

平成 31 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 2 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、「平成 31 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 .....	13
3.1.	データ取得方法 .....	13
3.2.	キャリブレーションフライト方法 .....	17
3.3.	解析のフロー .....	21
3.4.	空間線量率への換算方法 .....	22
3.4.1	空気中核種および宇宙線由来の計数率 .....	22
3.4.2	高度補正係数の算出方法 .....	24
3.4.3	空間線量率への換算係数の算出方法 .....	24
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 .....	26
3.7.	マッピング .....	26
3.8.	大気中のラドン子孫核種の弁別手法 .....	28
3.8.1	ラドン子孫核種 .....	28
3.8.2	ラドン弁別手法の理論 .....	31
3.8.3	GI の高度補正方法 .....	34
3.9.	天然放射性核種の濃度換算手法 .....	36
4.	モニタリング結果と考察 .....	39
4.1.	換算パラメータ .....	39
4.2.	地上における測定値との比較 .....	45
4.3.	空間線量率 .....	54
4.4.	天然の放射性核種濃度 .....	62
4.5.	ラドン弁別法の適用結果 .....	76
4.5.1	パラメータ (GI および RI) の決定 .....	76
4.5.2	従来手法との比較 .....	79
4.5.3	ラドン弁別手法の適用 .....	80
4.6.	放射性セシウムの沈着量 .....	89
5.	無人飛行機による放射線モニタリングを想定した要素技術試験 .....	91
5.1.	原子力災害時における無人機運用の課題 .....	91
5.2.	無人機の開発状況 .....	93

5.3. Penguin C のカタログ性能.....	94
5.4. 機器単体性能試験 .....	98
5.4.1. 地上局と機体のデータ通 .....	98
5.4.2. 機体の操縦およびエアバック・パラシュート展開操作 .....	99
5.4.3. エンジン回転数の調整.....	100
5.4.4. 異常時の警告.....	101
5.4.5. 機体の健全性チェック .....	102
5.4.6. 保守点検 .....	103
5.5. フライト試験.....	104
5.5.1. フライト試験概要 .....	104
5.5.2. 空域と試験概要 .....	105
5.5.3. フライト試験中に取得できるデータ .....	105
5.6. 原子力防災への適用について.....	105
5.7. 今後のスケジュール.....	106
6. まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理 .....	115
謝辞 .....	119
参考文献.....	120

## Table list

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL .....	4
Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧 .....	18
Table 3-2 機体とシステムの組み合わせと平均的な空气中核種由来の計数率および採用した CR-index .....	23
Table 3-3 ラドン子孫核種の放出する $\gamma$ 線 .....	30
Table 3-4 天然の放射性核種濃度への換算パラメーター一覧 .....	38
Table 4-1 2019 年度取得した AF データー一覧 .....	42
Table 4-2 2019 年度取得した CD データー一覧 .....	43
Table 4-3 換算パラメーターのまとめ .....	44
Table 4-4 GI および RI の一覧 .....	76
Table 5-1 UAV Factory における平均故障間隔計算時の事故分類 .....	96
Table 5-2 Penguin C 機体のカタログスペック .....	97
Table 5-3 Penguin C 周辺機器のカタログスペック .....	97
Table 5-4 データ通信試験チェックシート (一部) .....	99
Table 5-5 Copilot の警告インジケータ内容 .....	102
Table 5-6 エンジンのメンテナンススケジュール .....	104
Table 5-7 各フライト試験の条件一覧 .....	107
Table 5-8 今後の無人機開発スケジュール .....	114

## Figure list

Fig. 1-1 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果.....	5
Fig. 2-1 RSIシステムのブロック図 .....	7
Fig. 2-2 RSIシステムの写真.....	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 東通・六ヶ所および志賀周辺のモニタリングに使用した機体.....	9
Fig. 2-5 システムの半値幅および Gain の変動 (東通・六ヶ所 RSI 3).....	11
Fig. 2-6 システムの半値幅および Gain の変動 (志賀 RSI 3).....	12
Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (東通・六ヶ所) .....	14
Fig. 3-2 予定したフライトの測線 (志賀) .....	15
Fig. 3-3 フライトイメージ.....	16
Fig. 3-4 上空からの測定範囲イメージ.....	16
Fig. 3-5 テストラインフライトのイメージ .....	18
Fig. 3-6 テストラインおよびテストポイントの場所 (東通・六ヶ所).....	19
Fig. 3-7 テストラインおよびテストポイントの場所 (志賀) .....	19
Fig. 3-8 テストポイントフライトのイメージ.....	20
Fig. 3-9 宇宙線フライトのイメージ.....	20
Fig. 3-10 空気中核種フライトのイメージ .....	20
Fig. 3-11 解析のフロー .....	21
Fig. 3-12 RSIシステムにおける地上で取得した $\gamma$ 線スペクトルと海上でのスペクトル例.....	23
Fig. 3-13 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例 .....	23
Fig. 3-14 IDW に入力するパラメータとマップの関係.....	28
Fig. 3-15 ウラン系列およびトリウム系列 .....	30
Fig. 3-16 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況 .....	33
Fig. 3-17 大気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ .....	33
Fig. 3-18 計算体系のイメージ.....	35
Fig. 3-19 計算体系のベンチマーク .....	35
Fig. 3-20 シミュレーションによる測定高度と GI の関係.....	35
Fig. 3-21 天然の放射性核種によるピーク解析例 .....	37
Fig. 3-22 天然の放射性核種別の高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション).....	37
Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例.....	39
Fig. 4-2 地上測定による空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (東通・六ヶ所).....	40
Fig. 4-3 地上測定による空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (志賀).....	41
Fig. 4-4 地上における測定点 (東通・六ヶ所).....	46
Fig. 4-5 地上における測定点 (志賀).....	47
Fig. 4-6 地上測定による空間線量率との比較 (東通・六ヶ所).....	48
Fig. 4-7 地上測定による空間線量率との比較 (志賀).....	48

Fig. 4-8 地上測定による空間線量率との比較 (全データ).....	49
Fig. 4-9 地上測定による空間線量率との比較 (川内).....	49
Fig. 4-10 地上測定による空間線量率との比較 (大飯・高浜).....	50
Fig. 4-11 地上測定による空間線量率との比較 (伊方).....	50
Fig. 4-12 地上測定による空間線量率との比較 (泊).....	51
Fig. 4-13 地上測定による空間線量率との比較 (柏崎刈羽).....	51
Fig. 4-14 地上測定による空間線量率との比較 (玄海).....	52
Fig. 4-15 地上測定による空間線量率との比較 (島根).....	52
Fig. 4-16 地上測定による空間線量率との比較 (浜岡).....	53
Fig. 4-17 空間線量率マップ (東通・六ヶ所).....	58
Fig. 4-18 空間線量率マップ (志賀).....	59
Fig. 4-19 空間線量率マップの比較 (東通・六ヶ所).....	60
Fig. 4-20 空間線量率マップの比較 (志賀).....	61
Fig. 4-21 <sup>40</sup> K 濃度マップ (東通・六ヶ所).....	64
Fig. 4-22 U-series 濃度マップ (東通・六ヶ所).....	65
Fig. 4-23 Th-series 濃度マップ (東通・六ヶ所).....	66
Fig. 4-24 <sup>40</sup> K 濃度マップ (志賀).....	67
Fig. 4-25 U-series 濃度マップ (志賀).....	68
Fig. 4-26 Th-series 濃度マップ (志賀).....	69
Fig. 4-27 東通・放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 ( <sup>40</sup> K、東通・六ヶ所).....	70
Fig. 4-28 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (U-series、東通・六ヶ所).....	71
Fig. 4-29 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (Th-series、東通・六ヶ所).....	72
Fig. 4-30 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 ( <sup>40</sup> K、志賀).....	73
Fig. 4-31 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (U-series、志賀).....	74
Fig. 4-32 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (Th-series、志賀).....	75
Fig. 4-33 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係.....	77
Fig. 4-34 海上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係.....	78
Fig. 4-35 空気中核種フライトから求めた NaI RSI システムの計数率とラドン弁別手法を適用し求めたラドン子孫核種起源の計数率の平均値の比較.....	79
Fig. 4-36 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (東通・六ヶ所).....	82
Fig. 4-37 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (志賀).....	83
Fig. 4-38 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (東通・六ヶ所).....	84
Fig. 4-39 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (志賀).....	85
Fig. 4-40 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ比較.....	86
Fig. 4-41 従来法とラドン弁別手法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較 (東通・六ヶ所).....	87
Fig. 4-42 従来法とラドン弁別手法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較 (志賀).....	88
Fig. 4-43 放射性セシウム沈着量マップ.....	90

Fig. 5-1 既存の無人機によるシステムと原子力災害時に備えるべき無人機システムのイメージ.....	92
Fig. 5-2 原子力発電所事故を例にした対応シミュレーション.....	92
Fig. 5-3 代表的な無人機の概観とスペック .....	94
Fig. 5-4 Penguin C の概観 .....	96
Fig. 5-5 地上局の外観 (左) と通信試験風景 (右).....	98
Fig. 5-6 CoPilot の「CHUTE DEPLOY」ボタン.....	100
Fig. 5-7 CoPilot でエンジンのスロットルを自動モードから手動モードに切り替える手順 .....	101
Fig. 5-8 Copilot のインジケータと警告画面 .....	101
Fig. 5-9 チェックリストシステムのフローチャート.....	103
Fig. 5-10 フライト試験中の飛行経路 (2019年10月23日実施).....	108
Fig. 5-11 フライト試験中の機体位置データログ (2019年10月23日実施) .....	109
Fig. 5-12 フライト試験中の機体姿勢データログ (2019年10月23日実施) .....	110
Fig. 5-13 フライト試験中のエンジン関連データログ (2019年10月23日実施).....	111
Fig. 5-14 フライト試験中の操縦舵面データログ (2019年10月23日実施) .....	112
Fig. 5-15 フライト試験中の機体システムデータログ (2019年10月23日実施).....	113
Fig. 6-1 管制区域に係る情報 (東通・六ヶ所).....	117
Fig. 6-2 管制区域に係る情報 (志賀).....	118



## 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9年経過し、継続的な航空機モニタリングを実施しつつ、手法の改善および体制の整備を行ってきた<sup>1)・13)</sup>。

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<sup>14)</sup>。

### 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

##### (1) 緊急時モニタリングの実施業務

##### ② 緊急時モニタリングの実施・支援

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

一方、実際の原子力災害を想定した場合、フライトのタイミングや体制等を事故前に決定しておく必要がある。特にフライトのタイミングについては、原子力災害対策指針<sup>15)</sup>に定められている防護措置の実施の判断基準(Operational Intervention Level: OIL)を踏まえて位置づけられることが望ましい。Table 1-1に原子力災害対策指針におけるOILについて示す。また、機能的・効率的にフライトするには、事前に想定される地域を訓練として実際にフライトし、地域的な特性(飛行場から原子力発電所までの距離および事故発生、フライト開始までの最短時間評価並びに地形等フライト時の懸念事項)を抽出しておくことが望ましい。さらに、航空機モニタリングのデータを解析して情報を公表するまでの時間についてもシミュレーションしておく必要がある。

現在、福島原子力発電所の周辺環境で行っているモニタリングは、周辺環境に沈着した放射性セシウムから放出される $\gamma$ 線の測定を目的としている。放射性セシウムの影響が天然放射性核種からの影響に比べて比較的高い場所を測定する場合には、天然放射性核種の影響は無視で

きるが、福島原子力発電所事故よりも比較的小さな事故を想定した場合は、天然放射性核種の影響を考慮しなければならない。事故以前に測定・推定された天然の放射性核種由来の空間線量率分布をみると、西日本で高い傾向にあり、最大0.13  $\mu\text{Gy/h}$ 程度の場所もあるとされている<sup>16)</sup>。日本地質学会のホームページに掲載されている、地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果<sup>17)</sup>について Fig. 1-1 に示す。例えば、このような天然核種由来の線量率(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  $\mu\text{Sv/h}$  を測定する場合には、無視できない大きさである。バックグラウンドは、 $\gamma$  線エネルギースペクトルから除去する手法が考えられるが、スペクトル弁別には計数を一定程度蓄積する必要がある、一般的に時間がかかる。一方、事前にバックグラウンドを調査しておく、実際の事故時に迅速かつ正確にバックグラウンドを減算することができる。また、事前にフライトすることによって、地域特有の航空管制の情報、空港の使用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資する情報をあらかじめ取得しておくことは重要である。

近年、ドローン等の無人飛行体(UAV)の開発は著しく、福島原子力発電所事故後、放射線検出器と組み合わせたシステムが開発されている。原子力機構では、福島原子力発電所周辺のモニタリングや河川敷のモニタリングにヤマハ発動機社製の自律型無人ヘリコプターを活用している<sup>18)-20)</sup>。また、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)と共同で燃費が良い飛行機型 UAV に放射線検出システムを搭載したモニタリングシステム(Unmanned Airplane Radiation Monitoring System: UARMS)を開発してきている<sup>21)-23)</sup>。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<sup>21)</sup>。無人飛行機の特徴は、長距離通信での無人飛行が可能及び航続時間が長いことが挙げられ、現在、原子力規制庁が実施している有人ヘリコプターを用いた航空機モニタリングの代替技術としての適用が期待されているほか、将来的には原子力防災への適用が可能と考えられている。UAV を用いると放射線計測を遠隔地から実施できるため、本技術を原子力防災のツールとして適用することで、人員の被ばく線量低減に資すると考えられる。

これまでの一連の受託研究成果は以下の通りである。平成 27 年度(2015 年度)には、鹿児島県にある九州電力川内原子力発電所周辺の 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、天然の放射性核種の評価手法等について確立した<sup>7)</sup>。

平成 28 年度(2016 年度)には、福井県にある関西電力大飯・高浜発電所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<sup>9)</sup>。

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、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原子力発電所周辺 3 km~80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実施した<sup>11)</sup>。

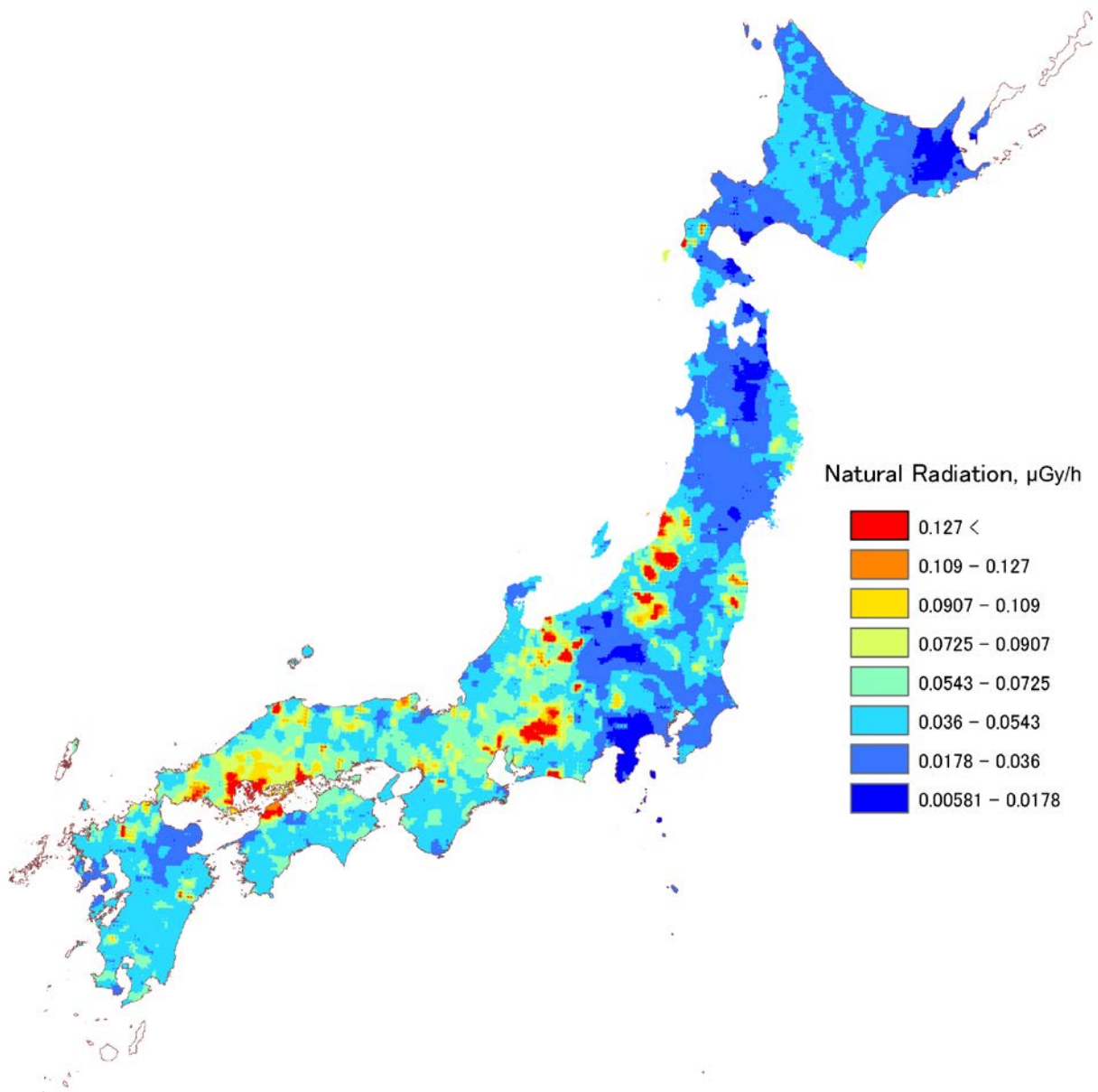
平成 30 年度(2018 年度)には、島根県にある中国電力島根原子力発電所および静岡県にある中部電力浜岡原子力発電所周辺 3 km~80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングを実

施した<sup>13)</sup>。

本報告書では、2019 年度に青森県にある東北電力東通原子力発電所並びに日本原燃六ヶ所再処理工場 (以下、東通・六ヶ所) および石川県にある北陸電力志賀原子力発電所 (以下、志賀) 周辺 3 km～80 km 圏内におけるバックグラウンドモニタリングにより得られた測定結果を報告する。また、今年度より、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た。初年度は、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結果を報告する。

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 $\mu$ Sv/h (地表面から1 mの高さ)		
	OIL4	除染を講じるための基準	$\beta$ 線: 40,000 cpm 皮膚から数 cm, 入射窓面積 20 $\text{cm}^2$ $\beta$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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<sup>17)</sup>より)

## 2. モニタリングシステムとヘリコプター

### 2.1. 航空機モニタリングシステム

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

今回のモニタリングで使用したシステム (以下、RSIシステム) は、原子力規制庁の所有する、機内に装着するタイプの Radiation Solution Inc. (RSI, Canada) 製航空機モニタリング機器を使用した。RSI システムのブロック図を Fig. 2-1 に示し、外観を Fig. 2-2 に示す。検出部 (Detector) には、2" × 4" × 16" の NaI シンチレーション検出器 3 本を組み込んだ検出器のユニットを 2 台使用している (合計: 12.6 L)。検出器で計測した 1,024 ch (0 ch ~ 1023 ch) の  $\gamma$  線のスペクトルは 1 秒毎に同期する GPS による位置データとともに、RS-701 と呼ばれる検出器上部に取り付けてあるデータ収集装置に保存される。検出器 2 台のデータは RS-501 という装置で統合される。RS-501 は PC と接続でき、PC にインストールされている専用のソフトウェア (RadAssist) を使用することによって GPS による位置情報や  $\gamma$  線の計数率情報をリアルタイムに確認できる。また、全体は外付けのバッテリーで駆動し、完全充電で 5 時間の稼働が可能である。

現在、原子力規制庁が所有する機器は複数システムあり、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングで主に使われている 2 システム (RSI 1、2) と区別するため、本報告書では RSI 3 と表記する。

また、RSI システムの GPS 受信機とは独立して高精度 GPS も機内に搭載している。当該システムでは高精度 GPS 受信機 (CORE 社製 QZNAV) が用いられており、RSI システムの GPS 受信機と比較して利用可能な信号が多い。具体的には、準天頂衛星システム (通称みちびき) からの情報を利用できるほか、L1-SAIF と呼ばれる補強信号を受信することにより、精度の高い位置情報の測定を行うことができる。測定された  $\gamma$  線計数率とその位置情報との紐付けは基本的に RSI システムの GPS で取得された緯度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<sup>10)</sup>。そのような事象が起きた際には、位置情報を高精度 GPS で取得された緯度および経度に置換する等の措置を行う。

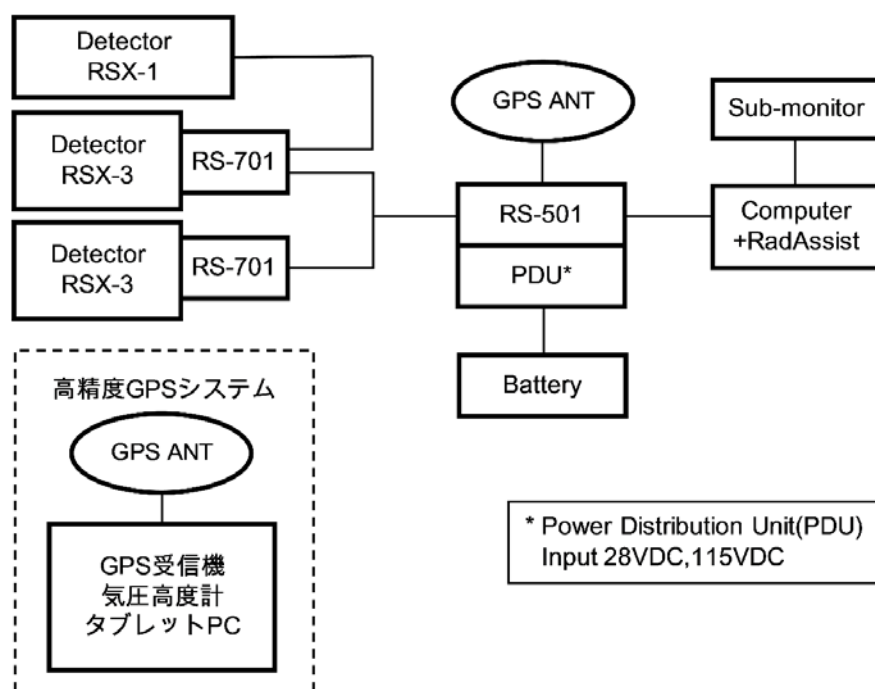


Fig. 2-1 RSI システムのブロック図

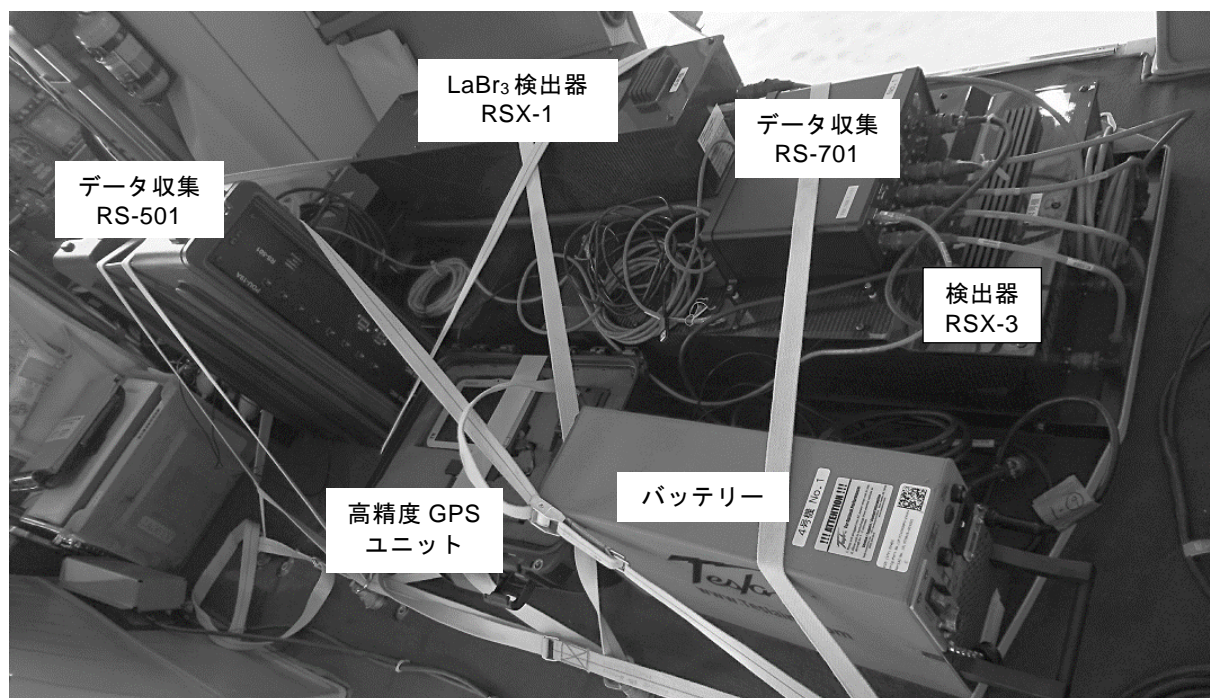


Fig. 2-2 RSI システムの写真

## 2.2. ヘリコプターの選定

RSIシステムは、機内に搭載するタイプであるため、機体(ヘリコプター)を選ばないというメリットはあるが、ヘリコプターの機底に燃料タンクがある場合、燃料タンクの材料および燃料による放射線の遮へいを無視できず評価が難しくなる。そこで、その評価に伴う誤差の混入を避けるためRSIシステムを使用できる機体は、機底に燃料タンクのない機種に限定している。使用できる機体について、Fig. 2-3 に示す。2019年度は、機体繰りの都合から、Bell 430 を使用した。Fig. 2-4 に使用した機体について示す。



Bell 430  
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



Bell 412  
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



AS 332  
アエロスパシアル社製



S-76  
シコルスキー・エアクラフト社製

Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧





**Fig. 2-4 東通・六ヶ所および志賀周辺のモニタリングに使用した機体  
(Bell 430 JA6900)**

### 2.3. RSI システムの保守

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

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

2,614 keV のピークに対する半値幅については、メーカーから 6 %以下という保守の推奨値が示されている。日常の点検で常に数値を確認し、この推奨値を超えた場合には高圧電源の電圧を変更するなど再調整を実施する。また、アンプのゲインについても同様にメーカーから示されている推奨値である 0.8 を下回る場合に再調整を行うこととしているが、2019 年度は再調整を行う必要性が生じなかった。本報告における半値幅とアンプのゲインの推移について Fig. 2-5、Fig. 2-6 に示す。図中の RSI 3 以降の枝番は配置してある検出器の番号である。アンプのゲインに大きな変動は見られなかったものの、使用日数が長くなるにつれ若干上昇傾向にある場合があった。これは、気温の低下により検出器の信号が小さくなることに起因する。このことから、気温の低い時期のモニタリングの際には注意が必要であり、ヘリコプター機内はなるべく気温が下がらないように対策を講じることが望ましい。これらのデータは RSI システムの保守を行う際に参考となる。

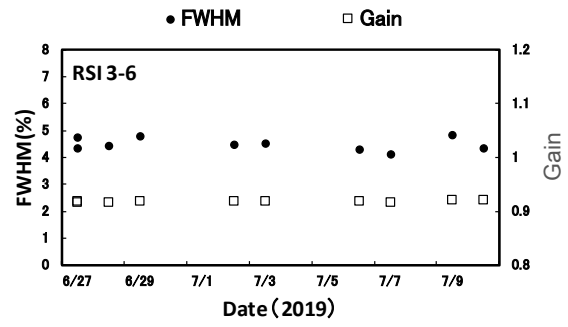
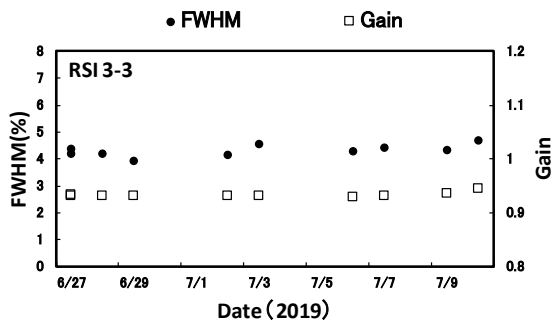
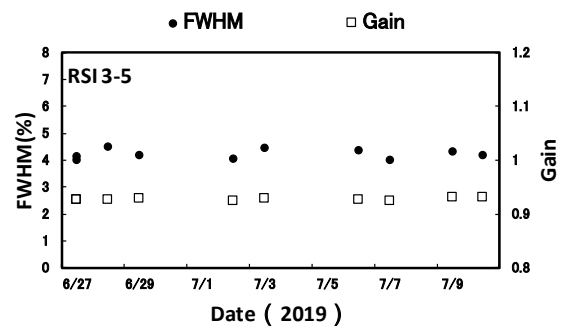
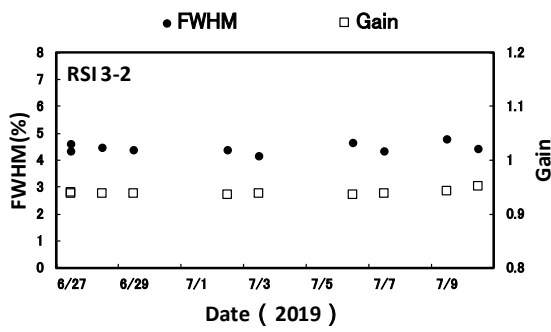
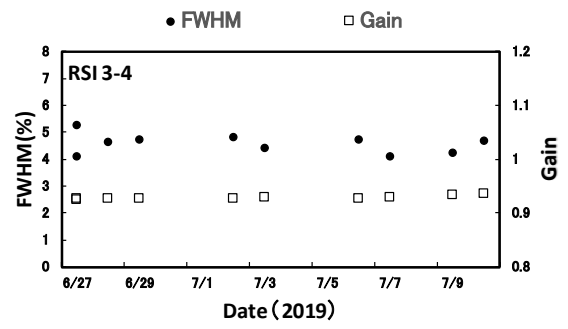
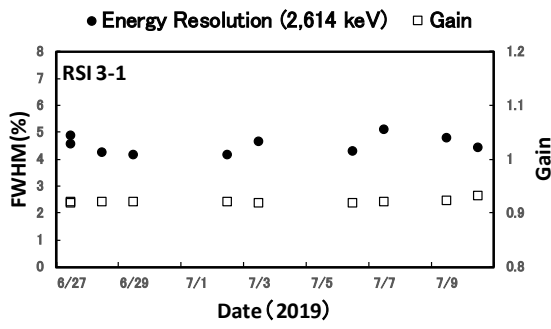


Fig. 2-5 システムの半値幅および Gain の変動 (東通・六ヶ所 RSI 3)

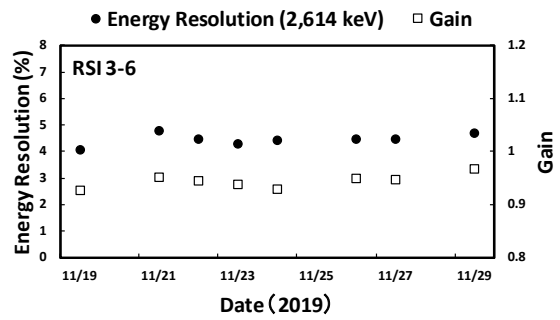
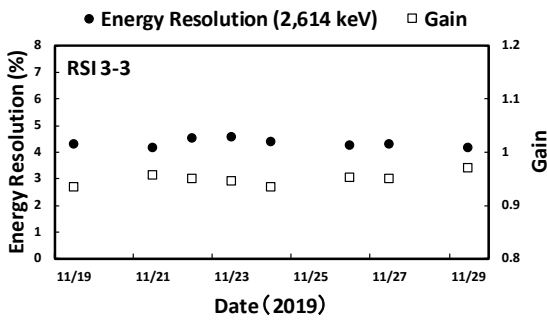
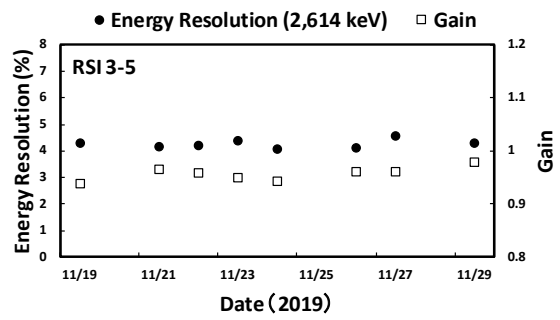
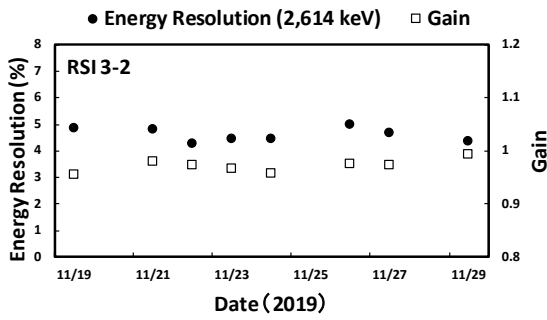
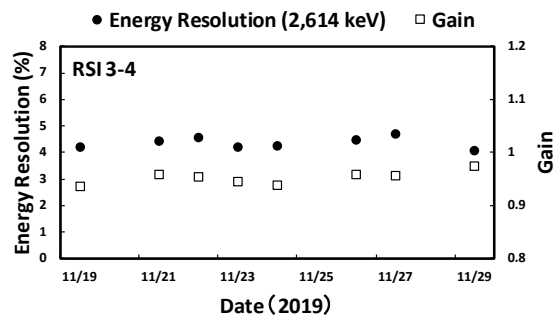
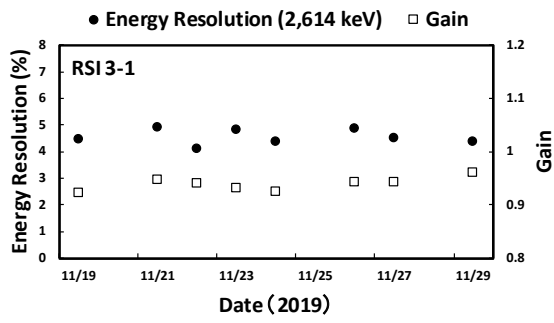


Fig. 2-6 システムの半値幅および Gain の変動 (志賀 RSI 3)

### 3. データ取得および解析方法

#### 3.1. データ取得方法

データは、下記のようなフライト条件で取得した。この測定条件は、気象条件や地形の高度・勾配によって若干変化する。測定データは、1秒ごとにGPSの位置情報と検出器の $\gamma$ 線のスペクトルを記録した。Fig. 3-1 (東通・六ヶ所)、Fig. 3-2 (志賀)に測定の予定測線について示す。Fig. 3-3にデータ取得のイメージを示す。

以降、本報告で使用する背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用した。

##### [フライト条件]

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

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

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

測定範囲のイメージについて Fig. 3-4 に示す。

##### [測定に要した期間]

- 東通・六ヶ所: 2019年6月26日～7月10日 (のべ22フライト)
- 志賀: 2019年11月21日～11月29日 (のべ15フライト)

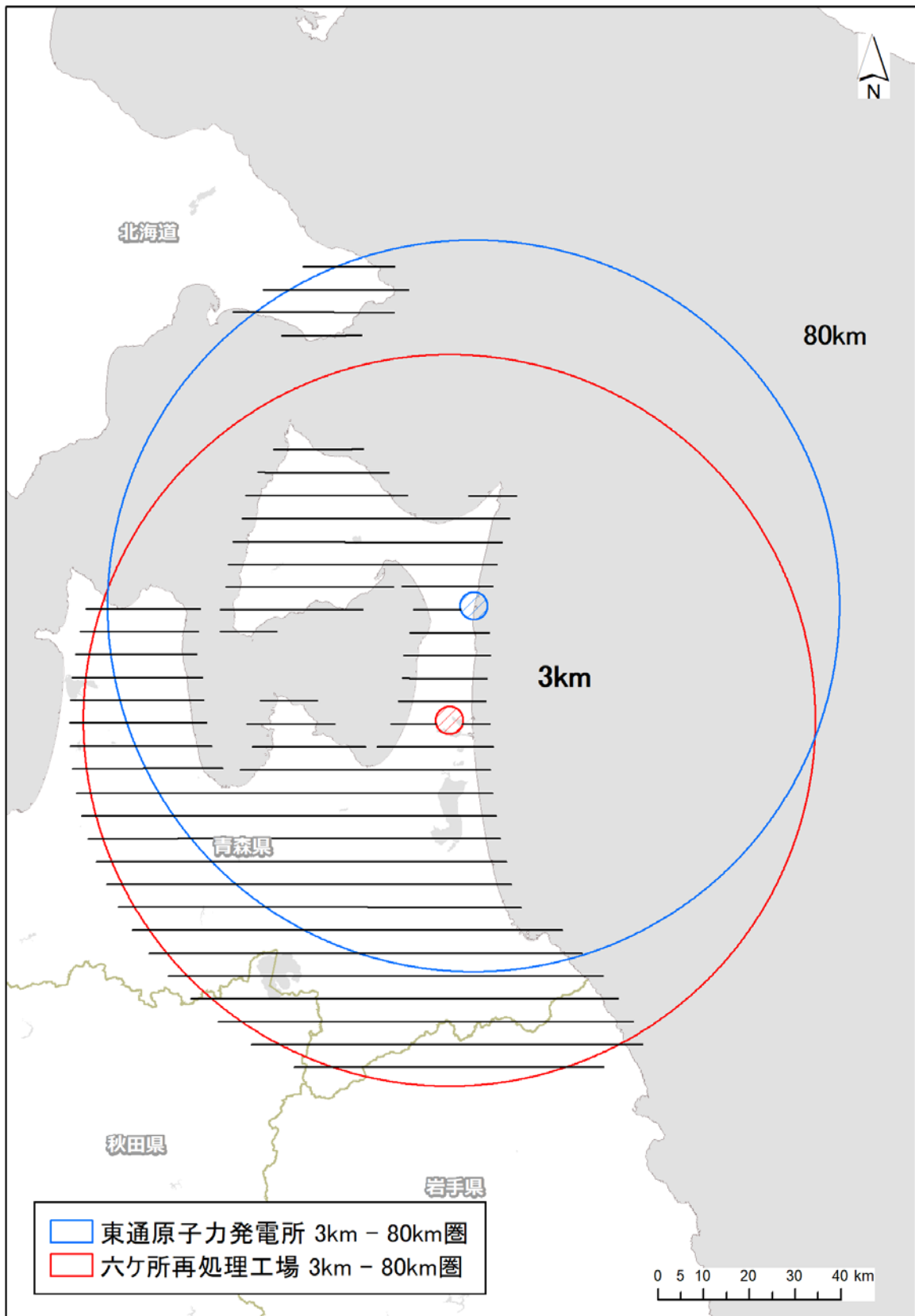


Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (東通・六ヶ所)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

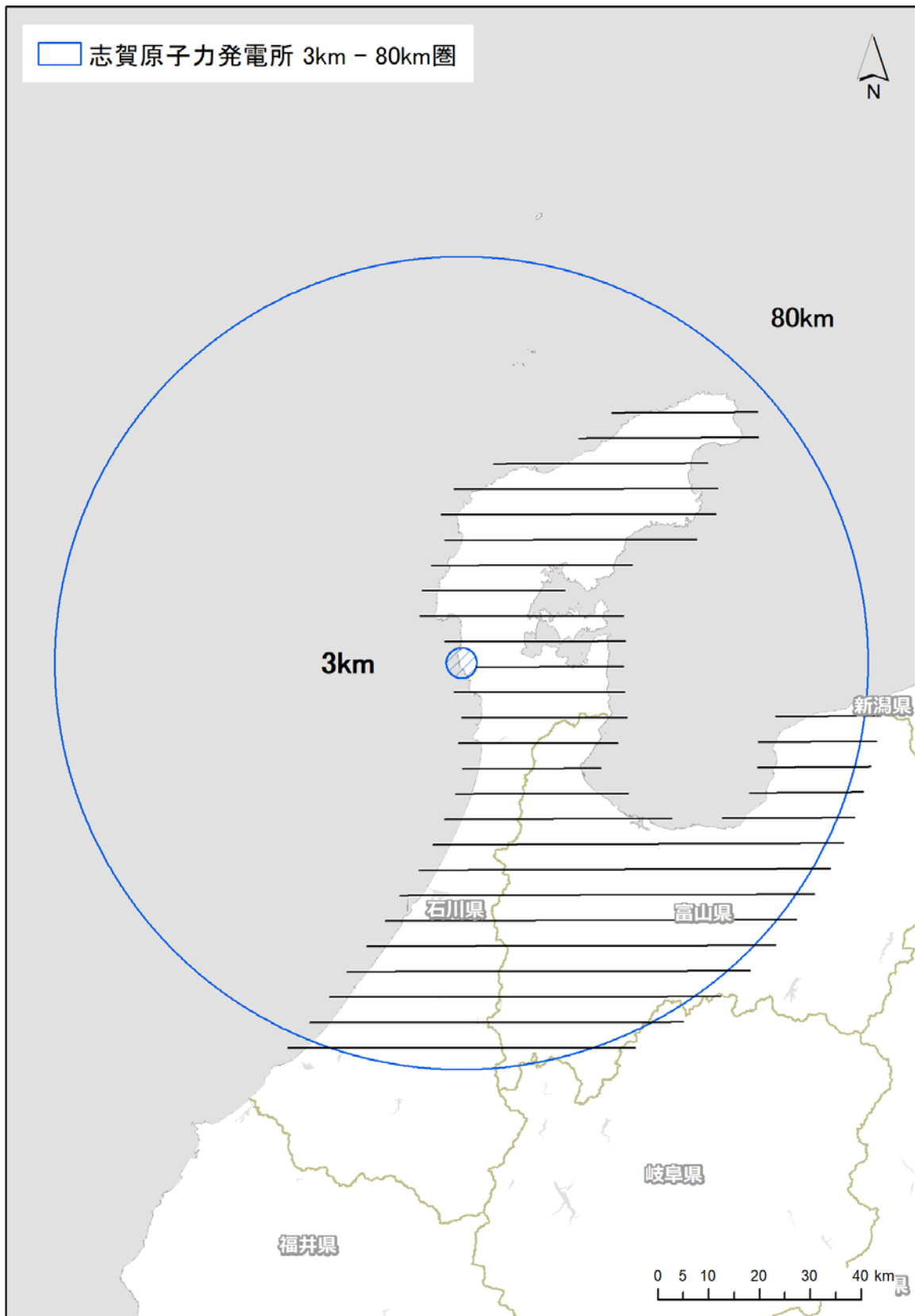


Fig. 3-2 予定したフライトの測線 (志賀)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

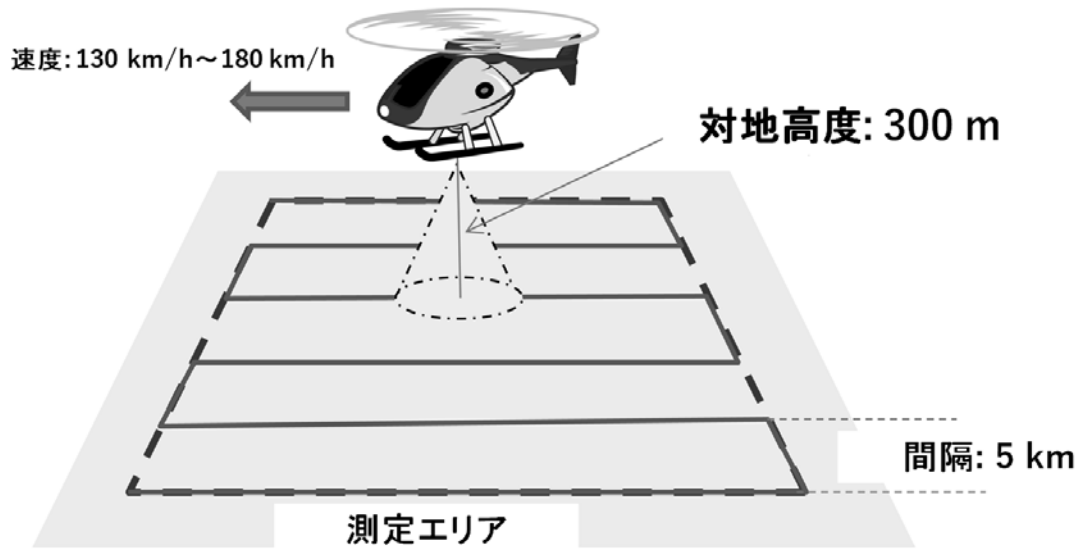


Fig. 3-3 フライトイメージ

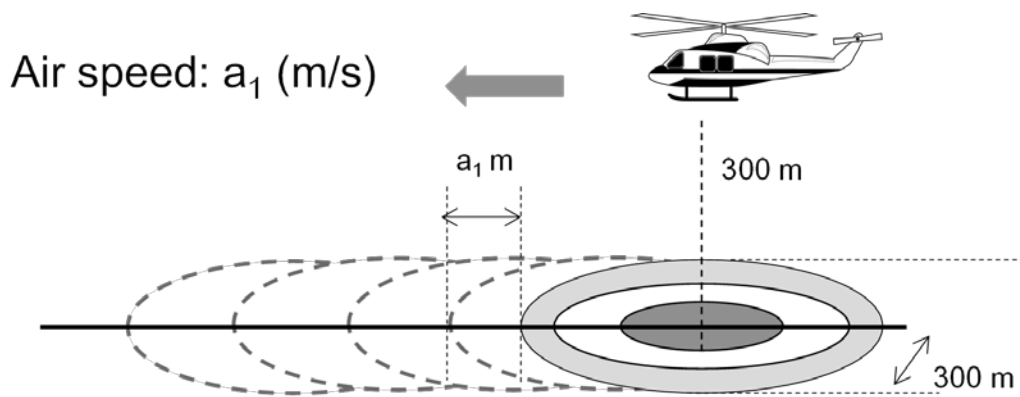


Fig. 3-4 上空からの測定範囲イメージ



### 3.2. キャリブレーションフライト方法

上空で取得したデータを地表面から 1 m の高さの放射線量や地表面の放射性セシウムの沈着量に換算するためのパラメータを求めるため、各種キャリブレーションフライトを実施する。キャリブレーションフライトの種類と目的について Table 3-1 に示す。

#### ・テストラインフライト

高度を補正するため、実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor:  $AF (m^{-1})$ ) を求めるためのフライトである。本フライトは、線量や地形の変化が少ない地点において約 3 km のラインを設定し、その上空において高度を変化させながら (300 m、450 m、600 m、750 m、900 m、1,500 m) フライトを実施する。得られたデータは高度ごとに平均化し、高度と計数率のグラフを作成し、指数近似の傾きによって、高度を補正する。テストラインフライトのイメージを Fig. 3-5 に示す。また、テストラインとして選定した場所について Fig. 3-6 (東通・六ヶ所)、Fig. 3-7 (志賀) に直線で示す。

#### ・テストポイントフライト

空間線量率の勾配が小さい場所および地形の平坦な地点 (テストポイント) を選定し、そこから半径 1,000 m の範囲内における上空でホバリングすることで、基準高度 (300 m) における地上の空間線量率換算係数 (Conversion factor of Dose-rate:  $CD (cps/[\mu Sv/h])$ ) を求めるためのフライトである。テストポイントでは NaI シンチレーション式サーベイメータ (日立製作所製 TCS-172B) を用いて、地表面から 1 m の高さの空間線量率の測定 (以下、地上測定) を人手により、半径 1,000 m の範囲内で 60 ポイントを目安に行う。また、テストポイントとして選定した場所を Fig. 3-6 (東通・六ヶ所)、Fig. 3-7 (志賀) に半径 1,000 m の円で示す。テストポイントフライトのイメージを Fig. 3-8 に示す。

#### ・宇宙線フライト

宇宙線の影響を差し引くために、海上を約 300 m～2,400 m まで上昇し、データを取得するものである。宇宙線フライトのイメージを Fig. 3-9 に示す。フライト場所は、陸地から十分に離れた海上であれば場所は問わないので、天候等を見ながら海上の適当な位置で実施する。

#### ・空気中核種フライト

地上からの放射線の影響が極めて少ないと考えられる対地高度約 900 m に保ち、約 3 分のフライトを継続し、機体および検出器周辺の空気中に存在する放射性核種由来の  $\gamma$  線計数率を取得する。空気中核種フライトのイメージを Fig. 3-10 に示す。

Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧

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

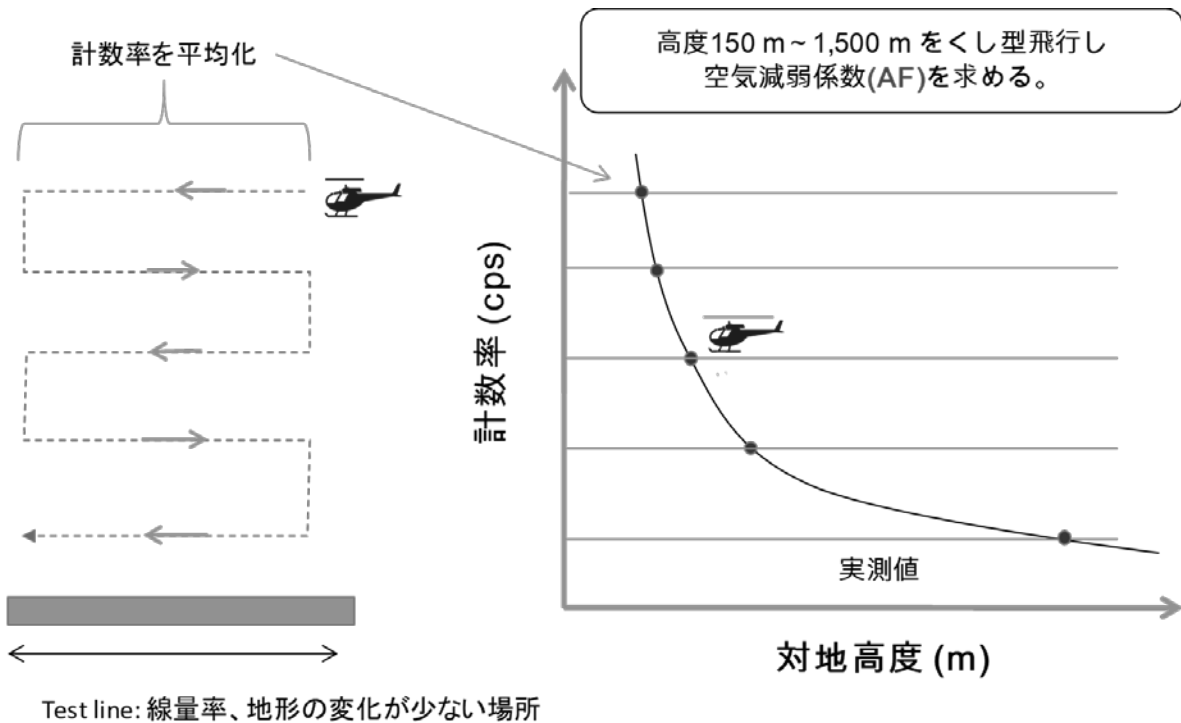


Fig. 3-5 テストラインフライトのイメージ



Fig. 3-6 テストラインおよびテストポイントの場所 (東通・六ヶ所)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

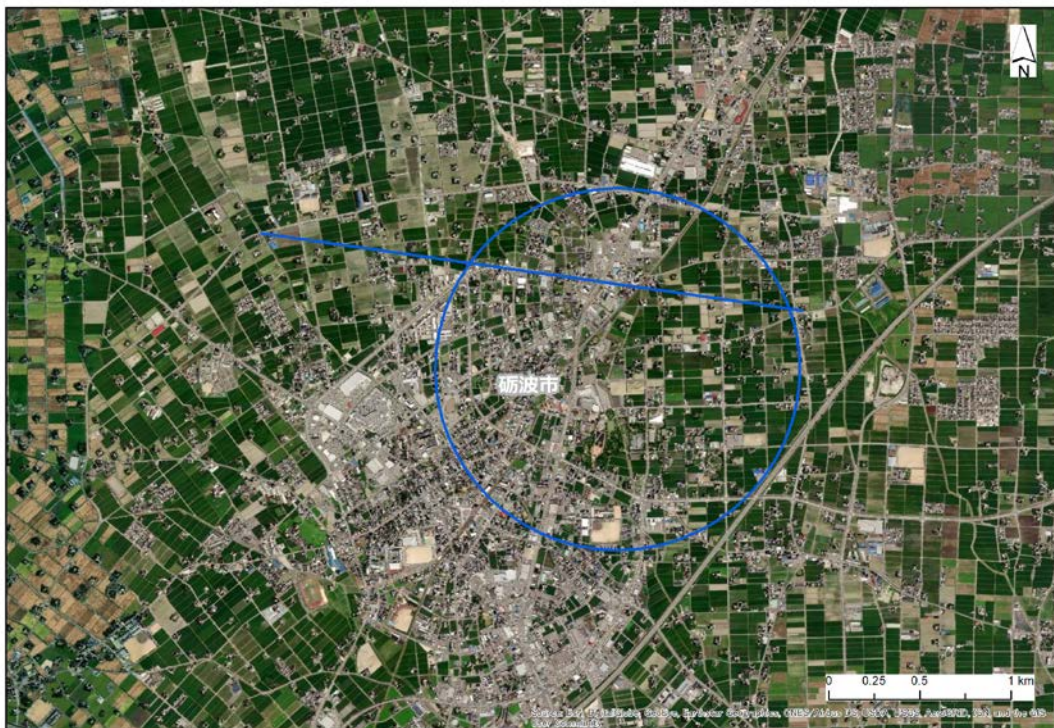


Fig. 3-7 テストラインおよびテストポイントの場所 (志賀)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

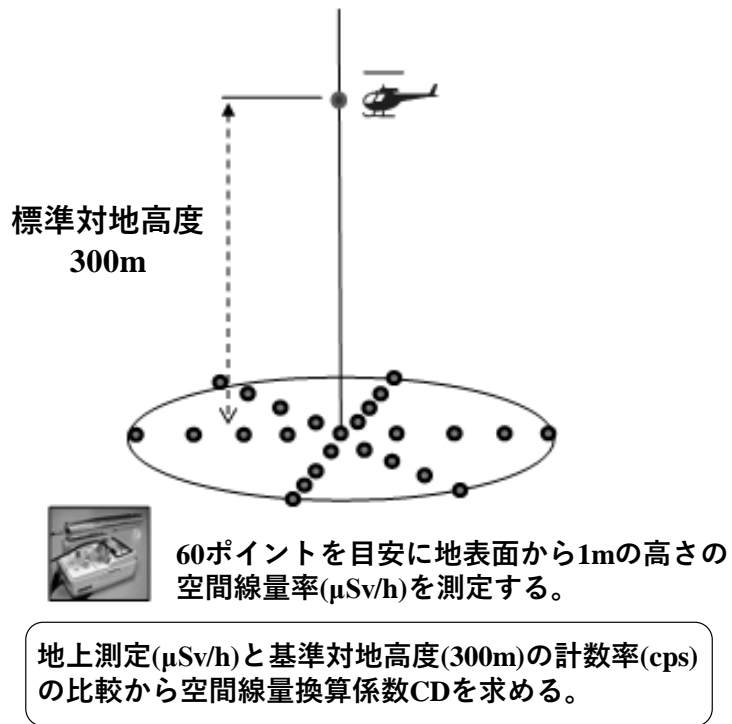


Fig. 3-8 テストポイントフライトのイメージ

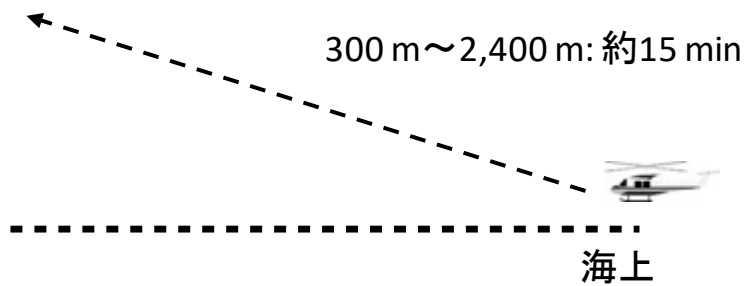


Fig. 3-9 宇宙線フライトのイメージ

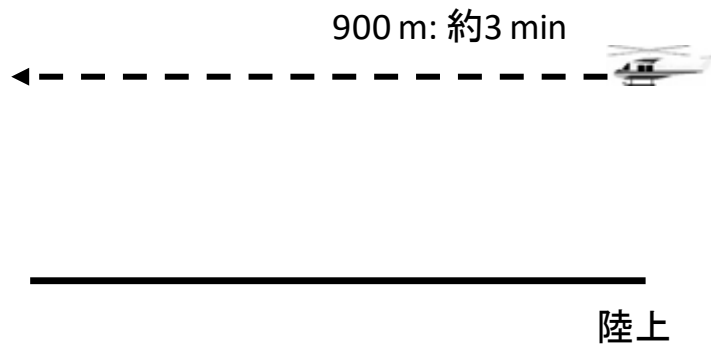


Fig. 3-10 空気中核種フライトのイメージ

### 3.3. 解析のフロー

本測定法により、計数される放射線は主に以下の4種類に分けられる。

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

本報告で測定する地域において、放射性セシウムの影響は無視できるため、①を評価するためには、②および③起源の計数率を測定データ(全計数率)から減算する必要がある。これらを考慮した解析のフローを Fig. 3-11 に示す。なお、本章以降の空間線量率とは、周辺線量当量率(1 cm 線量当量率)を意味する。

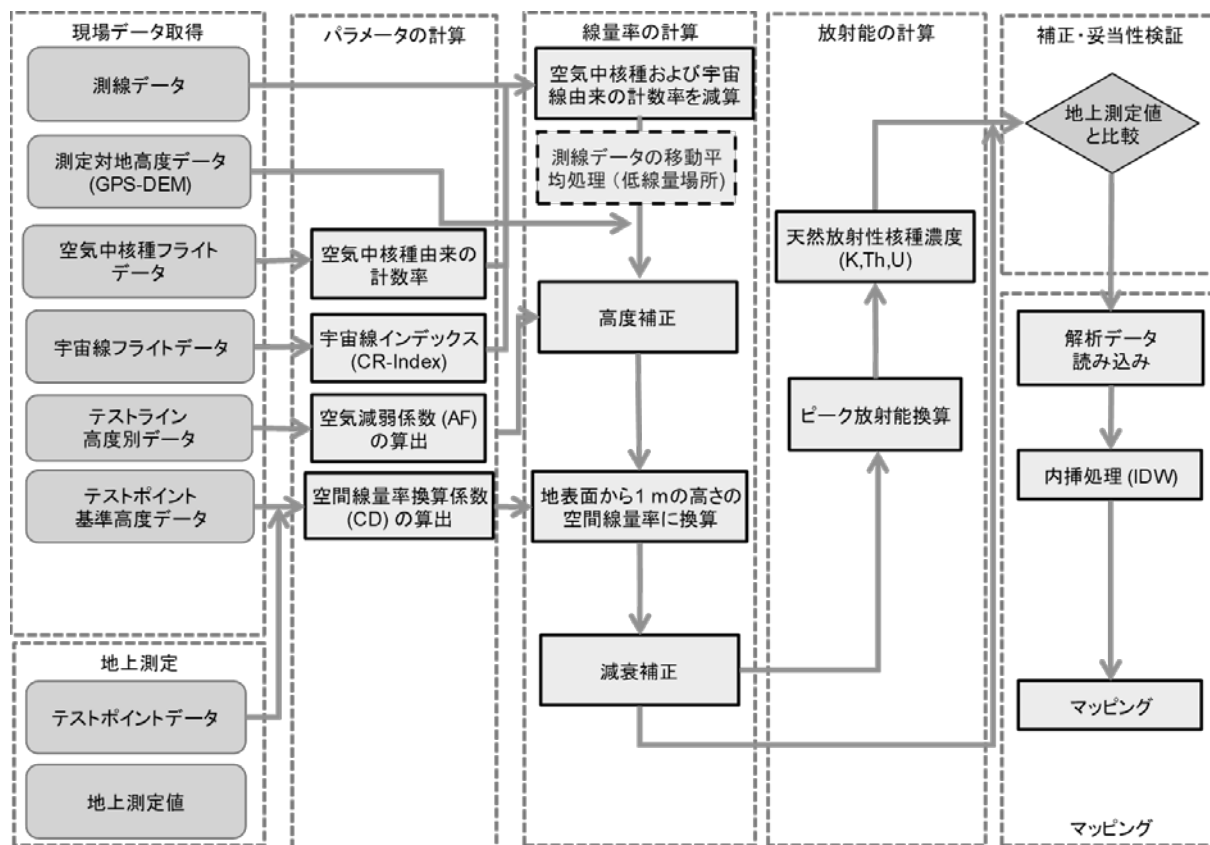


Fig. 3-11 解析のフロー

### 3.4. 空間線量率への換算方法

#### 3.4.1 空気中核種および宇宙線由来の計数率

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

これまでの経験<sup>5)-13)</sup>から海拔高度が上昇すると宇宙線起因の計数率が上昇することが分かっている。宇宙線起因の計数率は、RSI システムが測定している全エネルギー範囲（30 keV～3,000 keV）で計数されるが、<sup>208</sup>Tl が放出する 2,614 keV の  $\gamma$  線およびその散乱線の影響により、2,614 keV 以下の計数において、宇宙線による計数を弁別することは難しい。そこで、宇宙線の影響だけを計数していると考えられる 2,800 keV 以上の計数に着目した。なお、RSI システムにおいて、3,000 keV 以上の計数は最終チャンネル（1,023 ch）に積算される。Fig. 3-13 に海拔高度と宇宙線の計数率の関係例を示す。この例は、沖縄と北海道での海上において、50 m～2000 m の高度で取得したデータの 2,800 keV を超える  $\gamma$  線の計数率をプロットしたものである。このように、海拔高度と計数率は正の相関にあり、計測場所に影響されない。また、2,800 keV を超える  $\gamma$  線の計数率と 2,800 keV 以下の  $\gamma$  線の計数率の比（CR-index）は、高度に依存せず一定の数値を示すことから、CR-index を機体と検出器の組み合わせごとに設定した。その後、実際に測定したスペクトルの 2,800 keV 以上の計数率から CR-index を用いて全エネルギーにおける宇宙線起因の計数率を算出し、全計数率から差し引いた。実測したデータを基に算出した CR-index について Table 3-2 に示す。これらのパラメータを実際の解析に使用し、空気中核種および宇宙線由来の計数率の減算を行った。

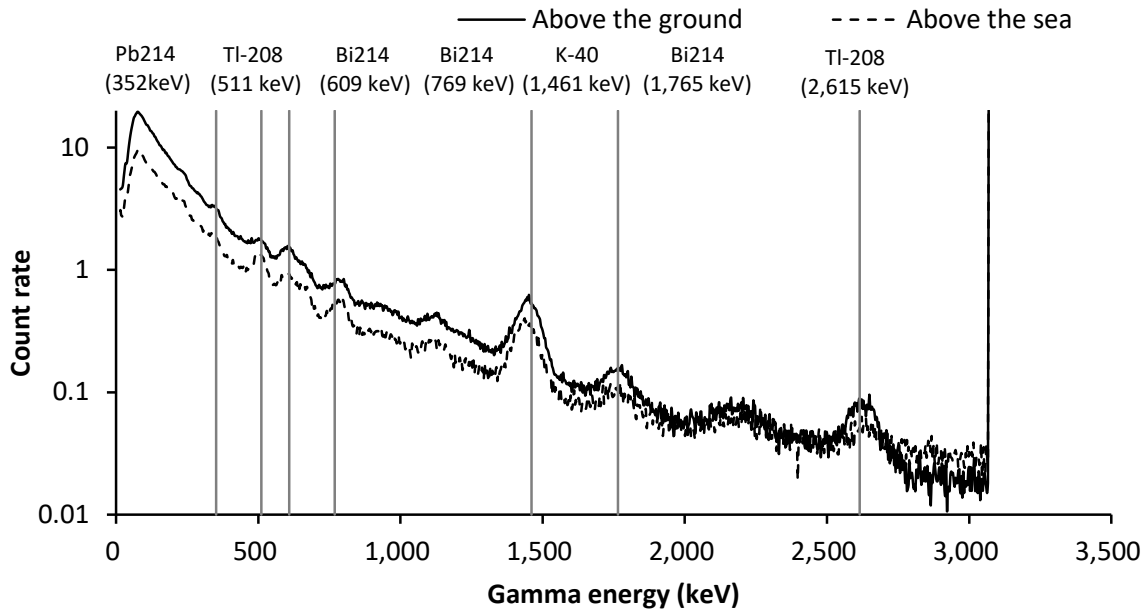


Fig. 3-12 RSI システムにおける地上で取得した  $\gamma$  線スペクトルと海上でのスペクトル例

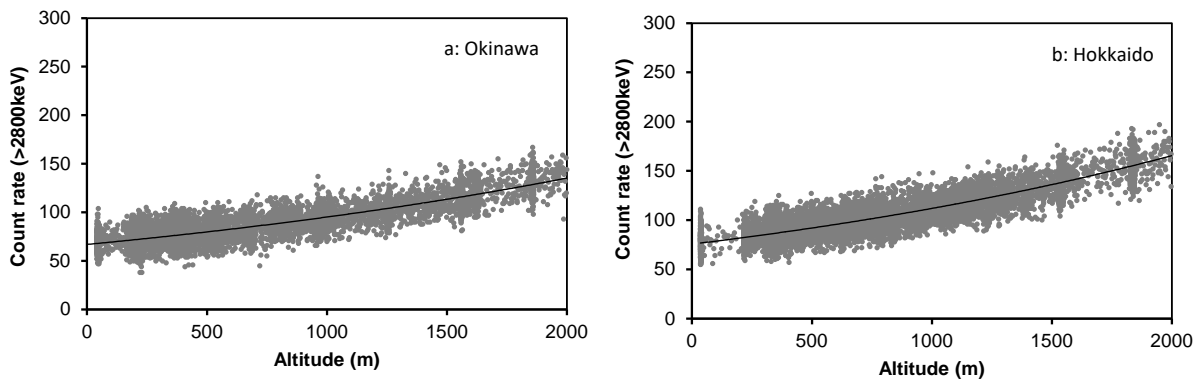


Fig. 3-13 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例

(a: 沖縄海域, b: 北海道海域)

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

Measurement area	Fiscal year	System	ヘリコプター	運航会社	空气中核種由来の計数率(cps)	CR-index
Higashidori Rokkasho	2019	RSI3	Bell 430 (JA6900)	AAC	272	3.89
Shika	2019	RSI3	Bell 430 (JA6900)	AAC	420	2.80
		RSI1	Bell 430 (JA05TV)	NNK	521	2.93
Fukushima	2019	RSI2	Bell 412 (JA9616)	AAC	493	2.97
		RSI2	Bell 412 (JA6767)	NNK	482	2.97

※ NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

### 3.4.2 高度補正係数の算出方法

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

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

ここで、

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

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

$H_{sd}$ : 基準高度(300 m)

$H_a$ : 対地高度(GPS 高度 - DEM - ジオイド高)

対地高度の算出には、GPS で記録した楕円対地高度から、公開されている 10 m メッシュの数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM)<sup>24</sup>およびジオイド高を差し引いて求めた\*1。対地高度と対応する計数率データは、Microsoft Excel®上で散布図としてプロットし、指数関数フィッティングを行った近似曲線の傾きを  $AF$  とする。テストラインで取得したデータを基に  $AF$  を求めた。実際に使用した換算パラメータについては、4.1 節に詳述する。

### 3.4.3 空間線量率への換算係数の算出方法

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

### 3.4.4 空間線量率への換算方法

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

① 測定で得られた  $\gamma$  線スペクトルから以下の領域の計数率を計算する。

(1) 全計数率 ( $C_{all}$ )

---

\*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からの高さ (ジオイド高) を差し引く必要がある。ジオイド高は、地域によって異なるが、日本においては 30 m ~ 40 m である。



(2) 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 ( $I_{cos}$ ) をかけて全エネルギー帯の計数率に対する宇宙線起源の計数率 ( $BG_{cos}$ ) を計算する。
- ③ 空气中核種フライトで取得したデータを空气中核種起源の計数率 ( $BG_{air}$ ) とする。
- ④  $C_{all}$ から  $BG_{cos}$ と  $BG_{air}$ を差し引いた計数率を  $C_{net}$ とし、 $CD$ および  $HF$ を用いて地表面から 1 m の高さの空間線量率  $D$ を算出する。

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

ここで、

$HF$ : 高度補正係数

$CD$ : 空間線量率換算係数 (cps/[ $\mu$ Sv/h])

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

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

および式 [1] を式 [2] に代入すると

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

となる。ここで定義した各記号の凡例を改めて以下に示す。

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

$C_{all}$ : 全計数率 (cps)

$BG_{air}$ : 空气中核種起源の計数率 (cps)

$CD$ : 空間線量率換算係数 (cps/[ $\mu$ Sv/h])

$AF$ : 空気減弱係数 ( $m^{-1}$ )

$H_{sd}$ : 基準高度 (300 m)

$H_m$ : 測定高度 (m)

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

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

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

以下では、これら換算のための補正係数等を総称し「換算パラメータ」と呼ぶ。

### 3.5. 検出下限値

検出下限 (Limit of Detection) と信頼性について評価を行った。まず、式 [3] に示した航空機モニタリングにおける空間線量率への換算方法の評価式を基に、検出下限値を計算する。式 [3] に示したように、航空機モニタリングにより算出される空間線量率の検出下限値は  $BG_{air}$  と  $BG_{cos}$  に影響を受ける。 $BG_{cos}$  はこれまでの測定結果を見ると 200 cps～500 cps の範囲となり、 $BG_{air}$  は約 400 cps であることから、ここでは、標準的な検出下限値を求めることを目的とし、 $BG_{air} + BG_{cos} = 900$  cps として評価を行った。

一般的に、検出下限値を求める際には、バックグラウンド計数率 ( $N_B$ ) の標準偏差 ( $\sigma$ ) を式 [4] に示した Currie の式<sup>25)</sup>に当てはめ、検出下限値 ( $N_D$ ) を算出する。

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

ここで、 $N_B$  を 900 cps とすると、 $N_D$  は 142 cps となる。これに、RSI システムの標準的な CD (13,000 cps/[ $\mu$ 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  $\mu$ Sv/h となった。

### 3.6. 不確かさ

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

- ・ 検出器の計数誤差：一般的に、計数率に対して統計的な誤差が生じる。
- ・ CD の選択：キャリブレーションのためのデータ取得には、測定条件により 20 % 程度の誤差が生じる。本測定の実験を重ねてきた現在では、その不確かさは小さくなってきている。
- ・ 高度補正係数の選択：CD と同様に、キャリブレーションのためのデータ取得の状況により係数の選択時の不確かさが生じる。
- ・ 測定高度の誤差：現在使用している GPS (Global Positioning System) には、衛星の位置等の状況により、高度情報において最大 30 m 程度の誤差が生じる。海拔高度の測定は GPS で実施しており、その誤差による不確かさが存在する。本誤差については、検証にまで至っておらず、今後の課題である。

### 3.7. マッピング

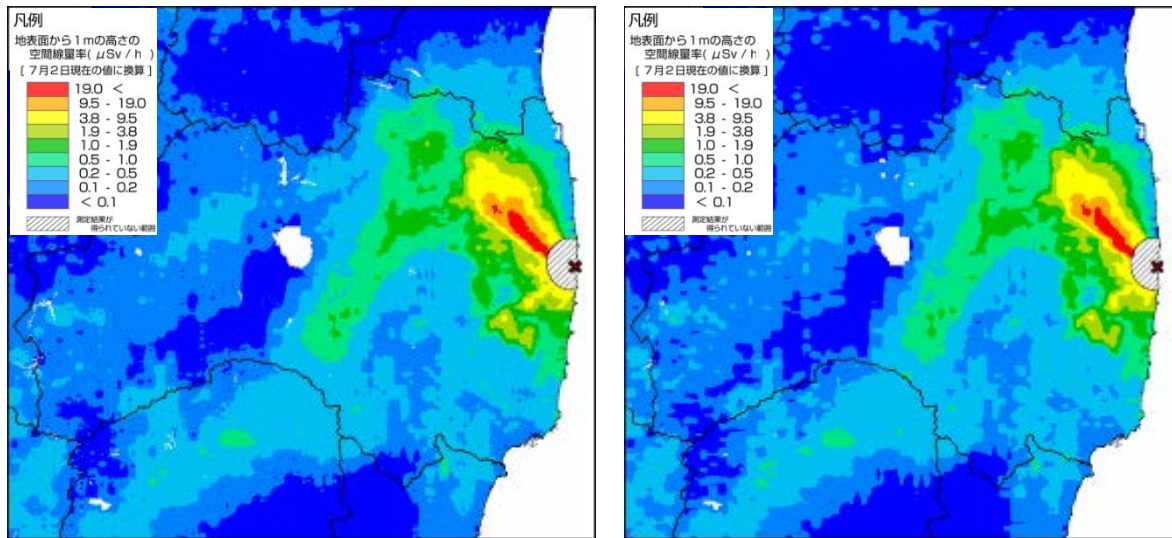
空間線量率や放射性物質のマッピングについては、国際原子力機関 (IAEA) から標準的な方法が示されている<sup>29)</sup>。補間方法には、IDW (Inverse Distance Weighted: 逆距離加重法)、クリギング (Kriging)、スプライン (Spline)、Natural Neighbor 等の多くの方法が存在する。福島原子力発電所周辺の航空機モニタリングでは、2011 年 4 月 6 日～29 日にかけて実施された第 1 回の解析を担当した DOE が用いた IDW を踏襲している。IDW とはある補間地点の近傍にある複数のサンプル点の測定値を補間地点からサ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<sup>26)</sup>。

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

本報告においては、 $\hat{z}_0$ を補間地点における空間線量率の推定値、 $d_{NT}(p_0, p_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, s$ )を補間地点 $p_0$ からサンプル点 $p_i$ までの水平距離、 $z_i$ を各サンプル点を持つ実測値、補間地点から近傍 $s$ 点をサンプル点とした。IDWによる補間の条件として「補間地点とサンプル点間の距離が大きくなるにつれて、その補間地点においてサンプル点が推定値に与える影響が減衰していく」ことが前提になる。そのため、推定する(重み付け平均)値は補間地点から近傍 $s$ 点の最高値より大きくならず、最低値より小さくなることはない。また、IDWには複雑なパラメータ設定が不要である。必要となるのは、補間地点とサンプル点間の距離に応じて影響度を制御する乗数 $\lambda$ と内挿処理の対象となるサンプル点数 $s$ の2つである。IDWでは $\lambda$ と $s$ の設定によって結果が異なってくるが、最良の値を決定するための基準が存在していない。 $\lambda$ が大きいほど、補間地点近傍データの影響力が相対的に大きくなり、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、 $\lambda$ として2.3、 $s$ として400を採用した。ちなみに、福島原子力発電所周辺で実施された第3次航空機モニタリングの空間線量率の二乗平均平方根誤差(Root Mean Squared Error: RMSE)は0.208であった。Fig. 3-14にパラメータ設定の異なる場合の空間線量率マップを示す。Fig. 3-14のa)とb)を比べると、両者の分布傾向は概ね一致しているが、線量のレンジの境界をみるとa)の方がなめらかになっていることが分かる。

航空機モニタリングにおいては、前述したとおり300 m上空からの測定を実施するため、測定される範囲は、ヘリコプター直下の地上半径300 m円内における放射線量の平均値となる。そこで、内挿においては測定対象のエリアを250 mメッシュに区切り、実測データから内挿しコンターマップを作成した。



a)乗数 2.3 対象地点数 180

b)乗数 2 対象地点数 12

\*第3次航空機モニタリングの測定結果を使用

**Fig. 3-14 IDW に入力するパラメータとマップの関係**  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

### 3.8. 大気中のラドン子孫核種の弁別手法

#### 3.8.1 ラドン子孫核種

地殻中に存在するウランやトリウムの変遷系列には、気体であるラドン (Rn) が存在し、ラドンの一部は大気中に散逸する。Fig. 3-15 に主な天然の放射性壊変系列であるウラン系列とトリウム系列について示す。大気中に散逸したラドンは、Po、Pb および Bi などの核種 (ラドン子孫核種) に壊変し、大気中の微粒子に吸着して大気中を浮遊する。航空機モニタリングにおける基準測定高度である対地高度約 300 m 付近におけるラドン子孫核種濃度の測定例はほとんど無いものの、地上におけるラドン濃度は広く測定されており、日本の屋外における濃度レベルは  $6 \text{ Bq/m}^3$  程度となっている<sup>27)</sup>。これらのラドンの濃度レベルは比較的低いものの、航空機モニタリングにおいてはヘリコプターの周辺に存在するような場合、測定される計数率に一定の影響があると考えられる。また、日単位や季節単位で空気中におけるラドン子孫核種濃度が変動することが知られており、航空機モニタリングの測定データに及ぼす影響も常に一定とは限らないと推察される<sup>28)</sup>。これまでの航空機モニタリングの経験においても、ラドン子孫核種の影響により、航空機モニタリングによる  $\gamma$  線計数率を地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算した際に過大評価となる例が報告されている<sup>5)-7)</sup>。

ラドン子孫核種が放出する  $\gamma$  線は、地殻にも同じ核種が存在するので、地上からの放射線との  $\gamma$  線スペクトル上での弁別が困難である。また、放射性セシウムが放出する  $\gamma$  線エネルギーに近いため、福島原子力発電所事故の影響を受けた地域近傍ではなおさら弁別が困難となる。

Table 3-3 にラドン子孫核種が放出する  $\gamma$  線エネルギーについて示す。これらのラドン子孫核種の影響を除去し、航空機モニタリングによる空間線量率への換算を高精度化する検討を 2015 年度に実施した<sup>7)</sup>。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<sup>8)</sup>。また、製作した解析プログラムを使用して 2016 年度～2018 年度に実施した発電所周辺におけるモニタリングデータを解析し、大気中のラドン子孫核種の影響について考察した<sup>9),11),13)</sup>。2019 年度も引き続き各原子力施設周辺の測定データに本手法を適用した。以下、大気中のラドン子孫核種の影響の除去手法を「ラドン弁別手法」と表記する。

ウラン ( $^{238}\text{U}$ ) 系列

トリウム ( $^{232}\text{Th}$ ) 系列

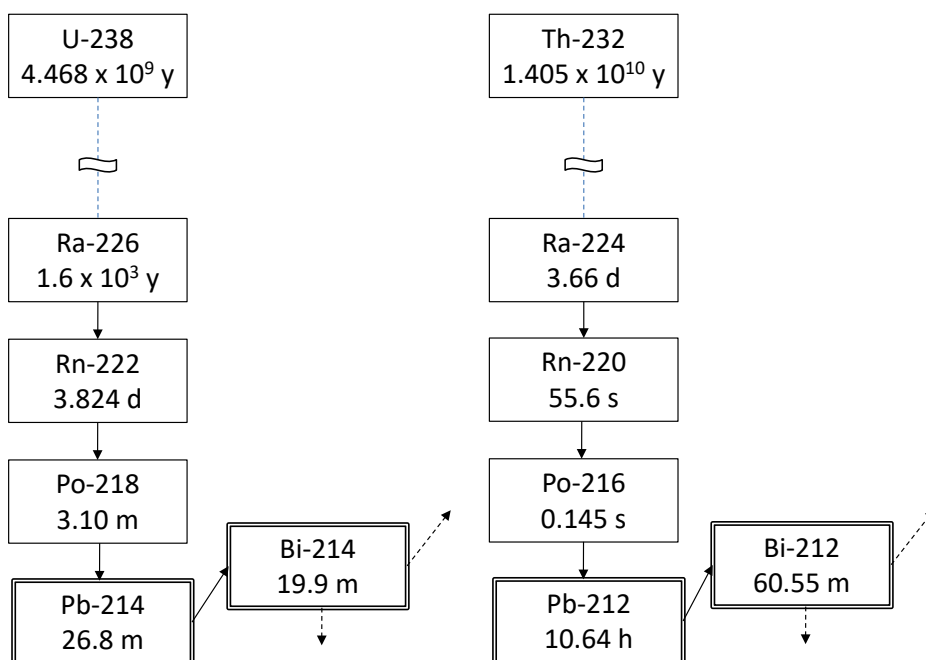


Fig. 3-15 ウラン系列およびトリウム系列

Table 3-3 ラドン子孫核種の放出する  $\gamma$  線

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

### 3.8.2 ラドン弁別手法の理論

前述したように、ラドン子孫核種は大気中だけでなく、地表面および地殻にも存在することから、 $\gamma$ 線のエネルギーによって大気中のラドン子孫核種の影響と地上のラドン子孫核種の影響を弁別することは難しい。また、 $^{134}\text{Cs}$ と $^{214}\text{Bi}$ は放出する $\gamma$ 線エネルギーが似通っているため、福島原子力発電所事故の影響を受けた地域では弁別はさらに困難である。航空機モニタリングにおけるラドン子孫核種の影響を弁別する方法として、航空機モニタリング用の検出器以外にラドン子孫核種測定用の検出器を搭載し、その比較からラドン子孫核種の影響を弁別する方法が知られている<sup>29)</sup>。

今回、ラドン子孫核種の影響を弁別する手法を検討するため、RSI製 $\text{LaBr}_3$ シンチレータ(3"×3")を用いた航空機モニタリング機器(以下、**LaBr RSIシステム**)を採用し、フライトデータの取得および換算パラメータの最適化を行った。採用した**LaBr RSIシステム**をヘリコプター内に搭載した状況について Fig. 3-16 に示す。写真のように、地上からの放射線を遮蔽することを目的とし、通常用いている**NaIシンチレーション検出器(NaI RSIシステム)**の上方に配置した。

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

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

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

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

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

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

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

ここで、

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

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

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

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

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

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

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

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

である。

ここで重要なパラメータである  $GI$  および  $RI$  については、機体の遮蔽状況により異なるため、陸上や海上で実際にデータを取得し設定した。使用したパラメータについては、4.5.1 項に詳述する。



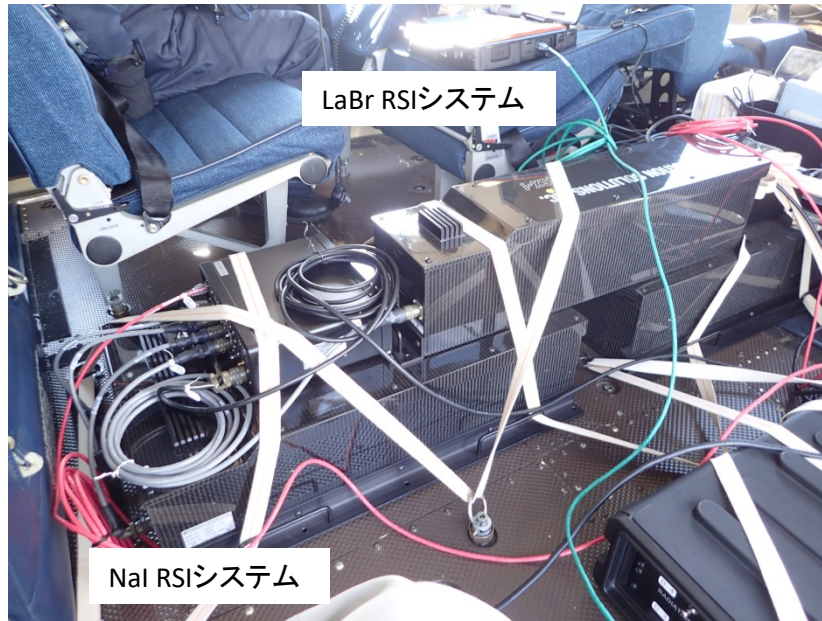


Fig. 3-16 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況

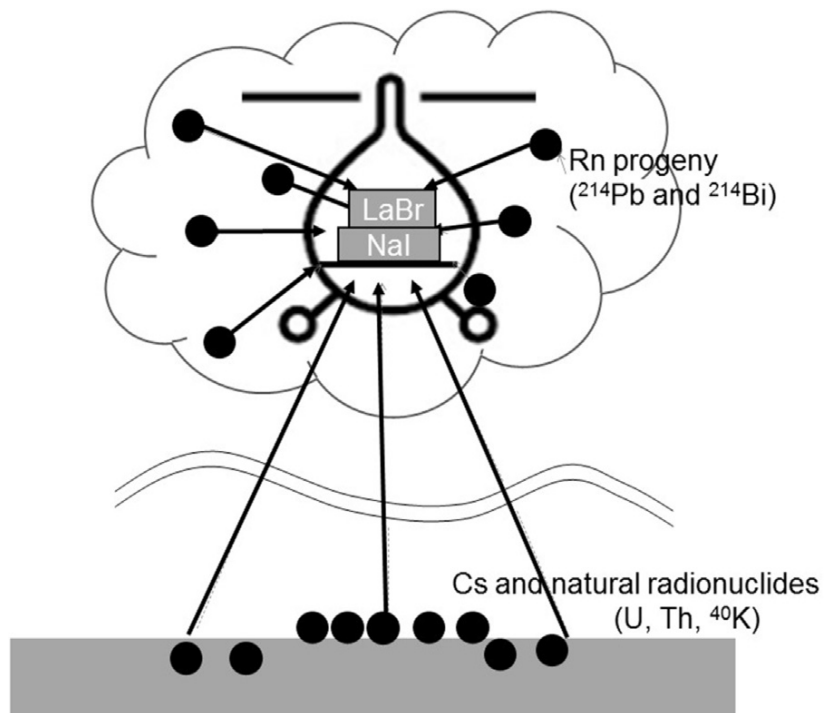


Fig. 3-17 大気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ

### 3.8.3 GIの高度補正方法

GIについては、2015年度に実施した予備的な調査により、対地高度に依存して数値が変化することが分かっている。しかしながら、実測のデータではラドン子孫核種の寄与がないデータを取得することは不可能であるため、計算シミュレーションにより実際の測定体系を模擬し、GIの高度補正手法について検討した。

シミュレーションに用いた計算コードは、モンテカルロ計算コードの一種である電磁カスケードモンテカルロコード EGS5<sup>30)</sup> (Electron Gamma Shower Version 5) とし、ヘリコプター内の検出器の体系を簡易的に Fig. 3-18 のように模擬した。計算体系の妥当性については、正面および横の周辺からの点線源を模擬した場合の検出器のレスポンスを計算した結果と、実際に有人のヘリコプターに検出器 (NaI RSI システム) を搭載した状態で、点線源 (<sup>137</sup>Cs) を照射することによって求めた検出器のレスポンスの結果を比較してベンチマークとした。Fig. 3-19 に計算結果と実測結果の比と線源の照射方向の関係について示す。このように概ねよく一致している。一部値が外れている部分は、計算体系に考慮されていない局所的な構造物が影響していると考えられるが、全体として構築した体系は検出器のレスポンスを再現するのに十分な精度を有する。本体系に対し、地上の無限平板線源を模擬し、距離を変化させることにより GI と測定高度 (300 m、450 m および 600 m) との関係性を計算により評価した。なお、実際の計算では NaI RSI システムと LaBr RSI システムについてそれぞれ実施した。LaBr RSI システムの計算時には、下部の NaI RSI システムを体系に加えた。線源の模擬体系は、以下の条件を設定した。土壌中の天然放射性核種濃度は、全国的な地上における測定結果から平均値を採用した<sup>36)</sup>。

- ・ 空気 (1 km × 1 km × 1.3 km) と土壌 (深さ 1 m, 密度  $\rho: 1.6 \text{ g cm}^{-3}$ )
- ・ 山等の地面の凹凸を再現せずに地面は平坦とする。
- ・ 地面中の自然放射性核種 (U 系列、Th 系列、<sup>40</sup>K) は一様分布する。
- ・ 地面中の人工放射性核種 (<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Cs) 表層から深さ方向に指数関数的な分布 (緩衝深度  $\beta = 3 \text{ g/cm}^2$ ) をする。
- ・ 土壌中の天然放射性核種濃度はそれぞれ、<sup>40</sup>K : 500 Bq/kg、U 系列 : 20 Bq/kg、Th 系列 : 10 Bq/kg、<sup>134</sup>Cs : 50 kBq/m<sup>2</sup>、<sup>137</sup>Cs : 200 kBq/m<sup>2</sup> とする。

検出器と線源の距離 (測定高度) に対する GI の計算結果を Fig. 3-20 に示す。このように測定高度と GI は正の相関関係にある。この結果における回帰直線の傾きを GI の高度補正係数として採用し、式 [11] に基づいて各測定高度で取得したデータに対して高度補正を施した GI を用いた。

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

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

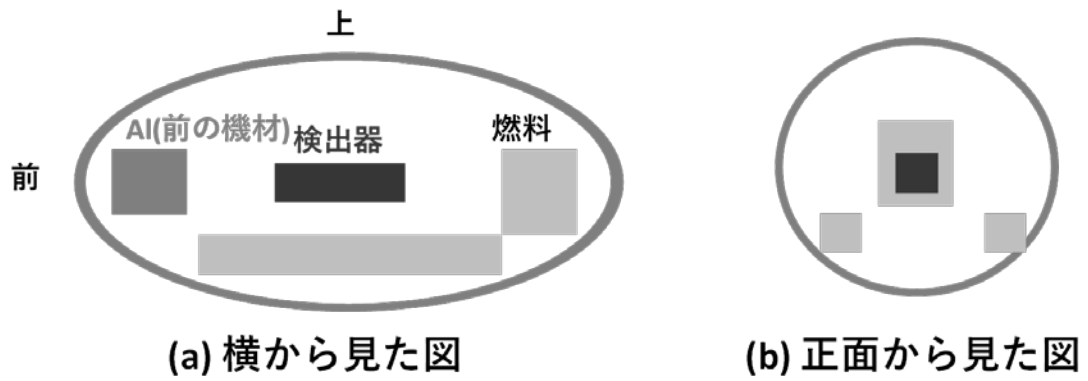


Fig. 3-18 計算体系のイメージ

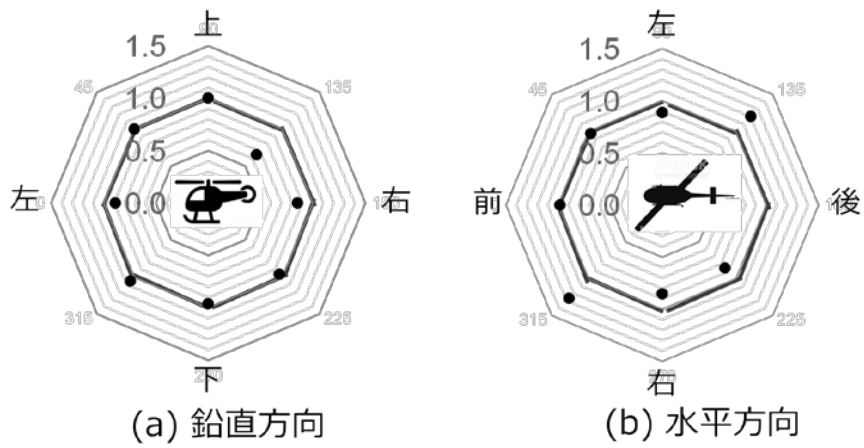


Fig. 3-19 計算体系のベンチマーク  
(計算結果と実測結果の比)

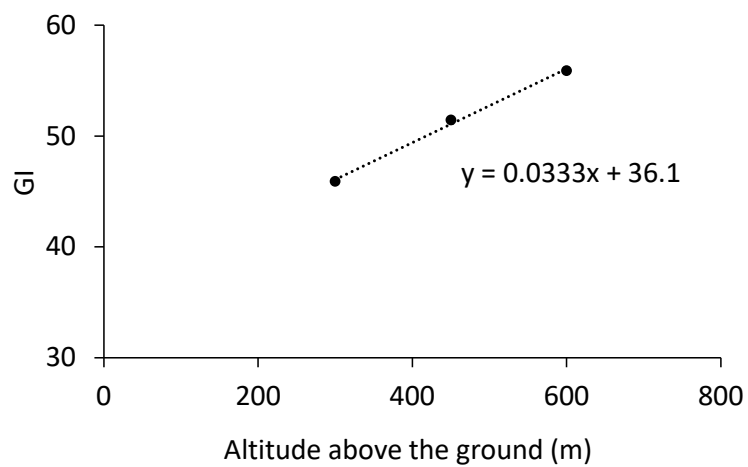


Fig. 3-20 シミュレーションによる測定高度と GI の関係

### 3.9. 天然放射性核種の濃度換算手法

一般的に、 $\gamma$  線スペクトルを利用して放射性核種を特定し、その放射能を定量化する手法が用いられている。航空機モニタリングにおいても、 $\gamma$  線スペクトルが取得できることから、天然の放射性核種ごとに定量が可能である。Fig. 3-21 に対地高度 300 m で取得できる典型的な  $\gamma$  線スペクトル例を示す。このように、散乱線の影響の少ない高エネルギー領域において  $^{40}\text{K}$  (1,461 keV)、U 系列 (U-series:  $^{214}\text{Bi}$ : 1,765 keV、2,204 keV) および Th 系列 (Th-series:  $^{208}\text{Tl}$ : 2,614 keV) が検出される。1,000 keV 以上の比較的高エネルギーの  $\gamma$  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  $\gamma$  線スペクトルを使用して目的のエネルギーにおけるピークの計数率を求めた。

航空機モニタリングの取得データから地上における天然放射性核種濃度を求めるためには、それぞれの核種に対する濃度換算係数と高度補正係数が必要となり、スペクトル解析ではエネルギーピークごとにその数値を決定する必要がある。まず、濃度換算係数 (CC) は、テストライン上における地上測定値について、上空での測定値との比較が必要である。ここでは、Fig. 3-6 (東通・六ヶ所)、Fig. 3-7 (志賀) 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 in-situ Ge 検出器により、地表面から 1 m の高さにおいて 30 分間の測定を行い、 $^{40}\text{K}$ 、U-series および Th-series の濃度を測定し、その平均値を地上の測定値とした。テストライン上における空中での測定値については測定高度である 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を取得し、地上の in-situ Ge 検出器との比較から CC を求めた。また、式 [1] に示したように高度補正係数評価に必要な空気減弱係数 (AF) については、EGS5 シミュレーションの結果を利用した。計算には、無限平板を模擬した半径 2,000 m の線源を仮定し、その上空 50 m、100 m、150 m、200 m、300 m、400 m および 500 m の計数率を計算した。計算した高度と計数率の関係について、上空 50 m で得られた結果を 1 に規格化し、Fig. 3-22 に示す。このように指数関数の関係となり、その指数近似の傾きをそれぞれの AF とした。以上により求めた CC と AF の数値について Table 3-4 に示す。

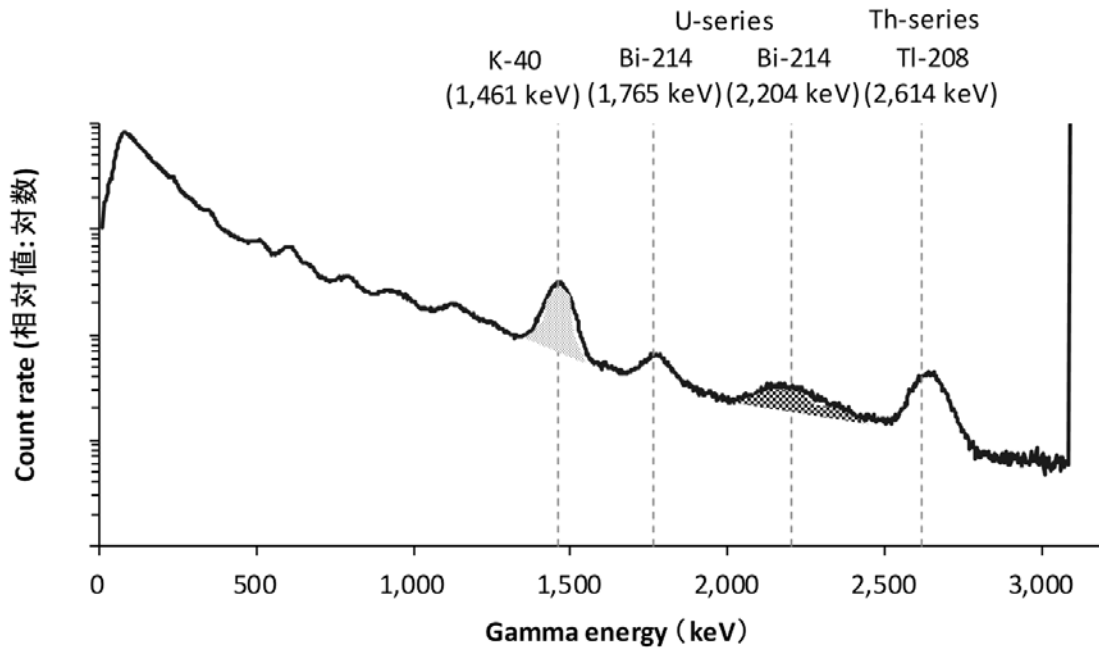


Fig. 3-21 天然の放射性核種によるピーク解析例

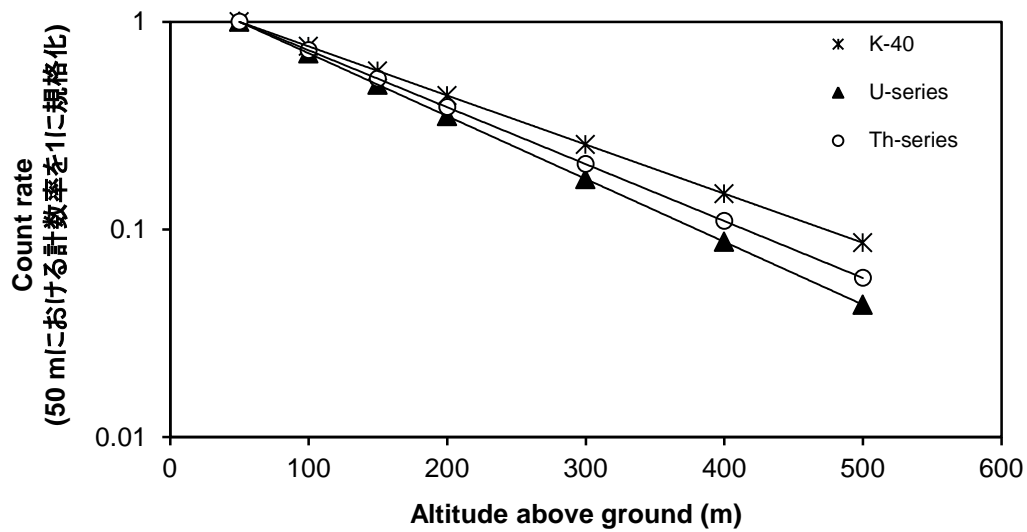


Fig. 3-22 天然の放射性核種別の高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション)

Table 3-4 天然の放射性核種濃度への換算パラメーター一覧

Measurement area	Parameters	<sup>40</sup> K	U-series	Th-series
Higashidori	CC (cps/[Bq/kg])	0.069	0.23	0.07
Rokkasho	AF (m <sup>-1</sup> )*	-0.0054	-0.0070	-0.0063
Shika	CC (cps/[Bq/kg])	0.033	0.40	0.11
	AF (m <sup>-1</sup> )*	-0.0054	-0.0070	-0.0063

\*EGS5によるシミュレーション結果より

## 4. モニタリング結果と考察

### 4.1. 換算パラメータ

3.4.2項で示した方法により、HFを求めた。Fig. 4-1に対地高度と計数率の関係を例示する。HFを求めるために必要なAFの数値は、テストラインで測定したデータから求めた。測定したデータの詳細をTable 4-1に示す。

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

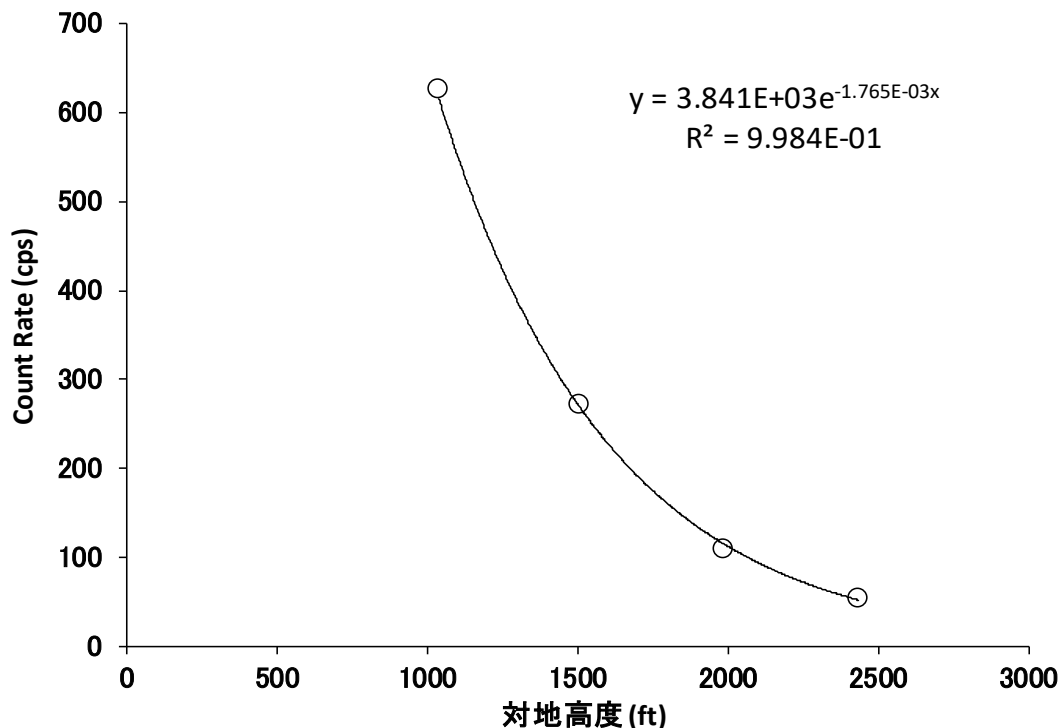


Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例  
(Bell 412 JA6928、2016年2月2日実施、Test line)

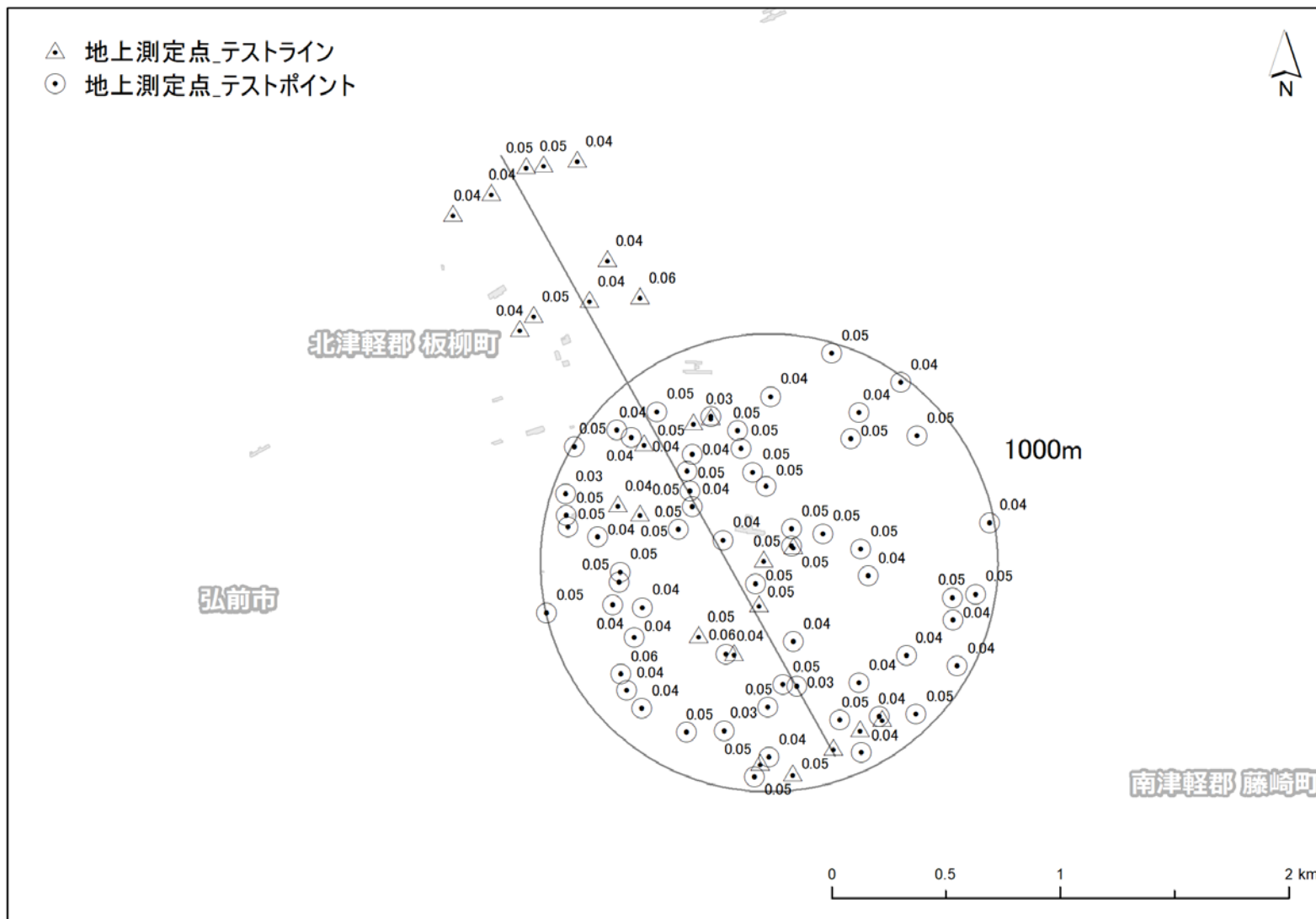


Fig. 4-2 地上測定による空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (東通・六ヶ所)



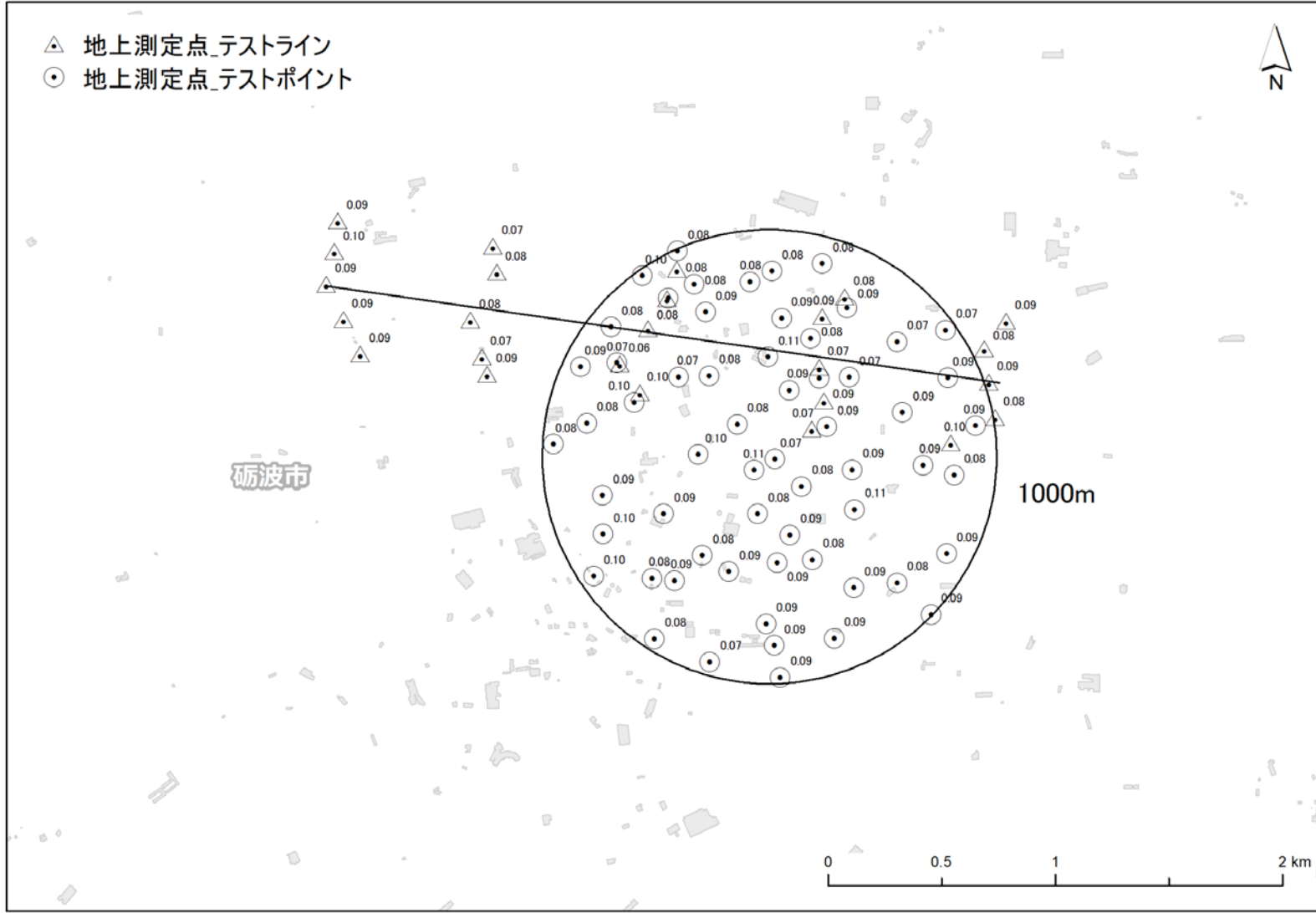


Fig. 4-3 地上測定による空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (志賀)

Table 4-1 2019 年度取得した AF データ一覧

Monitoring Area	System (Device Serial)	Helicopter		Operation company	Location	Date	AF	
		Model	Body No.				$\mu(m^{-1})$	$R^2$
Higashidori Rokkasho	5090	Bell430	JA6900	AAC	Itayanagi_TestLine	2019/06/26	-0.00659	0.99942
	5090	Bell430	JA6900	AAC	Itayanagi_TestLine	2019/07/07	-0.00530	0.99931
<b>Average</b>							<b>-0.00594</b>	
Shika	5090	Bell430	JA6900	AAC	Tonami_TestLine	2019/11/23	-0.00392	0.99989
	5090	Bell430	JA6900	AAC	Tonami_TestLine	2019/11/27	-0.00582	0.99750
<b>Average</b>							<b>-0.00487</b>	

※ $R^2$ : 近似した指数関数曲線の決定係数

※AAC: 朝日航洋株式会社

Table 4-2 2019 年度取得した CD データ一覧

Helicopter Model	Monitoring Area	Date	Body No.	Operation company	System (Device Serial)	Detector	Location	Ground data (NaI survey)			AMS data			AGL (m)			CD (cps/[ $\mu$ Sv/h])
								Survey (uSv/h)	SD (2 $\sigma$ )	RSD (%)	Count rate (cps)	SD (2 $\sigma$ )	RSD (%)	AGL_GEOID (m)	SD (2 $\sigma$ : %)	RSD (%)	
Bell 430	Higashidori Rokkasho	2019/6/26	JA6900	AAC	SN:5090	DPU1 SN:7306	Itayanagi_ TestPoint	0.05	0.011	25	1012	114	11	316	15	5	10100
						DPU2 SN:7307											
		2019/7/7	JA6900	AAC	SN:5090	DPU1 SN:7306	Itayanagi_ TestPoint	0.05	0.008	16	1209	273	23	248	31	12	
						DPU2 SN:7307											
<b>Average 10100</b>																	
Bell 430	Shika	2019/11/23	JA6900	AAC	SN:5090	DPU1 SN:7306	Tonami_ Testpoint	0.09	0.027	31	2228	23	1	296	44	15	17100
						DPU2 SN:7307											
		2019/11/27	JA6900	AAC	SN:5090	DPU1 SN:7306	Tonami_ Testpoint	0.09	0.027	30	1673	152	9	361	6	2	
						DPU2 SN:7307											
<b>Average 15000</b>																	

※AAC: 朝日航洋株式会社、SD: 標準偏差、RSD: 相対標準偏差

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

Monitoring Area	Parameters	Bell412		Bell430	
		Value	Number	Value	Number
Higashidori Rokkasho	AF ( $m^{-1}$ )	/		-0.0059	2
	CD (cps/ $[\mu Sv/h]$ )			10100	2
Shika	AF ( $m^{-1}$ )	/		-0.0049	2
	CD (cps/ $[\mu Sv/h]$ )			12900	2
Fukushima	AF ( $m^{-1}$ )	-0.0072 $\pm$ 0.00042	21	-0.0072 $\pm$ 0.00040	35
	CD (cps/ $[\mu Sv/h]$ )	11000 $\pm$ 2100	42	13000 $\pm$ 2800	65

## 4.2. 地上における測定値との比較

航空機モニタリングの妥当性を検証するために、ヘリコプターの測線下の地点から地形的に平坦な場所を選定し、地上測定を実施した。地上測定点について Fig. 4-4 (東通・六ヶ所)、Fig. 4-5 (志賀) に示す。

航空機モニタリングによる換算値と地上測定値との比較を Fig. 4-6 (東通・六ヶ所)、Fig. 4-7 (志賀)、Fig. 4-8 (全データ) に示す。それぞれ散布図および航空機の換算結果と地上測定結果の差を地上測定結果に対する相対誤差のヒストグラムで比較した。散布図を見ると、測定結果は東通・六ヶ所においては 90 % (全 50 点中 45 点)、志賀においては 93 % (全 30 点中 28 点)、2016 年度から 2019 年度までの全データにおいては 93 % (全 359 点中 334 点) がファクター 0.5 ~ 2.0 に収まり、地上測定値と正の相関関係にあることが分かった。相対誤差ヒストグラムを見ると、東通・六ヶ所および志賀については、共に頻度分布はある程度ばらついているものの、0 (航空機と地上測定値が等価) を中心に概ね左右対称な分布を示しており、ピーク位置、平均値および中央値は 0 付近となり、地上測定値とよく一致していると思われる。2016 年度から 2019 年度までの全データについても 0 以下 (航空機モニタリングの方が過小評価) に偏る分布が見られたものの、ピーク位置、平均値および中央値は 0 付近となり、全体として地上測定値とよく一致していると思われる。なお、2018 年度までに測定を実施した川内原子力発電所、大飯・高浜発電所、伊方発電所、泊発電所、柏崎刈羽原子力発電所、玄海原子力発電所、島根原子力発電所および浜岡原子力発電所における航空機モニタリングによる空間線量率値と地上測定値との比較を Fig. 4-9 (川内)、Fig. 4-10 (大飯・高浜)、Fig. 4-11 (伊方)、Fig. 4-12 (泊)、Fig. 4-13 (柏崎刈羽)、Fig. 4-14 (玄海)、Fig. 4-15 (島根)、Fig. 4-16 (浜岡) にそれぞれ示す。地上測定値を指標とした相対誤差のヒストグラムは 0 付近をピークとしてガウス分布に近い形態を示していることから、2018 年度までに実施した各地域における航空機モニタリングの結果についても地上測定値とよく一致していることが分かる。

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

- ①測定範囲の違い：空中からの測定値は、上空を頂点とし対地高度を高さとした円錐の底面部分に該当する地上の放射線の平均値となる。実際には、測定される範囲は地上の半径 300 m 円内における放射線量の平均値となる。一方、地上測定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物質が地上測定に影響する可能性がある。また、上空で測定する場合には、建物や森林等が地表面からの放射線を遮蔽するため、単純に比較できない場所がある。なお、本章において、比較用に取得した地上測定値は比較的地形が平坦な場所が多く、条件がよい場所を選定している。

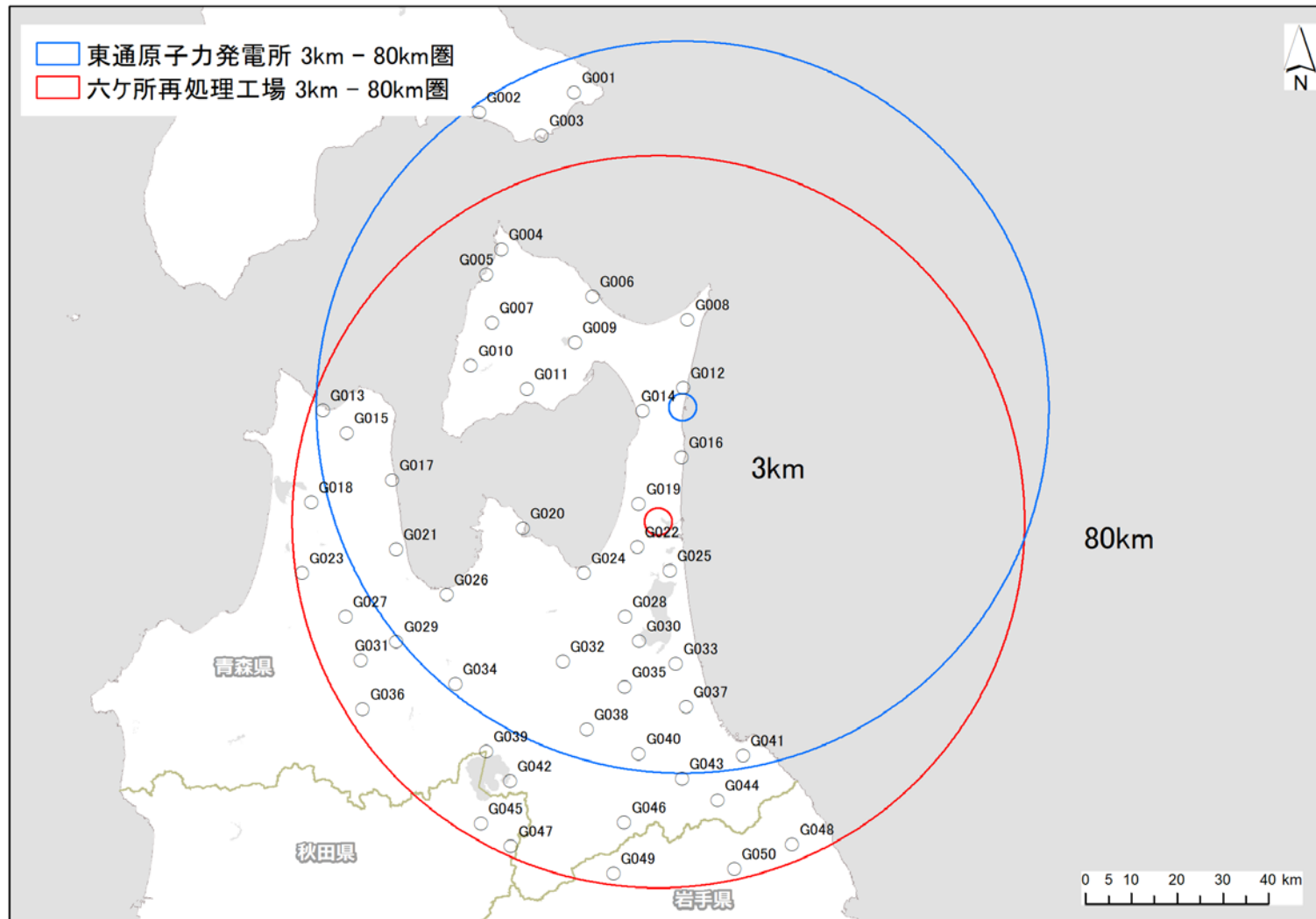


Fig. 4-4 地上における測定点 (東通・六ヶ所)

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

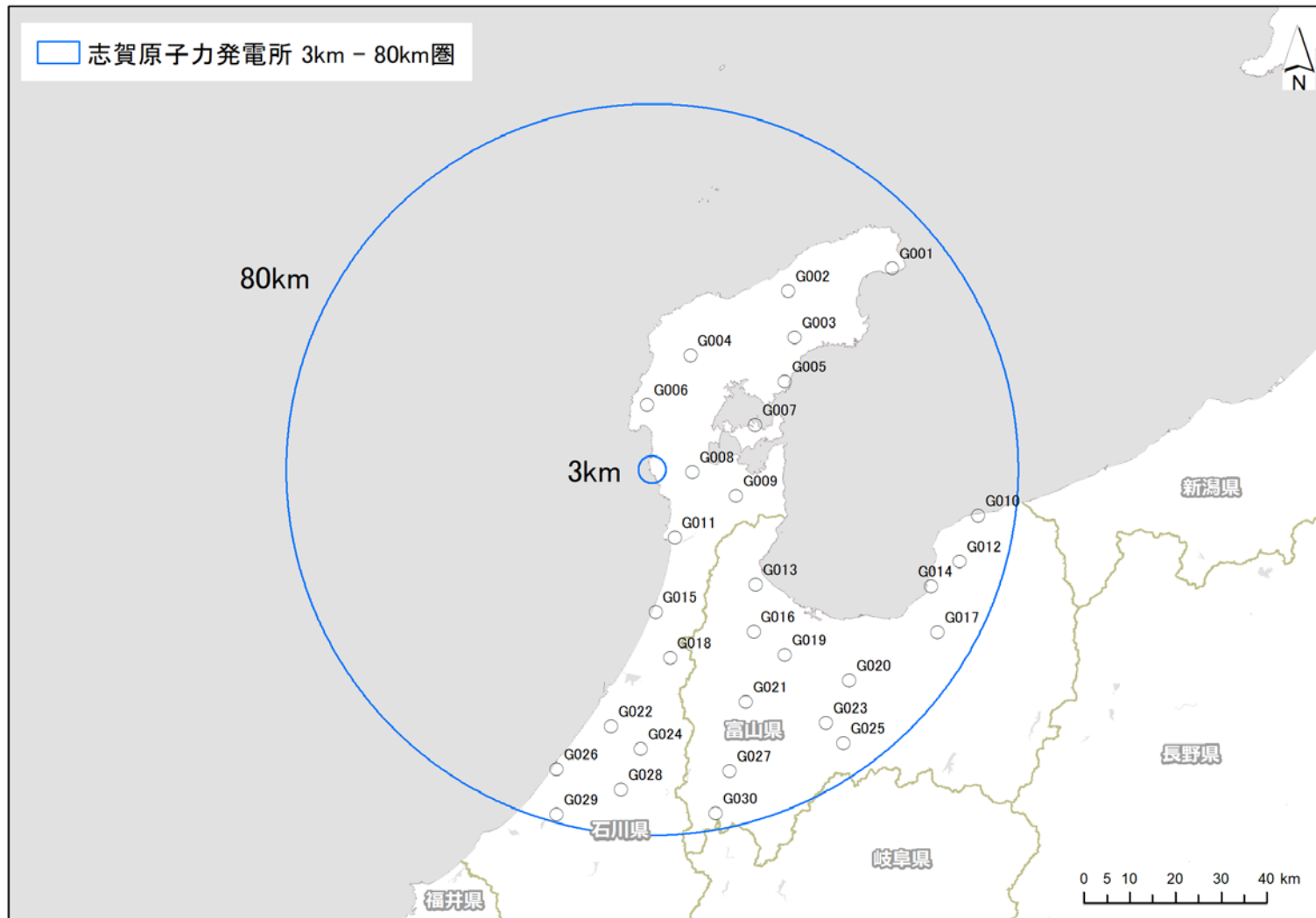


Fig. 4-5 地上における測定点 (志賀)

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

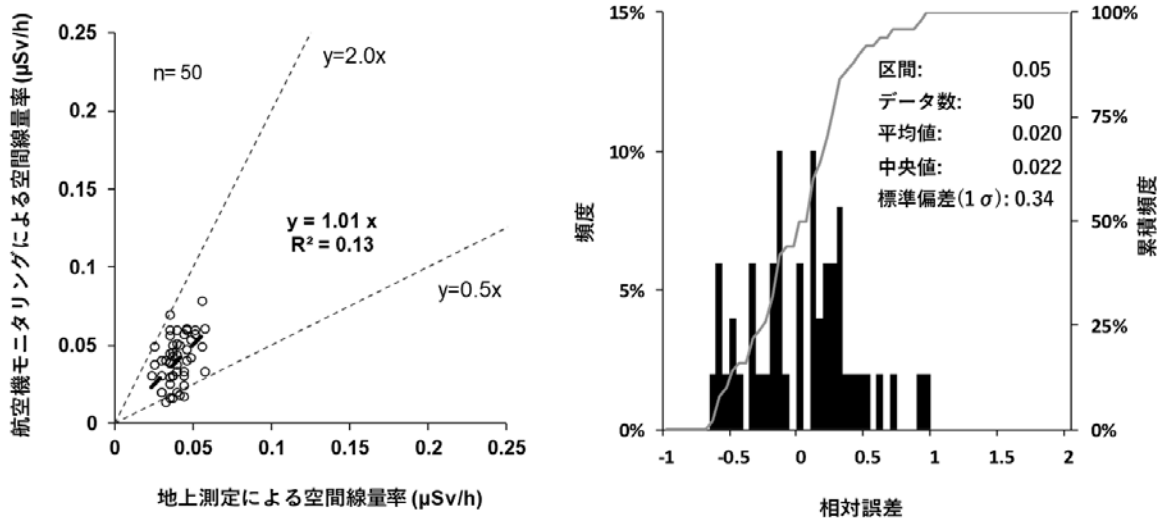


Fig. 4-6 地上測定による空間線量率との比較 (東通・六ヶ所)  
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

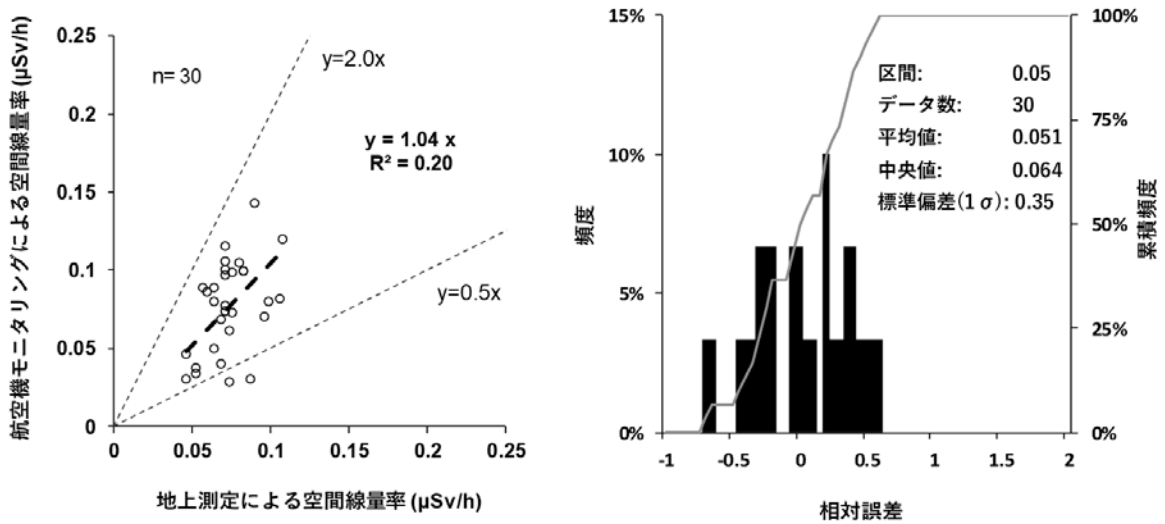


Fig. 4-7 地上測定による空間線量率との比較 (志賀)  
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)



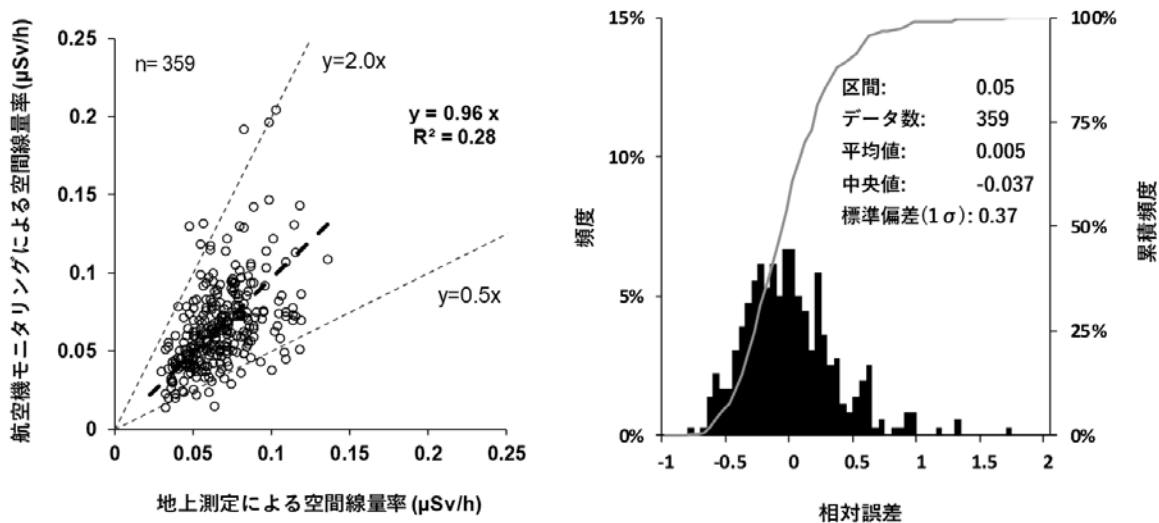


Fig. 4-8 地上測定による空間線量率との比較 (全データ)  
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

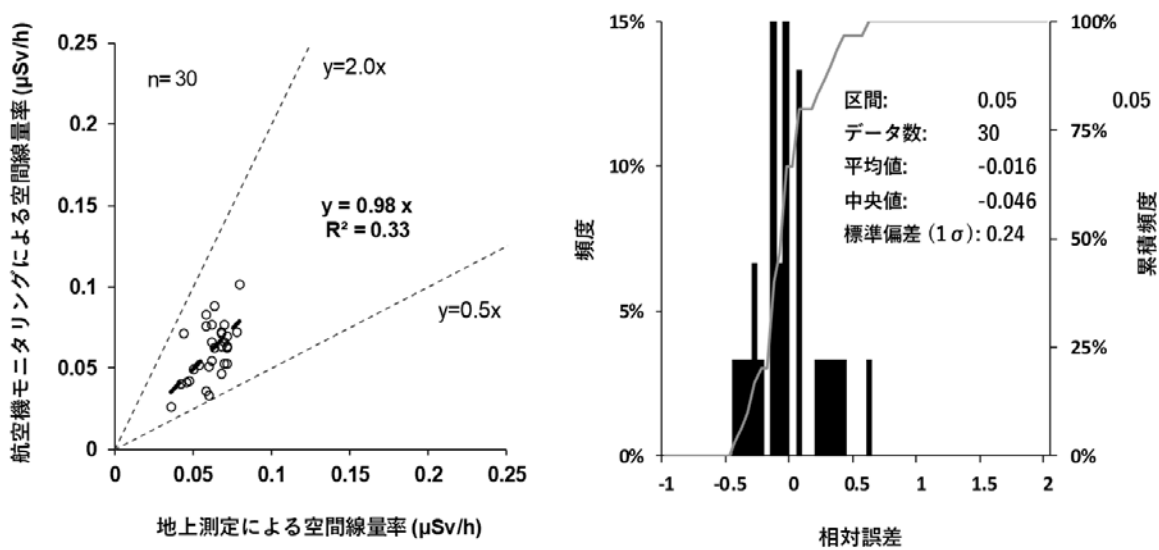


Fig. 4-9 地上測定による空間線量率との比較 (川内)  
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

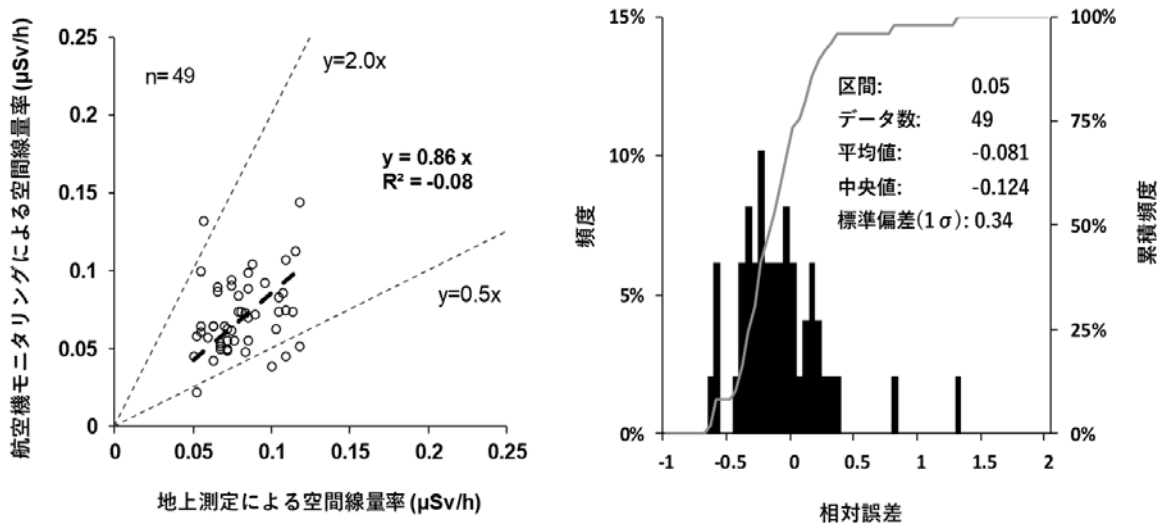


Fig. 4-10 地上測定による空間線量率との比較 (大飯・高浜)  
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

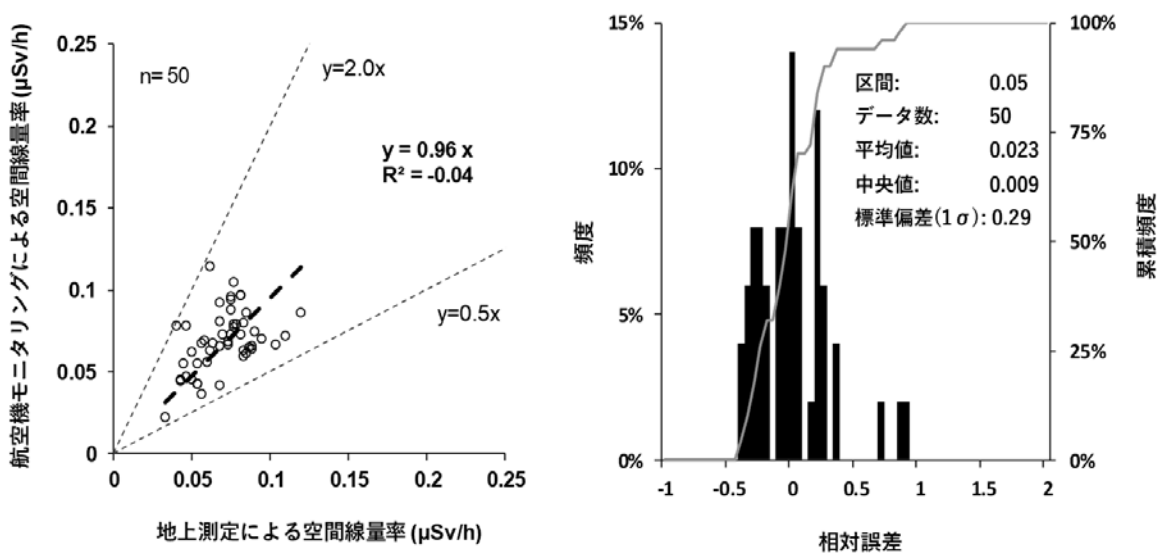


Fig. 4-11 地上測定による空間線量率との比較 (伊方)  
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

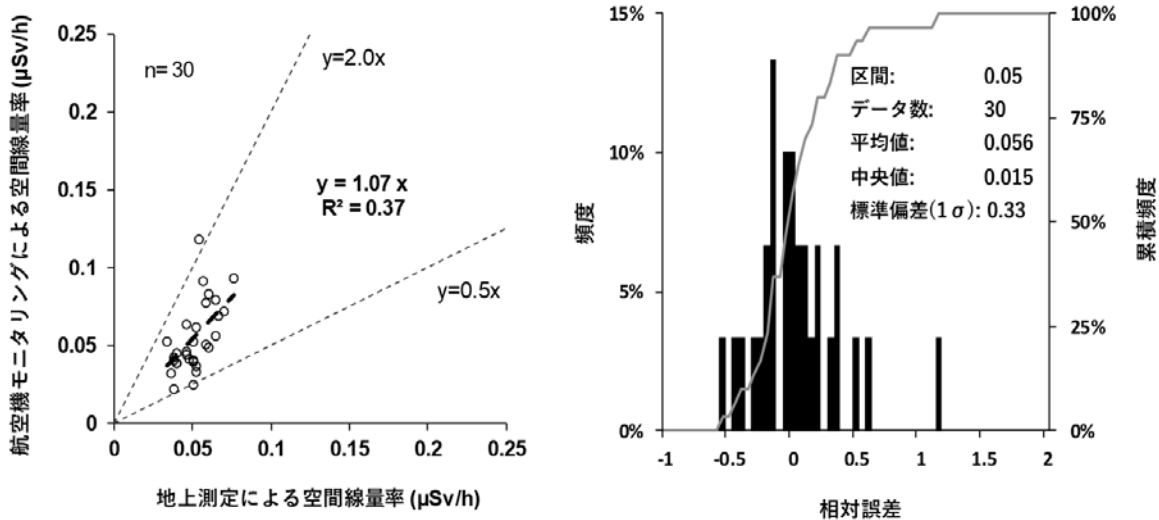


Fig. 4-12 地上測定による空間線量率との比較 (泊)  
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

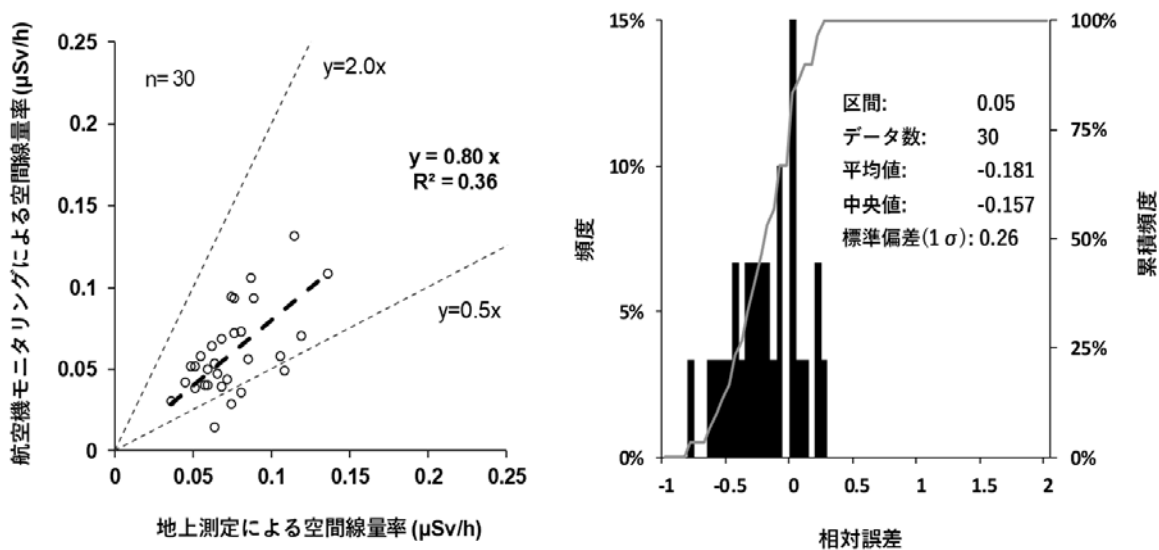


Fig. 4-13 地上測定による空間線量率との比較 (柏崎刈羽)  
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

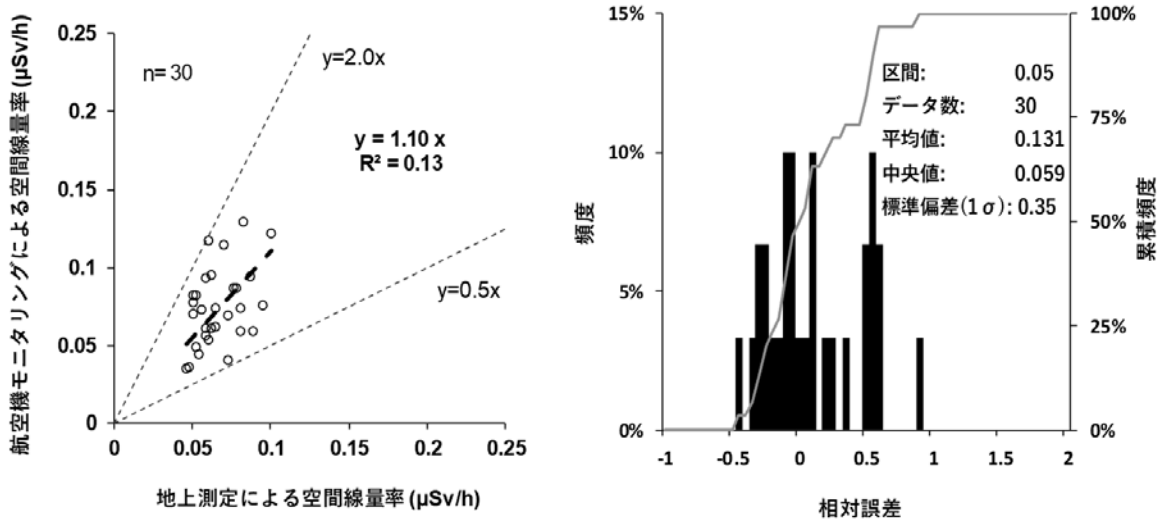


Fig. 4-14 地上測定による空間線量率との比較 (玄海)  
(左:散布図、右: 相対誤差頻度分布)

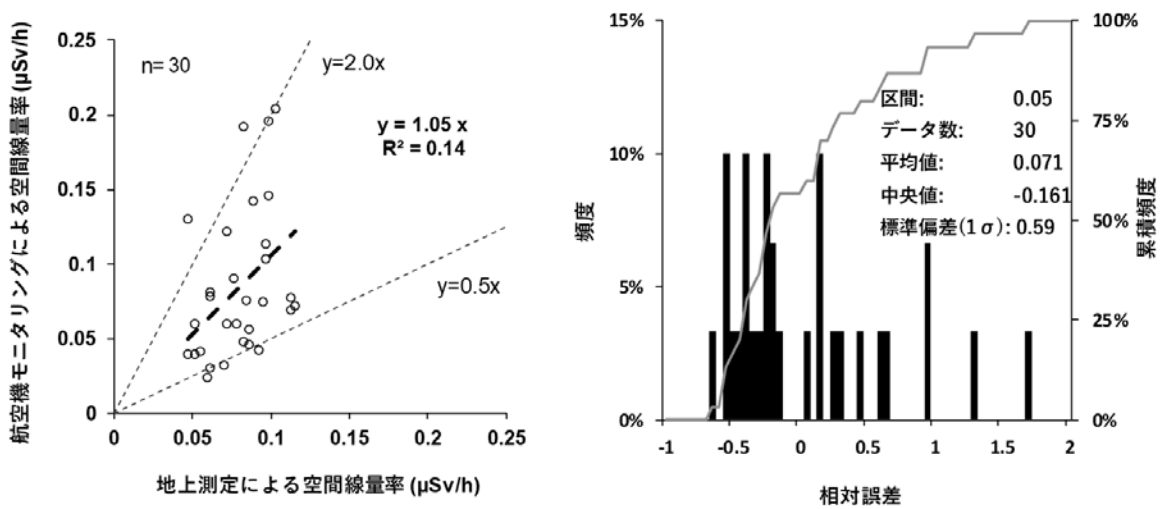


Fig. 4-15 地上測定による空間線量率との比較 (島根)  
(左:散布図、右: 相対誤差頻度分布)

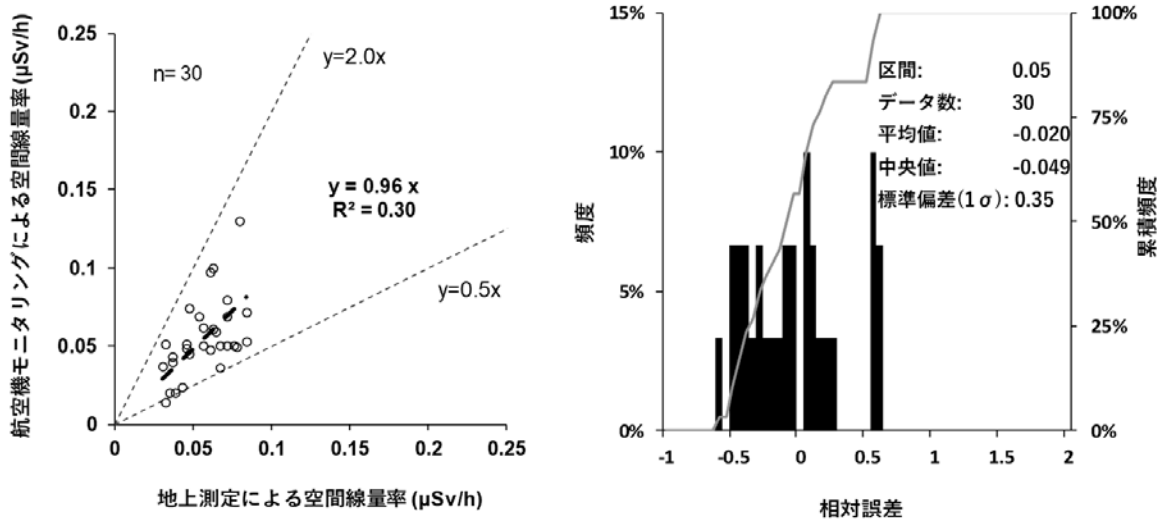


Fig. 4-16 地上測定による空間線量率との比較 (浜岡)  
(左: 散布図、右: 相対誤差頻度分布)

### 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. 4-17 (東通・六ヶ所)、Fig. 4-18 (志賀) に示す。なお、空間線量率マップの色合いについては、福島原子力発電所周辺において行っている航空機モニタリングの設定<sup>12)</sup>に準じた。志賀測定期間中に一部地域で積雪が見られ、空間線量率等の評価に影響を及ぼしている可能性があることから、積雪箇所は先述したマップの色合い設定の例外とし、白色で示した。積雪分布箇所の特定については、JAXA から提供されている SGLI MODIS データ<sup>31)</sup>のうち、2019年11月21日に配信されたものを用いた。なお、当該データに基づくと能登空港周辺にも積雪分布が見られたが、ヘリコプターからの目視では積雪が確認できなかったため、当該箇所については積雪がないものとして扱った。

本報告で測定された空間線量率の最大値は、東通・六ヶ所においては弘前市周辺の約 0.13  $\mu\text{Sv/h}$ 、志賀においては南砺市周辺の約 0.23  $\mu\text{Sv/h}$  であった。

Fig. 1-1 に示した日本地質学会のホームページに掲載されている、地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果<sup>17)</sup>と、航空機モニタリングによる空間線量率計算結果である Fig. 4-19 (東通・六ヶ所) および Fig. 4-20 (志賀) とを比較した。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<sup>16)</sup>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」<sup>17)</sup>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、計算に使用された試料の採取密度が 10 km  $\times$  10 km に 1 試料であり、それらの核種濃度の実測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、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。

東通・六ヶ所について、日本地質学会の空間線量率マップ (Fig. 4-19 (右)) では 0.06  $\mu\text{Sv/h}$  を超える地域は見られないが、航空機モニタリングによる空間線量率マップ (Fig. 4-19 (左)) においては北海道函館市南部、青森県では下北半島西部 (佐井村・むつ市周辺)、津軽半島北部 (外ヶ浜町周辺)、津軽半島南東部 (蓬田村・青森市・五所川原市の境界付近)、中央部 (青森市八甲田山の北側) および津軽平野南東部 (青森県大鰐町周辺) で 0.06  $\mu\text{Sv/h}$  を超える地域が見られた。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要因について、各箇所における既往の地質情報を基に考察を行った。

#### ・函館市南部について

本地域は主に粘板岩から構成されている地層 (通称: 戸井層) から成り、戸井層中に黄鉄鉱を主体とする鉱脈が存在している<sup>32)</sup>。戸井層や鉱脈中には自然放射性核種を高濃度に含む物質は存在しないと思われるが、鉱脈の一部で黄銅鉱が著しく濃集している箇所があり<sup>32)</sup>、この

濃集箇所から放出される  $\gamma$  線が航空機モニタリングにおける空間線量率に影響を与えた可能性がある。

- ・下北半島西部について

本地域は主に粘板岩・砂岩・チャート・塩基性石灰岩・石灰岩等を含む地層（通称：長浜層）から成り、これを貫く石英閃緑岩が小岩体として分布している<sup>33)</sup>。長浜層中に空間線量率の上昇に顕著に寄与し得る岩石類は含まれていない。一方で、石英閃緑岩は花崗岩類に分類され、花崗岩ほど高濃度ではないが自然放射性核種を含有する<sup>34)</sup>。日本シームレス地質図<sup>35)</sup>を見ると、石英閃緑岩の小岩体の分布位置と航空機モニタリングにおいて空間線量率が高く算出された位置は概ね重なる。一方、本地域において日本地質学会の空間線量率マップ作成に使用された試料の採取地点<sup>36)</sup>を見ると、石英閃緑岩の小岩体の分布位置は含まれていないため、石英閃緑岩に由来する空間線量率が反映されていないと推察される。

- ・津軽半島北部について

本地域は厚硬質頁岩を主体とする地層（通称：小泊層）から成るが、増川岳および四ッ滝山ではデイサイト、流紋岩等から成る地層が小泊層を貫いて現れている<sup>35),37)</sup>。デイサイト、流紋岩はともに珪長質火山岩に分類され、花崗岩ほど高濃度ではないが自然放射性核種を含有する<sup>34)</sup>。日本シームレス地質図<sup>35)</sup>を見ると、航空機モニタリングにおいて空間線量率が比較的高く算出されたのは増川岳から四ッ滝山にかけてのエリアであり、デイサイト、流紋岩等の分布位置と重なる。一方、本地域において日本地質学会の空間線量率マップ作成に使用された試料の採取地点<sup>36)</sup>を見ると、段丘堆積物が地層の主体である今別町付近の1点のみであり、デイサイト、流紋岩等に由来する空間線量率が反映されていないと推察される。

- ・津軽半島南東部について

本地域は山岳地域であり、北西から南東方向にかけて袴腰岳、赤倉岳、大倉岳を中心とした海拔 500 m～700 m の山稜が形成されている<sup>38)</sup>。この周囲は主に凝灰角礫岩から成るが、一部に流紋岩溶岩を伴う地層（通称：太田凝灰岩部層）によって取り巻かれている。太田凝灰岩部層中においては、流紋岩は主に貫入岩形態を示すが、一部に溶岩流として現れた流紋岩岩脈が存在している<sup>38)</sup>。日本シームレス地質図<sup>35)</sup>を見ると、航空機モニタリングにおいて空間線量率が高く算出された箇所は流紋岩岩脈の分布位置と重なる。一方、本地域において日本地質学会の空間線量率マップ作成に使用された試料の採取地点<sup>36)</sup>を見ると、いずれも地層の主体が段丘堆積物である五所川原市および青森市の市街地部であり、流紋岩に由来する空間線量率は反映されていないと推察される。

- ・中央部について

本地域では、駒込川流域において特に空間線量率が高く算出された。周囲はデイサイトや流紋岩等に取り囲まれているが<sup>35)</sup>、第四紀火山砕屑物や火山岩類等の火山噴出物で表層が広く覆われている<sup>40)</sup>ことを考慮に入れると、地質情報だけでは空間線量率が高くなることの説明は困難である。駒込川は硫酸性の非常に強い酸性河川として知られており、河川中の化学種による影響が可能性の一つとして挙げられるが、明確な原因は不明である。

- ・津軽平野南東部について

本地域では川沿いに河岸段丘が発達しており湖成堆積物が主に見られるが、デイサイト溶岩、

デイサイト凝灰岩から成る地層(通称:折紙沢層)が小範囲に分布している<sup>39)</sup>。日本シームレス地質図<sup>35)</sup>を見ると、航空機モニタリングにおいて空間線量率が高く算出された箇所は折紙沢層の分布位置と重なる。本地域の東側に位置する八甲田山、十和田湖周辺もデイサイトや流紋岩の分布域であるにも関わらず、大部分で空間線量率が0.06  $\mu\text{Sv/h}$ 未満であったのは、上記した通り、表層が火山噴出物により覆われていることによると推察される。

志賀について、日本地質学会の空間線量率マップ(Fig. 4-20(右))では、ほとんどの地域で0.06  $\mu\text{Sv/h}$ 未満であるが、富山県の南東部(黒部市から滑川市)から南部(富山市)にかけて、0.06  $\mu\text{Sv/h}$ を上回る地域が見られる。一方、航空機モニタリングによる空間線量率マップ(Fig. 4-20(左))では、測定範囲の南部地域のほとんどで0.06  $\mu\text{Sv/h}$ を上回っており、特に富山県においては南東部(魚津市)および南部(富山市および南砺市)、石川県においては南部(白山市)において局所的に0.16  $\mu\text{Sv/h}$ を超える地域が見られた。富山県の南東部から南部にかけて空間線量率が比較的高くなるという傾向は両マップで一致している。両マップにおいて特に空間線量率が高く算出された箇所について、既往の地質情報を基に考察を行った。

#### ・富山県南東部について

本地域は立山連峰等の高山地から富山湾床へ向かって標高が低下していく中間地帯にあたる。特に空間線量率が高く算出された箇所は立山連峰の辺縁であり、アダメロ岩、トータル岩、および花崗閃緑岩等の花崗岩類が露出している<sup>35),41)</sup>。アダメロ岩は花崗岩類の中でも比較的高濃度に、トータル岩および花崗閃緑岩は花崗岩ほど高濃度ではないが自然放射性核種を含有する<sup>34)</sup>。本地域では、これら花崗岩類から放出される $\gamma$ 線に起因した空間線量率が反映されていると推察される。また、平地である滑川市街地周辺にも比較的高線量率なエリアが見られるが、滑川市周辺に分布する堆積物中に花崗岩質岩石が含まれている<sup>41)</sup>ことに起因すると推察される。本地域において日本地質学会の空間線量率マップ作成に使用された試料の採取地点<sup>36)</sup>は多数あり、各試料の元素濃度の測定結果を見ると、いずれもU-seriesおよびTh-series濃度は比較的高い。

#### ・富山県南部について

本地域では、富山市の小口川、神通川および南砺市の庄川沿岸で空間線量率が高く算出された。いずれも、主に花崗岩や閃緑岩等の自然放射性核種を比較的高濃度に含んだ岩石体に取り囲まれた山間部であり<sup>35),42),43)</sup>、航空機モニタリングでは、これらの岩石体から放出された $\gamma$ 線を捉えたため空間線量率が特に高く算出されたと推察される。本地域において日本地質学会の空間線量率マップ作成に使用された試料の元素濃度測定結果<sup>36)</sup>を見ると、特にU-seriesおよびTh-series濃度が富山市および南砺市街地部のものより2倍程度高い。

#### ・石川県南部について

本地域においては、直海谷川の東側で局所的に空間線量率が高く算出された。周囲は安山岩、安山岩質玄武岩や溶岩・火砕岩からなる地層に囲まれており<sup>35)</sup>、地質情報からは空間線量率が高くなることの説明は困難である。また、本地域には採石場が点在しており、既往の地質情報と異なる地層が表層に露出している可能性が考えられるが、明確な要因は不明である。

以上のように、東通・六ヶ所における航空機モニタリングでは、土壌試料の濃度分析結果に基づく空間線量率マップとは異なり、その地域に存在する岩石体等に起因する $\gamma$ 線を捉える



ことができたため、空間線量率が高く算出された箇所が散見されたと推察される。また、志賀における航空機モニタリングでは、地質情報と空間線量率の関係性を説明するのが難しい地域があるものの、基本的に航空機モニタリングによる空間線量率マップは既往の地質情報と矛盾しないと言える。

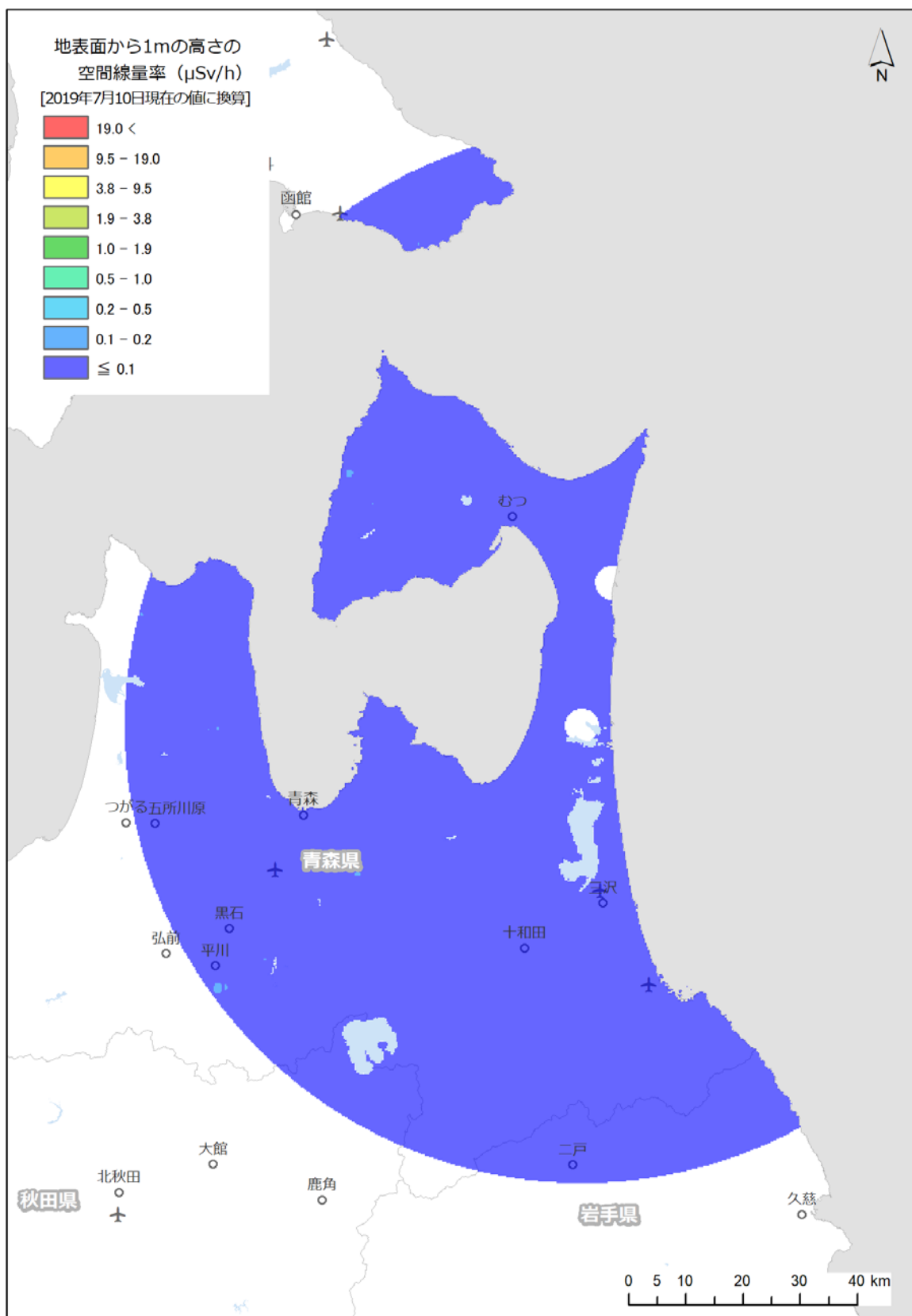


Fig. 4-17 空間線量率マップ (東通・六ヶ所)  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

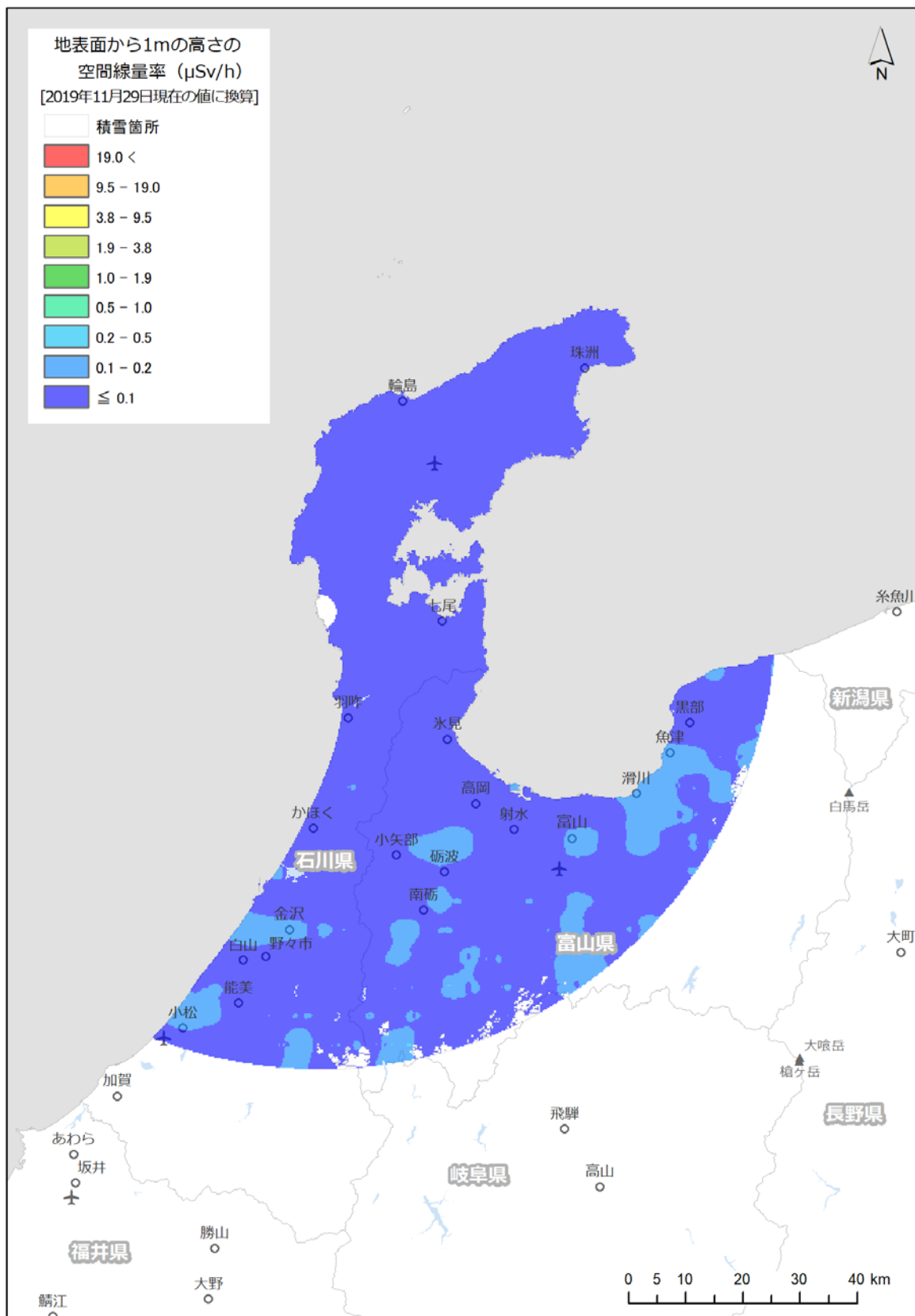


Fig. 4-18 空間線量率マップ (志賀)

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

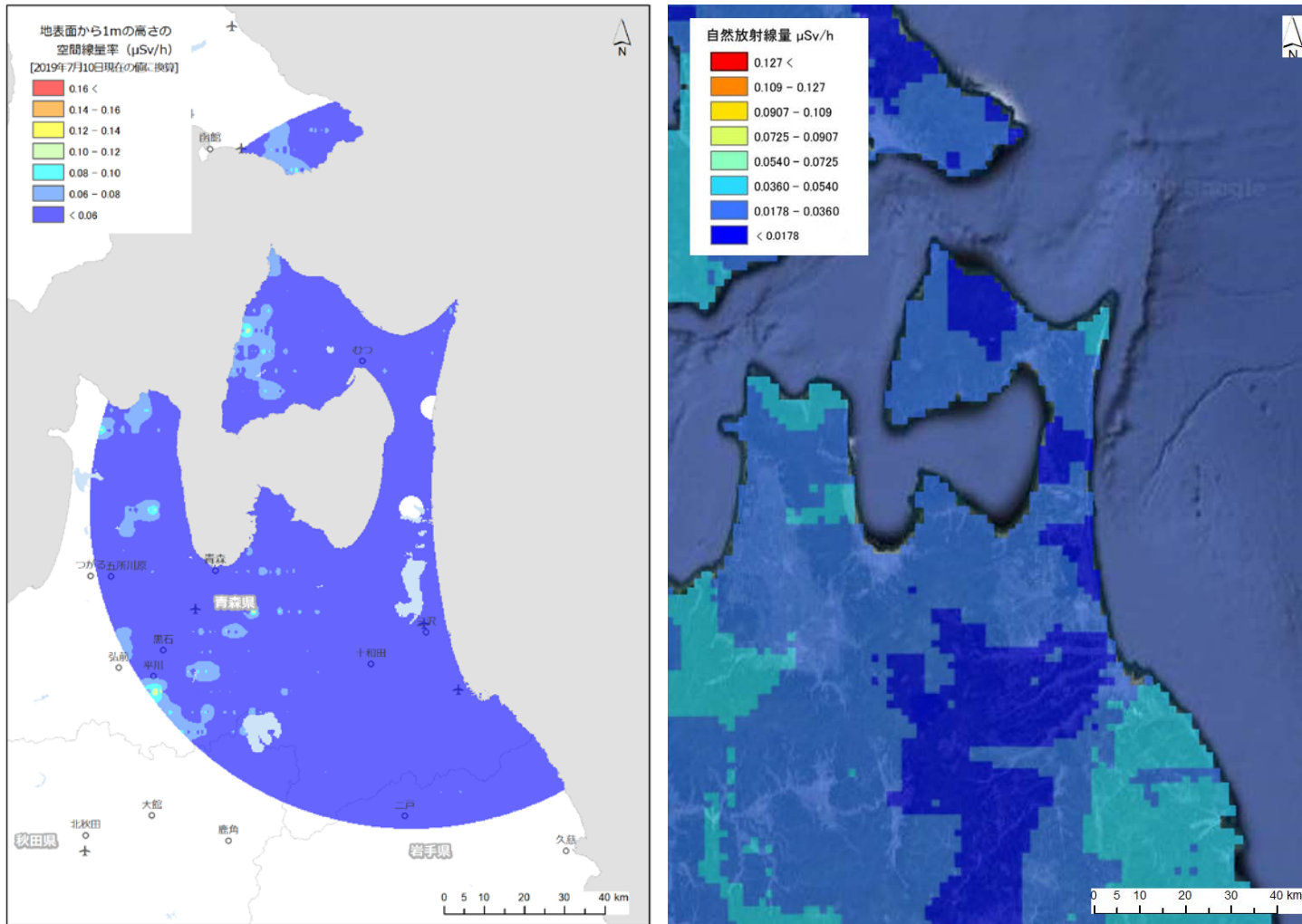


Fig. 4-19 空間線量率マップの比較 (東通・六ヶ所)

(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、©2018 TerraMetrics を使用)

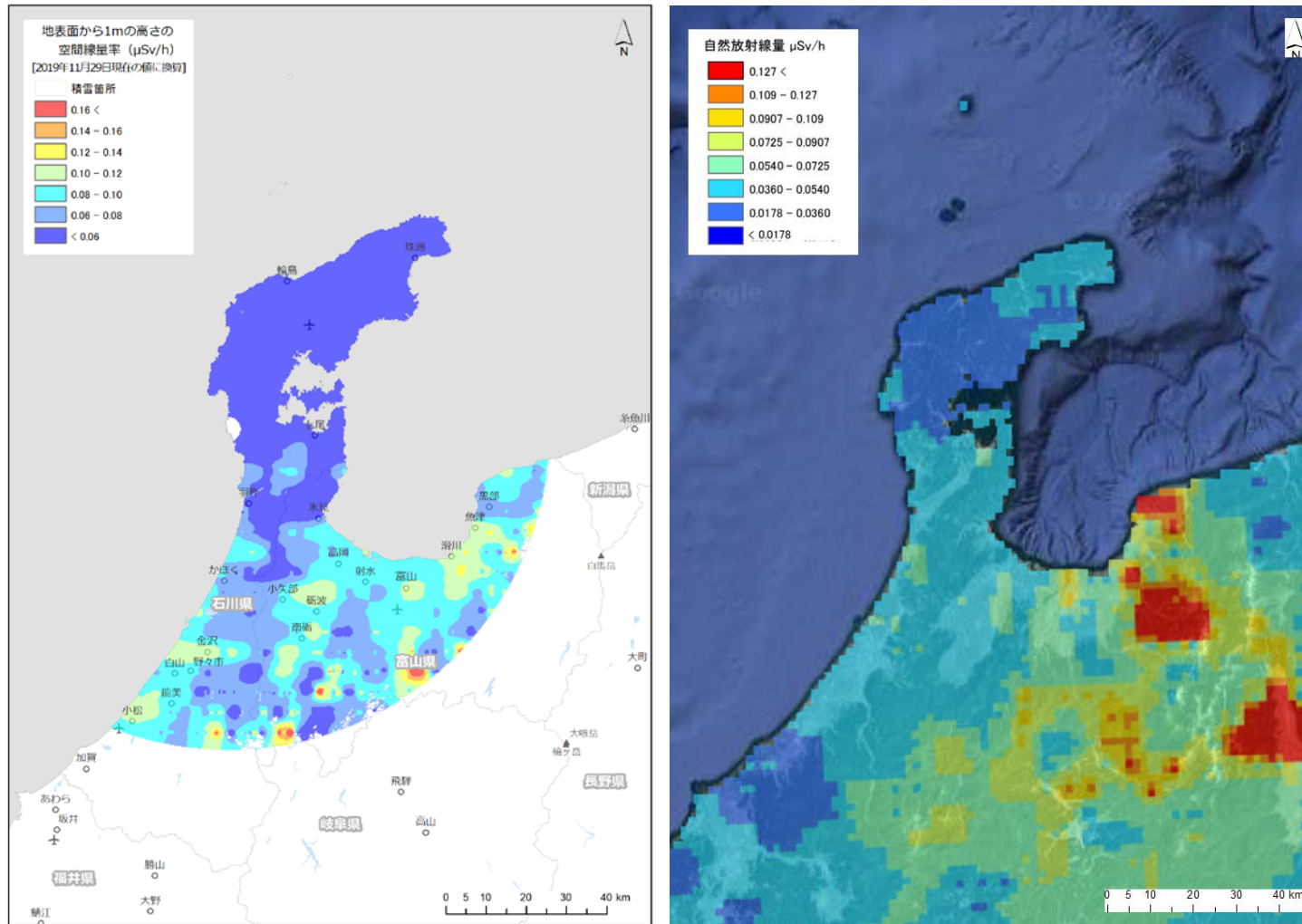


Fig. 4-20 空間線量率マップの比較 (志賀)

(左: 背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用、 右: 背景地図は、©2018 TerraMetrics を使用)

#### 4.4. 天然の放射性核種濃度

Table 3-4 に示したパラメータを利用し、地上値に換算し内挿して放射性核種濃度をマップ化した結果を東通・六ヶ所および志賀について  $^{40}\text{K}$ 、U-series および Th-series の順に、それぞれ Fig. 4-21～Fig. 4-23 および Fig. 4-24～Fig. 4-26 に示す。各最大濃度を見ると  $^{40}\text{K}$ 、U-series および Th-series は、東通・六ヶ所においては約 380 Bq/kg、約 70 Bq/kg および約 135 Bq/kg となり、志賀においては約 1,200 Bq/kg、約 55 Bq/kg および約 70 Bq/kg となった。一般的に、日本におけるそれらの核種の濃度は、 $^{40}\text{K}$ 、U-series および Th-series について、それぞれ 100 Bq/kg～700 Bq/kg、10 Bq/kg～50 Bq/kg および 7 Bq/kg～50 Bq/kg とされており<sup>44)</sup>、本報告で得られた濃度のレベルは東通・六ヶ所における Th-series、志賀における  $^{40}\text{K}$  を除いて概ね整合する。

それら核種の分布マップの妥当性を検証するために、産業技術総合研究所地質調査総合センターホームページに公開されている海と陸の地球化学図<sup>36)</sup>を利用した。航空機モニタリングによる天然放射性核種マップと海と陸の地球化学図による元素濃度マップの比較を東通・六ヶ所および志賀について  $^{40}\text{K}$ 、U-series、Th-series の順に Fig. 4-27～Fig. 4-29 および Fig. 4-30～Fig. 4-32 に示す。なお、海と陸の地球化学図の元素濃度マップは日本各地における土壌採取試料の元素濃度測定結果をもとに作成されており、その中でも  $^{40}\text{K}$ 、U-series および Th-series の濃度測定結果は 4.3 項で示したように、日本地質学会の空間線量率マップに使用されている。しかしながら、山間部等のデータは少ないため、このような地域の比較にあたっては注意が必要である。海と陸の地球化学図では元素の土壌中濃度 (ppm) を示しており、航空機モニタリングによる計算結果 (Bq/kg) との単純な比較は難しいが、全体的な傾向はよく一致しているように見える。

東通・六ヶ所について、 $^{40}\text{K}$  および U-series 濃度は測定範囲のほぼ全域において濃度レベルが比較的低くなる傾向は両マップで一致していた。しかしながら、下北半島西部 (佐井村・むつ市周辺) および津軽半島北部 (外ヶ浜町周辺) において、両マップ間で U-series 濃度に局所的な差異が見られた。下北半島西部において、海と陸の地球化学図による元素濃度マップ作成に使用された試料の元素濃度測定結果<sup>36)</sup>を見ると、U-series 濃度は最大で約 1.7 ppm であり、Fig. 4-28 (右) に示されたような色合い (6.27 ppm を超える) になることは考え難い。前項で記したように、本地域には石英閃緑岩の小岩体が分布しているものの、U-series 濃度がこれ程までに顕著に高くなる地質であるとは考え難く、比較対象として適切でない可能性がある。津軽半島北部については前項で記した通り、海と陸の地球化学図による元素濃度マップ作成に使用された試料の採取地点に、流紋岩脈が分布する地帯が含まれていないため、航空機モニタリングによる元素濃度マップとの差異が生じたものと推察される。

志賀については、 $^{40}\text{K}$ 、U-series および Th-series のいずれも測定範囲の南東部から南部にかけて比較的高濃度となる傾向は両マップで一致していた。海と陸の地球化学図における Th-series 濃度マップ (Fig. 4-32 (右)) について、測定範囲の中央部 (石川県七尾市周辺) で局所的に高濃度な箇所が見られる。当該マップ作成に使用された試料の内、七尾市内で採取されたものは三つあり、熊木川、二宮川および御祓川沿岸でそれぞれ採取されている<sup>36)</sup>。これらの試料

の Th-series 濃度はそれぞれ約 3.6 ppm、約 6.5 ppm および約 13 ppm であり、御祓川沿岸の試料が特に高濃度である。七尾市周辺の主要な岩相は段丘堆積物類や安山岩類であり<sup>35)</sup>、在来の土壌試料に Th-series が高濃度に含有されるとは考えにくく、当該試料の局所的な影響がマップ作成の際に周囲に拡大されたものと推察される。

以上のことから、局所的な影響を除けば、本手法で一定の信頼性をもつ天然の放射性核種濃度のマップ作成が可能であると考えられる。

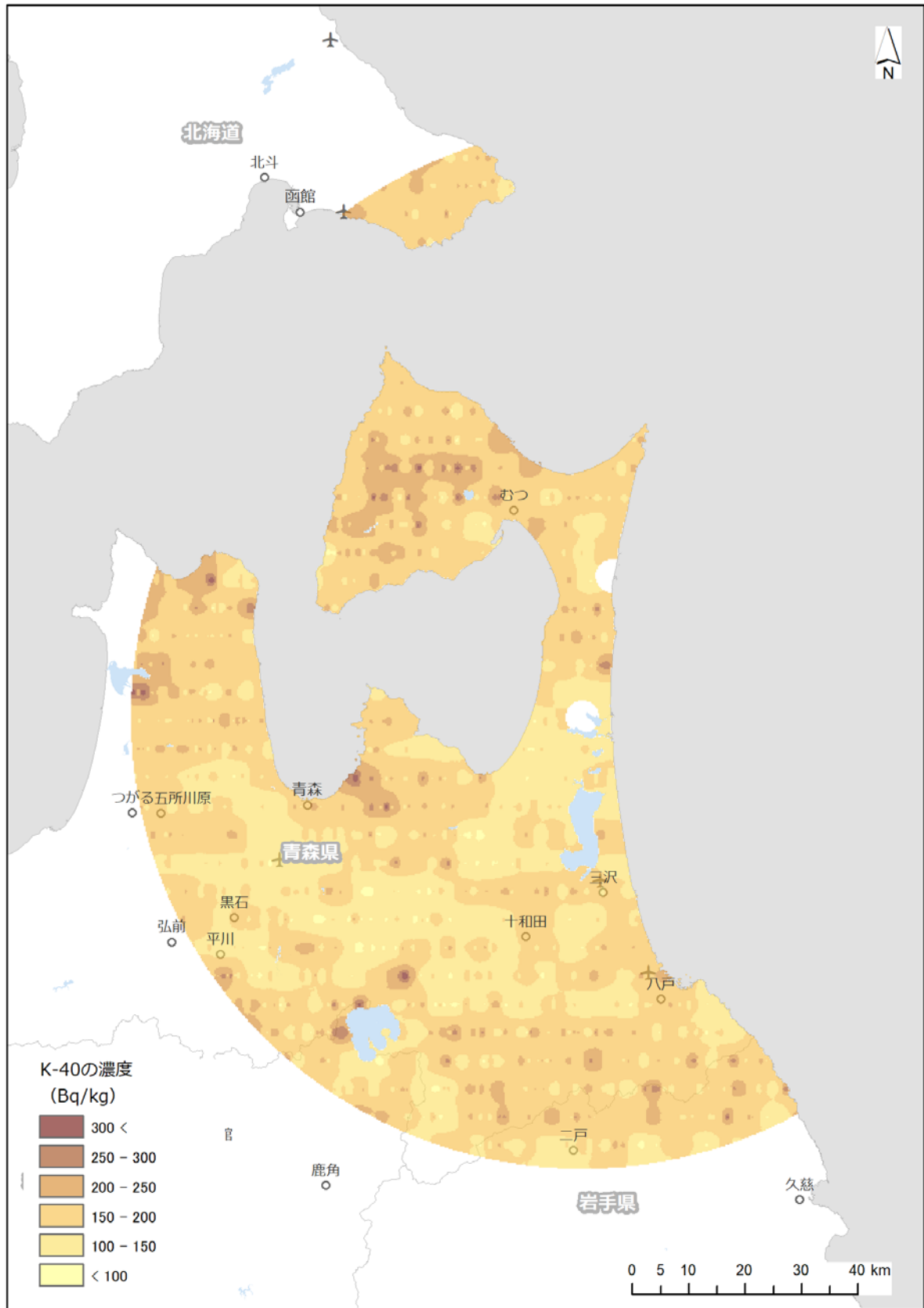


Fig. 4-21  $^{40}\text{K}$  濃度マップ (東通・六ヶ所)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)



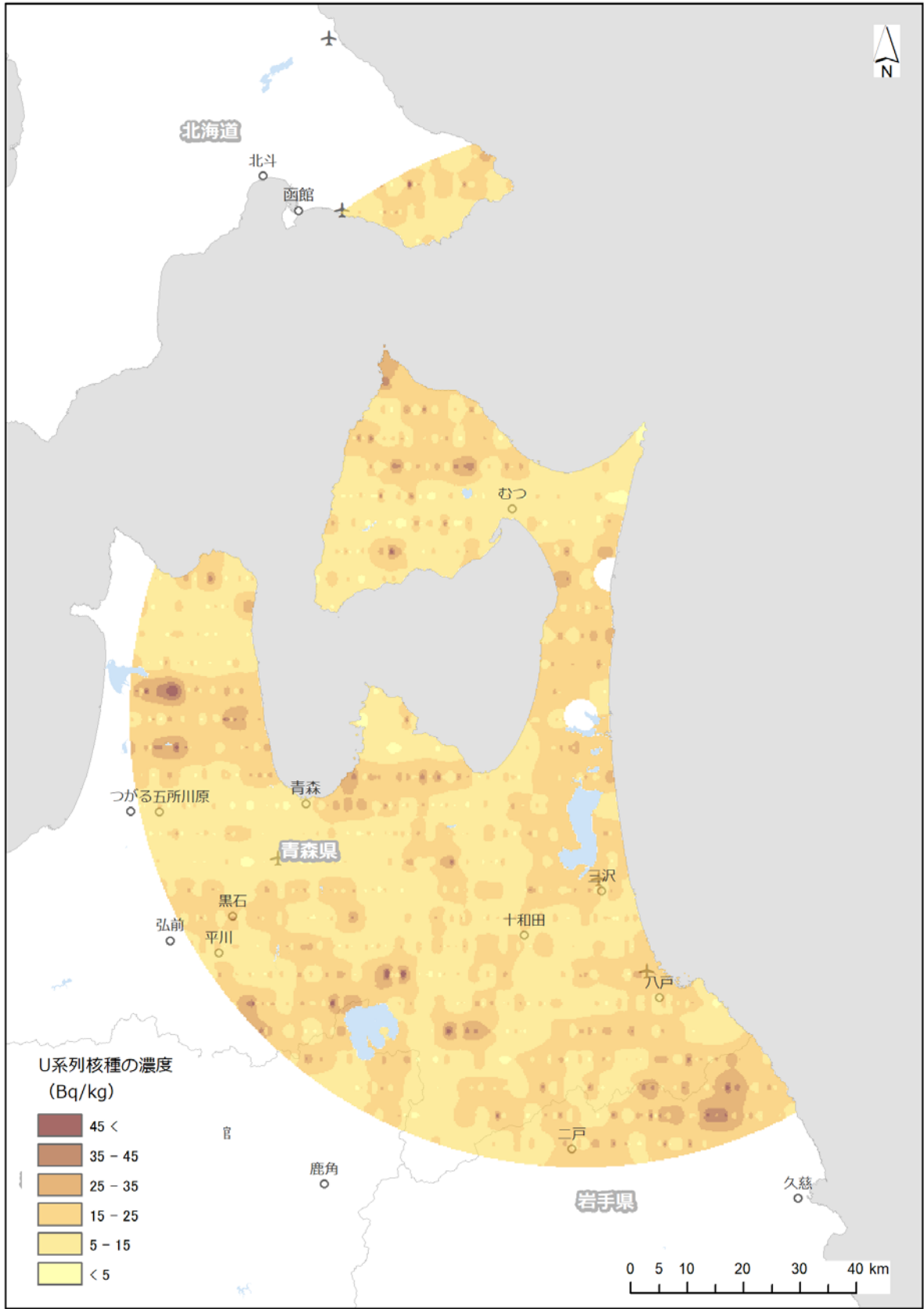


Fig. 4-22 U-series 濃度マップ (東通・六ヶ所)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

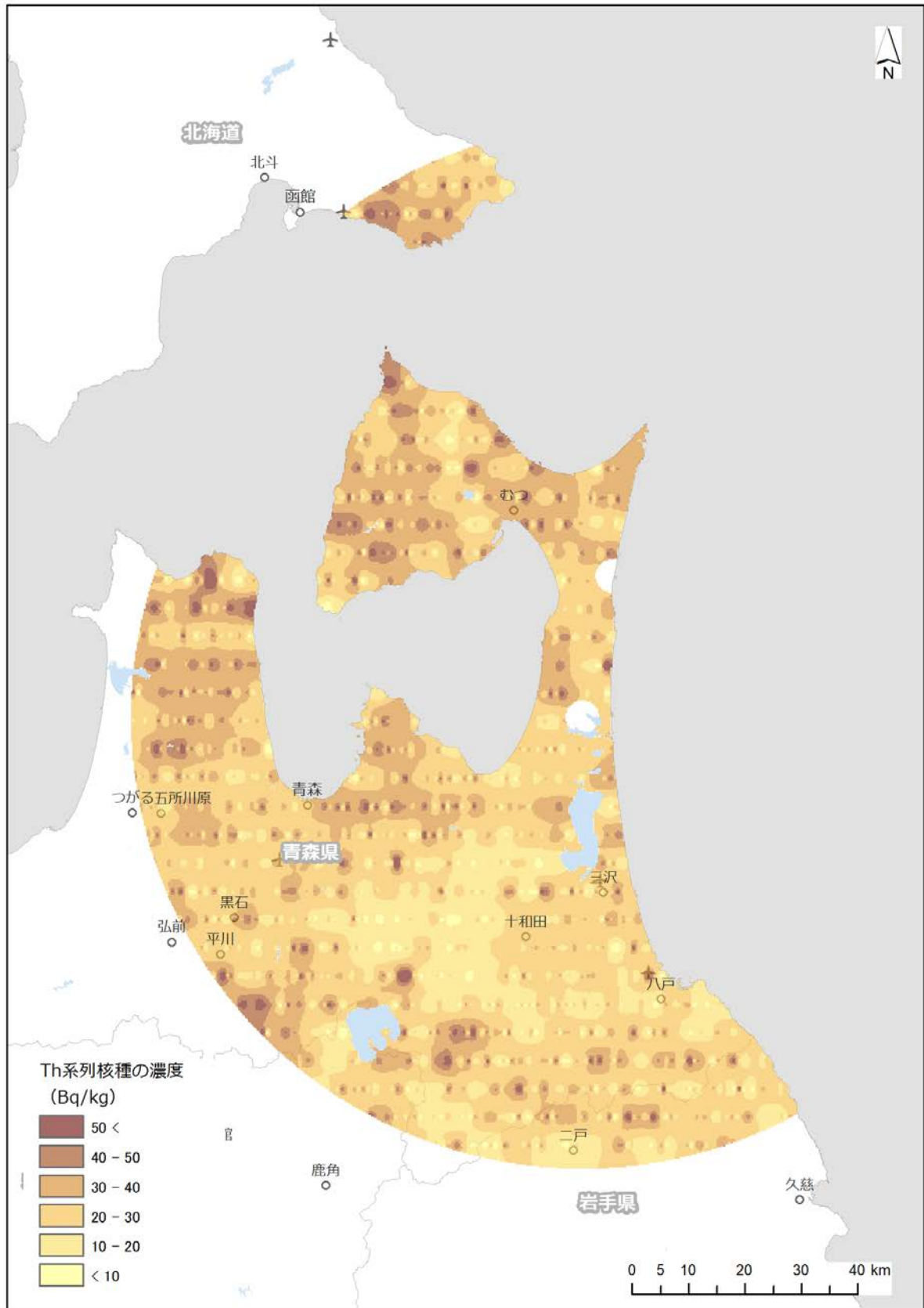


Fig. 4-23 Th-series 濃度マップ (東通・六ヶ所)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

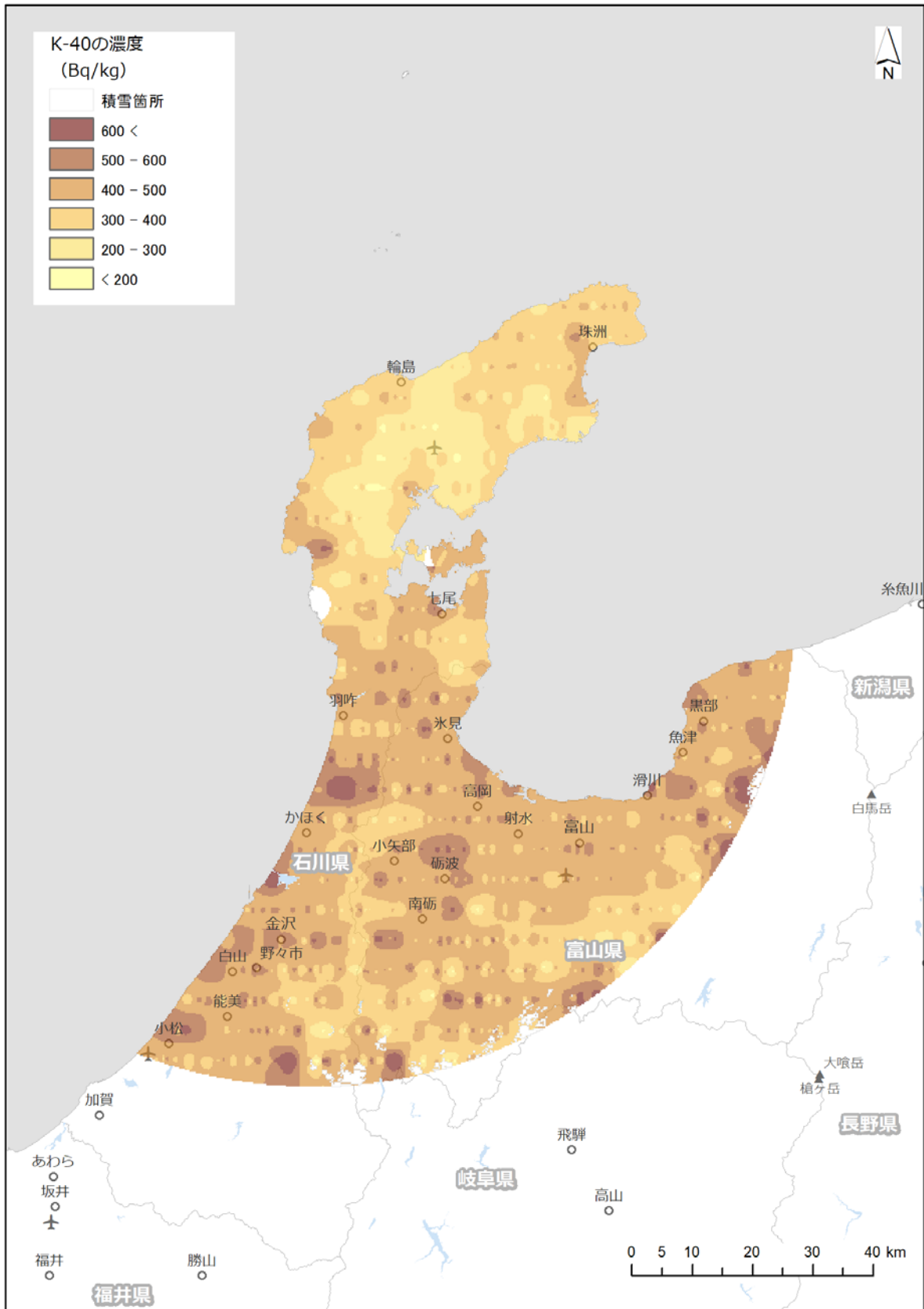


Fig. 4-24  $^{40}\text{K}$  濃度マップ (志賀)

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

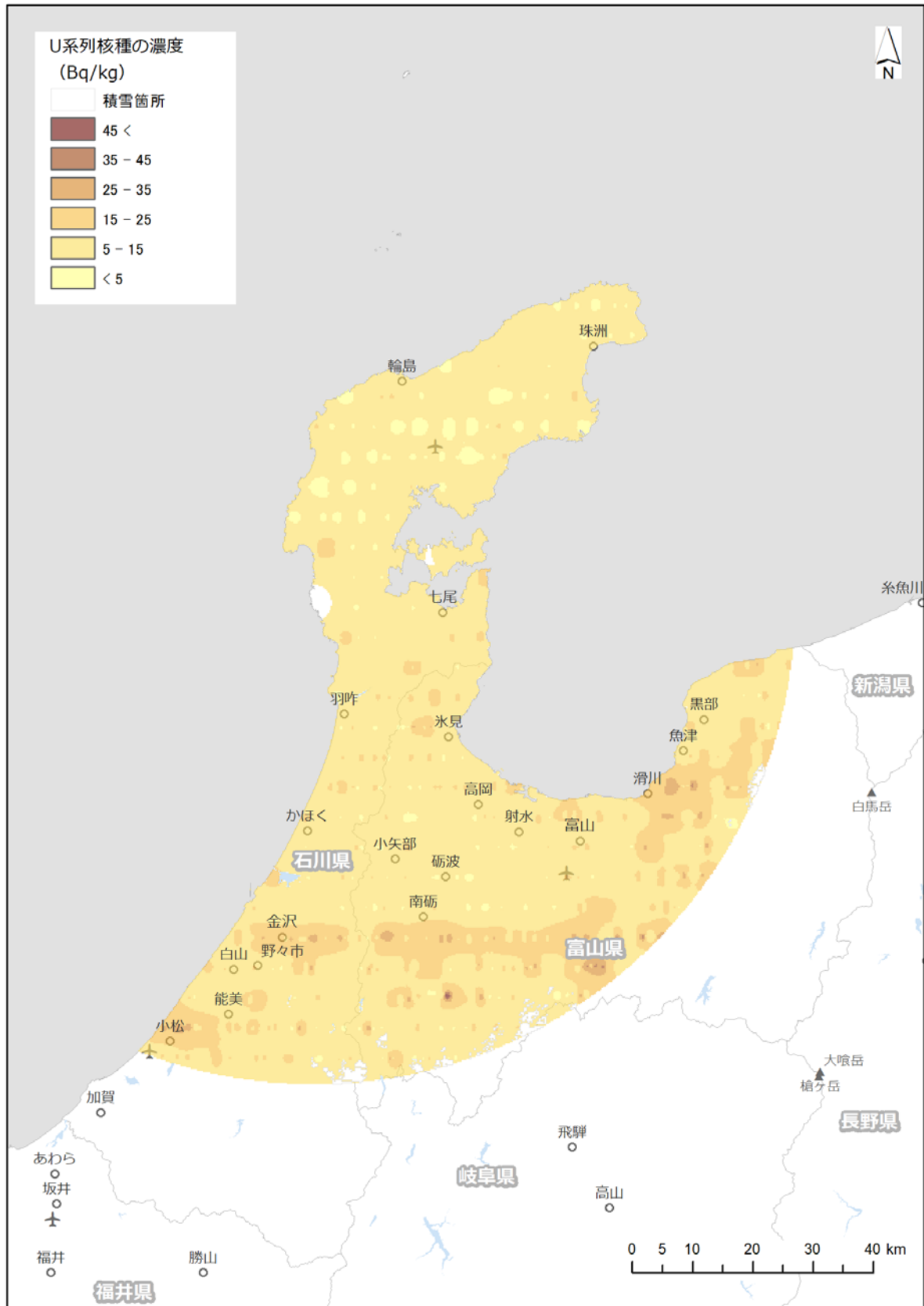


Fig. 4-25 U-series 濃度マップ (志賀)

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

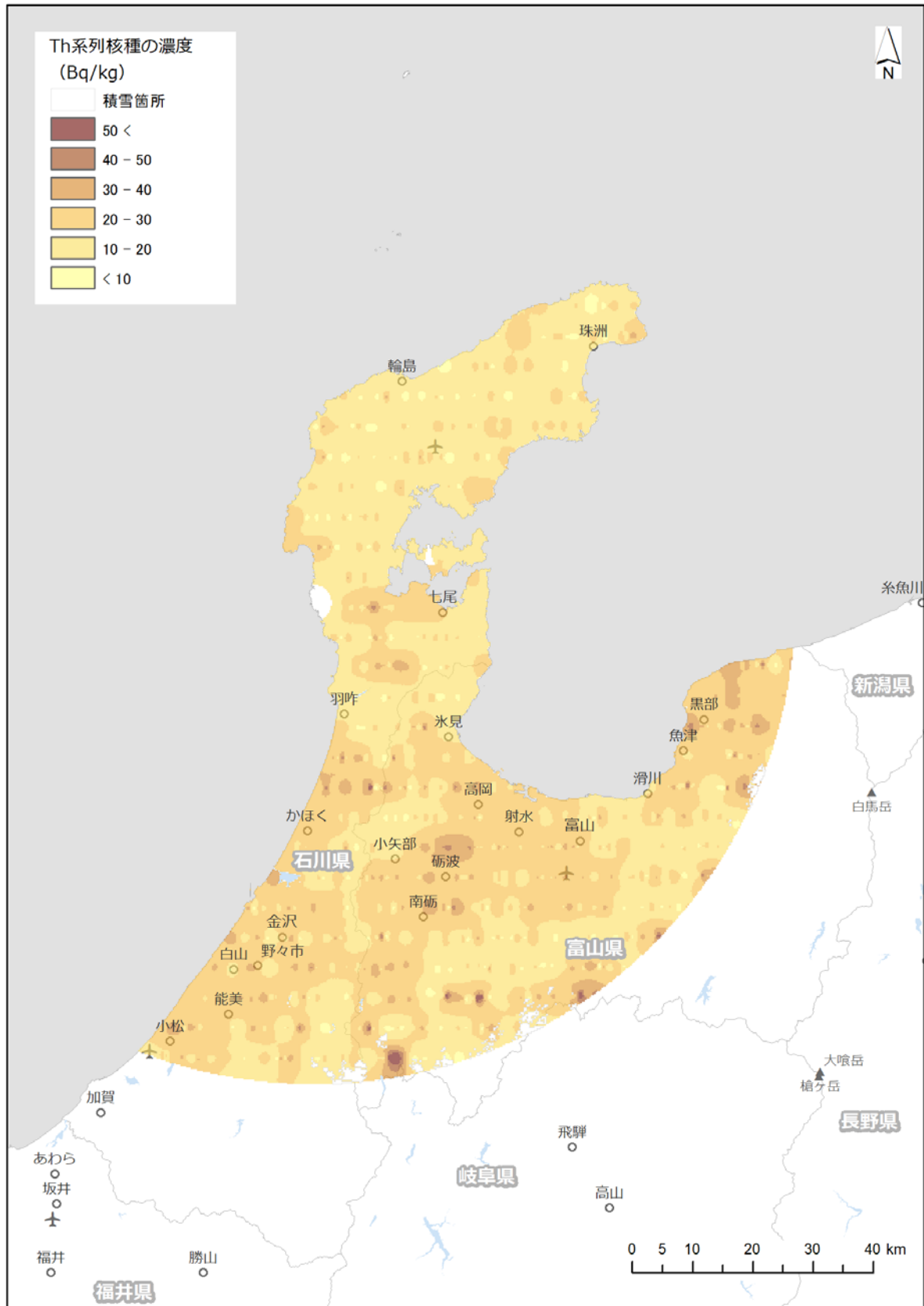


Fig. 4-26 Th-series 濃度マップ (志賀)

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

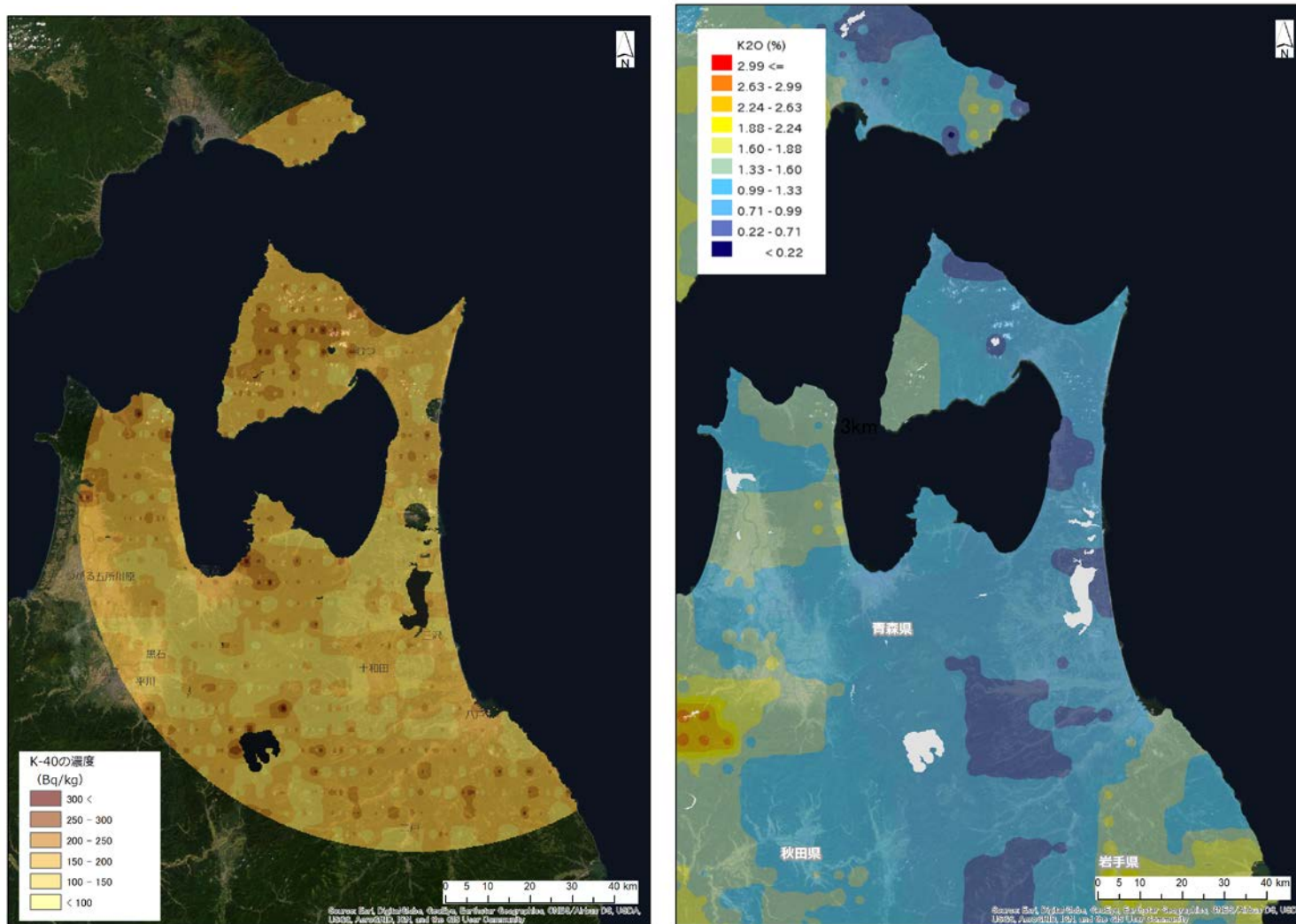


Fig. 4-27 東通・放射性核種濃度測定結果(左)と地球化学図(右)の比較( $^{40}\text{K}$ 、東通・六ヶ所)  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

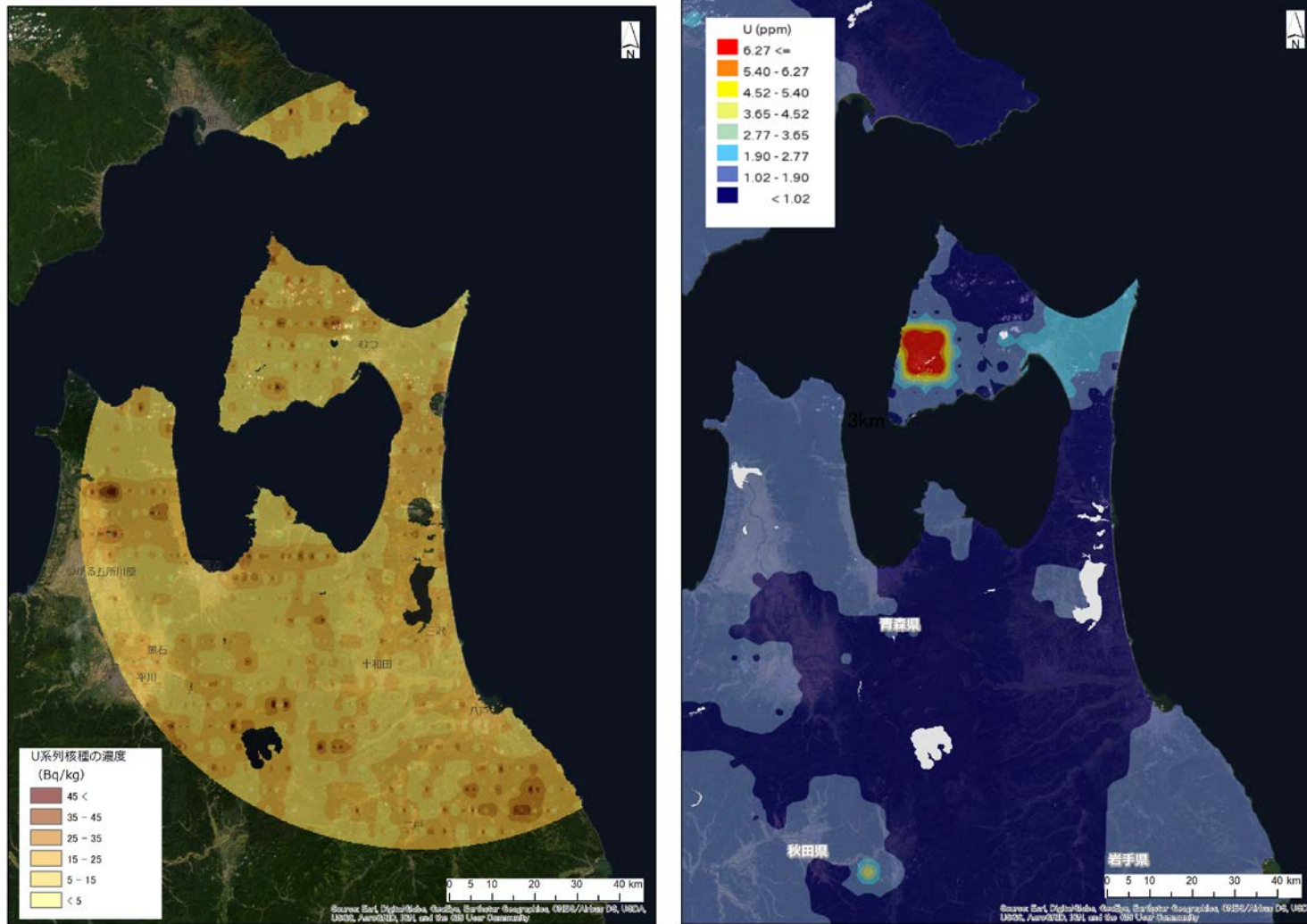


Fig. 4-28 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (U-series、東通・六ヶ所)  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

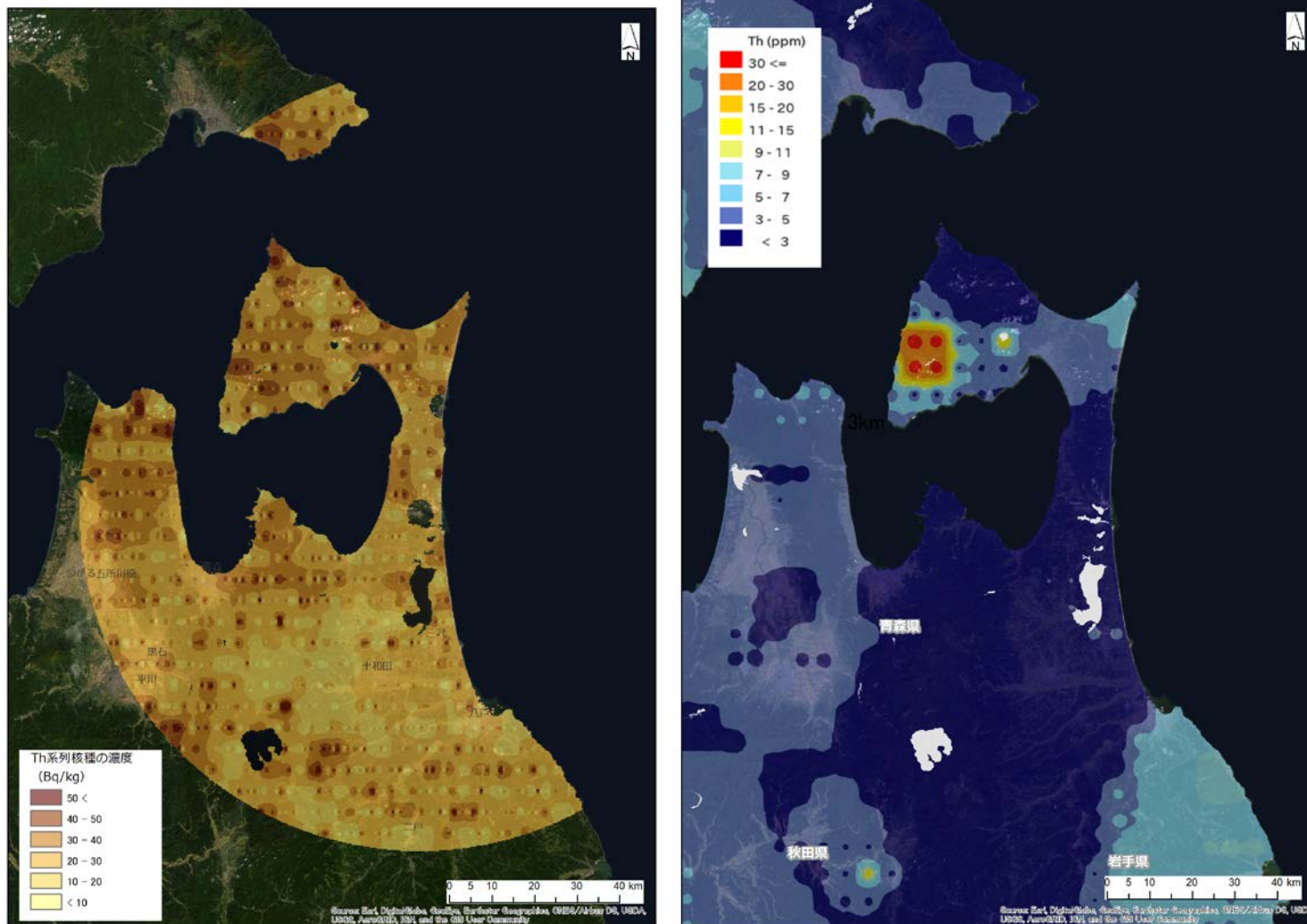


Fig. 4-29 放射性核種濃度測定結果(左)と地球化学図(右)の比較(Th-series、東通・六ヶ所)  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)



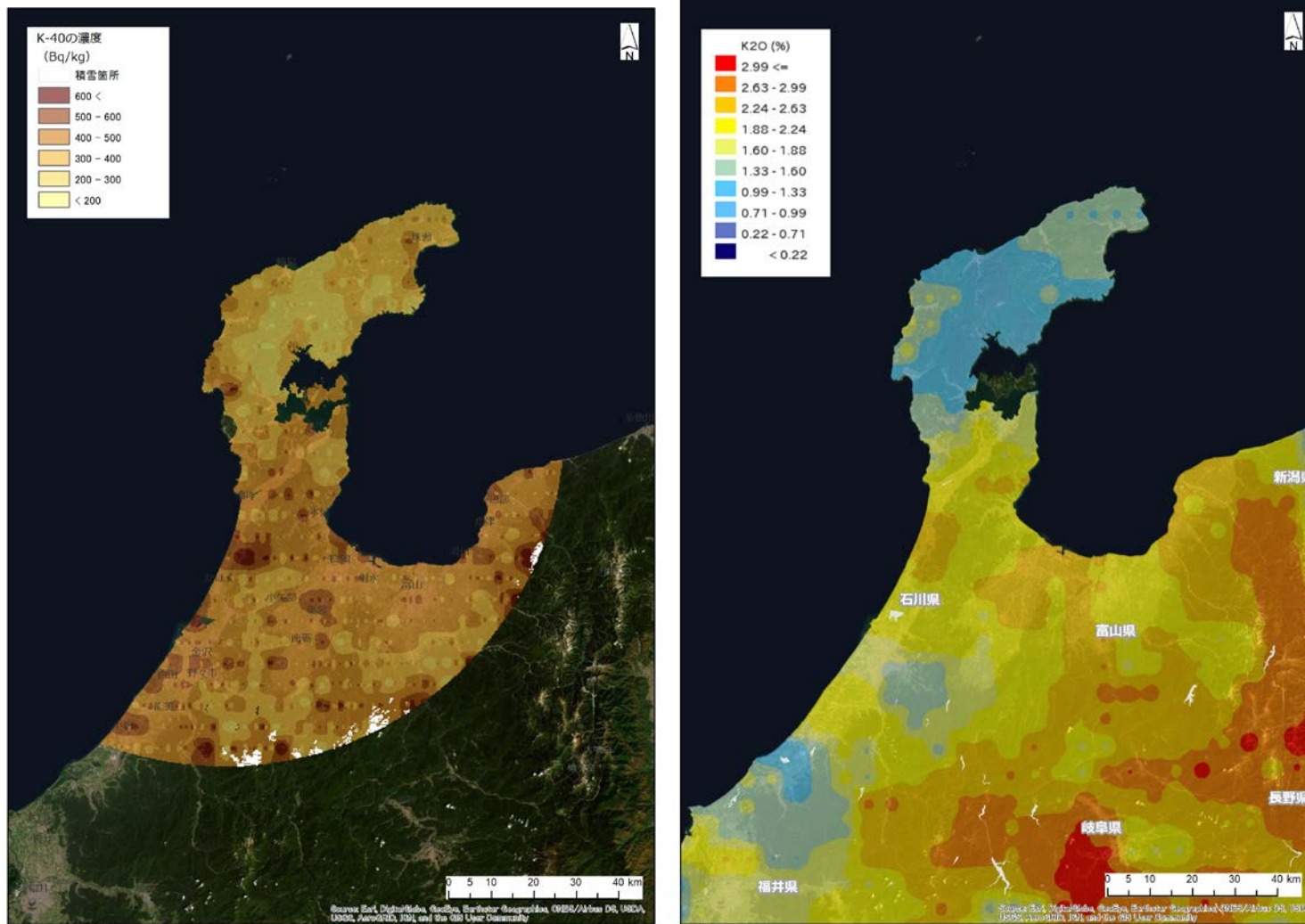


Fig. 4-30 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 ( $^{40}\text{K}$ 、志賀)  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

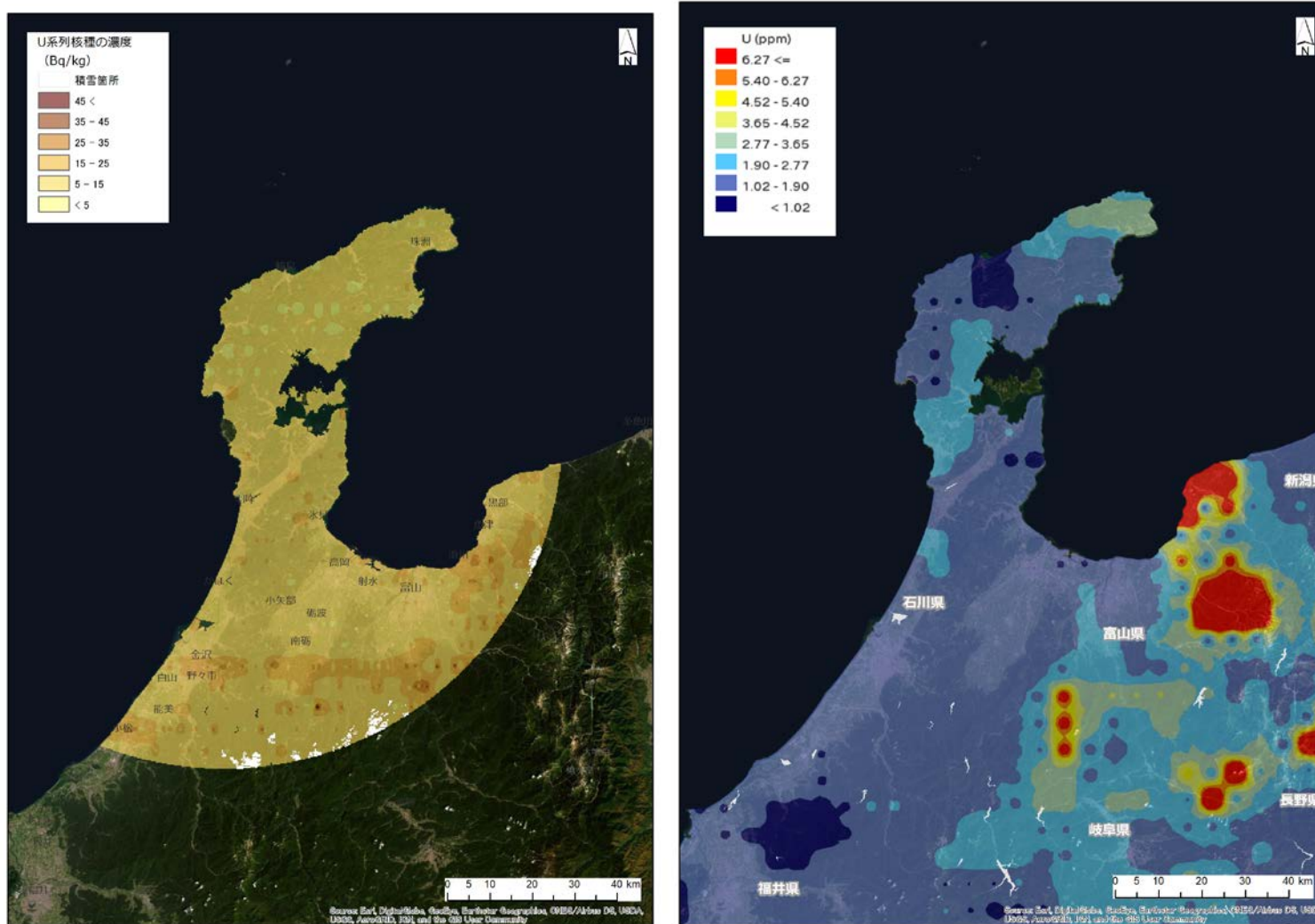


Fig. 4-31 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (U-series、志賀)  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ( (c) Esri Japan) を使用。)

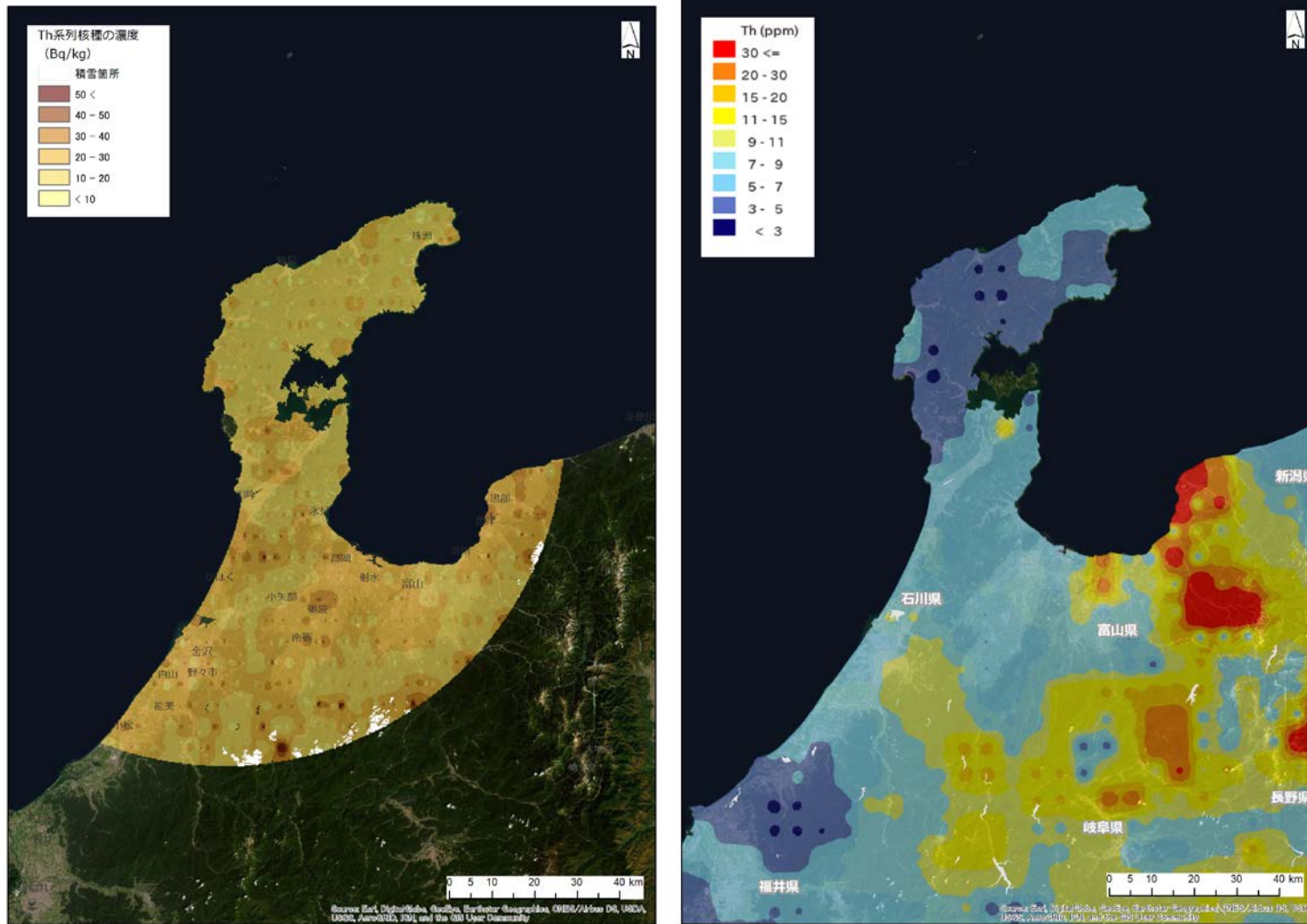


Fig. 4-32 放射性核種濃度測定結果 (左) と地球化学図 (右) の比較 (Th-series、志賀)  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (© Esri Japan) を使用。)

#### 4.5. ラドン弁別法の適用結果

##### 4.5.1 パラメータ (GIおよびRI) の決定

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

東通・六ヶ所で取得した地上から高さ 300 m 位置 (実際のフライトの対地高度が 290 m~320 m のデータ) における NaI RSI システムの計数率と、LaBr RSI システムの計数率の関係を Fig. 4-33 (a) に示す。また、志賀で取得した同様の結果を Fig. 4-33 (b) に示す。なお、東通・六ヶ所および志賀では Bell 430 (JA6900) を使用した。これらのデータにはラドン子孫核種の影響が含まれているが、完全にラドン子孫核種の影響のない環境でのデータ取得は困難であることから、GI の数値は不確かさが比較的大きいと推察される。今回測定を実施した 2 つの測定地域における散布図は、よい相関関係を示し、近似した直線の傾きをそれぞれの測定体系 (ヘリコプター) における GI と定義する。

一方、RI については、海上の 300 m 位置 (実際のフライトの海拔高度が 150 m~450 m のデータ) で取得したデータを抽出し、GI と同様に宇宙線および自己汚染の寄与分を差し引いた計数率データを用いた。東通・六ヶ所および志賀で使用した各ヘリコプターにおける NaI RSI システムの計数率と、LaBr RSI システムの計数率の関係を Fig. 4-34 (a)、(b) に示す。本散布図における近似直線の傾きを RI と定義した。これらのパラメータの違いはヘリコプター等を含む検出器の遮蔽状況の違いによるものと考えられる。Table 4-4 に解析に使用した GI および RI の一覧について、2019 年度の福島原子力発電所から 80 km 圏外における航空機モニタリング (東日本第 10 次モニタリング) で取得されたデータとともに示す。

Table 4-4 GI および RI の一覧

モニタリング名	開始日	終了日	RI	GI	ヘリコプター機種	
東通・六ヶ所	2019/6/26	2019/7/10	21.9	27.5	Bell430	JA6900
東日本第10次モニタリングA班	2019/9/18	2019/11/2	25.3	29.9	Bell430	JA05TV
東日本第10次モニタリングB班	2019/9/18	2019/9/30	16.8	30.0	Bell412	JA9616
	2019/9/30	2019/11/2			Bell412	JA6767
志賀	2019/11/21	2019/11/29	21.8	29.2	Bell430	JA6900

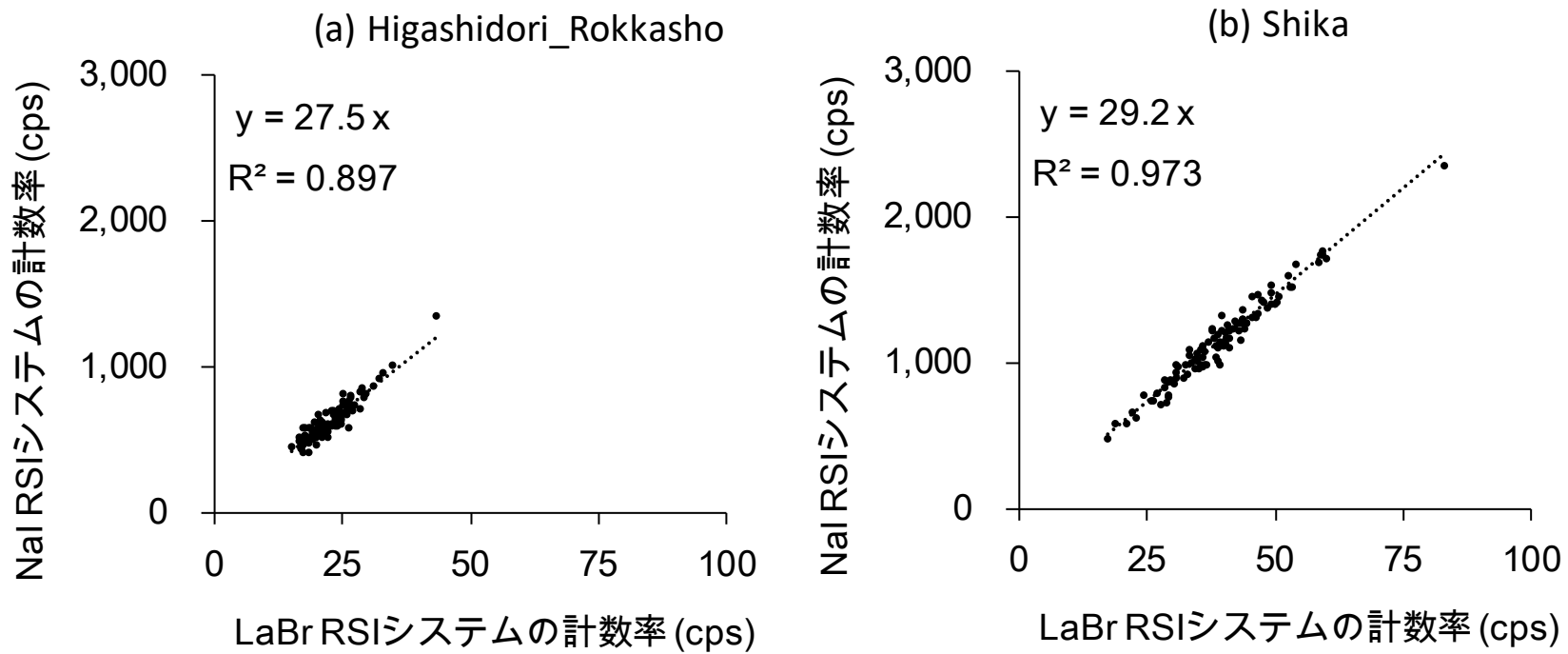


Fig. 4-33 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係

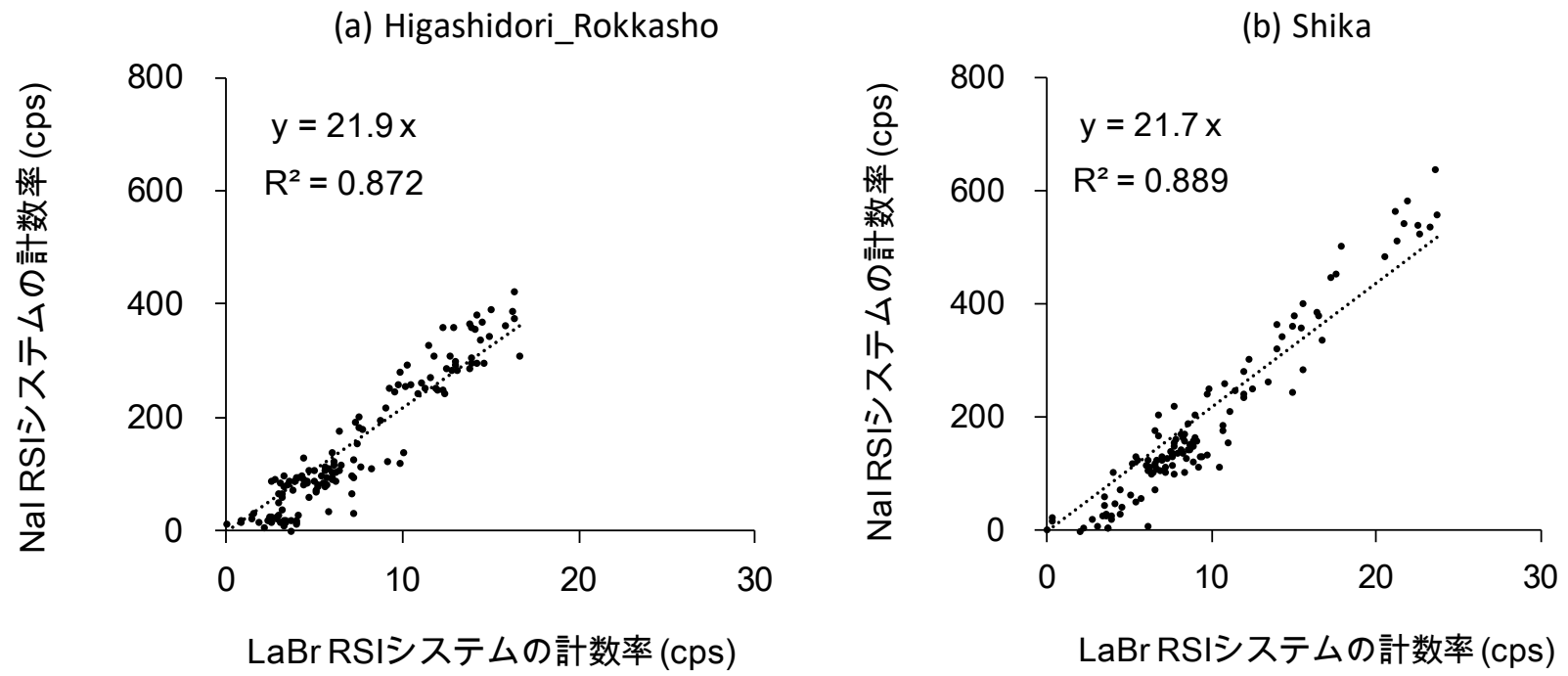


Fig. 4-34 海上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係

#### 4.5.2 従来手法との比較

Fig. 3-11 のフロー図に則った従来手法においては測定日ごとに空气中核種フライトとして対地高度約 900 m に機体を保ち約 3 分のフライトを継続し得られたデータを、地上の放射性核種由来の計数率の影響が無視できるものと見なし、全計数率から差し引いている。当該フライトで得られる計数率にはラドン子孫核種由来の計数率も含まれていると考えられ、ある程度ラドン子孫核種の影響を差し引くことができていると思われる。従来手法によるラドン子孫核種弁別の効果と上記の新たなラドン弁別手法の有効性を評価するために、Fig. 3-11 で示した従来手法に基づいた計数率と、Table 4-4 に示したヘリコプター機種毎の RI および GI 値を設定した場合におけるラドン弁別手法により求めたラドン子孫核種起源の計数率の比較を行った。測定日ごとの空气中核種フライトデータから求めた計数率と同日におけるラドン弁別手法で求めた計数率の平均値の比較を Fig. 4-35 に示す。本図には比較のため、東日本第 10 次モニタリング (E10th\_A および E10th\_B と表記) に適用した結果についても示している。このように一定の正の相関関係にあるものの、ばらつきが大きいことが分かる。プロット自体は、福島原子力発電所事故由来の放射性セシウムの有無に関わらず同様なばらつきを示しており、従来手法でもラドン子孫核種の弁別はある程度できることが示唆される。しかしながら、従来手法は大気中のラドン子孫核種濃度が 1 日を通して測定範囲で一定である場合のみ有効である。よってラドン子孫核種由来の計数率の減算手法により普遍性を持たせるために、ラドン弁別手法の精度を向上させていく必要があると考える。

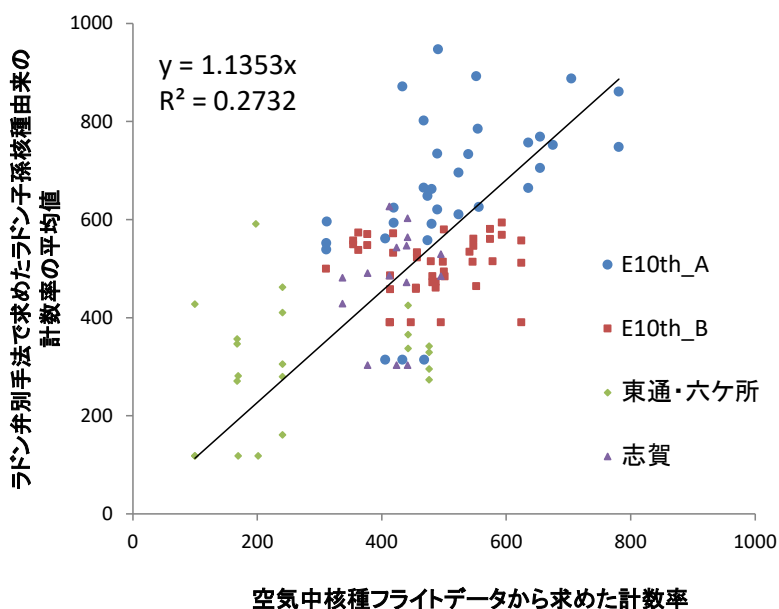


Fig. 4-35 空气中核種フライトから求めた NaI RSI システムの計数率とラドン弁別手法を適用し求めたラドン子孫核種起源の計数率の平均値の比較

#### 4.5.3 ラドン弁別手法の適用

ラドン弁別手法を 2019 年度の測定結果に適用し、空間線量率マップを作成した。本手法は GI の数値に依存すると考えられるため、Table 4-4 に示したヘリコプター機種毎の GI の数値を基準値とし (GI =  $\pm 0$  と表記)、基準値から -1 および -2 した場合 (GI = -1 および -2 と表記) についても解析した。得られた結果を地上測定値 50 点 (東通・六ヶ所) および 30 点 (志賀) と比較し、その妥当性について考察した。なお、3 章で示した従来の空間線量率換算手法においては、これまでの経験から Table 3-1 で示したように、測定日ごとに空气中核種フライトとして対地高度約 900 m に機体を保ち約 3 分のフライトを継続し、得られたデータを差し引いている。当該フライトで得られる計数率にはラドン子孫核種由来の計数率も含まれていると考えられ、ある程度ラドン子孫核種の影響を差し引くことができていると思われる。本手法の検証には、空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する。よって、本項で示す「ラドン弁別なし」の空間線量率マップは Fig. 4-17、Fig. 4-18 に示したマップとは異なる。Fig. 4-36、Fig. 4-37 に GI の数値を変化させながらラドン弁別手法を適用した結果について示す。GI の数値を小さく設定すると、空間線量率が比較的高いことを意味する色の面積が大きくなる傾向にあることが分かる。さらに、ラドン子孫核種の影響の高い地域について考察するために、Fig. 4-38、Fig. 4-39 にラドン弁別手法によりラドン子孫核種起源の計数率を減算した NaI RSI システムの計数率を抽出し、計数率マップを作成した。本マップは測定時刻が場所により異なるので、その時の測定により検出された空气中のラドン子孫核種由来の計数率が時間的につぎはぎ状でマップとして表現されている。Fig. 4-38 に東通・六ヶ所の測定結果から計算した空气中のラドン子孫核種由来の計数率のマップを示す。このように、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 =  $\pm 0$  の場合であっても 100 cps 未満の地域がほとんどを占め、測定範囲の北西部 (中泊町、青森市、五所川原市の周辺)、北東部 (六ヶ所村周辺)、中央部～南西部 (平川市、十和田市、新郷村周辺) および南東部 (八戸市、二戸市周辺) で比較的計数率が高く算出された。一方、Fig. 4-39 に示した志賀の測定結果に適用した例では、GI =  $\pm 0$  の場合、計数率が 100 cps を超える地域が多く、特に山地・丘陵地が主である南東部～南部に渡って計数率が比較的高く算出された。ただし、ラドン子孫核種の起源としては中国大陸からの輸送と、測定地域近傍における地殻からの放出が考えられ、後者由来のものは濃度の時間変化は小さいと考えられる。本手法で検出されたラドン子孫核種がどちら由来なのか弁別することは困難であり、本結果はその地域におけるラドン子孫核種の分布傾向を決定付けるものではないことに留意する必要がある。

従来手法と Table 4-4 に示したヘリコプターごとの GI の数値を用いてラドン弁別手法を適用した空間線量率のマップを Fig. 4-40 に示す。結果の妥当性を評価するために、地上測定値との比較を行った。比較結果を Fig. 4-41 (東通・六ヶ所)、Fig. 4-42 (志賀) に示す。ファクター 0.5～2 の範囲に収まっているプロットの数に着目すると、東通・六ヶ所については従来手法で 90 % (全 50 点中 45 点) であったのに対し、ラドン弁別後では GI =  $\pm 0$  で 84 % (全 50 点中 42 点)、GI = -1 および GI = -2 で 82 % (全 50 点中 41 点) であり、収まりが比較的悪くなった。志賀については、従来手法で 93 % (全 30 点中 28 点) であったのに対し、ラドン弁別後でも GI =



$\pm 0$ 、 $GI = -1$  および  $GI = -2$  のいずれでも 93 % (全 30 点中 28 点) であり、収まりに変化は見られなかった。2018 年度の東日本第 9 次モニタリングで行った検証ではラドン弁別手法により、空間線量率計算結果が地上測定値に近づくことが分かっている<sup>12)</sup>。

Fig. 4-36 に示すように、本地域においては放射性セシウム等の人工放射性核種による影響がなく、空間線量率が比較的小さいため、地上測定値との比較ではラドン弁別手法の有効性が相対的に表れにくいことが推察される。本手法には高度補正の手法や  $GI$  の数値決定方法に若干の不正確さが残っているため、今後もこのような解析経験を積み上げ、最適化を行っていくことが必要である。

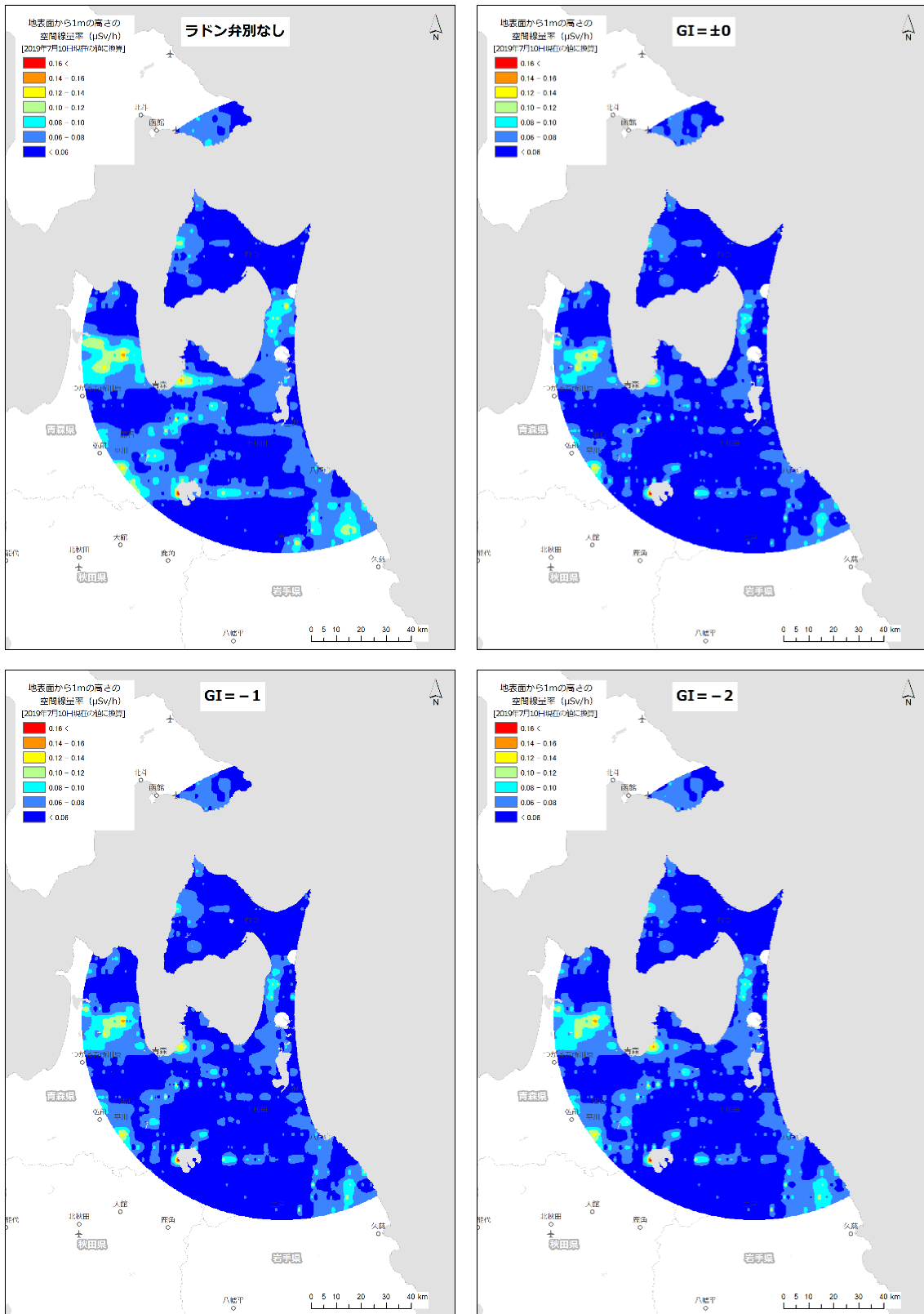


Fig. 4-36 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ(東通・六ヶ所)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

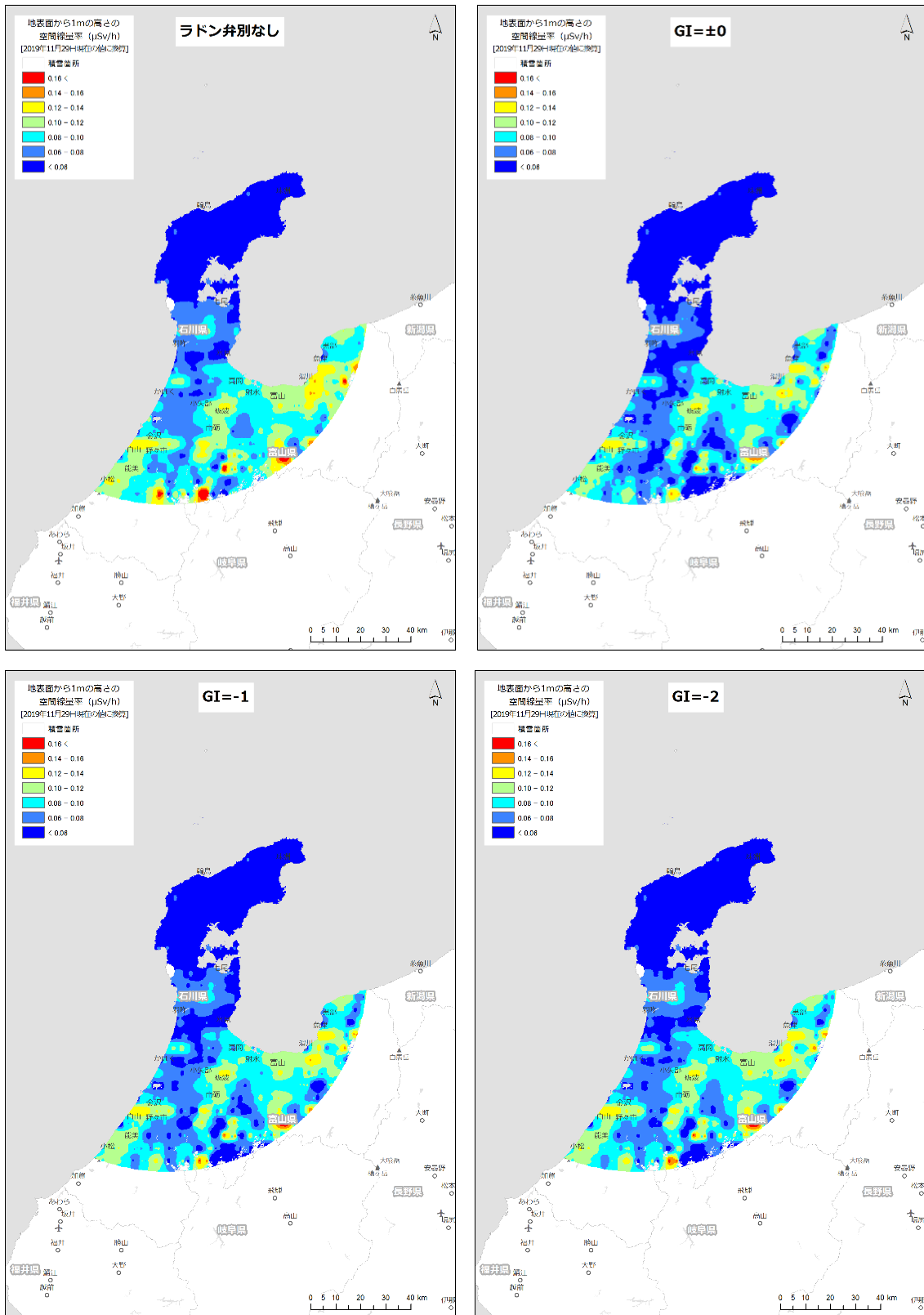


Fig. 4-37 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ (志賀)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (© Esri Japan) を使用。)

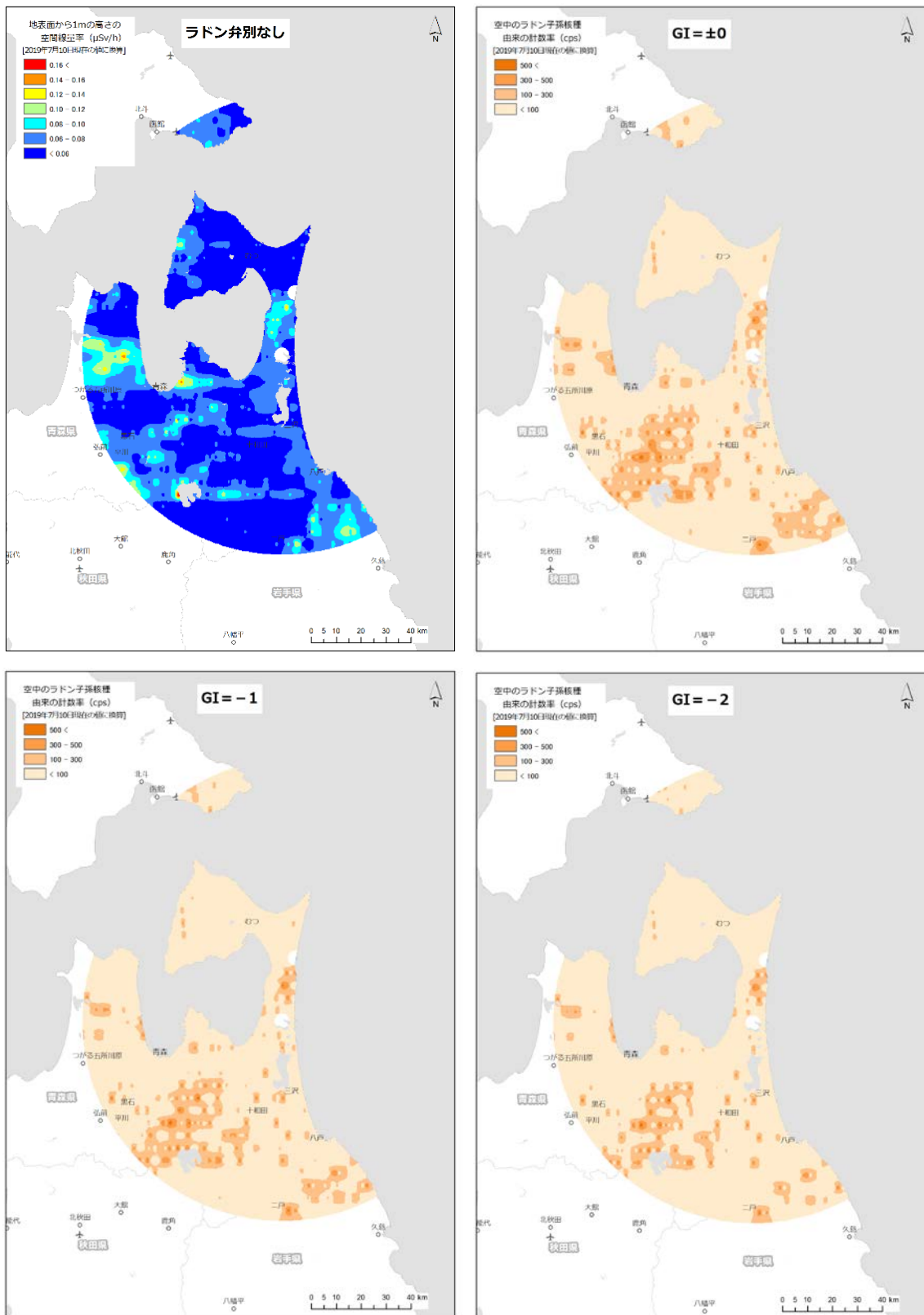


Fig. 4-38 空气中的ラドン子孫核種起源の計数率マップ(東通・六ヶ所)  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

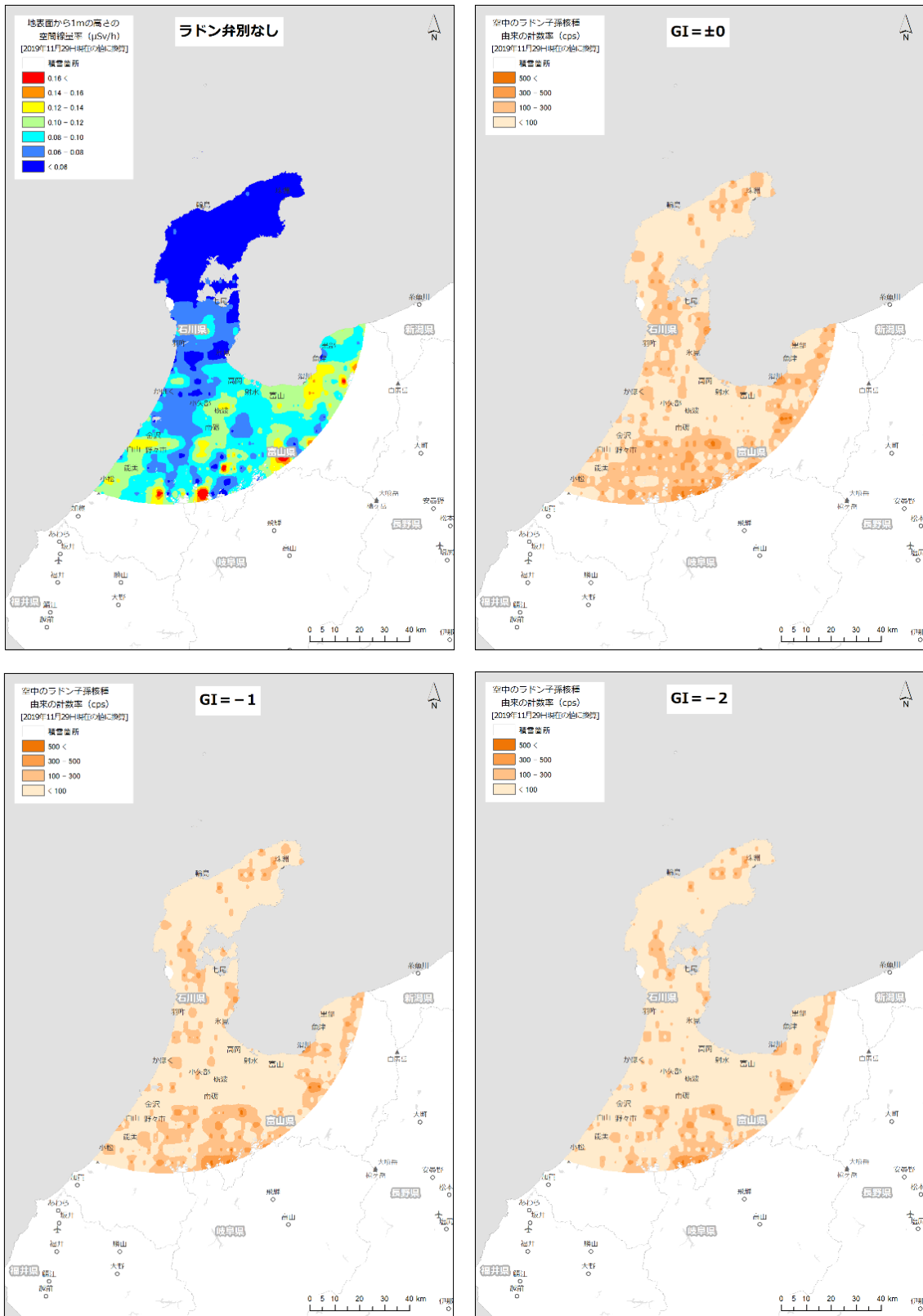


Fig. 4-39 空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ (志賀)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

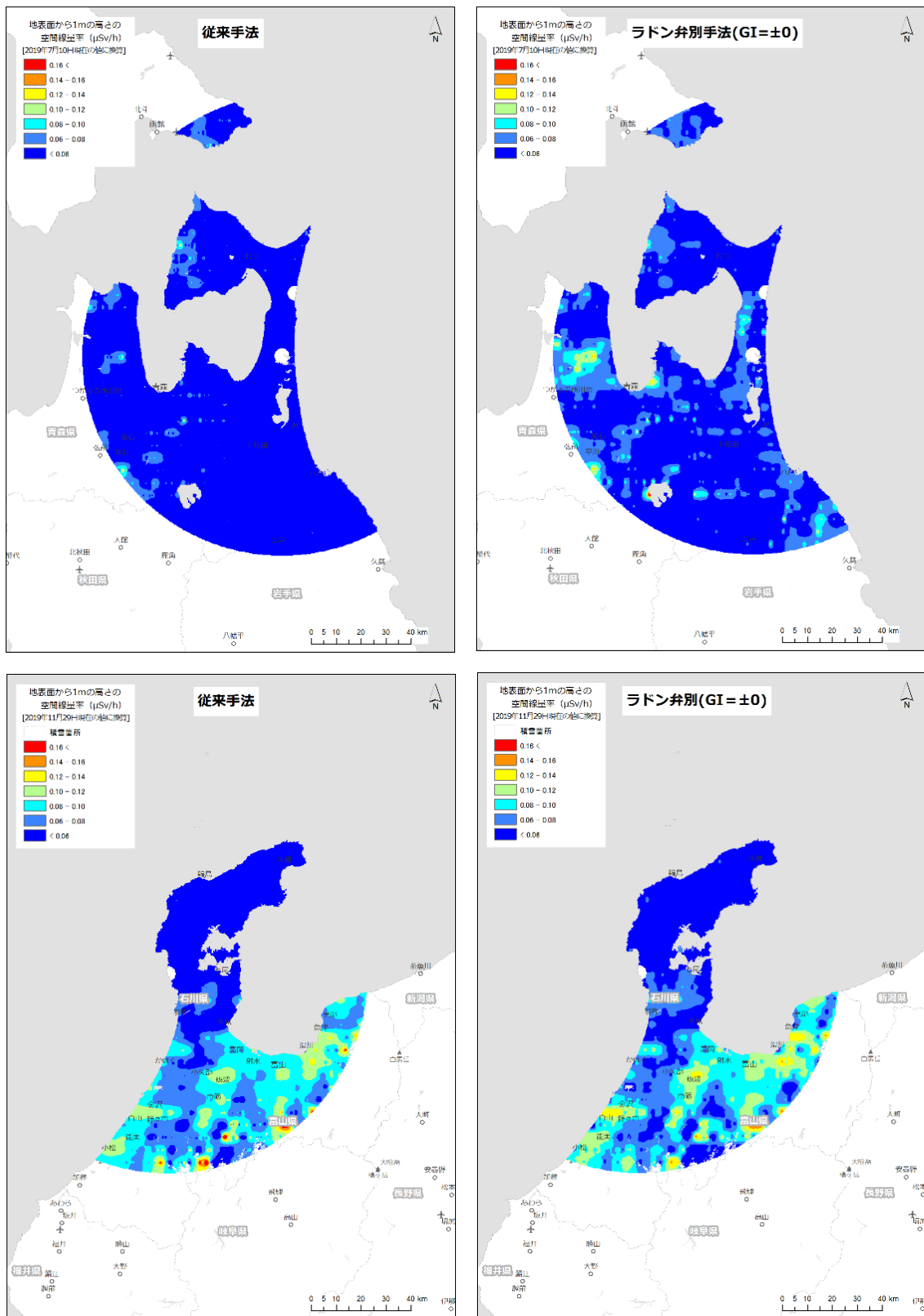


Fig. 4-40 ラドン弁別手法適用前後の空間線量率マップ比較

(上段: 東通・六ヶ所、下段: 志賀)

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

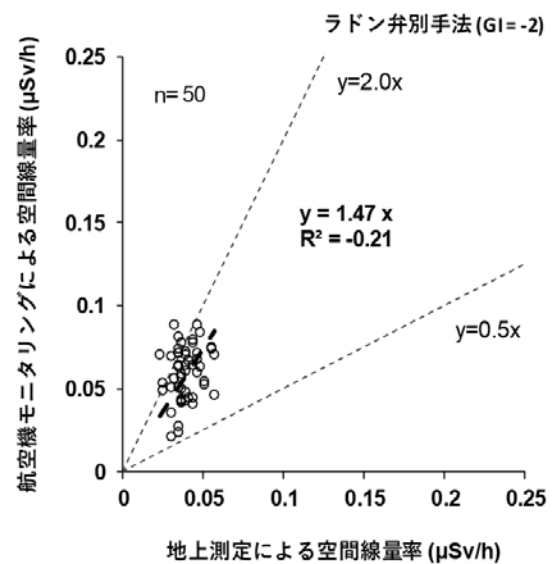
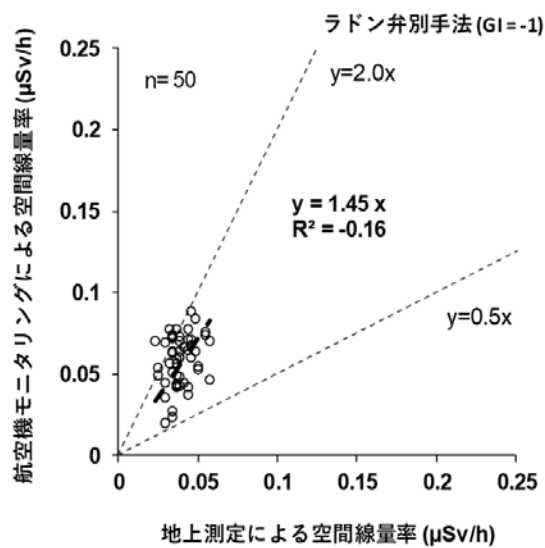
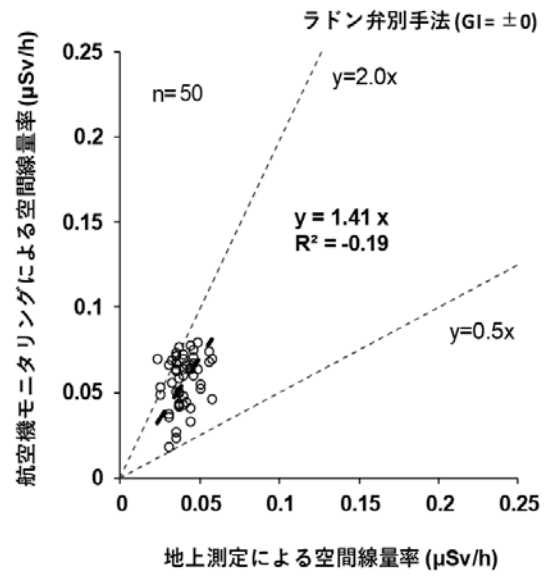
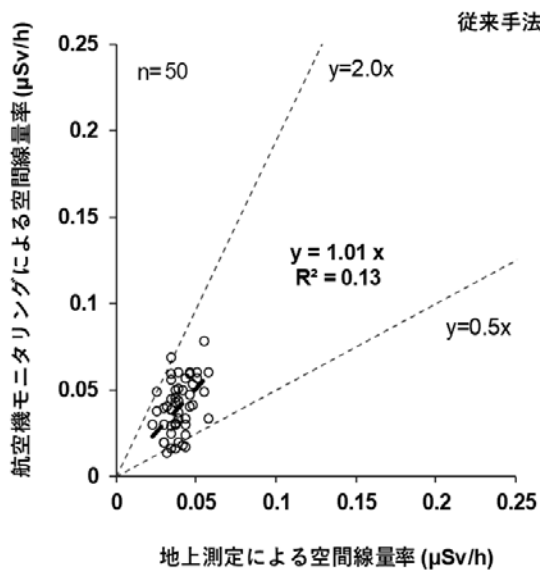


Fig. 4-41 従来法とラドン弁別手法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較 (東通・六ヶ所)

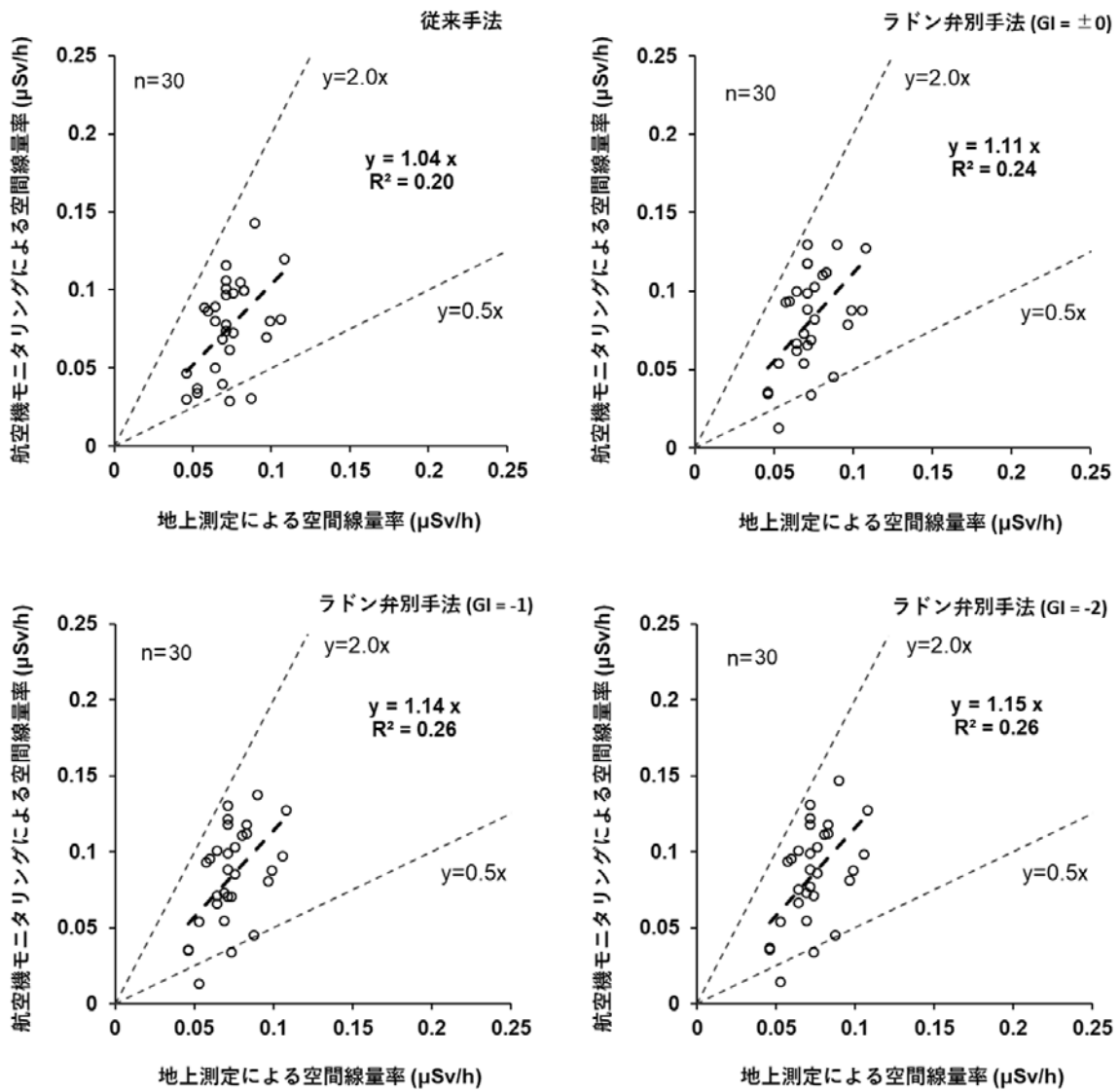


Fig. 4-42 従来法とラドン弁別手法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較 (志賀)



#### 4.6. 放射性セシウムの沈着量

東通・六ヶ所および志賀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. 4-43 に示す。このように、すべての地点において検出下限値未満となり、本測定エリアにおいて放射性セシウムは検出されなかった。なお、放射性セシウムの沈着量の計算手法については、福島原子力発電所周辺における航空機モニタリングと同様の手法<sup>12)</sup>に則った。

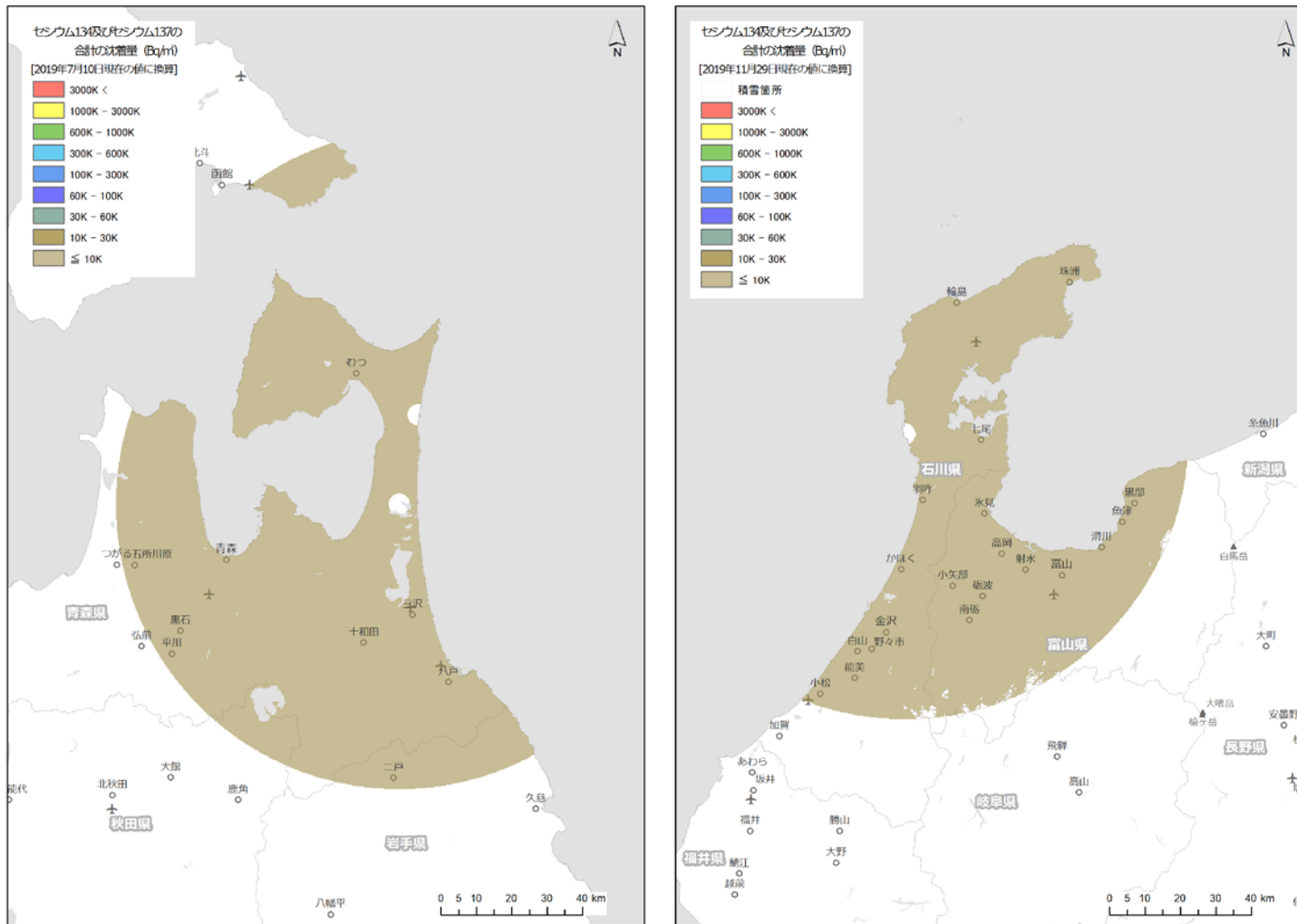


Fig. 4-43 放射性セシウム沈着量マップ

(左：東通・六ヶ所、右：志賀)

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

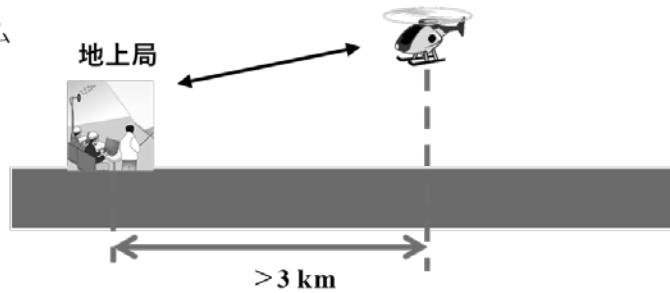
## 5. 無人飛行機による放射線モニタリングを想定した要素技術試験

### 5.1. 原子力災害時における無人機運用の課題

福島原子力発電所事故後、「原子力災害対策マニュアル<sup>14)</sup>」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 のため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<sup>18),19)</sup>。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<sup>46)</sup>。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のほか、住民の避難との干渉を防ぐことができ、モニタリングポストのような点での測定と比較して面的な放射線分布の評価が可能である。しかしながら、現状として、無人機によるモニタリング技術は原子力災害時にすぐ運用できる状況にはなく、上記の「原子力災害対策マニュアル」の枠組みを考慮し、活用シーンに合わせた要素技術開発が必要である。

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

- ★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

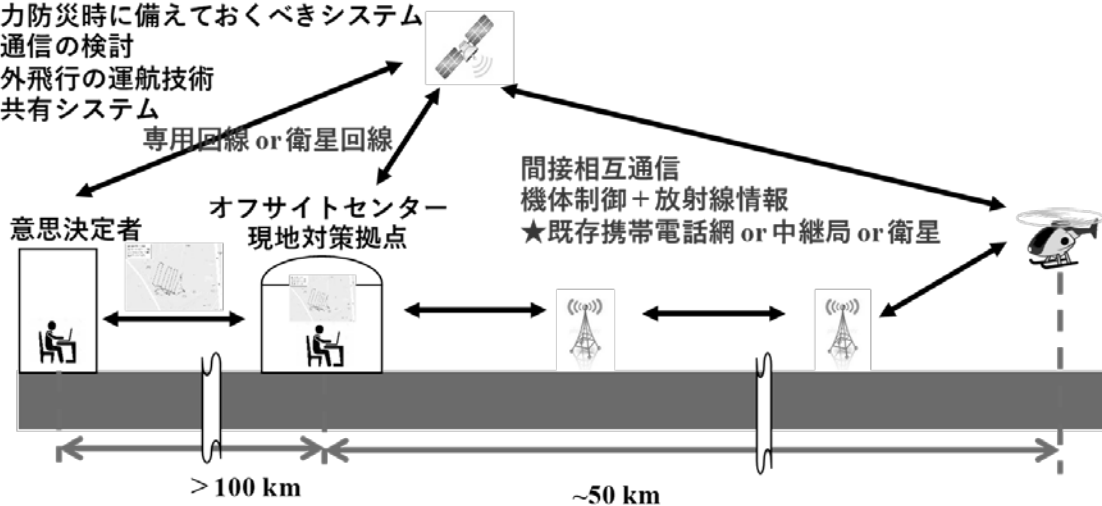


Fig. 5-1 既存の無人機によるシステムと原子力災害時に備えるべき無人機システムのイメージ

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

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

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

Fig. 5-2 原子力発電所事故を例にした対応シミュレーション

## 5.2. 無人機の開発状況

近年無人機の技術革新は目覚ましく、国内外で様々な製品が開発されている。原子力災害時に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飛行可能であること。プログラム飛行が可能であること。
- ⑤ 同機種によるフライトの実績が 100 時間を超え、墜落事故に対する平均故障間隔 (MTBF) が評価されていること。
- ⑥ 風速 10 m/s 以下でのフライトが可能であること。
- ⑦ 雨天時のフライトが可能であること。

これらの性能に近い国内外の代表的な無人機の例を Fig. 5-3 に示す。無人機の種類は、固定翼機 (飛行機タイプ) と回転翼機 (ヘリコプタータイプ) に分けられる。両タイプの一般的な利点・欠点は以下のとおりである。

### ・固定翼機

(利点) 燃費が良く航続時間が長い。

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

### ・回転翼機

(利点) ホバリングできるため、固定点での長時間測定等が可能。

(欠点) 固定翼機に比べると燃費が悪い。

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

原子力防災時における必要性能を最も満たす機種は、UAV Factory の Penguin C である。Penguin C は固定翼機であり、20 時間に渡り航続可能である。また、中東を中心とした国外に

数多くの納入実績を持ち、オプションとして衛星通信を使えることやカタパルト方式の離陸が可能な製品である。ただし、日本での運用実績がないことが課題である。

今回、国内外の無人航空機で最も我が国の原子力防災に適用可能な能力があると考えられる Penguin C について、実際に飛行試験などを通じて性能評価を試みるとともに、国内での運用の課題について抽出を行った。



名称	Penguin C	UARMS	Fazer R G2
開発メーカー (国)	UAV Factory Ltd. (ラトビア)	JAEA-JAXA開発中 (日本)	ヤマハ発動機社 (日本)
大きさ	3.3 m (翼長)	4 m (翼長)	4 m (ローター長)
離陸重量 (kg)	22.5	50	81
燃料	ガソリン	混合油	ガソリン
航続時間 (min)	<b>1,320</b>	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)	$\infty$ (衛星通信対応)	5 km (中継器を用いると20km)	$\infty$ (衛星通信対応)
最大積載量 (ペイロード:kg)	5	10	<b>35</b>

Fig. 5-3 代表的な無人機の概観とスペック

### 5.3. Penguin C のカタログ性能

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

- (1) 長時間 (20 時間以上) のフライトが可能であること。

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

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

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

(3) 離陸のための滑走路を要しないこと。

Penguin C は滑走路を必要とせず、持ち運び可能な空気式カタパルトから発射・離陸される。

(4) あらかじめ設定したプログラムにより飛行可能であること。

Cloud Cap Technology 製オートパイロット「Piccolo Command Center」で事前に作成したフライトプランにより飛行可能である。

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

Penguin C の通常のフライトおよびテストフライト実績はどちらも 1,000 時間を超え、UAV Factory 内で MTBF が評価されている。実際の数値については社外秘となっているが、評価の方法として事故の分類を Table 5-1 のようにし、運用の結果をデータベース化することで評価を行っている。

(6) 風速 10 m/s 以下でのフライトが可能であること。

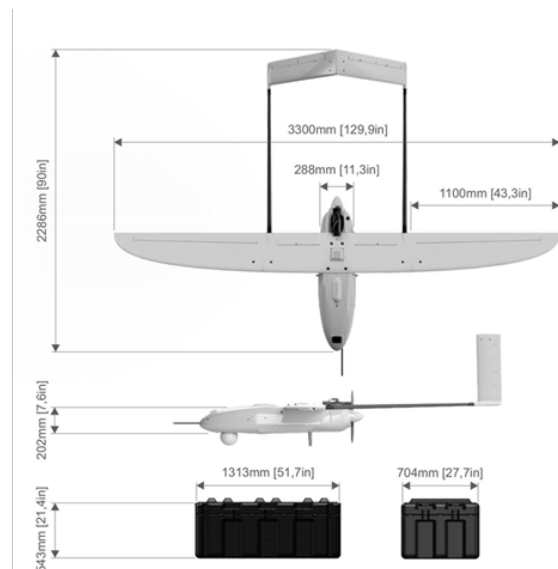
本機体の性能としては、フライト中の最大風速は 20 m/s、カタパルト発射時の向かい風は最大 10 m/s、パラシュート展開時の地表の突風は最大 8 m/s が限界値とされている。

(7) 雨天時のフライトが可能であること。

5 mm/h 程度の雨天時でもオペレーションは可能とされている。

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

アクシデント(偶然の事故) 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	インシデント(人為的な事故) MTBFの対象として分類されないもの
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 人的要因</li> <li>• 通信障害</li> <li>• エンジンの故障</li> <li>• パラシュートシステムの故障</li> <li>• フライト中のパーツの分離</li> <li>• <b>GPS 障害</b></li> <li>• ソフトウェアの故障</li> <li>• アビオニクス系の故障</li> <li>• 離陸に影響を及ぼすカタパルトの欠陥</li> <li>• 着陸エリア外での着陸</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• パラシュートリリースの欠陥</li> <li>• 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)</li> <li>• エアバッグの欠陥</li> <li>• ソフトウェアのクラッシュ                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- ソフトウェアの再起動で解決する場合</li> <li>- 墜落の原因とならないもの</li> </ul> </li> <li>• 不可抗力：制御不能な要因による損傷。 戦争、ストライキ、暴動、犯罪、落雷、 他の航空機との衝突など、当事者が制御 できない異常な出来事または状況が発生 した場合に両当事者の責任または義務を 根本的に免除するもの。</li> </ul>



**Fig. 5-4 Penguin C の概観**



**Table 5-2 Penguin C 機体のカタログスペック**

機体の仕様	
翼幅	3.3 m
最大離陸重量 (MTOW)	23 kg
ペイロード重量	最大 5 kg
飛行時間	20 時間以上
飛行距離	最大 100 km (トラッキングアンテナを使用した場合)
巡航速度	19 m/s～22 m/s
限界高度	4,500 m (15,000 ft) (平均海面)
離陸方式	完全自動・空気式カタパルト
最大離陸高度	3,000 m (10,000 ft) (海拔高度)
機体の回収	パラシュートおよびエアバッグ
動作温度	-25°C～+50°C
凍結防止機能	加熱式ピトー管
環境対応	雨天時のオペレーション可能 (1 時間の降水量 5 mm 程度まで)
エンジン仕様	
タイプ	燃料噴射式、28 cc エンジン
温度制御システム	フラップによる自動制御
燃料タイプ	オクタン価 98 ガソリン・オイル混合燃料
オイルタイプ	UAV Factory 製 2 ストロークエンジンオイル
燃料重量	5.0 kg
発電システム	100 W、オンボード発電システム
データリンク仕様	
周波数	2.4 GHz 帯または 5.7 GHz 帯
リンクレート	最大 12 Mbps

**Table 5-3 Penguin C 周辺機器のカタログスペック**

周辺機器	仕様	
フライトコントロールシステム	オートパイロット・タイプ	Cloud Cap Technology 製「Piccolo Command Center」および UAV Factory 製「CoPilot」
地上局 (GCS)	タイプ	携帯型 GCS、タッチスクリーン型 2 画面タイプ
アンテナ	タイプ	指向性・無指向性アンテナ自動切換式トラッキングアンテナ
カタパルト	タイプ	携帯型空気式カタパルト
	発射エネルギー	6,000 J

## 5.4. 機器単体性能試験

上記で確認したカタログスペックに対し、実際の性能を確認するために実機での機器単体試験を実施した。試験項目を以下に示す。

- ・ 地上局と機体のデータ通信が正常に行えるか。
- ・ 地上において 200 m 以上の離隔距離において地上局と機体のデータ通信が行えるか。
- ・ パラシュート・エアバックが地上の信号により作動するか。
- ・ 地上局からの操作信号により、ラダーやエルロンが滞なく行えるか。
- ・ エンジンの回転数が、地上からの信号により上昇下降が滞なく行えるか。
- ・ 異常時の警告が滞なく行えるか。
- ・ 機体が健全であることを確認する手順が整っているか。
- ・ 定期保守点検のための手順が整っているか。

以下、性能試験の結果について示す。なお、これらの試験は、UAV Factory の試験飛行場(ラトビア)で実施した。

### 5.4.1. 地上局と機体のデータ通信

Penguin C システムでは機体及びペイロード等のデータ通信・コントロール設定は地上局(GCS)を通じて行う (Fig. 5-5)。トラッキングアンテナの調整や状態確認も GCS のコンピューター上で行えるようになっている。GCS は外部入力電源を基本としつつ、バッテリーでも最大 2 時間稼働できる。2020 年 1 月に、地上において GCS と機体の距離を約 300 m 離れた状態でデータ通信が行えることを確認した。確認には Table 5-4 に一例を示したメーカー推奨のチェックシートを用いた。



Fig. 5-5 地上局の外観 (左) と通信試験風景 (右)

Table 5-4 データ通信試験チェックシート (一部)

No.	通信コマンド	作業内容	テクニシヤンのラジココマンド
40	RADIO CHECK	無線の通信状態をチェック	<i>LOUD AND CLEAR</i>
	LOUD AND CLEAR READY FOR PREFLIGHT CHECKLIST UAV ASSEMBLY CHECK	無線の通信状態を報告	<i>READY</i>
40		GCS のスイッチを入れる： ①タブブック、②スイッチ、③通信ケーブル 通信ケーブルが全て GCS に接続されていることを確認	<i>WILL COMPLY</i>
		GCS の外部電源が接続され、LED が緑色に点灯しているか確認 GCS の「DC」電圧が 10 V～32 V の範囲にあるか確認 バッテリー2 本とも装備され、完全に充電されているか確認 (90 %～100 %) Piccolo Command Center (PCC) の電源を入れ [Direct serial]を選択 正しい COM ポートを選択 ボーレートが 57,600 になっているか確認 [Enable Server]がチェックされているか確認 [OK]をクリック [File]→[Display Settings]→[General]を開き [Terrain Warning]の値を入力： [Severe Threshold] : 100 [Warn Threshold] : 110 [Display Settings]→[General]メニューから [Apply]、[OK]をクリック	<i>PITOT FLAG ON</i>  <i>BOLTS TIGHTENED PARACHUTE SAFETY PIN IN</i>  <i>IGNITION OFF</i>  <i>POWER OFF</i>
50		(トラッキングアンテナを使用する場合)	<i>UAV READY</i>
	READY FOR TRACKING ANTENNA CHECKLIST	トラッキングアンテナのオペレーションチェックの準備  トラッキングアンテナのチェックリストを実施	<i>READY</i>

#### 5.4.2. 機体の操縦およびエアバック・パラシュート展開操作

機体の操縦には Cloud Cap Technology 製「Piccolo Command Center (PCC)」および UAV Factory 製「CoPilot」の 2 つのオートパイロットシステムが採用されている。離陸から着陸まで自動飛行だが、一部の機能については地上からの信号により操作できるようになっている。Penguin C の操縦面としてはエルロンとラダーペーダがあるが、フライト中はどちらも自動制御されており地上からの信号では操作できない。ただし、フライト前チェックリストで操縦面の位置およびサーボチェックを行う際に CoPilot で操縦機能の確認ができる。チェックリストではオペレーターが CoPilot を操作し、テクニシヤンが機体を観察または実際に手で触れて操

縦面の位置と動きを確認し、無線で報告する。

着陸時のパラシュートとエアバッグの展開は基本的に自動で行われるが、緊急時に限りマニュアルでの展開も可能である。CoPilot ソフトに緊急用の「CHUTE DEPLOY」ボタンがあり、このボタンを押すとパラシュートとエアバッグが展開する (Fig. 5-6)。なお、通常は CoPilot で作成した着陸ポイントに機体を送り出して着陸開始ボタンを押すと、事前に設定したパラシュート展開ポイントで自動的にパラシュートとエアバッグが展開する。



Fig. 5-6 CoPilot の「CHUTE DEPLOY」ボタン

#### 5.4.3. エンジン回転数の調整

フライト中はエンジン回転数 (RPM) が自動制御されているが、エンジンのグラウンド・ランやフライト前のエンジンテストでは CoPilot 上でスロットルを手動モードに切り替え、スロットルバーを移動させれば RPM を上昇・下降できる (Fig. 5-7)。

エンジンテストでは RPM が 3,000 前後になるようアイドルングさせ、回転数に大きな変動がないことを確かめてからスロットルを全開にし、RPM が 5,900~7,000 程度まで上がった後再びアイドルングに戻す作業を数回繰り返す。このテストはエンジンがスムーズに加速するか、シリンダーヘッド温度が限界値を超えていないか確認するもので、フライト前に異常の有無を検出できる。

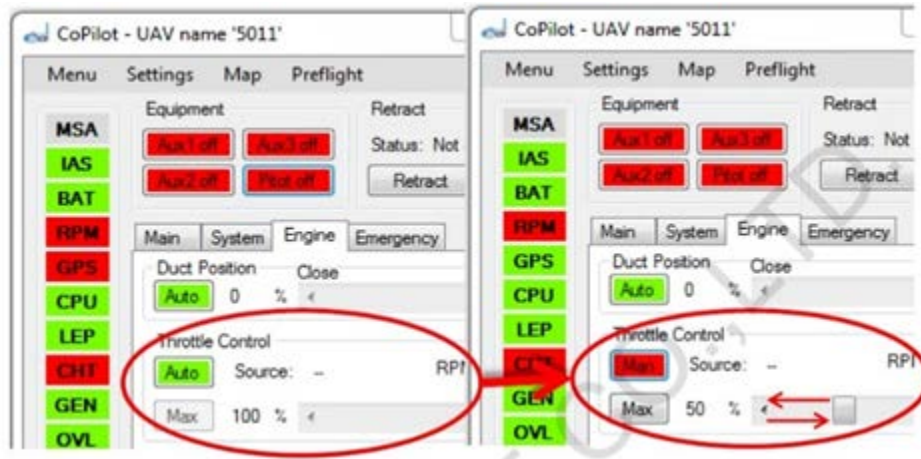


Fig. 5-7 CoPilot でエンジンのスロットルを自動モードから手動モードに切り替える手順

#### 5.4.4. 異常時の警告

CoPilot のトップ画面にはフライトオペレーションに特に重要なインジケータ一覧が表示されており、異常時は該当するインジケータの色が緑から赤に変わり、警告音が発するようになっている。インジケータを右クリックすると警告と緊急対応の内容が表示される。Fig. 5-8 に異常警告時の画面について示す。警告インジケータの内容を Table 5-5 に示す。また、CoPilot には RPM、シリンダーヘッド温度、燃料レベル、各サーボの電流などの状態がリアルタイムで表示される 3 つのタブがある。各項目の 3 色インジケータ (赤・黄・緑) でオペレーションが許容範囲にあるか視覚的に確認できるため、異常時も正確に対応判断ができる。

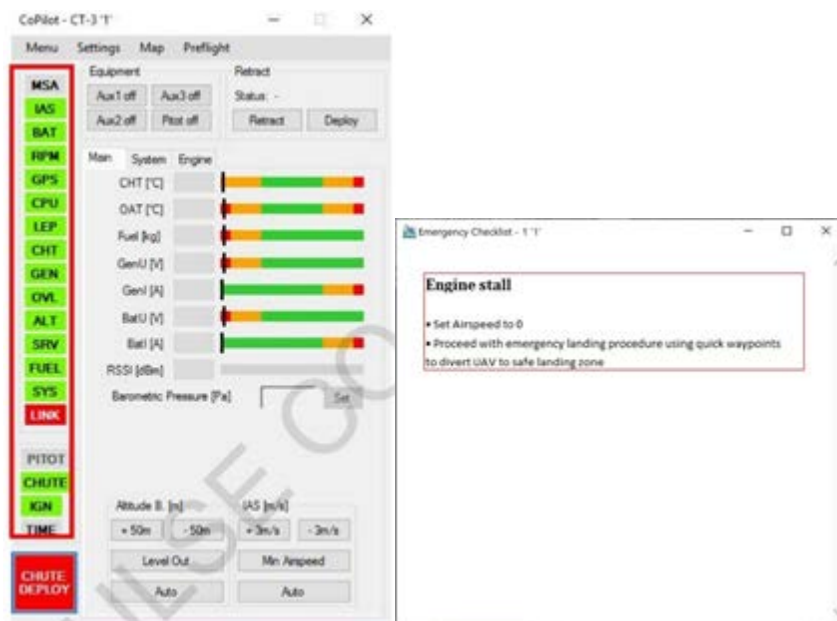


Fig. 5-8 Copilot のインジケータと警告画面

Table 5-5 Copilot の警告インジケータ内容

項目	警告内容 (インジケータが赤い場合)
MSA	最低高度を下回っている
IAS	指示対気速度が限界値を下回っている
BAT	バッテリーの電圧が限界値を下回っている
RPM	RPM が限界値を下回っている (エンスト)
GPS	GPS 接続が切断
CPU	CPU が過負荷 (オーバーロード) 状態にある
LEP	エンジン出力が限界値を下回っている
CHT	シリンダーヘッド温度が限界範囲を超えている
GEN	ジェネレータの電圧が限界値を下回っている
OVL	ジェネレータが過負荷 (オーバーロード) 状態にある
ALT	高度が限界範囲を超えている サーボの過電流
SRV	(左右エルロン、左右ラダーベータ、ダクト、スロットル、パラシュート、エアバッグ、パラシュートカバーの各電流)
FUEL	燃料レベルが限界値を下回っている マザーボードに SD カードが挿入されていない ECU (エンジンコントロールユニット) に SD カードが挿入されていない
SYS	エンジン稼働時間が限界値を超えている オートパイロットがストリーミングしていない ECU の温度が限界値を超えている
LINK	受信強度が限界値を下回っている
PITOT	ピトー管機能が無効 (ピトー管ヒーターの故障)
CHUTE	パラシュート未展開
IGN	点火機能が無効
TIME	リマインダーメッセージの表示

#### 5.4.5. 機体の健全性チェック

機体を安全にオペレーションするため、Penguin C システムではマニュアルとチェックリストの活用が徹底されている。特に、フライトオペレーションの際はオペレーターとテクニシャンの2名体制で複数のチェックリストを読み上げ、機体および関連システムの健全性を確認することが義務付けられている。

本拠地 (ベース) ではミッションを策定した後にチェックリストに従って機体部品・関連機器・工具の員数と状態を確認し、フライト準備を行う。フィールドベースではマニュアルに沿って機体・カタパルト・トラッキングアンテナを組み立て、チェックリストを読み上げながら機能・性能チェックを行う。フライト後もチェックリストで機体の回収や状態の確認、メンテナンスの決定を行う。このように、ミッション準備段階からメンテナンスに至るまで、マニュアル及びチェックリストに従って機体の健全性を確認する手順が整っている。Fig. 5-9 にチェックリストシステムのフローチャートを示す。

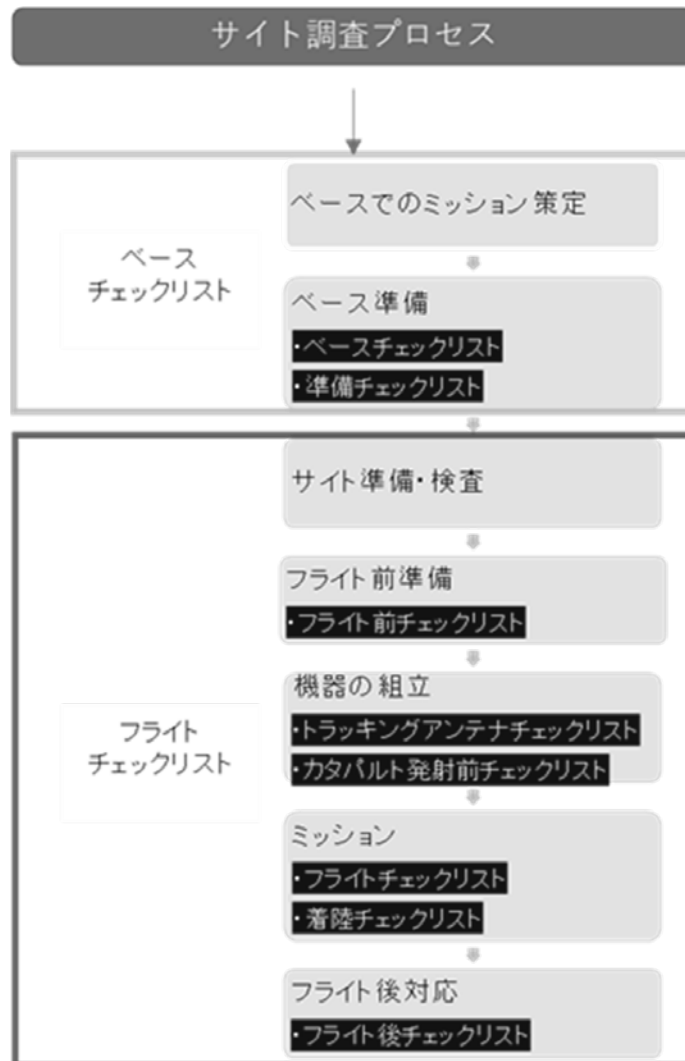


Fig. 5-9 チェックリストシステムのフローチャート

#### 5.4.6. 保守点検

Penguin C の機体および関連機器の定期保守点検は「Penguin C メンテナンスマニュアル」(別添) に従って行われる。UAV Factory は Penguin C の運用者に対し、5 回のフライトごとに機体・機器の全般的な点検を行うよう義務付けている。前述の通り、機体および関連システムの状態はフライトの前後で確認することとなっており、欠陥・損傷があればその都度技術ログまたはエンジンログブックに記録した上で補修・交換する。上記のマニュアルには損傷部分の大きさや状態に応じた補修・交換方法が明記されている。エンジンについては作動時間ごとに部品の点検・交換・オーバーホールが定められている (Table 5-6)。作業時間が 300 時間 (オーバーホール) に達したらフルメンテナンスのため UAV Factory に送り返すこととなっている。

Table 5-6 エンジンのメンテナンススケジュール

確認・作業	エンジン作動時間 (hours)						
	50	100	150	200	250	300	
グラウンド・ラン	メンテナンスプロセス後毎回						
エンジン圧縮テスト	○	○	○	○	○		
スパークプラグの交換	○	○	○	○	○		
点火システムの点検	○	○	○	○	○		
エアフィルターの点検・掃除	○	-	○	-	○		
エアフィルターの掃除*	-	○	-	○	-	エンジン オーバー ホール	
粗目燃料フィルターの点検*	-	○	-	○	-		
燃料管と燃料タンクの点検	○	○	○	○	○		
マフラーアセンブリの掃除	-	○	-	○	-		
ピストンアセンブリ及びシリンダーの点検	-	○	-	○	-		
ジェネレーターアセンブリの点検	○	○	○	○	○		
ワイヤーの点検	○	○	○	○	○		
スロットルサーボ及びリンケージの点検	○	○	○	○	○		
温度調整ダクト、サーボ及びリンケージの点検	○	○	○	○	○		
エンジン取り付け部品、ネジ、ナットの点検	○	○	○	○	○		
プロペラアセンブリの点検	フライト前後に毎回						

## 5.5. フライト試験

### 5.5.1. フライト試験概要

2019年10月および2020年1月にフライト中の機体データ取得のための試験を下記の要領に従い実施した。

- ・ 飛行試験を上記の期間中において10回以上実施すること。
- ・ 1回のフライト時間は1時間を目安とすること。
- ・ 期間中1回6時間以上の長時間フライトを実施すること。
- ・ フライト中の位置情報、機体の操縦記録およびエンジンの回転数等のデータを保存すること。
- ・ 飛行試験時における気象条件について記録すること。
- ・ 夜間でのフライトするための機能の確認を実施すること。
- ・ 飛行期間中、雨天時のフライトデータを1回以上取得すること。



### 5.5.2. 空域と試験概要

フライト試験を行ったラトビア中部 Zalenieki (ザレニエキ) の空域「EVR15」は無人航空機の飛行用に UAV Factory が利用申請を行っている。2019年10月および2020年の1月のフライト試験についても UAV Factory が航空法・電波法等に則って必要な申請を行った。2019年10月に計3回、2020年1月に計10回、全体で13回にわたり合計24時間25分のフライト試験を行った。このうち、1時間以上のフライトは10回実施した。また、2020年1月6日に7時間1分の長時間フライト、2020年1月6日、8日および10日に雨天時のフライトを計4回実施した。これらフライト試験の条件について Table 5-7 に示す。

### 5.5.3. フライト試験中に取得できるデータ

フライト試験中に取得できるデータの例として、2019年10月23日に実施したフライトにおいて取得したデータを示す。当該フライト時の条件を Table 5-7 (飛行番号: FU0001) に、フライト時の軌跡について Fig. 5-10 に示す。また、同フライト時で取得した機体位置データログ、機体姿勢データログ、エンジン関連データログ、操縦舵面データログおよび機体システムデータログを Fig. 5-11～Fig. 5-15 に示す。

## 5.6. 原子力防災への適用について

今回の試験結果から、原子力災害時に求められる以下の性能・条件について、Penguin C でフライトが可能であるか検討できる情報が集約できた。各項目について以下に示す。

(1) 事故発生から1時間以内に離陸が可能であること。

Penguin C システムの熟練オペレーターおよびテクニシャンであれば、フィールドベースに到着後1時間以内にPenguin Cの組み立てと点検を終え、離陸させることができる。実際、本件調査作業中に本邦から派遣された UAV 運用経験者がフライト準備訓練を繰り返したところ、最短55分で離陸させられることを確認した。

日本で実際に運用を行う際は、運用者が定期的にテストフライト等を行い非常時に備えることが重要である。また、長距離フライトの場合はトラッキングアンテナを常備し、組立て済みのカタパルトと機体・部品等を保管しておけるようなフィールドベースがあることが望ましい。

(2) 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。

Penguin C はオートパイロットソフト PCC で作成したフライトプランに沿って運航し、フライト中の機体の位置情報は PCC のマップ上で、ステータス情報は CoPilot の各インジケータでリアルタイムに監視できる。ミッションプランの変更があった際はフライト中でもルートや高度等の変更が可能である。

(3) OIL が設定された後、少なくとも30 km 以遠からのデータ通信が可能であること。

UAV Factory は過去に63 kmの距離からデータ通信を行った実績がある(2019年8月18日

付ビデオファイル別添。メキシコ・メヒコ州ウエイポストラ村～イダルゴ州シングイルカン村周辺までを飛行したもの)。日本国内においてもトラッキングアンテナを装備し、適当な離陸・着陸ポイントが確保できれば 30 km 以遠からのデータ通信は理論上可能である。

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

Penguin C に推奨されるジンバルカメラ Epsilon シリーズには赤外線センサーが内蔵されている。Penguin C には 5 kg までのペイロードを搭載できるため、同様の赤外線カメラ等を装備すれば夜間のフライトでも機体の位置や状態がより正確に把握できる。

また、Penguin C の左右のウィング下面に白い LED ライトがデフォルトで取り付けられているが、これらを夜間フライト用に色のついた航空灯に付け替えることも可能である。

(5) 国内での規定基準類に準拠していること。

後述するとおり、Penguin C で使用されるデータリンクのモデムは日本の技術基準適合証明を受けており、適当な免許申請を行うことで国内での利用が可能である。

また、カタパルトについても、性能自体は高圧ガス保安法の定義する「高圧ガス」に該当するが、圧縮装置の構造が同法の適用外と考えられるため、日本での運用が可能である。

(6) 少人数(2、3名)での運用が可能であること。

Penguin C の機体および関連システムは専用の輸送ケースに入れてミニバンで運搬可能であり、組み立て・点検・フライト・回収作業はすべてオペレーターとテクニシャンの 2 名体制で行えるようになっている。ただし、大規模災害時に実際に運用する際は時間短縮のため 2 名以上で作業にあたることを望ましいと考えられる。

## 5.7. 今後のスケジュール

今後の想定しているスケジュールについて Table 5-8 に示す。今後、国内での運用経験を蓄積し、防災時の適用についてハード面および運用面でのスキル向上に取り組むことが望ましい。

Table 5-7 各フライト試験の条件一覧

飛行番号	日付	出発		到着		燃料消費率					燃料		離陸時の天気情報						
		場所	時刻	場所	時刻	①飛行時間	②離陸重量 (kgw)	③着陸重量 (kgw)	④=②-③ (kgw)	⑤=④/①*24 (kg/hour)	離陸燃料 (kg)	着陸燃料 (kg)	水平見通距離 (m)	地上平均風速 (m/s)	地上最大風速 (m/s)	地上風向き (deg.Mag)	降水量 (mm)	外気温 (°C)	QNH (hPa)
FU0001	2019/10/23	EVR15	16:42	EVR15	17:32	0:50	18.60	18.42	0.18	0.22	1.60	1.42	5000	4.5	5.0	245	0.0	13.0	1020
FU0002	2019/10/24	EVR15	15:18	EVR15	16:19	1:01	18.20	17.82	0.38	0.37	1.40	1.02	5000	3.0	4.0	175	0.0	13.0	1019
FU0003	2019/10/25	EVR15	14:29	EVR15	16:14	1:45	18.10	17.49	0.61	0.35	1.20	0.59	3000	3.0	4.0	200	0.0	11.0	1017
FU0004	2020/1/6	EVR15	9:27	EVR15	16:28	7:01	20.70	18.32	2.38	0.34	3.40	1.02	1000	6.3	6.6	206	0.1	1.5	1020
FU0005	2020/1/8	EVR15	14:36	EVR15	15:44	1:08	18.70	18.20	0.50	0.44	2.05	1.55	1000	7.2	7.9	214	0.4	3.9	1013
FU0006	2020/1/9	EVR15	14:11	EVR15	15:38	1:27	18.67	18.13	0.54	0.37	2.10	1.56	5000	5.0	5.6	245	0.0	5.0	1016
FU0007	2020/1/10	EVR15	11:57	EVR15	13:05	1:08	19.20	18.75	0.45	0.40	2.61	2.16	1000	2.1	2.6	170	0.6	4.2	1010
FU0008	2020/1/10	EVR15	15:29	EVR15	15:45	0:16	18.90	18.77	0.13	0.49	2.31	2.18	1000	2.8	3.1	227	0.6	7.2	1009
FU0009	2020/1/13	EVR15	11:24	EVR15	13:11	1:47	18.60	17.97	0.63	0.35	2.01	1.38	5000	3.5	3.9	223	0.0	5.7	1014
FU0010	2020/1/13	EVR15	15:33	EVR15	16:00	0:27	18.15	17.96	0.19	0.42	1.56	1.37	5000	4.0	4.6	249	0.0	5.0	1014
FU0011	2020/1/14	EVR15	10:45	EVR15	14:42	3:57	21.52	19.76	1.76	0.45	3.52	1.76	3000	5.0	6.0	180	0.0	2.0	1017
FU0012	2020/1/16	EVR15	11:19	EVR15	13:22	2:03	17.60	16.94	0.66	0.32	1.00	0.34	5000	6.0	10.0	280	0.0	7.0	1006
FU0013	2020/1/17	EVR15	11:41	EVR15	13:16	1:35	18.72	18.17	0.55	0.35	2.05	1.50	5000	6.0	6.6	218	0.0	5.0	1028
Total Flight Time(hours)						24.4													



Fig. 5-10 フライト試験中の飛行経路 (2019年10月23日実施)

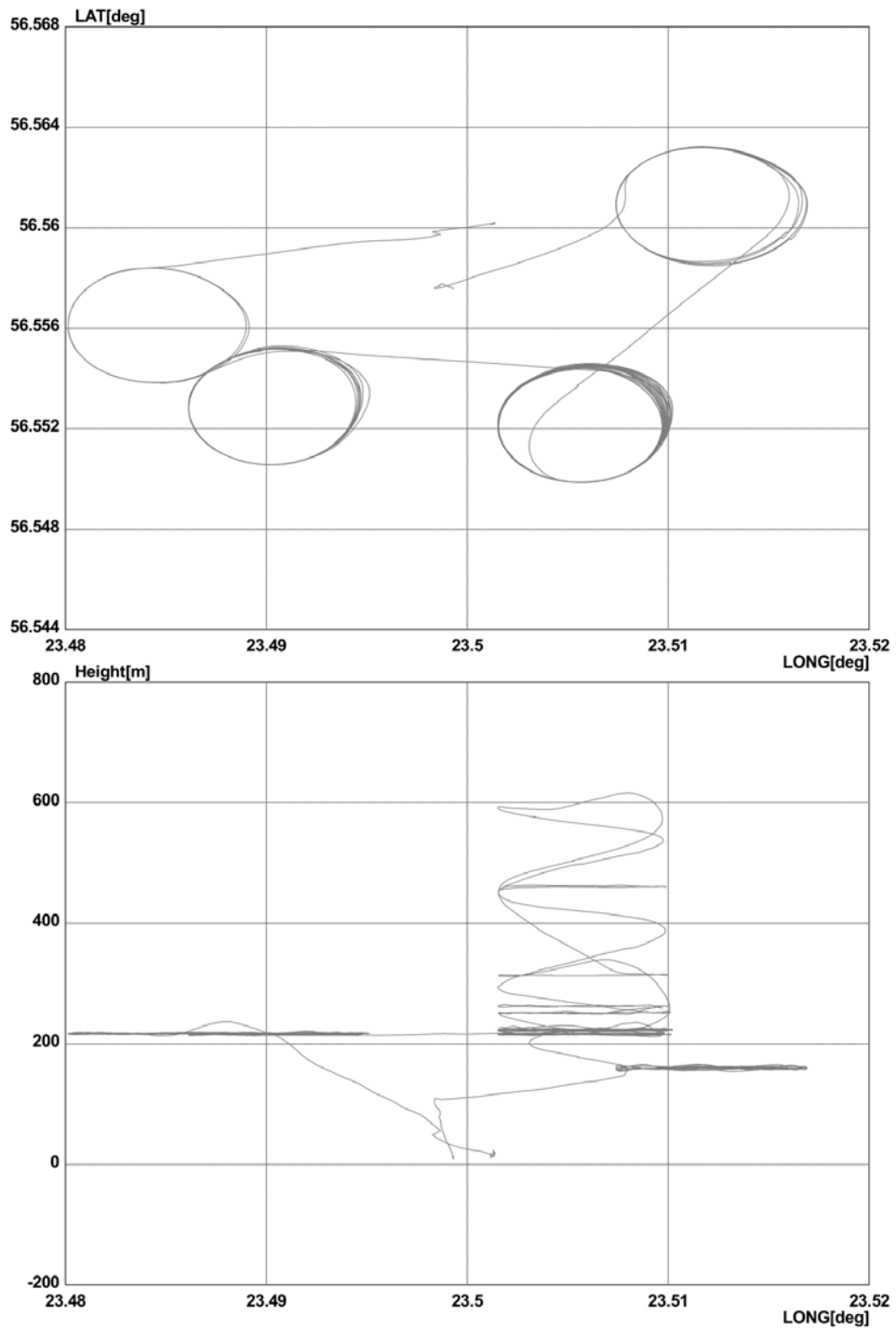
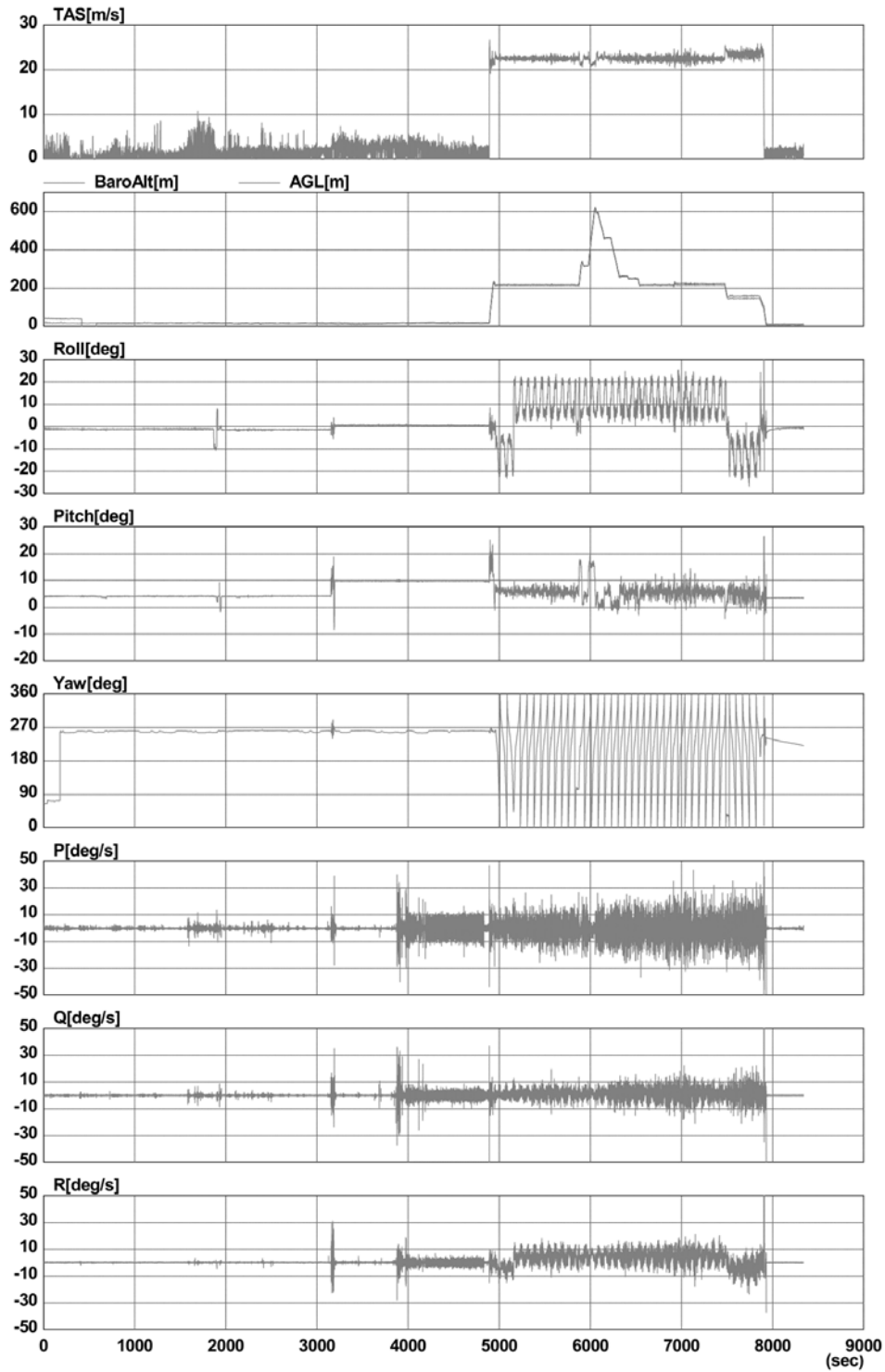
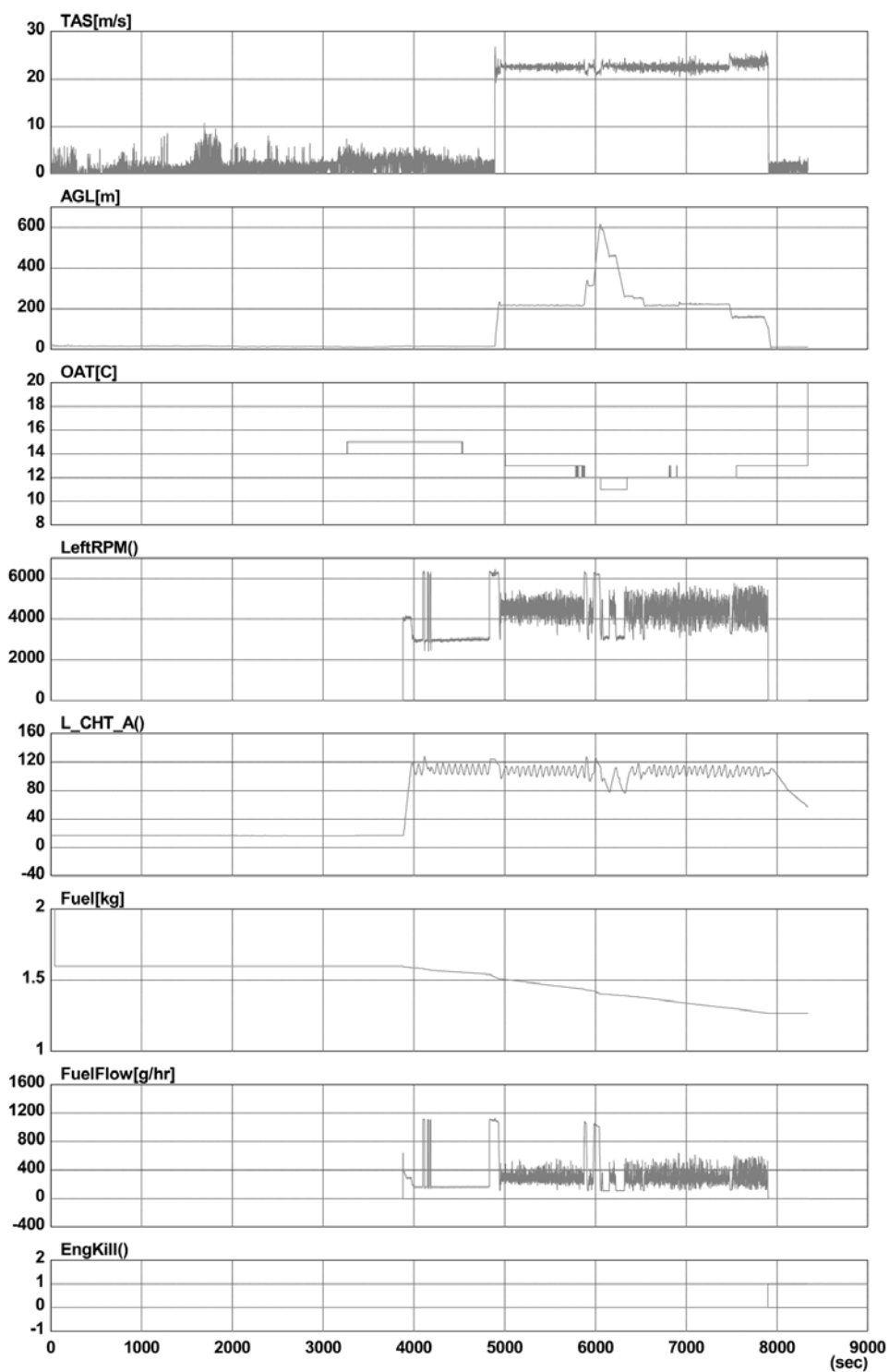


Fig. 5-11 フライト試験中の機体位置データログ (2019年10月23日実施)



[Piccolo 8243 Wed Oct 23 14-43-49 2019pd,dhs] Start: 00:00:00 End: 02:18:59 [202001/24 16:20:36]

Fig. 5-12 フライト試験中の機体姿勢データログ (2019年10月23日実施)



[Piccolo 8243 Wed Oct 23 14-43-49 2019pd.dhs] Start: 00:00:00 End: 02:18:59 [202001/24 16:19:34]

Fig. 5-13 フライト試験中のエンジン関連データログ (2019年10月23日実施)

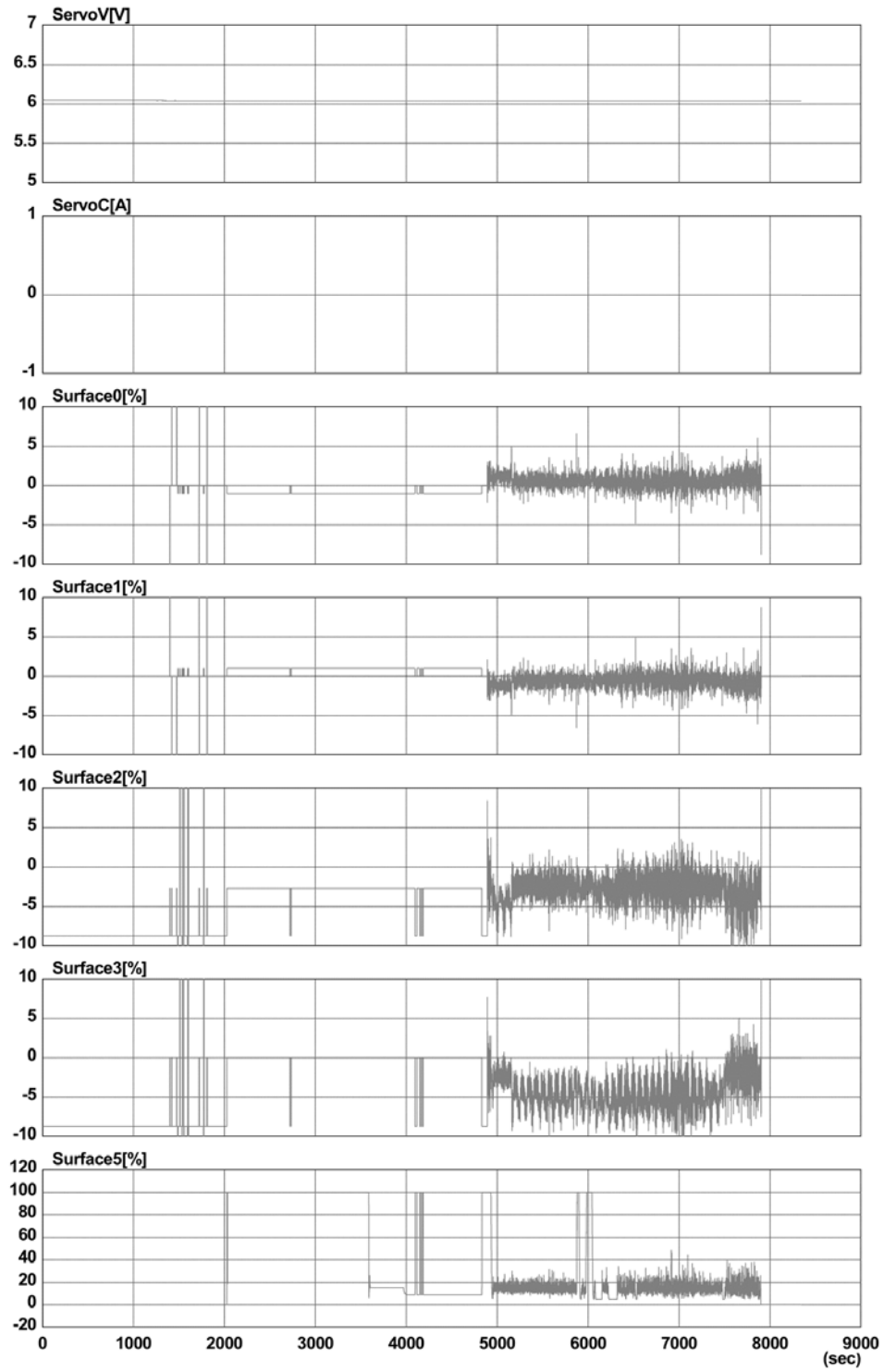
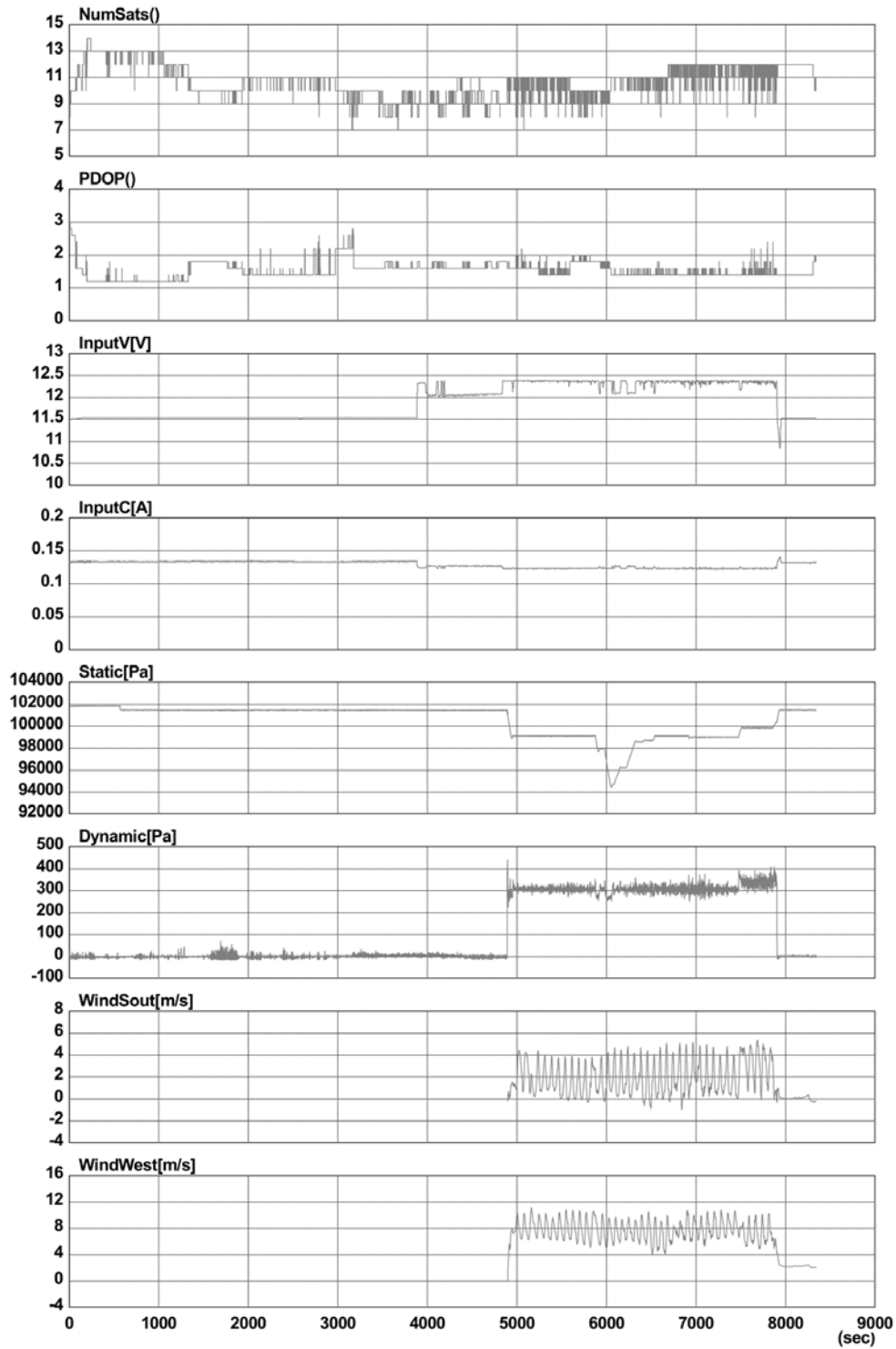


Fig. 5-14 フライト試験中の操縦舵面データログ (2019年10月23日実施)



Piccolo 8243 Wed Oct 23 14-43-49 2019



[Piccolo 8243 Wed Oct 23 14-43-49 2019pd.dhs] Start: 00:00:00 End: 02:18:59 [202001/24 16:17:44]

Fig. 5-15 フライト試験中の機体システムデータログ (2019年10月23日実施)

Table 5-8 今後の無人機開発スケジュール

項目	2019年度 (令和元年度)	2020年度 (令和2年度)	2021年度 (令和3年度)	2022年度 (令和4年度)	2023年度 (令和5年度)
運用手法の 確立・最適化	製造元での フライト試験	国内フライト試験 および手順策定  ☆国内への輸入	慣熟飛行試験	慣熟飛行試験	慣熟飛行試験
地表面測定 のためのパラ メータ取得		検出器製作	福島での パラメータ取得	発電所立地地域で のパラメータ取得	発電所立地地域で のパラメータ取得
原子力災害時 における運用 手法の検討			夜間フライトの 検討	夜間フライトの 模擬試験	リアルタイム換算 システムの統合  模擬試験実施
プルーム トラッキング の手法開発			プルーム測定用飛 行計画プログラム 最適化	模擬フライト試験	模擬フライト試験

## 6. まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理

本報告で得られた成果を以下にまとめる。

### ・測定結果について

東通原子力発電所並びに六ヶ所再処理工場および志賀原子力発電所について、3 km～80 km 圏における天然核種由来の空間線量率および核種別濃度マップを作成した。作成したマップの信頼性については、地上の測定データや他機関から公開されているマップ等と比較することで確認を行った。

### ・測定の日程について

測線は 5 km 間隔で東西方向に設定した。測定の期間は、東通原子力発電所並びに六ヶ所再処理工場が 2019 年 6 月 26 日～7 月 10 日 (のべ 22 フライト) の 15 日間、志賀原子力発電所では、2019 年 11 月 21 日～11 月 29 日 (のべ 15 フライト) の 9 日間を要した。

### ・解析手法について

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

### ・RSI システムの保守方法について

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

### ・測定エリアの管制区域および気候に関する特徴について

Fig. 6-1 に東通原子力発電所 (P1) 並びに六ヶ所再処理工場 (P2) から半径 80 km 圏内 (以下、東通・六ヶ所測定エリア) における管制区域に係る情報を示す。東通・六ヶ所測定エリア北部には函館空港 (A1) があり民間訓練空域 (C1) が隣接しており、中央部には大湊空港 (A2)、青森空港 (A3) が存在している。三沢基地 (A4) は航空自衛隊と米軍の共用飛行場であり、海上保安庁の航空基地も置かれている。六ヶ所再処理工場近辺には自衛隊の訓練エリア (六ヶ所対空射場: B1、三沢対地訓練区域: B2)、そして南部には八戸基地 (A5) が存在している。以上の管制区域内を通るフライトを実施する前に関係各機関に連絡をし、飛行内容を伝える等の事前調整が必要となる。東通・六ヶ所測定エリアの大部分を占める青森県は日本海、津軽海峡および太平洋により三方が海に囲まれている。中央部には奥羽山脈が縦走しており、その北端部にあたる八甲田山系から夏泊半島、下北半島西部に至る中央山地を境にして東西に二分されている。東通・六ヶ所測定エリアにおいて、八甲田山や恐山等の山間部、下北半島や亀田半島等の半島部で尾根と谷が連続しており、更に送電線や風力発電施設等の人工物が点在していることから、ヘリコプターの高度の上げ下げには十分に注意する必要がある。上記したように海域や地形が複雑なことから、東通・六ヶ所測定エリア内で気候が大きく異なる。例えば、夏季においては太平洋側を中心として冷たく湿った偏東風 (ヤマセ) が吹き、低温・多湿な日が多くなり濃霧が発生しやすい。そのため、有視界飛行のヘリコプターを運航する際には注意を要する。冬季においては冷たく湿った空気が奥羽山脈にぶつかり、津軽地方に雪を降らせる一方で、太平洋側には乾いた風が吹くことで乾燥して晴天な日が多くなる。

Fig. 6-2に志賀原子力発電所(P1)から半径80 km圏内(以下、志賀測定エリア)における管制区域に係る情報を示す。志賀測定エリア北部には能登空港(A1)、中央部には富山空港(A2)、南西部に小松空港(A3)および南東部の広範囲に渡り自衛隊訓練エリア(B1)があり、当該エリアを通過するフライトを実施する前には、関係各機関に連絡をし、飛行内容を伝える等して事前調整を行う必要がある。志賀測定エリアの大部分を占める石川県は日本海岸気候区に分類されるが、気象に地域差があり、気温が低く多雨・豪雪の加賀山岳地帯、温和な気候の加賀平野および日本海の影響を強く受ける能登半島に大別される。特に加賀山間部は冬季において、北西からの季節風により気温が低くなり、雪の降る日が多く、平野部にも積雪が見られる。更に、年間雷日数が日本で一番多く、特に冬季に雷が多く観測されることからヘリコプターの運航には注意を要する。富山県は石川県と同様に日本海岸気候区に分類され、冬季であっても山間部の積雪地帯で冷やされた空気が流出することにより南寄りの風が多く見られる。志賀測定エリアにおいて標高3,000 mに及ぶ高い山脈はないが、山地から海岸線までの距離が短いため、ヘリコプターの高度の上げ下げには十分注意する必要がある。

・原子力防災における無人飛行機の運用について

有人ヘリコプターを用いた航空機モニタリングの代替技術として期待されている無人飛行機の、原子力災害を想定した運用技術開発に今年度より着手した。初年度は無人飛行機の選定および仕様確認のためのフライト試験を実施した。原子力災害時における緊急時モニタリングを想定した場合、無人飛行機に最低限求められるスペックは5.2節に示した①～⑦であり、これらを最も満たす機種はUAV Factory(ラトビア)のPenguin Cであった。当該機種について、実際にUAV Factoryの試験飛行場における様々な環境条件下での飛行試験等を通じて性能評価を実施した結果、上記のスペックに加え、5.6節に示した運用上の理想的な条件(1)～(7)を満たすことを確認できた。Penguin Cを我が国の原子力防災に活かすために、国内における運用経験の蓄積、当該機種に適した放射線検出器の製作、空中で取得したデータを地表面から1 mの高さの空間線量率に換算するためのパラメータ等取得、測定データをリアルタイムに共有するためのシステム構築等に、今後取り組んでいく必要がある。

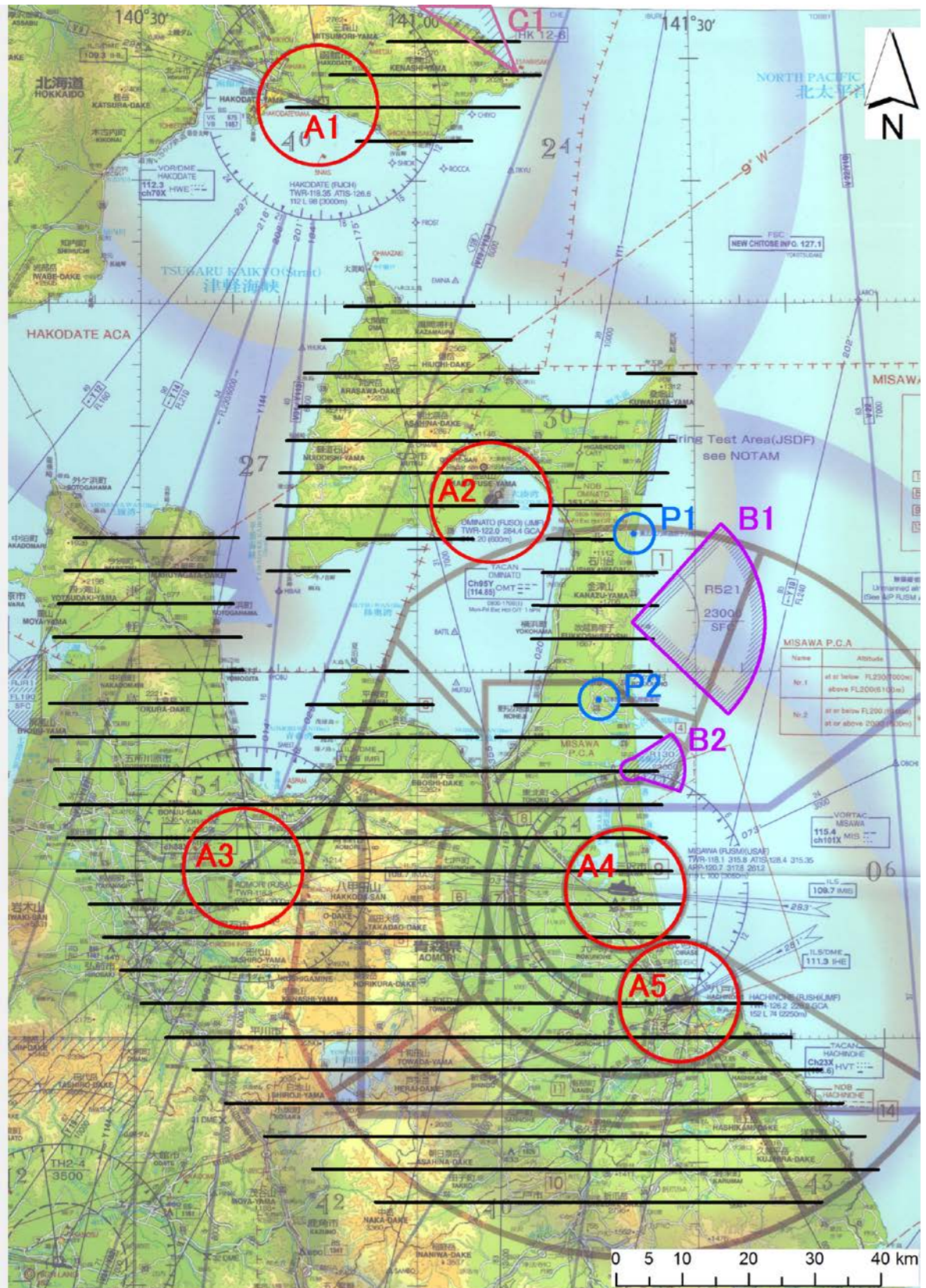


Fig. 6-1 管制区域に係る情報(東通・六ヶ所)

A: 空港・飛行場、B: 自衛隊訓練エリア、C: 民間訓練エリア、P: 原子力施設

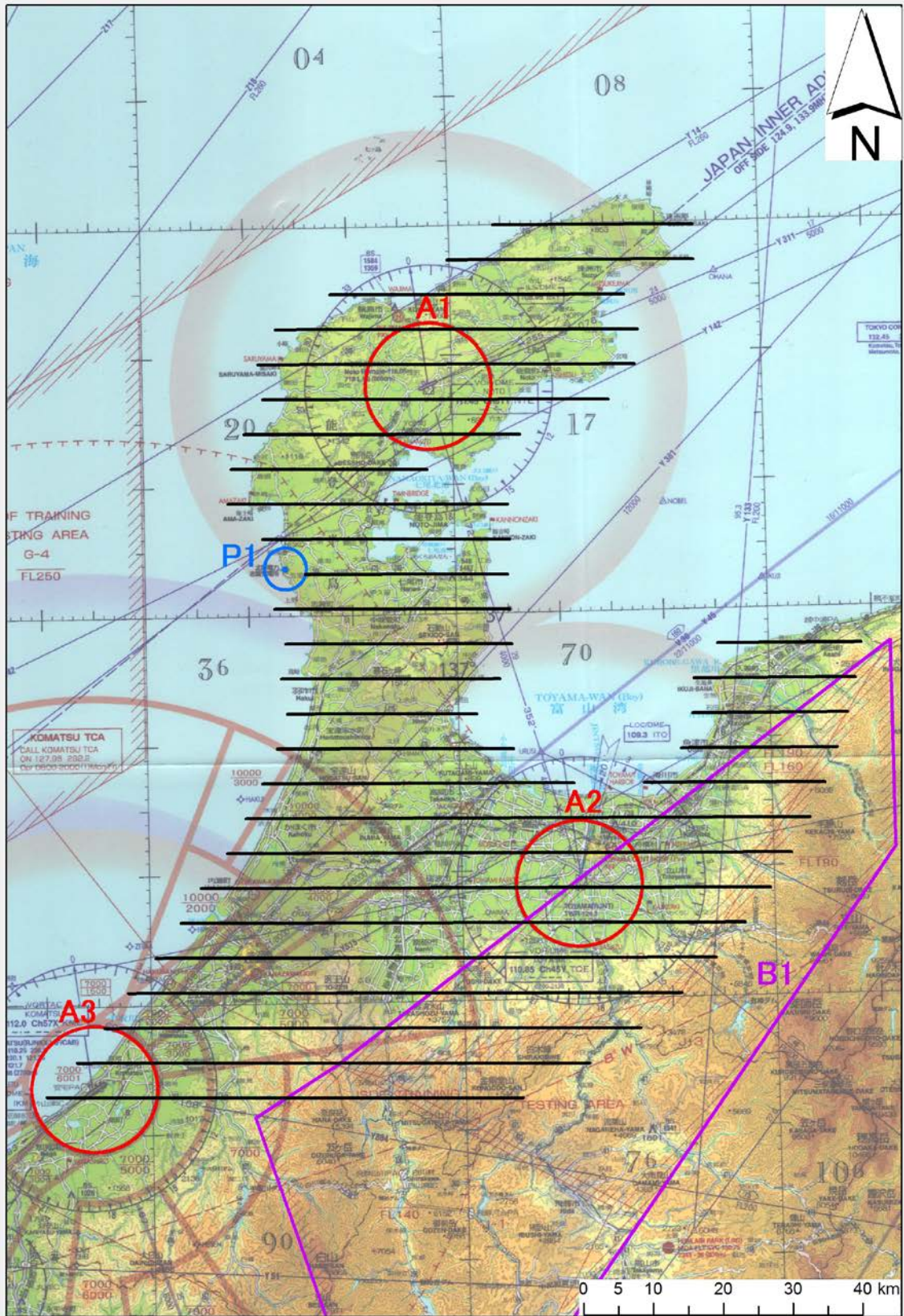


Fig. 6-2 管制区域に係る情報 (志賀)

A: 空港・航空基地、B: 自衛隊訓練エリア、P: 原子力施設

## 謝辞

本調査研究は、原子力規制庁による「平成 31 年度原子力施設等防災対策等委託費 (航空機モニタリング運用技術の確立等) 事業」の成果をとりまとめたものである。原子力機構、応用地質 (株)、(株) エイ・プローブの 30 余名が、航空機に搭乗しての測定、地上での空間線量率測定、さらにデータ解析とそのマップ化に取り組んだ。航空機の運航は、朝日航洋 (株)、中日本航空 (株) が行った。ここに本モニタリングに参加された皆様に謹んで謝意を表します。本報告にて、積雪分布箇所を調査するために使用したデータ (SGLI MODIS) は、宇宙研究開発機構 (JAXA) より提供を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

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



- 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-016, 2019, 116p.
- 13) 普天間章, 眞田幸尚, 古宮友和, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 萩野谷仁, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 石崎梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成30年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-017, 2019, 95p.
  - 14) 原子力防災会議幹事会, 原子力災害対策マニュアル, 平成31年3月29日一部改訂.
  - 15) 原子力規制委員会, 原子力災害対策指針, 平成27年8月26日全部改正.
  - 16) 湊進, 日本における地表 $\gamma$ 線の空間線量率分布, 地学雑誌, 115, pp.87-95, 2006.
  - 17) 日本地質学会, 日本の自然放射線量,  
<http://www.geosociety.jp/uploads/fckeditor/hazard/2011/daishinsai/20110412imai/Radiation-m2.gif> (2020年3月1日閲覧).
  - 18) 眞田幸尚, 西澤幸康, 山田勉, 池田和隆, 松井雅士, 土田清文, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 石田睦司, 卜部嘉, 志風義明, 杉田武志, 近藤敦哉, 鳥居建男, 原子力発電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定, JAEA-Research 2013-049, 2014, 129p.
  - 19) Sanada, Y., and Torii, T., Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter. *J. Environ. Radioact.*, 139, pp.294-299, 2015.
  - 20) Sanada, Y., Kondo, A., Sugita, T., Nishizawa, Y., Yuki .Y., Ikeda, K., Shoji, Y., Torii, T., Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi nuclear power plant. *Expl. Geophys.*, 45(1), pp.3-7, 2014.
  - 21) 佐藤昌之, 村岡浩治, 穂積弘毅, 眞田幸尚, 山田勉, 鳥居建男, Multiple Model Approach による構造化ロバスト制御器設計法を適用した放射線モニタリング無人固定翼機の飛行制御則設計-福島県浪江町における放射線モニタリング飛行-, 計測自動制御学会論文集, 51(4), pp.215-225, 2015.
  - 22) UARMS 開発チーム, 無人飛行機による放射線モニタリングシステムの開発, *Isotope News*, (727), pp. 30-34, 2014.
  - 23) 眞田幸尚, 鳥居建男, 村岡浩次, 福島原子力発電所事故後における無人機を用いた放射線モニタリング-UARMSの開発状況-, 第53回飛行機シンポジウム講演論文集, 2015, 2A05.
  - 24) 国土地理院基盤地図情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> (2020年3月1日閲覧).
  - 25) Currie, L. A., Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry., *Anal. Chem*, 40(3), pp.586-593, 1968.
  - 26) 塩出志乃, 逆距離加重法によるネットワーク空間上での点補間に関する研究, *Theory and Applications of GIS*, 13(1), pp.33-41, 2004.
  - 27) Oikawa, S., Nobuyuki, K., Sanada, T., Ohashi, N., Uesugi, M., Sato, K., Abukawa, J. and Higuchi, H., A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan. *J. Environ. Radioact.*, 65(2),

- pp.203-213, 2003.
- 28) 西川嗣雄, ラドン族(2) –自然放射線環境, 福井大学地域環境研究教育センター研究紀要「日本海地域の自然と環境」, 5, pp.83-94, 1998.
  - 29) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, pp.81-101, 2003.
  - 30) Hirayama, H., Namito, Y., Bielajew, A. F., Wilderman, S. J., Nelson, W. R., The EGS5 Code System, SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8, pp.20-132, 2005.
  - 31) 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター,  
[https://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/index\\_catalog\\_j.html](https://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/index_catalog_j.html) (2020年3月1日閲覧).
  - 32) 長谷川潔, 鈴木守, 5万分の1地質図幅説明書 五稜郭, 北海道立地下資源調査所, 函館-第86号, 23p, 1964.
  - 33) 上村不二雄, 陸奥川内地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 青森(5)第7号, 39p, 1975.
  - 34) 湊進, 日本列島における地表 $\gamma$ 線量率分布の地学的背景, RADIOISOTOPES, 64(8), pp.535-548, 2015.
  - 35) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 20万分の1日本シームレス地質図 2015年5月29日版, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (2020年3月1日閲覧).
  - 36) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 海と陸の地球化学図,  
<https://gbank.gsj.jp/geochemmap/> (2020年3月1日閲覧).
  - 37) 対馬坤六, 上村不二雄, 5万分の1地質図幅説明書 小泊, 地質調査研究所, 青森-第10号, 1959, 37p.
  - 38) 藤井敬三, 油川地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 青森(5)第15号, 1975, 38p.
  - 39) 村岡洋文, 長谷紘和, 黒石地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 青森(5)第29号, 1990, 124p.
  - 40) 宝田晋治, 村岡洋文, 八甲田山地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 青森(5)第30号, 2004, 86p.
  - 41) 角靖夫, 野沢保, 魚津地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 金沢(10)第23号, 1973, 109p.
  - 42) 野沢保, 坂本亨, 5万分の1地質図幅説明書 五百石, 地質調査所, 金沢-第29号, 1960, 78p.
  - 43) 野沢保他, 白木峰地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 金沢(10)第35号, 1981, 85p.
  - 44) 原子力百科事典 ATOMICA, 天然の放射性核種,  
[https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat\\_detail\\_09-01-01-02.html](https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_09-01-01-02.html) (2020年3月1日閲覧).
  - 45) 国土地理院, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2020年3月1日閲覧).
  - 46) 眞田幸尚, 西澤幸康, 越智康太郎, 結城洋一, 石崎梓, 長田直之, 平成29年度無人飛行機を用いた放射性プルーム測定技術の確立, JAEA-Research 2018-009. 2019, 48p.

**リサイクル適性** 

この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。