

平成 30 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

平成 31 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 30 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.	航空機モニタリングシステム .....	4
2.1.	航空機モニタリングシステム .....	4
2.2.	ヘリコプターの選定 .....	6
2.3.	RSI システムの保守 .....	8
3.	データ取得および解析方法 .....	11
3.1.	データ取得方法 .....	11
3.2.	キャリブレーションフライト方法 .....	15
3.3.	解析のフロー .....	20
3.4.	空間線量率への換算方法 .....	21
3.4.1.	バックグラウンド計数率(自己汚染および宇宙線) .....	21
3.4.2.	高度補正係数の算出方法 .....	23
3.4.3.	空間線量率への換算係数の算出方法 .....	23
3.4.4.	空間線量率への換算方法 .....	23
3.5.	検出下限値 .....	24
3.6.	不確かさ .....	25
3.7.	マッピング .....	25
3.8.	大気中のラドン子孫核種の弁別手法 .....	27
3.8.1.	ラドン子孫核種 .....	27
3.8.2.	ラドン弁別手法の理論 .....	29
3.8.3.	GI の高度補正方法 .....	31
3.9.	天然放射性核種の濃度換算手法 .....	34
4.	モニタリング結果と考察 .....	37
4.1.	換算パラメータ .....	37
4.2.	地上における測定値との比較 .....	43
4.3.	空間線量率 .....	50
4.4.	天然の放射性核種濃度 .....	56
4.5.	ラドン弁別法の適用結果 .....	65
4.5.1.	パラメータ (GI および RI) の決定 .....	65
4.5.2.	従来手法との比較 .....	68
4.5.3.	ラドン弁別手法の適用 .....	69
4.6.	放射性セシウムの沈着量 .....	77
5.	衛星通信を利用したリアルタイムデータ通信システムの作製 .....	79
5.1.	目的と背景 .....	79
5.2.	リアルタイムデータ通信システムの概要 .....	79

5.3.	動態管理システムの概要.....	81
5.4.	リアルタイムデータ通信システムの動作試験.....	82
5.5.	今後の課題と展望.....	85
6.	まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理.....	86
	謝辞.....	89
	参考文献.....	90

## Table list

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL .....	2
Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧 .....	16
Table 3-2 機体とシステムの組み合わせと平均的な自己汚染による計数率および採用した CR-index .....	22
Table 3-3 ラドン子孫核種の放出する $\gamma$ 線 .....	28
Table 3-4 天然の放射性核種濃度に換算するためのパラメーター一覧.....	36
Table 4-1 本事業で取得した AF データー一覧.....	40
Table 4-2 本事業で取得した CD データー一覧 .....	41
Table 4-3 使用したパラメータのまとめ .....	42
Table 4-4 GI および RI の一覧 .....	65

## 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.....	3
Fig. 2-1 RSI システムのブロック図 .....	5
Fig. 2-2 RSI システムの写真.....	5
Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧 .....	6
Fig. 2-4 島根原子力発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (Bell 430 JA6900) .....	7
Fig. 2-5 浜岡原子力発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (Bell 430 JA05TV).....	7
Fig. 2-6 システムの半値幅および Gain の変動 (島根 RSI3) .....	9
Fig. 2-7 システムの半値幅および Gain の変動 (浜岡 RSI4) .....	10
Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (島根) .....	12
Fig. 3-2 予定したフライトの測線 (浜岡) .....	13
Fig. 3-3 フライトイメージ.....	14
Fig. 3-4 上空からの測定範囲イメージ .....	14
Fig. 3-5 テストラインフライトのイメージ .....	17
Fig. 3-6 テストラインおよびテストポイントの場所 (島根) .....	18
Fig. 3-7 テストラインおよびテストポイントの場所 (浜岡) .....	18
Fig. 3-8 テストポイントフライトのイメージ.....	19
Fig. 3-9 宇宙線フライトのイメージ.....	19
Fig. 3-10 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ .....	19
Fig. 3-11 解析のフロー .....	20
Fig. 3-12 RSI システムにおける地上で取得した $\gamma$ 線スペクトルと海上でのスペクトル例 .....	22
Fig. 3-13 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例 .....	22
Fig. 3-14 IDW に入力するパラメータとマップの関係.....	26
Fig. 3-15 ウラン系列およびトリウム系列 .....	28
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 .....	31
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 .....	31
Fig. 3-18 計算体系のイメージ .....	33
Fig. 3-19 計算体系のベンチマーク .....	33
Fig. 3-20 シミュレーションによる測定高度と GI の関係 .....	33
Fig. 3-21 天然の放射性核種によるピーク解析例 .....	35
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) .....	35
Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例.....	37
Fig. 4-2 地上測定による空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (島根).....	38
Fig. 4-3 地上測定による空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (浜岡).....	39
Fig. 4-4 地上における測定点 (島根).....	44
Fig. 4-5 地上における測定点 (浜岡).....	44
Fig. 4-6 地上における空間線量率算出結果との比較 (島根) .....	45

Fig. 4-7 地上における空間線量率算出結果との比較 (浜岡) .....	45
Fig. 4-8 地上における空間線量率算出結果との比較 (全データ).....	46
Fig. 4-9 地上における空間線量率算出結果との比較 (川内) .....	46
Fig. 4-10 地上における空間線量率算出結果との比較 (大飯・高浜) .....	47
Fig. 4-11 地上における空間線量率算出結果との比較 (伊方).....	47
Fig. 4-12 地上における空間線量率算出結果との比較 (泊) .....	48
Fig. 4-13 地上における空間線量率算出結果との比較 (柏崎刈羽).....	48
Fig. 4-14 地上における空間線量率算出結果との比較 (玄海).....	49
Fig. 4-15 島根原子力発電所周辺の空間線量率マップ .....	52
Fig. 4-16 浜岡原子力発電所周辺の空間線量率マップ .....	53
Fig. 4-17 島根原子力発電所周辺の空間線量率マップの比較 .....	54
Fig. 4-18 浜岡原子力発電所周辺の空間線量率マップの比較 .....	55
Fig. 4-19 島根原子力発電所周辺の $^{40}\text{K}$ 濃度マップ .....	57
Fig. 4-20 浜岡原子力発電所周辺の $^{40}\text{K}$ 濃度マップ .....	58
Fig. 4-21 島根原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ .....	59
Fig. 4-22 浜岡原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ .....	60
Fig. 4-23 島根原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ .....	61
Fig. 4-24 浜岡原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ .....	62
Fig. 4-25 島根原子力発電所周辺の放射性核種濃度測定結果と地球化学図比較.....	63
Fig. 4-26 浜岡原子力発電所周辺の放射性核種濃度測定結果と地球化学図比較.....	64
Fig. 4-27 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.....	66
Fig. 4-28 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.....	67
Fig. 4-29 BG フライトから求めた NaI RSI システムのバックグラウンド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の計数率の平均値の比較.....	68
Fig. 4-30 ラドン影響弁別手法適用後の島根原子力発電所周辺における空間線量率マップ .....	70
Fig. 4-31 ラドン影響弁別手法適用後の浜岡原子力発電所周辺における空間線量率マップ .....	71
Fig. 4-32 ラドン影響弁別手法適用後の島根原子力発電所周辺における空気中のラドン子孫核種起 源の計数率マップ .....	72
Fig. 4-33 ラドン影響弁別手法適用後の浜岡発電所周辺における空気中のラドン子孫核種起源の計 数率マップ.....	73
Fig. 4-34 ラドン影響弁別手法適用後の発電所周辺空間線量率マップ.....	74
Fig. 4-35 島根原子力発電所モニタリングにおける従来法とラドン弁別法を用いた空間線量率換算 結果と地上測定値との比較 .....	75
Fig. 4-36 浜岡原子力発電所モニタリングにおける従来法とラドン弁別法を用いた空間線量率換算 結果と地上測定値との比較 .....	76
Fig. 4-37 発電所周辺の放射性セシウム沈着量マップ.....	78
Fig. 5-1 イリジウム衛星通信端末の概観 .....	79
Fig. 5-2 リアルタイムデータ通信システムの概要 .....	81

Fig. 5-3 動態管理システムログイン後の画面.....	82
Fig. 5-4 動態管理システムの位置情報および計数率情報表示.....	82
Fig. 5-5 リアルタイムデータ通信システムの動作試験で使用了システムのダイアグラム.....	84
Fig. 5-6 リアルタイムデータ通信システムの動作試験におけるシステムの車両搭載状況.....	84
Fig. 5-7 リアルタイムデータ通信システムの動作試験結果.....	85
Fig. 6-1 島根原子力発電所周辺における空域に係る情報.....	88
Fig. 6-2 浜岡原子力発電所周辺における空域に係る情報.....	88

## 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事故(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8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)・11)</sup>。

今回の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>12)</sup>。

### 第2 関係省庁における対応要領

#### 第1編事態毎の組織・応急対策業務

#### 第4章全面緊急事態

##### (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に、フライトのタイミングやフライト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>13)</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および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>14)</sup>。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>15)</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 OIL 6 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り、一般的に時間がかかる。一方、事前にバックグラウンドを調査しておくこと、実際の事故時に迅速かつ正確にバックグラウンドを減算することができる。また、事前にフライトすることによって、地域特有の航空管制の情報、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。

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 3~80 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。

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 3~80 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 3~80 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、静岡県にある中部電力浜岡原子力発電所周辺 3~80 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。

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 $\mu\text{Sv/h}$ (地表面から1 m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 $\mu\text{Sv/h}$ (地表面から1 m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 $\mu\text{Sv/h}$ (地表面から1 m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	

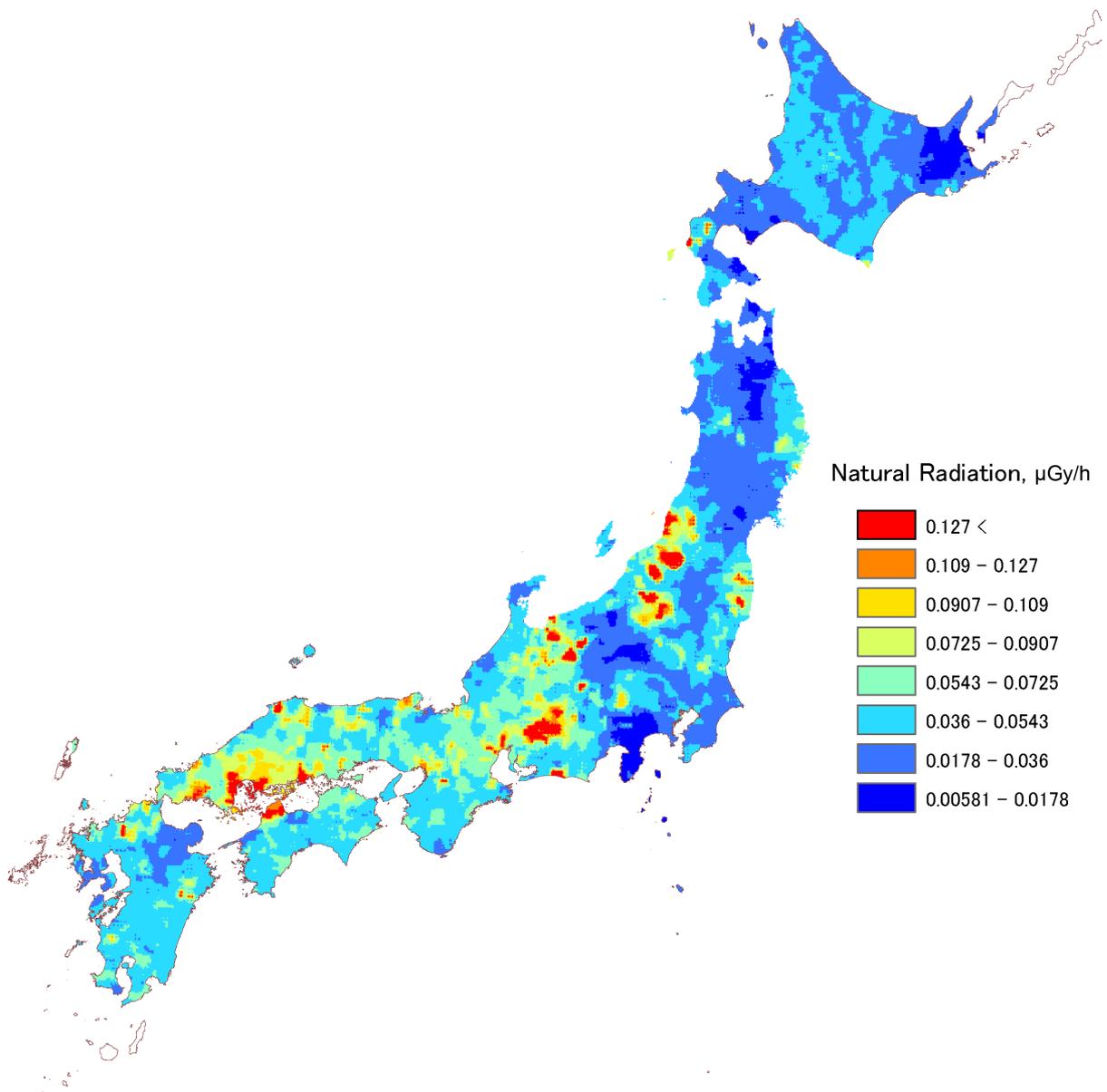


Fig. 1-1 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果  
(地質学会ホームページ<sup>15)</sup>より )

## 2. 航空機モニタリングシステム

### 2.1. 航空機モニタリングシステム

一般的に、航空機モニタリングシステム (Aerial Radiation Monitoring System: ARMS) には、大型の NaI 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 (0~1023 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出来る。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、福島第一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 (RSI1、2) と区別するため、本報告書では RSI3 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。

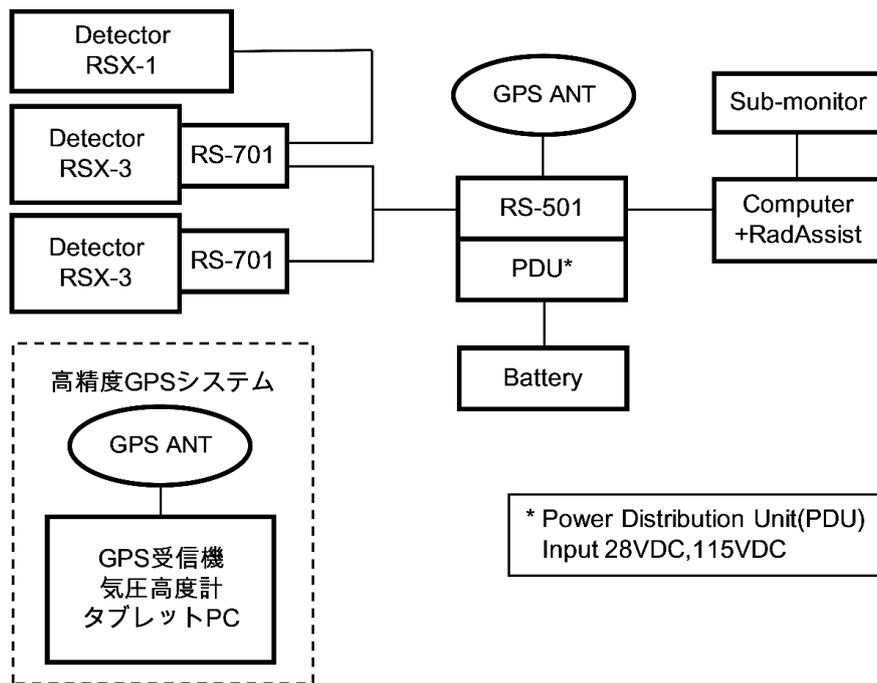


Fig. 2-1 RSI システムのブロック図



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。今年度は、機体繰りの都合から、Bell 430 を使用した。Fig. 2-4、Fig. 2-5 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 島根原子力発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (Bell 430 JA6900)**



**Fig. 2-5 浜岡原子力発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (Bell 430 JA05TV)**

### 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 (RS701 および RS501) 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)

2,614keV 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した。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、今年度は再調整を行う必要性が生じなかった。本報告における半値幅とアンプのゲインの推移について Fig. 2-6、Fig. 2-7 に示す。図中の RSI3 以降の枝番は配置してある検出器の番号である。アンプのゲインに大きな変動は見られなかったものの、使用日数が長くなるにつれ若干上昇傾向にある場合があった。これは、気温の低下により検出器の信号が小さくなることに起因する。このことから、気温の低い時期のモニタリングの際には注意が必要であり、ヘリコプター機内はなるべく気温が下がらないように対策を講じることが望ましい。これらのデータは RSI システムの保守を行う際に参考となる。

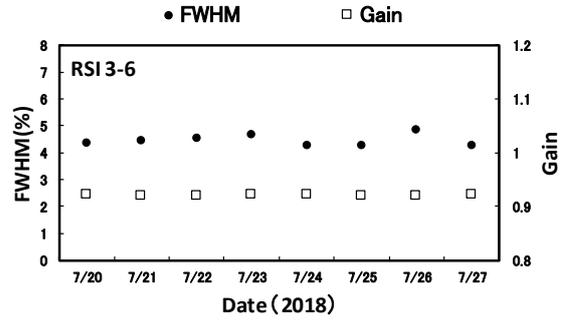
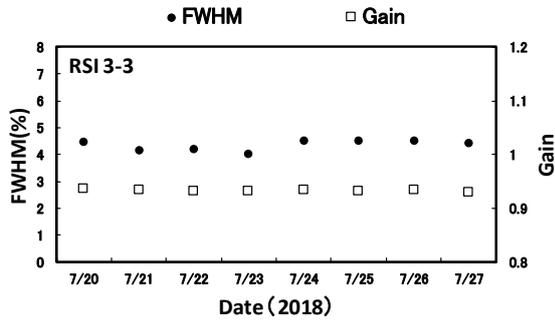
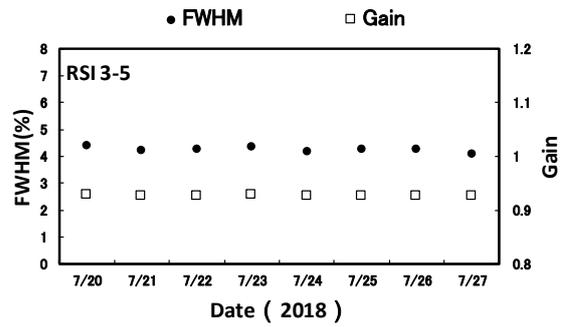
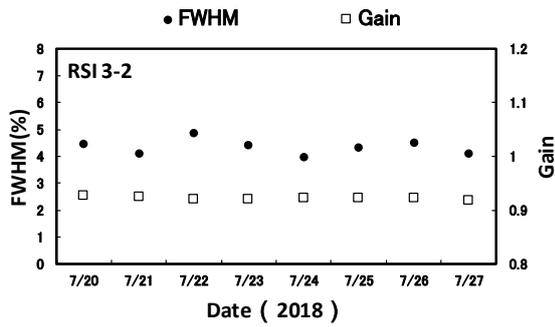
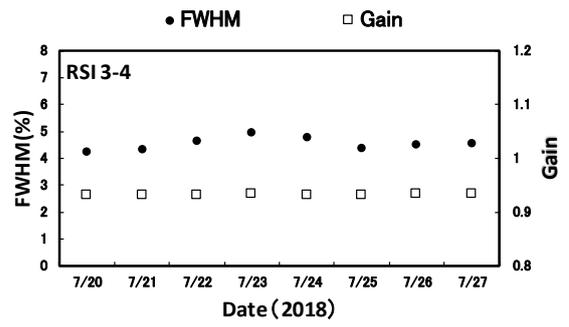
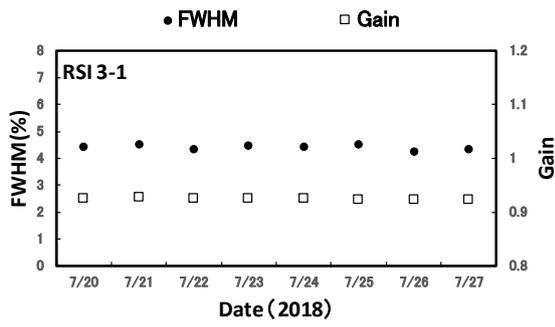


Fig. 2-6 システムの半値幅および Gain の変動 (島根 RSI3)

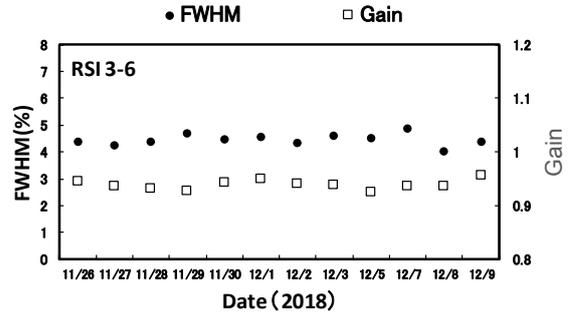
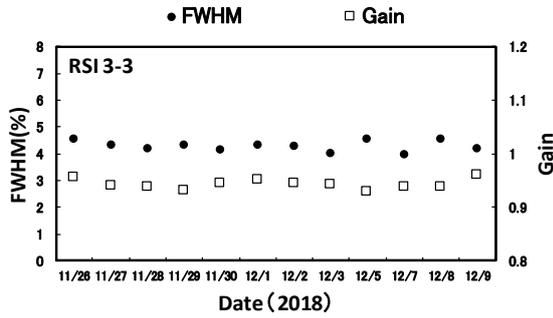
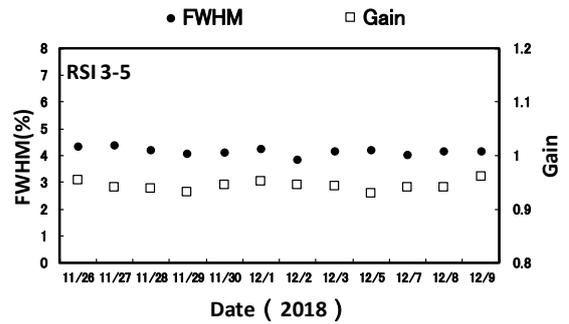
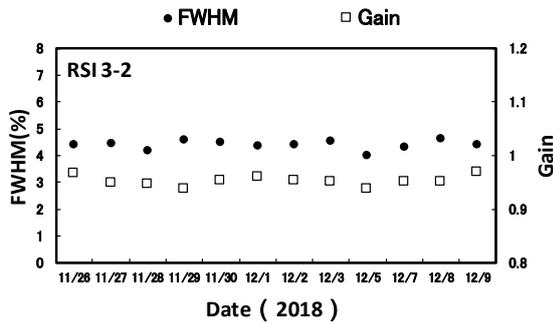
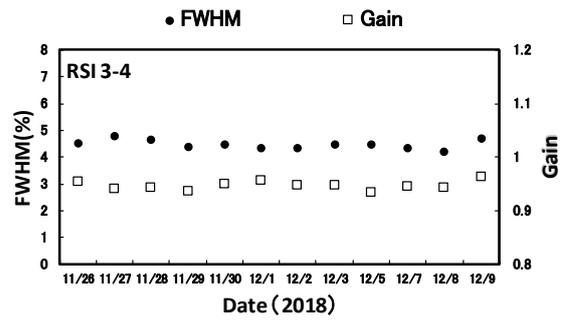
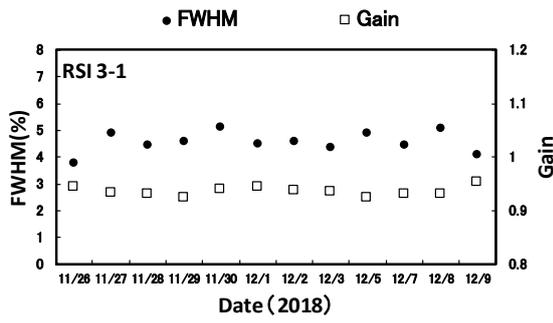


Fig. 2-7 システムの半値幅および Gain の変動 (浜岡 RSI3)

### 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。このフライト条件は、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 (島根)、Fig. 3-2 (浜岡) にフライト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、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用した。

[フライト条件]

- 速度：130～180 km/h (=70～95 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。

[フライトに要した期間]

- 島根原子力発電所: 平成 30 年 7 月 20 日～7 月 27 日 (のべ 16 フライト)
- 浜岡原子力発電所: 平成 30 年 11 月 27 日～12 月 9 日 (のべ 14 フライト)

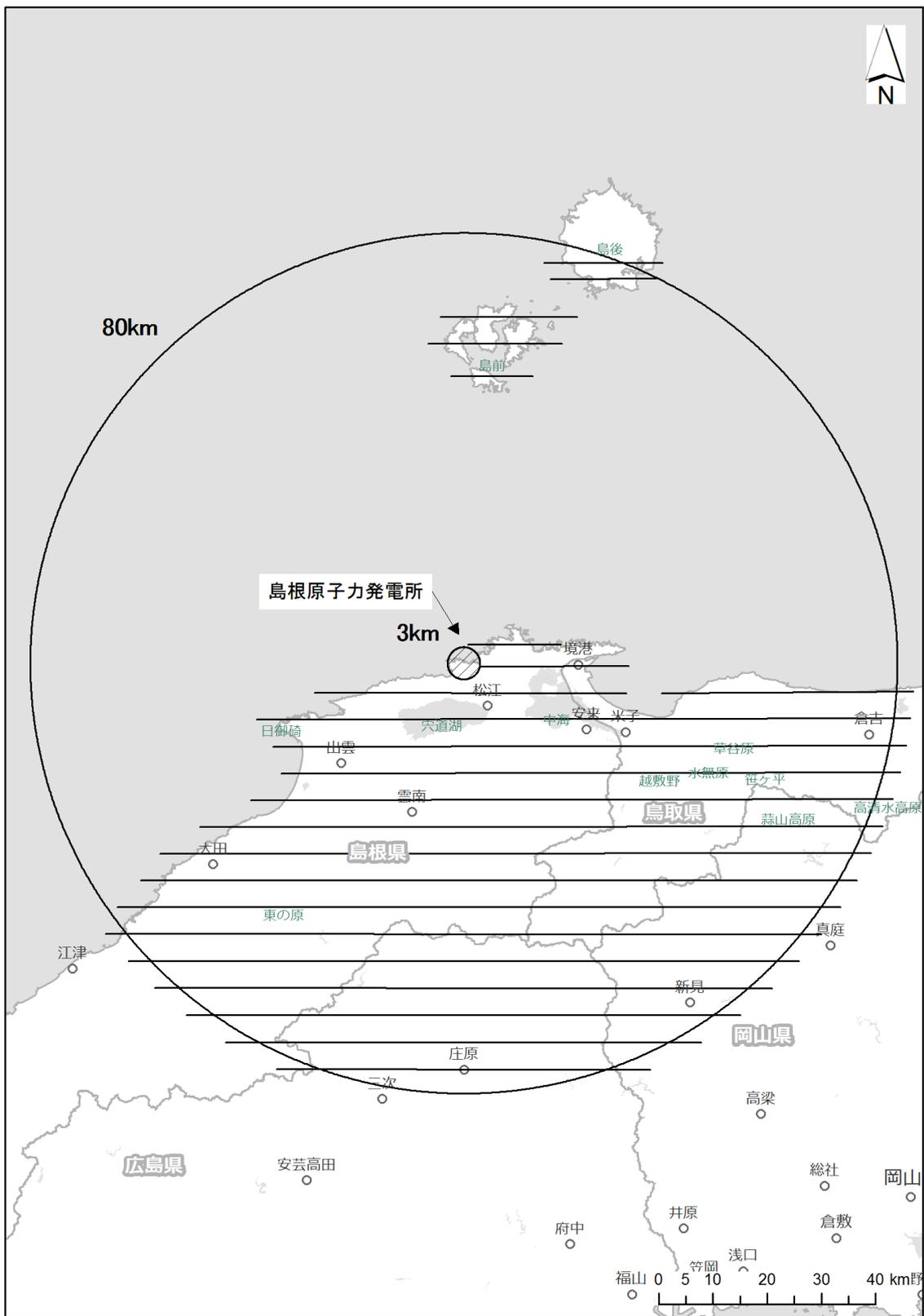


Fig. 3-1 予定したフライトの測線 (島根)

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

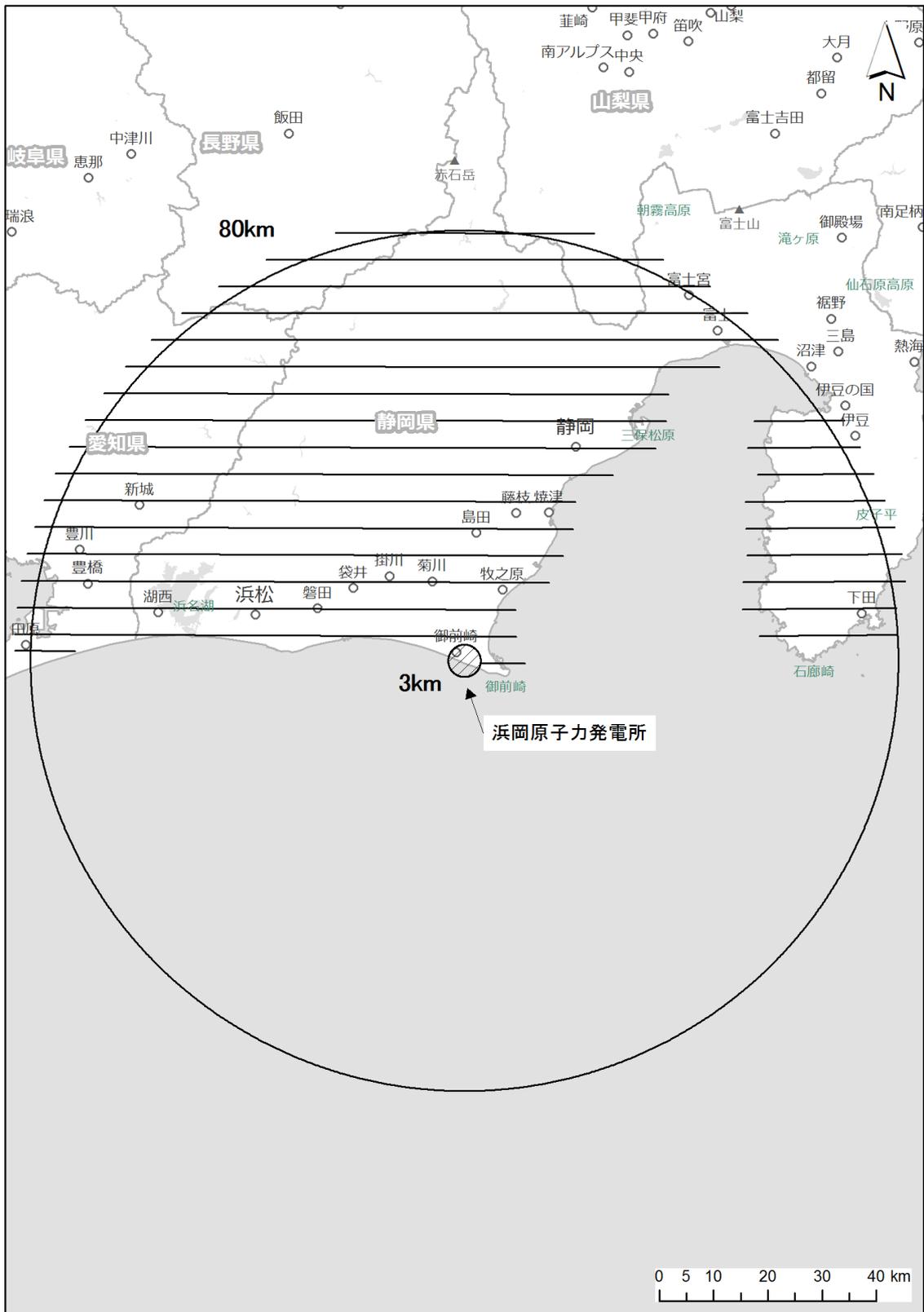


Fig. 3-2 予定したフライトの測線 (浜岡)

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

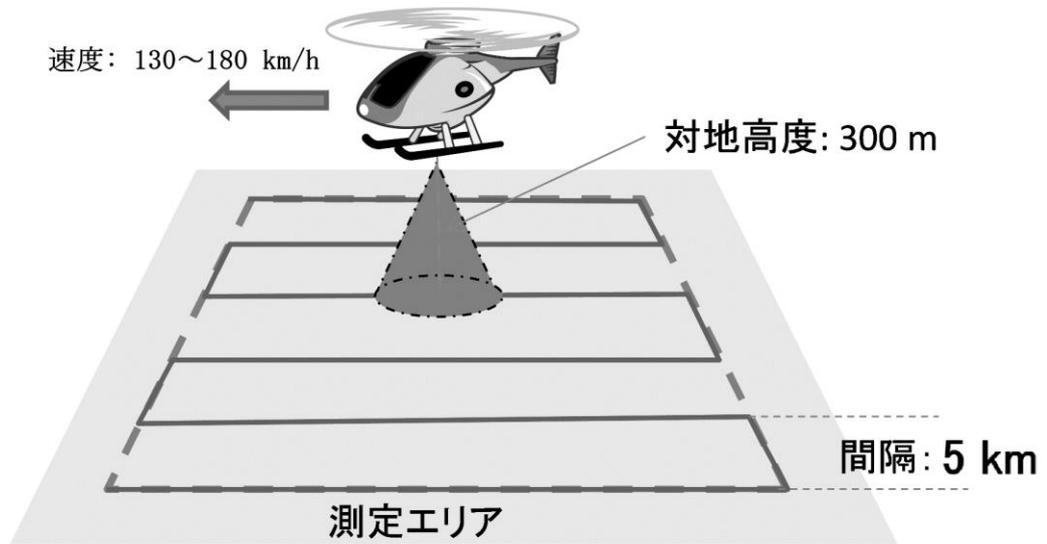


Fig. 3-3 フライトイメージ

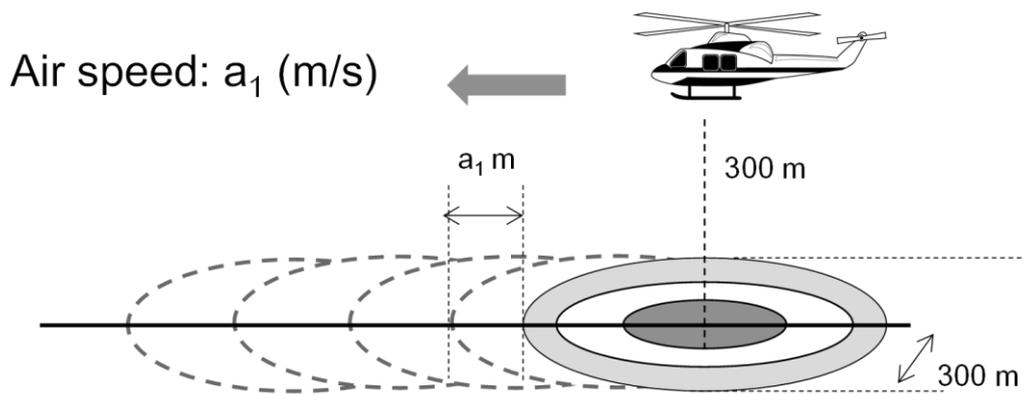


Fig. 3-4 上空からの測定範囲イメージ

### 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、地上 1 m 高さにおける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については、キャリブレーションフライトにより取得したデータに基づき決定している。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 ( $\text{m}^{-1}$ )) 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 (島根)、Fig. 3-7 (浜岡) 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 ( $\text{cps}/[\mu\text{Sv/h}]$ )) を求めるためのフライトである。テストポイントでは人手により、NaI シンチレーション式サーベイメータ (日立製作所社製 TCS-172B) を用いて、半径 1,000 m の範囲内で 30 ポイントを目安に地上 1 m 高さの空間線量率の測定を行う。また、テストポイントとして選定した場所を Fig. 3-6 (島根)、Fig. 3-7 (浜岡) 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 300~2,400 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。

#### ○Rn 影響フライト

空気中に存在するラドン子孫核種の影響を考察するために、決められた場所の上空において対地高度約 450~900 m までを直線的に上昇しデータを取得するフライトである。

#### ○BG フライト

地上からの放射線の影響の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てデータを取得することにより、機体および検出器のバックグラウンドデータを取得する。Rn 影響フライトおよび BG 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	空気減弱係数を算出	指定のテストライン上で高度 (300、450、600、750、900、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 300～2,400 m まで上昇	測定期間中に少なくとも 2 回
Rn 影響フライト	ラドンの影響を調査	フライト前に拠点近くの測線上を 450～900 m まで直線的に上昇	毎日
BG フライト	機体のバックグラウンドを調査	対地高度 900 m を 3 分 (Rn 影響フライト後に実施)	毎日

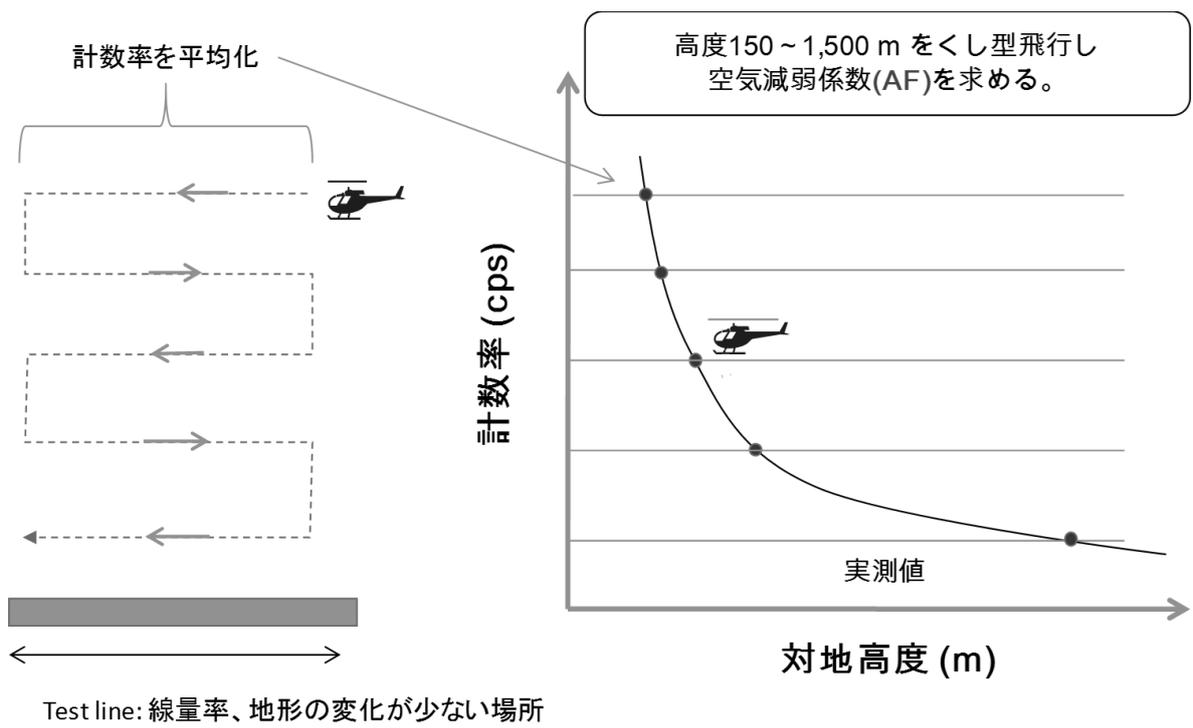
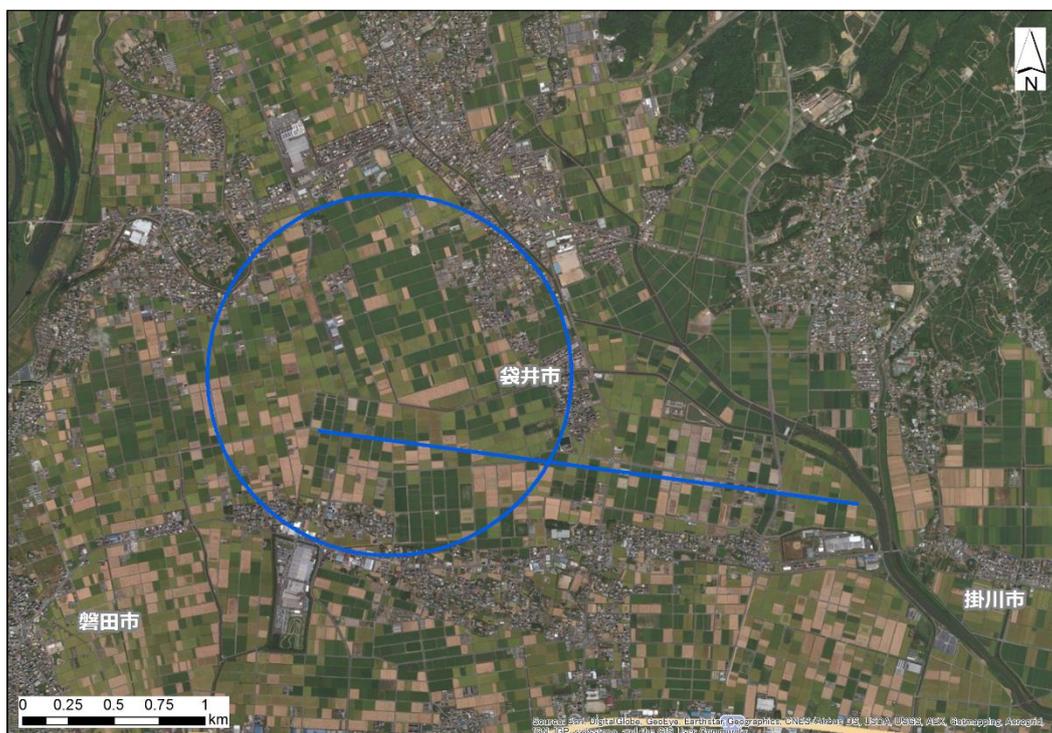


Fig. 3-5 テストラインフライトのイメージ



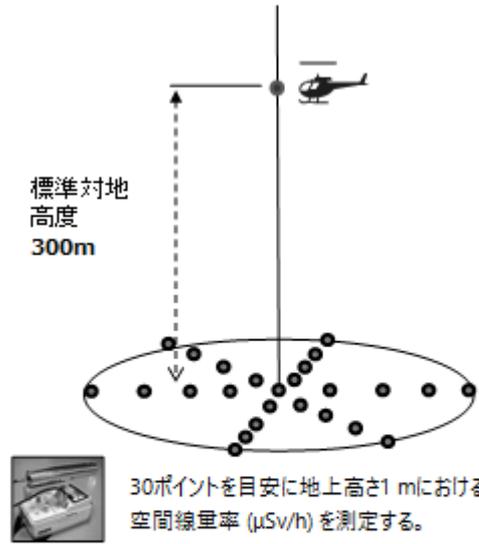
**Fig. 3-6 テストラインおよびテストポイントの場所 (島根)**

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) 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 (浜岡)**

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



地上測定( $\mu\text{Sv/h}$ )と基準対地高度(300 m)の計数率(cps)の比較から線量率換算係数**CD**を求める。

Fig. 3-8 テストポイントフライトのイメージ

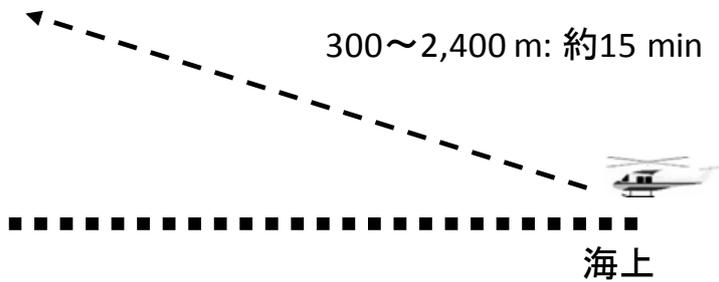


Fig. 3-9 宇宙線フライトのイメージ

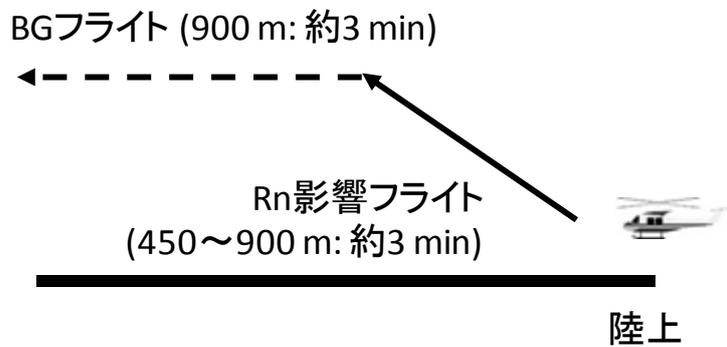


Fig. 3-10 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ

### 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

本地域において、放射性セシウムの影響は無視できるため、②および③起源の計数率を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。

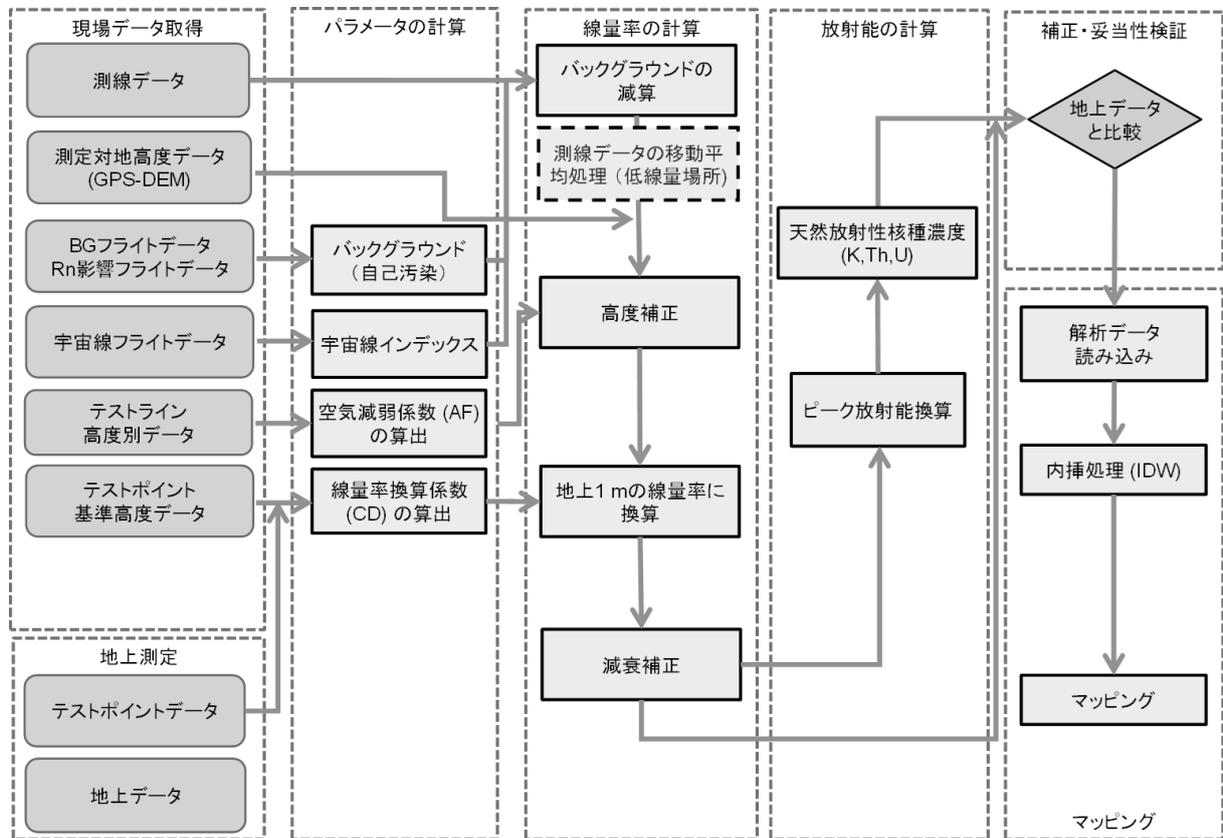


Fig. 3-11 解析のフロー

### 3.4. 空間線量率への換算方法

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 バックグラウンド減算：全計数率からバックグラウンド計数率（自己汚染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により地上1 m高さにおける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、上記項目の詳細について述べる。

#### 3.4.1. バックグラウンド計数率（自己汚染および宇宙線）

航空機モニタリングにおいて、自己汚染および宇宙線はバックグラウンド計数率として扱われるため測定データ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。自己汚染については、BGフライトとして実施した地上からの放射線が届かないと考えられる900 m以上のフライト（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、平均的な自己汚染の計数率を Table 3-2 に示す。

これまでの経験<sup>5)-11)</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（30～3,000 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、50～2,000 mの高度で取得したデータの2,800 keV以上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以上の計数率と2,800 keV以下の計数率の比（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、バックグラウンド計数率の減算を行った。

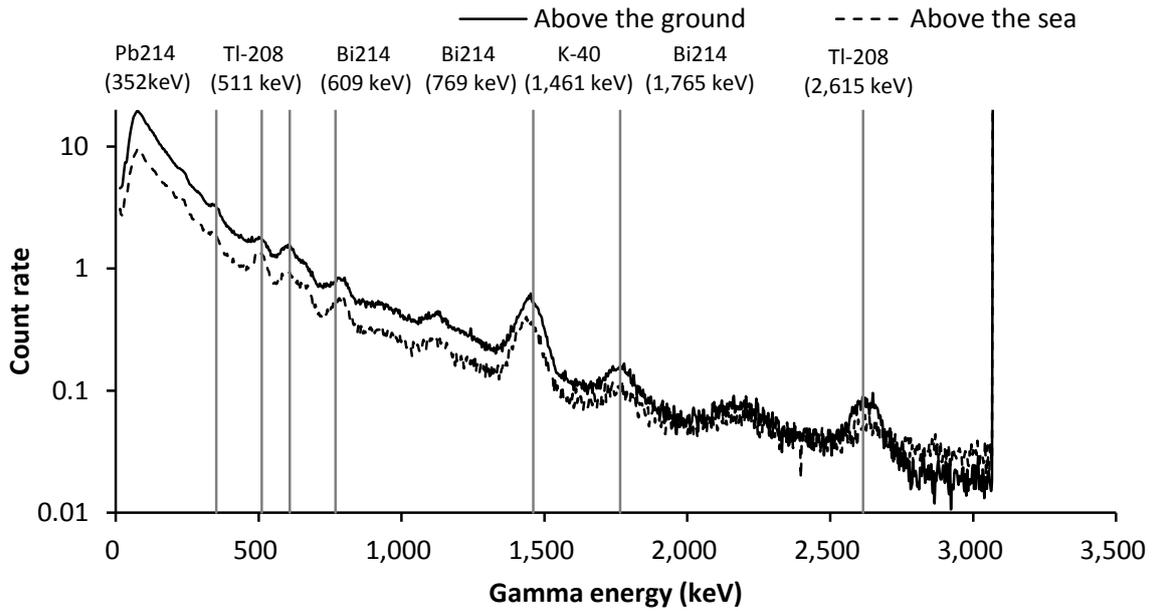


Fig. 3-12 RSI システムにおける地上で取得した  $\gamma$  線スペクトルと海上でのスペクトル例

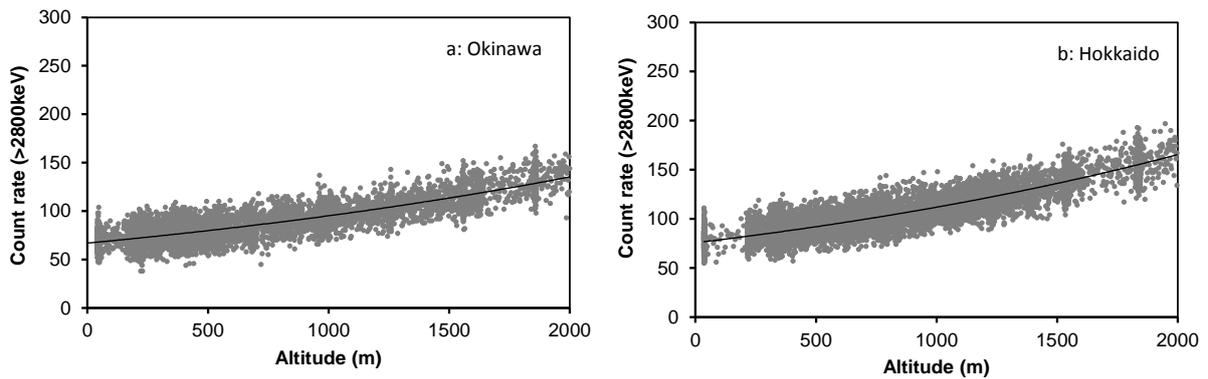


Fig. 3-13 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例

(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自己汚染による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	自己汚染計数率 (cps)	CR-index
Shimane	2018	RSI3	Bell 430 (JA6900)	AAC	431	4.13
		RSI4	Bell 430 (JA05TV)	NNK	556	2.91
Fukushima	2018	RSI1	Bell 430 (JA05TV)	NNK	512	2.93
			S-76 (JA6655)	AAC	482	3.83
		RSI2	Bell 412 (JA6767)	NNK	502	2.97
			Bell 430 (JA05TV)	NNK	581	2.93
			Bell 430 (JA6900)	AAC	528	2.93

※ 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、テストラインで取得したデータを基に AF を求めた。高度補正に必要な補正係数 HF は、計算式 [1] を用いて算出できる。

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

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>16)</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。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

地表面から高さ 1 m における空間線量率に換算するために設定する換算係数 (空間線量率換算係数: 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

これまで求め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 30~40 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の宇宙線のバックグラウンド計数率 ( $BG_{cos}$ ) を計算する。

③ BG フライトで取得したデータを自己汚染による計数率 ( $BG_{self}$ ) とする。

④  $C_{all}$  から  $BG_{cos}$  と  $BG_{self}$  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 1 m における空間線量率  $D$  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])

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

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

および式 [1] を式 [2] に代入すると

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

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: 空間線量率 ( $\mu$ Sv/h)

$C_{all}$ : 全計数率 (cps)

$BG_{self}$  機体の汚染 (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])

### 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  $BG_{self}$  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 200~500 cps の範囲となり、 $BG_{self}$  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、 $BG_{self} + BG_{cos} = 900$  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>17)</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 (12,800 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

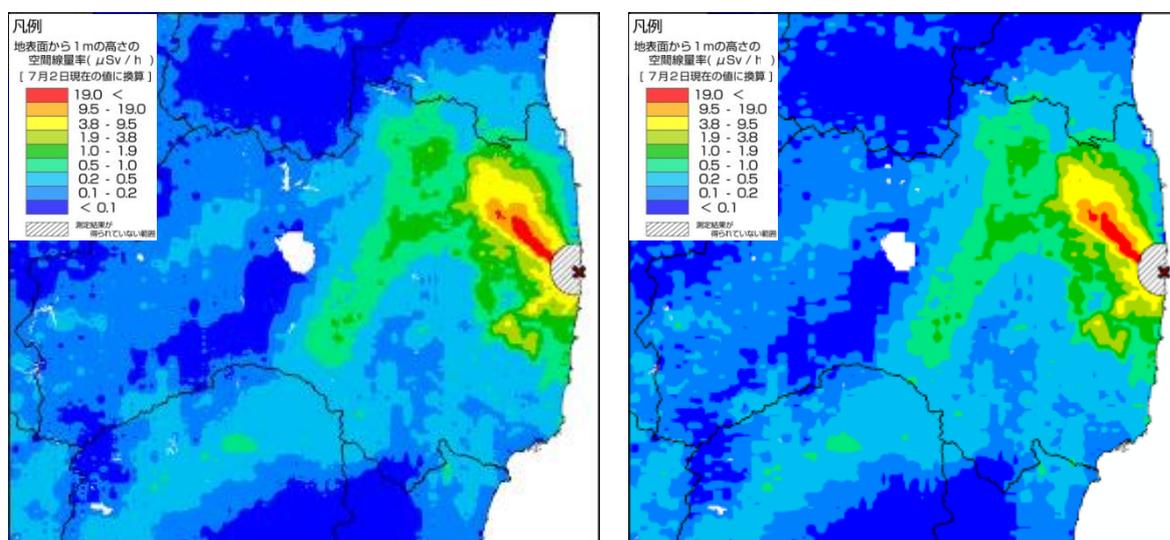
空間線量率や放射性物質のマッピングについては、国際原子力機関 (IAEA) から標準的な方法が示されている<sup>18)</sup>。補間方法には、IDW (Inverse Distance Weighted: 逆距離加重法)、クリギング (Kriging)、スプライン (Spline)、Natural Neighbor 等の多くの方法が存在する。福島第一原子力発電所周辺の航空機モニタリングでは、2011 年 4 月 6 日～29 日にかけて実施された第 1 次の解析を担当した DOE が用いた IDW を踏襲している。IDW とはある補間地点の近傍にある複数のサンプル点の測定値を補間地点からサンプル点までの水平距離の逆数のべき乗関数により重み付け平均することで、ある補間地点における値を推定する方法である。IDW による、ある補間点における推定値は以下の式 [5] で表わされる<sup>27)</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り、最低値より小さくなることはない。また、IDWには複雑なパラメータ設定が不要である。必要となるのは、補間地点とサンプル点間の距離に応じて影響度を制御する乗数 $\lambda$ 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。 $\lambda$ が大きいくほど、補間地点近傍データの影響力が相対的に大きくなり、一般的に2がよく用いられるが、必ずしも2が最良であるとは限らない。本報告では、今まで積み上げてきた経験から、 $\lambda$ として2.3、sとして400を採用した。ちなみに、第3次航空機モニタリングの空間線量率のRMSE(Root Mean Squared Error: 二乗平均平方根誤差)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300m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300m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250m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

### 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核種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 Bq/m<sup>3</sup> 程度となっている<sup>19)</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ことが推察される<sup>20)</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の地上換算時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 年度および 2017 年度に実施した発電所周辺のデータを解析し、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)</sup>。今年度も引き続き各原子力発電所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

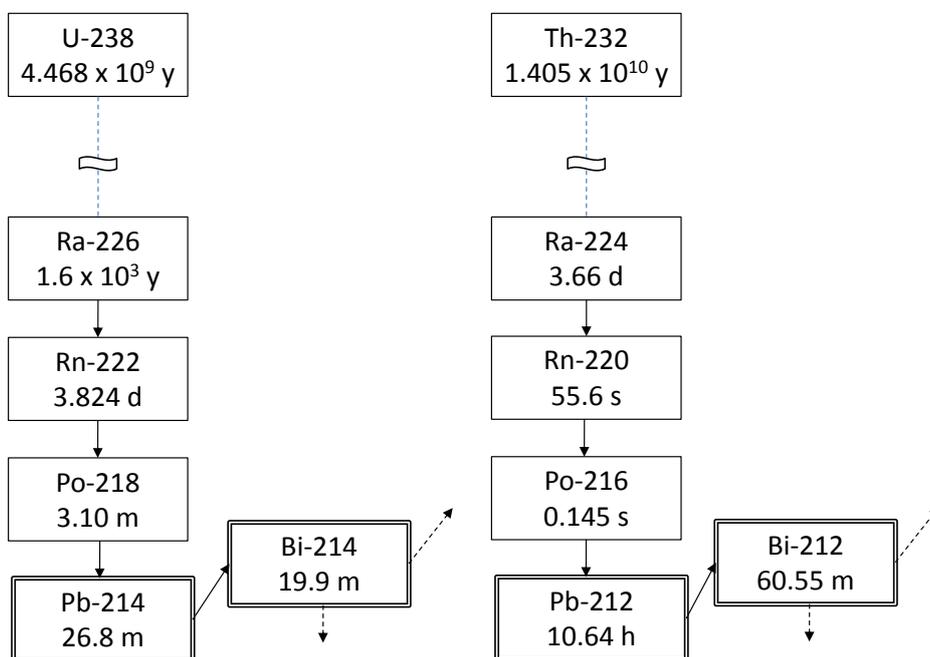


Fig. 3-15 ウラン系列およびトリウム系列

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>18)</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 (Radiation Solutions Inc.) 社製 LaBr<sub>3</sub>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 $\gamma$ 線と比べて近いいため、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の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からラドン子孫核種起源の 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求めておき、この数値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から、地上の放射性核種からの $\gamma$ 線に由来する 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求めておき、この数値をグラウンドインデックス (GI) と定義して、この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 30～2800 keV における全計数率

$C_{NaI,g}$ : NaI RSI システムの 30～2800 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 30～2800 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 50～700 keV における全計数率

$C_{LaBr,g}$ : LaBr RSI システムの 50～700 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 50～700 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:

陸上における対地高度 300 m での NaI RSI システムと LaBr RSI システムの測定データにおける近似曲線の傾き

$RI$ : ラドンインデックス:

海上における海拔高度 300 m での NaI RSI システムと LaBr RSI システムの測定データにおける近似曲線の傾き

である。

ここでの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。

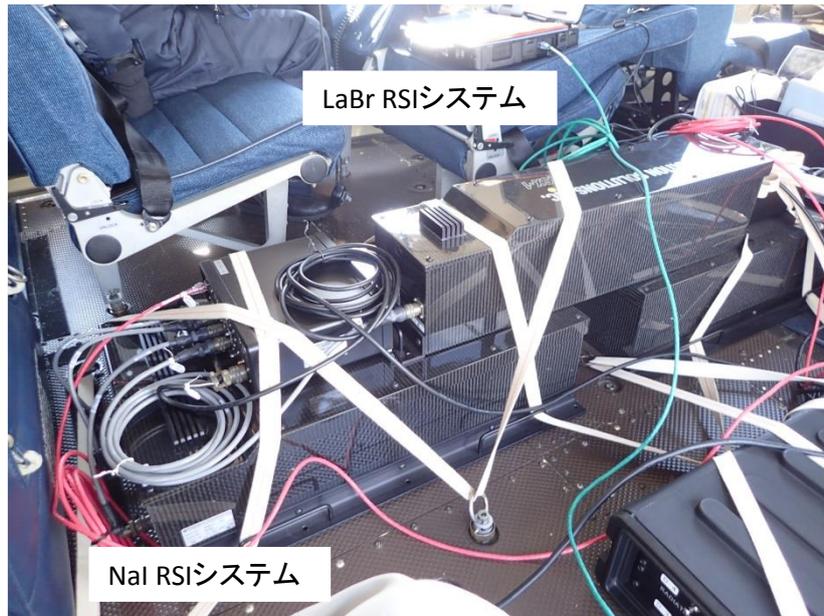


Fig. 3-16 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況

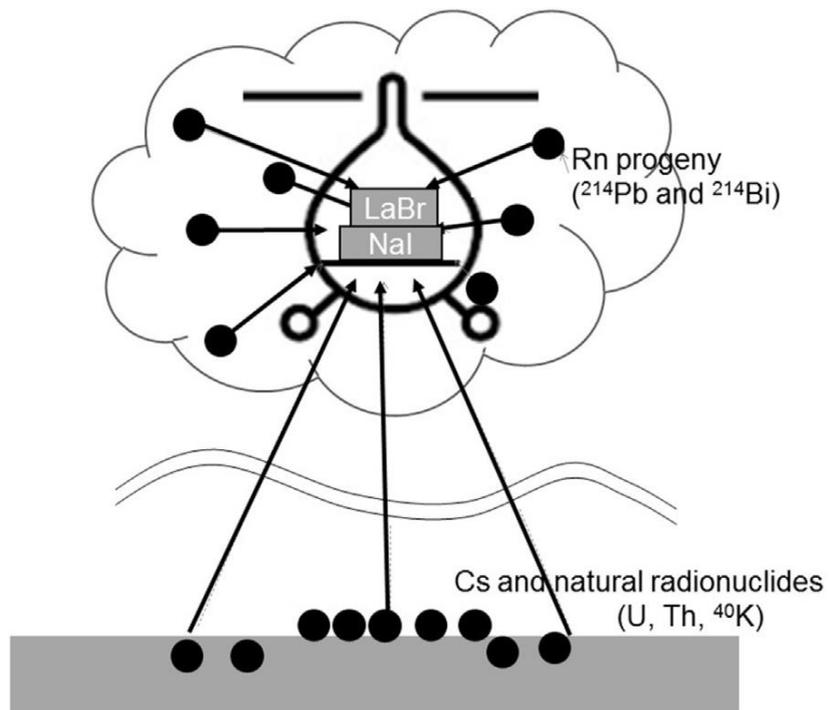


Fig. 3-17 大気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ

### 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>28)</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 の測定高度との関係を計算した。なお、実際の計算では NaI RSI システムと LaBr RSI システムを別で実施した。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。土壤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>22)</sup>。

- ・ 空気(1 km×1 km×1.3 km)と土壌 (深さ 1 m, 密度  $\rho$ :1.6 g cm<sup>-3</sup>)
- ・ 山等の地面の凹凸を再現せずに地面は平坦
- ・ 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
- ・ 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  $\beta = 3$  g/cm<sup>2</sup>)
- ・ 土壌中の放射性核種濃度 <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>

検出器と線源の距離 (測定高度) と 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。

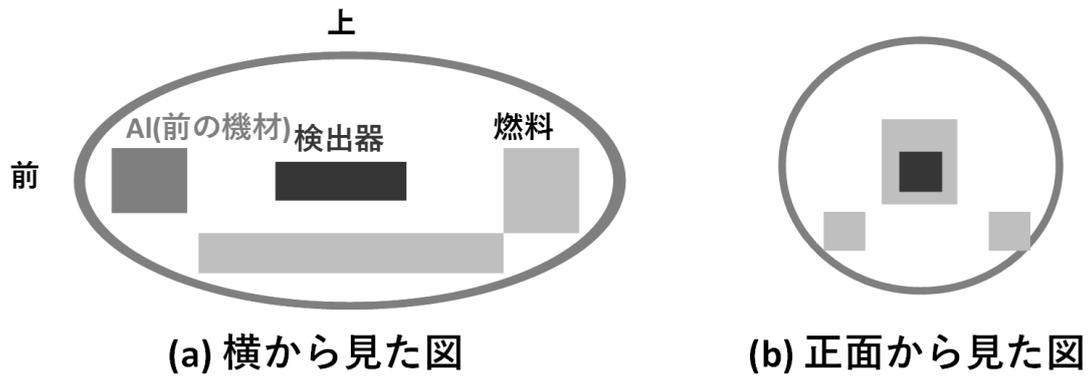


Fig. 3-18 計算体系のイメージ

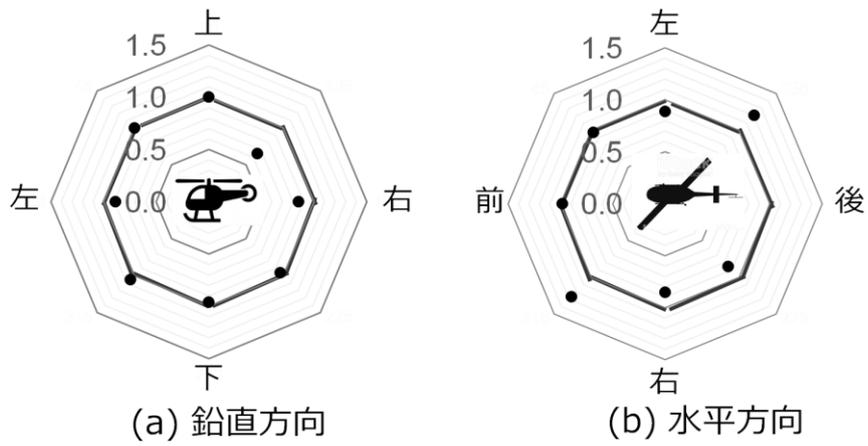


Fig. 3-19 計算体系のベンチマーク  
(計算結果と実測結果の比)

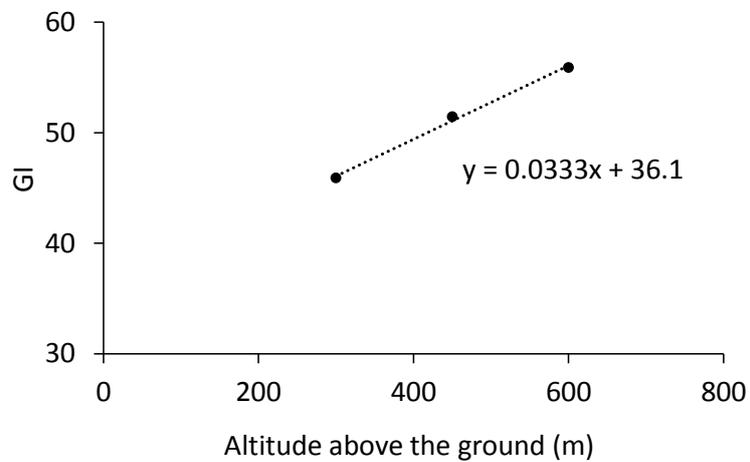


Fig. 3-20 シミュレーションによる測定高度と GI の関係

### 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核種ごとに定性・定量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側である  $^{40}\text{K}$  (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ので、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、ここでは 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。スペクトルのピーク解析のイメージを Fig. 3-21 に示す。

地上の濃度に換算するために、パラメータの設定が必要である。前述のように、航空機モニタリングでは、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 (Conversion factor for natural nuclide Concentration: 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 (島根)、Fig. 3-7 (浜岡) で示した、測定対象である原子力発電所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、地上高さ 1 m 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、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。実際の CC と AF の数値について Table 3-4 に示す。

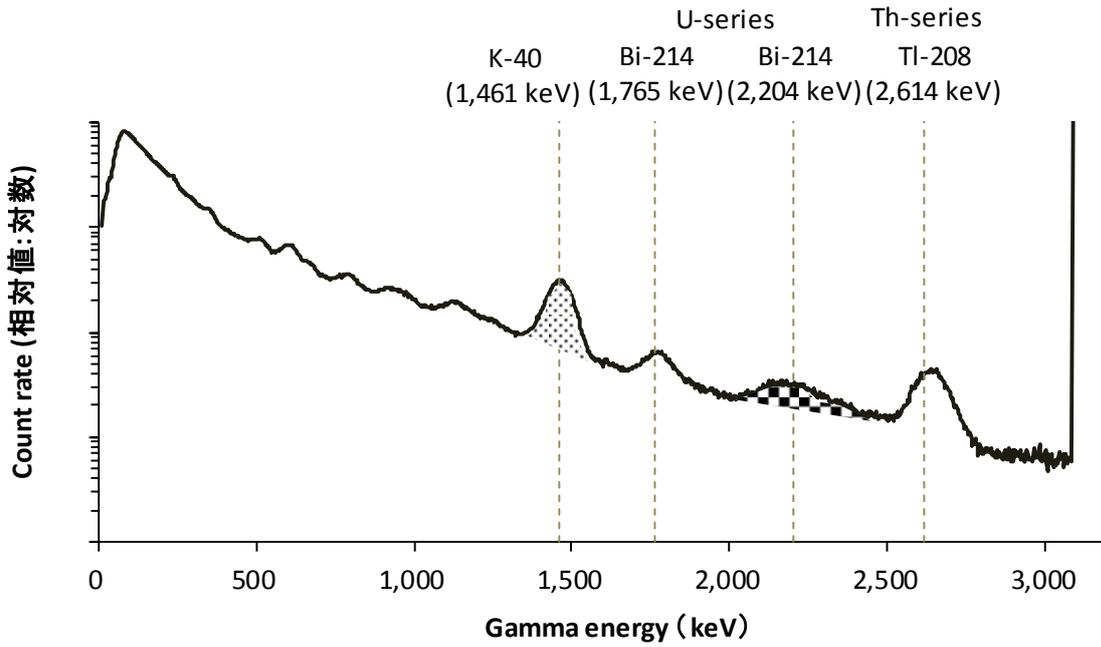


Fig. 3-21 天然の放射性核種によるピーク解析例

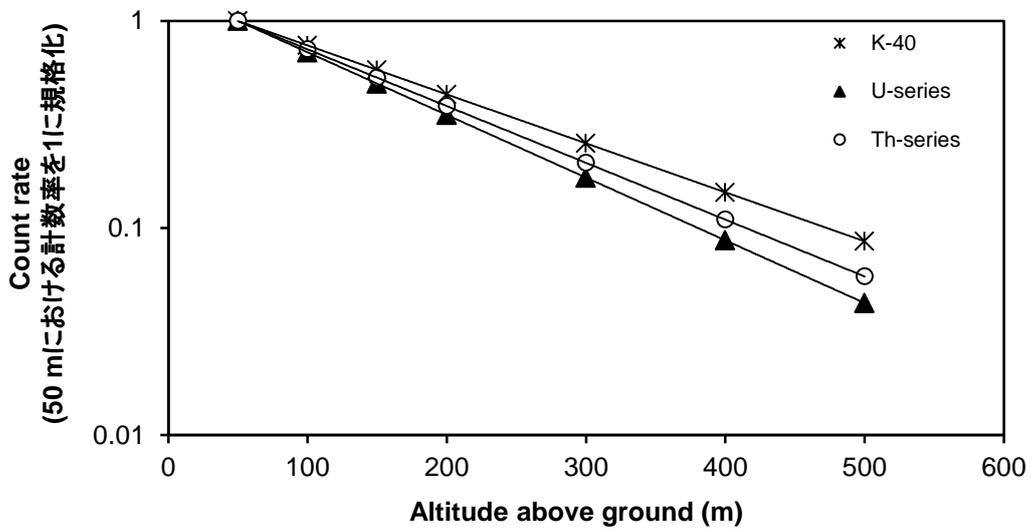


Fig. 3-22 天然の放射性核種別の高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション)

Table 3-4 天然の放射性核種濃度に換算するためのパラメーター一覧

Measurement area	Parameters	<sup>40</sup> K	U-series	Th-series
Shimane	CC (cps/[Bq/kg])	0.048	0.37	0.09
	AF (m <sup>-1</sup> )*	-0.0054	-0.0070	-0.0063
Hamaoka	CC (cps/[Bq/kg])	0.047	0.27	0.09
	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、AF を求めた。Fig. 4-1 に対地高度と計数率の関係の例について示す。AF の数値は、テストラインで測定したデータを使用した。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、地上にテストポイントにおける 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記載した。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データと同等の数値であり、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。

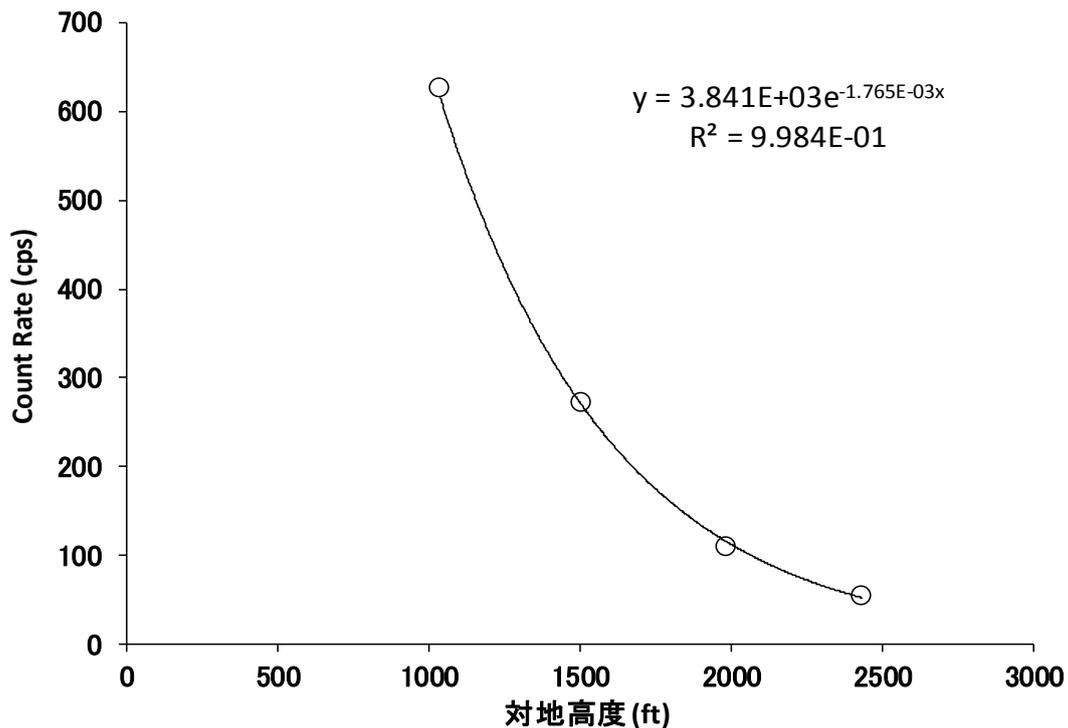


Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例

(誤差は1秒ごとのデータの標準偏差、Bell 412 JA6928、2016/2/2 実施、Test line)

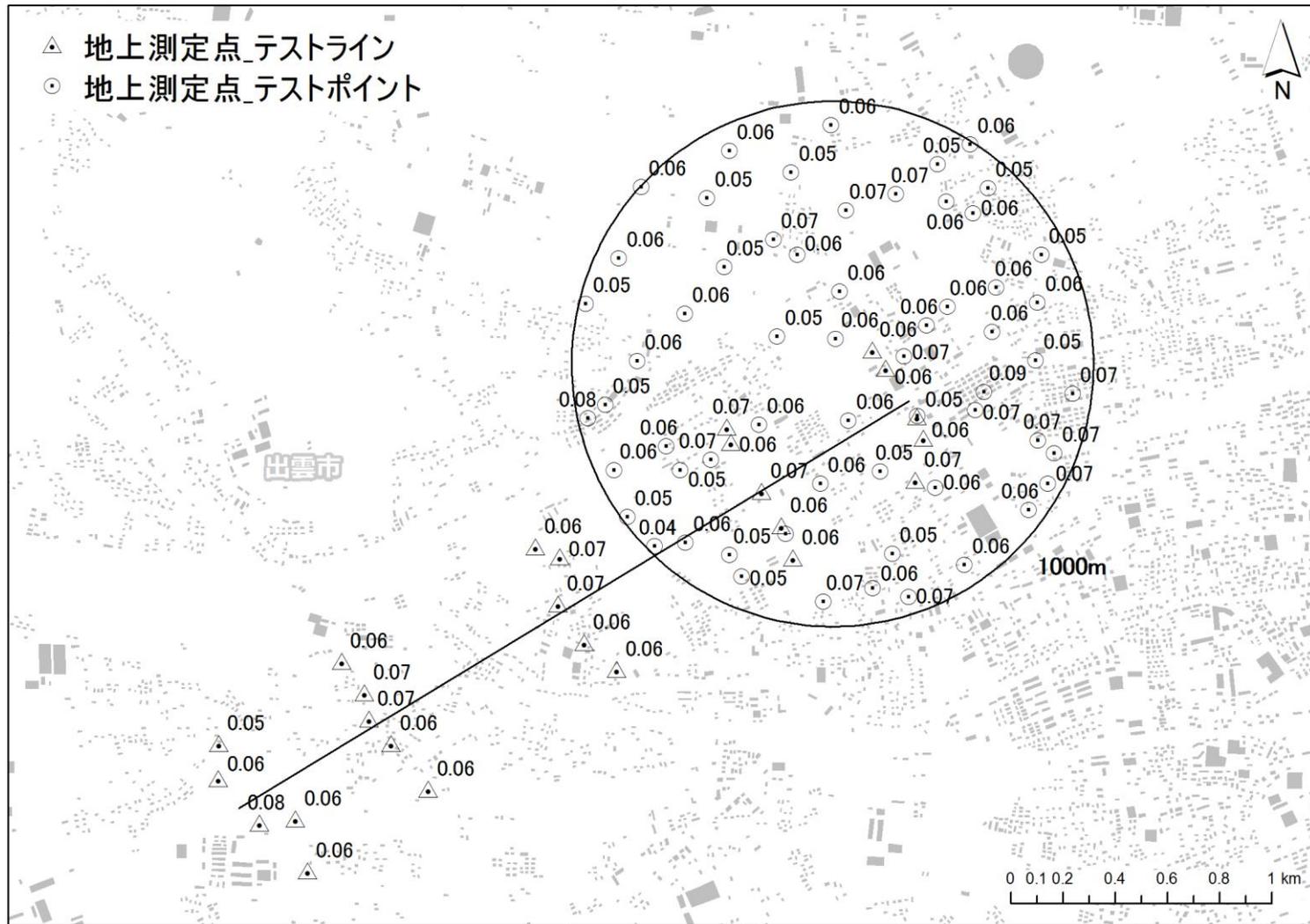


Fig. 4-2 地上測定による空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (島根)

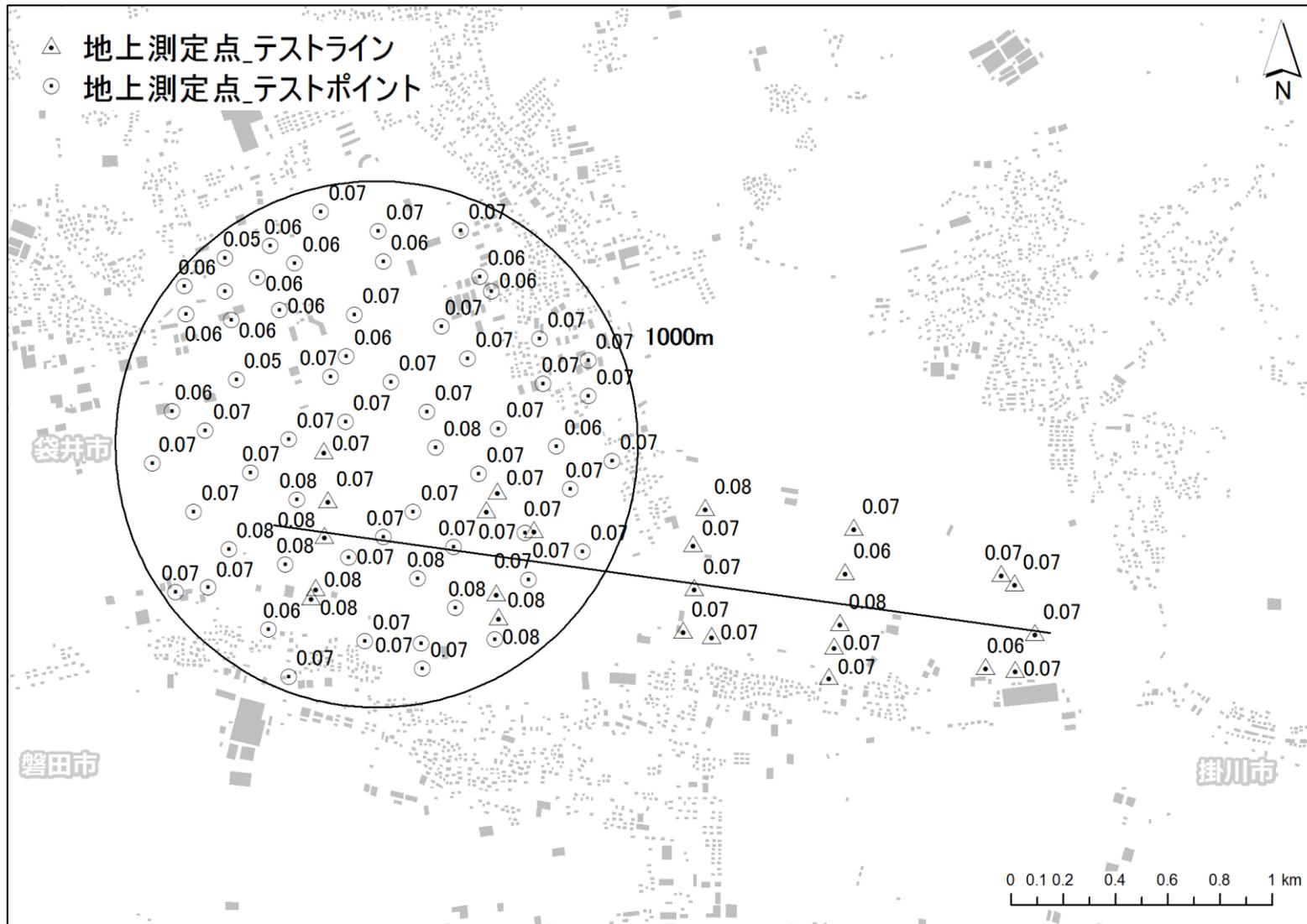


Fig. 4-3 地上測定による空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (浜岡)

Table 4-1 本事業で取得した AF データ一覧

Monitoring Area	System (Device Serial)	Helicopter		Operation company	Location	Date	AF	
		Model	Body No.				$\mu(m^{-1})$	$R^2$
Shimane	5090	Bell430	JA6900	AAC	Izumo_TestLine	2018/07/20	-0.00592	0.99985
	5090	Bell430	JA6900	AAC	Izumo_TestLine	2018/07/25	-0.00548	0.99999
<b>Average</b>							<b>-0.00570</b>	
Hamaoka	5090	Bell430	JA05TV	NNK	Fukuroi_TestLine	2018/11/30	-0.00531	0.99997
	5090	Bell430	JA05TV	NNK	Fukuroi_TestLine	2018/12/02	-0.00686	0.99985
<b>Average</b>							<b>-0.00609</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、NNK: 中日本航空株式会社

Table 4-2 本事業で取得した CD データ一覧

Helicopter Model	Monitoring Area	Date	Body No.	Operation company	System (Device Serial)	Detector	Location	Ground data (Nal 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	Shimane	2018/7/20	JA6900	AAC	SN:5090	DPU1 SN:7306	Isumo_ TestPoint	0.06	0.013	23	2196	118	5	299	14	5	13200
						SN:2241 SN:2266 SN:2239											
		DPU2 SN:7307	Isumo_ TestPoint	0.06	0.017	29	1302	99	8	350	14	4					
		SN:2241 SN:2266 SN:2239 SN:2146 SN:2150 SN:2092															
2018/7/25	JA6900	AAC	SN:5090	DPU1 SN:7306	Isumo_ TestPoint	0.06	0.017	29	1302	99	8	350	14	4	13900		
DPU2 SN:7307	SN:2241 SN:2266 SN:2239 SN:2146 SN:2150 SN:2092																
<b>Average 13600</b>																	
Bell 430	Hamaoka	2018/11/30	JA05TV	NNK	SN:5090	DPU1 SN:7306	Fukuroi_ TestPoint	0.07	0.007	10	1781	107	6	279	11	4	12000
						SN:2241 SN:2266 SN:2239											
		DPU2 SN:7307	Fukuroi_ TestPoint	0.07	0.013	18	1495	392	26	291	35	12					
		SN:2241 SN:2266 SN:2239 SN:2146 SN:2150 SN:2092															
2018/12/2	JA05TV	NNK	SN:5090	DPU1 SN:7306	Fukuroi_ TestPoint	0.07	0.013	18	1495	392	26	291	35	12	9900		
DPU2 SN:7307	SN:2241 SN:2266 SN:2239 SN:2146 SN:2150 SN:2092																
<b>Average 11000</b>																	

※NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社、SD: 標準偏差、RSD: 相対標準偏差

**Table 4-3** 使用した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		S76	
		Value	Number	Value	Number	Value	Number
Shimane	AF ( $m^{-1}$ )	/		-0.0057	2	/	
	CD (cps/ $[\mu Sv/h]$ )			13900	2		
Hamaoka	AF ( $m^{-1}$ )	/		-0.0061	2	/	
	CD (cps/ $[\mu Sv/h]$ )			12000	2		
Fukushima	AF ( $m^{-1}$ )	-0.0072 $\pm$ 0.00042	21	-0.0072 $\pm$ 0.00040	35	-0.0072 $\pm$ 0.00052	2
	CD (cps/ $[\mu Sv/h]$ )	11000 $\pm$ 2100	42	13000 $\pm$ 2800	65	14300	

※S-76のCDに関しては、福島第11次におけるBell430とのオーバーラップフライトの結果を基に設定された。

## 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、測定対象区域から地形的に平坦な場所がかつヘリコプターの測線下の地点を選定し、地上において、1 m 高さの空間線量率を NaI サーベイメータ (日立製作所社製 TCS-172B) を用いて空間線量率の測定を行った。測定した地上の測定点について Fig. 4-4 (島根)、Fig. 4-5 (浜岡) 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 (島根)、Fig. 4-7 (浜岡)、Fig. 4-8 (全データ) に示す。比較は、それぞれ散布図および航空機の換算結果と地上の測定結果の差の地上の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 2016 年度から 2018 年度までの全データにおいては 94% (全 279 点中 261 点)、島根においては 80% (全 30 点中 24 点)、浜岡においては 97% (全 30 点中 29 点) がファクター 0.5~2.0 に収まり、地上の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、2016 年度から 2018 年度までの全データにおいては 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をよく再現できていると思われる。一方、島根については頻度分布はばらついており、0 以上 (航空機の方が過大評価) の領域に広く分布が見られ、地上測定値の再現が難しい地点が存在することを示唆している。浜岡については 0 以下 (航空機の方が過小評価) の領域に頻度分布の偏りが見られるものの、ピーク位置、平均値および中央値は 0 付近となり、地上測定をよく再現できていると思われる。なお、昨年度までに実施している川内原子力発電所、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および玄海原子力発電所周辺で取得した航空機モニタリングによる空間線量率値と地上値との比較を 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) 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、昨年度までに実施した地域における航空機モニタリングの結果は地上測定値をよく再現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、地上における測定は、地上 1 m 高さにおける測定範囲は半径 30 m 程度の円の放射線量の平均値となる。よって、地上の放射線分布が一樣の場所では整合しやすいが、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、建物や木自身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おいては、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。

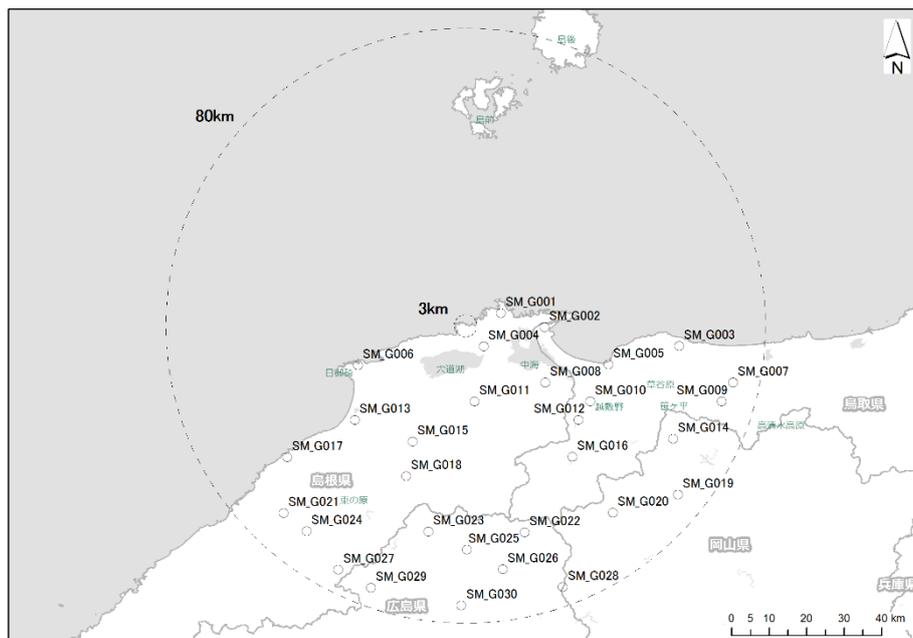


Fig. 4-4 地上における測定点 (島根)

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

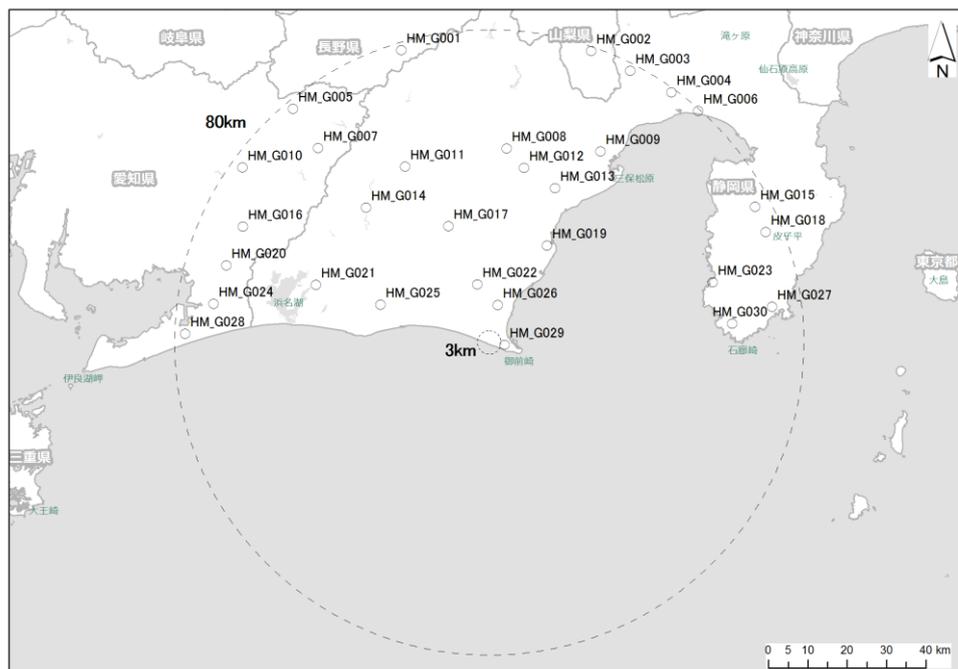


Fig. 4-5 地上における測定点 (浜岡)

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

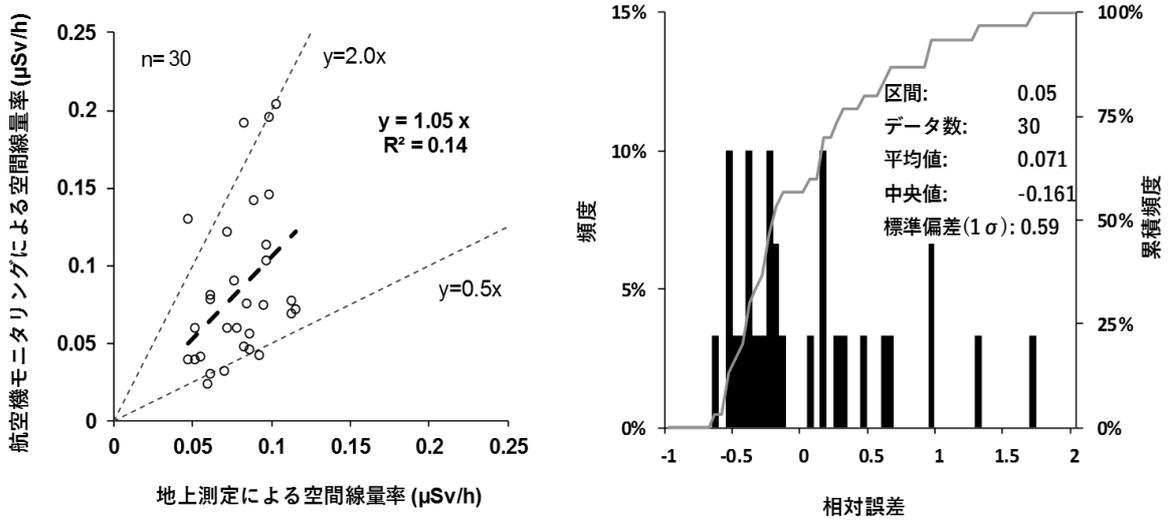


Fig. 4-6 地上における空間線量率算出結果との比較 (島根)  
(左: 散布図; 右: 相対誤差頻度分布)

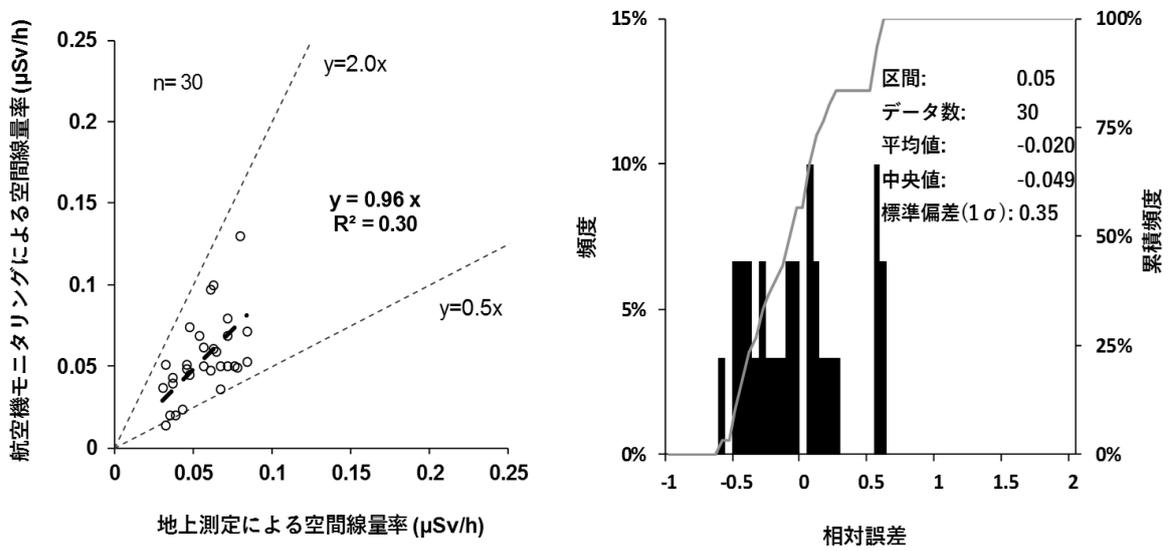


Fig. 4-7 地上における空間線量率算出結果との比較 (浜岡)  
(左: 散布図; 右: 相対誤差頻度分布)

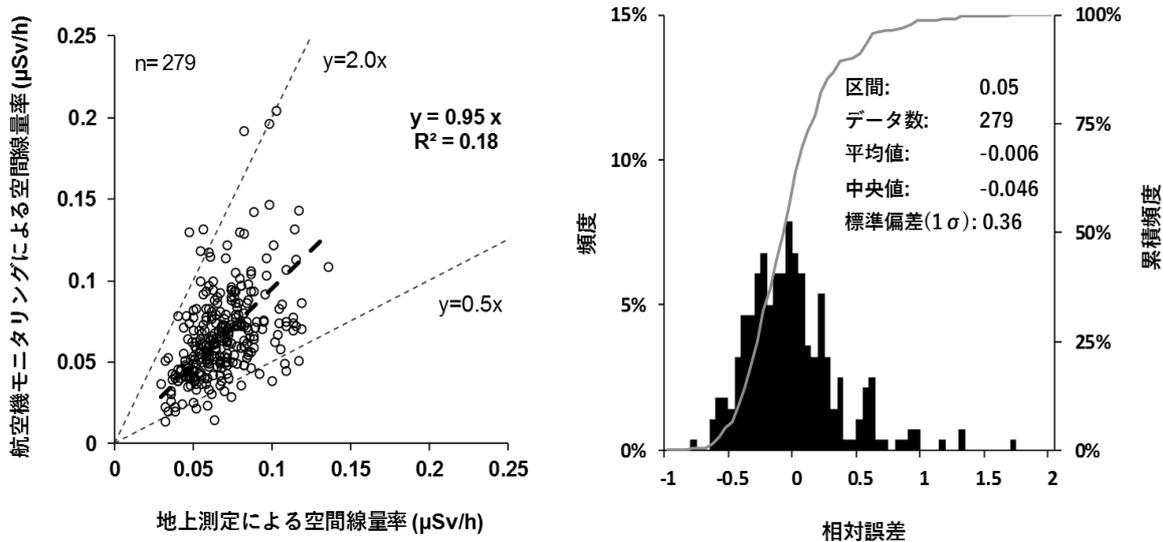


Fig. 4-8 地上における空間線量率算出結果との比較 (全データ)  
(左: 散布図; 右: 相対誤差頻度分布)

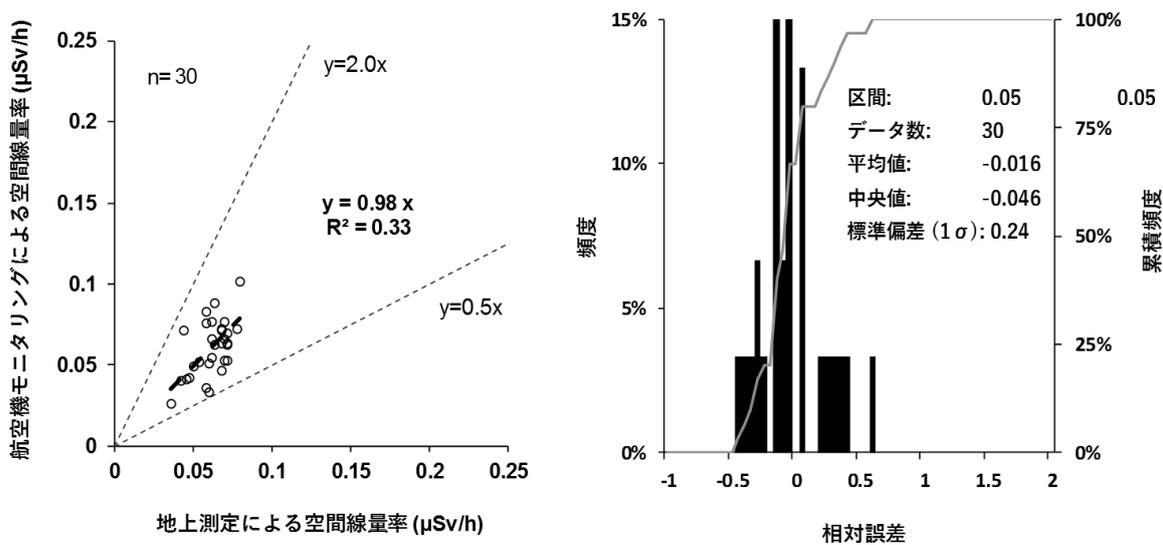


Fig. 4-9 地上における空間線量率算出結果との比較 (川内)  
(左: 散布図; 右: 相対誤差頻度分布)

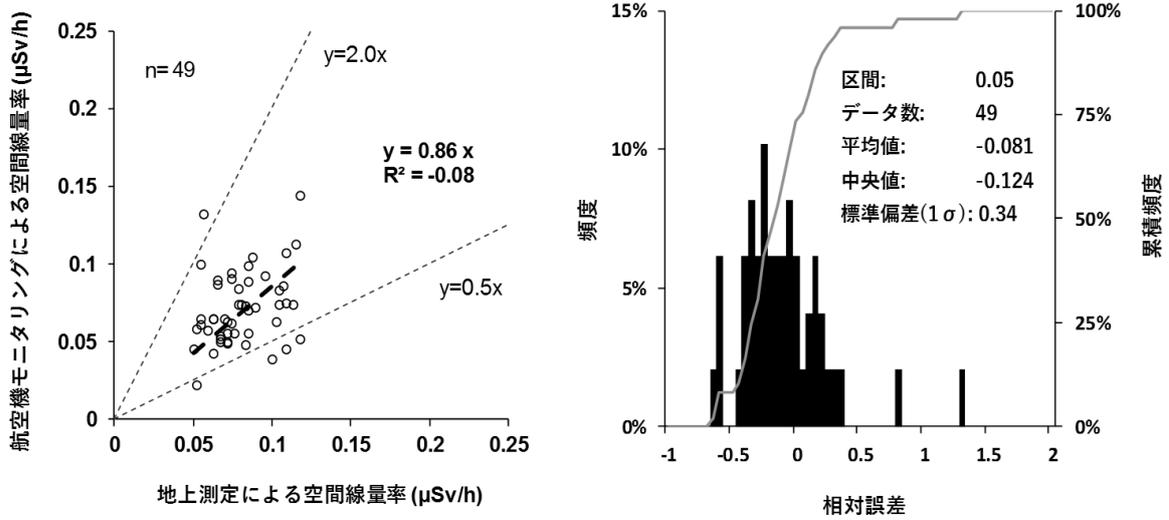


Fig. 4-10 地上における空間線量率算出結果との比較 (大飯・高浜)  
(左: 散布図; 右: 相対誤差頻度分布)

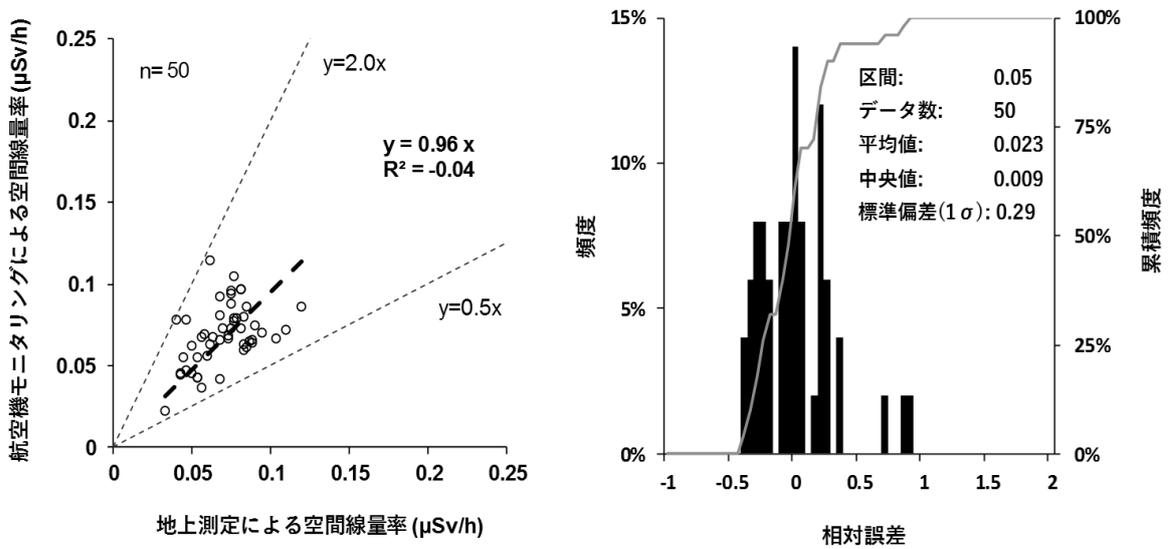


Fig. 4-11 地上における空間線量率算出結果との比較 (伊方)  
(左: 散布図; 右: 相対誤差頻度分布)

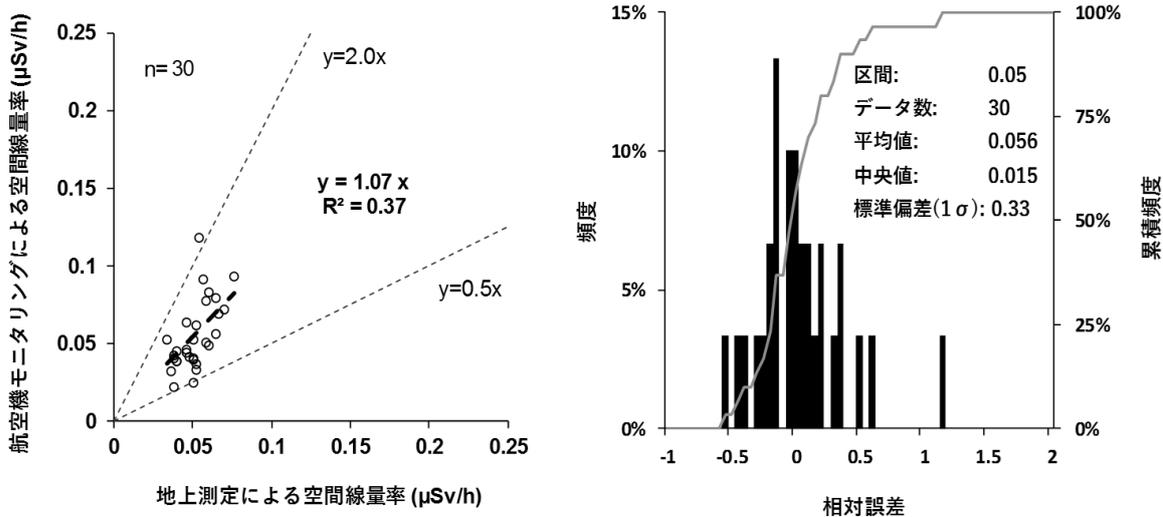


Fig. 4-12 地上における空間線量率算出結果との比較 (泊)  
(左: 散布図; 右: 相対誤差頻度分布)

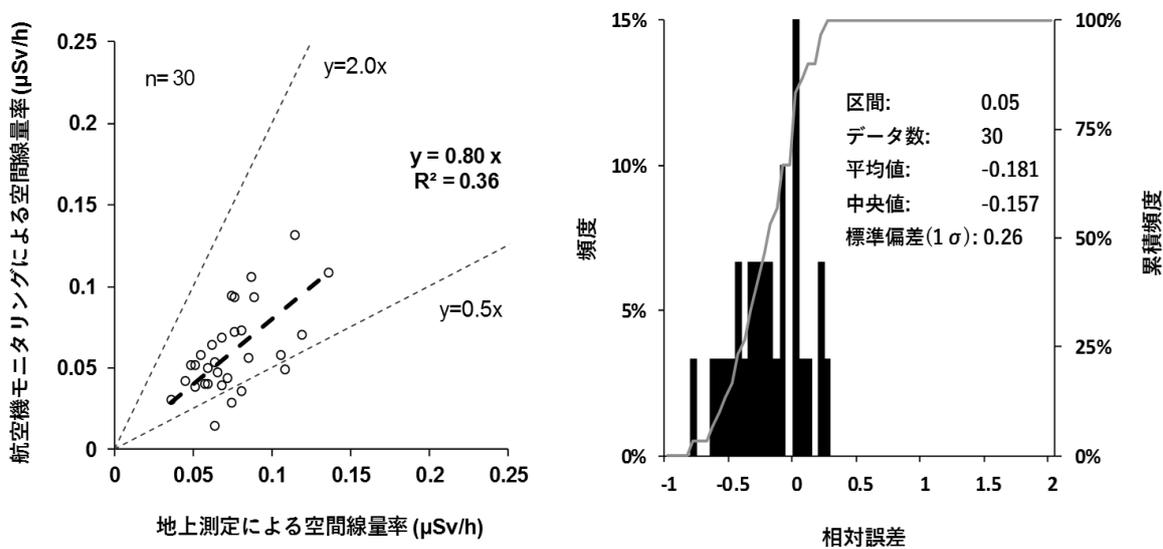


Fig. 4-13 地上における空間線量率算出結果との比較 (柏崎刈羽)  
(左: 散布図; 右: 相対誤差頻度分布)

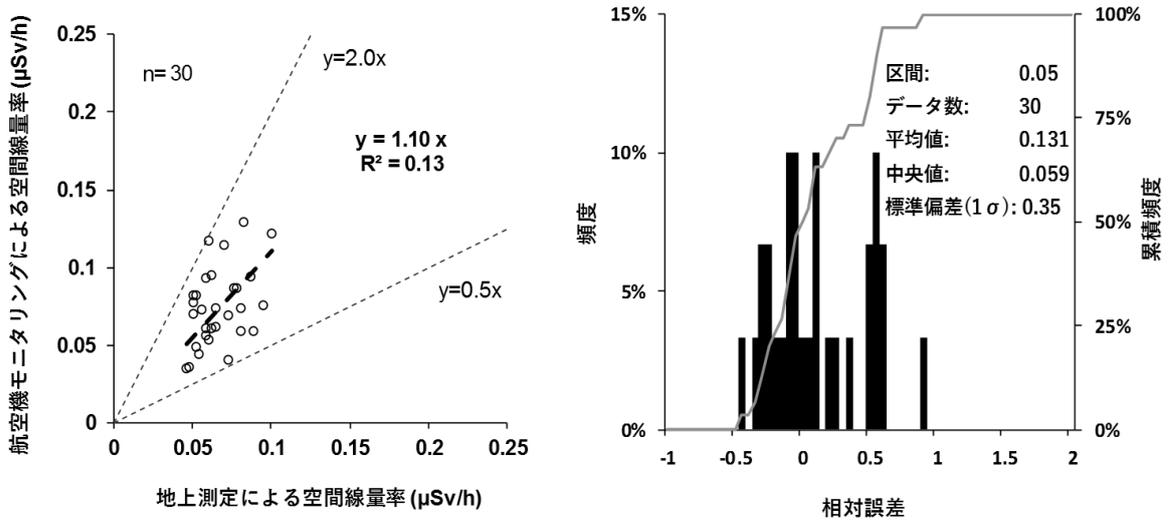


Fig. 4-14 地上における空間線量率算出結果との比較 (玄海)  
 (左: 散布図; 右: 相対誤差頻度分布)

### 4.3. 空間線量率

航空機モニタリングの測定結果を基に、地上 1 m 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. 4-15 (島根)、Fig. 4-16 (浜岡) に示す。なお、空間線量率マップの色合いについては、福島第一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手法に準じた。空間線量率の最大値は、島根のバックグラウンドモニタリングで取得された約 0.37  $\mu\text{Sv/h}$  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>15)</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. 4-17 (島根) および Fig. 4-18 (浜岡) 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>14)</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  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Sv}$  と換算できる」<sup>15)</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 項に記述したとおり、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) を意味しており、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、計算に使用した試料の採取密度が  $10 \times 10 \text{ km}$  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。

島根については、測定範囲の南西部 (美郷町周辺) で比較的高線量率となった。日本シームレス地質図<sup>21)</sup>によると、当該地域には花崗岩質の深成岩が密に分布しており、そこから放出される  $^{40}\text{K}$  由来の  $\gamma$  線およびラドン子孫核種由来の  $\gamma$  線の影響で、空間線量率が比較的高く算出されたと推察される。しかしながら、測定範囲北側 (出雲市周辺) においては航空機モニタリングの結果と日本地質学会の計算結果とで差異が見られた。日本シームレス地質図によると、当該地域では流紋岩、安山岩、玄武岩等の火山岩類が主に分布しており、これら岩石の U、Th および K の含有量は比較的少なく、空間線量率が局所的に高くなることは考えにくい。日本地質学会による空間線量率マップでは、出雲市周辺で採取された Th 濃度約 48 ppm という高濃度な試料が計算に用いられ、そのデータの影響が近傍に拡張された可能性がある。浜岡については、全体的な傾向としては一致しているように思われる。測定範囲南西部 (浜松市周辺) において局所的に高線量率な箇所が見られた。当該箇所における地質は砂丘堆積物や海成堆積物等が主となっており<sup>21)</sup>、特に砂丘堆積物における Th 濃度は比較的高く、概ね 15 ppm 程度であるという評価例がある<sup>23)</sup>。さらに、産業技術総合研究所地質総合センター<sup>22)</sup>によると、伊良湖岬周辺における土壌試料に Th 濃度約 223 ppm と非常に高濃度なものが存在しており、この影響が近傍に拡張され、浜松市周辺の空間線量率が比較的高く算出されたものと推察される。

今回、航空機モニタリングで測定した結果は、Fig. 4-6 (島根)、Fig. 4-7 (浜岡) で示した地上

測定結果や過去に実施された元素の濃度実測結果から求められた空間線量率分布と、局所的な差異は認められたものの、概ね一致したことから地上の空間線量率分布をよく再現できていると思われる。

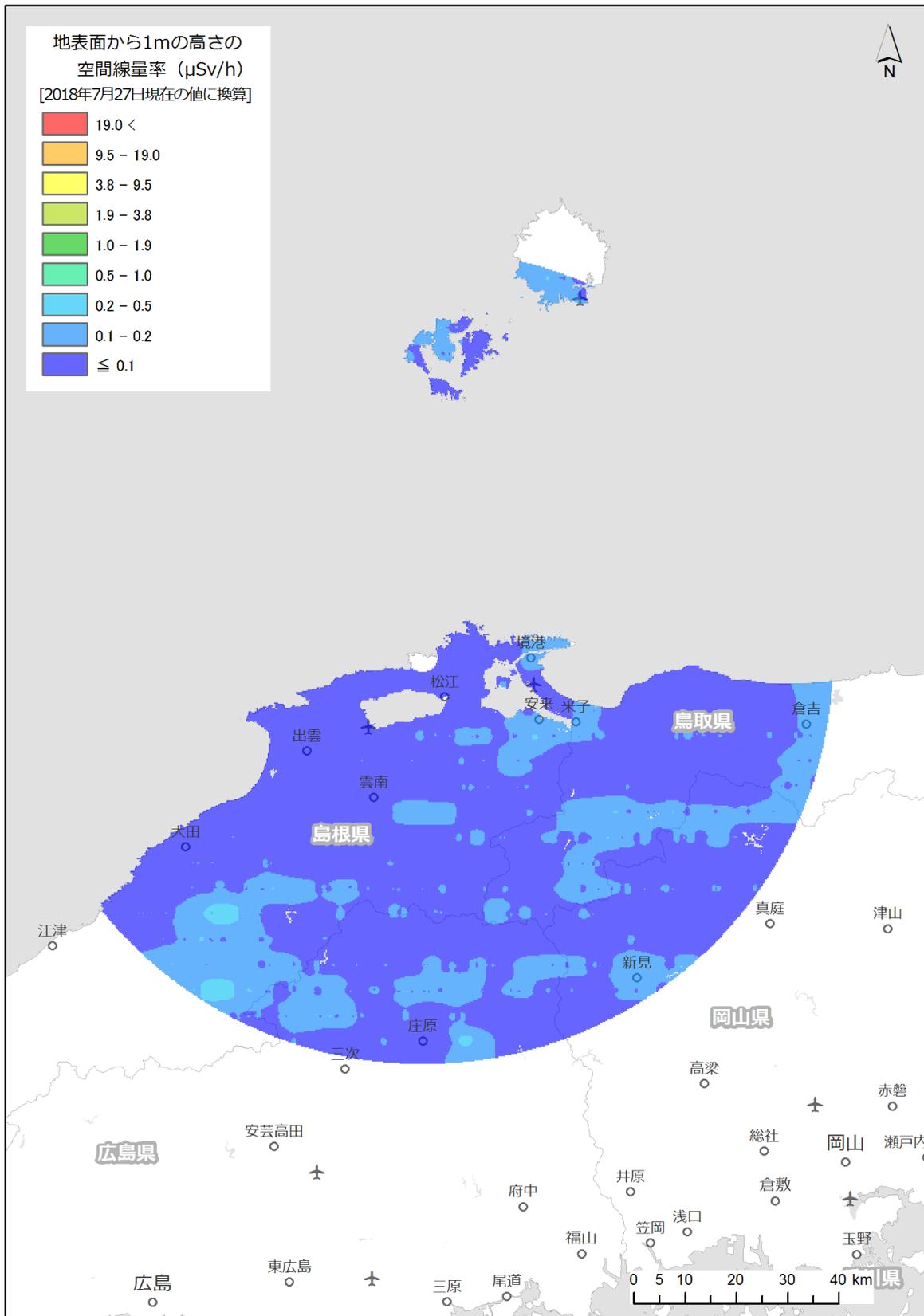


Fig. 4-15 島根原子力発電所周辺の空間線量率マップ  
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

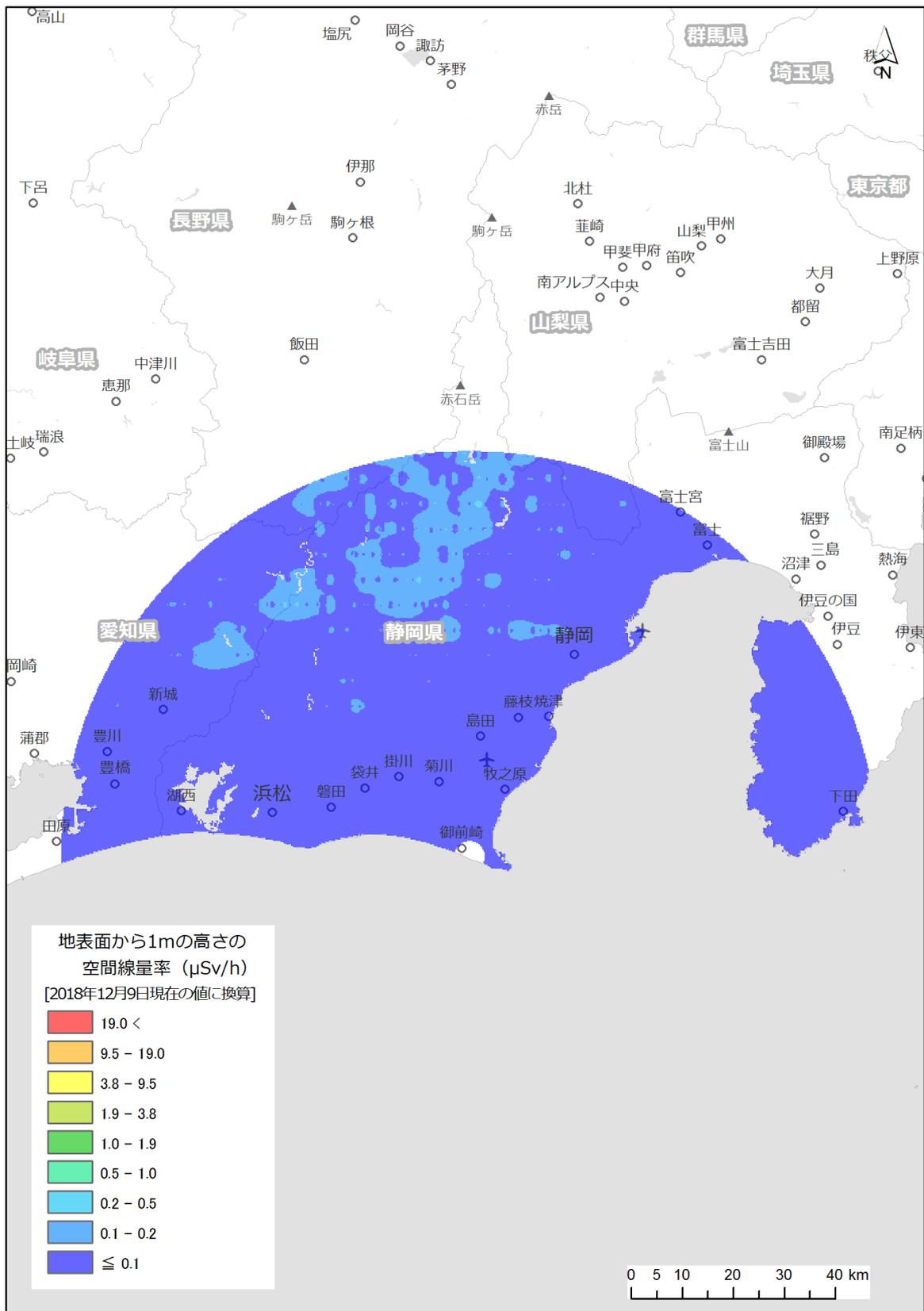


Fig. 4-16 浜岡原子力発電所周辺の空間線量率マップ

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

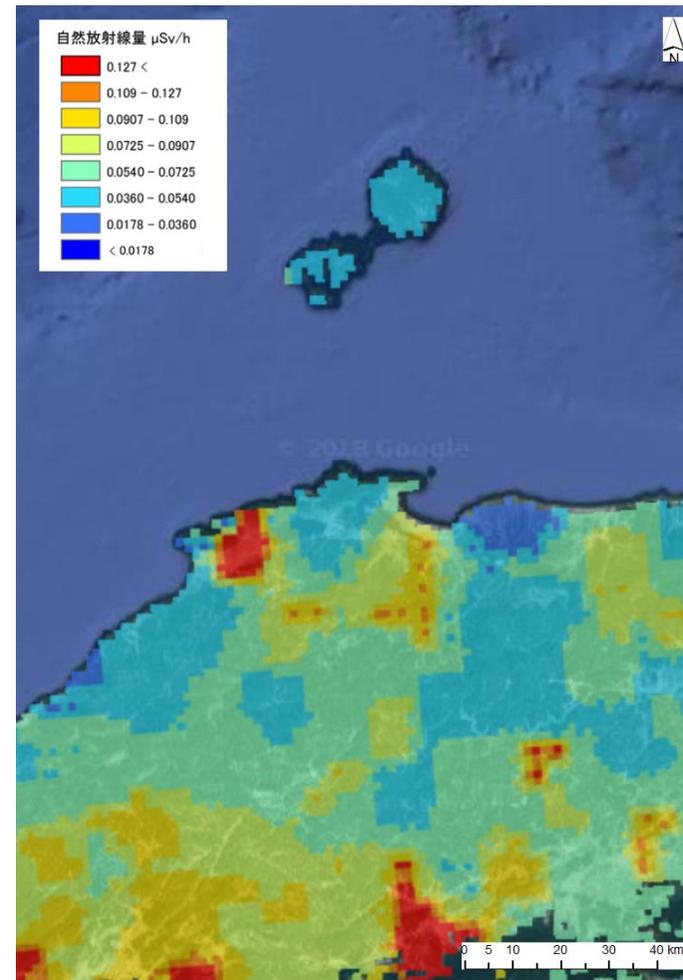
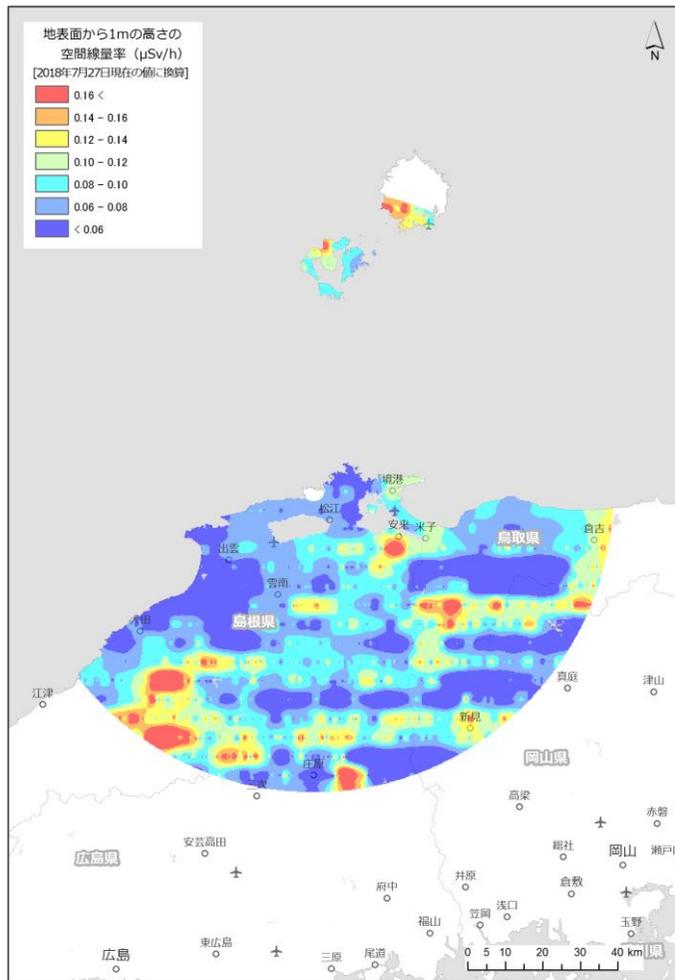


Fig. 4-17 島根原子力発電所周辺の空間線量率マップの比較

(左: 背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用、 右: 背景地図は、Google map を使用)

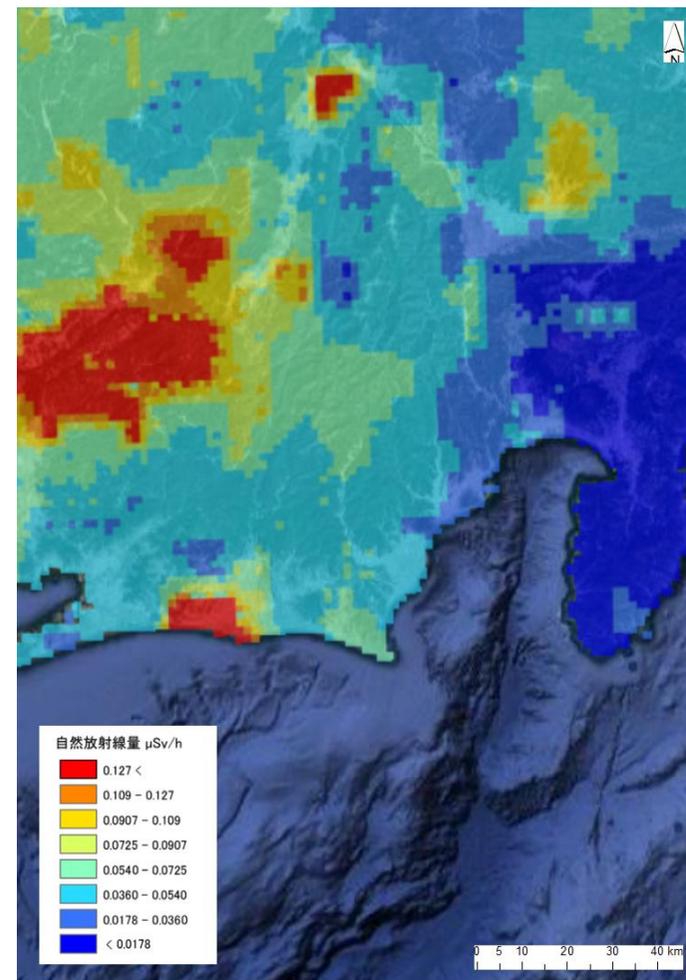
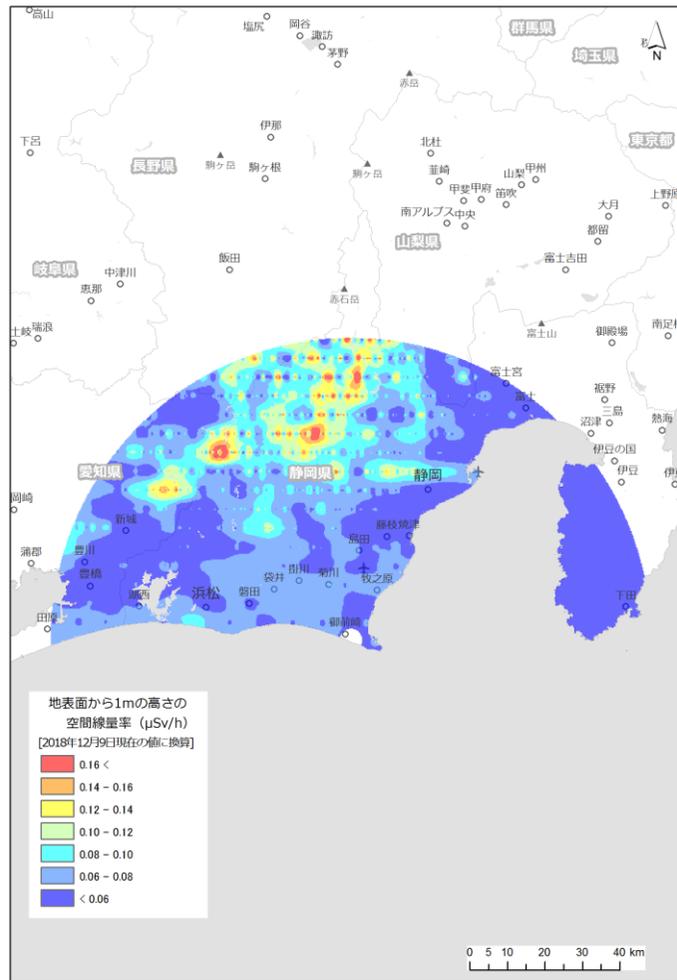


Fig. 4-18 浜岡原子力発電所周辺の空間線量率マップの比較

(左: 背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用、 右: 背景地図は、Google map 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マップ化した結果を  $^{40}\text{K}$ 、U-series および Th-series について、それぞれ Fig. 4-19、Fig. 4-20、Fig. 4-21、Fig. 4-22 および Fig. 4-23、Fig. 4-24 に示す。各最大濃度を見ると  $^{40}\text{K}$ 、U-series および Th-series は、約 500 Bq/kg、約 45 Bq/kg および約 90 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 100~700 Bq/kg、10~50 Bq/kg および 7~50 Bq/kg とされており<sup>24)</sup>、Th-series を除いて濃度のレベルは概ね整合する。

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>22)</sup>を利用した。Fig. 4-25、Fig. 4-26 に海と陸の地球化学図による元素濃度マップと航空機モニタリングによる天然放射性核種マップを比較する。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 K、U および Th の濃度測定結果は 4.3 項で示した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/m<sup>2</sup>) との単純な比較は難しいが、傾向はよく一致しているように見える。島根に関しては、測定範囲北部 (出雲市周辺) において U および Th 濃度の分布傾向が海と陸の地球化学図と一致しない箇所が見られた。4.3 項にて触れたとおり、当該箇所には火山岩類が主に分布しており、上記核種濃度が高くなることは考えにくく、海と陸の地球化学図において計算に用いられた採取試料濃度の局所的な影響が周辺に拡張されたものと思われる。浜岡についても測定範囲南西部 (浜松市周辺) において U および Th 濃度の分布傾向が一致しない箇所が見られた。当該箇所についても 4.3 項で触れたとおり、海と陸の地球化学図において計算に用いられた試料に、その周囲と比較して U 濃度および Th 濃度が高いものが含まれており、航空機モニタリングではこの局所的な核種濃度分布を再現できなかつたと推察される。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。

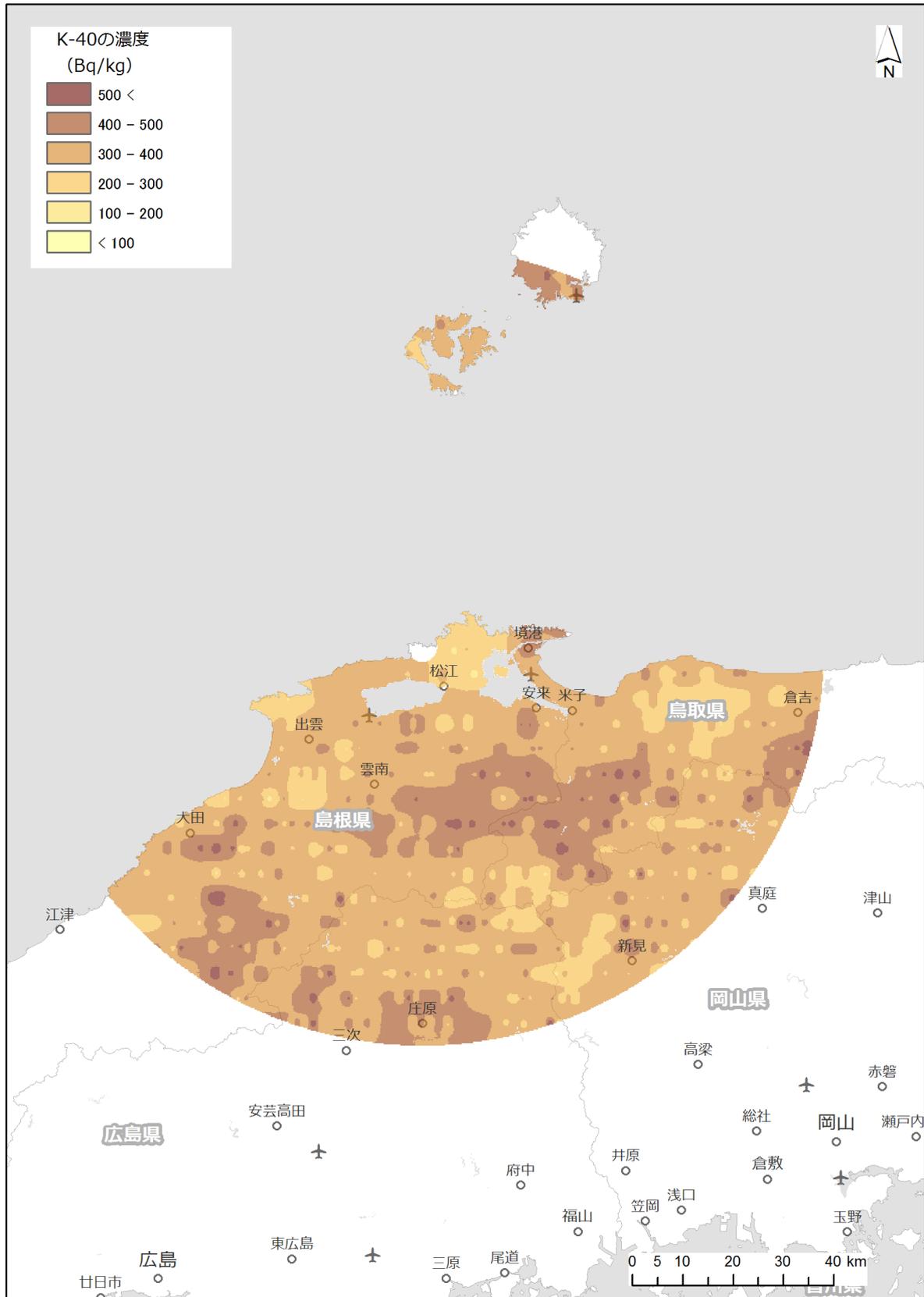


Fig. 4-19 島根原子力発電所周辺の<sup>40</sup>K濃度マップ

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

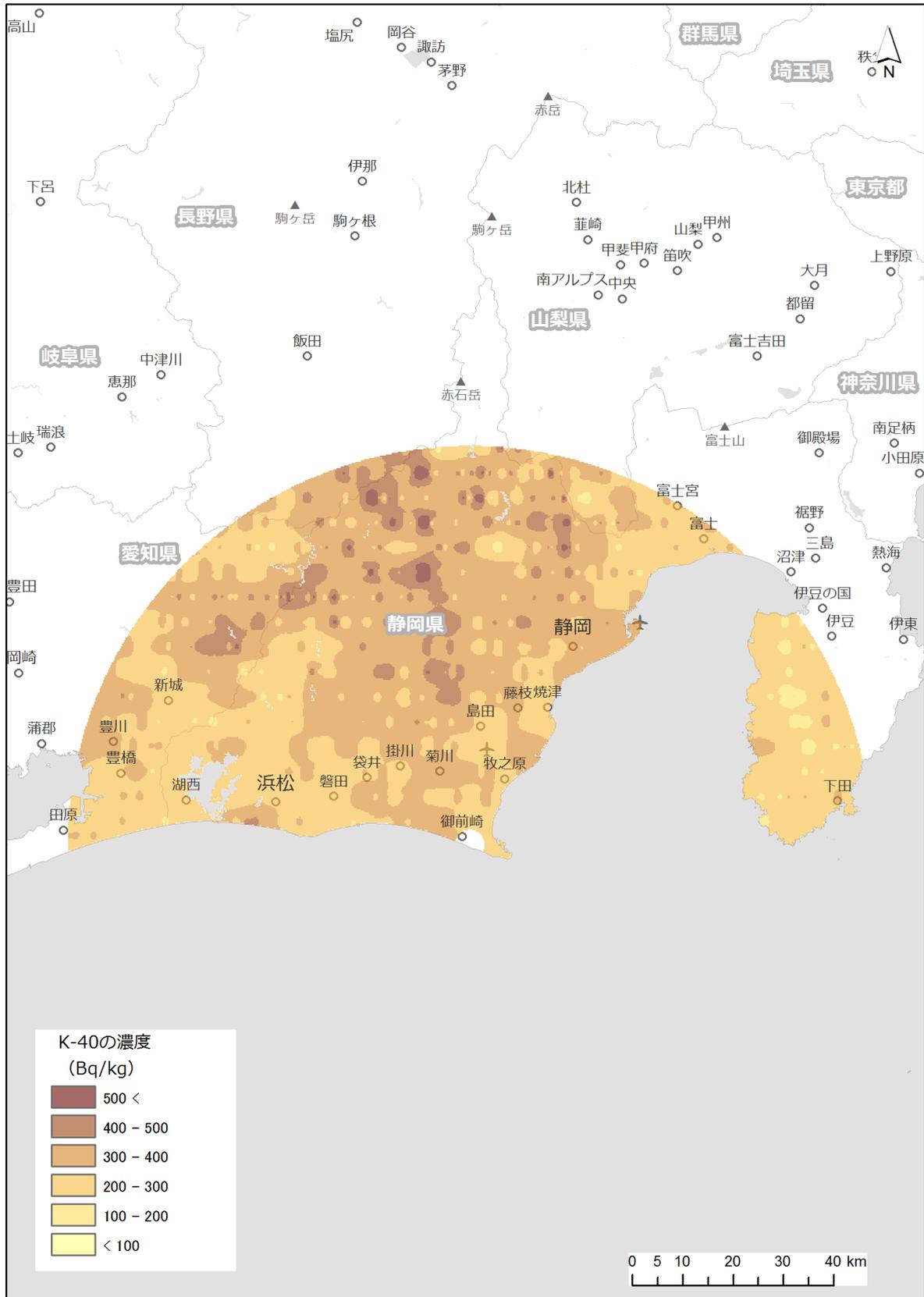


Fig. 4-20 浜岡原子力発電所周辺の<sup>40</sup>K濃度マップ  
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

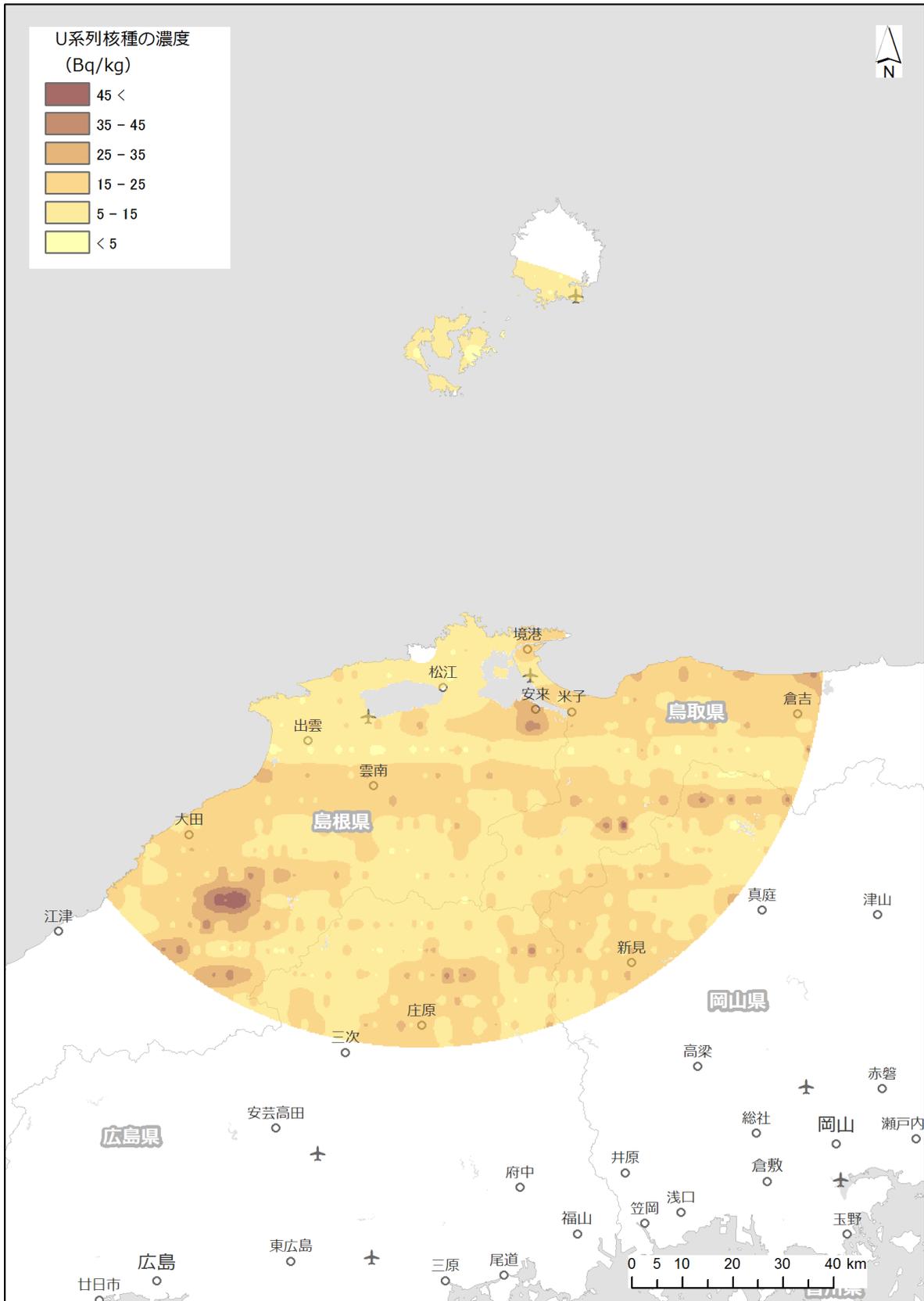


Fig. 4-21 島根原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ  
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

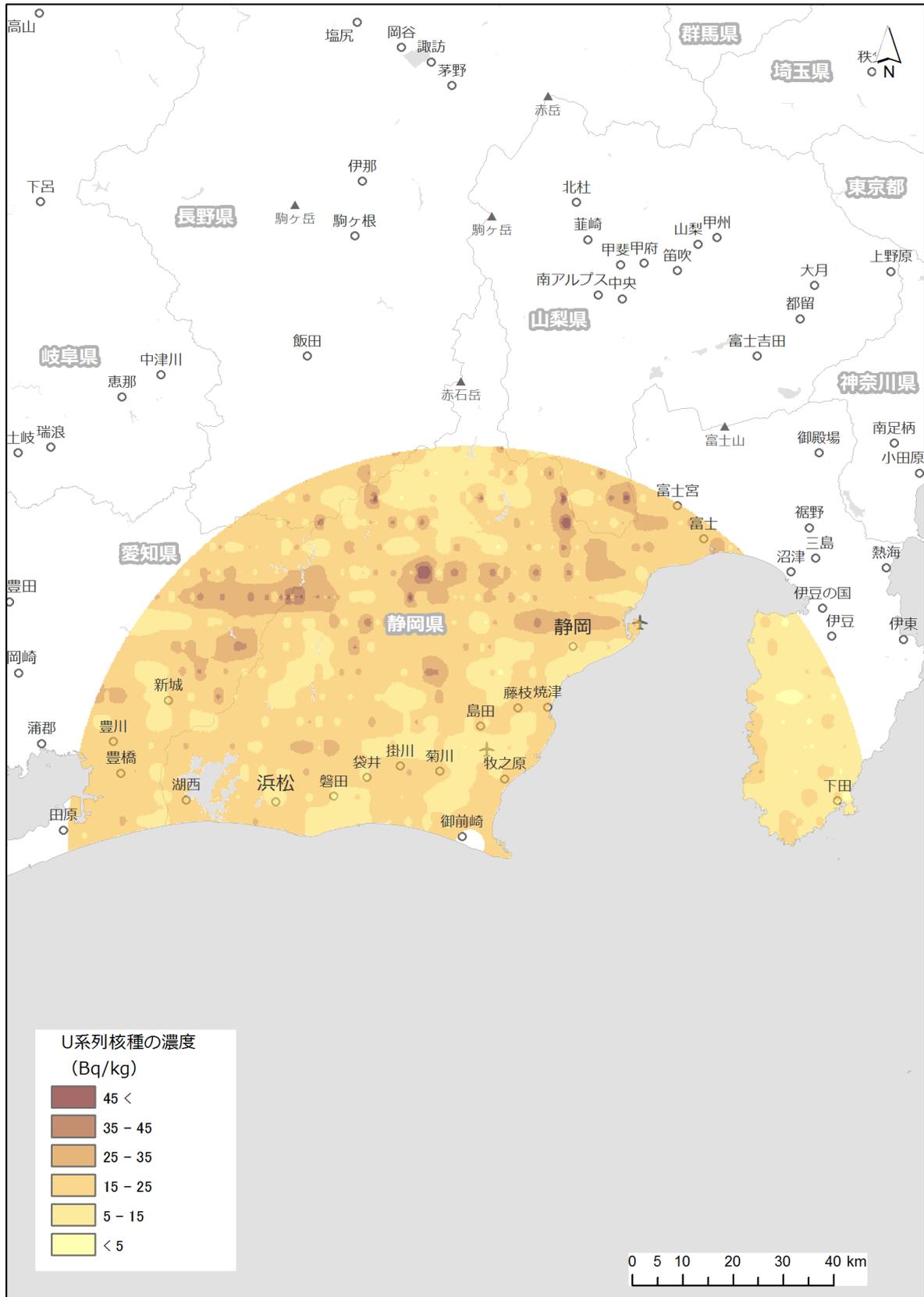


Fig. 4-22 浜岡原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ  
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

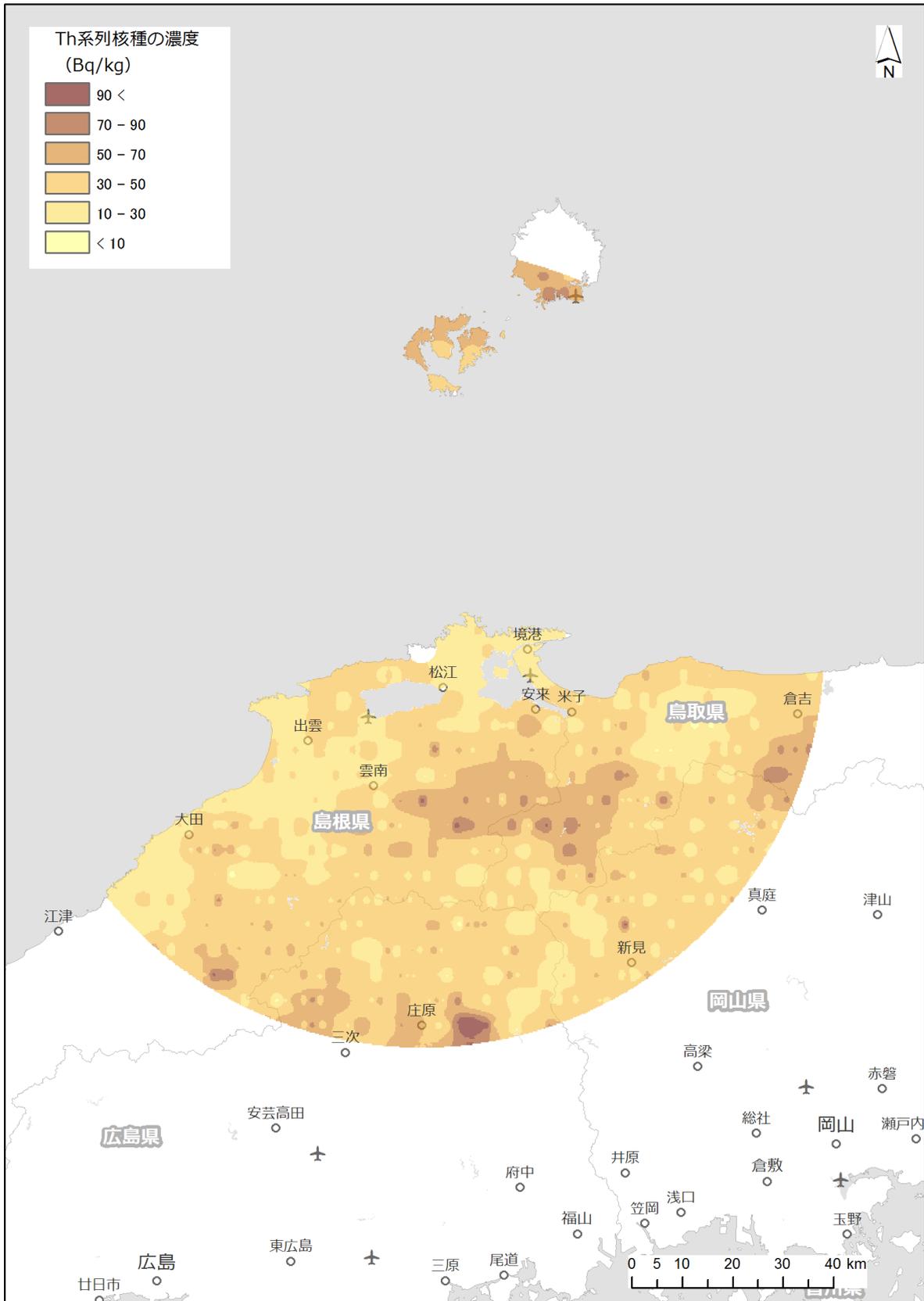


Fig. 4-23 島根原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ  
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

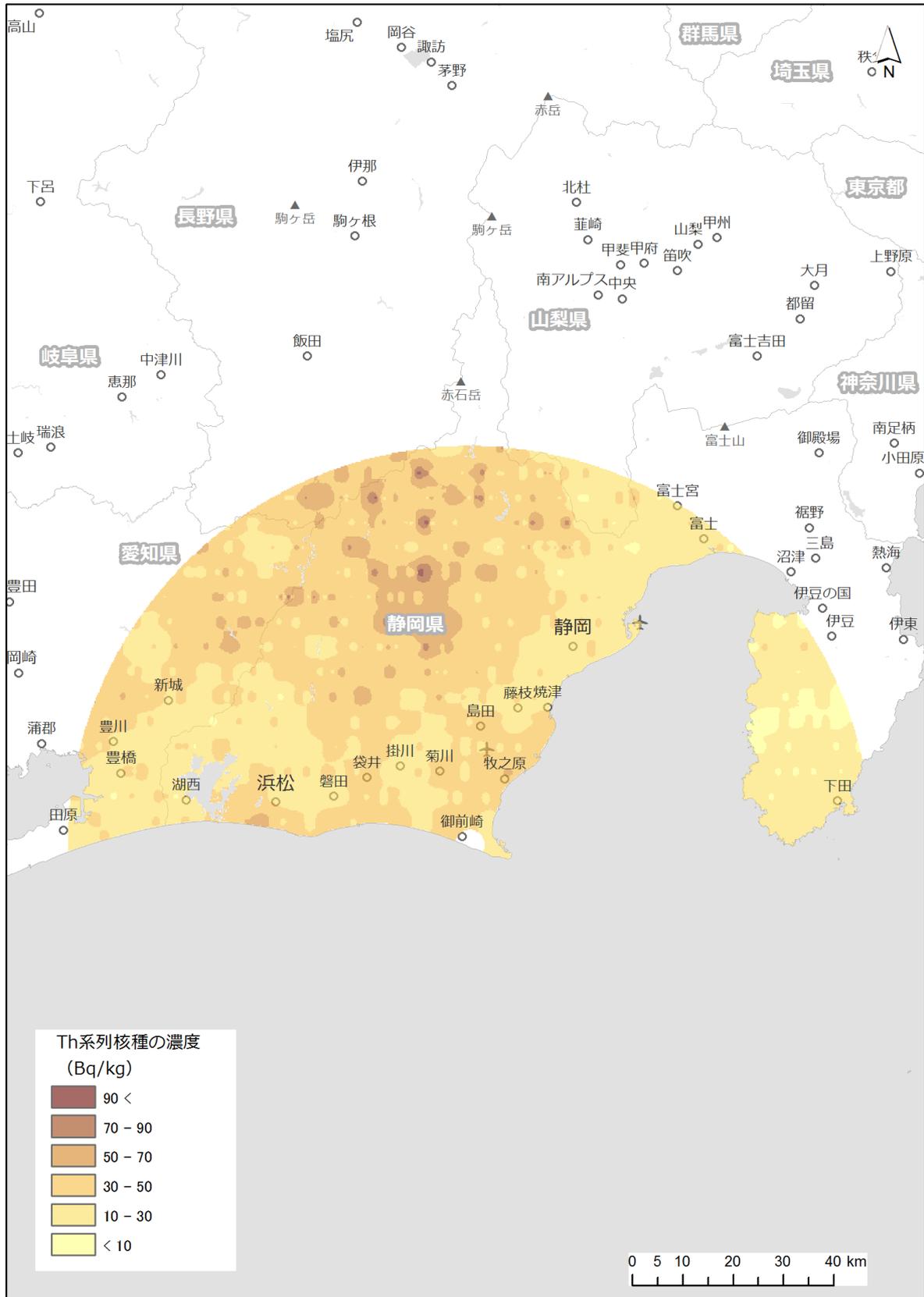


Fig. 4-24 浜岡原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ  
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

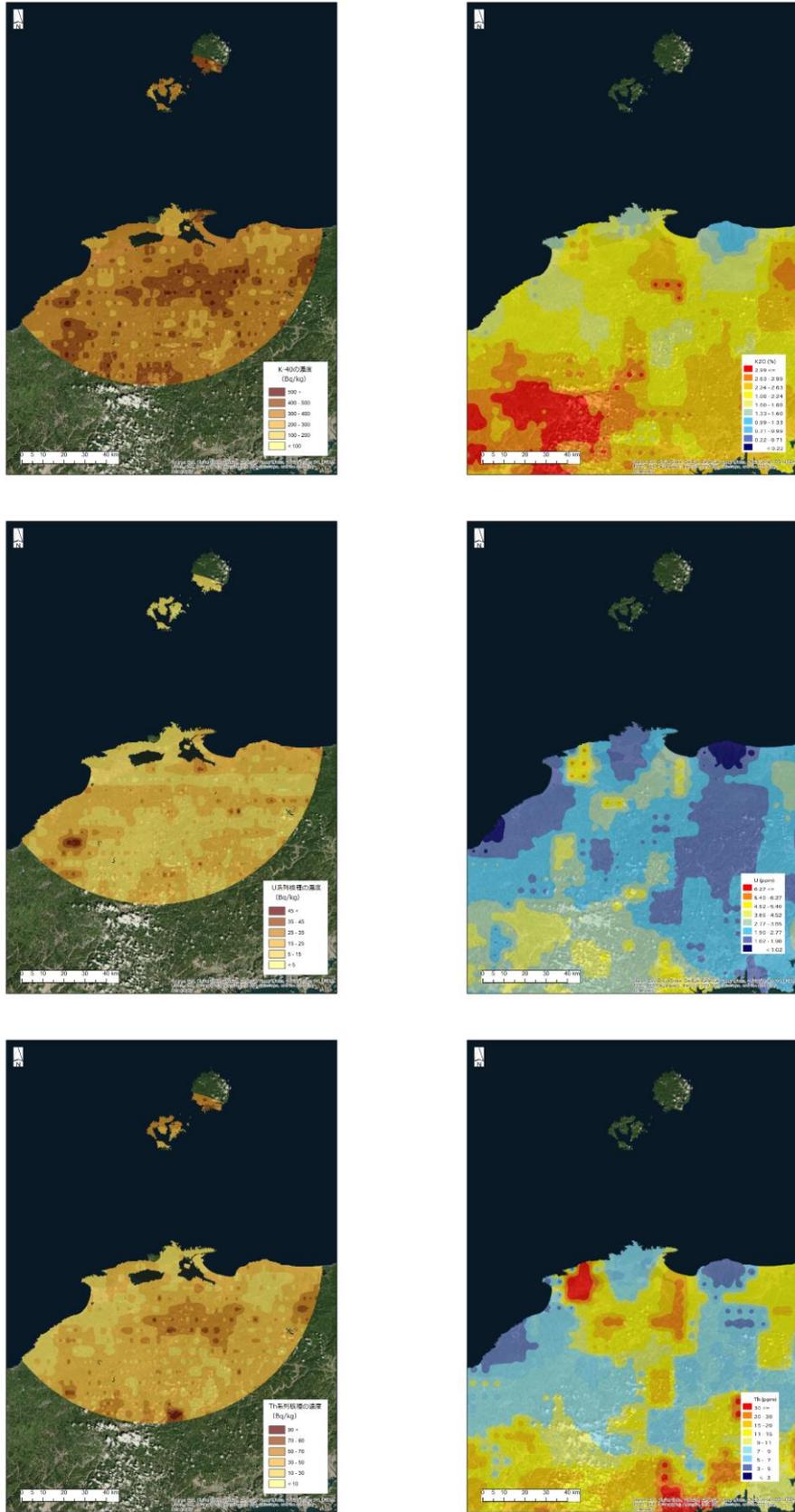


Fig. 4-25 島根原子力発電所周辺の放射性核種濃度測定結果と地球化学図比較  
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



## 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。

島根原子力発電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 290~320 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. 4-27 (a) に示す。また、浜岡原子力発電所で取得した同様の結果を Fig. 4-27 (b) に示す。なお、島根原子力発電所では Bell 430 (JA6900)、浜岡原子力発電所では Bell 430 (JA05TV) をそれぞれ使用した。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 3 つの発電所における散布図は、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 150~450 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。島根原子力発電所、浜岡原子力発電所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. 4-28 (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	
島根BGモニタリング	2018/7/20	2018/7/27	25.3	30.5	Bell430	JA6900
福島13次モニタリングA班	2018/9/6	2018/10/16	23.6	29.6	Bell430	JA05TV
福島13次モニタリングB班	2018/9/6	2018/10/16	25.1	32.5	Bell430	JA6900
東日本9次モニタリングA班	2018/10/8	2018/10/19	23.6	30.5	Bell430	JA05TV
	2018/10/24	2018/11/15	23.0	32.3	S-76	JA6655
東日本9次モニタリングB班*	2018/10/8	2018/11/8	22.8	31.2	Bell412	JA6767
	2018/11/8	2018/11/15			Bell430	JA05TV
浜岡BGモニタリング	2018/11/27	2018/12/9	20.8	29.0	Bell430	JA05TV

\* 同じ数値を使用

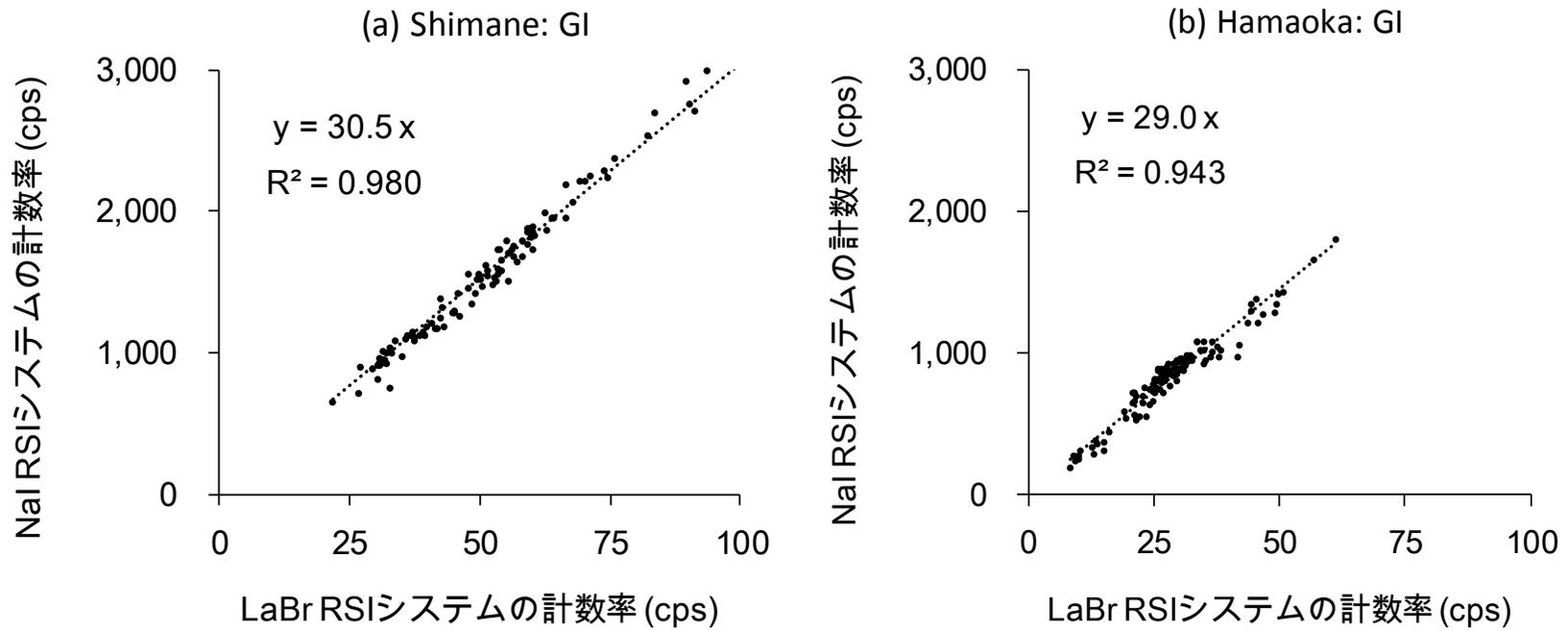


Fig. 4-27 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係  
(1次近似曲線の傾きを GI と定義)

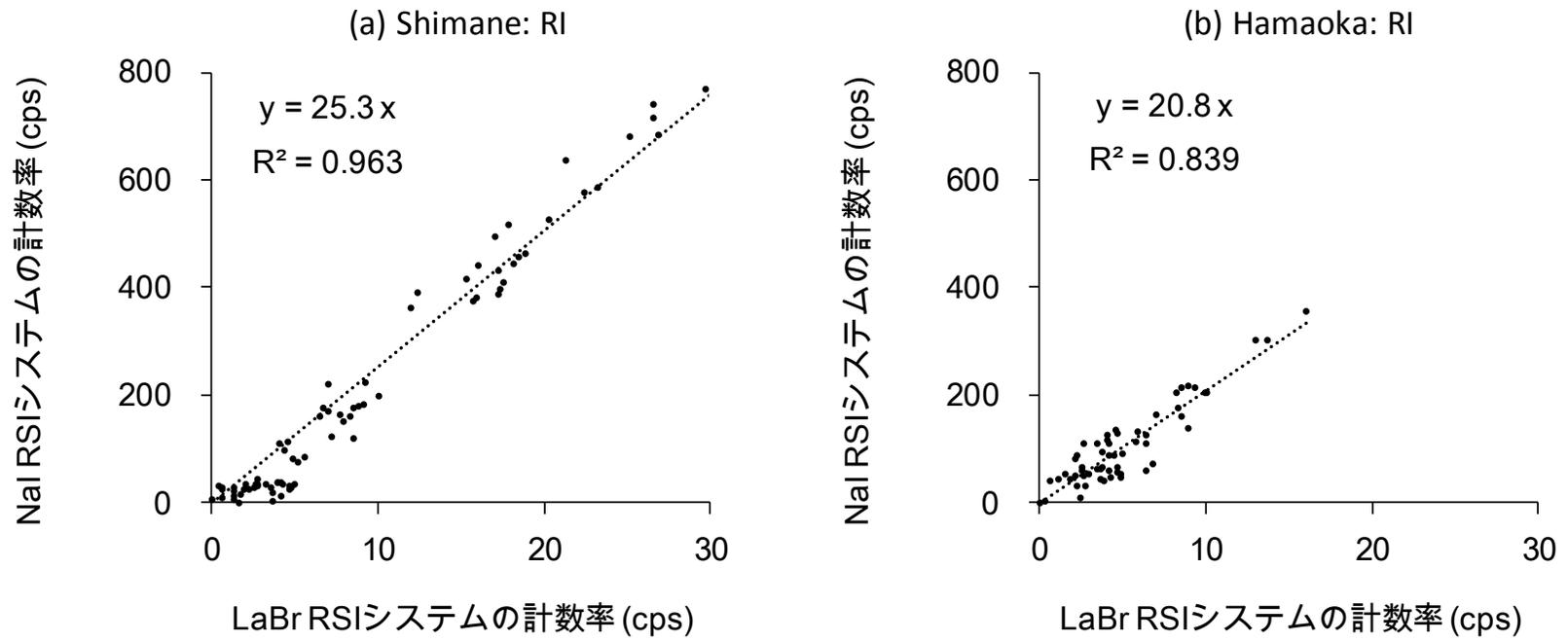


Fig. 4-28 海上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係  
(1次近似曲線の傾きを RI と定義)

#### 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 BG 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、バックグラウンド計数率として差し引いている。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て算出したバックグラウンド計数率とラドン弁別手法に基づいたバックグラウンド計数率の比較を行った。従来法で求めた測定日ごとのバックグラウンド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. 4-29 に示す。本図には比較のため、本年度に実施した福島第一原子力発電所から 80 km 圏内 (第 13 次モニタリング) および圏外のモニタリング結果 (第 9 次東日本モニタリング) に適用した結果についても示している。第 13 次モニタリングでは 2 種類の、第 9 次東日本モニタリングでは 3 種類のヘリコプターを用いており、本図中では F13th\_A、F13th\_B、E9th\_A および E9th\_B と表記する。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、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。

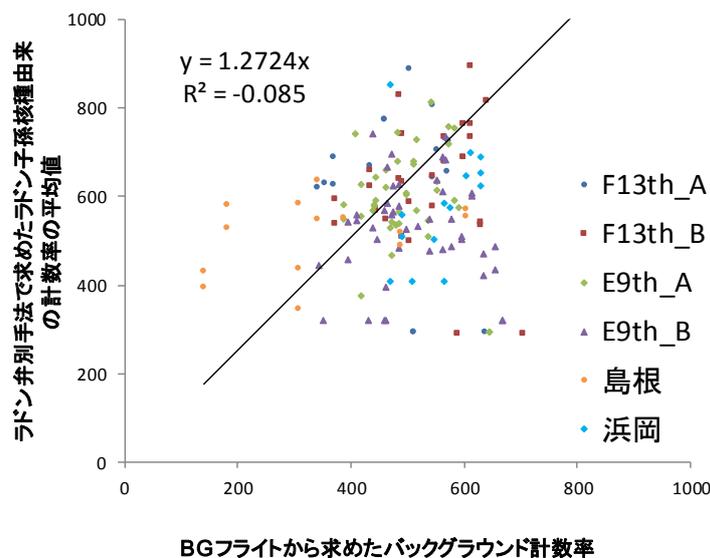


Fig. 4-29 BG フライトから求めた NaI RSI システムのバックグラウンド計数率とラドン弁別手法を適用し求めたラドン子孫核種の計数率の平均値の比較

#### 4.5.3. ラドン弁別手法の適用

ラドン弁別手法を本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ごとの 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 した場合についても解析した。得られた結果を地上における測定結果 30 点と比較し、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 BG 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、得られたデータをバックグラウンドとして差し引いている。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、BG フライトで取得したバックグラウンドを減算せずにラドン弁別手法を適用する。よって、ラドン弁別なしの空間線量率マップは Fig. 4-15、Fig. 4-16 に示したマップとは異なる。

Fig. 4-30、Fig. 4-31 に各発電所の測定結果において、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暖色系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. 4-32、Fig. 4-33 にラドン弁別手法によりバックグラウンド計数率を減算した 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。本マップは測定の時間が場所により異なるので、瞬間的な空気中のラドン子孫核種の影響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. 4-32 に島根原子力発電所の測定結果から計算した空気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 300 cps 以上となる地域がほとんどを占めた。一方、Fig. 4-33 に示した浜岡原子力発電所周辺の結果に適用した例では、測定範囲北側の山間部でラドン子孫核種由来の  $\gamma$  線計数率は比較的大きく、それ以外の平野部では比較的小さいように思われる。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 (GI =  $\pm 0$  と表記) 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. 4-34 に示す。結果の妥当性を評価するために、地上値との比較を行った。比較結果を Fig. 4-35 (島根)、Fig. 4-36 (浜岡) に示す。ラドン弁別手法適用前後で回帰直線の傾き、相関係数およびファクター 2 の収まりにおいて特筆すべき改善が見られなかった。福島第一原子力発電所から 80 km 圏外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>8)</sup>。Fig. 4-30 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。

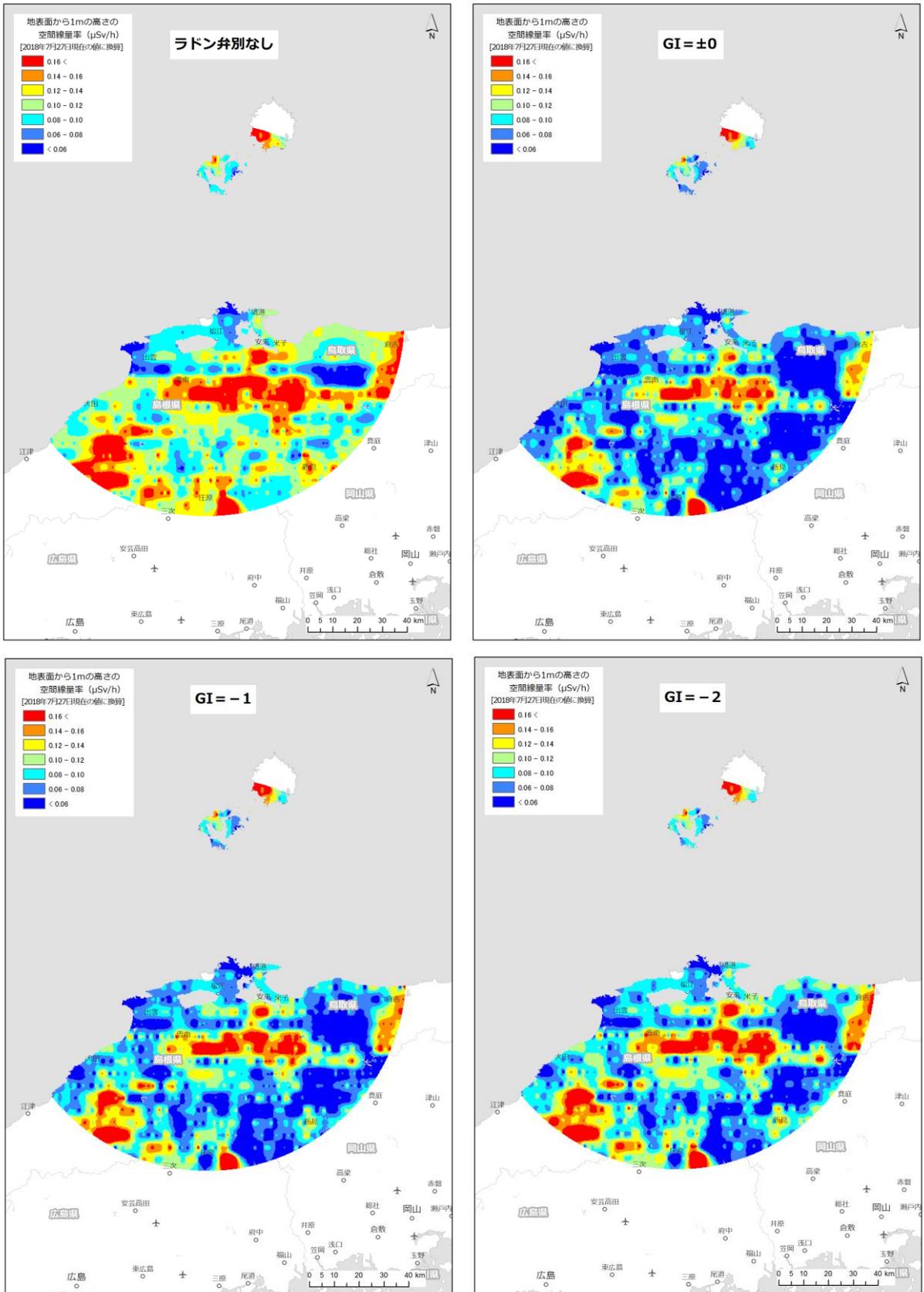


Fig. 4-30 ラドン影響弁別手法適用後の島根原子力発電所周辺における空間線量率マップ (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

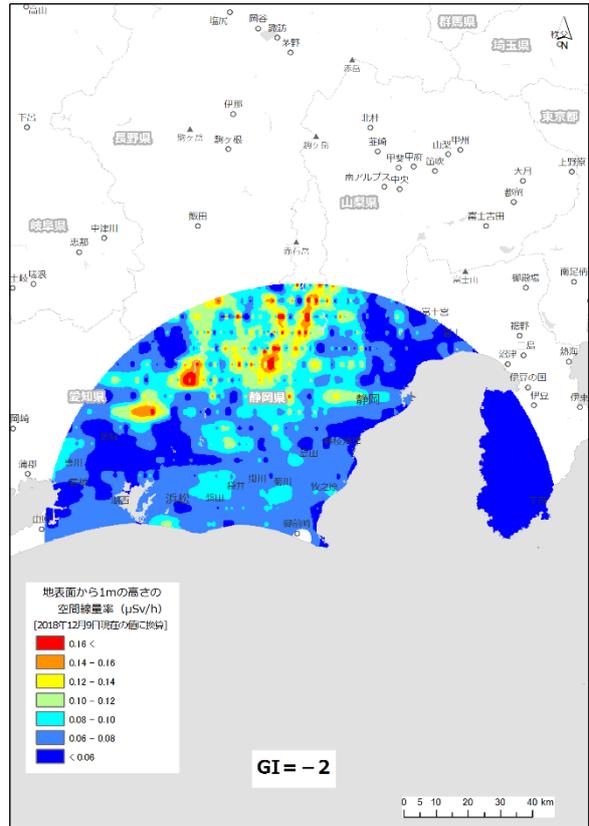
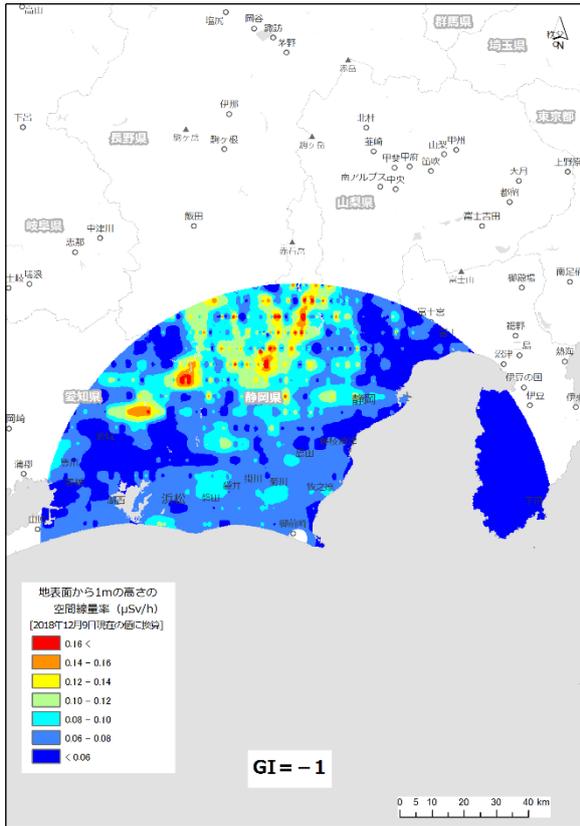
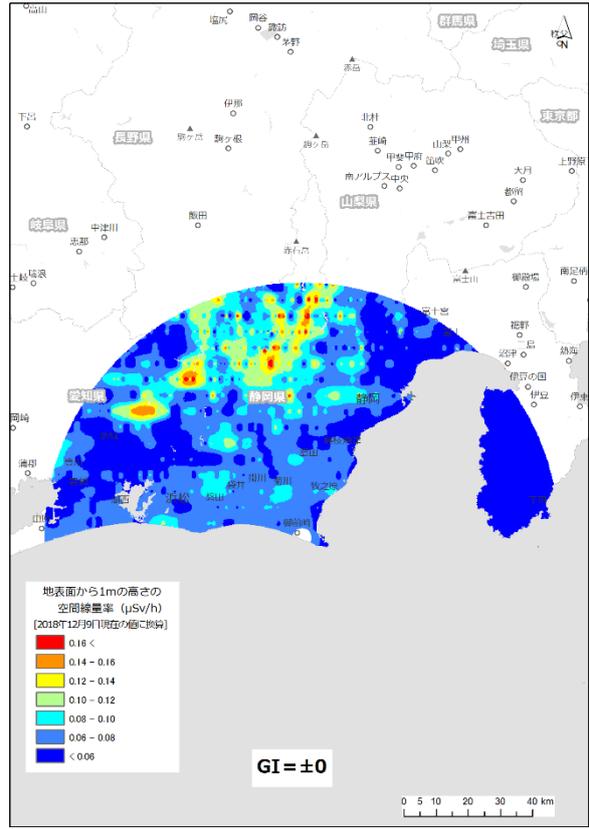
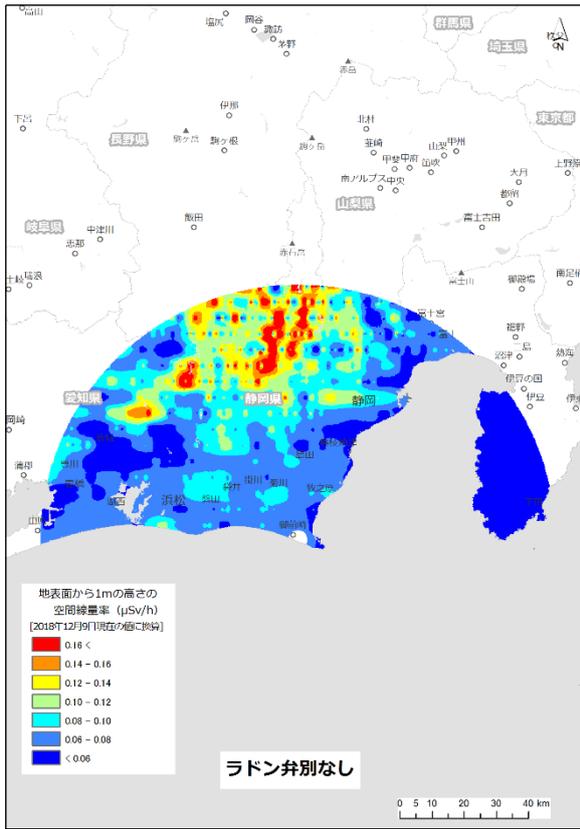


Fig. 4-31 ラドン影響弁別手法適用後の浜岡原子力発電所周辺における空間線量率マップ  
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

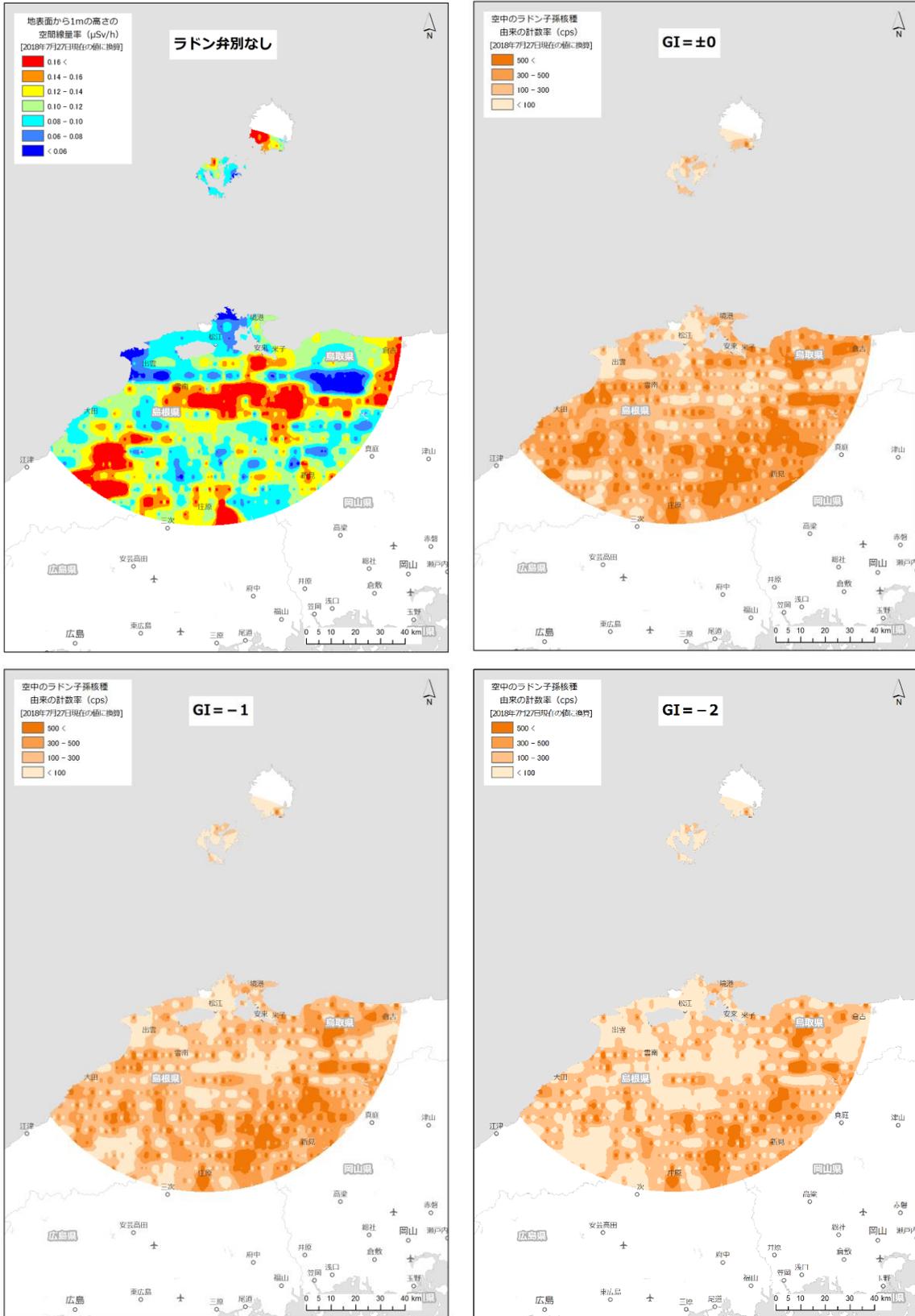


Fig. 4-32 ラドン影響弁別手法適用後の島根原子力発電所周辺における空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

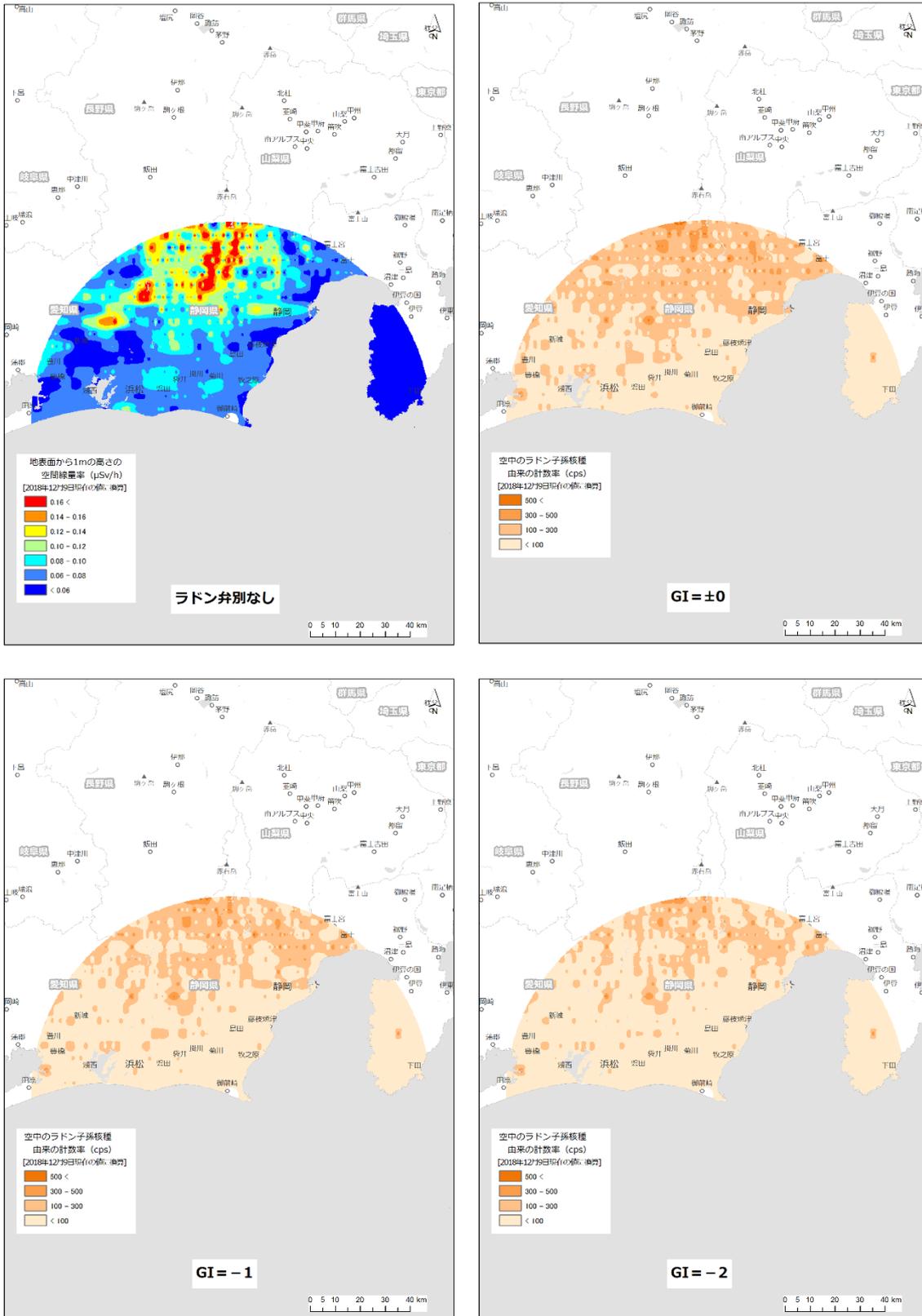


Fig. 4-33 ラドン影響弁別手法適用後の浜岡発電所周辺における空気中のラドン子孫核種起源の計数率マップ  
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

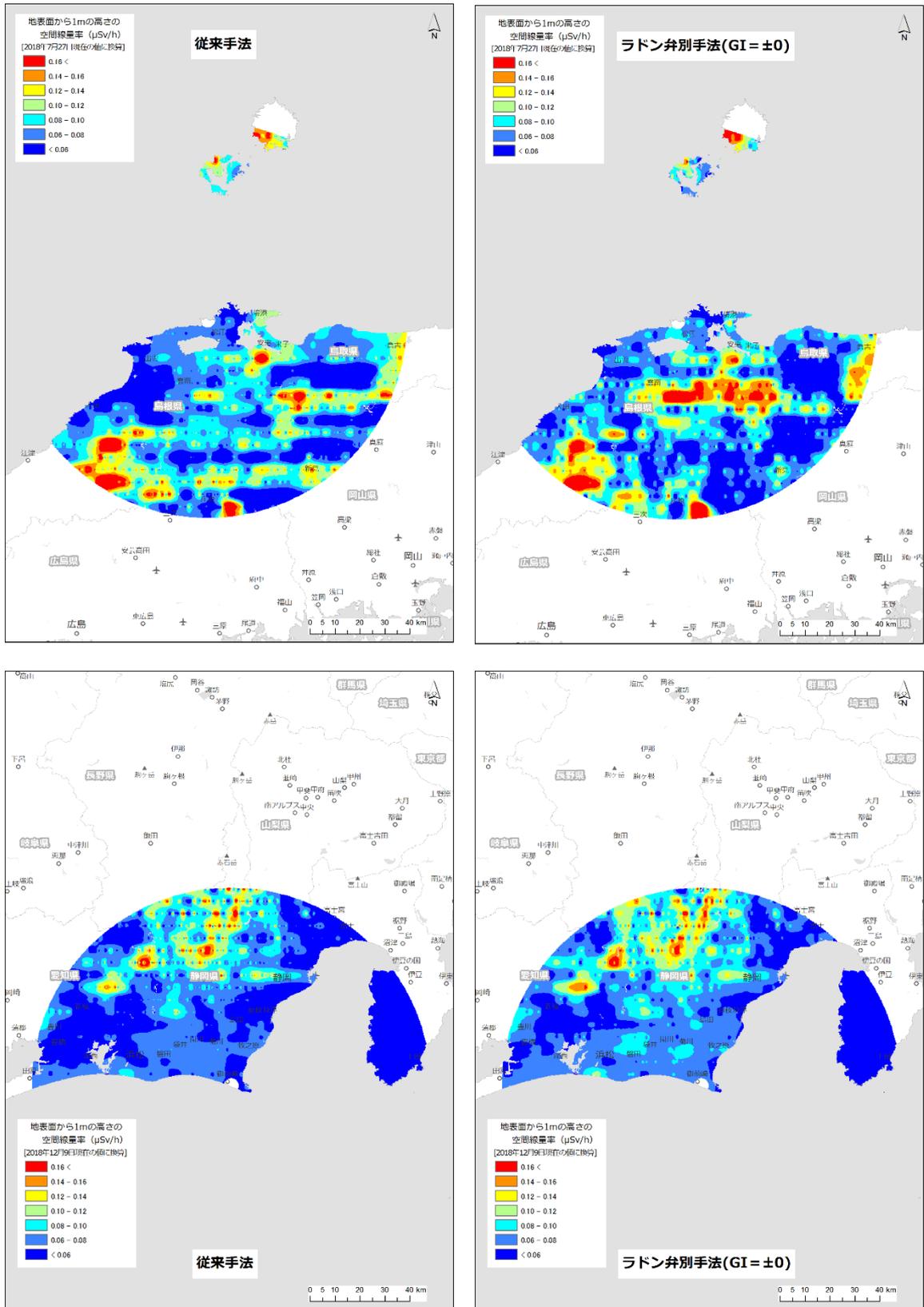


Fig. 4-34 ラドン影響弁別手法適用後の発電所周辺空間線量率マップ  
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

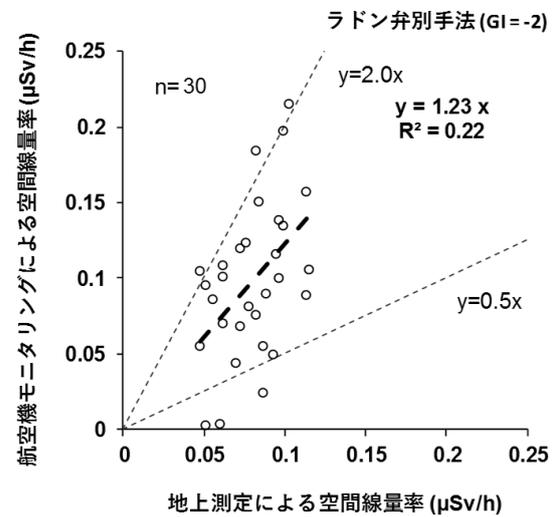
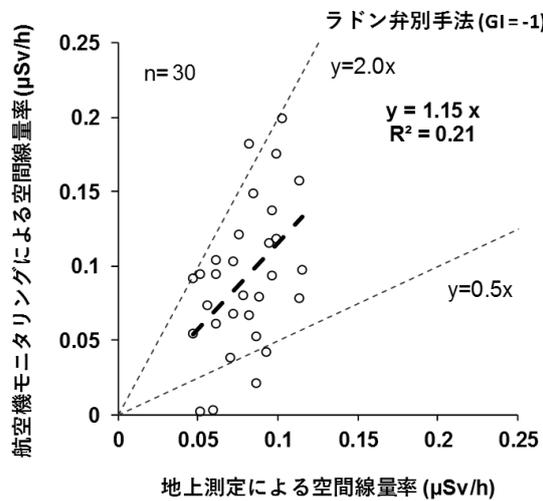
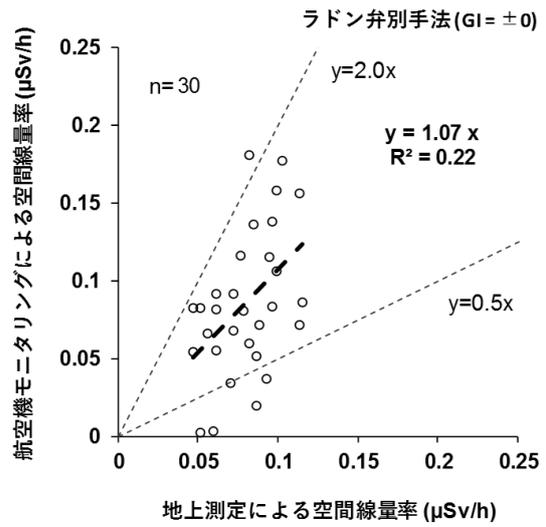
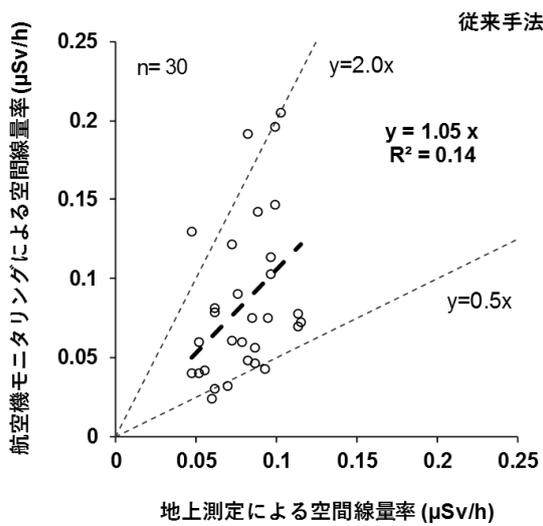


Fig. 4-35 島根原子力発電所モニタリングにおける従来法とラドン弁別法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較

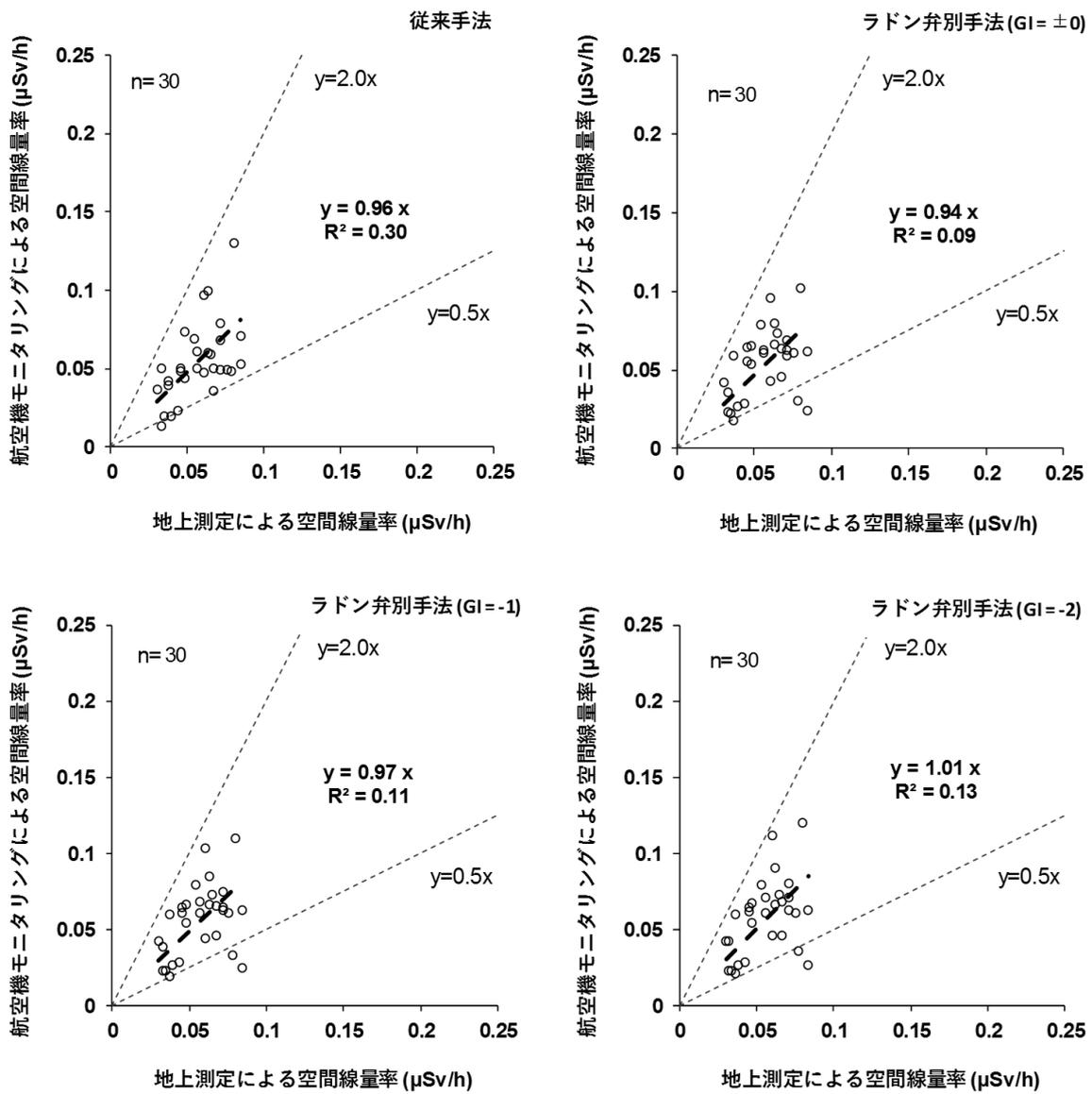


Fig. 4-36 浜岡原子力発電所モニタリングにおける従来法とラドン弁別法を用いた空間線量率換算結果と地上測定値との比較

#### 4.6. 放射性セシウムの沈着量

島根原子力発電所および浜岡原子力発電所周辺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. 4-37 に示す。このように、すべての地点において検出下限値以下となり、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、福島第一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>10)</sup>に則った。

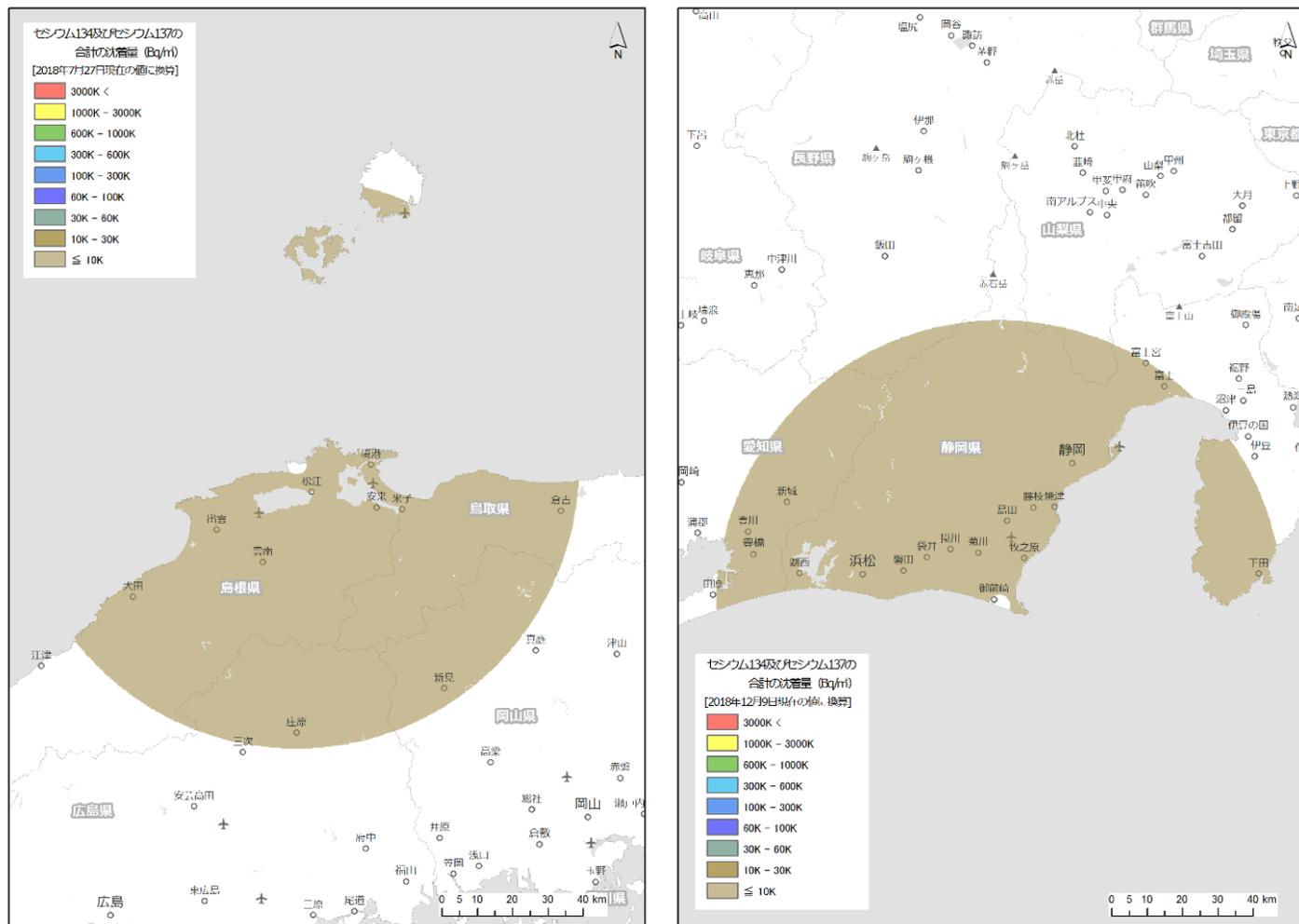


Fig. 4-37 発電所周辺の放射性セシウム沈着量マップ  
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

## 5. 衛星通信を利用したリアルタイムデータ通信システムの作製

### 5.1. 目的と背景

航空機モニタリングでは、RSIシステムを用いて取得した $\gamma$ 線計数率および位置情報のデータを解析し、空間線量率等のマッピングを行っている。測定結果を公開するまでには、ヘリコプターが離陸してからデータ取得を完了して着陸し、その取得データを解析完了するまでの時間を要する。実際の原子力緊急時には、一刻も早いデータの解析・提供が求められるため、機内から何らかの通信方法により、放射線の測定データをリアルタイムにダウンリンクできるシステム(以下、リアルタイムデータ通信システム)を構築しておく必要がある。本事業において2016年度よりリアルタイムデータ通信システムの導入に係る検討を開始した。2016年度にはヘリコプター内で使用できるイリジウム衛星通信機能を有した端末(ナビコムアビエーション株式会社製NCS-P01)を購入し、その性能評価を行った。当該端末の概観をFig. 5-1に示す。2017年度にはイリジウム衛星通信端末とRSIシステムの接続、本通信システムに必要なシステムの検討および設計を行った。2018年度は2017年度に行った検討および設計を基に、リアルタイムデータ通信システムの構築を行ない、動作試験も実施した。



Fig. 5-1 イリジウム衛星通信端末の概観

### 5.2. リアルタイムデータ通信システムの概要

リアルタイムデータ通信システムは、イリジウム衛星通信端末、メール用サーバ、動態管理

用サーバ、および線量表示用サーバから構成される。各装置の役割は以下の通りである。

- ・イリジウム衛星通信端末: RSI システムおよび高精度 GPS から出力されるデータをイリジウム衛星に送信する。
- ・メール用サーバ: イリジウム衛星からの通信データをイリジウム地上局を介して受信し、動態管理用サーバに転送する。
- ・動態管理用サーバ: メール用サーバから転送されてきた情報を基に機体の位置を地図上に表示し、 $\gamma$  線計数率データを線量表示用サーバに転送する。
- ・線量表示用サーバ:  $\gamma$  線計数率を動態管理用サーバで表示するためのデータ変換等を行い、動態管理サーバに返送する。

リアルタイムデータ通信システムは原子力緊急時支援・研修センター (NEAT: Nuclear Emergency Assistance and Training Center) 内に設置されている。本システムの全体概要を Fig. 5-2 に示す。本システムでは、日本のどの場所においても通信可能なイリジウム SBD (Short Burst Data) 通信を採用している。イリジウム SBD 通信では、送信データはメールに添付する形で送られるため、1 回につき送ることのできるデータ量が小さいものの (200~300 バイト程度)、遅延が比較的短いこと (1~3 分) が特徴である。なお、イリジウム衛星に送信するデータのうち、位置情報については RSI システムの GPS 由来のデータか高精度 GPS 由来のデータのどちらを送信するかは任意に選択できるような仕様とした。本システムでは動態管理用サーバにアクセスし、アプリケーション (動態管理システム) にログインすることで、ヘリの現在位置およびその位置における  $\gamma$  線計数率が閲覧できる。本システムをセキュアかつフレキシブルな環境で運用するために、動態管理用サーバにはファイアウォールにてアクセスが許可された端末から VPN (Virtual Private Network) 接続を行うものとし、インターネットに接続できる環境であればどこからでも web 接続も可能なようにネットワーク構築を行った。動態管理システムにログインできるユーザーは任意に追加でき、複数のユーザーによる同時接続およびデータ閲覧可能な仕組みとした。

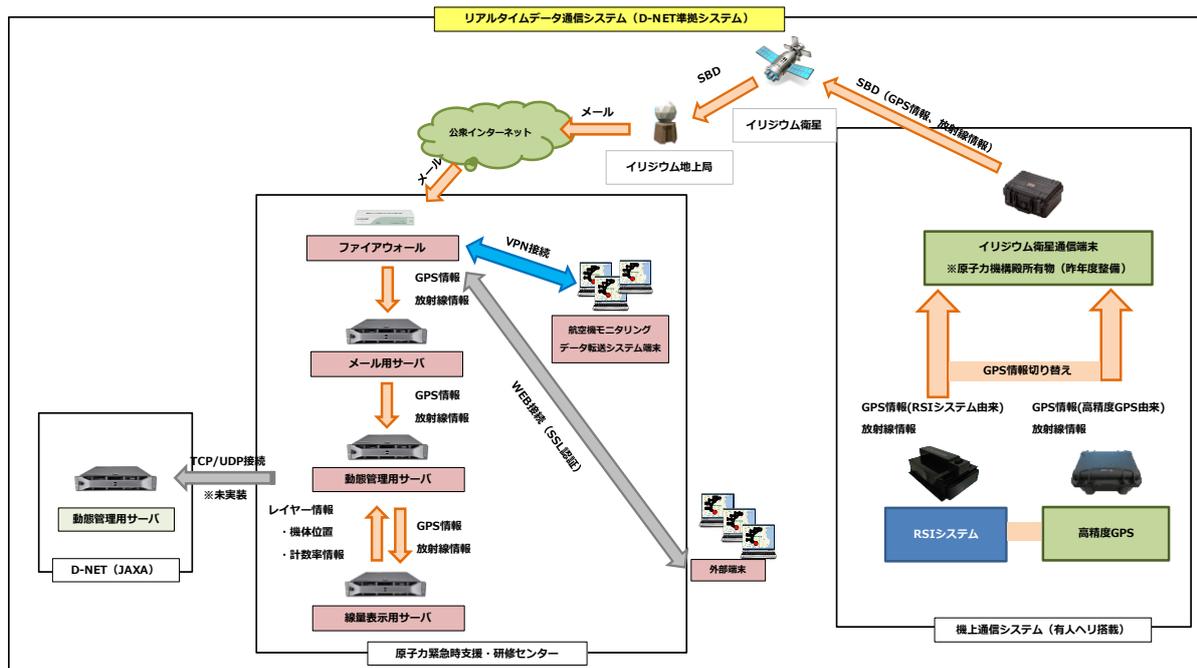


Fig. 5-2 リアルタイムデータ通信システムの概要

### 5.3. 動態管理システムの概要

動態管理システムにログインすると、Fig. 5-3 に示すように地図画面が表示される。背景地図は国土地理院ホームページ<sup>16)</sup>で公開されている電子地形図を用いている。地図画面には拡大・縮尺機能、ヘリ等の移動体の現在位置を追尾するモードを任意にON/OFFできる機能等を備えている。リアルタイムに送信されてくるデータを閲覧するだけでなく、過去に受信したデータを検索して表示する機能も備えており、閲覧したいデータの日時範囲を指定して呼び出し表示が可能な仕様とした。

$\gamma$ 線計数率および位置情報のデータを取得し、イリジウム衛星によるデータ通信が成功すると、Fig. 5-4 に示すように、地図画面上にデータ送信時の位置がプロットで表示される。各プロットの隣に表示されている数字はRSIシステムにより取得された $\gamma$ 線計数率(cps)である。プロットの色は6段階に分けられており、計数率の数値によって変化するが、その閾値は任意に変更可能な仕様とした。

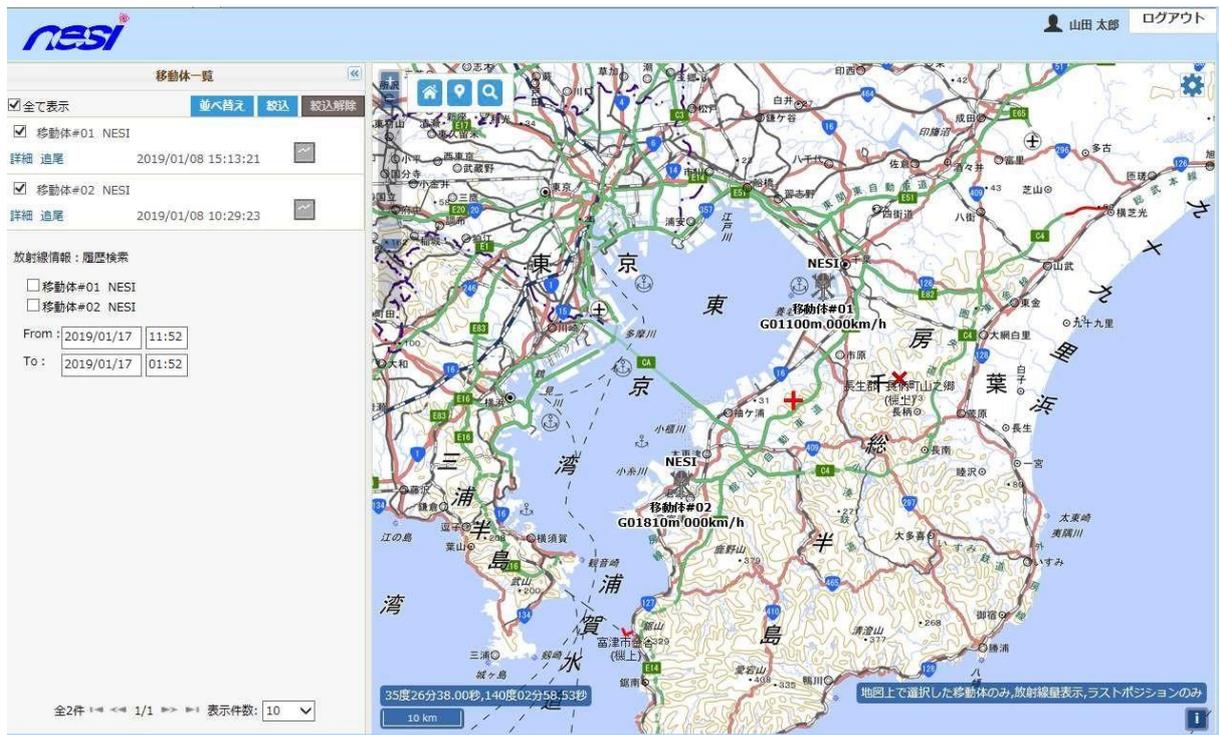


Fig. 5-3 動態管理システムログイン後の画面

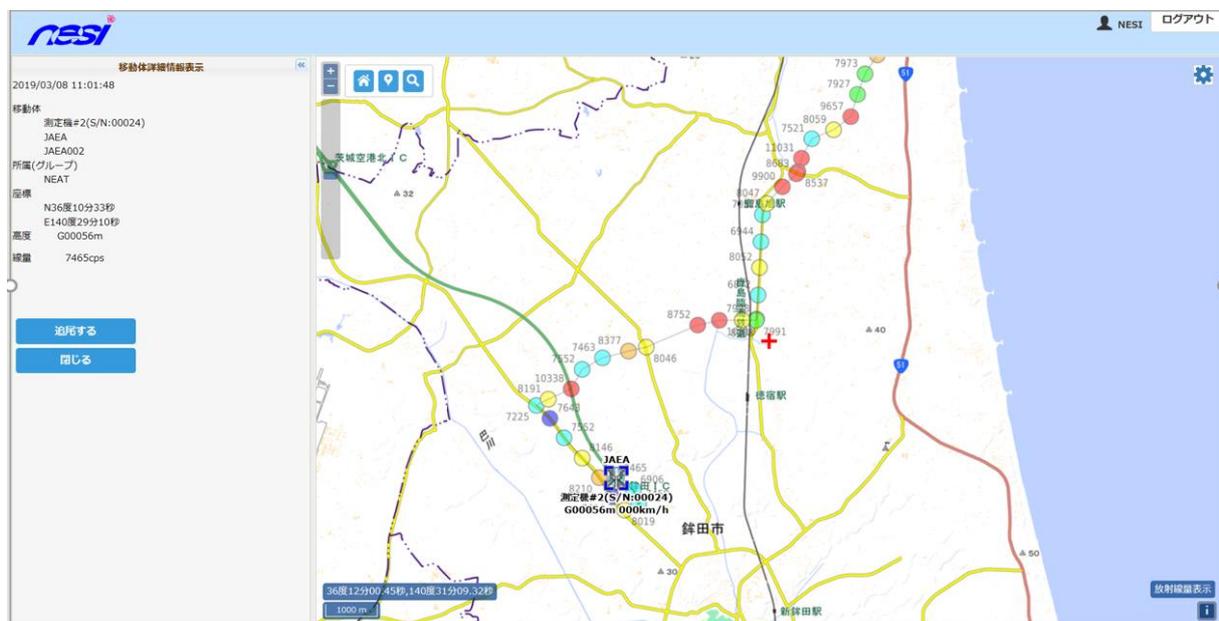


Fig. 5-4 動態管理システムの位置情報および計数率情報表示

#### 5.4. リアルタイムデータ通信システムの動作試験

今年度構築したリアルタイムデータ通信システムの動作確認試験を実施した。試験項目は以下の通りである。

- ・RSIシステムおよび高精度GPSから出力されるデータをイリジウム衛星通信を介して正常に

送受信できるか。

・動態管理システムにより移動体の現在位置およびその位置における  $\gamma$  線計数率をリアルタイムに閲覧できるか。

動作試験はワンボックスタイプの車両に RSI システム、高精度 GPS およびイリジウム衛星通信端末を搭載し、 $\gamma$  線計数率を測定しながら茨城県内を走行することで行った。本試験におけるシステムダイアグラムおよびシステムの車両搭載状況を Fig. 5-5 および Fig. 5-6 に示す。イリジウム衛星通信端末を用いて  $\gamma$  線計数率および位置情報をイリジウム衛星に送信するためには、イリジウムアンテナを適切な位置に取り付けるとともに、イリジウム衛星通信端末と RS-501 および高精度 GPS システムをケーブル接続する必要がある。なお、イリジウム衛星通信端末からイリジウム衛星へのデータ送信を行う時間間隔は 30 秒に 1 回とした。

本試験では、NEAT (ひたちなか市) を出発し、一般道を通って大洗町を經由し鉾田市に向かった後、高速道路を利用して NEAT に戻る経路を設定した。走行している間、NEAT 内の端末から動態管理システムにログインし、リアルタイムに  $\gamma$  線計数率および車両の現在位置が表示されるかを確認した。

本試験の結果を Fig. 5-7 に示す。走行した経路全域において、 $\gamma$  線計数率および位置情報が途切れることなく送受信されたことが確認できる。高速道路を走行するような速度域 (約 100 km/h) においてもデータの送受信に問題が生じなかった。位置情報については、RSI システムの GPS データ、高精度 GPS データのいずれを用いた場合でも正常に送受信できることが確認できた。今後、実際にヘリコプターに搭載し試験を実施する必要がある。

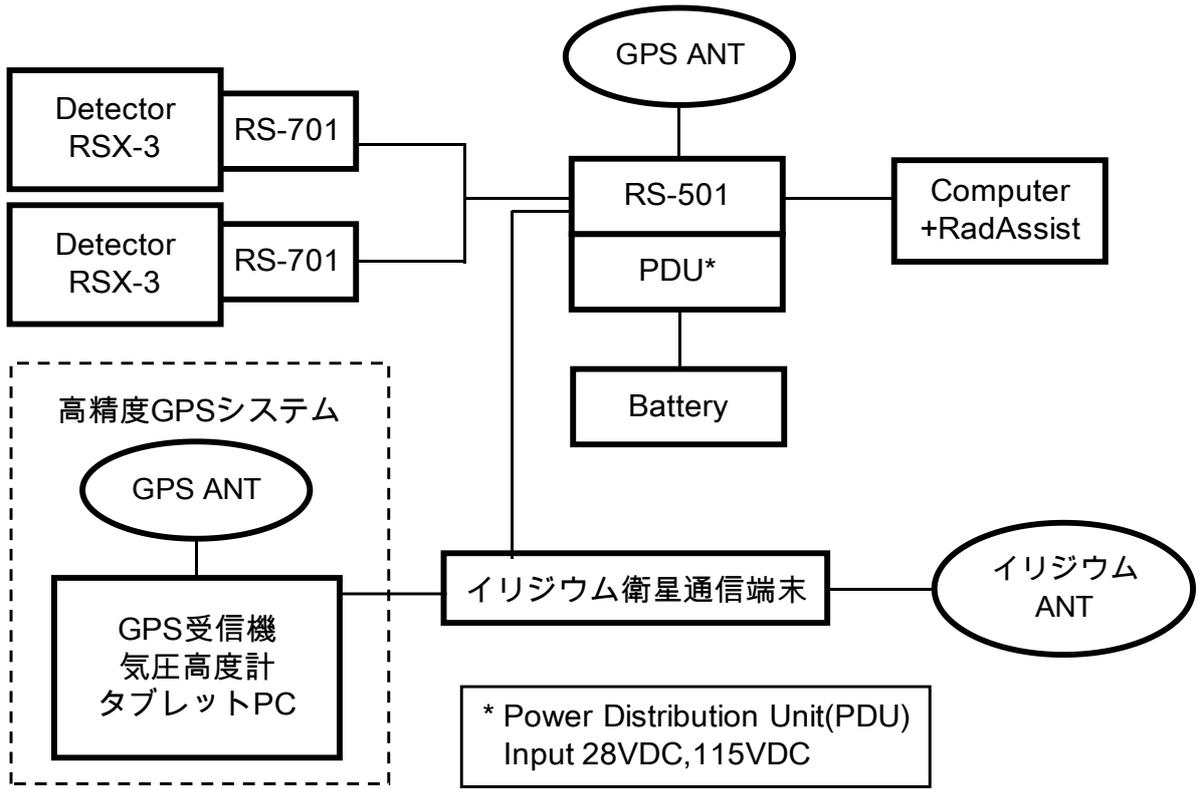


Fig. 5-5 リアルタイムデータ通信システムの動作試験で利用したシステムのダイアグラム



Fig. 5-6 リアルタイムデータ通信システムの動作試験におけるシステムの車両搭載状況

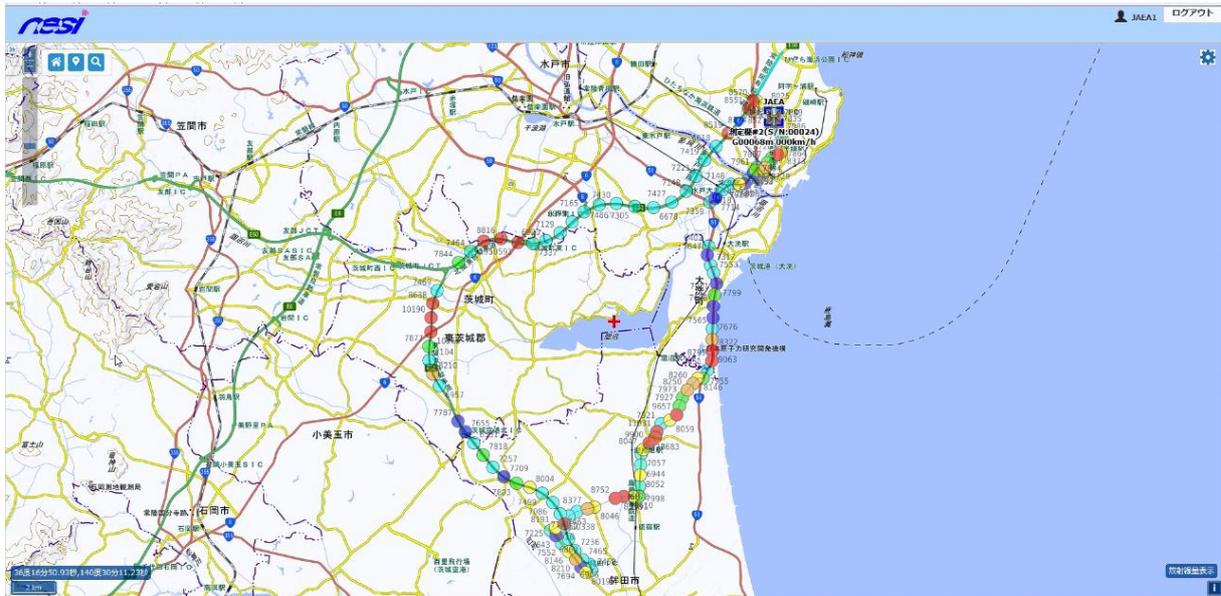


Fig. 5-7 リアルタイムデータ通信システムの動作試験結果

## 5.5. 今後の課題と展望

災害救援航空情報共有ネットワーク (D-NET)<sup>25)</sup> は国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA) が提供する通信フォーマットであり、本システムはその仕様に準拠している。現時点では、航空機モニタリング用の独立したシステムとなっているが、将来的に JAXA が運用する D-NET サーバーと相互通信が可能となる見込みである。また、動態管理システムは位置情報と RSI システムによる  $\gamma$  線の全計数率を記録できる仕様としており、スペクトルを用いた詳細な解析は難しいが、ダウンリンクした  $\gamma$  線全計数から地上 1 m 高さにおける空間線量率に換算することも可能である。今後、リアルタイムで自動的に換算できる機能を追加し、より直接的な放射線情報を表示できるように改良が必要である。

## 6. まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理

今年度得られた成果を以下にまとめる。

### ・測定結果について

島根原子力発電所および浜岡原子力発電所について、3～80 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、島根原子力発電所が2018年7月20日～7月27日(のべ16フライト)の8日間を要した。浜岡原子力発電所では、2018年11月27日～12月9日(のべ14フライト)の13日間を要した。浜岡原子力発電所周辺における測定期間中に天候不良等で3日間フライトできない日があった。

### ・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。

### ・測定エリアの特徴について

島根原子力発電所から半径80 km 圏内(以下、島根測定エリアという。)における空域に係る情報をFig. 6-1に示す。中央には米子空港(正式名称：美保飛行場)(A1)、出雲空港(A2)、および隠岐空港(A3)が存在しており、島根測定エリアから東側約27 kmに鳥取空港(A4)が位置している。米子空港は航空自衛隊と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。島根測定エリアにおいては米子空港の管制区が中央にあるため、管制を受けながら測定飛行を行うことになり、事前の調整が重要となる。島根測定エリア西側には自衛隊の訓練エリア(B1、2、3)が在り、事前の調整が必要である。また、測定エリア北側にある隠岐ノ島は日本国の防空識別圏(Air Defense Identification Zone: ADIZ)のアウトゾーン(外層)にあたり常時防空監視が行なわれていることから、フライトプランにない飛行を行なうと識別証明を要求される場合があることに留意が必要である。島根測定エリア東南東に民間訓練エリア(C1、2)があるが、訓練飛行が不定期で行なわれているため、測定飛行に際しては当日毎での確認が必要である。島根測定エリアの気候特性は冬季に積雪が多い日本海側の気候ではあるが、その傾向は弱く冬季の積雪量も多くない。しかし、冬季は晴天率が低くなるので、測定に際しては比較的晴天率の高い夏期に実施することが望ましい。島根県、鳥取県は大山鳥に代表される飼養地になっており、島根測定エリア全般、特に平野部に鶏舎が点在するため、騒音被害に十分注意する必要がある。

浜岡原子力発電所から半径80 km 圏内(以下、浜岡測定エリアという。)における空域に係る情報を中央に静岡空港(A1)、また、西側に管制が厳しい航空自衛隊浜松基地(A2)が存在する。さらに浜岡測定エリアを東西に横断する航空自衛隊の訓練エリア(B1)があり、いずれも測定

飛行の3週間以上前に当局と事前調整をすることが重要である。また、浜岡測定エリア外ではあるが、北東に隣接する富士の陸上自衛隊演習場 (B2) にも注意が必要である。浜岡測定エリアでは、東名高速道路を境に南北で大きく地形特性が変化している。駿河湾、遠州灘に面した南側地域は平坦な地形が東西にわたって広がっており、測定飛行に際して特段の問題はないが、特に浜岡原子力発電所から北側 50 km 以遠は山間部となっているため急峻な地形が多く、ヘリコプターの機動性をもってしても対地高度を一定に保った地形追従での飛行は大変困難である。そのため、測定に使用する機体はパワーがあり上昇力に余裕がある機種が望ましい。こうした地域では地形的な特徴から、木材搬出に索道 (尾根渡りや、尾根筋から林道までを結んだワイヤーロープの架空線) が用いられることが多く、尾根筋より低高度となる場合がある測定飛行に際しては十分な警戒を要する。索道は統括された管理体制 (情報) がなく、その空域をよく知るパイロットや、地元で航空機を運用する航空会社から、飛行前に最新の情報を入手しておくことが大変重要であり、周囲の状況を監視する為のコーパイロットの搭乗も必須である。また、高さ 60 m を超える大型の送電鉄塔も山間部には数多く敷設されているので注意を要する。気象的特徴として、冬季は北西風が卓越し最大瞬間風速にして 50 knot に達することもあるため、測定時期としては晴天率が高く、かつ雪の影響もない9~10月の秋口が望ましい。

#### ・リアルタイムデータ通信システムについて

昨年度実施した設計を基に本システムの構築を行うとともに、本システムの動作試験を実施した。本システムによりイリジウム衛星通信を介して、リアルタイムに放射線情報をダウンロードできることを確認した。今後はヘリコプター機内にイリジウム衛星通信端末を搭載し、試験を行なう必要がある。また、本システムは D-NET の通信フォーマットに準拠しており、将来は両システムの連携が期待できる。しかしながら、動態管理システム画面上で表示される放射線情報等をリアルタイムに、よりダイレクトな情報に変換するための改良等について検討を重ねていくことが必要であると考えらる。

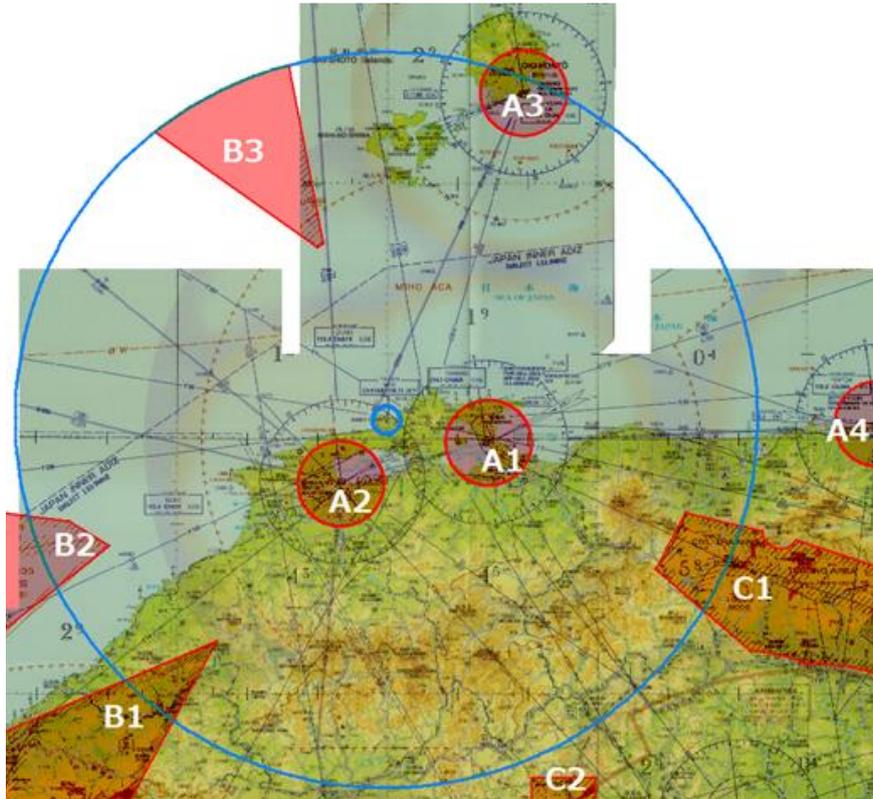


Fig. 6-1 島根原子力発電所周辺における空域に係る情報  
 A:空港・飛行場 B:自衛隊訓練エリア C:民間訓練エリア

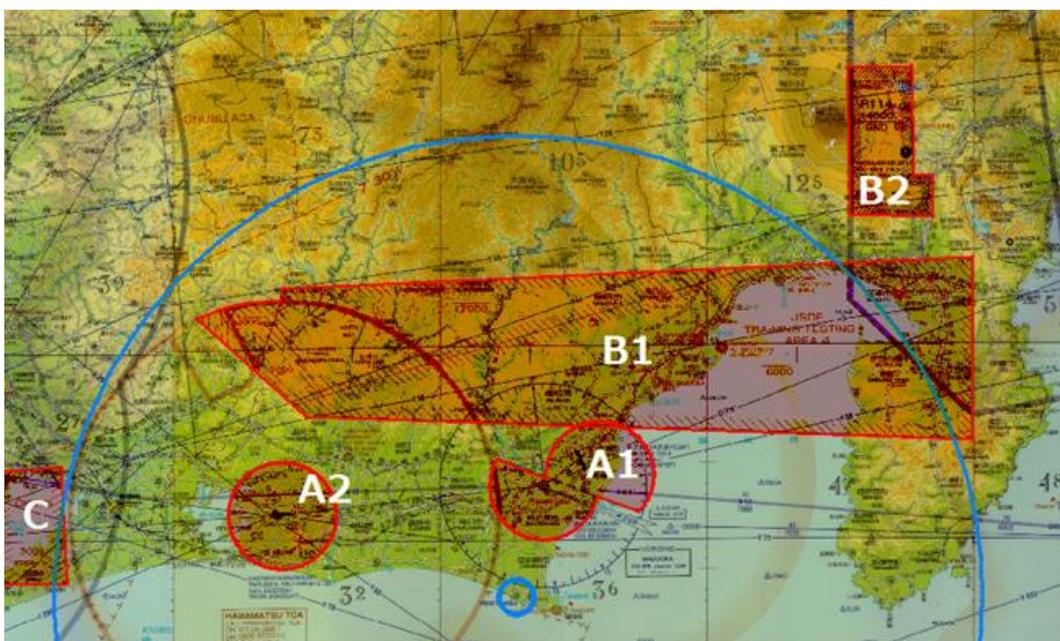


Fig. 6-2 浜岡原子力発電所周辺における空域に係る情報  
 A:空港・航空基地 B:自衛隊訓練エリア C:民間訓練エリア

## 謝辞

本調査研究は、「原子力規制庁による平成 30 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)、TK 海陸調査事務所 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。

## 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) 原子力防災会議幹事会, 原子力災害対策マニュアル, 平成 29 年 12 月 26 日一部改訂.
- 13) 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.

- 14) 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.
- 15) 地質学会ホームページ, 日本の自然放射線量,  
<http://www.geosociety.jp/uploads/fckeditor/hazard/2011/daishinsai/20110412imai/Radiation-m2.gif> (2019年3月1日閲覧).
- 16) 国土地理院ホームページ, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> (2019年3月1日閲覧).
- 17) Currie, L. A., Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry., Anal. Chem, 40(3), pp.586-593, 1968.
- 18) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, pp.81-101.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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/> (2019年3月1日閲覧).
- 22) 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, 海と陸の地球化学図, <https://gbank.gsj.jp/geochemmap/> (2019年3月1日閲覧).
- 23) 湊進, 砂丘-砂丘系における自然 $\gamma$ 線の線量率分布 –中田島砂丘の事例-, RADIOISOTOPRES, 65, pp.377-382, 2016.
- 24) 一般財団法人高度情報科学技術研究機構, 原子力百科事典 ATOMICA, 天然の放射性核種, [http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat\\_detail.php?Title\\_No=09-01-01-02](http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-01-01-02) (2019年3月1日閲覧).
- 25) 国土地理院ホームページ, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2019年3月1日閲覧).
- 26) 小林啓二, 防災・小型機運航技術～より多くの人を救うために～, 日本航空宇宙学会誌, 64, pp.305-308, 2016.
- 27) 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.
- 28) H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman, W. R. Nelson, The EGS5 Code System, SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8, 2005, pp.20-132.

**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。