

九州電力川内原子力発電所 80 km 圏内における  
航空機モニタリング事業

報告書

平成 28 年 3 月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

本報告書は、原子力規制庁による平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費「九州電力川内原子力発電所 80 km 圏内における航空機モニタリング等事業」の成果をとりまとめたものである。

## 目次

1. はじめに.....	6
2. 航空機モニタリングシステム .....	9
2.1. 航空機モニタリングシステム .....	9
2.2. ヘリコプターの選定.....	11
2.3. RSI システムの保守 .....	13
3. データ取得及び解析方法 .....	15
3.1. データ取得方法 .....	15
3.2. キャリブレーションフライト方法 .....	18
3.3. 解析のフロー .....	22
3.4. 線量率への換算方法.....	23
3.4.1. バックグラウンド (自己汚染及び宇宙線).....	23
3.4.2. 高度補正係数の算出方法 .....	25
3.4.3. 線量率への換算係数の算出方法 .....	25
3.4.4. 線量率への換算方法.....	25
3.4.5. 天然核種の弁別と放射性セシウム起源の計数率の算出 .....	26
3.4.6. 線量率-放射能換算係数.....	28
3.4.7. 減衰補正 .....	28
3.4.8. 検出下限値.....	29
3.5. 検出下限値 .....	30
3.6. 不確かさ .....	30
3.7. マッピング .....	31
3.8. 空気中の Rn 子孫核種の影響について.....	32
4. モニタリング結果と考察 .....	34
4.1. 換算パラメータ .....	34
4.2. 地上値との比較 .....	40
4.3. 線量率 .....	37
4.4. 天然の放射性核種濃度.....	43
4.5. 放射性セシウムの沈着量.....	49
5. まとめと緊急時モニタリングに資する知見の整理 .....	50
参考文献 .....	51

## Table list

Table 1-1 原子力災害対策指針における OIL.....	7
Table 3-1 キャリブレーションフライトの一覧.....	19
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及び採用した CR-index .....	24
Table 3-3 BG-index 一覧.....	27
Table 4-1 本事業で取得した AF データ一覧.....	36
Table 4-2 本事業で取得した CD データ一覧.....	36
Table 4-3 使用したパラメータのまとめ.....	36
Table 4-4 天然の放射性核種濃度に換算するためのパラメータ一覧.....	44

## 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.....	8
Fig. 2-1 RSI システムのブロック図 .....	9
Fig. 2-2 システムの写真 .....	10
Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧 .....	11
Fig. 2-4 川内原子力発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (Bell 412 JA6928) .....	12
Fig. 2-5 システムの半値幅及び Gain の変動 (RSI-3) .....	14
Fig. 3-1 予定したフライトの測線 .....	16
Fig. 3-2 フライトイメージ .....	17
Fig. 3-3 上空からの測定範囲イメージ .....	17
Fig. 3-4 テストラインフライトのイメージ .....	19
Fig. 3-5 テストライン及びテストポイントの場所 .....	20
Fig. 3-6 テストポイントフライトのイメージ .....	21
Fig. 3-7 宇宙線フライトのイメージ .....	21
Fig. 3-8 Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージ .....	21
Fig. 3-9 解析のフロー .....	22
Fig. 3-10 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 .....	24
Fig. 3-11 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例 .....	24
Fig. 3-12 放射性セシウムの計数率の算出イメージ .....	27
Fig. 3-13 BG-index の算出例 .....	27
Fig. 3-14 重量緩衝深度と線量率-放射能換算係数の関係 .....	28
Fig. 3-15 IDW に入力するパラメータとマップの関係 .....	32
Fig. 3-16 Rn 子孫核種の検出例 .....	33
Fig. 3-17 Rn 子孫核種の日変動 .....	33
Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例 .....	34
Fig. 4-2 地上測定データ .....	35
Fig. 4-3 川内原子力発電所周辺の線量率マップ .....	38
Fig. 4-4 川内原子力発電所周辺の線量率マップの比較 .....	39
Fig. 4-5 地上における測定点 .....	41
Fig. 4-6 地上における線量率測定結果との比較 (散布図) .....	42
Fig. 4-7 地上における線量率測定結果との比較 (相対偏差) .....	42
Fig. 4-8 天然の放射性核種によるピーク解析例 .....	44
Fig. 4-9 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) .....	44
Fig. 4-10 川内原子力発電所周辺の K-40 濃度マップ .....	45
Fig. 4-11 川内原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ .....	46
Fig. 4-12 川内原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ .....	47
Fig. 4-13 川内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 .....	48

Fig. 4-14 第 10 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ ..... 49

## 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の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5年経過し、継続的な航空機モニタリングを実施しつつ、手法の改善及び体制の整備を行ってきた<sup>1-6)</sup>。

今回の東京電力福島第一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生かすために、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及び技術の継承等の課題があると考えられる。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>7)</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、フライトするタイミングやフライトする体制等事故前に決定しておく必要がある。特にフライトするタイミングについては、原子力災害対策指針に定められている防護措置の実施の判断基準 (OIL: Operational Intervention Level) を踏まえて位置づけられることが望ましい<sup>8)</sup>。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及び事故発生、フライト開始までの最短時間評価及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、東京電力福島第一原子力発電所事故の周辺環境で行っているモニタリングは、周辺環境に沈着した放射性セシウムから放出されるγ線の測定を目的としている。放射性セシウムの影響が天然放射性核種からの影響に比べて比較的高い場所を測定する場合には、天然放射性核種は無視できるが、東京電力福島第一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線量率分布をみると、西日本で高い傾向にあり、最大 0.13 μGy/h 程度の場所もあるとされている<sup>9)</sup>。地質学会の HP 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について Fig. 1-1 に示す<sup>10)</sup>。例えば、このような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、空港の使用方法及び山間部等のフライト上の危険個所の抽出等緊急時に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。

そこで、鹿児島県にある九州電力川内原子力発電所周辺におけるバックグラウンドモニタリングを実施したので報告する。

**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等させるための基準	空間線量率 500 $\mu\text{Sv/h}$ (地表面から1m高さ)		
	OIL4	除染を講じるための基準	(B) 40,000 cpm 皮膚から数cm, 入射窓20 $\text{cm}^2$ (B) 13,000 cpm 1月後の数値		
早期防護措置	OIL2	住民等を1週間程度内に一時移転させるための基準・地域生産物の摂取を制限	空間線量率 20 $\mu\text{Sv/h}$ (地表面から1m高さ)		
飲食物摂取制限	OIL3 (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1m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	

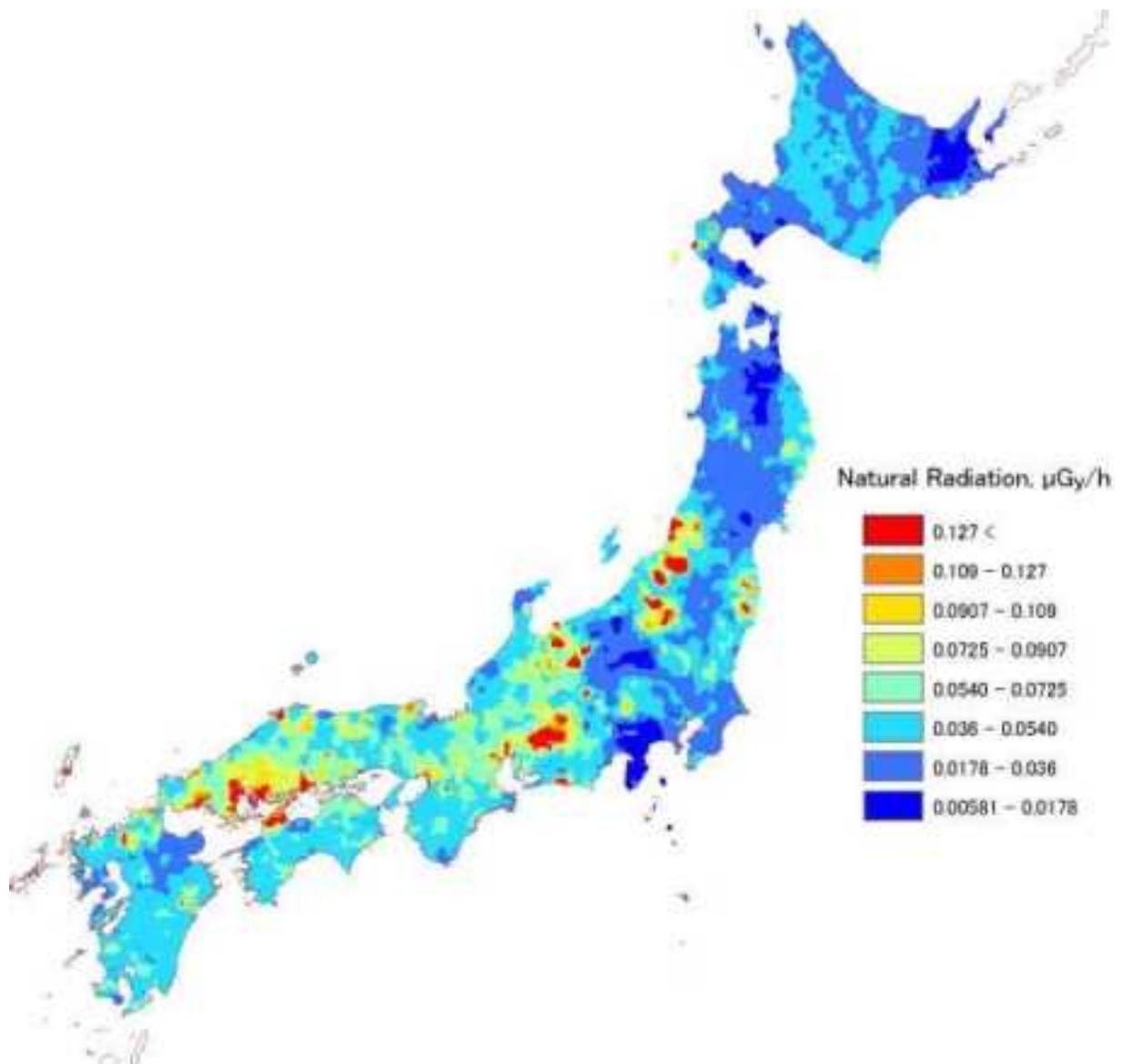


Fig. 1-1 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果  
(地質学会ホームページより<sup>10)</sup>)

## 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" x 4" x 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 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、RS701 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 RS501 という装置で統合される。RS501 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 時間稼働が可能である。

現在、原子力規制庁が所有する機器は 4 台あり、福島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。

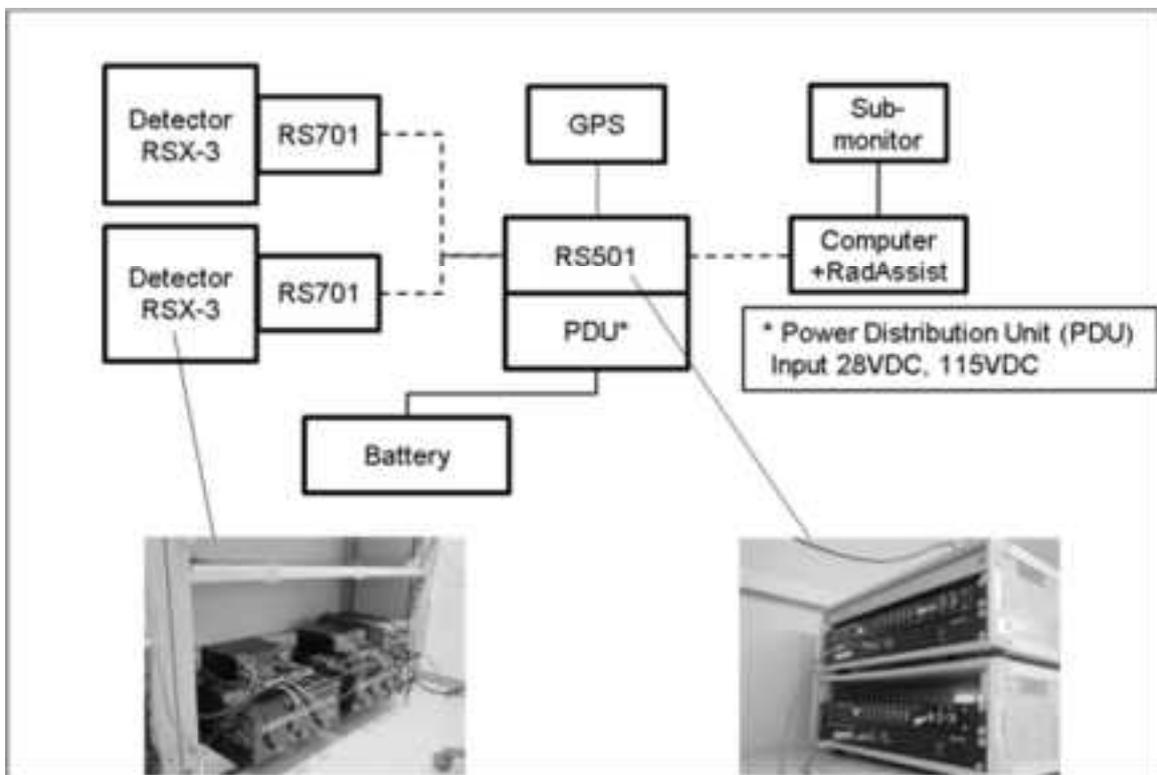


Fig. 2-1 RSI システムのブロック図



Fig. 2-2 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、燃料タンクの材料及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導入を避けるため 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 412 を使用した。Fig. 2-4 に使用した機体について示す。



Bell 430  
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



Bell 412  
ベル・ヘリコプター・テキストロン社製



AS 332  
アエロスパシアル社製



S 76  
シコルスキー・エアクラフト社製

Fig. 2-3 ヘリコプター機底に燃料タンクのない機体一覧



Fig. 2-4 川内原子力発電所周辺のモニタリングに使用した機体 (Bell 412 JA6928)

### 2.3. RSI システムの保守

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

- ・RSI システムの接続チェック: データ収集装置 (RS701 及び 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 のピークの半値幅 (Full Width at Half Maximum; 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)

ピークの半値幅については、メーカーから保守の推奨値として 6 %以下とされている。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、また、アンプのゲインについては 0.8 を下回る場合に再調整を行うが、今回は再調整を行う必要は無かった。本事業における FWHM とアンプのゲインの推移について Fig. 2-5 に示す。図中の RSI-3 以降の枝番は 3 台配置してある検出器番号である。アンプのゲインは大きな変動はなかった。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り、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、ヘリコプターの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。なお、定常的に行った保守結果については、Appendix に示す。

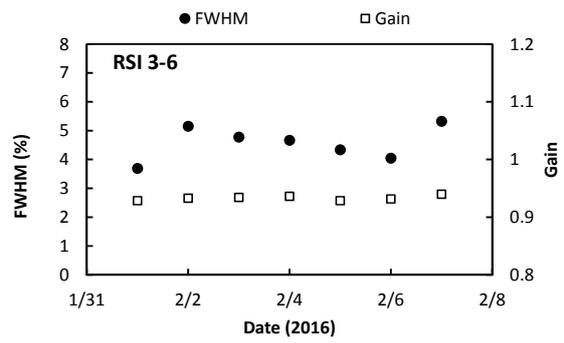
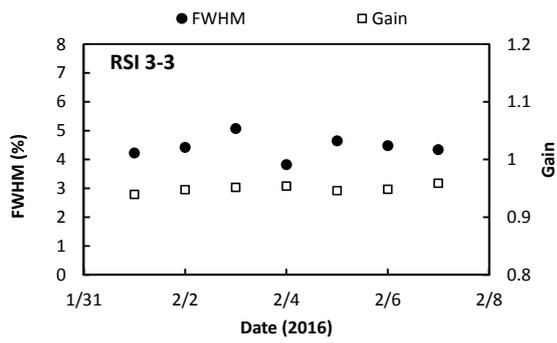
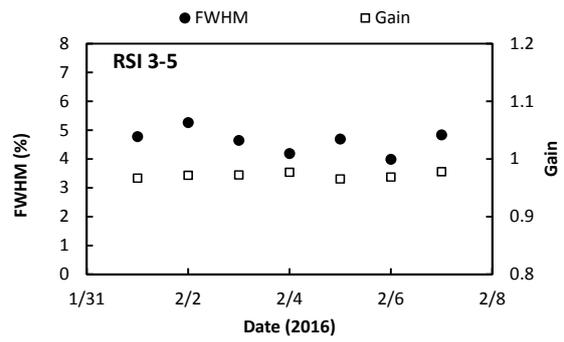
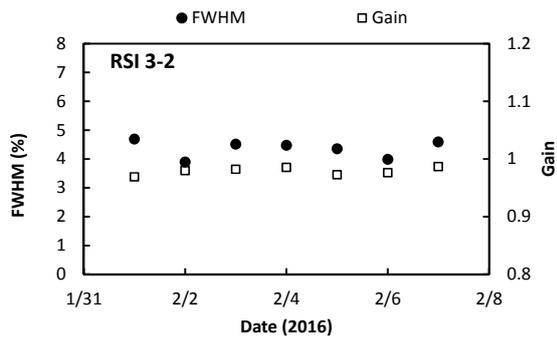
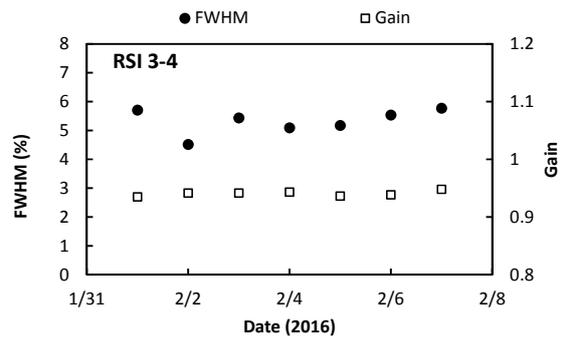
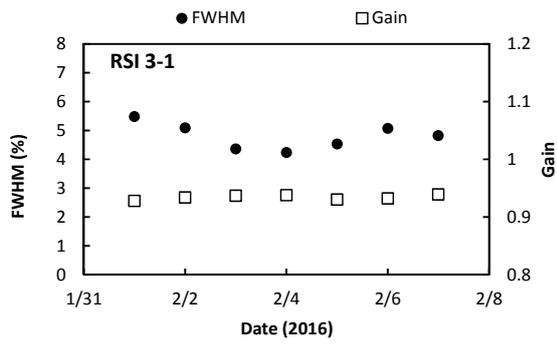


Fig. 2-5 システムの半値幅及び Gain の変動 (RSI-3)

### 3. データ取得及び解析方法

#### 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秒毎に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にフライトの予定測線について示す。Fig. 3-2にデータ取得のイメージを示す。

以降、本報告書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 knot)
- 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。
- 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. 3-3 に示す。



Fig. 3-1 予定したフライトの測線

(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)

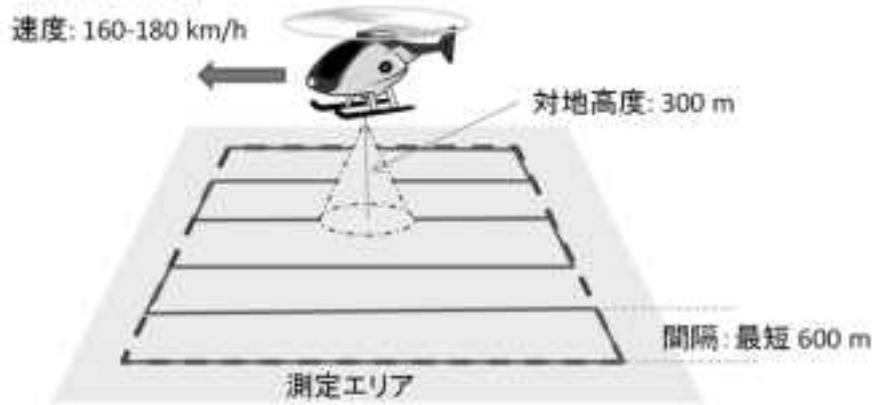


Fig. 3-2 フライトイメージ

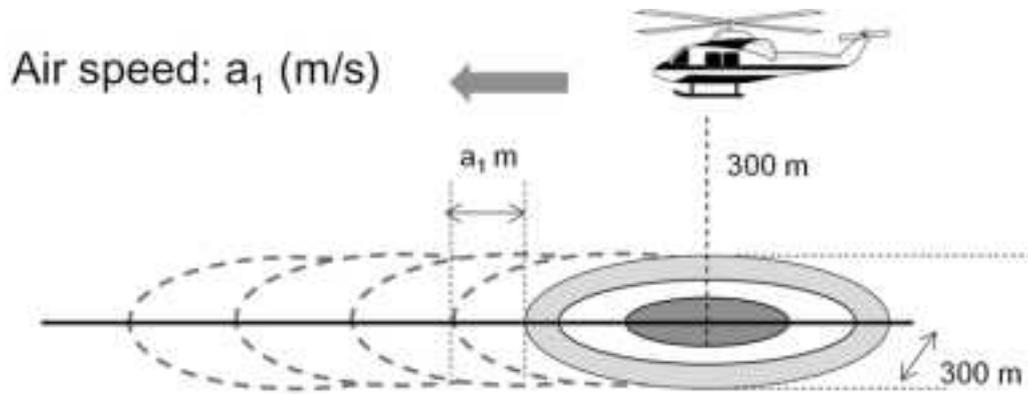


Fig. 3-3 上空からの測定範囲イメージ

### 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パラメータについては、昨年度までのデータを基に数値を決定している。今年度は、決定したパラメータの妥当性を確認する目的で、キャリブレーションフライトを行った。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の実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor,  $m^{-1}$ ; 以下、「AF」という。) 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毎に平均化し、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. 3-4 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. 3-5 に直線で示す。

#### ○テストポイントフライト

半径 1,000 m の範囲内で線量率の勾配が小さい場所及び地形の平坦な地点を選定し、地上の線量率を測定した場所の上空をフライトし、基準高度 (300 m) における地上の線量率換算係数 (Conversion factor of Dose-rate, cps/[ $\mu$ Sv/h]; 以下、「CD」という。) 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 ALOKA 社製 TCS-171B) を用いて、半径 100 m の範囲内で 25 ポイントを目安に 1 m 高さの空間線量率の測定を行う。Fig. 3-6 にテストポイントフライトのイメージを示す。また、テストポイントとして選定した場所を Fig. 3-5 に半径 1,000m の円で示す。なお、これまでの航空機モニタリングの経験から、ホバリングで同一の場所にとどまることは非常に難しいことから、高度を変えたフライトの相互比較から算出する実効的な空気減弱係数をテストラインで実施し、地上で測定した線量率との比較する線量率換算係数を算出するフライトはテストポイントで実施する。

#### ○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 300~2,500 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. 3-7 に示す。フライト場所は、陸地から十分に離れた海上であればどこでもいいので、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 Rn 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 450~1000 m までを直線的に上昇しデータを取得する。

#### ○BG フライト

地上からの放射線の影響のない対地高度約 1000 m に保ち約 3 分のフライトを継続し、データを取得することにより機体及び検出器のバックグラウンドデータを取得する。Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージを Fig. 3-8 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を変化させてフライト	測定期間中に 2 回
テストポイントフライト	線量率換算係数を算出	指定の地点上で、300 m 高度で 2 分	測定期間中に 2 回
宇宙線フライト	宇宙線の影響を調査する	海上を 300-2,500 m まで上昇	測定期間中に 2 回
Rn 影響フライト	Rn の影響を調査する	フライト前に拠点近くの測線を 450-1,000 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	1,000 m を 3 分 (Rn 影響フライト後に実施)	毎日

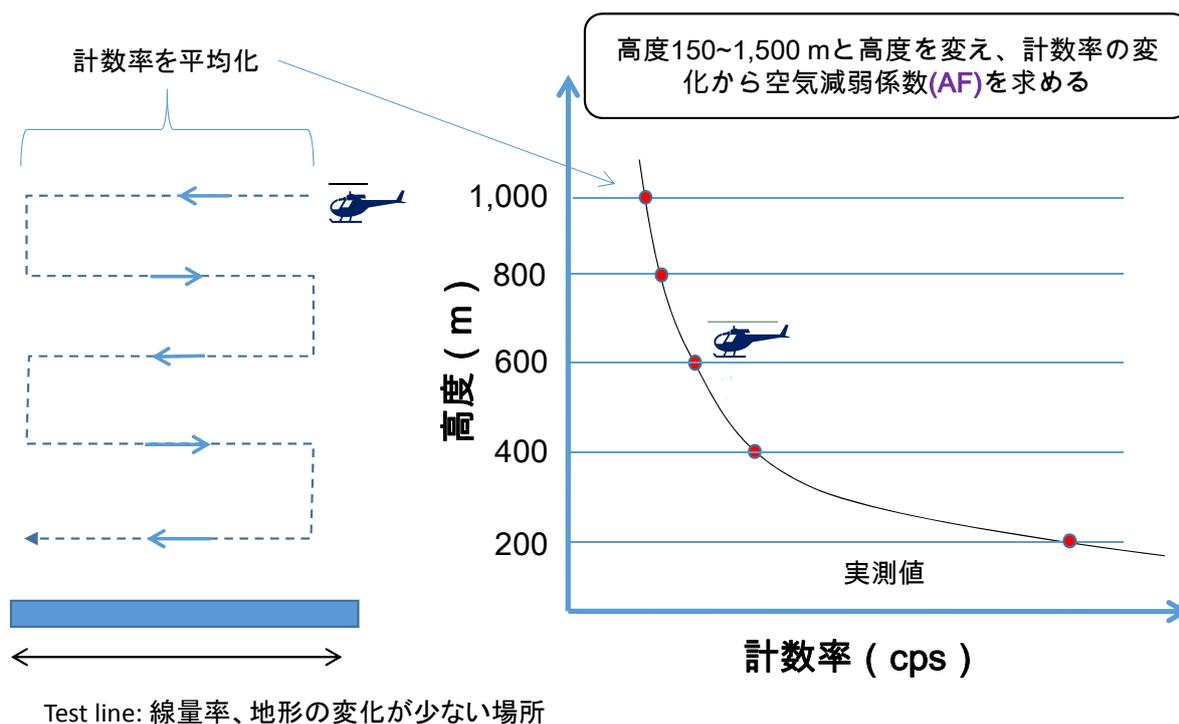


Fig. 3-4 テストラインフライトのイメージ



Fig. 3-5 テストライン及びテストポイントの場所  
(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)

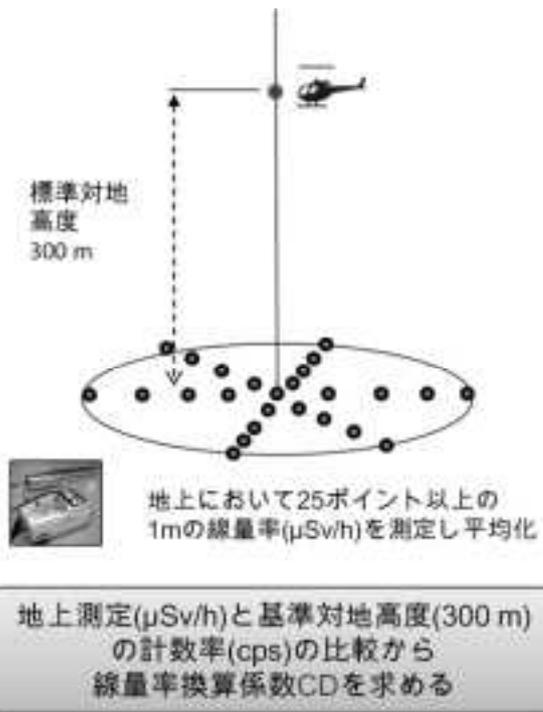


Fig. 3-6 テストポイントフライトのイメージ

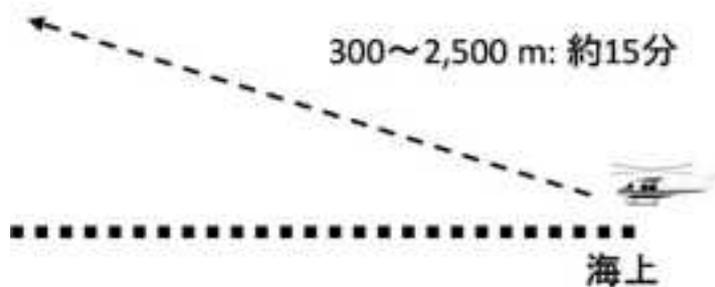


Fig. 3-7 宇宙線フライトのイメージ

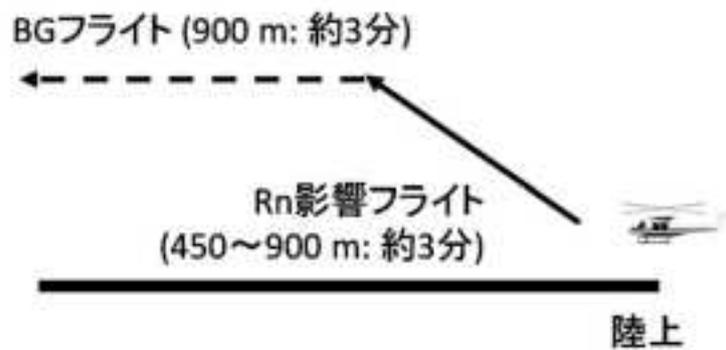


Fig. 3-8 Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージ

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

放射性セシウムの影響を測定することが目的であるため、②～④起源の計数率は減算する必要がある。これらを考慮した解析のフローを Fig. 3-9 に示す。なお、本章以降の線量率とは、周辺線量当量率 (1 cm 線量当量率) を意味する。

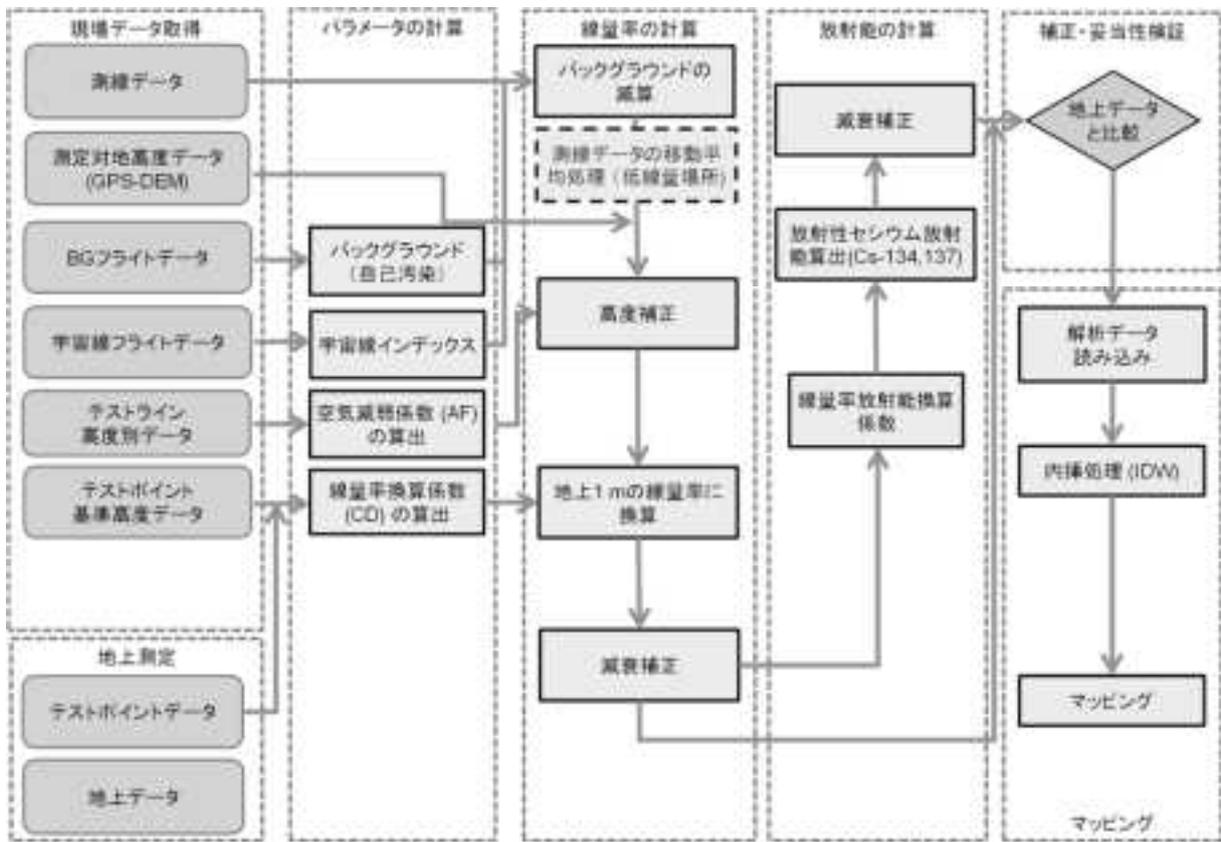


Fig. 3-9 解析のフロー

### 3.4. 線量率への換算方法

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

- ① 全計数率からバックグラウンド計数率（自己汚染及び宇宙線由来の計数率）減算
- ② 高度補正（フライト高度の基準高度からのずれを補正）
- ③ 線量率換算係数により地上線量率に換算

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（自己汚染及び宇宙線）

航空機モニタリングにおいて、自己汚染及び宇宙線はバックグラウンドとなる。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1,000 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：宇宙線フライト）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. 3-10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（50～3,000 keV）で計数されるが、2,614 keVのTl-208が放出する $\gamma$ 線の影響により、2614 keV以下の計数は弁別が難しい。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以上の計数に着目する。なお、RSIシステムにおいて、3,000 keV以上の計数は最終チャンネル（1,024 ch）に積算される。Fig. 3-11に海拔高度と宇宙線の計数率の関係例を示す。この例は、沖縄と北海道での海上において、50 m～2000 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指数の相関関係にあり、緯度に依存する。なお、日本のような中緯度地域では時間帯による変化は少ない。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毎に設定した。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、バックグラウンドの減算を行った。

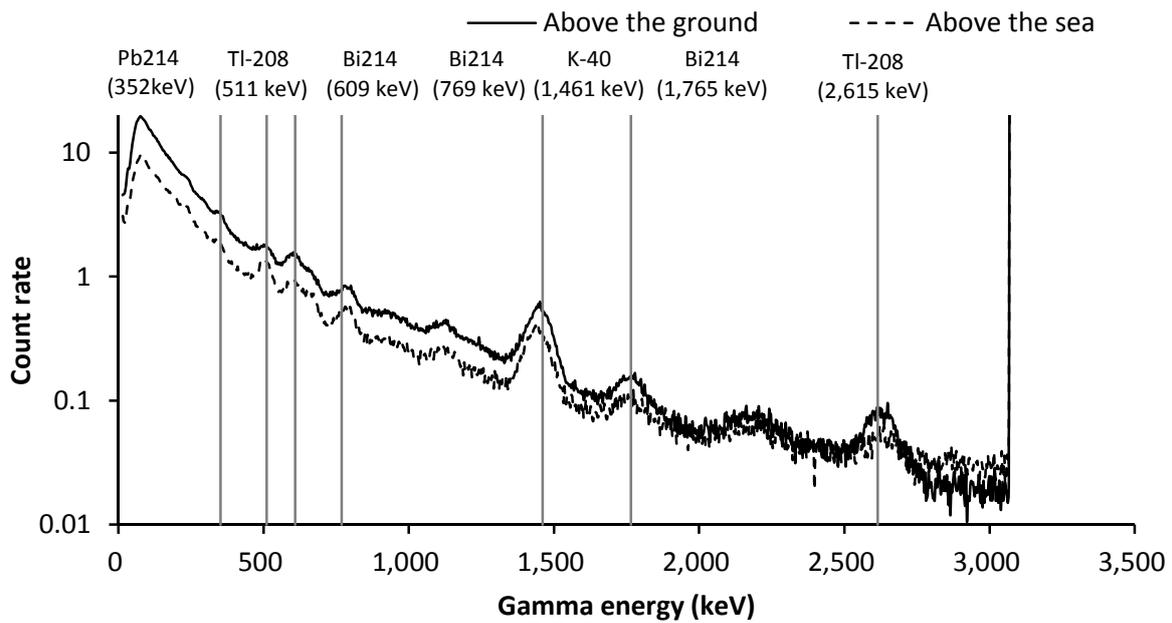


Fig. 3-10 RSI システムにおける地上で取得した  $\gamma$ 線スペクトルと海上でのスペクトル例

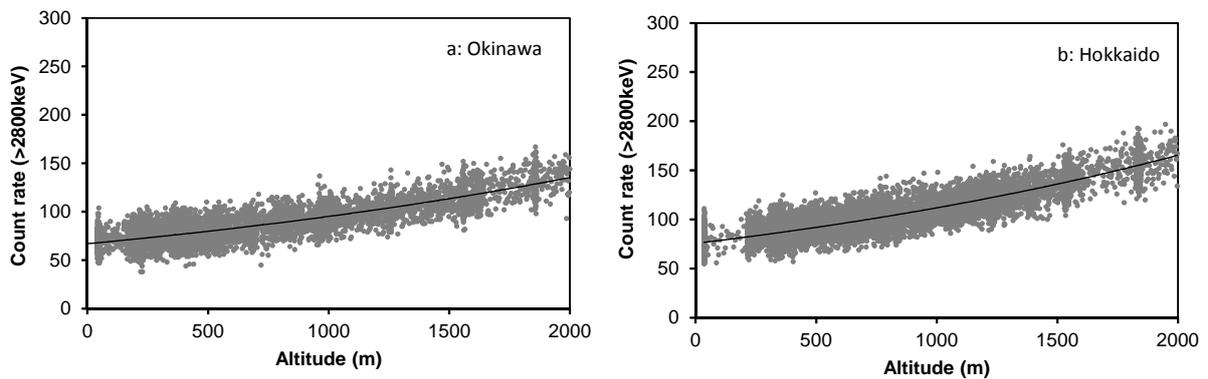


Fig. 3-11 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例

(a: 沖縄海域, b: 北海道海域)

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及び採用した CR-index

Measurement area	Fiscal year	System	ヘリコプター	自己汚染計数率	CR-index	
Kagoshima	2015	RSIシステム3	Bell 412 (JA6928)	AAC	381	3.86
Fukushima	2015	RSIシステム1	Bell 430 (JA05TV)	NNK	481	3.69
		RSIシステム2	Bell 412 (JA6928)	AAC	489	3.87
			Bell 412 (JA6767)	NNK	497	3.87

### 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、テストラインであらかじめ取得したデータを基に、実効的な 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; 以下、「HF」という)

H<sub>sd</sub>: 基準高度 (300 m)

H<sub>a</sub>: 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 (DEM: Digital Elevation Model) <sup>1)</sup> 及びジオイド高を差し引いて求める\*<sup>1</sup>。このように、Microsoft Excel 上で指数関数フィッティングを行い、近似曲線の傾きを AF とする。

### 3.4.3. 線量率への換算係数の算出方法

地表面から高さ 1 m における線量率に換算するために設定する CD 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 をフライトした計数率の平均値の比を取って求める。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毎に数値を設定する。CD は、テストポイント上でホバリングした航空機モニタリング機器でのデータ及び地上測定値の比から求める。

### 3.4.4. 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] 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<sub>all</sub>)
  - (2) 2,800 keV 以上の計数率 (C<sub>cos</sub>)
- ② 式(2)のように、C<sub>cos</sub> に CR-index (I<sub>cos</sub>) 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<sub>cos</sub>) を計算
- 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<sub>self</sub>) とする
- ④ C<sub>all</sub> から BG<sub>cos</sub> と BG<sub>self</sub> を差し引いた計数率を C<sub>net</sub> とし、CD 及び HF を用いて地表 1 m における線量率 D を算出

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

ここで、

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

\*<sup>1</sup> 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。

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

とした。

### 3.4.5. 天然核種の弁別と放射性セシウム起源の計数率の算出

天然核種の弁別方法は、DOEが開発したMMGC法 (Man Made Gross count) を参考にした<sup>12), 13)</sup>。本方法は、天然核種で得られるγ線スペクトルが、放射性セシウムの放出するγ線を含まない1,400~2,800 keV以上の計数率と全計数率の比 (BG-index) が一定であることに着目し、機体と検出器の組み合わせ毎に、あらかじめ放射性セシウムのない地域をフライトしたデータを基に、BG-indexを設定し、実際のフライトデータの1,400~2,800 keV以上の計数率を基に全体の計数率から減算する。BG-index算出に用いるスペクトルのROI (Region of Interest) のイメージをFig. 3-12に示す。

BG-indexの算出例をFig. 3-13に示す。本データは、平成23年度に関西西部において、1秒毎に測定したγ線スペクトルからBG-indexを求め、ヒストグラムで表示したものである。このようにばらつきはあるものの、正規分布に近い形を示す。今回の測定で使用した機体と検出器の組み合わせで設定したBG-indexについてTable 3-3に示す。

これらのパラメータを設定し、放射性セシウム起源の計数率の算出手順を以下に示す。また、計算式を式 [3] に示す。なお、線量率-放射能換算係数 (CF) については、3.4.6項に記述する。

- ① 測定で得られたγ線スペクトルから1,400~2,800 keVの計数率 ( $C_{\text{BG}}$ ) 計算する。
- ②  $C_{\text{BG}}$ にBG-index ( $I_{\text{BG}}$ ) をかけて天然核種起源の計数率 ( $BG_{\text{nat}}$ ) を算出する。
- ③  $C_{\text{net}}$ から $BG_{\text{nat}}$ を差し引き、放射性セシウムだけの計数率 ( $C_{\text{Cs}}$ ) を求める。
- ④  $C_{\text{Cs}}$ にCDとHFを使用してから放射性セシウムだけの線量率 ( $D_{\text{Cs}}$ ) を算出する。
- ⑤ 式(3)より、線量率に線量率-放射能換算係数 (CF, [ $\mu\text{Sv/h}$ ]/[ $\text{kBq/m}^2$ ]) をかけて放射性セシウムの沈着量  $R_d$  に換算する。

$$R_d = \frac{D_{\text{Cs}}}{CF} \quad [3]$$

ここで、

$$C_{\text{Cs}} = C_{\text{net}} - BG_{\text{nat}}$$

$$BG_{\text{nat}} = C_{\text{BG}} \cdot I_{\text{BG}}$$

$$D_{\text{Cs}} = \frac{C_{\text{Cs}} \times \text{HF}}{\text{CD}}$$

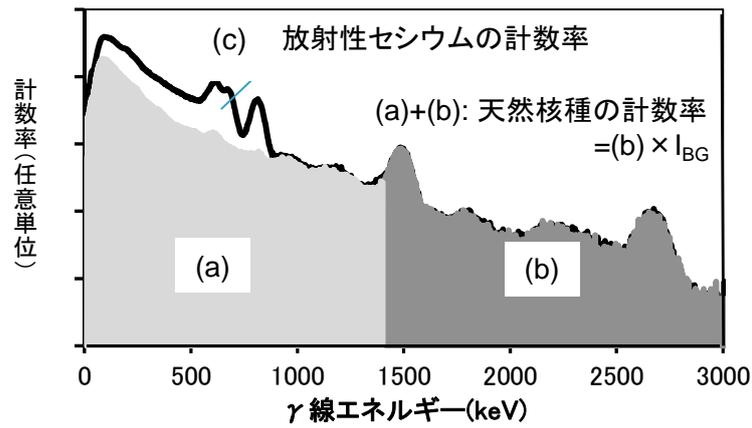


Fig. 3-12 放射性セシウムの計数率の算出イメージ  
( $I_{BG}$ : BG-index)

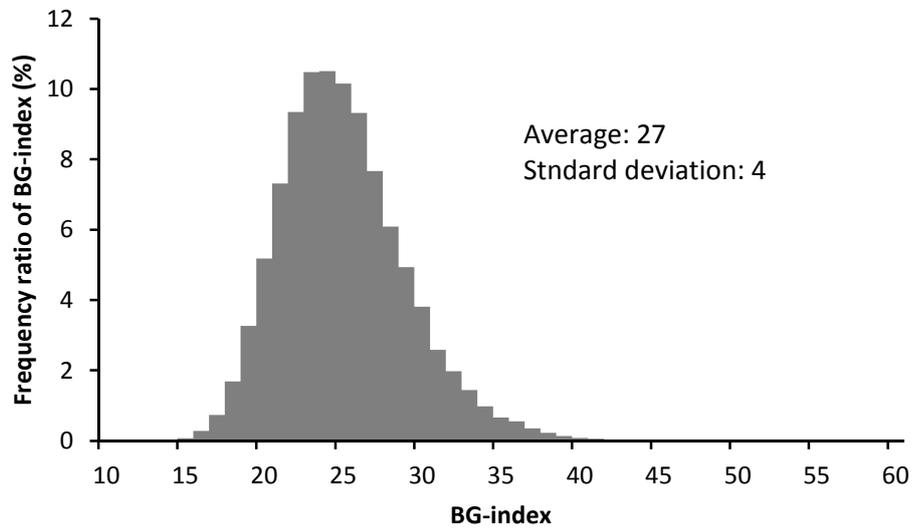


Fig. 3-13 BG-index の算出例  
(川内原子力発電所周辺において、1秒毎に測定したγ線スペクトルから  
BG-index を求めヒストグラムで表示、全 82,000 データ: Bell 412)

Table 3-3 BG-index 一覧

System	ヘリコプター	BG-index
RSIシステム1	Bell 430 (JA6900) AAC	33
	Bell 412 (JA6767) NNK	27
RSIシステム2	Bell 412 (JA6928) AAC	26
	Bell 430 (JA05TV) NNK	31
RSIシステム3	Bell 412 (JA6928) AAC	27

### 3.4.6. 線量率-放射能換算係数

航空機モニタリングでは、地上の放射性セシウムの沈着量に換算する場合に、文献<sup>14)</sup>に示される線量率-放射能換算係数 (Conversion factor, [ $\mu\text{Sv/h}$ ] / [ $\text{kBq/m}^2$ ], 以下、「CF」という。)を使用する。CF は、土壌への放射性セシウムの浸透度を示す重量緩衝深度 ( $\beta$ )によって異なった値が設定されている。重量緩衝深度と CF の関係について Fig. 3-14 に示す。これまで、福島第一原子力発電所周辺で行われている航空機モニタリングにおいては、過去との比較を考慮し  $\beta = 1.0$  の CF を継続的に使用している。

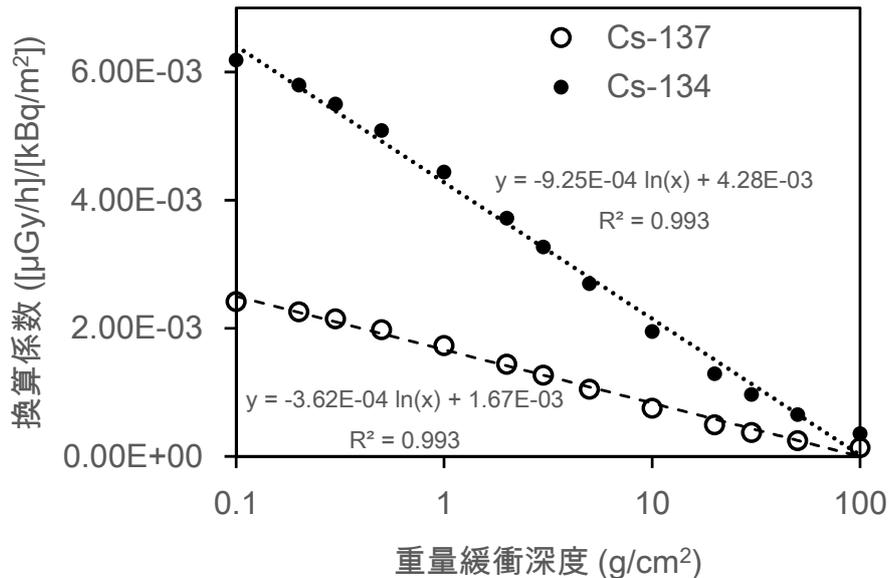


Fig. 3-14 重量緩衝深度と線量率-放射能換算係数の関係  
([文献 14] のデータを基に対数による近似曲線を表示)

### 3.4.7. 減衰補正

発電所の放射性核種が放出されてから時間が経過し、半減期の短い核種はほぼ減衰しており、2011年8月13日以降では、 $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  が評価核種となる。ここでは、線量率から放射能への  $^{137}\text{Cs}$  換算係数、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  濃度比及び測定時点の線量率を評価時点の線量率に補正する暫定的な算出方法について記述する。線量率から放射能への換算は、緩衝深度  $\beta = 1.0$  の場合の換算係数 CF を適用し、あらかじめ求めておいた  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  比を用いて、地上 1 m 高さにおける線量率から地表における  $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  の放射性物質濃度に換算した。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  比は、2011年8月に福島県で 50 ポイント以上の In-situ Ge による測定データを取得し、2011年8月13日時点での  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs} = 0.917$  ( $B_0$ ) を基本とした。その基準日から、航空機モニタリングのデータ取得日に減衰計算して換算した。評価時における  $^{137}\text{Cs}$  及び  $^{134}\text{Cs}$  の濃度  $C_{\text{Cs}137}$ 、 $C_{\text{Cs}134}$  は、航空機サーベイデータから求まる全線量率から天然核種によるバックグラウンドの線量率を引いた線量率  $E_{\text{Cs}137+134}$  ( $\mu\text{Sv/h}$ ) 及び評価時における  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  比  $B$  を用い、下記の式 [4], [5] から算出する。

$$C_{Cs137} = A \cdot E_{Cs137+134} \quad [4]$$

$$C_{Cs134} = B \cdot C_{Cs137} \quad [5]$$

ここで、評価時の線量率からの Cs-137 濃度換算係数 A は、式 [6] で表される。

$$A = \frac{\exp(-\lambda_{Cs137} \cdot t)}{CF_{Cs137} \cdot \exp(-\lambda_{Cs137} \cdot t) + B_0 \cdot CF_{Cs134} \cdot \exp(-\lambda_{Cs134} \cdot t)} \quad [6]$$

ここで、t: 基準日 (2011/8/13) からの経過時間、 $\lambda_{Cs137}$  及び  $\lambda_{Cs134}$ : 崩壊定数 (0.693/半減期) としている。

線量率の減衰補正方法は、以下のような手順を設定した。

- ① 換算した放射能を航空機モニタリングの取得日に合わせて減衰補正する。
- ② 減衰補正した値に CF を乗じて線量率に換算する。
- ③ 換算した線量率にバックグラウンド線量率を足し、全線量率とする。

#### 3.4.8. 検出下限値

放射性セシウムの沈着量は、 $\gamma$  線スペクトルのデータから、バックグラウンド (宇宙線、機体の汚染) を差し引き求めている。計数率から放射性セシウムへの換算式について式 [7] に示す。

$$Rd_{134} = (C_{all} - BG_{nat} - BG_{cos} - BG_{self}) \times \frac{1}{CD} \times \exp(-AF \times (H_{std} - H_m)) \times \frac{1}{CF} \times R_{\frac{134}{134+137}} \times DC_{134} \quad [7]$$

ここで、

$C_{all}$ : 全計数率 (cps)

$BG_{self}$ : 機体の汚染 (cps)

CD: 線量率換算係数 (cps/ $\mu$ Sv/h)

AF: 空気減弱係数 ( $m^{-1}$ )

$H_{std}$ : 基準高度 (m)

$H_m$ : 測定高度 (m)

$Rd_{134}$ : 放射性セシウムの沈着量 ( $Bq/m^2$ ) (\* $^{137}Cs$  の場合は 134 を 137 に読み替える)

$BG_{nat}$ : 天然起源の計数率 (cps)  $C_{BG} \times I_{BG}$  ( $C_{BG}$ : 1400-2800 keV の計数率;  $I_{BG}$ : BG index)

$BG_{cos}$ : 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)

CF: 線量率-放射能換算係数 (( $\mu$ Gy/h)/( $Bq/m^2$ ))

R: 放射性セシウムに対する  $^{134}Cs$  ( $^{137}Cs$ ) の割合

DC: 減衰補正係数 (=exp(- $\lambda\tau$ )) (\* $\tau$ : 経過時間)

この式からわかるように、バックグラウンドとなる計数率は、線量率計算時に定義した自己汚染計数率 ( $BG_{self}$ ) と宇宙線起因の計数率 ( $BG_{cos}$ ) 以外に天然の放射性核種による計数率 ( $BG_{nat}$ ) が含まれる。実際には、場所や高度の条件により異なった検出下限値となるが、ここで

は、標準的な検出下限値を求めることを目的とし、これらを合計したバックグラウンド計数率 ( $N_B$ ) を標準的な数値である 3,000 cps とし計算を行った。また、放射線の計測に一般的に使用されるキュリーの式 [8] を使用した<sup>15)</sup>。

$$N_D = 4.65\sqrt{N_B} + 2.71 \quad [8]$$

ここで、 $N_D$  は検出限界の計数率である。 $N_D$  を計数率の検出下限とし、RSI システムの標準的な CD (12,800 cps/ $\mu$ Sv/h) 及び AF (0.0072  $m^{-1}$ ) で線量率に換算した。この結果、放射性セシウムの沈着量の検出下限は、16 kBq/ $m^2$  と評価された。

### 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 [9] に航空機モニタリングにおける全線量率への換算方法の評価式について示す。本式をもとに、検出下限値及び信頼性について検討を行った。

$$D = (C_{all} - BG_{self} - BG_{cos}) \times \frac{1}{CD} \times \exp(-AF \times (H_{std} - H_m)) \quad [9]$$

ここで、

D: 全線量率 ( $\mu$ Sv/h)

$C_{all}$ : 全計数率 (cps)

$BG_{self}$ : 機体の汚染 (cps)

CD: 線量率換算係数 (cps/ $\mu$ Sv/h)

AF: 空気減弱係数 ( $m^{-1}$ )

$H_{std}$ : 基準高度 (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)

式に示すように、線量率の検出下限値は  $BG_{self}$  と  $BG_{cos}$  に依存する。 $BG_{cos}$  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 とし評価を行う。

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[10]に示した Currie の式<sup>27)</sup> に当てはめ、検出下限値 ( $N_D$ ) を算出する。

$$N_D = 4.653\sigma_{N_B} + 2.706 \quad [10]$$

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) から線量率を計算すると、0.012  $\mu$ Sv/h となる。

### 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 [7] から、以下の事項が挙げられる。

- ・ 検出器の計数誤差：一般的に、計数率に対して統計的な誤差が生じる。
- ・ CD の選択：キャリブレーションのためのデータ取得には、測定条件により 20 %程度の誤

差が生じる。本測定の経験を重ねてきた現在では、その不確かさは小さくなってきている。

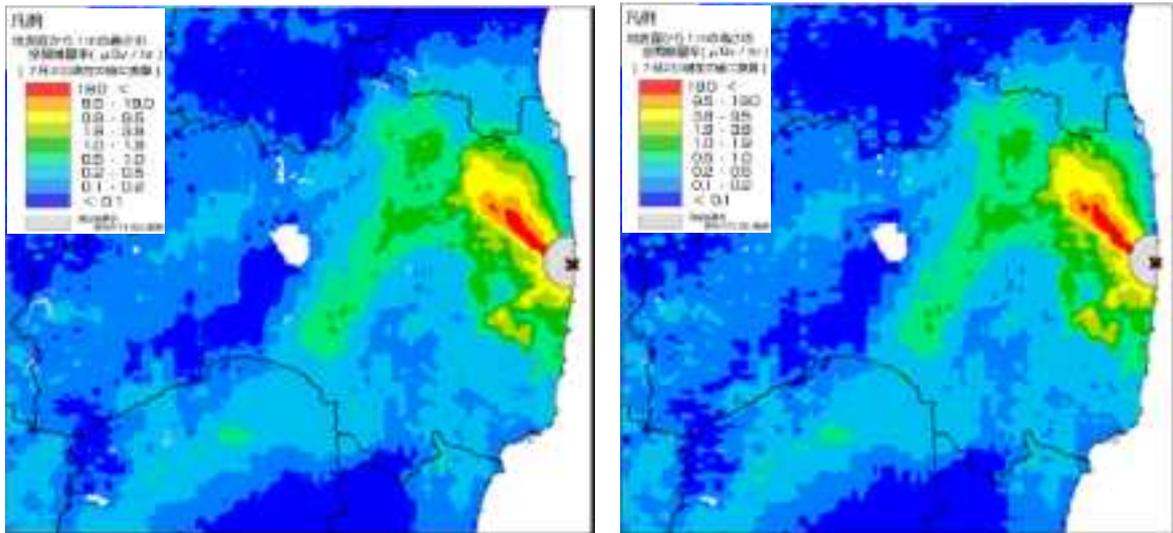
- 高度補正係数の選択：CD と同様に、キャリブレーションのためのデータ取得の状況により係数の選択時の不確かさが生じる。
- 測定高度の誤差：現在使用している GPS (Global Positioning System) には、衛星の位置等の状況により最大 30 m 程度の誤差がある。海拔高度の測定は GPS で実施しており、その誤差による不確かさが存在する。本誤差については、検証にまで至っておらず、今後の課題である。
- Rn 子孫核種の影響：日本においては、特に冬場に大陸由来の Rn の影響が知られている。Rn 子孫核種の  $\gamma$  線エネルギーは、放射性セシウムからの  $\gamma$  線エネルギーに近いこと及び地殻からの天然放射性核種からの放射線と同じであることから、弁別が難しい。

### 3.7. マッピング

線量率や放射性物質のマッピングについては、IAEA から標準的な方法が示されている<sup>12)</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 は、補間する地点の近傍にある複数の地点の測定値を平均し、推定する方法である。IDW とは、補間点からサンプル点までの水平距離の逆数の二乗を重みとした平均であり、以下の式 [11] で得られる。

$$\tilde{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{e_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{e_i^2}} \quad [11]$$

ここで、 $\tilde{Z}$  は補間点における推定地表高度である。また、 $e_i$  は補間点からサンプル点までの水平距離であり、補間点から近傍  $n$  点をサンプル点としたものである。補間する条件として「測定地点からの距離が遠くなるにつれて、影響が小さくなること」が前提になる。そのため、各地点の測定値が局所的影響をもち、推定する (平均) 値は、対象となる測定値の最高値より大きくなり、最低値より小さくならない。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、距離に応じて影響度を制御する乗数と内挿処理の対象となる地点数の 2 つである。本事業では、乗数 2.3、対象となる地点 180 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 RMS 誤差 (Root Mean Square: 二乗平均平方根) は 0.208 であった。Fig. 3-15 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。一般的に、乗数が大きいくほど、近傍データの影響力が大きくなり、推定値の詳細度が高くなる。Fig. 3-15 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。



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. 3-15 IDWに入力するパラメータとマップの関係

### 3.8. 空気中の Rn 子孫核種の影響について

航空機モニタリングの解析方法は、グロスカウント法を採用しているため、空気中の Rn 子孫核種は、減算できない。これまでの航空機モニタリングの経験より、海上での測定結果から、フライトの時期や高度によって機体周辺の空気中の Rn 子孫核種が計数されることが分かっている。ここでは、キャリブレーションフライトの一種として取得した地上の影響が既知である場所において取得した Rn 子孫核種フライトを解析し、影響度合いを評価する。なお、現状の手法では地上からの放射線の影響が不明である場所における Rn 子孫核種の影響を減算することができない。

ヘリコプターによるデータ採取は、地上の線量率が既知の場所において 450~1,000 m を直線的に上昇し、データを取得した。取得したデータはあらかじめ地上の影響が分かっているので、式 [12] から地上からの放射線の影響、宇宙線及び自己汚染の計数率を減算し、残差を Rn 子孫核種による計数率 ( $C_{Rn}$ ) とする。

$$C_{Rn} = C_{all} - BG_{self} - BG_{cos} - \left( \frac{D}{CD \times \exp(-AF \times (H_{std} - H_m))} \right) \quad [12]$$

取得したデータの対地高度と Rn 子孫核種由来の計数率の観測例について、Fig. 3-16 に示す。本鉛直分布は、式 [12] から求めた Rn 子孫核種起因の計数率を対地高度 20 m 毎に平均した。2月2日に取得したデータを見ると 450 m 付近に有意な計数率の上昇が確認できる。一方、2月3日の例では、計数率の上昇が確認できない。測定日毎の最大値を抽出し、観測日とともに Fig. 3-17 に示す。計数率の最大値は、2月2日に観測された 107 cps であり、その他のデータは 100 cps 以下となった。ここでの最大値 107 cps を、Table 3-3 の換算係数を当てはめて、地上 1m 高さの線量率に換算すると 0.01  $\mu\text{Sv/h}$  となる。すなわち、今回の測定において、Rn 子孫核種は最大 0.01  $\mu\text{Sv/h}$  の妨害となることが示唆され、大きな影響はなかったといえる。なお、本測定は

測定日の最初に実施しており、大気中の Rn 子孫核種に時間変動があるとすればこの限りではない。

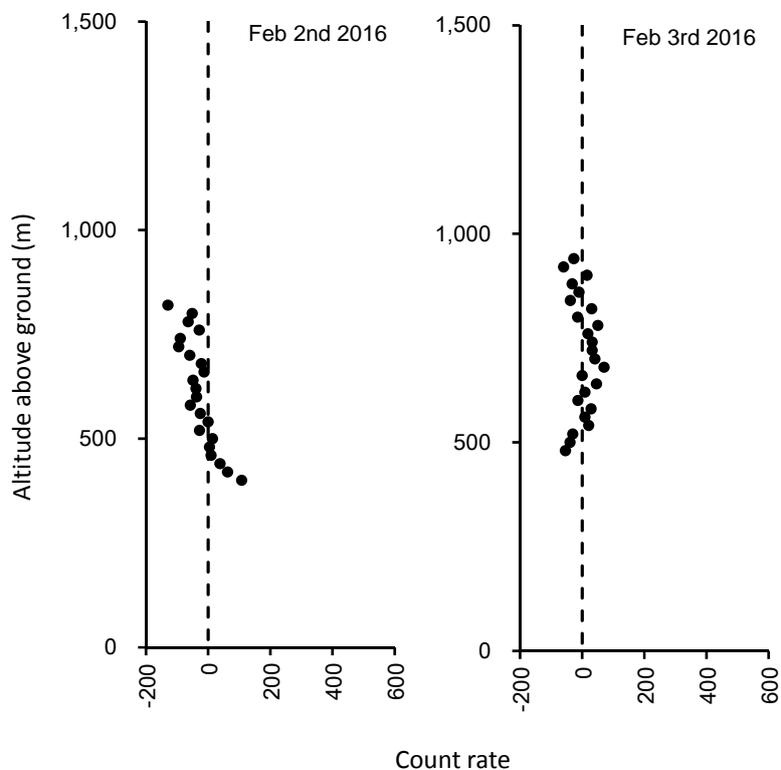


Fig. 3-16 Rn 子孫核種の検出例

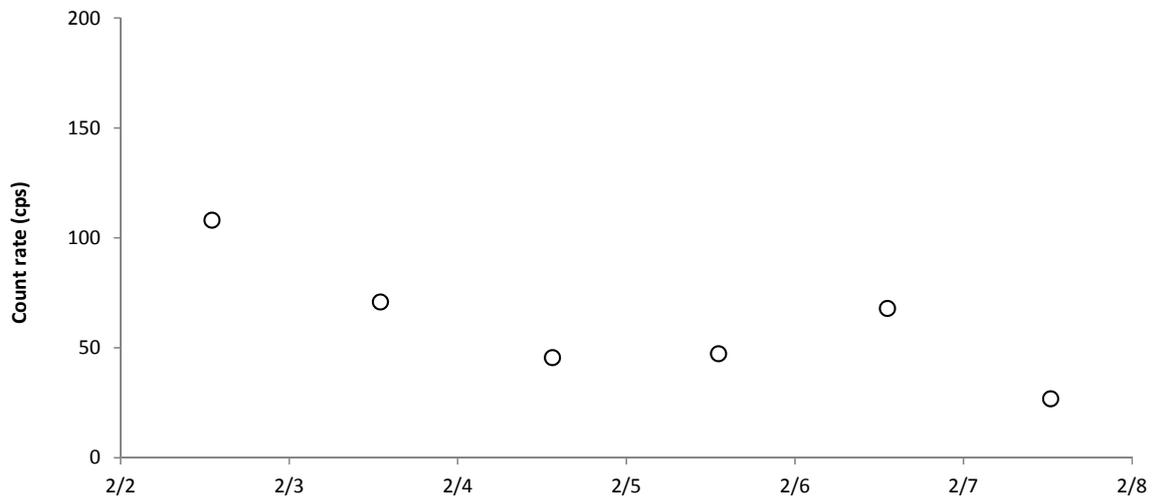


Fig. 3-17 Rn 子孫核種の日変動

#### 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、今回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。同表には比較として福島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、放射性セシウムが存在する福島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。

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. 4-3 に示す。なお、図に示した線量率には、サーバ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。

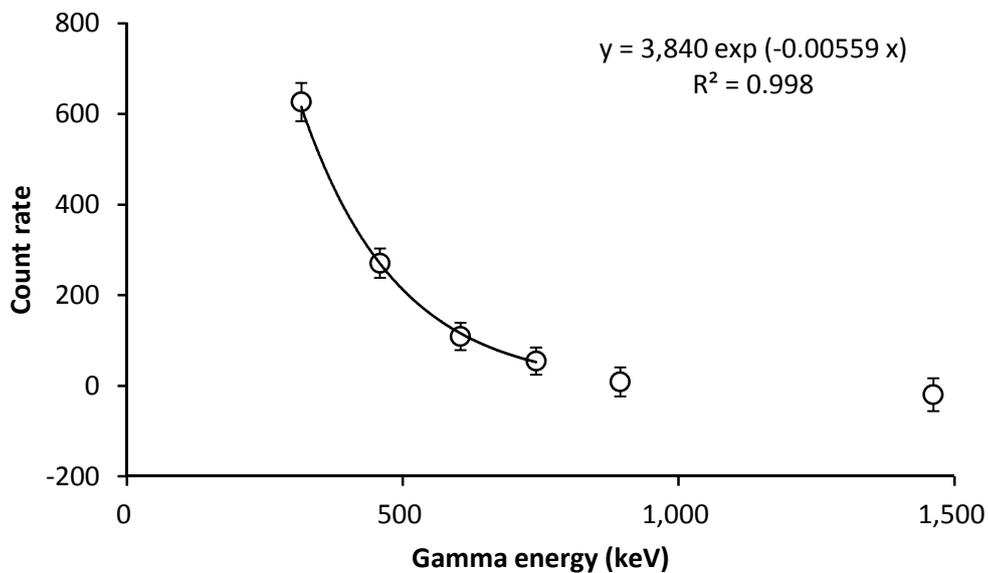


Fig. 4-1 対地高度と計数率の関係例  
(誤差は 1 秒毎のデータの標準偏差, Bell 412 JA6928, 2016/2/2 実施, Test line)

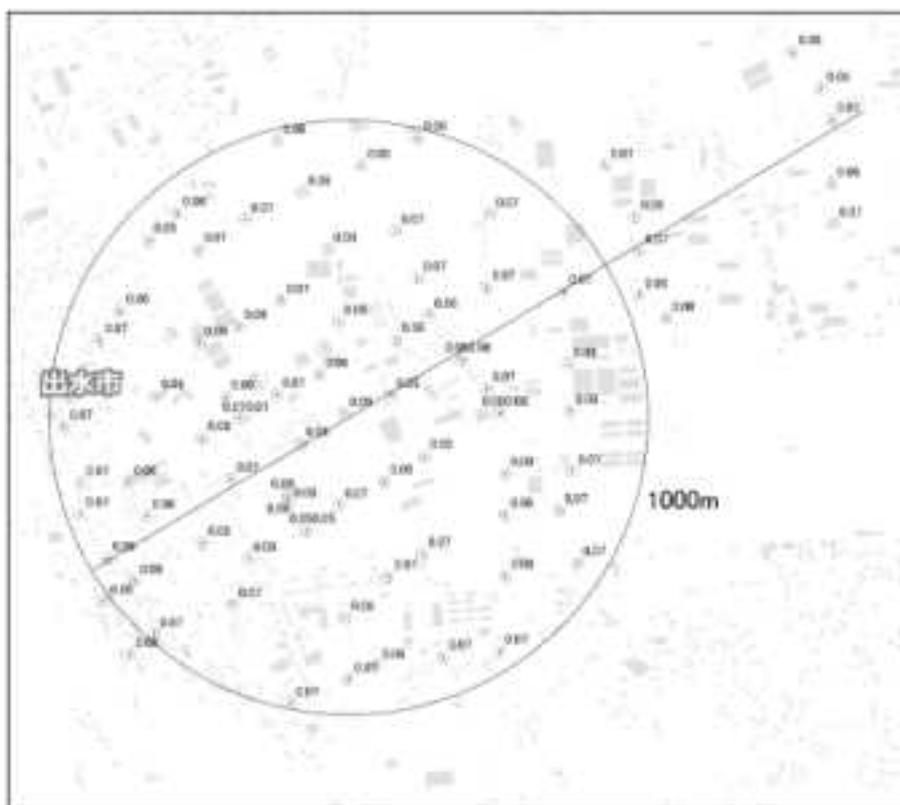


Fig. 4-2 地上測定データ

Table 4-1 本事業で取得した AF データ一覧

Monitoring No.	System (Device Serial)	Helicopter	Body No	Operarion company	Location	Date	AF	
							$\mu(m-1)$	R2
Sendai	5090	Bell412	JA6928	AAC	Izumi_TestLine	02/02/2016	-0.00559	1.00000
Sendai	5090	Bell412	JA6928	AAC	Izumi_TestLine	02/06/2016	-0.00740	0.99876
Average							-0.00650	

\* R2: 近似した指数関数曲線の決定係数

Table 4-2 本事業で取得した CD データ一覧

Helicopter	Operarion company	location	Date	Ground data (Nal survey)			AMS data			AGL (m)			CD (cps[ $\mu$ Sv/h] <sup>-1</sup> )
				Survey (uSv/h)	Stdev (2 $\sigma$ )	Stdev (%)	AMS data (cps)	Stdev (2 $\sigma$ )	Stdev (%)	AGL (m)	Stdev (2 $\sigma$ : %)	Stdev (%)	
Bell412	AAC	Izumi_TestPoint	2016/2/2	0.06	0.015	24	1394	281	20	962	170	18	9900
Bell412	AAC	Izumi_TestPoint	2016/2/6	0.07	0.021	32	1355	139	10	1000	81	8	10600

\* Survey: 地上でのサーベイメータによる測定結果, Stdev: 標準偏差, AMS data: RSI システムの計数率, AGL: フライト高度

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( $\sigma$ ))

		Bell412		Bell430		
		Value	Number	Value	Number	
Sendai	AF (m-1)	-0.0065	2			
	CD (cps/ $\mu$ Sv/h)	10600	2			
Fukushima	AF (m-1)	-0.00719 $\pm$	0.00047	21	-0.00723 $\pm$ 0.000402	35
	CD (cps/ $\mu$ Sv/h)	10900 $\pm$	2100	42	12800 $\pm$ 2800	65

## 4.2. 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. 4-3 に示す。なお、線量率マップの色合いについては、 $0.02 \mu\text{Sv/h}$  毎に分けて表示した。線量率の分布は、最大  $0.16 \mu\text{Sv/h}$  であった。Fig. 4-4 に、前述した天然の線量率マップと比較を示す。全体の線量率の分布傾向はよく似通っていることが分かる。特徴的に比較的線量の高い出水市の高線量エリアは、出水山地にある紫尾花崗岩体と呼ばれる花崗岩ドームの影響を受けていると考えられる<sup>16)</sup>。また、霧島市の高線量エリアは、霧島火山群である<sup>16)</sup>。一方、熊本県南部の高線量率エリアについては、Fig. 4-4 (右)に示した線量率マップに確認されなかった。この理由として、参照した線量率マップの解像度が挙げられる。すなわち、本線量率マップは、大地のウランとトリウムとカリウムの濃度から計算によって求める方法で作成されており、大地のウランとトリウムとカリウムの濃度実測結果がない場所については、内挿補間で色付けされている。該当の地域は、九州山地であり、それらの濃度の実測結果が少なく実際の線量率を再現できていない可能性がある。

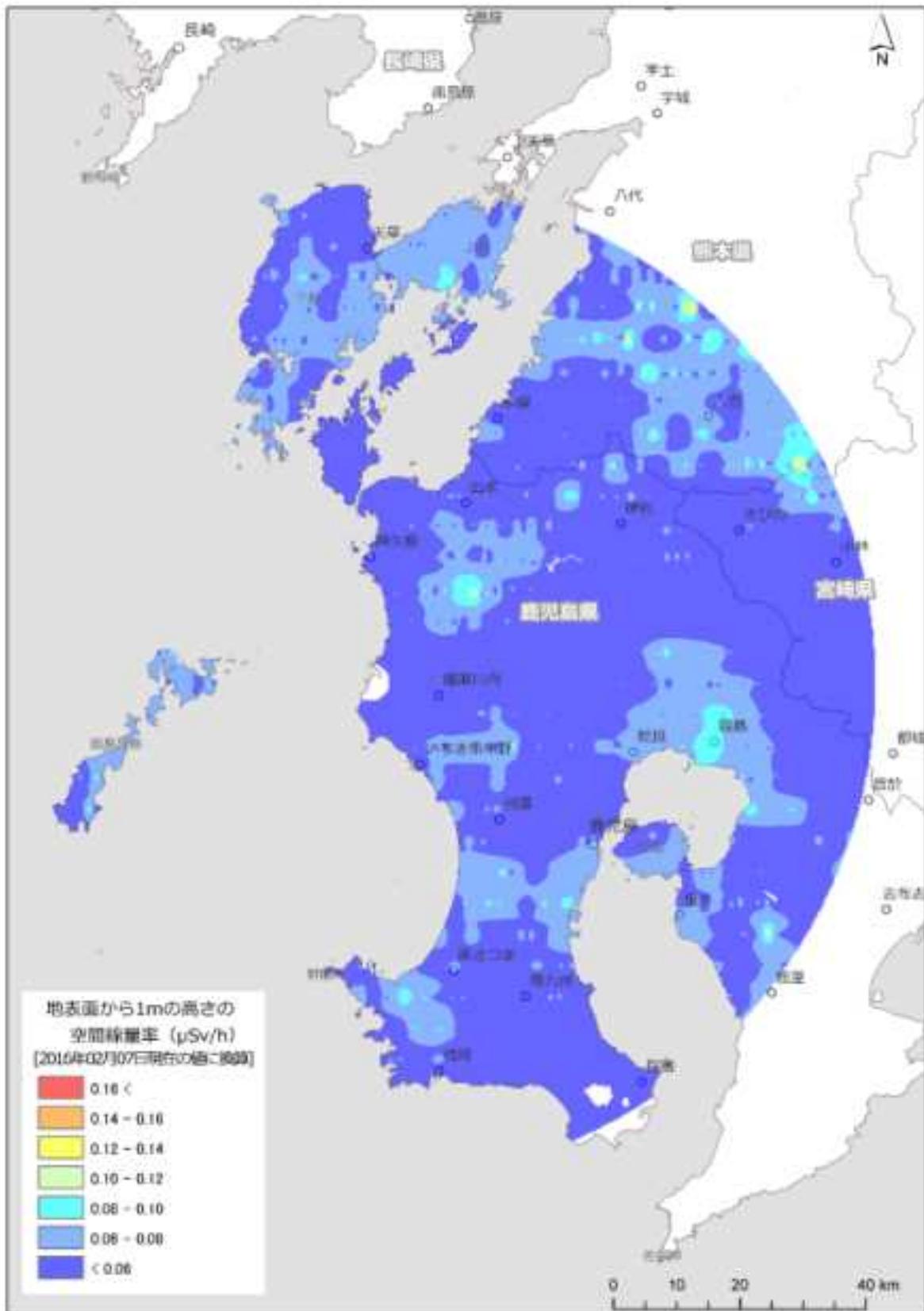


Fig. 4-3 川内原子力発電所周辺の線量率マップ  
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

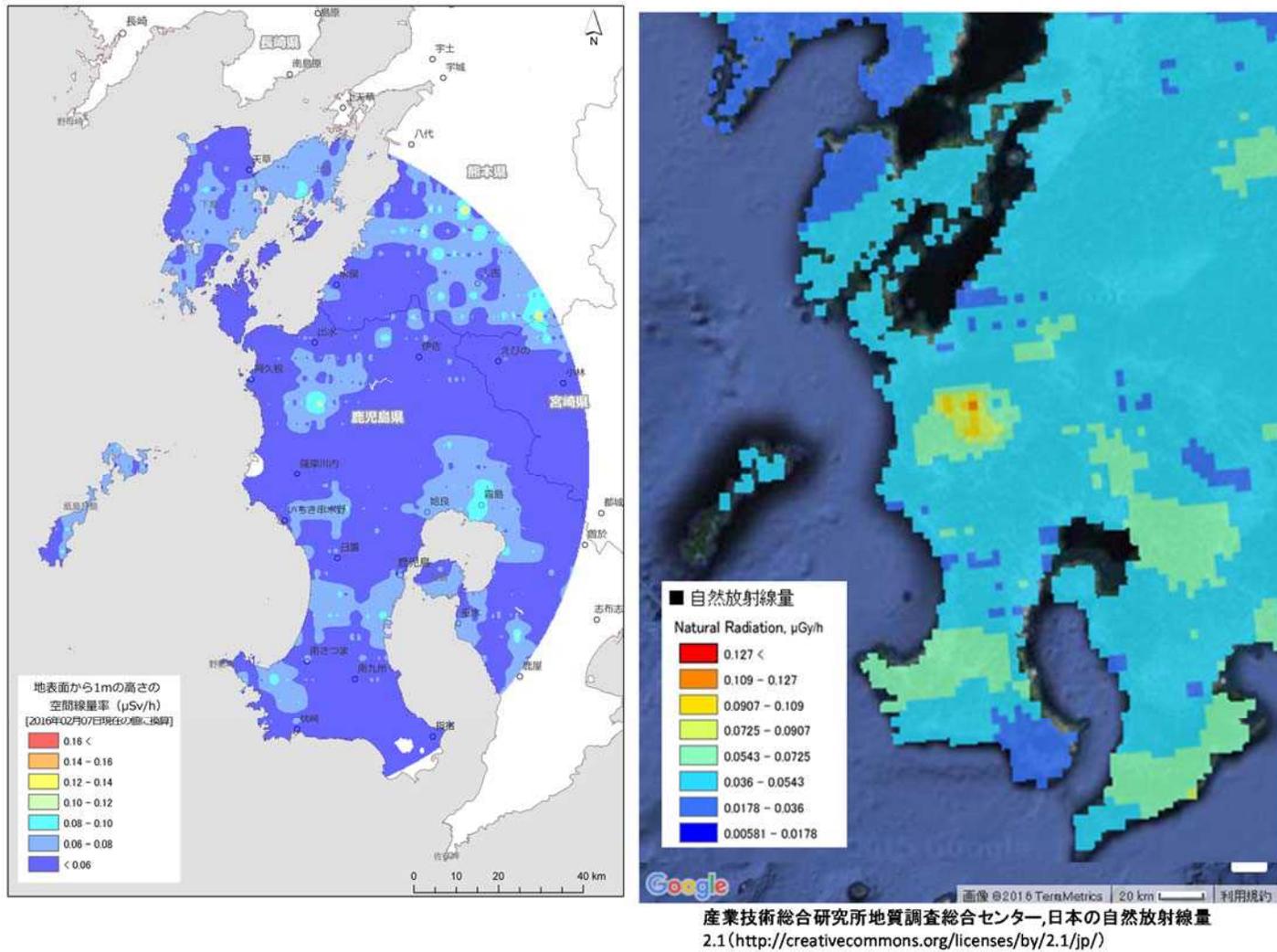


Fig. 4-4 川内原子力発電所周辺の線量率マップの比較

(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)

### 4.3. 地上値との比較

測定対象区域から、ヘリコプターの測線下の点を選定し、地上において、1m 高さの線量率を NaI サーベイメータ（日立 ALOKA 社製 TCS-171B）を用いて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. 4-5 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 及び Fig. 4-7 に示す。比較は、それぞれ散布図及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偏差のヒストグラムで比較した。散布図を見ると、測定結果はファクター0.5~2.0 の間に入り、概ね、地上の測定値と正の相関関係にあることが分かった。ヒストグラムの形状は正規分布に近く、相対偏差の平均値は、0 付近となり、両者はよく一致しているといえる。

なお、地上の測定結果との比較については、以下のような要因を考慮しなくてはならない。

- ① 測定の範囲の違い：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。地上における測定は、地上 1 m 高さにおける測定でも測定範囲は半径 30 m 程度の円の平均値となる。よって、特に、地上の線量率の分布は均一でない場所では、測定結果が合わない可能性がある。
- ② 周辺からの影響：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線が地上測定に影響する場合や、上空で測定する場合には、地表面に沈着している放射線を遮蔽するため、単純に比較できない場所がある。

今回、航空機モニタリングで測定した結果は、Fig. 4-6 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線量率分布とよく一致したことから、地上の線量率分布をよく再現できていると考えられる。



Fig. 4-5 地上における測定点  
 (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)

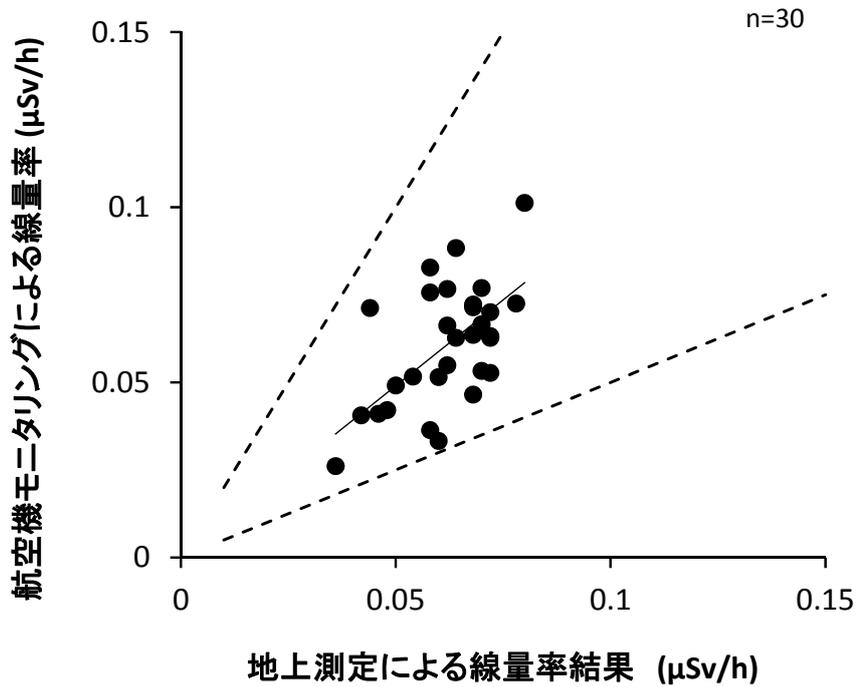


Fig. 4-6 地上における線量率測定結果との比較 (散布図)

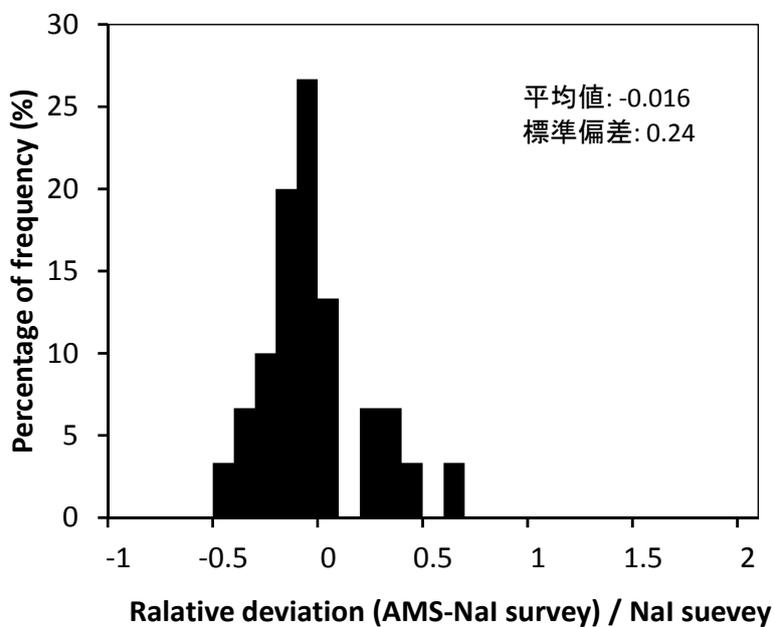


Fig. 4-7 地上における線量率測定結果との比較 (相対偏差)

#### 4.4. 天然の放射性核種濃度

航空機モニタリングで測定した川内原子力発電所周辺の線量率分布測定を目的に取得したデータを基に、天然の放射性核種濃度への換算について検討を行った。

一般的に $\gamma$ 線スペクトルを利用し、天然の放射性核種を核種毎に定量することが一般的である。航空機モニタリングにおいても、 $\gamma$ 線スペクトルが利用できる。Fig. 4-8 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のエネルギーである K-40 (1,461 keV)、U 系列 (U-series: Bi-214: 1,765 keV, 2,204 keV) 及び Th 系列 (Th-series: Tl-208: 2,615 keV) が利用できる。一方、高エネルギー側は低エネルギー側と比較して効率が悪いため、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は 1 秒毎にデータを取得しているが、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スペクトルを使用し、Fig. 4-8 のようにスペクトルピークの計数率を求めた。

地上の濃度に換算するために、パラメータの設定を行った。前述のように、航空機モニタリングでは、換算係数と高度補正係数が必要となる。まず、換算係数 (CC: Conversion factor for natural nuclide concentration) は、Fig. 3-5 で示したテストラインにおいて、In-situ Ge 検出器による 30 分間の測定を 5 地点において、K-40、U-series 及び Th-series の濃度を測定したデータの平均値と上空でホバリングした際の検出器の計数率を比較することで求めた。また、高度補正係数 (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, 150m, 200 m, 300 m, 400 m 及び 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. 4-9 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 4-4 に示す。

上記の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 K-40、U-series 及び Th-series についてそれぞれ Fig. 4-10, 4-11 及び 4-12 に示す。各最大濃度を見ると K-40、U-series 及び Th-series は、500 Bq/kg、45 Bq/kg 及び 25 Bq/kg となった。一般的に、日本におけるそれぞれの核種の濃度は、K-40、U-series 及び Th-series について 100~700 Bq/kg、10~50 Bq/kg 及び 7~50 Bq/kg と言われており<sup>17)</sup>、濃度のレベルは概ね整合する。

それぞれ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>18)</sup>を利用した。Fig. 4-13 にそれぞれの元素濃度と天然放射性核種マップを比較する。なお、元素濃度は土壌の分析を基に内挿して作成されており、山間部等のデータは少ないので注意が必要である。この地球化学図は元素の濃度であり、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。ただし、K-40 における薩摩半島の先端等、元素の濃度のデータはあっても線量率のデータと一致しない場所がみられた。現時点で原因の特定は難しいが、今後もデータを蓄積し、検証することが必要である。全体的には、本手法で一定の信頼性のある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。

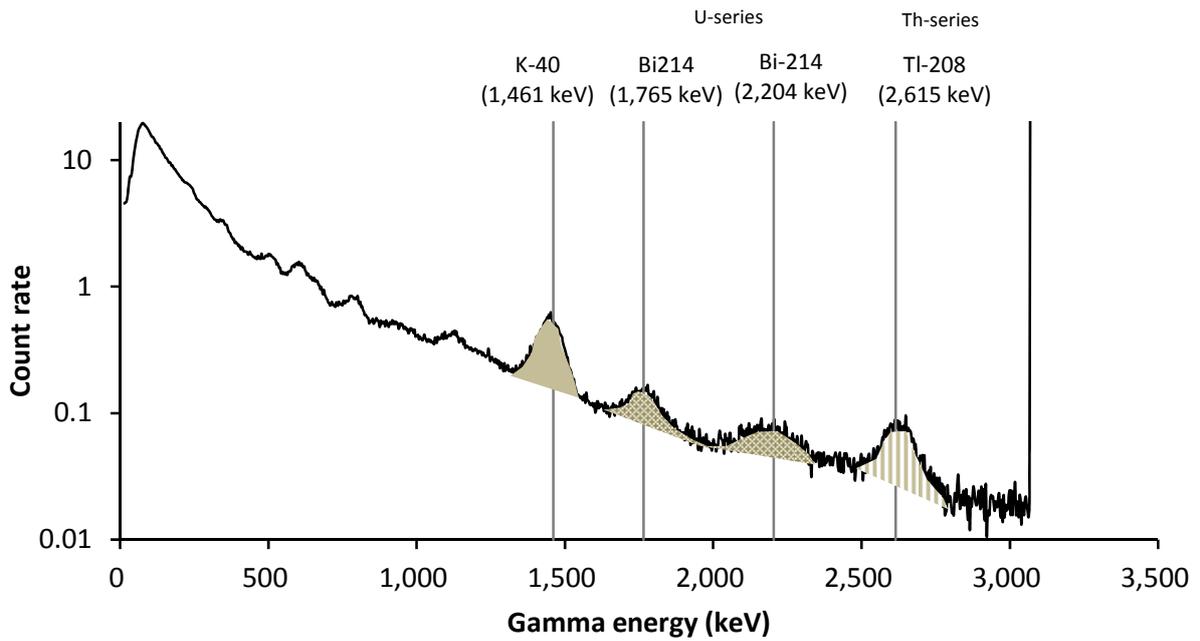


Fig. 4-8 天然の放射性核種によるピーク解析例

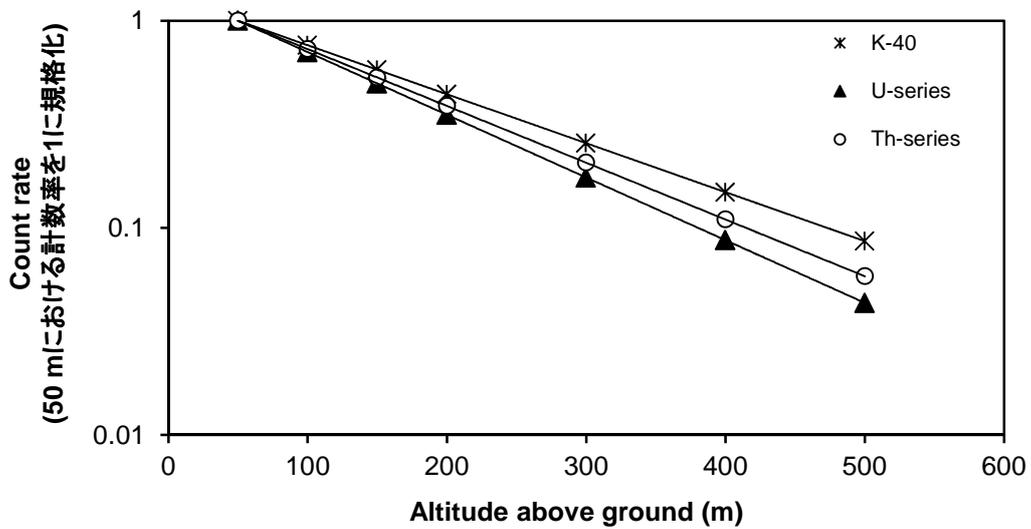


Fig. 4-9 天然の放射性核種別の高度と計数率の関係 (EGS5 によるシミュレーション)

Table 4-4 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

	K-40	U-series	Th-series
CC (cps/Bq/kg)	0.043	0.23	0.27
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

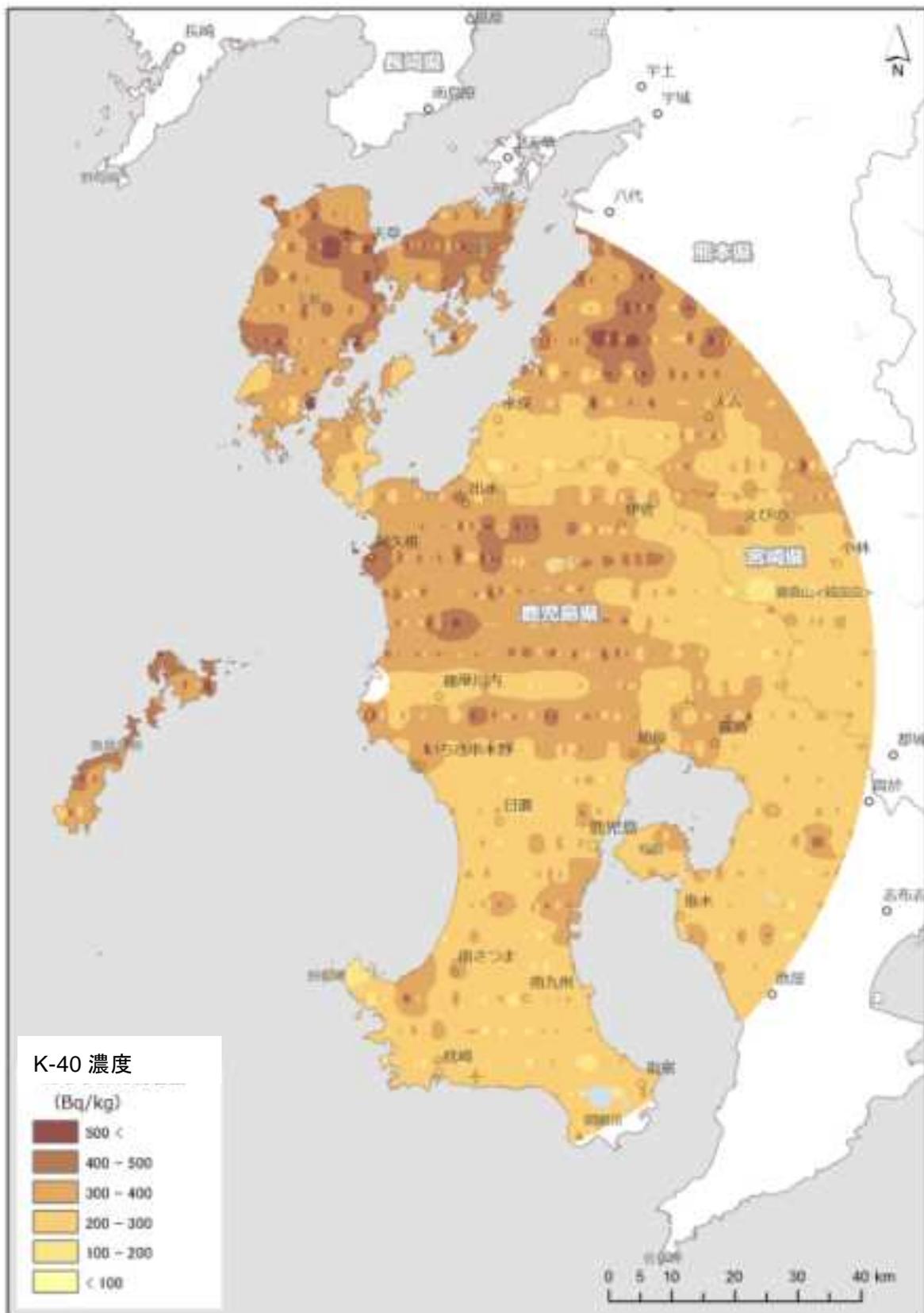


Fig. 4-10 川内原子力発電所周辺の K-40 濃度マップ  
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

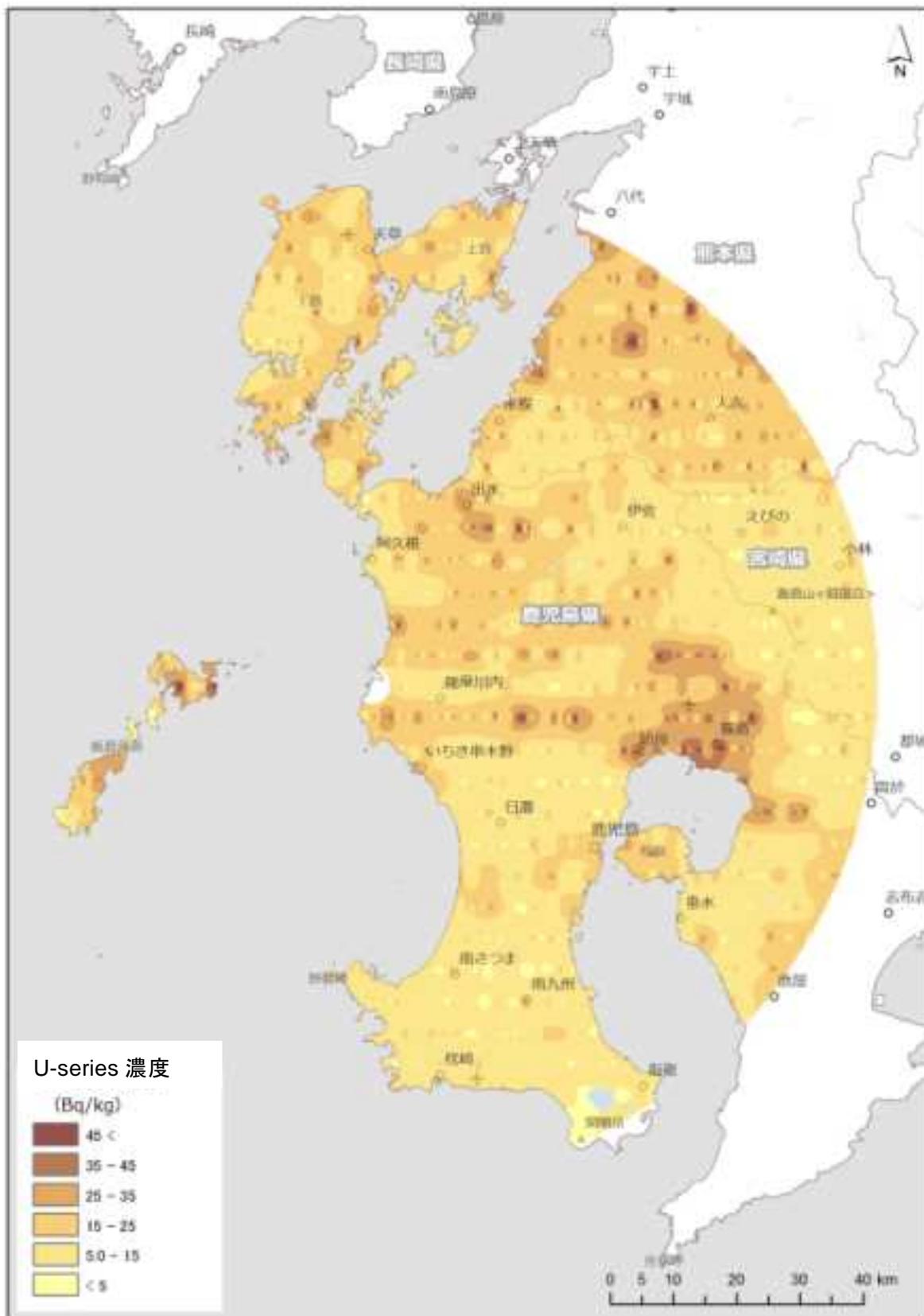


Fig. 4-11 川内原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ  
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

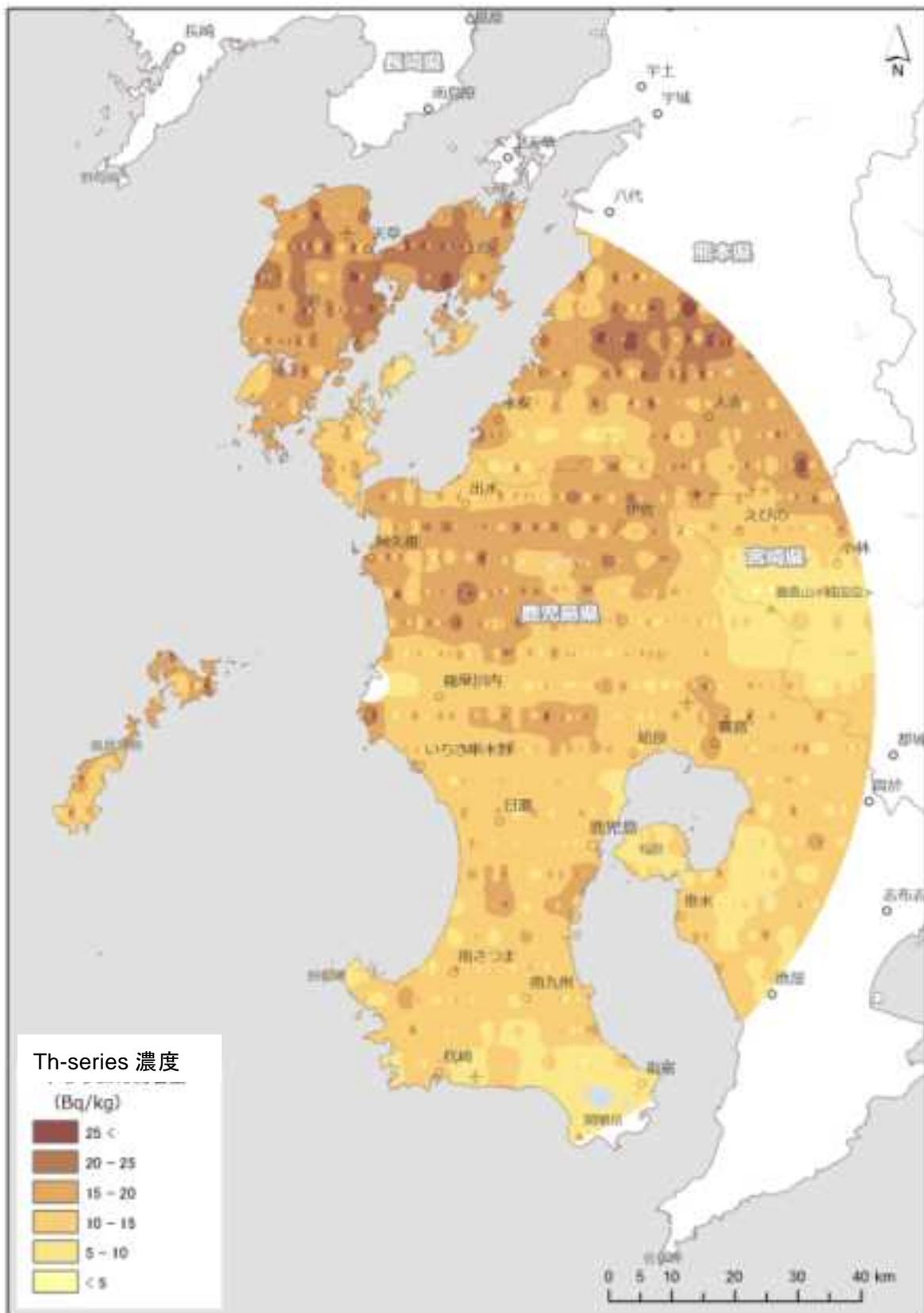


Fig. 4-12 川内原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ  
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

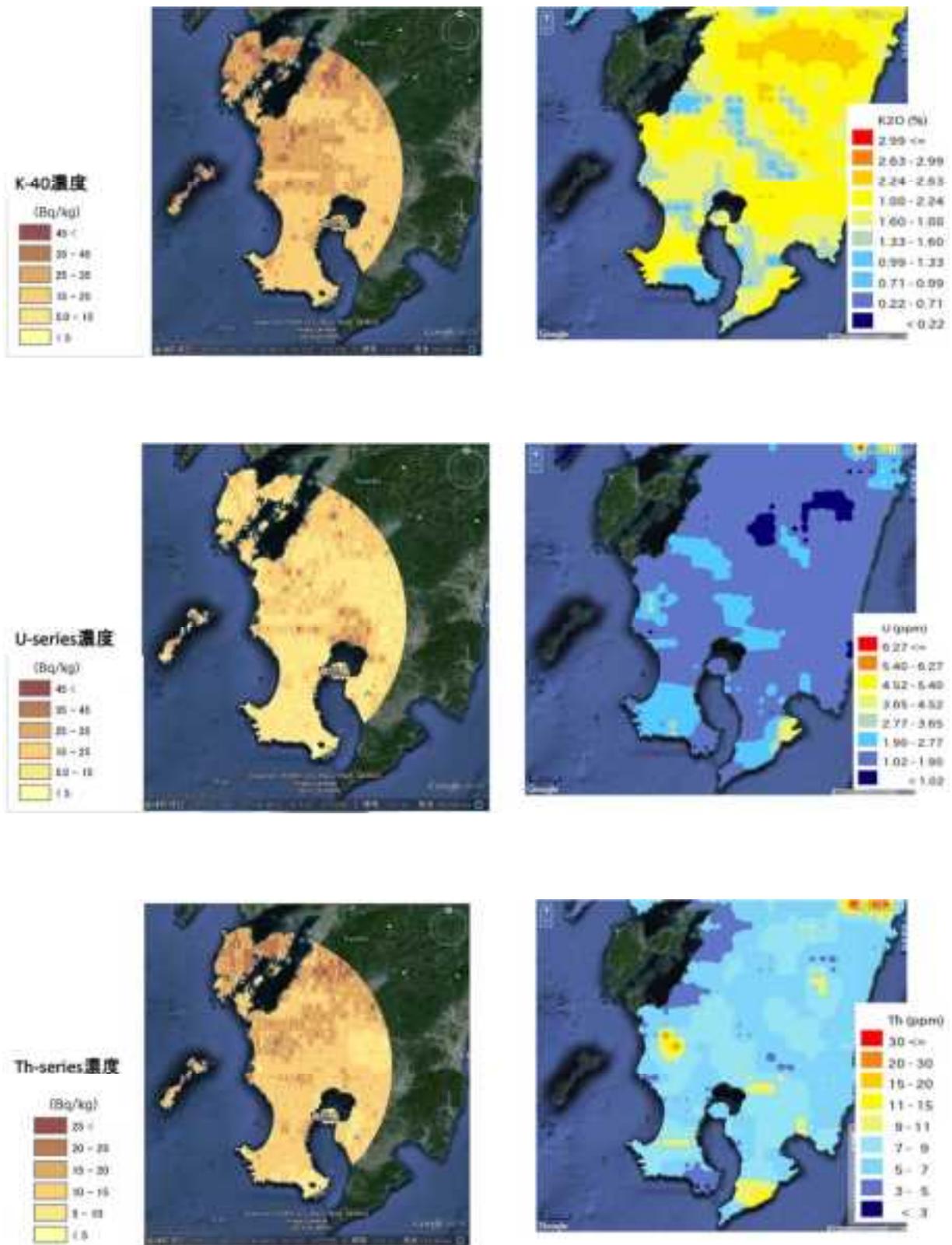


Fig. 4-13 川内原子力発電所周辺の放射性核種濃度測定結果と地球化学図比較

#### 4.5. 放射性セシウムの沈着量

川内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. 4-14 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。

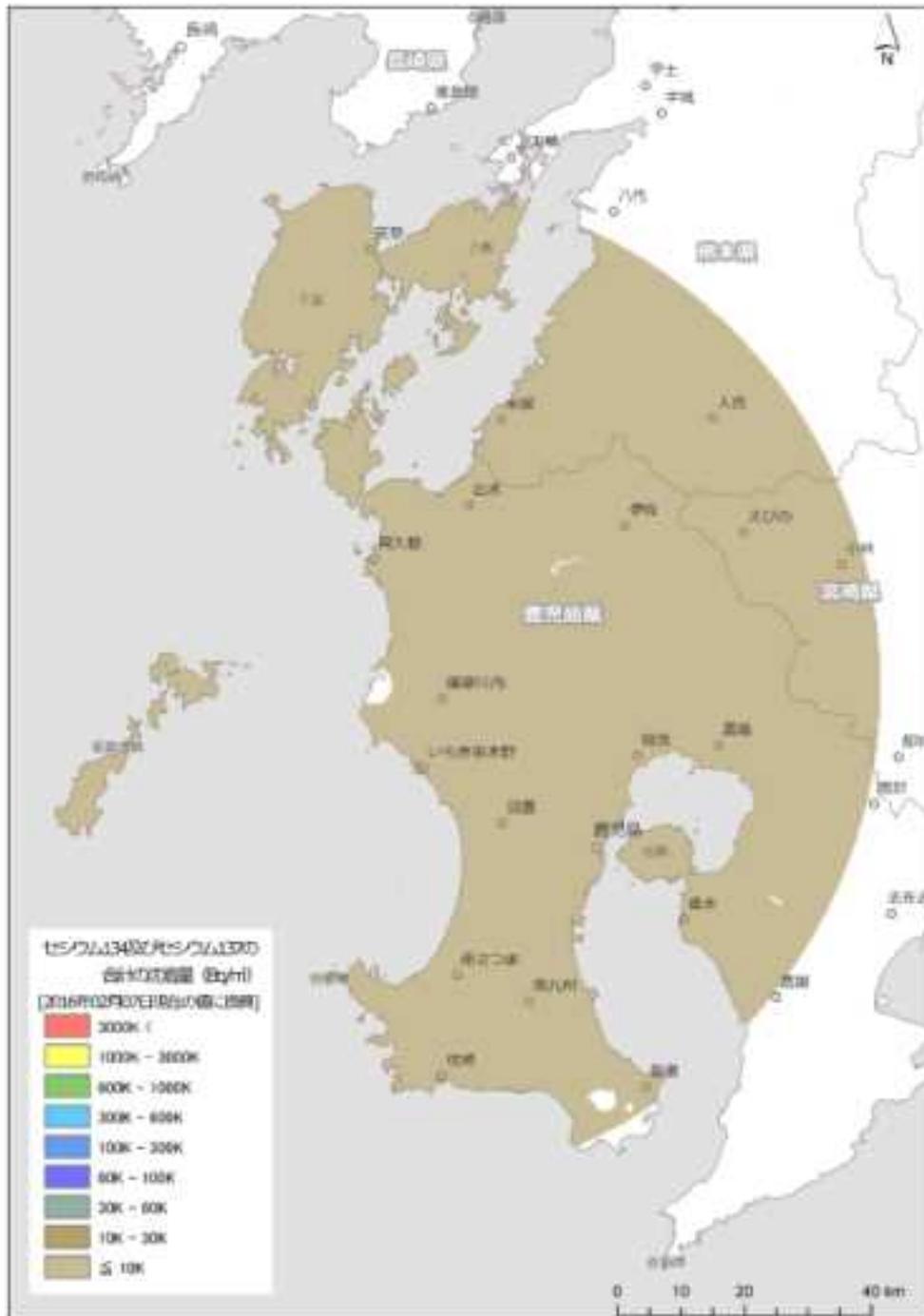


Fig. 4-14 第 10 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ  
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

## 5. 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

九州電力川内原子力発電所における3～80 km圏における天然の線量率及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、地上の測定データと比較することで確認を行った。線量率の分布は出水市や霧島市及び熊本県南部について、比較的線量率の高い場所が確認され、花崗岩等の地質によるものと推定された。

### ・測定の日程について

測線として5 kmメッシュの東西方向に設定した。測定の期間は、平成27年2月1日～2月7日（のべ12フライト）の7日間要した。期間中に、天候不良で半日間フライトができない日があった。

### ・手法について

天然の線量率及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

規制庁所有のRSIシステムの月例保守方法について定型化し、確実に実施した。実施の結果、特に異状は見られなかった。

### ・測定エリアの特徴について

公共の管制圏としては、鹿児島空港及び鹿屋空港が存在する。特に鹿児島空港は、島へのハブ空港として機能しており、飛行機の頻繁な離発着が行われている。また、えびの市に自衛隊の基地があり、フライトには調整が必要な場所がある。本エリアには、火山活動中の桜島があり、火山から半径2 kmは航空会社の自主的なフライト制限区域に設定されている。本地域は、畜産業が盛んであり、ヘリコプターの騒音で動物に影響が出ることがあるため、特に大規模な養鶏を営む農場上空のフライトには注意が必要である。

## 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(ATOMOZ), Vol. 54 No. 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 2014-014, 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, 平成27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, 95p
- 7) 原子力防災会議幹事会, 原子力災害対策マニュアル, 平成27年6月19日一部改訂
- 8) 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
- 9) 湊進, 日本における地表 $\gamma$ 線の線量率分布, 地学雑誌, 115, 87-95, 2006.
- 10) 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>  
(2016年3月1日閲覧).
- 11) 国土地理院ホームページ, <http://www.gsi.go.jp/kibanchizu/kibanchizu60004.html> (2016年3月1日閲覧).
- 12) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003.
- 13) Hendricks, T. and Riedhauser, S., An serial radiological survey of the Nevada test site., DOE/NV/11718-324, 1999.
- 14) 文科省, ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法, 放射能測定法シリーズ 33, 1992.
- 15) G. F. KNOLL, 神野郁夫, 木村逸朗, 阪井英次訳, 放射線計測ハンドブック (第4版), 日刊工業新聞社, 2013.
- 16) 町田洋, 太田洋子, 河名俊男, 森脇広, 長岡信治, 日本の地形7九州・南西諸島(第2版), 東京大学出版会, 2007
- 17) 分析センターホームページ, 環境放射線データベース,  
<http://search.kankyo-hoshano.go.jp/servlet/search.top?pageSID=19119433> (2016年3月1日閲覧).
- 18) 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/> (2016年3月1日閲覧).

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。