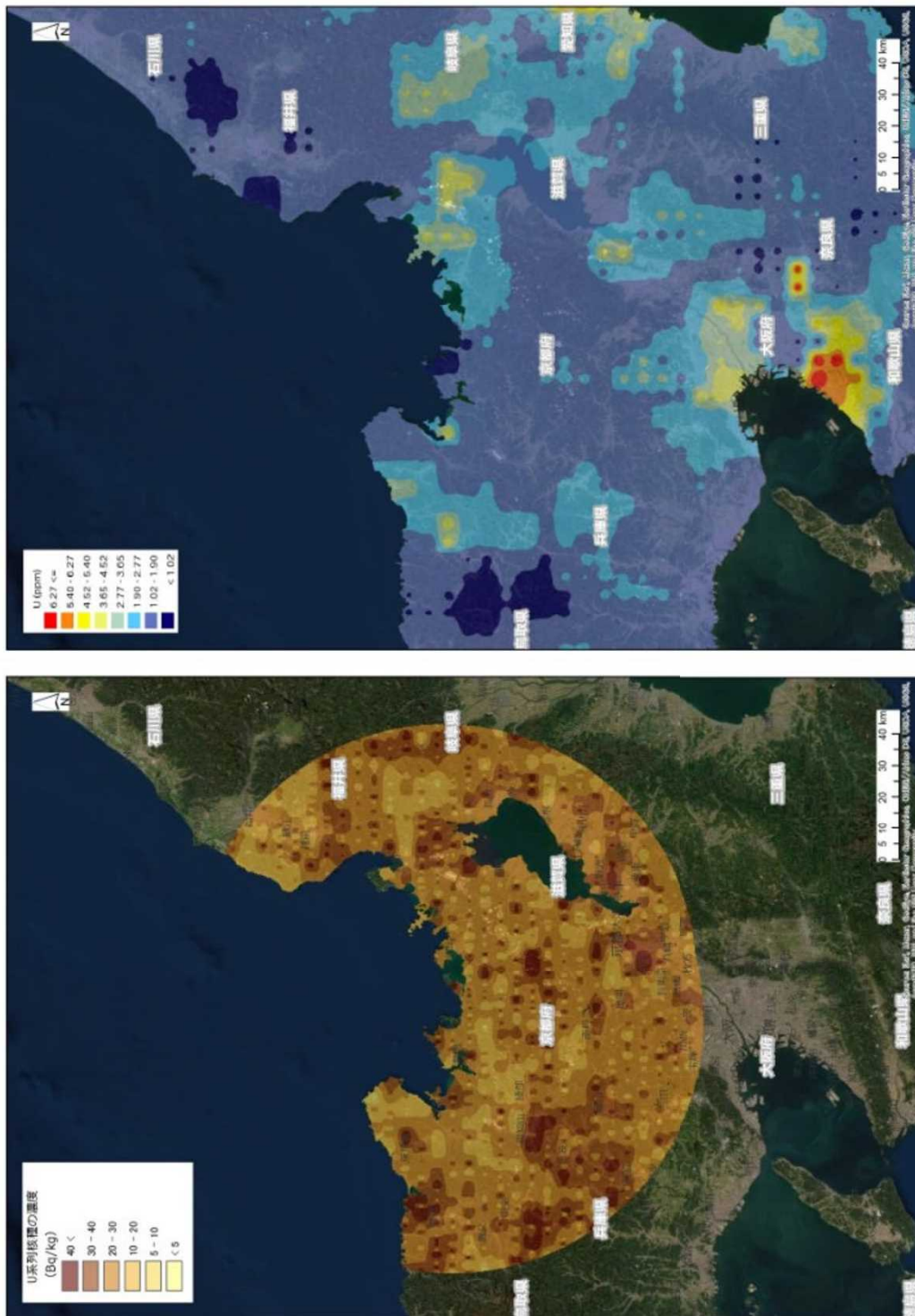


Fig. 4-14 放射性核種濃度測定結果(左)と地球化学図(右)の比較(U系列)

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

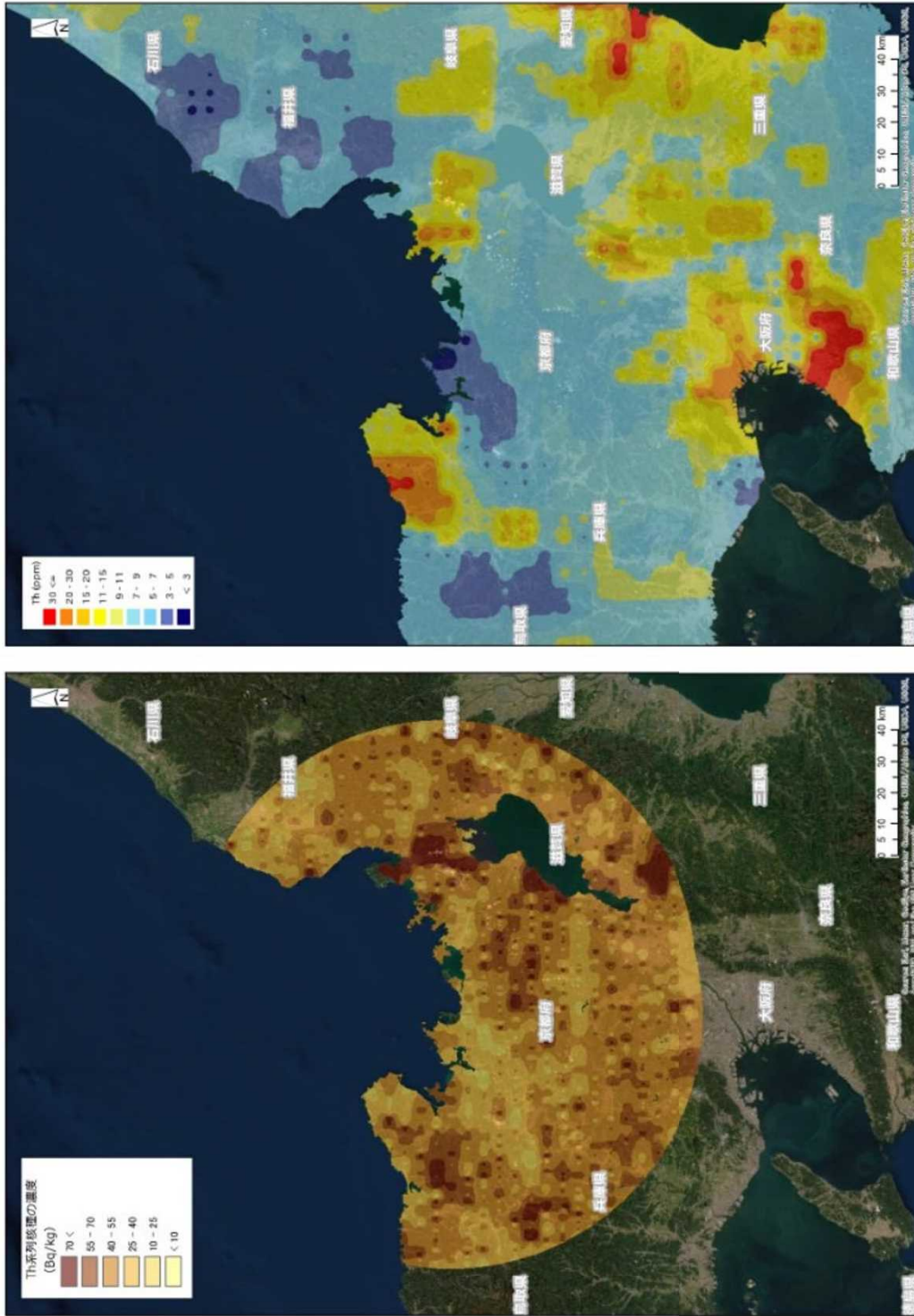


Fig. 4-15 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (Th 系列)

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

4.5. ラドン弁別手法の適用

4.5.1. パラメータ (*RI* および *GI*) の決定

式 [10] に記載したように、ラドン弁別法の信頼性は *GI* と *RI* の設定精度に依存する。ヘリコプターの遮へいによる γ 線計数率の変化に付随して、これらのパラメータも変化すると考えられるため、使用したヘリコプター機種ごとに実測データから数値を決定した。

計数率の変動による影響をなるべく低減するために、大飯・高浜における航空機モニタリングにおいて取得した計数率データおよび GPS データ (緯度、経度および飛行高度) を 40 秒平均し、全計数率から宇宙線およびヘリコプター機体に起因する γ 線計数率の寄与をバックグラウンドとして減算したうえで *GI* の算出に用いた。このとき、対地高度が 300 m 前後 (実際のフライト対地高度が 290 m ~ 320 m のデータ) のデータのみを対象とした。NaI(Tl) 検出器の計数率と LaBr₃ 検出器の計数率の関係を Fig. 4-16 (a) に示す。本散布図に示された単回帰直線の傾きを *GI* とした。実環境中において、ラドン子孫核種による影響が含まれないデータを取得することは困難であり、*GI* にはラドン子孫核種の影響がある程度含まれていることに留意する必要がある。

RI の算出については、大飯・高浜周辺の航空機モニタリングにおいて取得したデータを *GI* の場合と同様にして 40 秒平均およびバックグラウンドの減算を行ったうえで用いた。このとき、海拔高度が 300 m \pm 150 m (実際のフライト海拔高度が 150 m ~ 450 m) で取得したデータを対象として、NaI(Tl) 検出器および LaBr₃ 検出器の計数率の平均値を算出し、それぞれの検出器における計数率が平均値 \pm 2 標本標準偏差以内に収まるデータのみを抽出し使用した。これは過去に実施したラドン弁別手法の評価¹⁶⁾において、海拔高度が上記した範囲内であることのみを制約条件にすると、*RI* の数値に悪影響を及ぼすようなデータが残留する可能性があるという知見に基づいた、計数率に関する制約条件を付加して *RI* の算出に適したデータを簡易的にスクリーニングするための工程である。NaI(Tl) 検出器の計数率と LaBr₃ 検出器の計数率の関係を Fig. 4-16 (b) に示す。本散布図に示された単回帰直線の傾きを *RI* とした。*RI* についてはラドン子孫核種に起因する計数率のみが反映されていると考えられるが、大気中ラドン子孫核種の分布の不均一さや抽出対象とするデータの海拔高度範囲が広いことに起因し、プロットがややばらつくと思われる。

本解析に使用した *GI* および *RI* と使用したヘリコプター機種 (機体番号) について Table 4-4 にまとめた。本表には、2021 年度の福島原子力発電所周辺から 80 km 圏外における航空機モニタリング (東日本第 12 次モニタリング) で用いた *GI* および *RI* も併記した。なお、東日本第 12 次モニタリングでは海上で測定したデータがほとんどなく、*RI* の算出に適したデータが得られなかったため、同年度に実施した福島原子力発電所から 80 km 圏における航空機モニタリング (第 16 次モニタリング) のデータを使用した。両モニタリングとも、*GI* については概ね 30 前後であるのに対し、*RI* の値にはややばらつきが見られた。*RI* を適切に設定するために、現行の手法とは異なるデータスクリーニング方法や外れ値による影響を緩和するためにロバスト回帰分析を適用すること等について今後検討する必要がある。

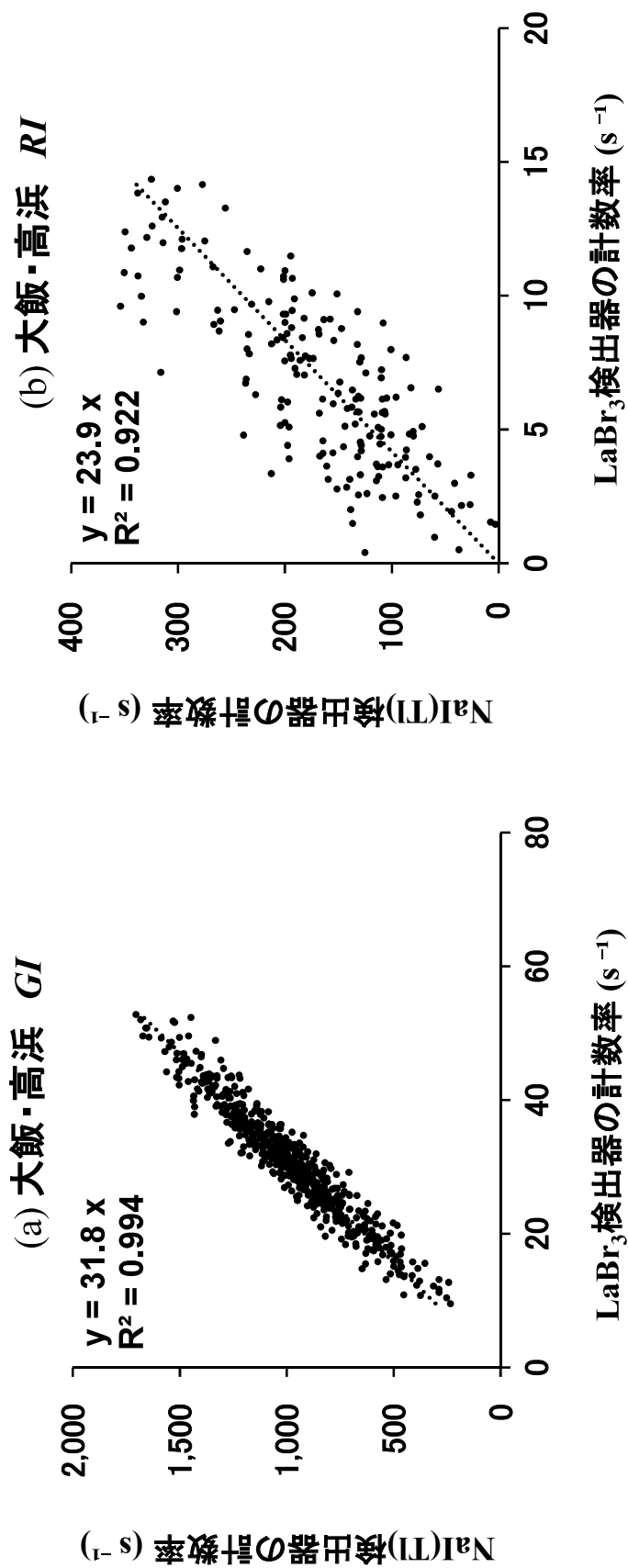


Fig. 4-16 陸上および海上における NaI(Tl)検出器の計数率と LaBr₃検出器の計数率の関係

Table 4-4 解析に用いた RI および GI の一覧

モニタリング名	開始日	終了日	ヘリコプター機種 (機体番号)	GI	RI
大飯・高浜	2021/11/06	2021/11/20	Bell412 (JA6928)	31.8	23.9
東日本12次モニタリング	2021/09/28	2021/10/25	Bell430 (JA05TV)	27.3	15.9*
	2021/09/26	2021/10/08	Bell430 (JA02AX)	27.9	23.0*
	2021/10/08	2021/10/25	Bell412 (JA6767)	28.5	19.8*

* RI の算出には第16次モニタリングのデータを用いた

4.5.2. ラドン弁別手法の適用結果および従来手法との比較

ラドン弁別手法を大飯・高浜周辺における航空機モニタリングデータに適用し、空間線量率マップおよび空气中ラドン子孫核種の計数率マップを作成した。なお、今までの経験から GI を実測データに基づく数値よりもある程度小さく設定した方が、空間線量率の計算値が地上測定値とよく整合するという知見が得られている。このことが普遍的に成立するかを検証するために、前節で示した GI を基準値とし、基準値から 1 および 2 を減じた場合についても解析を実施した。すなわち、31.8 を GI の基準値とし、30.8 および 29.8 とした場合についても解析し、それぞれの場合で空間線量率マップを作成した。なお、3 章で示した従来の空間線量率換算法においては Table 3-2 で示したように、測定日ごとに空气中核種フライトで得られたデータを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空气中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、空气中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。ラドン弁別手法による空气中ラドン子孫核種の影響の減算効果を検証するため、まずは空气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した解析結果（「ラドン弁別なし」と表記）を比較対象とした。つまり、本項で示す「ラドン弁別なし」の空間線量率マップは Fig. 4-7 に示したマップとは異なる。次に、ラドン弁別手法を適用して作成した空間線量率マップについて地上測定値 20 点と比較し、従来手法によるものと比較することで、その妥当性について検証した。最後に、従来手法で用いた空气中核種フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空气中ラドン子孫核種由来の計数率を比較し、空間線量率マップを作成するにあたって評価対象外となる計数率の除去効果の有効性を検証した。

ラドン弁別手法を適用した空間線量率マップを Fig. 4-17 に示す。ラドン弁別なしのマップと比べて、ラドン弁別手法を適用したマップでは空間線量率が比較的高いことを示す色の面積が減少していることから、本手法により空气中核種由来の計数率が減算できていることが分かる。また、空間線量率の計算値は GI を基準値から減じるほど全体的に大きくなる傾向にある。これは式 [10] より、 GI を 1 および 2 減じる程度の範囲においては、 $C_{NaI,g}$ が大きくなる傾向にあるためである。また、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、空气中のラドン子孫核種由来の計数率マップを作成した (Fig. 4-18)。本マップは、大飯・高浜周辺の航空機モニタリングにおけるラドン弁別手法の過程で計算した、 $NaI(Tl)$ 検出器における空气中ラドン子孫核種由来の計数率をマッピングしたものである。 $NaI(Tl)$ 検出器における空气中ラドン子孫核種由来の計数率は、式 [10] で求めた $C_{NaI,g}$ を式 [6] に代入して $C_{NaI,a}$ を計算し求めた。測定日時が場所により異なるため、空气中ラドン子孫核種由来の計数率は離散的である。ラドン子孫核種由来の計数率が最も大きく算出される $GI = 31.8$ の場合、全体として 100 s^{-1} を下回る地域が多く、琵琶湖の周辺では 100 s^{-1} を上回る地域が比較的多く見られた。ただし、空気ラドン子孫核種の起源としては中国大陸からの大気輸送と測定地近傍における地殻からの放出が考えられ、前者の影響は特に日本海側の冬季に大きくなる傾向にある⁶⁰⁾。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。また、空間線量率が比較的高く算出された場所と空气中ラドン子孫核種由来の計数率が比較的高い場所は必ずしも一致しない。このような場所では、空間線量率の上昇には空气中ラドン子孫核種以外の要因（例えば、地質学的な要因や地形的な要因）の方が強く関与することが示唆される。

次に、従来手法とラドン弁別手法における空間線量率の計算値の妥当性を比較検証するため、従来手法と上記した各 GI の数値を用いてラドン弁別手法を適用した場合の空間線量率マップを Fig. 4-19 に示す。このように、両マップ間で空間線量率の分布傾向に、特筆すべき違いは認められなかった。次に、空間線量率の計算値と地上測定値との比較を行った結果を Fig. 4-20 に示す。従来手法に比べて、ラドン弁別手法を適用した場合の方が空間線量率はやや低く算出される傾向にあった。ファクター2 の範囲に収まっているプロットの数に着目すると、従来手法で 65 % (全 20 点中 13 点) であったのに対し、ラドン弁別後では $GI = 31.8$ および $GI = 30.8$ で 70 % (全 20 点中 14 点)、 $GI = 29.8$ で 75 % (全 20 点中 14 点) であり、ラドン弁別手法の方がやや収まりが良くなった。また、ラドン弁別手法を適用した結果同士で比較すると従来法の知見通り、 GI を実測に基づく値よりも小さく設定した方が、地上測定値との整合が良くなった。しかしながら、地上測定地点数が少なく、適切な比較ができているとは言い難い面がある。

最後に、ラドン弁別手法で求めた空气中ラドン子孫核種の計数率が、評価対象外となる計数率を除去するのに有効な数値となり得るかを検証するため、従来手法において空气中核種フライトで求めた計数率と、 GI として基準値を用いてラドン弁別手法を適用して求めたラドン子孫核種由来の計数率を比較した (Fig. 4-21)。いずれも、従来手法における空气中核種フライトを実施した時刻および場所で取得した計数率データを基に算出したものである。本図には比較のため、福島原子力発電所事故に由来する放射性セシウムの影響がある程度含まれると考えられる、東日本第 12 次モニタリングのデータを同様に比較した結果についても示した。全体的にプロットにはばらつきが見られ、大飯・高浜においては、空气中核種フライトで取得した計数率よりもラドン弁別手法で求めた空气中ラドン子孫核種由来の計数率の方が 1.2 倍程度高くなった。このことが、大飯・高浜では従来手法よりもラドン弁別手法による空間線量率の計算値の方がやや低くなったことに寄与したと推察される。しかしながら、空間線量率マップの色合いが顕著に異なる程の差異に繋がるわけではない。大飯・高浜と東日本第 12 次モニタリングとの間に、空气中核種フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空气中ラドン子孫核種由来の計数率との関係性に顕著な違いが認められなかったことから、放射性セシウムの影響がある程度存在するような環境下においても、ラドン弁別手法によって従来手法とほとんど同等の精度で、空間線量率マップを作成するにあたって評価対象外となる計数率の推定が可能であることが示唆される。

以上のことから、ラドン弁別手法による空間線量率の計算値および空气中ラドン子孫核種に起因する計数率等の評価対象外となる計数率の減算の精度は、従来手法によるものと同様以上の精度を有していると言える。従来手法では空气中核種フライトにより得られた計数率を、その日の測定エリア全体における、評価対象の計数率の代表値として扱うことから、特に、測定エリア近傍における地殻から放出される空气中ラドン子孫核種由来の計数率を適切

に除去できない可能性が高い。一方、ラドン弁別手法では、各測定点における全計数率から、空气中ラドン子孫核種（遠方からの輸送および近傍の地殻から放出されたものを含む）に起因する計数率を切り出して除去できる点に強みがある。ラドン弁別手法の信頼性を確立させることができれば、空气中核種フライトが不要となり、航空機モニタリングの測定時間やデータの解析評価に掛かる時間の短縮等の効率化に寄与することとなる。よって、ラドン弁別手法の更なる高度化と信頼性の向上に係る検討を重ねていく必要がある。

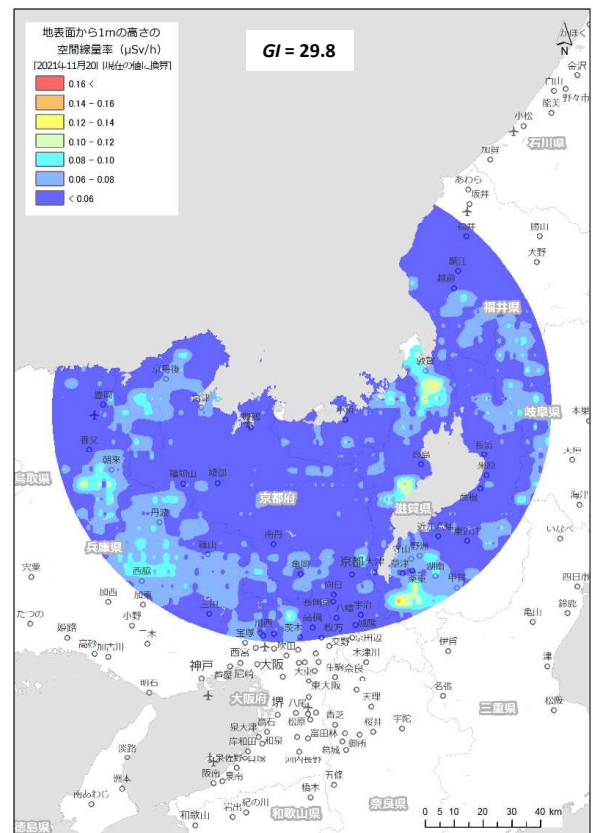
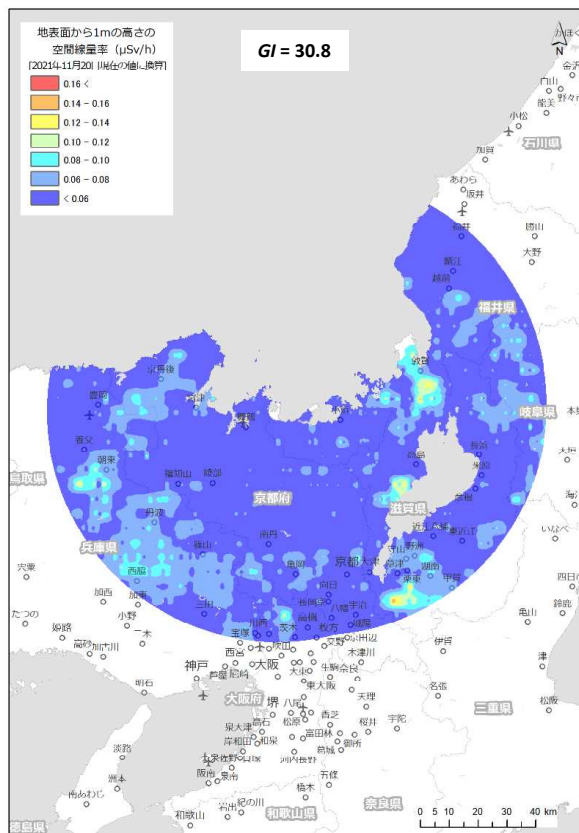
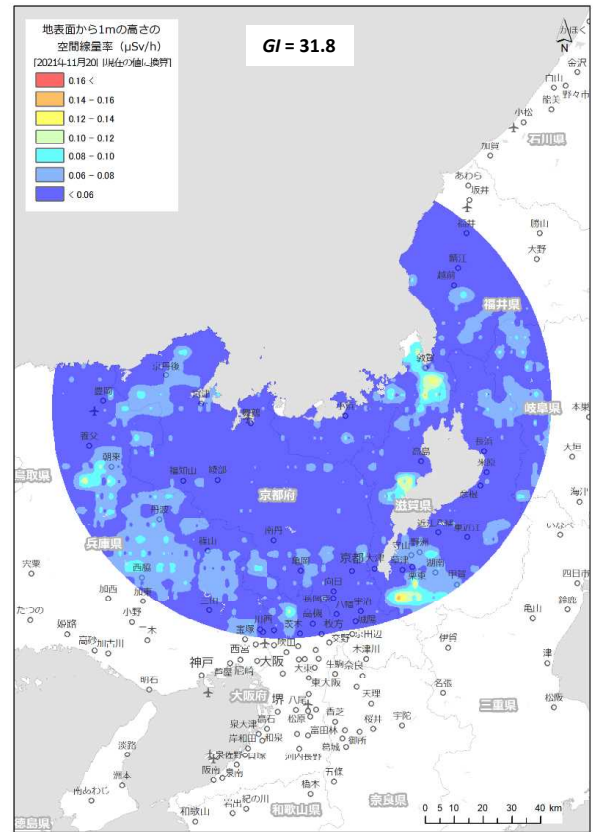
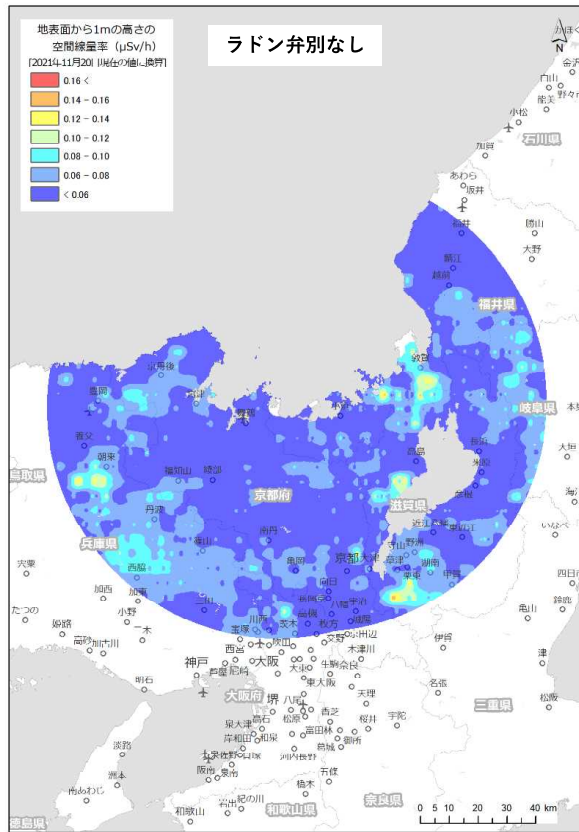


Fig. 4-17 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

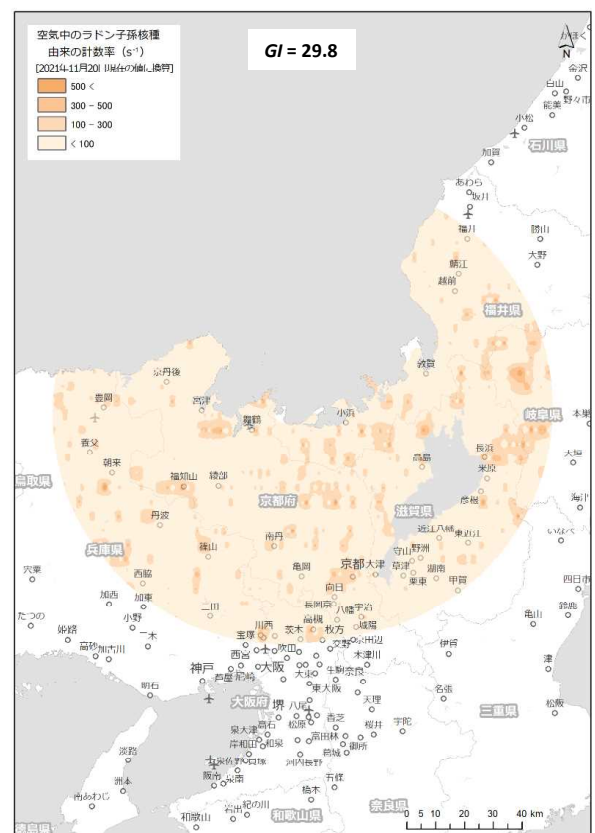
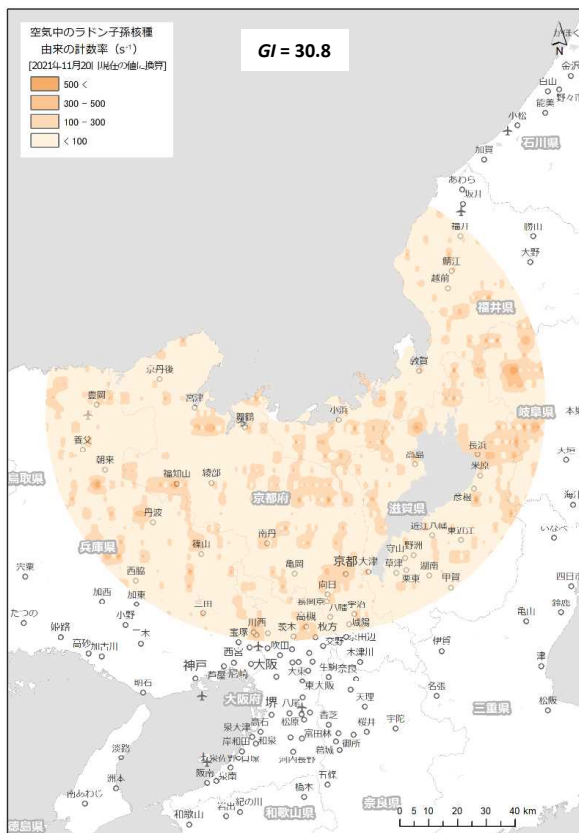
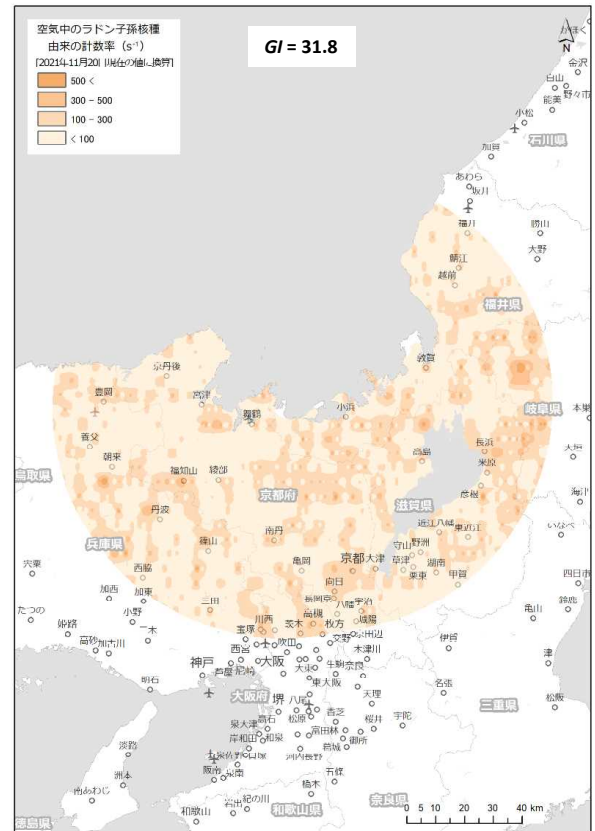
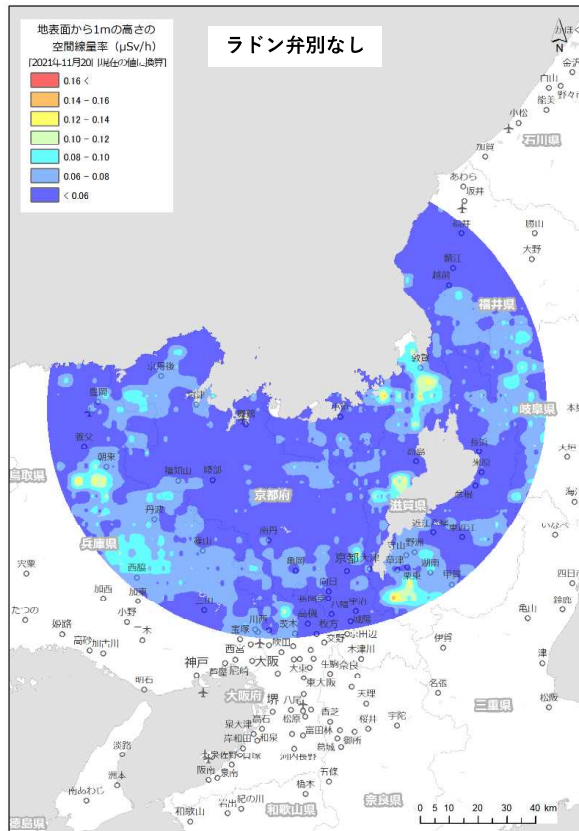


Fig. 4-18 空气中的ラドン子孫核種起源の計数率マップ
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

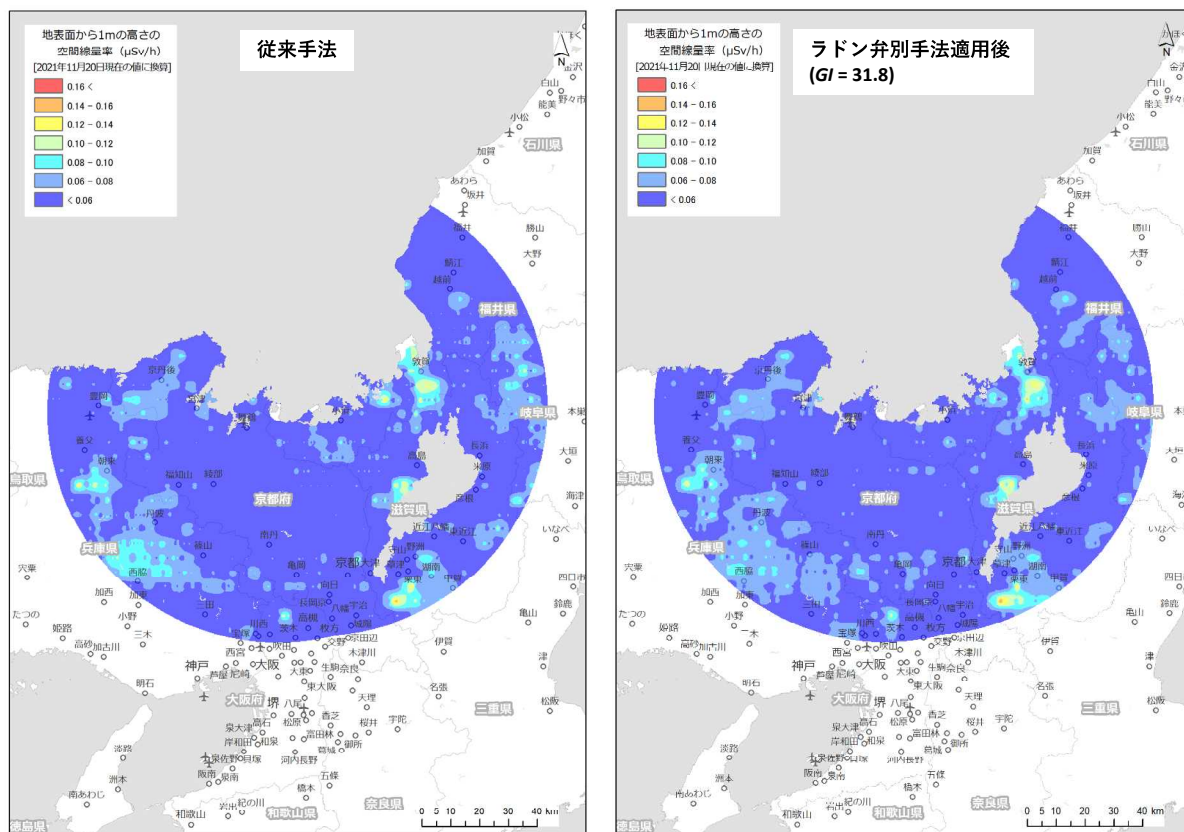


Fig. 4-19 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ比較
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

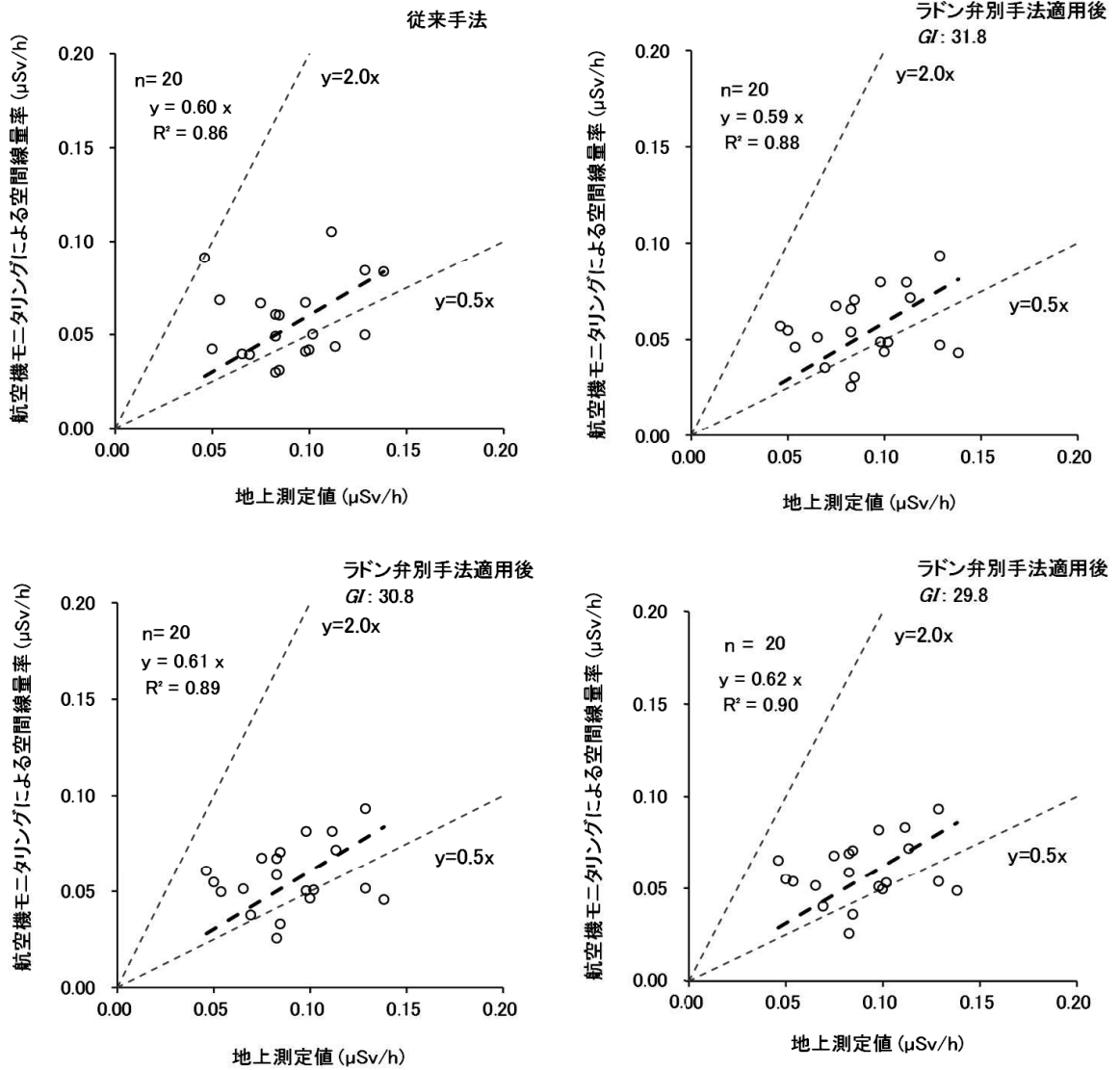


Fig. 4-20 従来手法およびラドン弁別手法による空間線量率の計算結果と地上測定値との比較

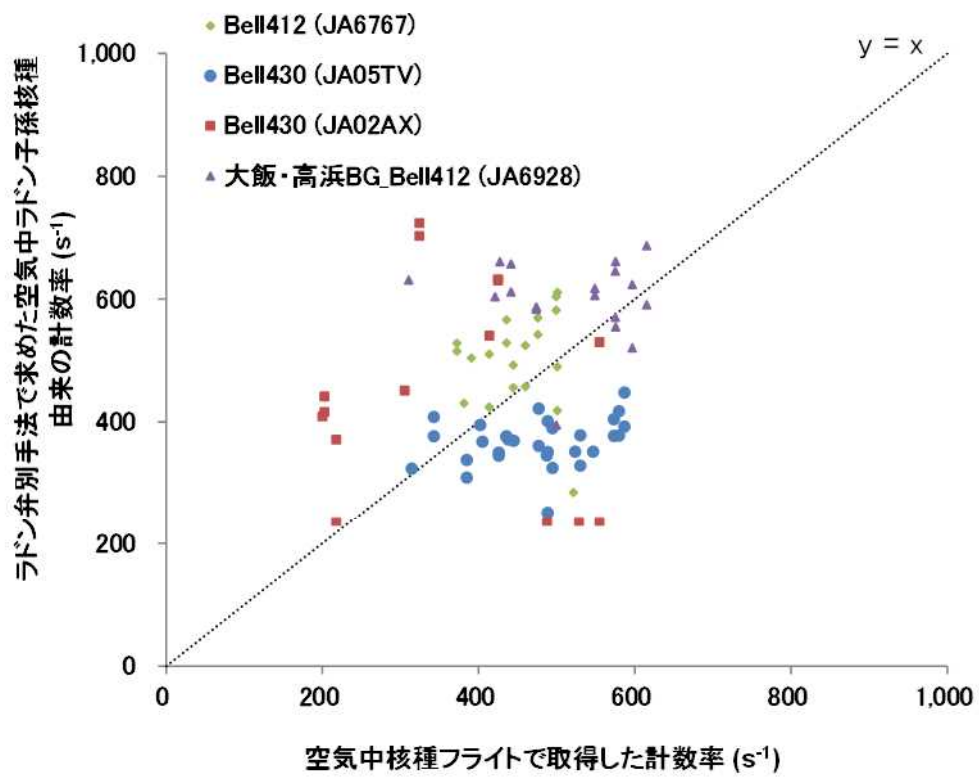


Fig. 4-21 空気中核種フライトで取得した計数率とラドン弁別手法で求めた空気中ラドン子孫核種由来の計数率の比較

4.6. 放射性セシウムの沈着量

大飯・高浜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. 4-22 に示す。このように、全範囲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およびマップの色合いの設定については、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリング¹⁶⁾と同様とした。

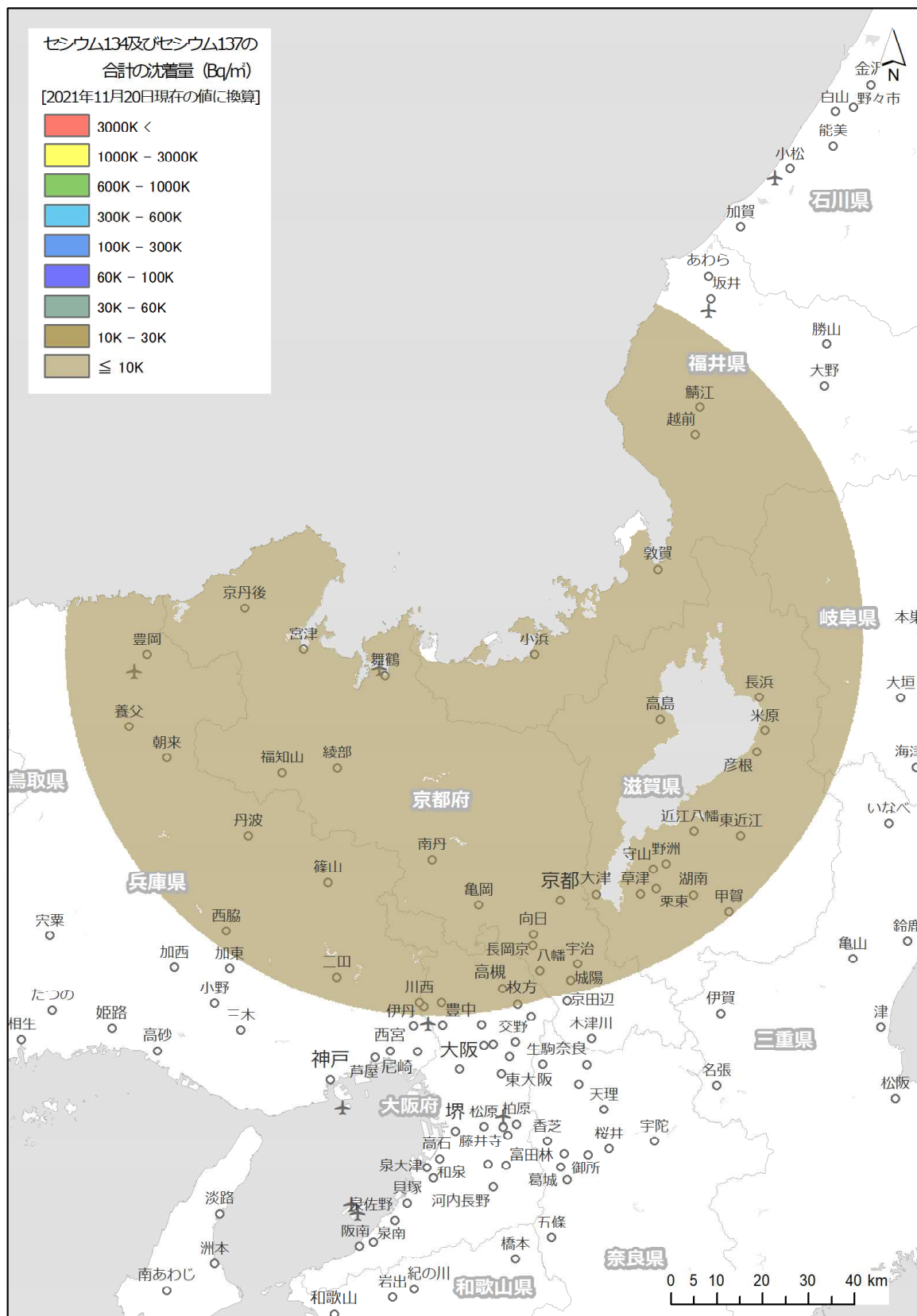


Fig. 4-22 放射性セシウム沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパンデータ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

5. 原子力防災訓練における緊急時航空機モニタリング

5.1. 概要

原子力機構は原子力災害時等の緊急時に人的および技術的支援を行うことが要求されている。緊急時における実効性のある原子力防災対策の基盤整備に貢献するため、原子力機構は内閣府が主導する原子力総合防災訓練等に参画してきた。1章で触れたとおり、緊急時モニタリングの一環として、航空機モニタリングを実施することが原子力災害対策マニュアルに定められている。緊急時における航空機モニタリングの実効性向上に資するため、原子力機構は原子力総合防災訓練等において原子力規制庁（以下、規制庁）および防衛省（自衛隊）と連携して航空機モニタリングを実施してきた（Table 5-1）。平成28年度（2016年度）には、航空機モニタリング訓練として千葉県富津市において航空機モニタリングを実施した。平成29年度には原子力総合防災訓練において玄海を対象サイトとして長崎県壱岐市周辺をモニタリングした。平成30年度には原子力総合防災訓練および北海道原子力防災訓練において大飯・高浜および泊を対象サイトとして、滋賀県高島市周辺および北海道小樽市周辺においてモニタリングを実施した。令和元年度には原子力総合防災訓練において島根を対象サイトとして、鳥取県米子市、南部町および島根県安来市周辺をモニタリングした。なお、令和2年度については、原子力総合防災訓練において、東北電力女川原子力発電所（以下、女川）を対象サイトとして宮城県登米市南部から松島町周辺にかけてモニタリングする予定であったが、新型コロナウイルス感染症に関する緊急事態宣言の発令に伴い、当該訓練自体が中止となった。

本章では、令和3年度の原子力防災訓練等における緊急時航空機モニタリングの概要および本訓練で得られた実働上の課題について述べる。本年度には、北海道原子力防災訓練および原子力総合防災訓練（対象サイト：女川）の2件で緊急時航空機モニタリングの実施要請があった。北海道原子力防災訓練については防衛省（陸上自衛隊）から航空機モニタリングシステムの使用許可が得られなかったため、モニタリングは実施せず、事前に策定したフライトプランに沿ってフライトするのみに留まった。原子力総合防災訓練については防衛省（航空自衛隊）から航空機モニタリングシステムの使用許可が得られており、モニタリングを実施する予定であったものの、当該訓練の実施日の直前に、対応者に新型コロナウイルス感染症の罹患者が認められたため実施を見送った。上記の原子力防災訓練等において実質的に航空機モニタリングは実施できなかったため、航空機モニタリングシステムをヘリコプターにより円滑に搭載するための改善点と当該システムを使用するに当たって乗り越えるべき課題を、北海道原子力防災訓練の対応例を中心に取りまとめた。

Table 5-1 原子力総合防災訓練等における航空機モニタリング実施状況

訓練名 (実施日時)	対象サイト (モニタリング地域)	使用機体 (所有部隊)	機体の 離発着地点
航空機モニタリング訓練 (2016年11月7日)	なし (千葉県富津市)	CH-47 (陸上自衛隊木更津駐屯地)	千葉県 木更津駐屯地
平成29年度 原子力総合防災訓練 (2017年9月4日)	玄海 (長崎県壱岐市)	UH-60 (航空自衛隊芦屋基地)	福岡県 芦谷基地
平成30年度 原子力総合防災訓練 (2018年8月26日)	大飯・高浜 (滋賀県高島市)	UH-60 (航空自衛隊小松基地)	石川県 小松基地
平成30年度 北海道原子力防災訓練 (2018年10月22日)	泊 (北海道小樽市から余市郡 赤井川村)	UH-1J (陸上自衛隊丘珠駐屯地)	北海道 丘珠駐屯地
令和元年度 原子力総合防災訓練 (2019年11月8日～10日)	島根 (鳥取県米子市、南部町、 島根県安来市)	UH-60 (航空自衛隊芦屋基地)	島根県 美保基地
令和2年度 原子力総合防災訓練 (2021年2月7日)	女川 (宮城県登米市から松島 町)	新型コロナウイルス感染症に関する緊急事態宣言の発令に伴い、中止となった。	
令和3年度 北海道原子力防災訓練 (2021年10月27日～28日)	泊 (北海道小樽市から余市郡 赤井川村) ※フライトのみ実施	UH-1J (陸上自衛隊丘珠駐屯地)	北海道 丘珠駐屯地
令和3年度 原子力総合防災訓練 (2021年2月11日～12日)	女川 (宮城県登米市から松島 町)	訓練対応者に新型コロナウイルス感染症の罹患者が認められたため、中止となった。	

5.2. 原子力防災訓練等における航空機モニタリングに係る全体概要

令和3年度北海道原子力防災訓練における原子力発電所事故の想定⁶¹⁾を以下に示す。

『新型コロナウイルス感染症流行下において、後志地方に台風が接近及び上陸し、被害が発生する中、北海道電力株式会社泊発電所3号機において、原子炉の一次冷却材が漏えいし、原子炉が停止。複数の設備故障等により原子炉の冷却が不能となり、原子力災害に至る。』

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

向に拡散したと想定し、陸上自衛隊丘珠駐屯地を離発着点として、国道5号線に沿って小樽市までフライトし、小樽市から余市郡赤井川村近辺において距離約15kmの測線1～測線4をフライトした後、キロロリゾート付近で一度着陸し、陸上自衛隊員によってヘリコプター機体の汚染検査および除染作業を実施した後に丘珠駐屯地に帰着するプランとした (Fig. 5-1)。なお、基準対地高度は300m (≒1,000ft)、上限対地高度は530m (≒1,750ft)、下限対地高度は0mと設定した。航空機モニタリングシステムは緊急時モニタリング用ラック¹¹⁾に取付け、10月25日にNEATから丘珠駐屯地へ輸送した。10月27日に丘珠駐屯地で航空機モニタリングシステムを受領し、本訓練における使用ヘリコプターであるUH-1J (Fig. 5-2)に搭載し、ケーブル接続等を行った。搭載完了後の機材の外観をFig. 5-3に示す。

前述した通り、本訓練においては防衛省 (陸上自衛隊) から航空機モニタリングシステムの使用許可が得られなかったため、10月28日には航空機モニタリングシステムの電源を投入せずに、フライトのみを実施した。当日のフライトに係るスケジュールをTable 5-2に示す。NEATの訓練対応者は防塵マスク、タイベックスーツおよびシューズカバーを着用したうえでヘリコプターに搭乗した (Fig. 5-4)。フライト中、航空機モニタリングシステムが使用できないことから、対地高度はヘリコプターに装備された電波高度計によって取得し、パイロットとNEATの訓練対応者が密にコミュニケーションを取ることで、上記したフライトプランと対地高度の設定を遵守して、仮想的な緊急時航空機モニタリングを実施した。キロロリゾート付近で実施したヘリコプター機体の汚染検査および除染作業の様子をFig. 5-5に参考として示す。

Table 5-2 令和3年度北海道原子力防災訓練に係るタイムテーブル (2021年10月28日)

時刻	実施内容
10:30	フライト準備、ヘリコプター搭乗
11:00	丘珠駐屯地を離陸、国道5号線沿いおよび測線1～測線4をフライト
12:04	キロロリゾート近辺に着陸、ヘリコプターの汚染検査および除染作業
13:16	キロロリゾートを離陸
13:40	丘珠駐屯地に着陸

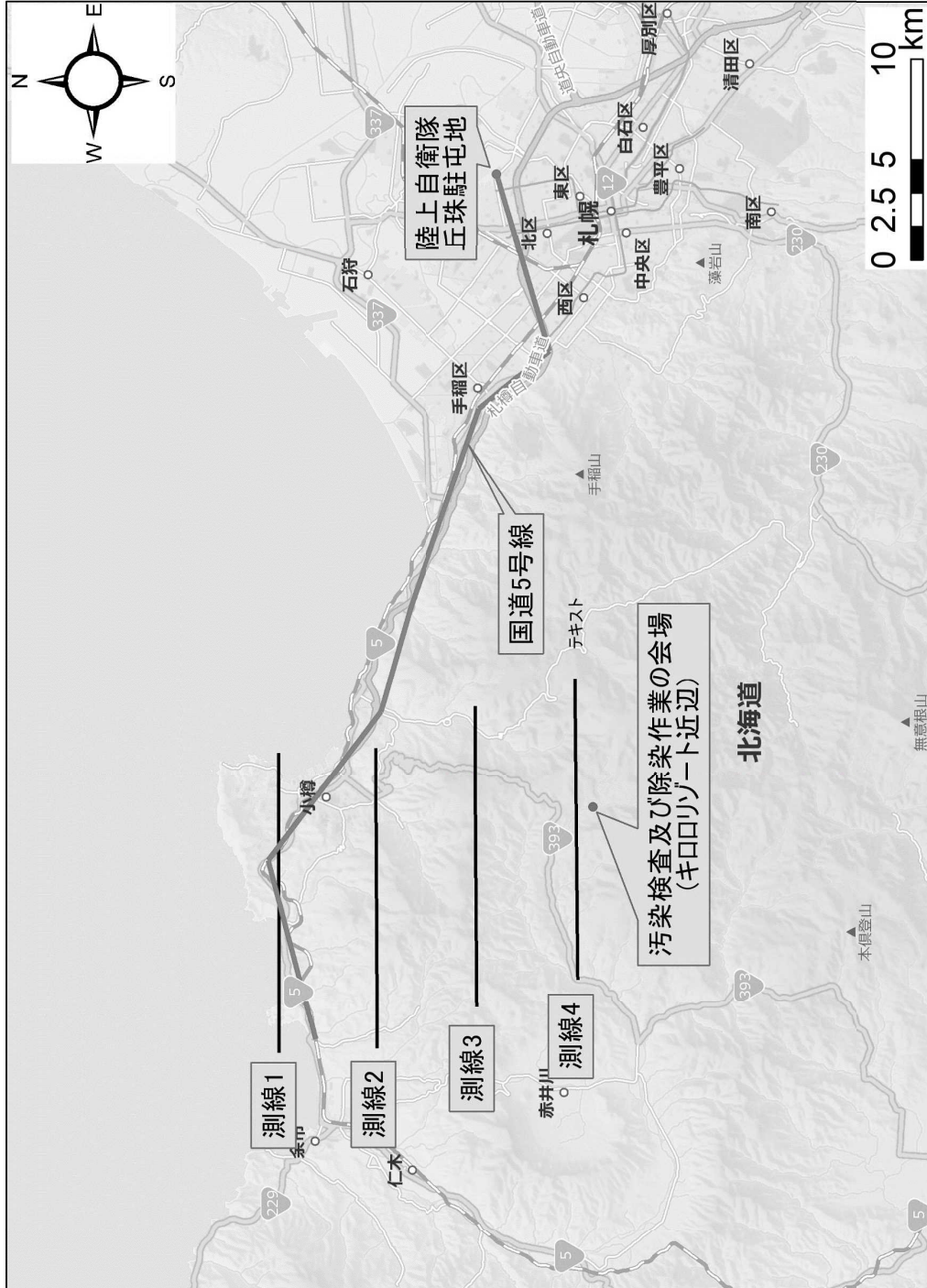


Fig. 5-1 令和3年度北海道原子力防災訓練におけるフライトプラン
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)



Fig. 5-2 令和3年度北海道原子力防災訓練において使用したヘリコプター (UH-1J)



Fig. 5-3 航空機モニタリングシステムの搭載状況



Fig. 5-4 NEAT の訓練対応者の装備



Fig. 5-5 ヘリコプターの汚染検査および除染作業の一幕

5.3. 訓練の総評と課題の抽出

令和3年度北海道原子力防災訓練で実施した各作業の総評と抽出した課題を以下にまとめる。

•航空機モニタリングシステムの輸送について

本訓練では民間の輸送業者により測定機材等の輸送を実施した。しかしながら、原子力災害時等においては、民間の輸送業者や自衛隊等の他機関から輸送に係る協力を得られない可能性もあるため、原子力機構が航空機モニタリングシステムをヘリコプターの離発着地点まで輸送する方法についても検討する必要がある。

•航空機モニタリングシステムのUH-1Jへの搭載について

搭載作業は丘珠駐屯地隊員からの協力の下に実施し、概ね30分程度で完了した。より迅速に本作業を完了させるために、以下の2点について注意するとともに、可能な限り改善に取り組む必要がある。また、リアルタイムデータ通信システム¹³⁾も搭載する場合、さらに作業時間を要する可能性が高い。適宜、航空機モニタリングシステムの設置要領を確認することが重要である。

- ① 航空機モニタリングシステム用ラックのボルト穴の位置と、2つのラックを連結するブリッジのボルト穴の位置がうまく合わず、ラックの連結作業がやや難航した。NEAT内で実施した事前練習では、広いスペースで当該作業を行いスムーズにクリアした工程であったため、難航するとは予想だにできなかった。よって、ヘリコプター機内の限られたスペースで当該作業を行うことを想定して事前練習に取り組むことが重要である。また、NEAT職員はインチ工具の取り扱いの習熟に努めることが必要である。
- ② 航空機モニタリングシステム用ラックはUH-60に対して容易に設置できるように設計、製作されたものである。UH-1Jに対しても容易に設置が可能となるような改造の検討を実施したが、ラックの構造強度の低下等が懸念され、改造が不可能であると結論した。そのため、UH-1Jにフィットするラックを別途、設計し製作することが望ましい。

•フライトについて

航空機モニタリングシステムの電源を投入できなかったため、NEATの訓練対応者にとってヘリの現在位置および対地高度の確認が困難であった。しかしながら、パイロットおよびコパイロットとNEATの訓練対応者が密にコミュニケーションを取ることで、航空機モニタリングに際してのフライトの注意点等を共有でき、有益な訓練が実施できたと考える。

•航空機モニタリングシステムの使用許可について

航空機モニタリングシステムの使用許可が得られなかった原因として、当システムから発せられる電磁ノイズが、UH-1Jに装備されている計器に及ぼす影響の度合いが不明確であったことが挙げられる。本課題を解決するため、陸上自衛隊補給統制本部において電磁干渉試験を実施し、上記した影響の度合いを明確化したうえで、陸上幕僚監部から正式にUH-1Jに対する航空機モニタリングシステムの使用許可を得ることが必須である。

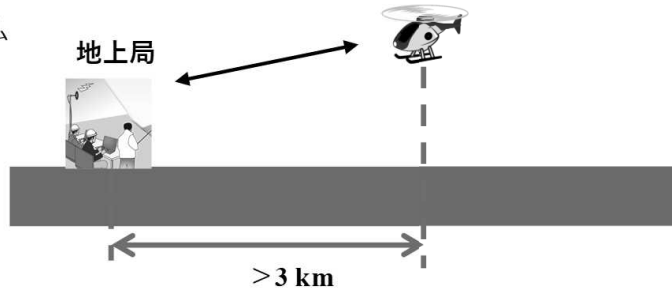
6. 無人飛行機による放射線モニタリングを想定した要素技術試験

6.1. 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¹⁸⁾」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^{23),24)}。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⁶¹⁾。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等の特長がある。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. 6-1)。また、時系列な対応課題の抽出も重要である。Fig. 6-2に想定される原子力発電所事故の例と福島原子力発電所周辺で運用されているヤマハ発動機社製の無人ヘリコプターに想定される対応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。令和2年度は、福島ロボットテストフィールドでのフライト試験を通して、Penguin Cの運用のための手順確認や放射線検出器の搭載方法の検討を実施した。令和3年度は、引き続き、福島ロボットテストフィールドおよび青森県の飛行フィールドでのフライト試験を通してPenguin Cの運用のための慣熟訓練を実施するとともに、原子力防災時に必要となる機能等について検討を行った。

- ★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

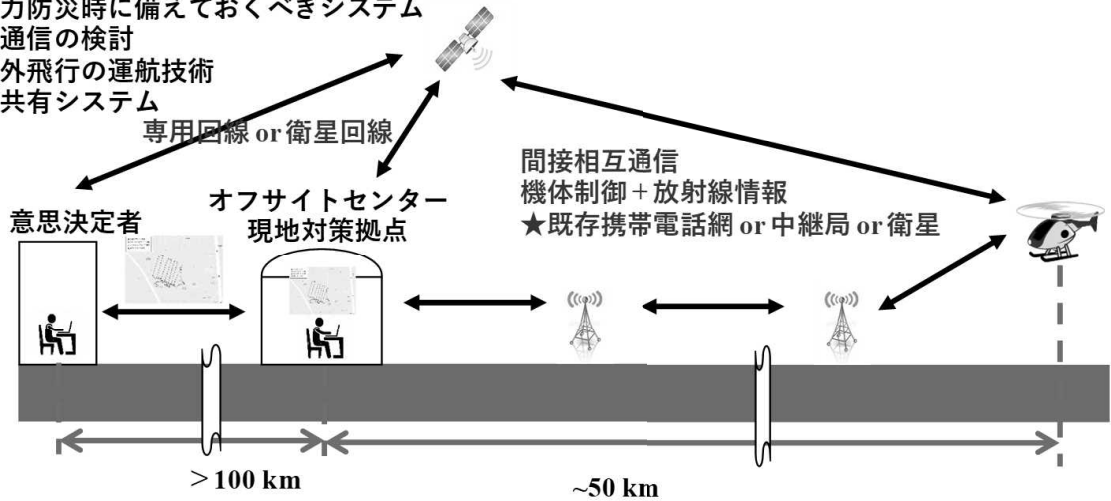


Fig. 6-1 既存の無人機によるシステムと原子力災害時に備えるべき無人機システムのイメージ

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	18-24
原子力施設事故対応例	▽14:00 地震発生			★敷地外への放射性物質放出の確認			▽16:00 全面緊急事態			
	▽16:00 施設敷地緊急事態 PAZ避難準備・実施			▽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		→ 移動・飛行準備 1h		→ 敷地境界のフライト 20h		→ UPZ内のフライト 20h
		※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)		★OIL1, 2区域の特定		
理想的な無人機システムによる運用想定						※UPZ外からの操縦不可能 (操縦範囲2 km ~ 3 km)				

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

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

Fig. 6-2 原子力発電所事故を例にした対応シミュレーション

6.2. 無人機の開発状況

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 Table 6-1 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原子力機構と JAXA が共同開発している UARMS があり、航続時間 6 時間で中継器を用いた 20 km 以遠からのオートパイロットの操縦実績があり、原子力防災への適用機種として有力候補である。本機体は実用機の試験段階で製品化はされていないが、日本のメーカーが開発に一から携わっていることから細かい部分のカスタマイズが可能など強みがある。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が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。

Table 6-1 代表的な無人機の概観とスペック

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

6.3. Penguin C のカタログ性能

選定した Penguin C の概観およびカタログ性能について、それぞれ Fig. 6-3 および Table 6-2 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 6-3 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 (PCC) で事前に作成したフライトプランにより飛行可能である。
- (5) 同機種によるフライトの実績が 100 時間を超え、墜落事故に対する平均故障間隔 (MTBF) が評価されていること。
Penguin C の通常のフライト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 6-4 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。

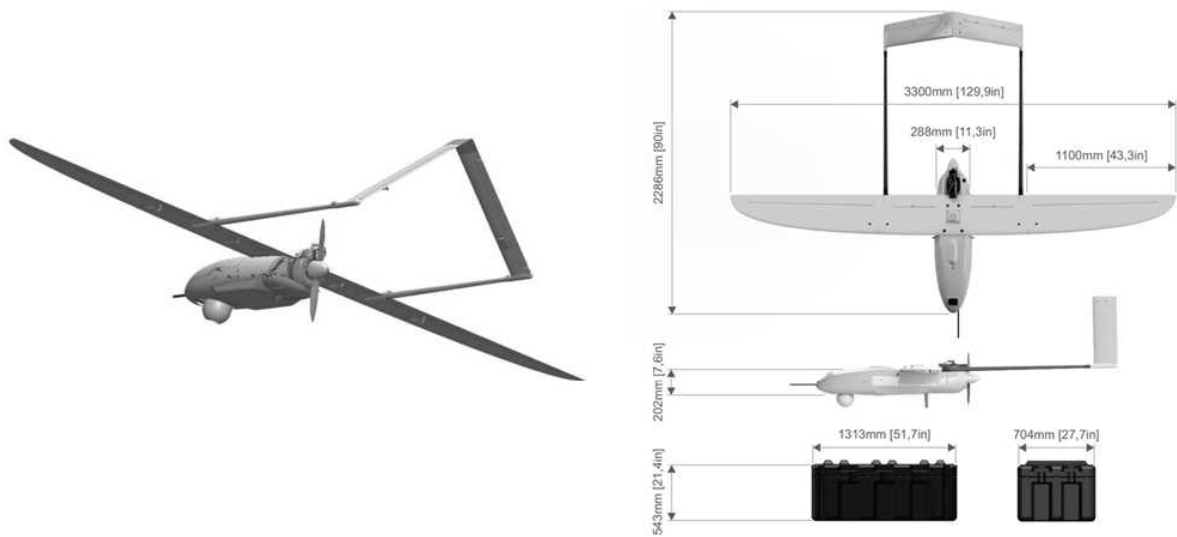


Fig. 6-3 Penguin C の概観

Table 6-2 Penguin C 機体のカタログスペック

機体の仕様	
翼幅	3.3 m
最大離陸重量 (MTOW)	23 kg
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 6-3 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 (以下、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

Table 6-4 UAV Factory における平均故障間隔計算時の事故分類

<p>アクシデント (偶然の事故)</p> <p>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</p>	<p>インシデント (人為的な事故)</p> <p>MTBF の対象として分類されないもの</p>
<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 ・ 制御不能な要因による損傷：戦争、ストライキ、暴動、犯罪、落雷、他の航空機との衝突など、当事者が制御できない異常な出来事または状況が発生した場合に両当事者の責任または義務を根本的に免除するもの。

6.4. 地上試験および飛行試験の実績

Penguin C を用いた地上試験 (6.5 節に詳述する) および飛行試験について、実施日および各試験内容を Table 6-5 に示す。なお、本試験は、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 に委託した。8 月 23 日には、飛行準備のための機器の組み立て時に手順ミスが発生し、天候不順以外の理由でフライトを延期させることになったものの、翌日には復旧し、飛行試験の実施が可能となった。

Table 6-5 2021 年度に実施した飛行試験

試験日		実施場所	試験内容	フライト No.
6 月 7 日	(月)	福島ロボット テストフィールド (福島県南相馬市) RTF	地上試験	天候不良のため飛行見送り
6 月 8 日	(火)		地上試験、飛行試験 1 回	2021-1
6 月 9 日	(水)		地上試験、飛行試験 1 回	2021-2
6 月 10 日	(木)		地上試験、飛行試験 2 回	2021-3 2021-4
6 月 11 日	(金)		機器点検	-
8 月 23 日	(月)	福島ロボット テストフィールド (福島県南相馬市) RTF	地上試験	組み立て時のエンジン不調 のため飛行見送り
8 月 24 日	(火)		地上試験、飛行試験 1 回	2021-5
8 月 25 日	(水)		地上試験、飛行試験 2 回	2021-6 2021-7
8 月 26 日	(木)		機器点検	-
8 月 27 日	(金)		機器点検	-
10 月 11 日	(月)	岡山牧場 (青森県上北郡 横浜町) OYF	移動日	-
10 月 12 日	(火)		地上試験、飛行試験 1 回	2021-8
10 月 13 日	(水)		地上試験	強風のため飛行見送り
10 月 14 日	(木)		機器点検	-
11 月 29 日	(月)	福島ロボット テストフィールド (福島県南相馬市) RTF	地上試験、飛行試験 2 回	2021-9 2021-10
11 月 30 日	(火)		地上試験、飛行試験 1 回	2021-11
12 月 1 日	(水)		地上試験、飛行試験	荒天のため飛行見送り
12 月 2 日	(木)		地上試験	-
12 月 3 日	(金)		機器点検	-

6.5. 地上における機体の基礎データ取得試験

6.5.1. 地上における機体基礎データ取得試験結果

Penguin C を用いて実施した、地上での機体基礎データ取得試験により得られた結果について、以下 1) ~6) の 6 項目を記す。

1) GCS と機体のデータ通信が正常に行えるか。通信時のデータ通信量はどの程度であるか。

GCS と機体のデータ通信は、GCS によって制御されている。通信状況については、機体へのコマンド送信に対する物理的な操作確認に加え、GCS で操作するソフトウェアである Copilot およびアンテナのソフトウェア上にて数値およびグラフィックにて視覚的に確認することができる。試験中、通信エラーを起因とするデータ送受信の異常や動作不具合は発生しなかったことから、データ通信は良好であり正常に機能していたと判断する。

データ通信量は、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、2 kbps である。

2) 地上 200 m 以上の離隔距離において、GCS と機体の通信が行えるか。

GCS と機体のデータ通信が可能な距離を確認するため、GCS と機体の直線距離を約 210 m 離しての機体操作を実施した (Fig. 6-4)。トラッキングアンテナは GCS 側に設置し、キャリブレーションを完了させた状態で使用した。機体の動作確認については、GCS から各翼の舵面の作動とスロットルの開閉をコマンドとして送信後、正常に動作していることを目視にて確認することで行った。いずれの動作においてもコマンド送信後に反応の遅延や異常は見られなかった。また、コマンド送受信に方向特性の有無を確認するために、機体の向きを東西南北の各方向へ向けて同様の各動作確認を実施したが、コマンド送信時の動作に異常は認められず、方向特性はないことが確認された。

上記の離隔距離 200 m での良好な結果を踏まえ、実際の飛行試験と同条件下において GCS と機体の離陸地点が取り得る離隔距離について検証を行った。本検証は、2021 年 6 月に福島ロボットテストフィールド (以下、RTF) における飛行試験の一環として実施した。RTF における飛行試験当日の風向および風速を加味して、コマンド送受信が正常に行うことができ、かつ機体が安全にフライト可能な GCS と機体の離隔距離は最大で 450 m 程度と見積もられた (Fig. 6-5)。RTF の広さに制約があるため、それ以上の距離を取った場合についての検証はできなかったが、実際に離隔距離を 450 m とした時、離陸前に地上で実施するプリフライトチェックにおいて通信エラーは特段発生せず、離陸に支障はなく、かつ安全にフライトできることを確認した。

以上のことから、RTF において GCS と機体の離隔距離は少なくとも 450 m まで取ることが可能であると確認された。

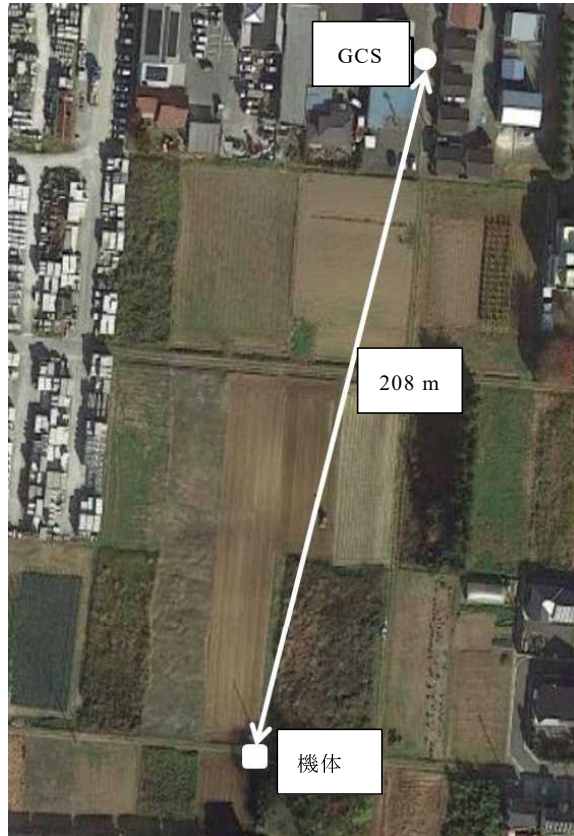


Fig. 6-4 通信試験の実施地点



Fig. 6-5 飛行試験時の離隔距離

3) GCS からの操作信号により、パラシュートおよびエアバッグが作動するか。

パラシュートおよびエアバッグを作動させるために、パラシュートカバーピンの挿抜およびパラシュートサーボの駆動の2点が、GCS から送信されたコマンドに従って実行される。パラシュートカバーピンについては、GCS によるコマンド送信後 (Fig. 6-6)、機体側で作業を行うテクニシャンが目視でピンがカバー上のホールを遅滞なく抜き挿しできてい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. 6-7)。パラシュートサーボはパラシュートカバーピンを操作する役割を持つ。GCS からのコマンドに従って作動しているか否かの判断は、サーボ駆動音の有無によって確認する。エアバッグについても同様に、エアバッグカバーピンの挿抜と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音を確認する。

以上の一連の動作確認は、地上試験に加えて飛行前に行うプリフライトチェックにおいても点検項目として含まれており、試験の際には必ず実施されるものである。これらの点検の結果、ピンが動かない等の異常は見られず、GCS からのコマンドによりパラシュートおよびエアバッグが正常に作動していることを確認した。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が手動で操作する必要はない。

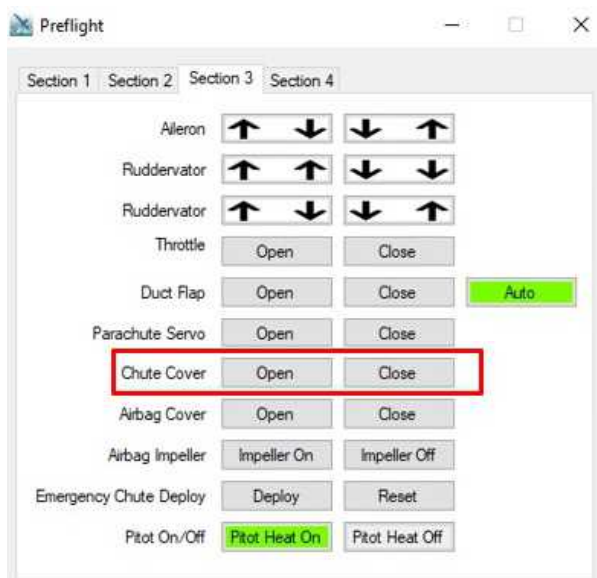


Fig. 6-6 CoPilot 操作画面



Fig. 6-7 正常位置にあるパラシュート
カバーピン

4) GCS からのコマンドにより、ラダーやエルロンの操縦が遅滞なく行えるか。

Penguin C は尾翼に V テールが採用されており、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。補助翼 (エルロン) は一般的な飛行機のように主翼に取り付けられている。

エルロンおよびラダーベーターの操縦には CoPilot を使用する。3) のパラシュートおよびエアバッグの場合と同様に、プリフライトチェックにて動作確認を実施する。また、エルロ

ンおよびラダーベーターの操縦はフライト中にオートパイロットによる制御へと切り替わる。プリフライトでの動作確認時には、GCS を操作しているオペレーターが舵面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舵面を指で掴んで動作確認を行う。オペレーターはコマンドと作動箇所の一致を確認し、次の舵面の確認へと移る。このとき、CoPilot にて各舵面の電流インジケータを表示し (Fig. 6-8)、電流が正常範囲内に収まっていることを確認する。

試験実施期間中すべての試験において、GCS からのコマンド送信によるエルロンおよびラダーベーターの動作確認を実施した結果、指示された舵面が動かない等の異常は見られず、GCS からのコマンドにより正常に作動することを確認した。

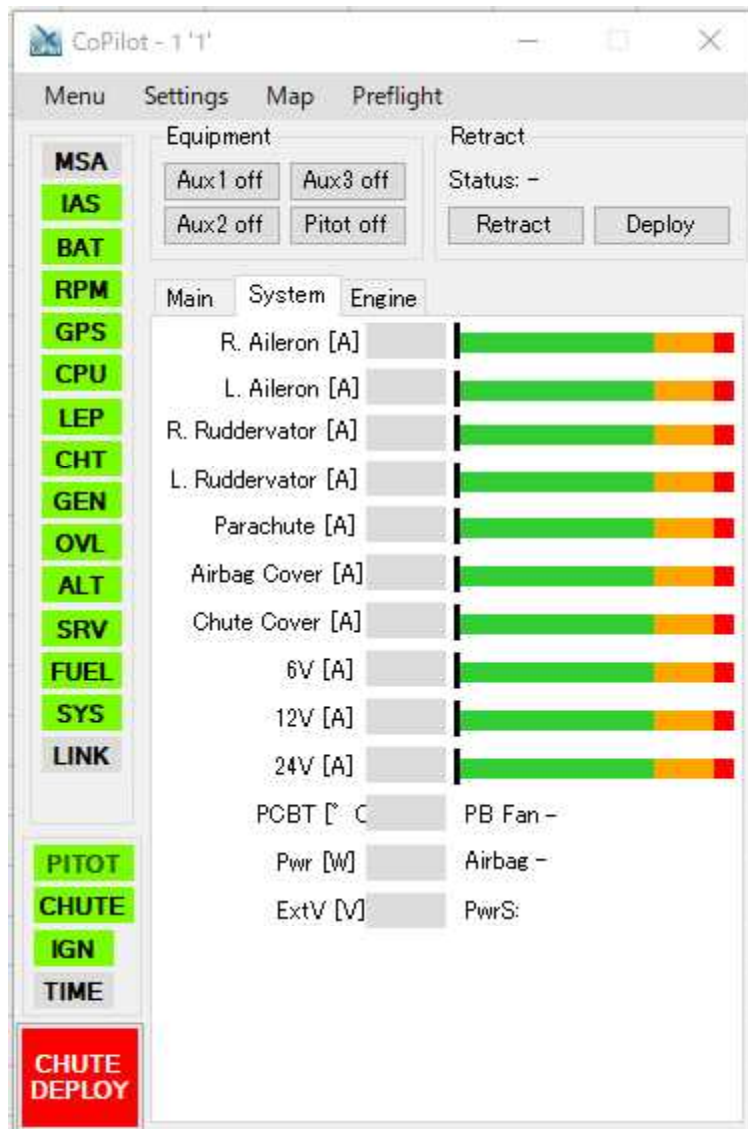


Fig. 6-8 CoPilot 舵面インジケータ

5) GCS からのコマンドにより、エンジンの回転数が遅滞なく上昇および下降するか。

GCS からのエンジンの操作は CoPilot を通して行う。グラウンドランまたはプリフライトチェックのチェックリストに従って作業を実施する。GCS での操作によって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、オペレーターはエンジン回転数が遅滞なく上昇および下降することと、その値が正常であるかをインジケータにて確認する (Fig. 6-9)。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。なお、エンジンの回転数も舵面等と同様に、フライト中はオートパイロットによる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。

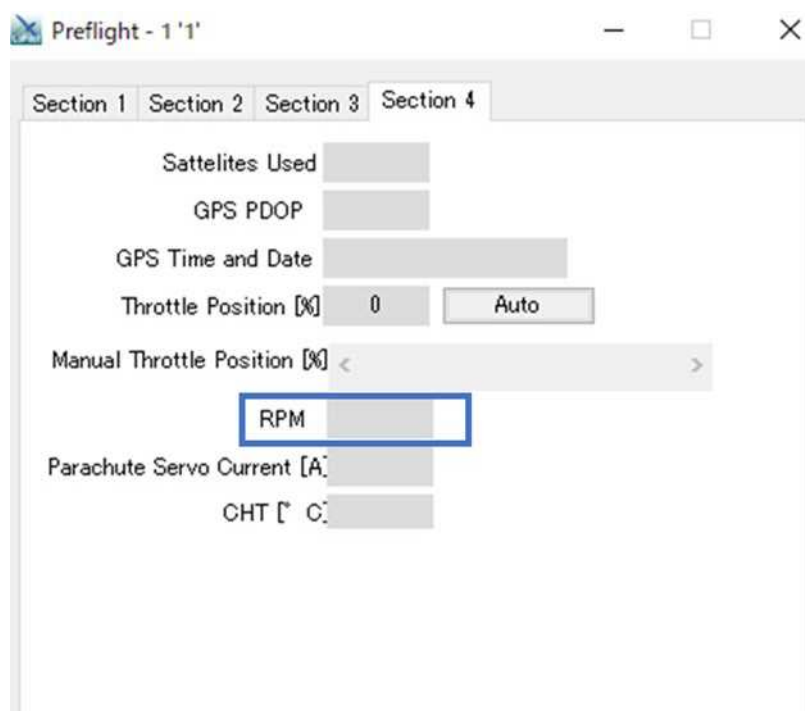


Fig. 6-9 CoPilot RPM 表示箇所

6) 異常時の警告が遅滞なく表示等されるか。

機体に異常が生じた場合には、CoPilot に列挙されている機体の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 (Fig. 6-10、Fig. 6-11)、同時に該当機器を読み上げる音声(「エンジン」等) が流れる。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過ごしを防ぎ、迅速に対応策を取るために設けられた機能である。

警告の表示および音声の確認はプリフライトチェック実施と同時に行う。まず、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回転数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、既定の手順により機体の離陸体制を整えるうちに異常なしの状態へ戻り、最終的にすべての警告表示が消えたことが確認してから離陸する。

試験実施期間中の全試験において、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。

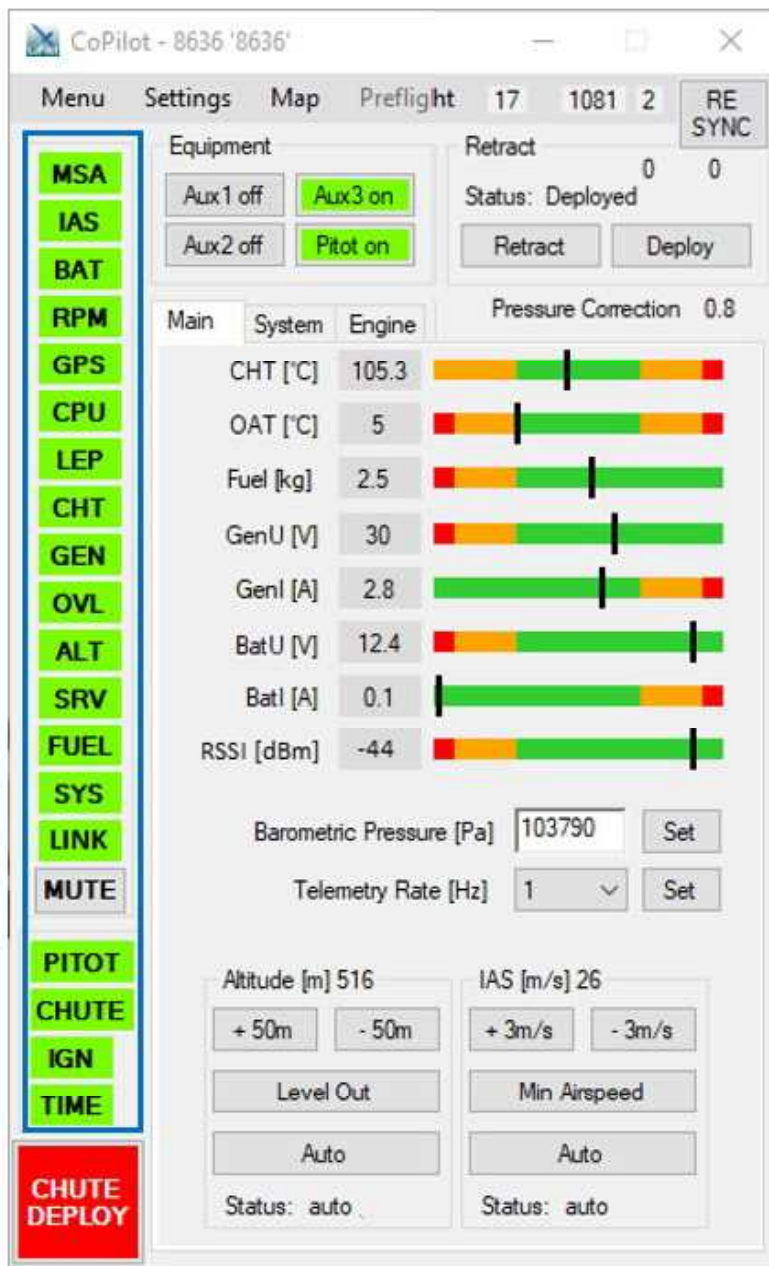


Fig. 6-10 警告表示箇所 (青色の四角枠)

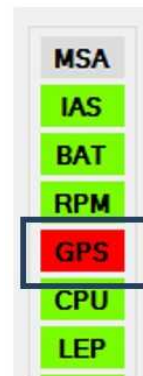


Fig. 6-11 警告表示の例

6.5.2.機体健全性確認の点検手順書

Penguin C の機体が正常に機能していることの確認を目的とした『機体健全性確認の点検手順書』を作成した(Appendix 4-1)。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。本手順書に従う点検はフライト実施予定の前週等を目安に、フライトまでに余裕をもって行うものとする。点検の結果、必要があれば部品の交換を実施し、該当箇所に係る点検工程を再度実施して問題なく作動することを確認し、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を事前に完了していることを前提とした飛行前の最終確認であり、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。点検内容詳細については Appendix 4-2 に示す。

6.5.3.定期保守点検手順書

Penguin C の定期保守点検については、メーカーである UAV factory が作成している各機器のマニュアルに点検頻度や内容が記されている。それらのマニュアルを基に、点検業務の効率化と情報の一元化を目的として『定期保守点検手順書』を作成した(Appendix 4-3)。本書は、機体のカバー類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 運用に関係するすべての機器について網羅されている。本手順書に基づく点検頻度は、メーカー指定の通り、5 回のフライト毎に 1 回または対象機体を用いてフライトを行っていない場合には毎月とする。

6.6. フライト中の機体データ取得のための試験

Penguin C を用いて実施した、フライト中の機体データ取得試験により得られた結果について以下に記す。

1) フライト回数

1 時間フライト：10 回

6 時間フライト：1 回

以上、計 11 回実施した。

2) 飛行試験データ

飛行試験のデータ一覧を Table 6-6 に示す。

Table 6-6 飛行試験のデータ一覧

項目	観測値											
	6月8日	6月9日	6月10日	6月10日	8月24日	8月25日	8月25日	10月12日	11月29日	11月29日	11月29日	11月30日
日付 (2021年)	2021-1	2021-2	2021-3	2021-4	2021-5	2021-6	2021-7	2021-8	2021-9	2021-10	2021-11	2021-11
フライト番号	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	RTF	OYF	RTF	RTF	RTF	RTF
試験地												
天候	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ
外気温 (°C)	23	22	24	24	26	28	31	19	14	13	14	14
風速/離陸 (m/s)	0	3	4	5	0	1.5	0	1.5	1	0	1.2	1.2
風速/着陸 (m/s)	2	5	4	6	2	3.0	0	1.5	1.6	1	1	1
風向/離陸 (°)	190	162	160	170	160	207	180	206	210	210	210	210
風向/着陸 (°)	170	160	160	160	200	180	180	135	210	210	210	180
気圧 (hPa)	1013	1015	1020	1019	1010	1006	1008	1080	1030	1027	1024	1024
離陸時間	10:44	13:58	10:19	14:33	11:22	11:02	14:10	12:02	10:40	14:16	10:45	10:45
着陸時間	16:46	15:45	11:34	16:09	12:31	12:27	15:20	13:22	12:00	15:35	11:55	11:55
飛行時間	6時間2分	1時間47分	1時間15分	1時間36分	1時間9分	1時間25分	1時間10分	1時間20分	1時間20分	1時間19分	1時間10分	1時間10分
機体番号	PNC0056	PNC0056	PNC0056	PNC0056	PNC0056	PNC0056	PNC0056	PNC0056	PNC0056	PNC0094	PNC0056	PNC0056
エンジン番号	EFI-1	EFI-1	EFI-1	EFI-1	EFI-1	EFI-1	EFI-1	EFI-1	EFI-1	EFI-2	EFI-1	EFI-1
ペイロード	検出器	検出器	検出器	検出器	検出器	検出器	検出器	無し	検出器	カメラ	検出器	検出器
離陸重量 (kg)	20.64	19.64	19.64	19.64	20.08	18.04	18.04	19.54	19.75	19.67	19.69	19.69
搭載燃料 (kg)	3.00	2.00	2.00	2.00	2.04	2.00	2.00	2.00	2.06	2.02	2.00	2.00
消費燃料 (kg)	1.72	0.62	0.58	0.47	0.44	0.52	0.44	0.51	0.56	0.52	0.5	0.5
MaxRPM	6438	6335	6285	6348	6308	6656	6264	6301	6179	6665	6169	6169

6.6.1. 気象データ

UAVに限らず、飛行体の事故が発生するタイミングは離発着時に多い。特に本機体は着陸時、パラシュートで自由落下するため、地表面において急な突風があると機体の制御が利かず、事故を誘発する。このような事故を防止するために、本機体を実際に運用する時は、離発着地点の詳細な気象データを得て、その情報を基に離発着のタイミングを選択する必要がある。ここでは、市販されている気象計の基礎性能について確認した。

試験実施中に気象計 (Kestrel 製, 5500 Link Weather Meter) により、飛行試験期間中の気温、湿球温度、相対湿度、気圧、高度、定点気圧、風速、ヒートストレスインデックス、露点湿度、密度高度、風速 (横風)、風速 (向かい風)、方位 (磁北)、方位 (真北)、体感温度の 15 項目を 1 分おきに記録した。気象データの取得例として、Fig. 6-12 に 2021 年 6 月 7 日の例を示す。

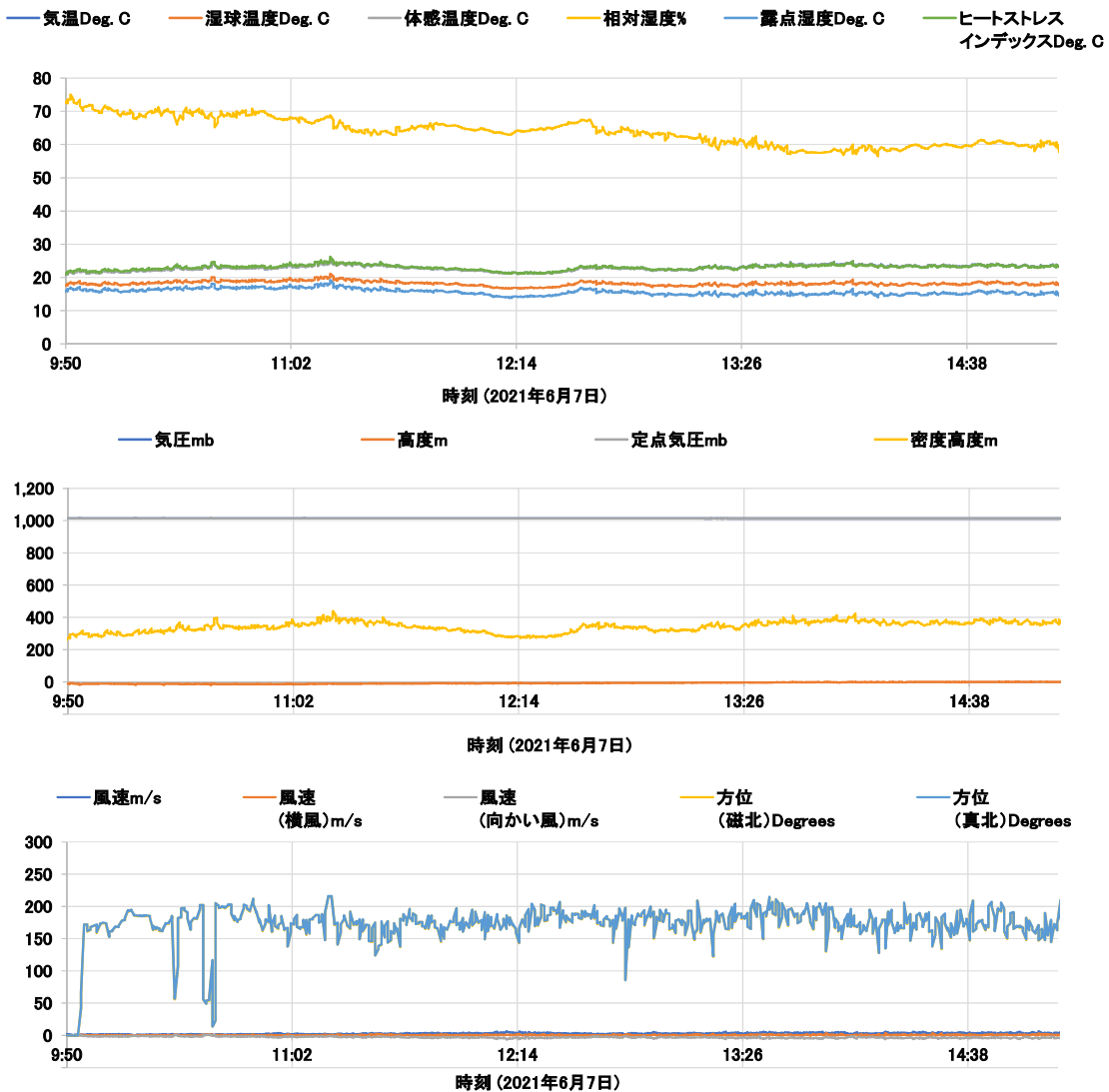


Fig. 6-12 飛行試験期間中に取得した気象データの例

6.6.2. 飛行ログ

飛行試験中のデータは、飛行経路(上空から見た飛行ルート)を航空写真上に表示、飛行位置ログ、機体姿勢ログ、エンジン関連ログ、操縦舵面ログ、機体システムログを記録した。フライトデータの記録例として、Fig. 6-13、Fig. 6-14に6月8日の試験例を示す。このようなフライトログは、万が一の機体のトラブルの際の原因究明に使用できる。

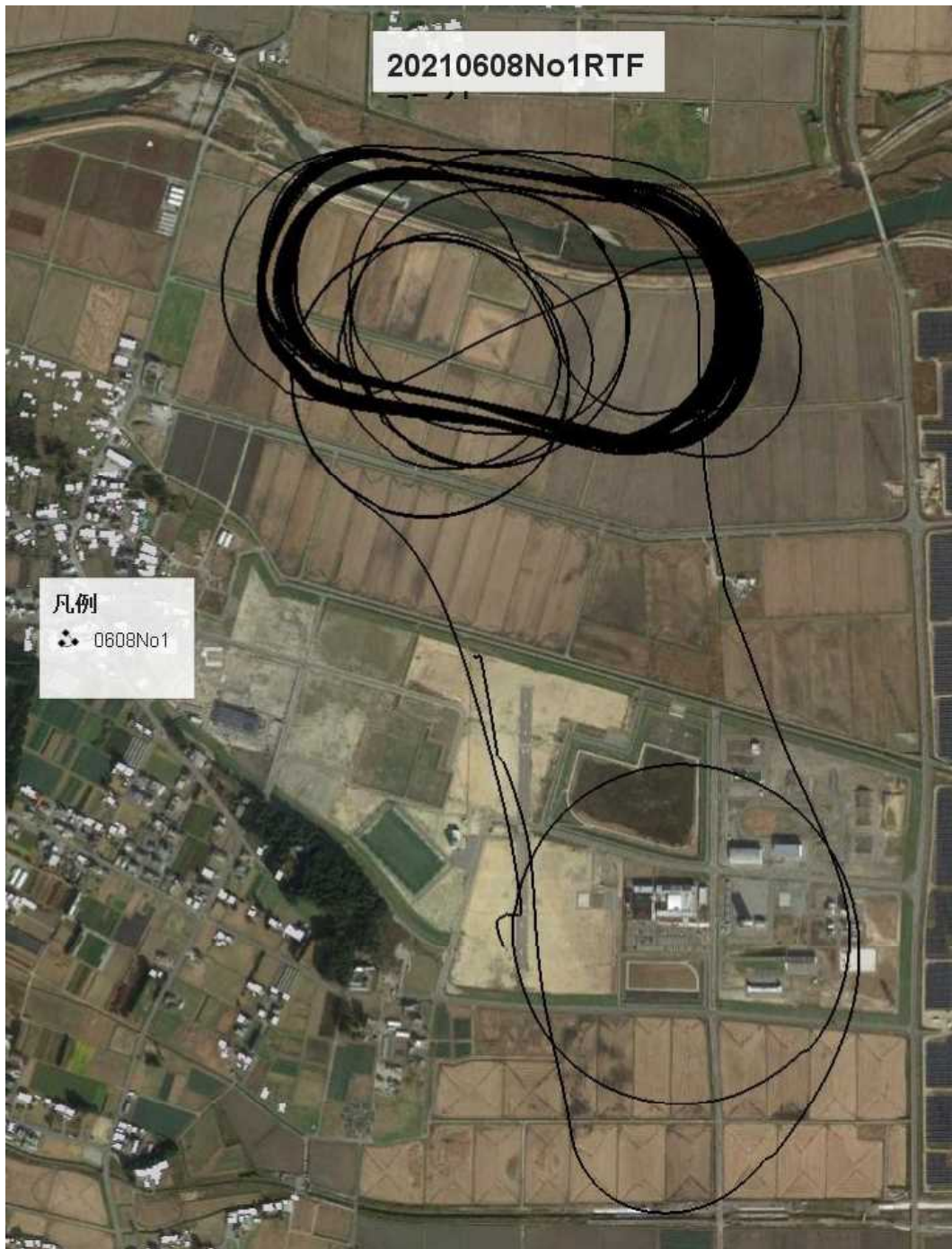
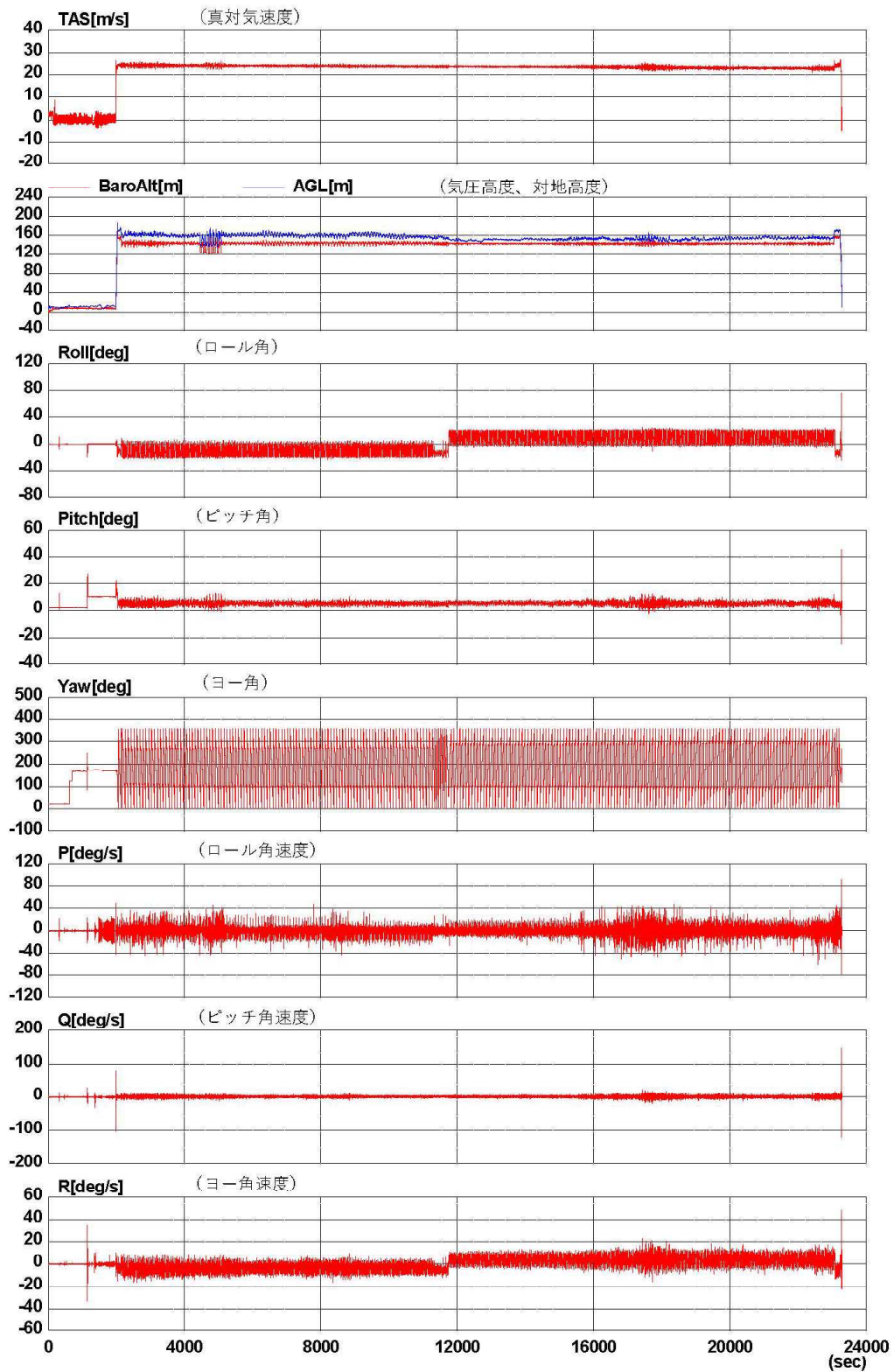


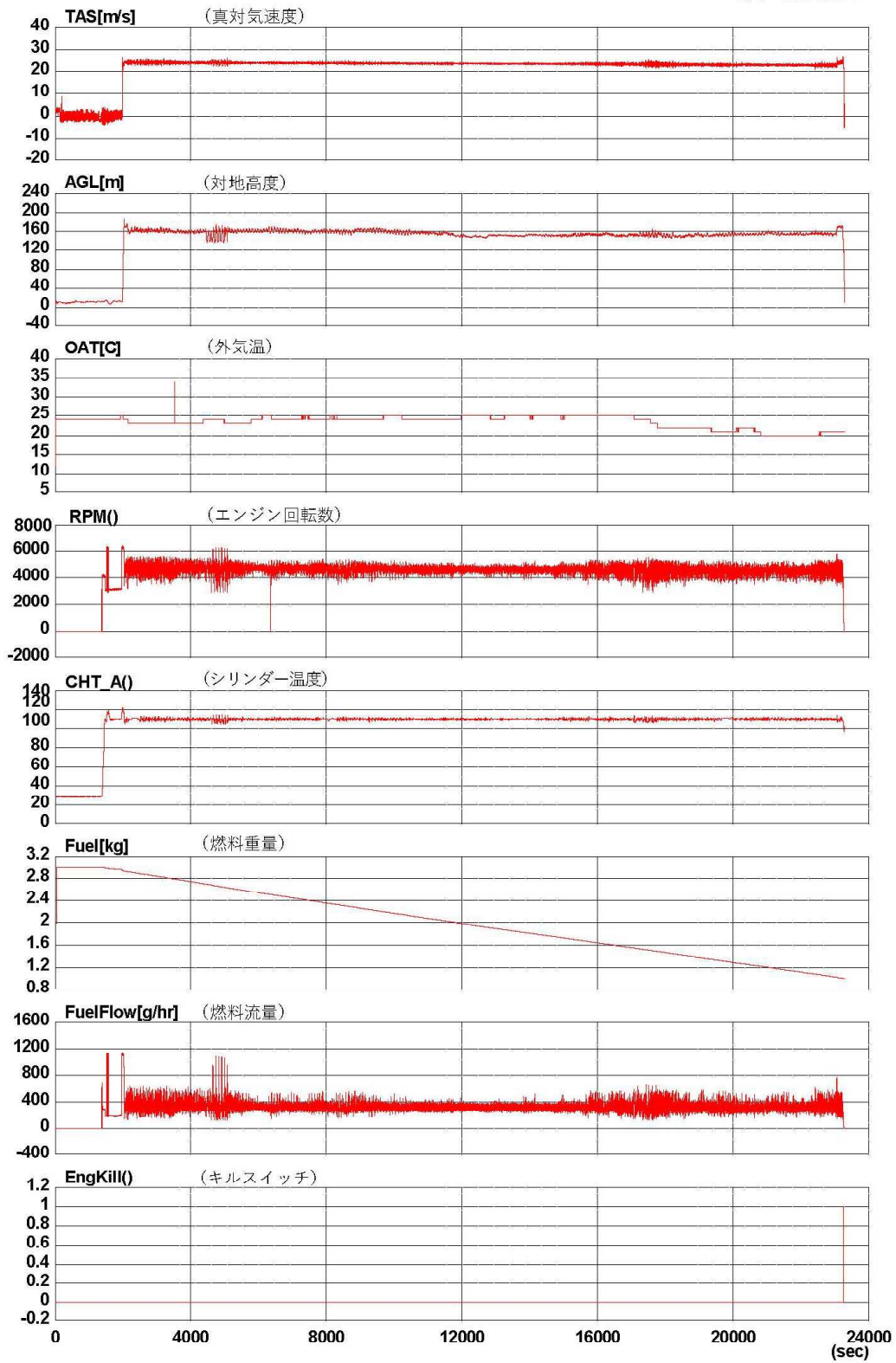
Fig. 6-13 フライトの軌跡例 (2021年6月8日 RTF)



[Piccolo 8245 Tue Jun 08 09:55:47 2021.ppt dhs] Start: 00:00:00 End: 06:28:13 [2021/06/21 11:22:17]

Fig. 6-14 フライトログ例 (2021年6月8日 RTF)

(1/4)

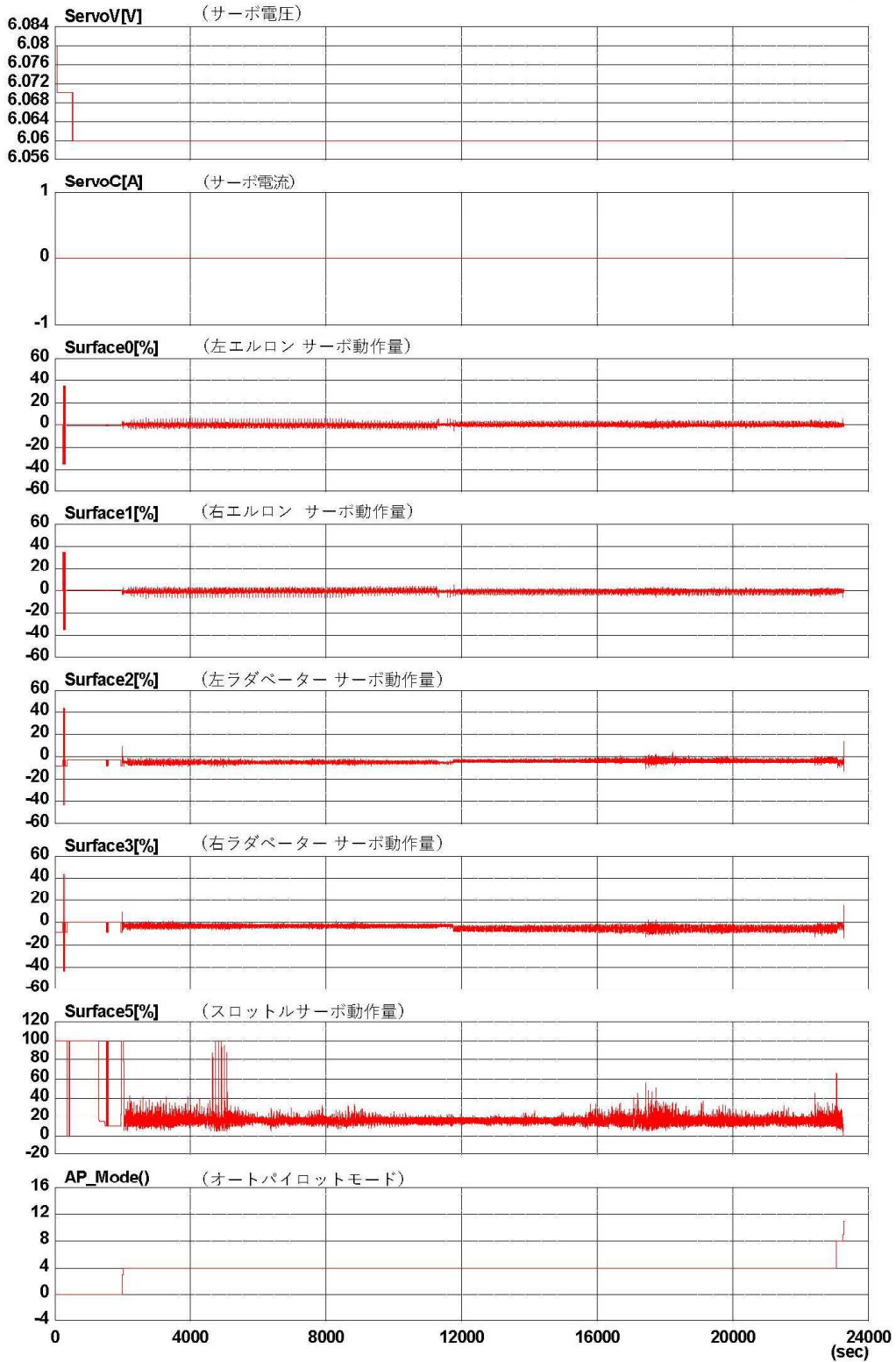


[Piccolo 82.45 Tue Jun 08 09:59:59-47 2021.ppt.dhs] Start: 00:00:00 End: 06:28:13 [2021/06/21 11:22:54]

[Piccolo 82.45 Tue Jun 08 09:59:59-47 2021.ppt.dhs]

Fig. 6-14 フライトログ例 (2021年6月8日 RTF)

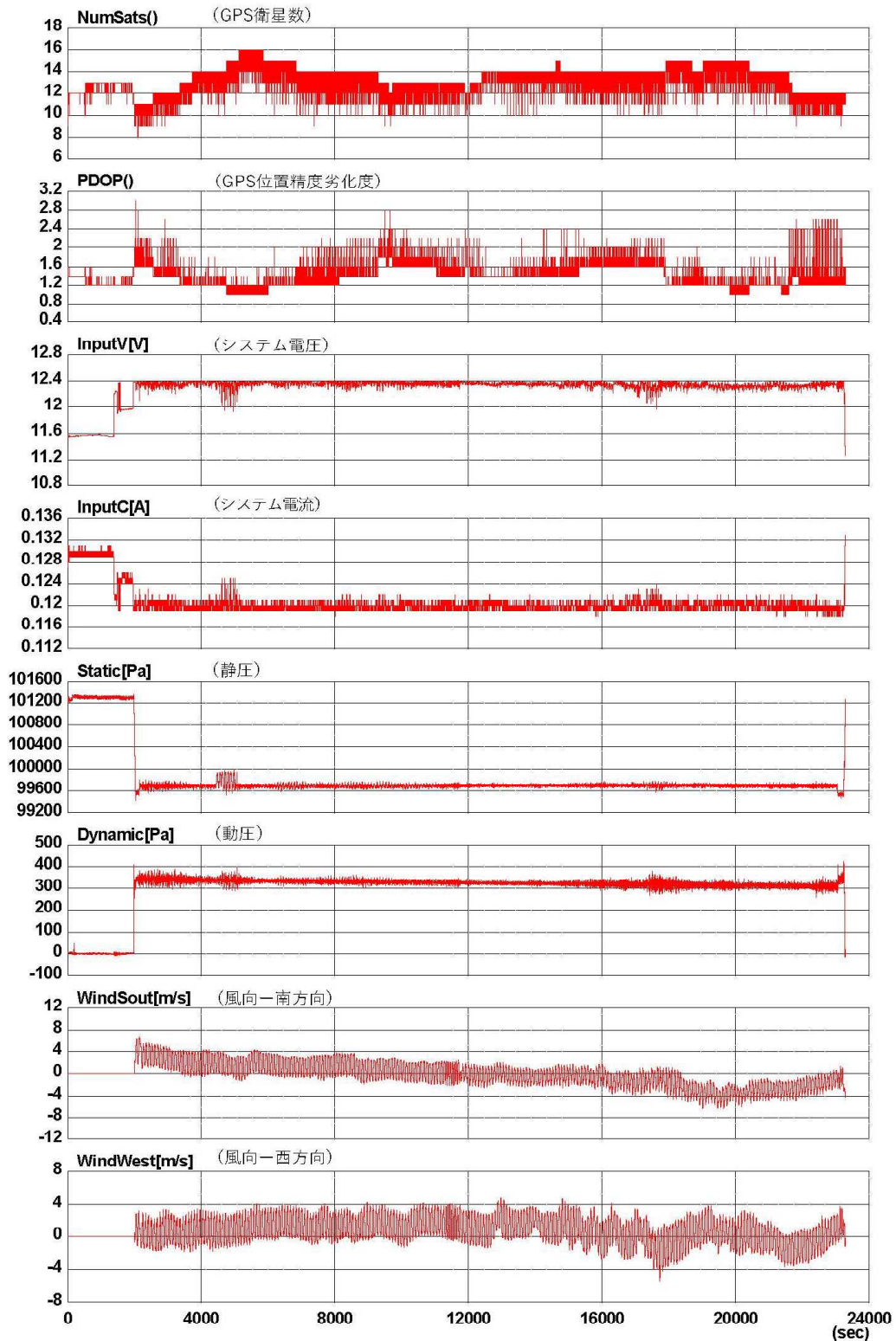
(2/4)



[Piccolo 8245 Tue Jun 08 09:59:47 2021]pd.dhs] Start: 00:00:00 End: 06:28:13 [2021/06/21 11:23:45]

Fig. 6-14 フライトログ例 (2021年6月8日 RTF)

(3/4)



[2021/06/21 11:25:56]

Start: 00:00:00 End: 06:28:13

[Piccolo 8245 Tue Jun 08 09:59:47 2021]pd.dhs]

Fig. 6-14 フライトログ例 (2021年6月8日 RTF)

(4/4)

6.7. 夜間フライトに必要となる機能および運用体制の確認

夜間フライトの実施にあたっては、関連法規に準じて事前に関係各所への申請を行わなければならない。まず、航空法の該当条文を以下に引用する。

航空法

第九章 無人航空機

(飛行の方法)

第一百三十二条の二 無人航空機を飛行させる者は、次に掲げる方法によりこれを飛行させなければならない。

(略)

五 日出から日没までの間において飛行させること。

(略)

2 前項の規定にかかわらず、無人航空機を飛行させる者は、次に掲げる場合には、同項第五号から第十号までに掲げる方法のいずれかによらずに飛行させることができる。

(略)

二 前号に掲げるもののほか、国土交通省令で定めるところにより、あらかじめ、前項第五号から第十号までに掲げる方法のいずれかによらずに無人航空機を飛行させることが航空機の航行の安全並びに地上及び水上の人及び物件の安全を損なうおそれがないことについて国土交通大臣の承認を受けて、その承認を受けたところに従い、これを飛行させる場合

(以下、略)

第一百三十二条の二の2項の二が示すとおり、夜間(日出から日没以外の時間を指す)に飛行する場合には国土交通省の承認を受けることが必要となる。承認を得るための手続きは同省が運営するオンラインサービス『DIPS』を通して実施する。この申請時に情報提供すべき項目のひとつに「無人航空機を飛行させる際の安全を確保するために必要な体制に関する事項」が挙げられており、自社作成書類でも申請することは可能だが、同省作成の『航空局標準マニュアル』に従うことで本項を満たすことができる。同マニュアルが示す夜間飛行実施にあたり必要となる体制は以下のとおりである。

『無人航空機飛行マニュアル(空港等周辺・150 m 以上・DID・夜間・目視外・30 m・催し・危険物・物件投下) 場所を特定した申請について適用』

国土交通省航空局標準マニュアル①令和3年10月1日版

3-7 夜間飛行を行う際の体制

- ・夜間飛行においては、目視外飛行は実施せず、機体の向きを視認できる灯火が装備された機体を使用し、機体の灯火が容易に認識できる範囲内での飛行に限定する。
- ・飛行高度と同じ距離の半径の範囲内に第三者が存在しない状況でのみ飛行を実施する。
- ・操縦者は、夜間飛行の訓練を修了した者に限る。
- ・補助者についても、飛行させている無人航空機の特徴を十分理解させておくこと。
- ・夜間の離発着場所において車のヘッドライトや撮影用照明機材等で機体離発着場所に十分な照明を確保する。

これにより、夜間飛行時に機体が装備すべき機能は「機体の向きを視認できる灯火」であることが分かる。本試験では、灯火機能として LED ライトを両翼裏面に装着させ、上空飛行時における地上からのライト視認性確認を行い、対地高度 300 m の飛行時においても発光を目視できることを確認した。

運用体制については、操縦者の夜間飛行に対する技能向上と、夜間における周囲監視の方法等や機体特性の再確認を含む補助者の知見向上に向けて準備を進めていくことが必要である。

また、現時点において、航空法については有人地帯における目視外飛行実現を目指す法改正や制度整備が進められており、前述の条文やマニュアルも改訂される可能性がある。飛行試験を滞りなく進めていくためには、最新の情報を常に把握しそれに迅速に対応できる体制の構築が肝要である。

6.8. 原子力災害時に想定される無人航空機放射線モニタリング対応

今年度の試験結果と Penguin C の性能を踏まえ、原子力災害時に想定される放射線モニタリングを実施するために必要となる下記 13 項目について、同機が対応可能であるか検討を行った。

1) 長時間 (20 時間以上) のフライトが可能であること

Penguin C はメーカーオリジナルの EFI エンジン(Electronic Fuel Injection : 電子制御燃料噴射)を搭載しており、これにより連続 20 時間以上のフライトが可能である。同エンジンは氷点下から高温まで対応する冷却装置を備え、高いエンジン効率を実現する性能を持つ。ただし、使用するペイロードの種類によっては条件に満たない場合もある。

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

Table 6-2 に示した通り、Penguin C の最大離陸重量は 23 kg である。これに対し、空虚重量(機体自体の重量)は 17.25 kg である (Fig. 6-15)。よって、燃料搭載量を 1 kg とした場合では 5 kg 程度のペイロードが搭載可能である。本試験においては、2 kg 程度のペイロードを搭載してフライトを実施した。



Fig. 6-15 空虚重量測定例

3) 離陸のための滑走路を要しないこと

Penguin C の離陸には可搬型空気圧式カタパルトを使用する。カタパルトをアンカーペグにより地面に固定できる場所で離陸させることとなるが、カタパルトからの発射となるため滑走

路は不要である。

4) あらかじめ設定したプログラムにより飛行可能であること

フライトに際し、事前に PCC にて作成したフライトプランを使用して飛行可能である。

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

メーカー公表値で Penguin C のテストフライト実績は 9,000 時間を超え、様々な飛行環境下における機体の耐久性および堅牢性が実証されている。また、MTBF については、メーカー内にて一定の基準を設け、各事象に対する評価が行われている。実際の数値については公表されていないが、事故分類基準については Table 6-4 に示した通りである。

6) 風速 10 m/s 以下でのフライトが可能であること

Penguin C のオペレーションに係る風速制限は下記のとおり設定されており、本要件を満たす。

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

7) 雨天時のフライトが可能であること

機体性能として 5 mm/h 程度の雨量までフライト可能である。雨や霧等湿度の高い環境における機体の耐久性を高めるため、今年度から静圧ポートを覆うプロテクターを導入した。

8) 事故発生から 1 時間以内に離陸が可能であること

Penguin C は GCS およびトラッキングアンテナを含め機器一式の組立から離陸まで短時間で完了できるよう設計されている。実際に本試験を振り返ると、機器一式の中でも大型の機器であるトラッキングアンテナとカタパルトを試験に先立って屋内にて一部組立済みであるという条件の下ではあるが、試験準備開始から概ね 1 時間程度で離陸準備を終えている。

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

フライト中、機体と GCS は常時相互通信可能な状態にある。GCS では、PCC を通して機体位置情報を、CoPilot を通してエンジン等のステータス情報をリアルタイムで確認することができる。また、ペイロードとしてカメラを搭載している場合には、上空でカメラが撮影している映像も同時に GCS にて受信及び確認が可能である。

10) 原子力災害対策指針に定める OIL に則り、避難等が指示された後において、UPZ の外側から、データ通信が可能であること

Penguin C のトラッキングアンテナにはオムニダイレクショナルアンテナ (無指向性アンテナ)

ナ)とダイレクショナルアンテナ(指向性アンテナ)が取り付けられており、機体までの距離に応じて自動的に切り替わる仕組みになっている。数 km までの近距離の場合にはオムニアンテナが対応し、半径 100 km までの長距離の場合にはダイレクショナルアンテナが対応する。UPZ を想定するとダイレクショナルアンテナの利用が必要となるが、オムニアンテナの出力が 1 W であるのに対し、ダイレクショナルアンテナは 5 W であるため、電波法に基づいて使用許可を得ることが必要となる。加えて、機体および GCS の両方にアンプを搭載することも必要である。

11) 夜間にフライトするための機能(暗視カメラ、航空灯など)を有すること

夜間フライト時の視認性を高めるため、航空灯として LED ライト等を機体表面(各翼裏面等)に取り付け可能である。本試験においては、UAV 用 LED ライトを両翼の裏面に取り付けてフライトを実施し、機体に強い物理的衝撃が加わる離着陸時においても落下しないことおよび機体が対地高度 300 m を飛行している際にもライトの点滅を目視できることを確認した。また、エルロンサーボを利用した LED ライトの取り付け方法についてもメーカーが情報提供をしており、使用目的に応じていずれかの方法を選択することが可能である。

機体前方のペイロードベイにはユーザーの用途に応じたペイロードを搭載することができ、本試験においては、メーカー推奨の UAV 用カメラ (Octopus ISR Systems 製 Epsilon) を搭載したフライトも行っている。同機はカラーカメラと赤外線カメラを備えており、夜間のフライトにおいても赤外線カメラを利用した対象物の確認等が可能である。

12) 国内での規定基準類に準拠していること

Penguin C 運用に際して依拠すべき日本国内規定基準類は、電波法および高圧ガス保安法である。電波法は GCS と機体間の電波通信について適用され、高圧ガス保安法についてはカタパルトが同法適用対象であるか照合が必要となる。①電波法②高圧ガス保安法の順に詳細を以下に述べる。

① 電波法

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

Penguin C については、GCS と機体の通信に UAV IP Data link を使用している。同機は Microhard Systems Inc. 製 pMDDL2450 無線モデムを利用しており、同モデムは技術基準適合証明を受けている。同証明書(技術基準適合証明番号: R210-130451)を Appendix 4-4 に添付する。また、無線局について同モデムの仕様 (Table 6-7) は携帯局陸上移動局に該当する。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 (Appendix 4-5)。

Table 6-7 UAV IP Data Link の仕様

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

Table 6-8 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
免許およ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	第三級陸上特殊無線技士以上
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	
		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 μ V/m 以下のもの。

太文字：PenguinC 該当箇所

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

② 高圧ガス保安法

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

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

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

高圧ガス保安法施行令

(適用除外)

第二条

3 法第三条第一項第八号の政令で定める高圧ガスは、次のとおりとする。

一 圧縮装置 (空気分離装置に用いられているものを除く。次号において同じ。) 内における圧縮空気であつて、温度三十五度において圧力 (ゲージ圧力をいう。以下同じ。) 五メガパスカル以下のもの

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

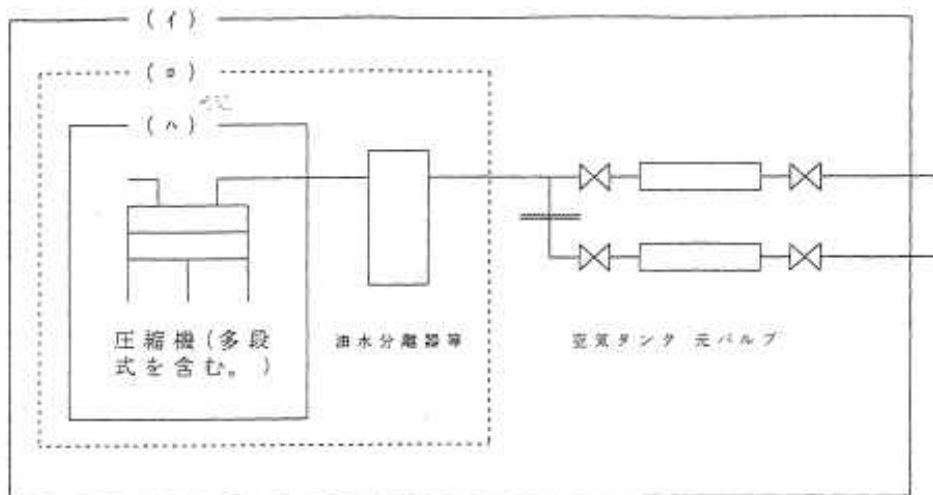
高圧ガス保安法及び関係政省令等の運用及び解釈について (内規)

20200715 保局第 1 号

II. 政令関係

第 2 条関係 (適用除外)

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



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

①法の適用を受ける場合

容器等への充填行為等高圧ガスの製造をするとき

(略)

②法の適用を受けない場合

気密試験用等消費をするとき

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

13) 少人数(2~3名)での運用が可能であること

Penguin Cは離陸地点までの機器一式(機体、アンテナ、GCSおよびカタパルトを指す)運搬、機器組立、離陸、ミッションフライト並びに着陸までの一連の作業を最小人数2名で遂行することが可能である。しかしながら、原子力災害時の迅速な対応を最優先事項とすると、運搬から離陸までの過程は人手が増えることで時間短縮が可能となることから、2名以上の作業員を配置することが望ましいといえる。

6.9. 無人飛行機に搭載する放射線測定システムの設計、製作および動作試験

本節では、令和2年度に実施した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における「放射線検出器の搭載方法の検討」の結果¹⁷⁾を踏まえ、無人飛行機に搭載する放射線測定システムの試作機の設計および製作を実施し、それを用いた試験結果を述べる。また本年度の試験結果を踏まえ、Penguin Cを用いて緊急時モニタリングを行ううえで必要となる無人飛行機に搭載する放射線測定システムの性能および今後の課題を述べる。

6.9.1. 放射線測定システムについて

原子力災害時の緊急時モニタリングを想定し、Penguin Cに搭載する放射線測定システムの試作機の設計、製作および本システムを用いた測定試験を実施した。Fig. 6-16に試作機の概要および外観を示す。試作機は放射線検出器モジュール(日本放射線エンジニアリング株式会社製)、カメラ(BUFFALO社製BSW20KM03HSV 2.0MEGA PIXEL)、GNSSセンサー(u-blox社製SAM-M8Q)が搭載されており、それらのデータはデータロガーPC(DFRobot社製LattePanda 4G/64G)によってSDカードメモリに保存されると同時に、機体通信によりGCSにデータが送信される。データは全て、GNSSセンサーで取得した時刻および位置情報(緯度、経度)で紐付けされており、これらのデータに加えて、1秒ごとに高さ情報、β線およびγ線計数率、γ線スペクトル情報が得られる。放射線検出器にはゲルマニウム酸ビスマスシンチレータ(以下、BGO)とプラスチックシンチレータを用いたホスウィッチ型検出器を採用した。ホスウィッチ型検出器とは、複数の異なるシンチレータを用いることで、放射線の種類(本試作

機では β 線と γ 線) に応じて得られるパルス形状に変化を与え、放射線の種類ごとに計数率を弁別できるものである。ホスウィッチ型検出器は二つの検出器を個別に搭載することなく複数種類の放射線の計数率を取得でき、また小型軽量化を実現できるため、無人飛行機のように搭載スペースおよび重量に制約があるものに搭載するのに適している。

本報告で試作したホスウィッチ型放射線検出器の図面を Fig. 6-17 に示す。本検出器は表面に遮光用のマイラ膜、次にプラスチックシンチレータ (25 mm ϕ \times 1 mm H)、そして BGO (25 mm ϕ \times 25 mm H) が配置された積層構造になっており、 β 線はプラスチックシンチレータで、 γ 線は BGO でそれぞれ検出する。無人飛行機による原子力災害時の緊急時モニタリングにおいて、放射性プルームによる機体の汚染の影響を把握し弁別したうえで、地表面に沈着した放射性核種に由来する空間線量率の評価等をどのように行うかが課題の一つとして挙げられる。そこで、本システムでは、機体表面の汚染状況を把握できるようにするため、上記したように γ 線だけでなく β 線も検出できる仕組みとした。Fig. 6-18 は本ホスウィッチ型検出器による Cs-137 点線源 (10 MBq) 測定時の放射線スペクトルである。

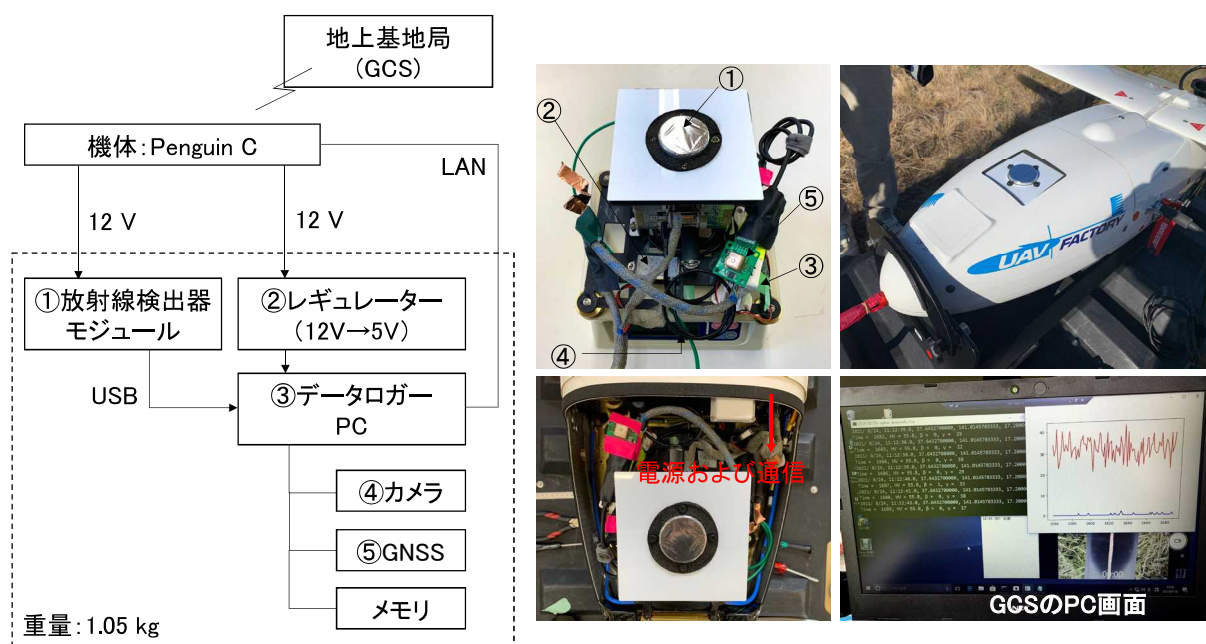


Fig. 6-16 放射線測定システム試作機の概要および外観

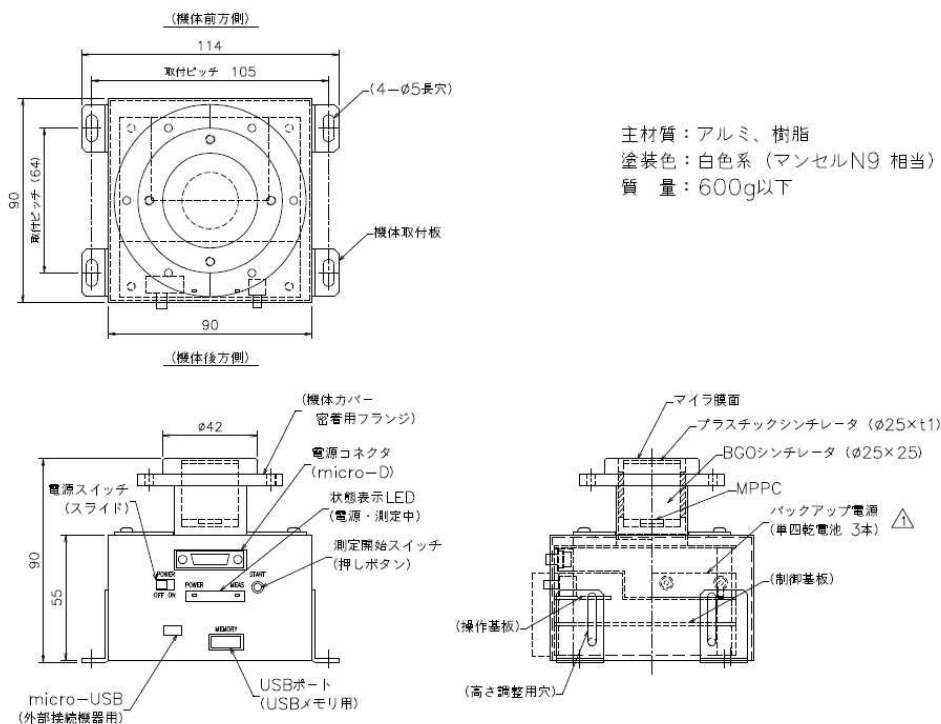


Fig. 6-17 ホススイッチ型検出器の図面

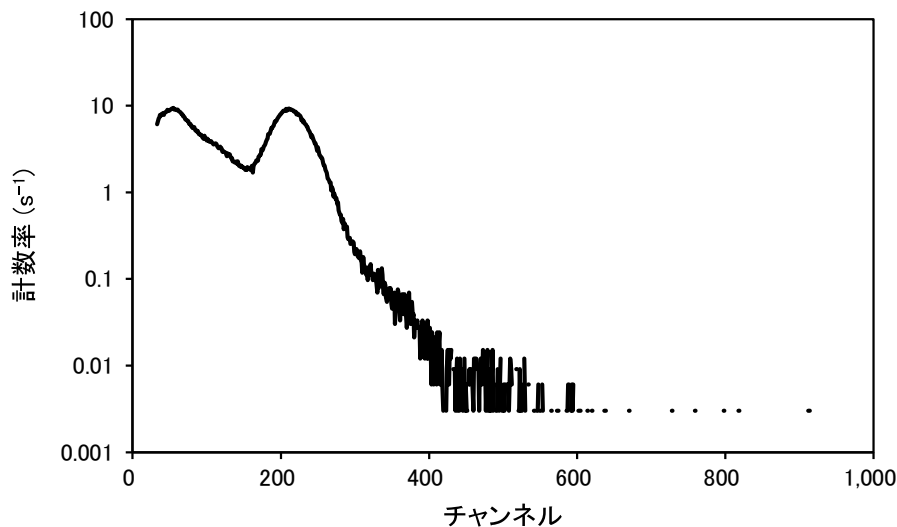


Fig. 6-18 ホススイッチ型検出器で得られたスペクトル
 (Cs-137 点線源 (10 MBq) 照射時のスペクトルである。)

6.9.2. 放射線測定システムの動作試験結果について

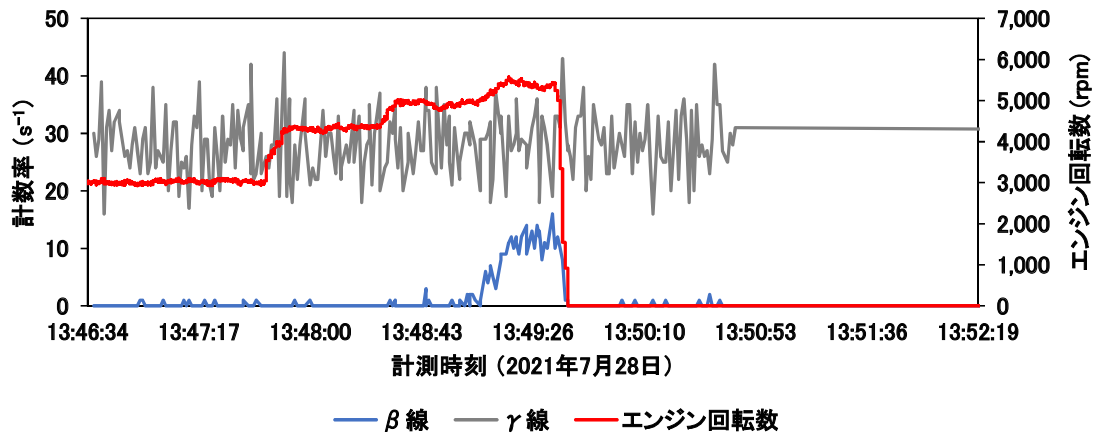
放射線測定システムの試作機を Penguin C に搭載し、動作試験を行った。まず地上において Penguin C のエンジンを回した際に、測定結果にどのような影響があるのかを確認した (Fig. 6-19)。Fig. 6-19 (a) に示すように、エンジン回転数が 5,000 rpm を超えると β 線計数率が急激に

上昇した。一方で、 γ 線に関しては特に大きな影響はなく、スペクトル形状の変化等は見られなかった。本事象が電磁パルス (EMP) による検出器の誤作動である可能性を考え、検出器をシールドメッシュで覆い、さらに検出器にグランド線を追加し、ノイズ対策を行ったうえで同様に試験を行った (Fig. 6-19 (b))。ノイズ対策後は、Fig. 6-19 (a) で見られたような、エンジン回転数が 5,000 rpm を超えたときの β 線計数率の上昇は見られなかったものの、エンジン回転数が 3,000 rpm になった辺りで β 線計数率が上昇した。

検出器の搭載スペースにカバーをした状態とカバーを取った状態で動作試験を行い、エンジン回転数に伴う計数率の変化を調べた結果を Fig. 6-20 に示す。本試験は上記したノイズ対策を行った状態で実施した。Fig. 6-20 (a) より、カバーを取り付けた状態ではエンジン回転数 3,000 rpm あたりでのみ、 β 線の計数率が高くなるのが分かる。これはノイズと振動の特性 (なぜ 3,000rpm がピークなのか?) は不明であるが、カバーを被せることで検出器に機体からの振動が伝わり、ノイズが発生したことで、計数率が上昇したと考えられる。これらの結果を踏まえ、飛行測定試験においては、機体からの振動が検出器に伝わるのを防ぐため、検出器を搭載する架台にインシュレーター (防振材) を取付けるとともに、検出器をシールドメッシュで覆った状態で飛行測定試験を行うこととした。

以上のようなノイズ対策を施した検出器を Penguin C に搭載し、飛行測定試験を行った結果の一例を Fig. 6-21 に示す。また、本試験で得られた γ 線スペクトルを Fig. 6-22 に示す。Fig. 6-21 に示した通り、カタパルト発射後に β 線の計数率が上昇した。これには機体の振動に伴うノイズが影響していると考えられ、上述したノイズ対策では不可避な現象であることが推察される。一方 γ 線計数率については、カタパルト発射後、対地高度の上昇に伴い地表面の天然放射性核種からの影響が小さくなることで計数率が減少し、その後、場所によって計数率の変動が見られた。Fig. 6-23 は Fig. 6-21 の γ 線計数率をマッピングした結果と、飛行測定試験と同時期に歩行式サーベイメータ (日本遮蔽技研社製 ホットスポットファインダー) により地表面から 1 m の高さの空間線量率を測定した結果である。Fig. 6-23 に赤い円で示したエリア上空を通過した際に γ 線計数率の上昇が見られ、それに呼応するように Fig. 6-21 に示した山型の変動が見られた。また Fig. 6-23 における飛行測定試験時の γ 線測定結果と、地上における空間線量率の測定結果を比較すると、同様の分布傾向を示した。Fig. 6-22 に示したように γ 線のスペクトル形状は正常であり、以上の結果から γ 線計数率にはエンジン回転に伴うノイズの影響はなく、正常に測定することができたと考えられる。

(a) シールドメッシュ被覆前



(b) シールドメッシュ被覆後

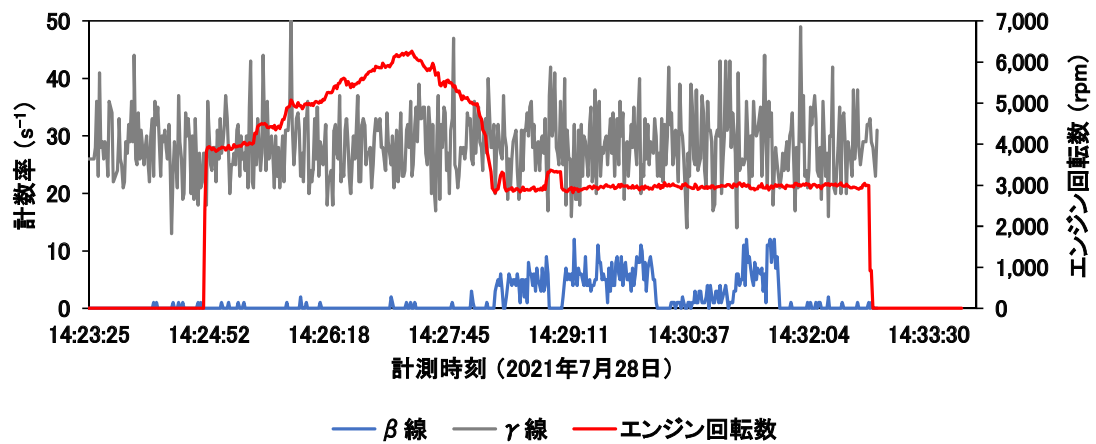


Fig. 6-19 エンジン回転数上昇に伴うノイズの影響 (地上試験時)
(a) ノイズ対策前、(b) シールドメッシュによるノイズ対策後

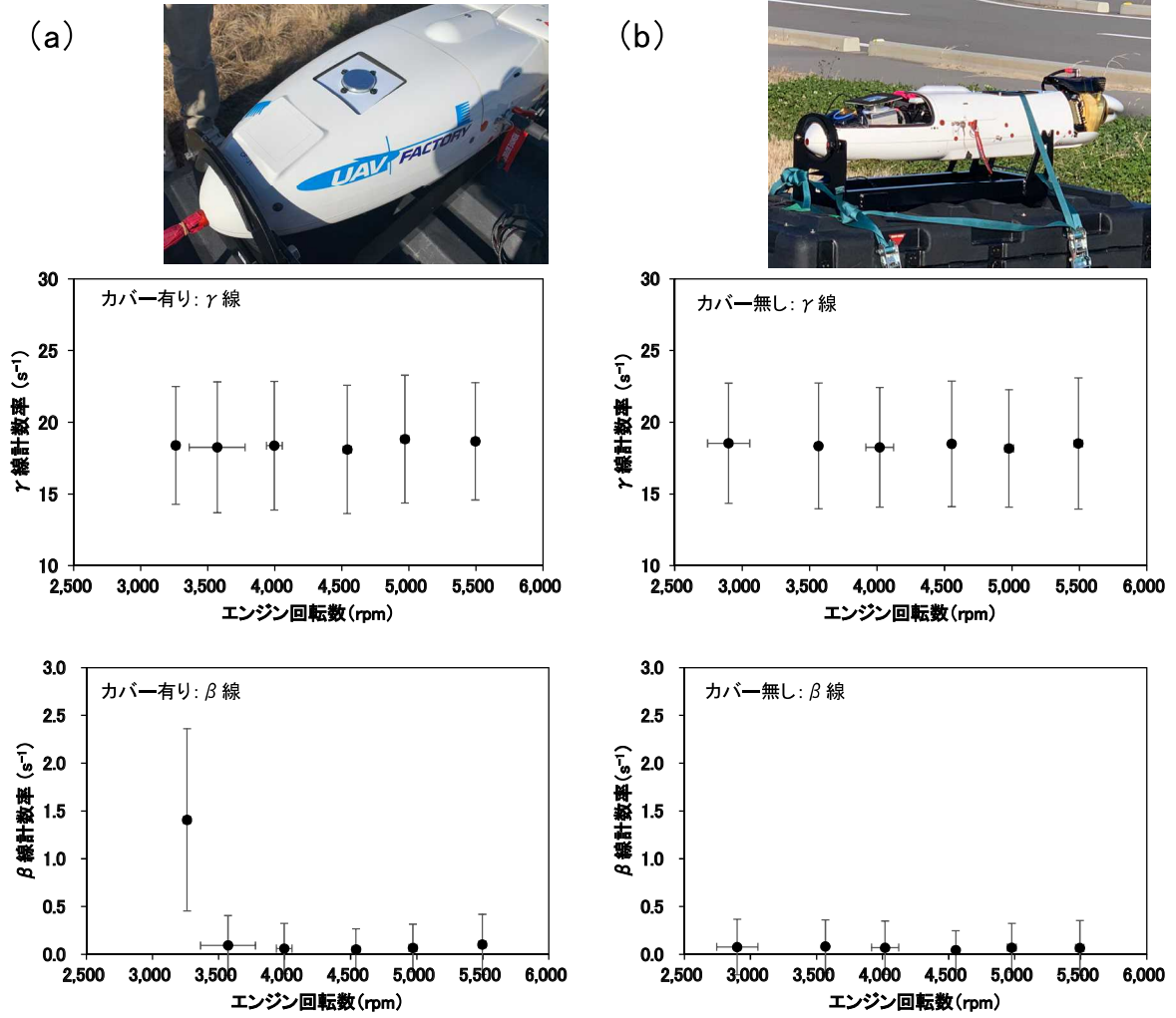


Fig. 6-20 カバーの有無による電磁ノイズの影響
 (a) カバー取付けた状態、(b) カバーを外した状態
 (双方ともシールドメッシュで検出器を覆った状態で測定した結果である。)

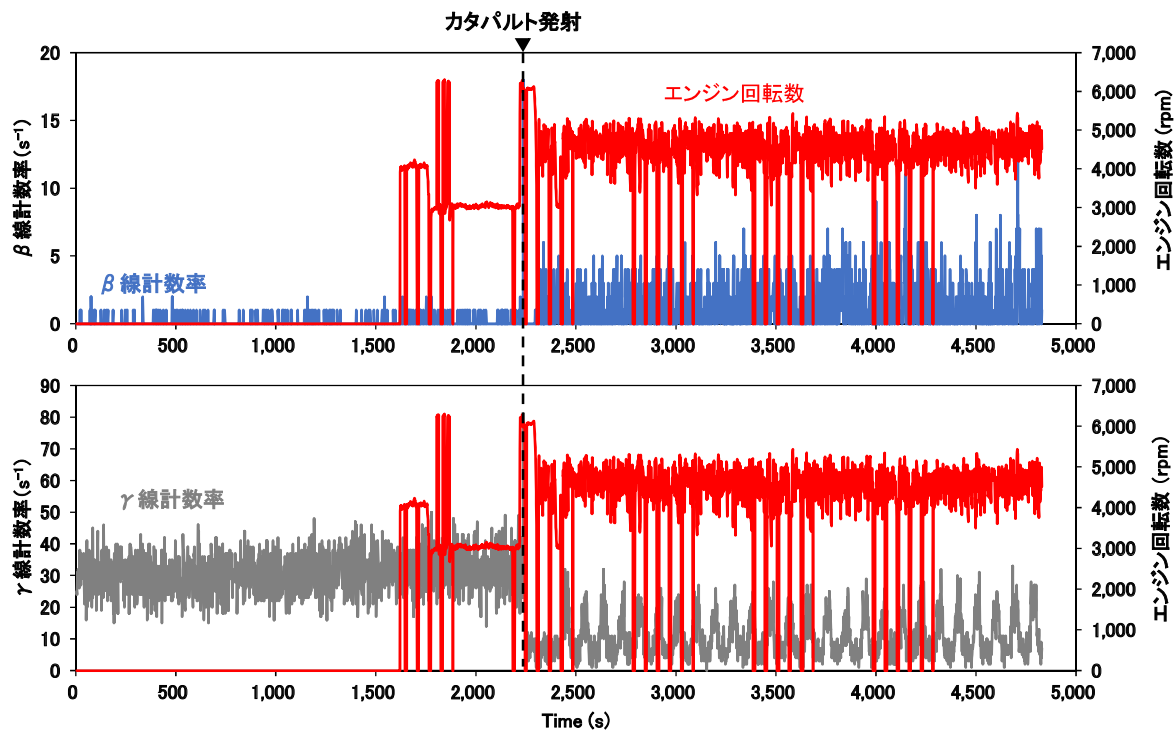


Fig. 6-21 飛行測定試験時の計数率の変化 (2021年8月24日)
 (対地高度 150 m における β 線の平均計数率は 1.33 s⁻¹、γ 線は 10.3 s⁻¹であった。)

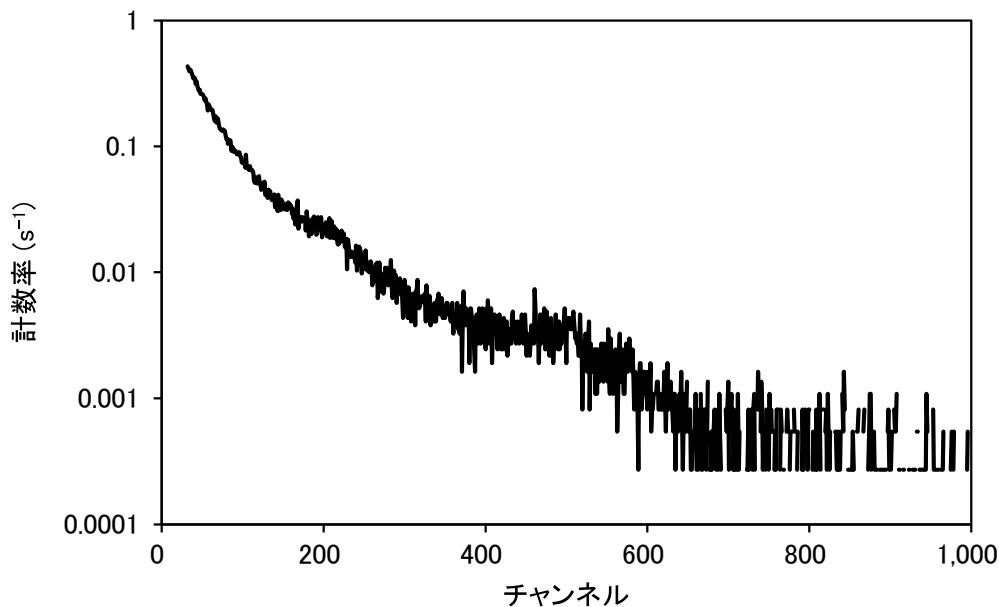


Fig. 6-22 フライト試験時の γ 線スペクトル (2021年8月24日)

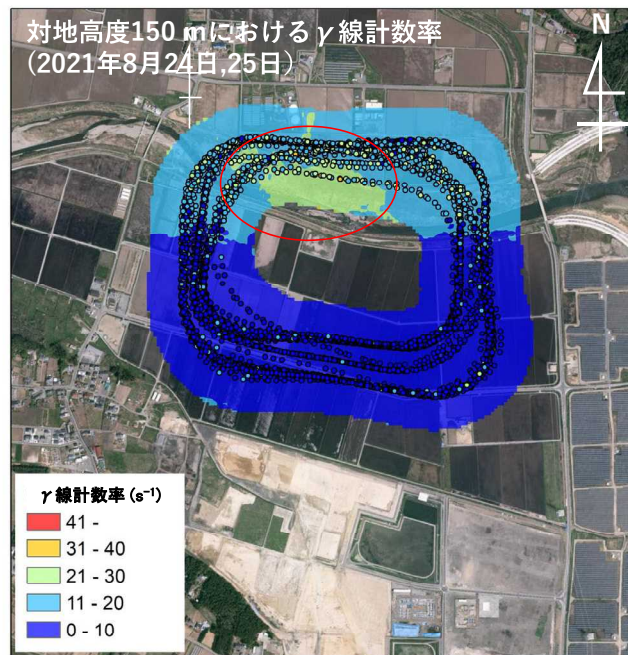


Fig. 6-23 飛行測定試験時の γ 線計数率および地表面から1 mの高さの空間線量率
(飛行測定は2021年8月24日と25日、地上測定は2021年8月27日に実施した。)
(地上測定は検出部にCsI(Tl)シンチレーション式検出器(38 mm L × 38 mm W × 25 mm H)
を用いた歩行式サーベイによる。)

6.9.3. 放射線測定システムの性能および課題について

以上の結果および試験の経験を踏まえ、Penguin C を用いた緊急時モニタリングを行ううえで必要となる、無人飛行機に搭載する放射線測定システムの条件と性能を以下にまとめた。また、これらの条件を踏まえ、無人飛行機に搭載する放射線測定システムの設計案を Fig. 6-24 に示す。

- ・機体への搭載物総重量は 2 kg 以下、大きさはおおよそ 220 mm × 200 mm × 100 mm 以下であること。
- ・機体への搭載物は防塵、防滴仕様であり、目安として-10°C~50°Cにおいて動作すること。
- ・機体への搭載物の電源は機体からの供給電源（12 V × 2 個、24 V × 1 個）を用いたものであること。
- ・機体への搭載物は突然の電源消失においても機器が破損しないように、瞬停用電源等を搭載した設計にすること。機体からの供給電圧を安定的にするため、可能であればバッテリーを搭載し、それを通した電源を検出器等に使用することが望ましい。
- ・機体への搭載物はカタパルト発射時の衝撃に備え、架台等にしっかりと固定されていること。また衝撃により、機器が停止する可能性もあるので、機体への搭載物は遠隔で電源の ON/OFF が可能であり、再起動を実施できること。
- ・機体への搭載物での取得データは TCP/IP 通信を用いて、リアルタイムで地上基地局において状況確認が可能であり、機器の電源の ON/OFF、データの受信可能であること。
- ・機体への搭載物での取得データは、機体搭載物内と GCS、どちらにも保存されるシステムであること。
- ・機体への搭載物は GNSS 受信機を備えているか、または Penguin C 機体から GNSS 情報を受信し、取得データの全てを GNSS 時刻で紐付けすること。
- ・機体には最低限、検出器とそのデータを記録し、送受信するための PC、前方または下方を確認できるカメラを搭載すること。カメラは機体を目視外飛行させるために必要であり、可能であれば、温湿度気圧センサーを具備し、前方と下方の双方を確認できるようなものが望ましい。
- ・機体への搭載する検出器は γ 線と β 線の両方が検出可能であり、 γ 線スペクトルも取得可能であること。
- ・機体への搭載物から得られるデータは 1 秒ごとに連続して保存が可能であること。
- ・機体への搭載物には機体からの EMP ノイズを防止する処理 (シールドメッシュによる被覆等) を施すこと。
- ・機体への搭載物には振動ノイズの影響を防止する処理 (専用架台の作成、インシュレーターの設置等) を施すこと。

無人飛行機に搭載する放射線測定システムの構築にあたって一番の課題となる部分は、機体搭載物、特に検出器に対するノイズの影響防止であると考えられる。試作機ではシールドメ

ッシュによる被覆、グラウンド線の設置、インシュレーターの設置を行ったが、検出器へのノイズの影響を完全に防止することはできなかった。検出器へのノイズの影響を防止する方策として、搭載物をシンプルな形状に一体化し、ノイズの影響を抑えるための専用架台を作製することが一案として挙げられる。今後は、検出器やその他機器を一体化し、形状を最適化した放射線測定システムを製作する等、ノイズの影響を防止するための検討を行う必要がある。

併せて、ここで示したシステムは γ 線と β 線を測定できる検出器を搭載することで機体の汚染状況を把握できるように簡易的に設計したが、機体汚染が起こった際の γ 線と β 線の計数率の関係性を評価する等して知見を蓄える必要がある。その知見を基に両者を弁別できるようなシステム設計に昇華させ、地表面から1mの高さの空間線量率を評価する手法を構築することが肝要である。今後、機体への放射線源吹付試験等を実施し、 γ 線と β 線の弁別に必要なパラメータの取得および評価を行う必要がある。

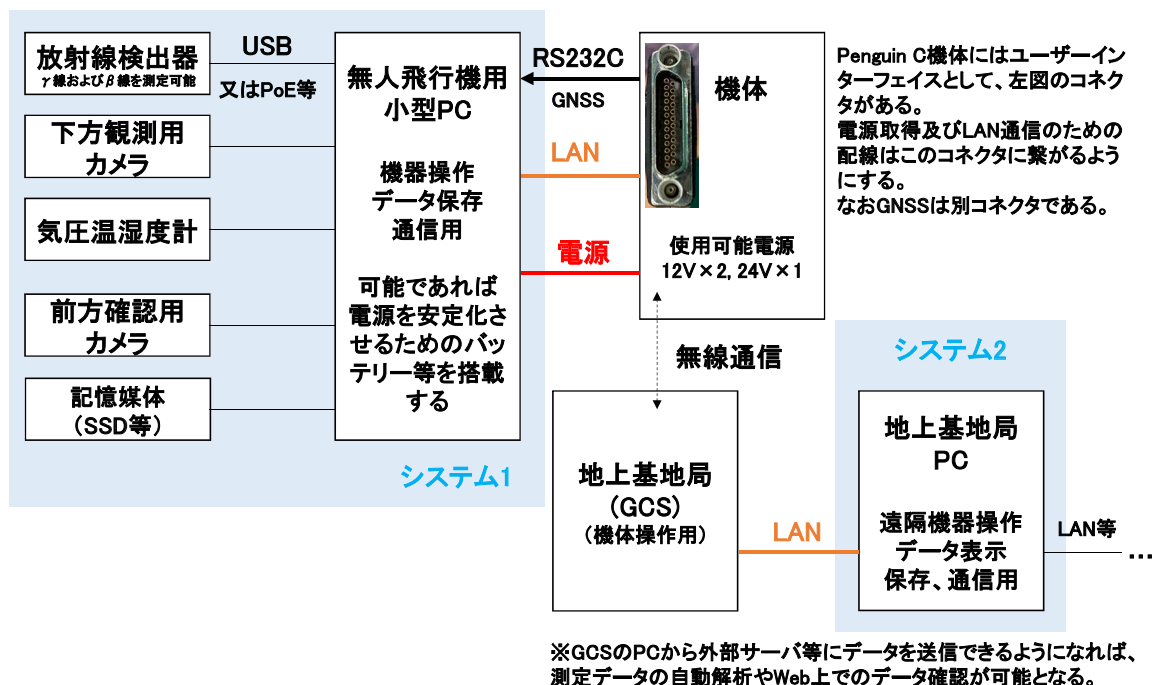


Fig. 6-24 Penguin C に搭載する放射線測定システム設計案

システム 1 は Penguin C に搭載するシステム、システム 2 は GCS が備えるシステムを示す。