

令和2年度原子力施設等防災対策等委託費及び  
放射性物質測定調査委託費  
(80km圏内外における航空機モニタリング)事業  
報告書

令和3年3月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

安全研究防災支援部門 原子力緊急時支援・研修センター

防災研究開発ディビジョン 航空機モニタリンググループ

本報告書は、「令和 2 年度原子力施設等防災対策等委託費及び放射性物質測定調査委託費(80km 圏内外における航空機モニタリング)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の経緯 .....	3
3. 測定システムとヘリコプター .....	10
3.1. 航空機モニタリングシステム .....	10
3.2. ヘリコプターの選定 .....	12
3.3. 線源試験 .....	14
3.4. RSI システムの保守 .....	16
4. データ取得および解析方法 .....	19
4.1. 上空での測定値の地上への換算に関する基本的な考え方 .....	19
4.2. データ取得方法 .....	23
4.3. 設定パラメータ妥当性確認のためのキャリブレーションフライト方法 .....	25
4.4. 解析のフロー .....	32
4.5. 空間線量率への換算方法 .....	33
4.5.1. バックグラウンド減算 (自己汚染および宇宙線) .....	33
4.5.2. 高度補正 .....	35
4.5.3. 空間線量率への換算 .....	37
4.5.4. 空間線量率への換算方法 .....	48
4.6. 放射性 Cs の沈着量への換算方法 .....	48
4.6.1. 天然核種の弁別と放射性 Cs 起源の計数率の算出 .....	48
4.6.2. 空間線量率－放射能換算係数 .....	50
4.7. 減衰補正 .....	51
4.8. 検出下限値 .....	52
4.8.1. 空間線量率の検出下限値 .....	53
4.8.2. 放射性 Cs の沈着量の検出下限値 .....	53
4.9. 不確かさ .....	54
4.10. マッピング .....	54
4.11. 地上における測定値との比較 .....	56
4.12. 天然放射性核種由来の空間線量率マップの作成 .....	58
5. モニタリング結果 .....	63
5.1. 第 15 次モニタリング .....	63
5.2. 東日本第 11 次モニタリング .....	68
6. モニタリング結果の考察 .....	81
6.1. 過去のモニタリング結果との比較 .....	81

6.2. 環境半減期の算出.....	87
6.3. 土地利用による空間線量率の変化傾向の違い.....	89
7. 地形の起伏による影響と補正方法.....	97
7.1. 背景.....	97
7.2. 地形の起伏による測定への影響.....	97
7.3. 地形の起伏による影響の補正.....	100
8. ラドン弁別手法を適用した空間線量率マップの作成.....	104
8.1. ラドン子孫核種.....	104
8.2. ラドン弁別手法の理論.....	105
8.3. パラメータ (GIおよびRI) の決定.....	109
8.4. GIの高度補正方法.....	111
8.5. 80 km 圏外データへの適用.....	112
8.6. 従来手法の評価.....	118
9. 成果のまとめと今後の課題.....	121
10. まとめ.....	123
謝辞.....	123
参考文献.....	124

## Table list

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯 .....	6
Table 2-2 航空機モニタリングに関わる技術開発の経緯 .....	9
Table 3-1 使用したヘリコプターと RSI システムのリスト .....	13
Table 3-2 ポイントソースによる機体の遮蔽状況の比較 .....	14
Table 4-1 キャリブレーションフライトの一覧 .....	27
Table 4-2 機体とシステムの組み合わせと自己汚染による計数率および CR-index .....	35
Table 4-3 使用したパラメータのまとめ .....	36
Table 4-4 2020 年度に取得した AF データ一覧 .....	37
Table 4-5 2020 年度に取得した CD データ一覧 (Bell 412) .....	46
Table 4-6 2020 年度に取得した CD データ一覧 (Bell 430) .....	47
Table 4-7 BG-index 一覧 .....	50
Table 4-8 RSI システムの検出下限値 .....	54
Table 4-9 使用した減弱係数 ( $m^{-1}$ ) のまとめ .....	60
Table 6-1 二重指数関数近似から求めた環境半減期 .....	88
Table 6-2 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュ データ (平成 21 年度公開版) に基づく) .....	95
Table 6-3 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュ データ (平成 26 年度公開版) に基づく) .....	95
Table 6-4 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュ データ (平成 28 年度公開版) に基づく) .....	96
Table 8-1 ラドン子孫核種の放出する $\gamma$ 線 .....	105
Table 9-1 RSI システムの保守・運用実績 .....	122

## Figure list

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績.....	8
Fig. 3-1 RSI システムのブロック図 .....	11
Fig. 3-2 RSI システムの外観.....	11
Fig. 3-3 機底に燃料タンクのない機体一覧 .....	12
Fig. 3-4 線源試験イメージ.....	15
Fig. 3-5 RSI システムのエネルギー分解能および Gain の変動 (RSI 1) .....	17
Fig. 3-6 RSI システムのエネルギー分解能および Gain の変動 (RSI 2) .....	18
Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係 .....	20
Fig. 4-2 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の積算計数に対する線源位置の関係.....	21
Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の線源位置ごとの計数の割合 .....	21
Fig. 4-4 上空からの測定イメージ .....	22
Fig. 4-5 フライトイメージ.....	23
Fig. 4-6 予定したフライトの測線 .....	24
Fig. 4-7 テストラインフライトのイメージ .....	28
Fig. 4-8 テストラインの場所 .....	28
Fig. 4-9 テストポイントフライトのイメージ.....	29
Fig. 4-10 テストポイントの場所 .....	30
Fig. 4-11 宇宙線フライトのイメージ.....	31
Fig. 4-12 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ .....	31
Fig. 4-13 天然核種フライトの測線とオーバーラップフライト場所 .....	31
Fig. 4-14 解析のフロー .....	32
Fig. 4-15 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 .....	34
Fig. 4-16 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例 .....	34
Fig. 4-17 対地高度と計数率の関係例.....	36
Fig. 4-18 地上測定データ (Test Point 1).....	39
Fig. 4-19 地上測定データ (Test Point 3) .....	40
Fig. 4-20 地上測定データ (Test Point 4) .....	41
Fig. 4-21 地上測定データ (Test Point 5) .....	42
Fig. 4-22 地上測定データ (Test Point D) .....	43
Fig. 4-23 地上測定データ (Test Point E).....	44
Fig. 4-24 ヘリコプターの機種とオーバーラップフライトにおける計数率の関係.....	45
Fig. 4-25 放射性 Cs の計数率の算出イメージ.....	49
Fig. 4-26 BG-index の算出例.....	50
Fig. 4-27 重量緩衝深度と空間線量率—放射能換算係数の関係.....	51
Fig. 4-28 IDW に入力するパラメータとマップの関係.....	55
Fig. 4-29 地上の測線上における空間線量率測定値との比較 .....	57

Fig. 4-30 地上のランダムな位置における空間線量率測定結果との比較.....	57
Fig. 4-31 地上における可搬型 Ge 検出器による測定値との比較 .....	58
Fig. 4-32 関数適合法を用いた $^{134}\text{Cs}$ と $^{40}\text{K}$ の弁別 .....	60
Fig. 4-33 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell 412).....	61
Fig. 4-34 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell 430).....	61
Fig. 4-35 福島原子力発電所周辺の天然の空間線量率マップの作成例.....	62
Fig. 4-36 航空機モニタリングによる天然核種由来の空間線量率と可搬型 Ge 半導体検出器で得られた天然核種由来の空間線量率の比較.....	62
Fig. 5-1 第 15 次モニタリングにおける空間線量率マップ .....	64
Fig. 5-2 第 15 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ .....	65
Fig. 5-3 第 15 次モニタリングにおける $^{137}\text{Cs}$ 沈着量マップ .....	66
Fig. 5-4 第 15 次モニタリングにおける $^{134}\text{Cs}$ 沈着量マップ .....	67
Fig. 5-5 東日本第 11 次モニタリングにおける空間線量率マップ .....	69
Fig. 5-6 東日本第 11 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ.....	70
Fig. 5-7 東日本第 11 次モニタリングにおける $^{137}\text{Cs}$ 沈着量マップ .....	71
Fig. 5-8 東日本第 11 次モニタリングにおける $^{134}\text{Cs}$ 沈着量マップ .....	72
Fig. 5-9 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける空間線量率マップ .....	73
Fig. 5-10 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ.....	74
Fig. 5-11 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける $^{137}\text{Cs}$ 沈着量マップ .....	75
Fig. 5-12 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける $^{134}\text{Cs}$ 沈着量マップ .....	76
Fig. 5-13 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける天然核種由来の空間線量率マップ .....	77
Fig. 5-14 各測定年度における天然放射性核種による空間線量率マップの比較.....	78
Fig. 6-1 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較 .....	82
Fig. 6-2 福島原子力発電所から 80 km 圏内における第 4 次モニタリングおよび第 15 次モニタリングの空間線量率算出結果の比較.....	85
Fig. 6-3 旧避難指示区域における第 4 次モニタリングおよび第 15 次モニタリングの空間線量率...86	86
Fig. 6-4 旧避難指示区域における第 4 次モニタリングおよび第 15 次モニタリングの放射性 Cs 沈着量算出結果の比較 .....	86
Fig. 6-5 測定値の二重指数関数近似 .....	88
Fig. 6-6 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版 国土地理院土地利用調査データより) .....	91
Fig. 6-7 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版 国土地理院土地利用調査データより) .....	92
Fig. 6-8 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版 国土地理院土地利用調査データより) .....	93
Fig. 6-9 森林部および市街地における地表面から 1 m の高さの空間線量率の算出結果の比較 .....	94
Fig. 7-1 無作為に抽出した評価点の位置 .....	99

Fig. 7-2 数値標高マップから三角ポリゴンへの変換例 .....	100
Fig. 7-3 平坦な地形と起伏のある地形における対地高度 300 m での計数率比の頻度分布 .....	100
Fig. 7-4 地形の起伏による影響を補正する場合に考慮すべき点 .....	101
Fig. 7-5 第 15 次モニタリングの空間線量率マップの比較 .....	102
Fig. 7-6 第 15 次モニタリング結果と地上測定値との比較 .....	103
Fig. 8-1 ウラン系列およびトリウム系列 .....	105
Fig. 8-2 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 .....	107
Fig. 8-3 空気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ .....	108
Fig. 8-4 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 .....	109
Fig. 8-5 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 .....	110
Fig. 8-6 計算体系のイメージ .....	112
Fig. 8-7 計算体系のベンチマーク .....	112
Fig. 8-8 シミュレーションによる測定高度と GI の関係 .....	112
Fig. 8-9 ラドン影響弁別手法適用後の東日本第 11 次モニタリングの空間線量率マップ .....	114
Fig. 8-10 東日本第 11 次モニタリングの測定結果から計算した空気中のラドン子孫核種の NaI RSI システムで検出された計数率マップ .....	115
Fig. 8-11 ラドン影響弁別後の地上測定値との比較 (東日本第 11 次モニタリング) .....	116
Fig. 8-12 従来手法とラドン弁別手法の比較 .....	119
Fig. 8-13 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同日における測定 データにラドン弁別手法を適用して求めた計数率の平均値の比較 .....	120



## 1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に起因して、東京電力福島第一原子力発電所(以下、福島原子力発電所)事故が発生し、周辺環境に放射性物質が広く拡散したため、その影響を評価することが急務となった。短時間で広域のモニタリングを実施する方法として、有人のヘリコプターを用いた航空機モニタリング(Aerial Radiation Monitoring)が挙げられる。航空機モニタリングによる放射線の測定マッピングは、1979年に発生した米国スリーマイル島(以下、スリーマイル島)の事故や1986年に発生したチェルノブイリ原子力発電所事故を契機とし、環境中の地表に沈着した人工の放射性核種を迅速に検出するための手法として、ウラン探査の技術をベースに開発されてきた<sup>1)</sup>。現在、米国ではエネルギー省(以下、DOE)を中心に多数の航空機モニタリングの機器を所有しており、核実験場等の計測等で培った経験を基に緊急時における運用方法が整備されている<sup>2),3)</sup>。また、欧州ではチェルノブイリ原子力発電所事故後、スコットランド大学連合環境放射能研究所(Scottish Universities Environmental Research Centre: SUERC)を中心に、各国で運用されている航空機モニタリングのシステムを一か所に集め比較測定を実施することにより、データフォーマットや解析手法の標準化を行っている<sup>4)</sup>。

我が国でも航空機モニタリングは、1979年に起きたスリーマイル島原子力発電所事故以来、旧日本原子力研究所(現国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構))を中心に開発が進められてきた。旧日本原子力研究所は、1980年から5年間にわたって航空機 $\gamma$ 線サーベイシステム(Aerial Radiological Survey and Assessment System: ARSAS)の開発を行い、基本的な航空機サーベイの方法を確立した<sup>5),6)</sup>。また、原子力災害時における空気中の放射性プルームの評価を目的とし、ガス状の放射性物質を航空機モニタリングで測定する際の換算係数をシミュレーション計算から求める研究を行った<sup>7)</sup>。その後、航空機モニタリングの技術は、公益財団法人原子力安全技術センター(以下、NUSTEC)に引き継がれ、原子力防災における放射線分布を早期に計測するツールとして整備されてきた<sup>8)</sup>。しかしながら実態としては、福島原子力発電所事故当時、我が国において、航空機モニタリングは環境放射線モニタリング指針<sup>9)</sup>で原子力防災時に実施するように位置づけられてはいたものの、今回のような広範囲の測定に対応できるデータ取得方法やデータ解析方法について、ルーチンベースで整備されていたとは言い難かった。

福島原子力発電所事故直後、航空機モニタリングはDOEと文部科学省(以下、文科省)により開始された<sup>10)-12)</sup>。航空機モニタリングの手法については、原子力機構をはじめとした航空機モニタリングの経験のある研究機関や企業などが集結し、DOEの手法をベースに事故の状況や急峻な地形が多いという日本独特の環境を加味して最適化を図ってきた。特に、地表面から1mの高さの空間線量率や放射性セシウム(以下、放射性Cs)の沈着量の地上値への換算パラメータについては、実際にデータを取得しつつ評価する必要があったため、得られた結果を基に考察し、最適化を図ってきた。また、バックグラウンドとなる天然の放射線との識別方法に関するパラメータの設定には、試行錯誤を重ねてきた<sup>13),14)</sup>。福島原子力発電所事故後には事故により周辺環境中に放出され、地表面に沈着した放射性Csの環境影響を調査するために、我が国初の大規模な原子力災害における日本全域の航空機モニタリングを行った。当時作成し

た福島原子力発電所周辺における汚染マップは避難指示区域設定の基礎資料となっている他、様々なメディアや研究に活用されている<sup>15)</sup>。さらに、高度な解析例として、鳥居他<sup>16),17)</sup>はDOEが事故直後に実施した航空機モニタリングデータの $\gamma$ 線スペクトルをコベル法により再解析し、得られた $^{131}\text{I}$ のピーク面積からモンテカルロ計算コードにより沈着量に換算する手法を開発した。また、事故直後に実施されていた福島原子力発電所周辺の海上における航空機モニタリングデータを再解析し、事故直後の海上における $^{131}\text{I}$ や放射性Csの降下量マップを再構築し、シミュレーションと比較した例も報告されている<sup>18)</sup>。いずれの例も、福島原子力発電所事故後における航空機モニタリングによるデータ取得の有効性および得られる情報量の多さを示している。

福島原子力発電所事故から約10年が経過しようとしており、放射性物質の環境中における移行状況の解明のために、継続的な航空機モニタリングが望まれている。航空機モニタリング事業は当初、文科省事業であったが、2013年度に原子力規制庁(以下、規制庁)に移管されて定期的に実施されており、その結果は規制庁のホームページで随時公開されている<sup>19)</sup>。

本報告書では、2020年度に行われた、福島県およびその近隣県における航空機モニタリングの結果について報告する。また、通常のモニタリングの他に、空間線量率計算のさらなる高精度化を目的とし、地形の起伏を考慮した場合に空間線量率計算結果に及ぼす影響について、今年度の航空機モニタリングデータを用いて、地上測定値を指標として定量的評価を行った。また、大気中のラドン子孫核種からの $\gamma$ 線と地上の放射性核種からの $\gamma$ 線との弁別手法を用いて空間線量率マップを作成した。

## 2. 航空機モニタリングの経緯

航空機モニタリングの一連のスケジュールと実績について Table 2-1 および Fig. 2-1 に示す。航空機モニタリングは、2011年3月25日に文科省によりプレス発表された「文部科学省航空機モニタリング行動計画<sup>20)</sup>」に則り、2011年4月6日から文科省が主体となり DOE の協力を得て(測定: NUSTEC)、「第1次モニタリング」として福島原子力発電所から80 km 圏内モニタリングを開始した。また、2011年5月18日から「第2次モニタリング」として発電所から80 km～100 km 圏をモニタリングした。その後、2011年5月31日に開始された「第3次モニタリング」からは、文科省が主体として実施することになり原子力機構が加わって、福島原子力発電所から80 km 圏内のモニタリングを実施した。さらに、100 km 圏外にも放射性物質が拡散していることが予想されたため、2011年6月22日から福島周辺県の宮城県、栃木県、茨城県を対象にモニタリングを実施した後、2011年8月2日から、文科省委託事業である「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」として、原子力機構が主体となり東日本全域の航空機モニタリング「東日本第1次モニタリング」を実施した。その後、福島原子力発電所から80 km 圏内のモニタリングを2011年10月22日から「第4次モニタリング」として実施した。また、文科省委託事業を拡大する形で、2012年1月30日からは、北海道から沖縄までの上記以外の地域における航空機モニタリング「西日本・北海道モニタリング」を実施した。2012年2月6日からは、「警戒区域および計画的避難区域における航空機モニタリング(第4.5次)」として実施した。

2012年度(平成24年度)は、それまでのデータに基づき、福島原子力発電所事故の影響が見られる地域に限定し、モニタリングを継続した。空間線量率の比較的高い場所(0.2 μSv/h 以上)で福島原子力発電所から80 km 圏内を除く地域を対象に、2012年4月2日から「東日本第2次モニタリング」を、2012年10月31日から「東日本第3次モニタリング」を実施した。80 km 圏内については、2012年6月22日および10月31日から「第5次モニタリング」および「第6次モニタリング」をそれぞれ実施した。さらに、2013年3月4日には、「警戒区域および避難指示区域における航空機モニタリング(第6.5次)」を実施した。

2013年度(平成25年度)は、事業主体が規制庁に移管され、福島原子力発電所から80 km 圏内について2013年8月27日および2013年11月2日から「第7次モニタリング」および「第8次モニタリング」をそれぞれ実施した。また、2013年9月3日から空間線量率の比較的高い場所(0.2 μSv/h 以上)で福島原子力発電所から80 km 圏内を除く地域を対象に「東日本第4次モニタリング」を実施した。2013年度の結果については、眞田他(2014)<sup>21)</sup>に詳しく報告されている。

2014年度(平成26年度)は、福島原子力発電所から80 km 圏内について2014年9月1日から「第9次モニタリング」を実施した。また、2014年9月21日より福島原子力発電所から80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第5次モニタリング」を実施した。2014年度の結果については、眞田他(2015)<sup>22)</sup>に詳しく報告されている。

2015年度(平成27年度)については、福島原子力発電所から80 km 圏内について2015年9月12日から「第10次モニタリング」を実施した。また、2015年10月2日から福島原子力発

電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第 6 次モニタリング」を実施した。さらに、バックグラウンド空間線量率の把握を目的として(別事業)、九州電力川内原子力発電所周辺のモニタリングを実施した。2015 年度の結果については、眞田他 (2016)<sup>23)</sup>に詳しく報告されている。

2016 年度(平成 28 年度)については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2016 年 9 月 14 日から「第 11 次モニタリング」を実施した。また、2016 年 10 月 15 日から福島原子力発電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第 7 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、関西電力大飯発電所並びに高浜発電所周辺および四国電力伊方発電所周辺のモニタリングを実施した。2016 年度の結果については、眞田他 (2017)<sup>24),25)</sup>に詳しく報告されている。

2017 年度(平成 29 年度)については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2017 年 9 月 9 日から「第 12 次モニタリング」を実施した。また、2017 年 9 月 29 日から福島原子力発電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第 8 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、北海道電力泊発電所、東京電力柏崎刈羽原子力発電所および九州電力玄海原子力発電所周辺のモニタリングを実施した。2017 年度の結果については普天間他 (2018)<sup>26),27)</sup>に詳しく報告されている。

2018 年度(平成 30 年度)については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2018 年 9 月 6 日から「第 13 次モニタリング」を実施した。また、2018 年 10 月 8 日から福島原子力発電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第 9 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、中国電力島根原子力発電所および中部電力浜岡原子力発電所周辺のモニタリングを実施した。2018 年度の結果については普天間他 (2019)<sup>28),29)</sup>に詳しく報告されている。

2019 年度(令和元年度)については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2019 年 8 月 29 日から「第 14 次モニタリング」を実施した。また、2019 年 9 月 18 日から福島原子力発電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第 10 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、東北電力東通原子力発電所並びに日本原燃六ヶ所再処理工場および北陸電力志賀原子力発電所周辺のモニタリングを実施した。2019 年度の結果については普天間他 (2021)<sup>30),31)</sup>に詳しく報告されている。

2020 年度(令和 2 年度)については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2020 年 8 月 25 日から「第 15 次モニタリング」を実施した。また、2020 年 9 月 22 日から福島原子力発電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第 11 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、関西電力美浜発電所並びに日本原子力発電敦賀発電所および近畿大学原子力研究所並びに京都大学複合原子力科学研究所における研究用原子炉周辺のモニタリングを実施した。

このように、これまでの航空機モニタリングによって、日本全域の陸地からの放射線量分布の全体像を示すとともに、福島原子力発電所事故の影響の大きい地域については継続的に測定するなど、信頼できるデータを提供してきた。

これらの継続的なモニタリングと並行して、関連する技術開発を実施してきた。Table 2-2

に航空機モニタリングに関連する技術開発の経緯について示す。2011年度は基本的な航空機モニタリングの手法を確立し、2012年度はその手法をルーチン的に利用できる解析システムを開発した。また、航空機モニタリングの換算手法は地表面が平面で空間線量率が一定であると仮定しているため、山や谷などの地形が複雑な場所での精度が懸念されていたことから、地上の勾配を評価できるように10 mメッシュの数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) データの抽出ツールを開発した。開発したツールは、測定場所の直下に降ろした直線から45°の角度に降ろした直線と地表の交点内に含まれるDEMデータを抽出することができ、測定場所の平均的な地表の高度を知ることができる。これにより、測定場所の地表面の勾配について評価できるようになった。2013年度には、福島原子力発電所から80 km圏内の谷や山地形等の特徴的な地形の上空から放射線の計測データを取得し、測定場所の地形と航空機モニタリングの精度について基礎データを取得した。2014年度には $\gamma$ 線スペクトルデータに関数フィッティング法を適用することにより、 $^{134}\text{Cs}$ 起源の1,365 keVと $^{40}\text{K}$ 起源の1,461 keVの $\gamma$ 線を弁別する手法を開発した。本手法は、放出エネルギーの近い人工放射性核種と自然放射性核種が形成する複合ピークの弁別に資するものであり、原子力発電所事故直後における汚染分布評価に特に有用である。また、同一の場所において測定高度の異なるデータと地上測定値と比較することにより、データの信頼性を評価した。2015年度には、課題となっていた空気中のラドン子孫核種の影響を減算するため、専用の空気中ラドン子孫核種減算用の検出器 (LaBr<sub>3</sub>:Ce シンチレーション検出器) を導入し、地表からの放射線と空気中からの放射線で測定されるレスポンスの差を利用し、弁別・測定する基礎的な手法を開発した。開発した手法については、2016年度に既存の航空機モニタリング解析システムに組み込むとともに、福島原子力発電所から80 km圏外のデータに適用した。また、2015年度には、放射線計測とともにレーザー測量および写真測量データを積雪の前後で取得し、積雪による放射線の減衰係数を評価した<sup>31)</sup>。この手法により、事故直後に積雪があり放射線が遮蔽された場合においても一定の精度で航空機モニタリングが可能になった。2016年には、近年、精度が向上している最新の全球測位衛星システム (以下、GNSS) を用いて航空機モニタリングデータと同時に位置データを取得し、既存のGNSSの性能を比較評価するとともに、位置情報の精度が地上の空間線量率への換算に与える影響について評価した。2017年度には、Ishizaki et al. (2017)<sup>33)</sup>が開発した地形の勾配を詳細に補正する手法を広いエリアの航空機モニタリングに適用できるようにシステム化した。2018年度は2017年度にシステム化した地形補正手法を過去の航空機モニタリング結果に適用し、地上測定値を指標として従来手法と比較することにより、空間線量率の計算精度向上について定量的な評価を実施した。2019年度は地形補正手法を既存の航空機モニタリング解析システムに組み込むとともに、福島原子力発電所から80 km圏内のデータに適用し、地上測定値を指標として従来法と比較することにより、空間線量率の計算精度向上についての定量的評価を実施した。

2020年度も引き続き、既存の航空機モニタリング解析システムに組み込んだ評価手法を用いて、従来法による評価結果と比較することで航空機モニタリングにおける解析・評価手法の高精度化に資する知見を整備した。

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯  
(1/2)

モニタリング名	測定場所	測定実施機関	解析実施機関	測定実施日	結果公表日
第1次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	DOE: 60 km圏内	DOE	2011/4/6~4/29	2011/5/6
		NUSTEC: 60 km~80 km圏内			
第2次モニタリング	福島原子力発電所から80 km~100 km圏内	NUSTEC	NUSTEC	2011/5/18~5/26	2011/6/16
第3次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JAEA, NUSTEC: 40 km圏内	JAEA, NUSTEC	2011/5/31~7/2	2011/7/8
		NUSTEC: 40 km~80 km圏内			
東日本第1次モニタリング	青森~福井までの東日本 (2次, 3次実施部分除く)	JAEA (NUSTEC, OYO)	JAEA (NUSTEC, OYO)	2011/6/22~10/20	随時公表
第4次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JAEA, NUSTEC: 40 km圏内	JAEA, NUSTEC	2011/10/22~11/5	2011/12/16
		NUSTEC: 40 km~80 km圏内			
西日本、北海道モニタリング	近畿~沖縄、北海道	JAEA (NUSTEC, OYO)	JAEA (NUSTEC, OYO)	2012/1/30~5/31	随時公表
警戒区域及び計画的避難区域における航空機モニタリング (4.5次)	警戒区域及び計画的避難区域	NUSTEC	JAEA, NUSTEC	2012/2/6~2/10	2012/2/24
東日本第2次モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA (NUSTEC, OYO)	JAEA (NUSTEC, OYO)	2012/4/2~5/7	2012/9/28
第5次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JCAC(OYO)	JCAC(NUSTEC)	2012/6/22~6/28	2012/9/28
第6次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JCAC(OYO)	JCAC(NUSTEC)	2012/10/31~11/16	2013/3/1
東日本第3次モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	NUSTEC	JAEA	2012/10/31~12/28	2013/3/1
		JCAC(NUSTEC)			
警戒区域及び避難指示区域における航空機モニタリング (6.5次)	警戒区域及び避難指示区域	JCAC(NUSTEC)	JCAC(NUSTEC)	2013/3/4~3/11	2013/5/13
第7次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2013/8/27~9/28	2013/12/25
東日本第4次モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2013/9/3~11/4	2014/3/7
		JAEA (OYO)			
第8次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2013/11/2~11/19	2014/3/7
第9次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2014/9/1~9/20	2015/2/13
東日本第5次モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2014/9/21~11/7	2015/2/13
第10次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2015/9/12~9/30	2016/2/2
東日本第6次モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2015/10/2~11/4	2016/2/2
H27_BG モニタリング	川内原子力発電所から80 km圏内	JAEA	JAEA	2016/2/1~2/7	-

※DOE: 米国エネルギー省、NUSTEC: (公財) 原子力安全技術センター、JAEA: (国研) 日本原子力研究開発機構

OYO: 応用地質(株)、JCAC: (公財) 日本分析センター

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯  
(2/2)

モニタリング名	測定場所	測定実施機関	解析実施機関	測定実施日	結果公表日
H28_BGモニタリング (1)	大飯・高浜発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2016/7/20～8/1	-
第11次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2016/9/14～10/15	2017/2/13
東日本第7次モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2016/10/15～11/18	2017/2/13
H28_BGモニタリング (2)	伊方発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2016/11/29～12/11	-
H29_BGモニタリング (1)	泊発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2017/7/24～8/2	-
H28_BGモニタリング (2)	柏崎刈羽原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2017/7/26～8/10 2017/9/30～10/11	-
第12次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2017/9/9～9/25	2018/2/20
東日本第8次モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2017/9/29～11/16	2018/2/20
H29_BGモニタリング (3)	玄海原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2017/11/28～12/5	-
H30_BGモニタリング (1)	島根原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2018/7/20～7/27	-
第13次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2018/9/6～10/16	2019/3/8
東日本第9次モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2018/10/8～11/15	2019/3/8
H30_BGモニタリング (2)	浜岡原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2018/11/27～12/9	-
R1_BGモニタリング (1)	東通原子力発電所並びに六ヶ所再処理工場から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2019/6/26～7/10	-
第14次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2019/8/29～9/18	2020/2/13
東日本第10次モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2019/9/18～11/2	2020/2/13
R1_BGモニタリング (2)	志賀原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2019/11/21～11/29	-
R2_BGモニタリング (1)	美浜発電所並びに敦賀発電所から80 km圏内	JAEA (SIC)	JAEA	2020/7/22～8/10	-
第15次モニタリング	福島原子力発電所から80 km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2020/8/25～10/2	2021/2/15
東日本第11次モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2020/9/22～10/30	2021/2/15
R2_BGモニタリング (2)	近畿大学原子力研究所並びに京都大学複合原子力科学研究所から80 km圏内	JAEA (SIC)	JAEA	2020/11/12～11/19	-

※JAEA: (国研)日本原子力研究開発機構、OYO: 応用地質(株)、SIC: (株)静環検査センター

年 月	2011			2012			2013			2014			2015			2016			2017			2018			2019			2020				
	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12				
80 km 圏内	第1次 (4/6~4/29)	第3次 (5/6~7/2)	第4次 (10/25~11/5)	第5次 (6/22~6/28)	第6次 (10/31~11/16)	第7次 (8/27~9/28)	第8次 (11/2~11/19)	第9次 (9/1~9/20)	第10次 (9/12~9/30)	第11次 (9/14~10/15)	第12次 (9/9~9/25)	第13次 (9/6~10/16)	第14次 (8/25~9/18)	第15次 (8/25~10/2)																		
福島原子力発電所事故 (3/11)	警戒区域・村面的避難 準備区域(4.5次) 準備区域(2.5~2/10)			警戒区域・村面的避難 準備区域(6.5次) 準備区域(3.4~3/11)			川内BPG (2/1~2/7)			伊方BPG (11/29~12/11) 高浜・大飯BPG (7/20~8/1)			茨城BPG (11/29~12/11)			浜岡BPG(11/27~12/9) 島根BPG(7/20~7/27)			志賀BPG(11/21~11/29) 東通・穴所 BPG(6/26~7/10)			近大伊・大伊BPG (11/12~11/19)			美浜・敦賀BPG (7/22~8/10)			東日本第1次 (8/22~10/30)				
80 km 圏外	第2次 80~120km圏内 (5/18~5/26)	東日本第1次 若葉~福井+岐阜+愛知 (6/22~10/10)	西日本+北海道全域 京都~徳島~沖縄 (1/30~5/31)	東日本第2次 (4/2~5/7)	東日本第3次 (10/31~12/28)	東日本第4次 (9/3~11/4)	東日本第5次 (9/21~11/7)	東日本第6次 (10/2~11/4)	東日本第7次 (10/15~11/16)	東日本第8次 (9/29~11/16)	東日本第9次 (9/29~11/16)	東日本第10次 (9/18~11/2)	東日本第11次 (10/8~11/15)	東日本第12次 (9/18~11/2)	東日本第13次 (9/22~10/30)																	

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績



Table 2-2 航空機モニタリングに関わる技術開発の経緯

年度(和暦)	技術開発項目	開発成果
2011 (H23)	基本的な航空機モニタリング解析手法の確立	地上への換算パラメータの最適化等基本的な航空機モニタリングの解析手法を確立した。
2012 (H24)	航空機モニタリング解析システムの開発	2011年度に開発した手法をルーチ的に開発できるシステムを構築した。
2013 (H25)	DEMデータ抽出ツールの開発	航空機による測定範囲の標高データを抽出できるツールを開発した。これにより、放射線の測定範囲内の地形の勾配が評価可能となった。
2014 (H26)	地中の天然起源の放射性核種の弁別評価手法の確立	谷や山地形等の特徴的な地形の上空から放射線の計測データを取得し、DEMデータ抽出ツールを用いて測定結果に与える影響を評価した。
2015 (H27)	フライト高度による測定精度の評価	スペクトルピークの関数フィッティングにより、弁別できなかった <sup>134</sup> Cs起源の1,365 keVと <sup>40</sup> K起源の1,461 keVを弁別する手法を開発した。地上の天然の放射性核種起源の空間線量率分布を評価可能となった。
2016 (H28)	積雪の影響評価手法の開発	フライトの高度を変化させてデータを取得し、地上測定値と比較することにより、データの信頼性を評価した。
2017 (H29)	GPSの精度評価	空気中ラドン子孫核種の影響を評価するためのLaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器を導入し、データを取得して基礎的な手法を確立した。
2018 (H30)	地形補正手法による空間線量率計算精度の向上評価	放射線計測とともにレーザー測量および写真測量データを積雪の前後で取得し、積雪による放射線の減衰係数を評価した。
2019(R1)	地形補正手法の航空機モニタリング解析システムへの組み込み	前年度導入した専用の検出器からのデータを利用した空気中ラドン子孫核種減算システムを構築し、既存の航空機モニタリング解析システムに組み込むとともに、福島原子力発電所から80 km圏外のデータに適用した。

### 3. 測定システムとヘリコプター

#### 3.1. 航空機モニタリングシステム

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

今回のモニタリングで使用した Radiation Solutions Inc. (RSI, Canada) 製のシステム (以下、RSI システム) は、福島原子力発電所事故当時に DOE により行われた航空機モニタリングで用いられたシステムと同タイプであり、機内に搭載するタイプである。RSI システムのブロック図を Fig. 3-1 に示し、外観を Fig. 3-2 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 (検出器容量合計: 12.6 L)。検出器で計測した 1,024 ch (0 ch~1023 ch) の  $\gamma$  線のスペクトルは 1 秒ごとに同期する GPS による位置データとともに、RS-701 と呼ばれる検出器上部に取り付けてあるデータ収集装置に保存される。検出器 2 台のデータは RS-501 という装置で統合される。RS-501 は PC と接続でき、PC にインストールされている専用のソフトウェア (RadAssist) を使用することによって GPS による位置情報や  $\gamma$  線の計数率情報をリアルタイムに確認できる。また、全体は外付けのバッテリーで駆動し、完全充電で約 5 時間の稼働が可能である。福島およびその周辺県で使用した RSI システムは 2 セットあるため、以下それぞれ RSI 1 および RSI 2 と区別する。

また、RSI システムの GPS 受信機とは独立して高精度 GPS システムも機内に搭載している。当該システムでは高精度 GPS 受信機 (CORE 社製 QZNAV) が用いられており、RSI システムの GPS 受信機と比較して利用可能な信号が多い。具体的には、準天頂衛星システム (通称「みちびき」) からの情報を利用できるほか、L1-SAIF と呼ばれる補強信号を受信することにより、精度の高い位置情報の測定を行うことができる。測定された  $\gamma$  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>26)</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。

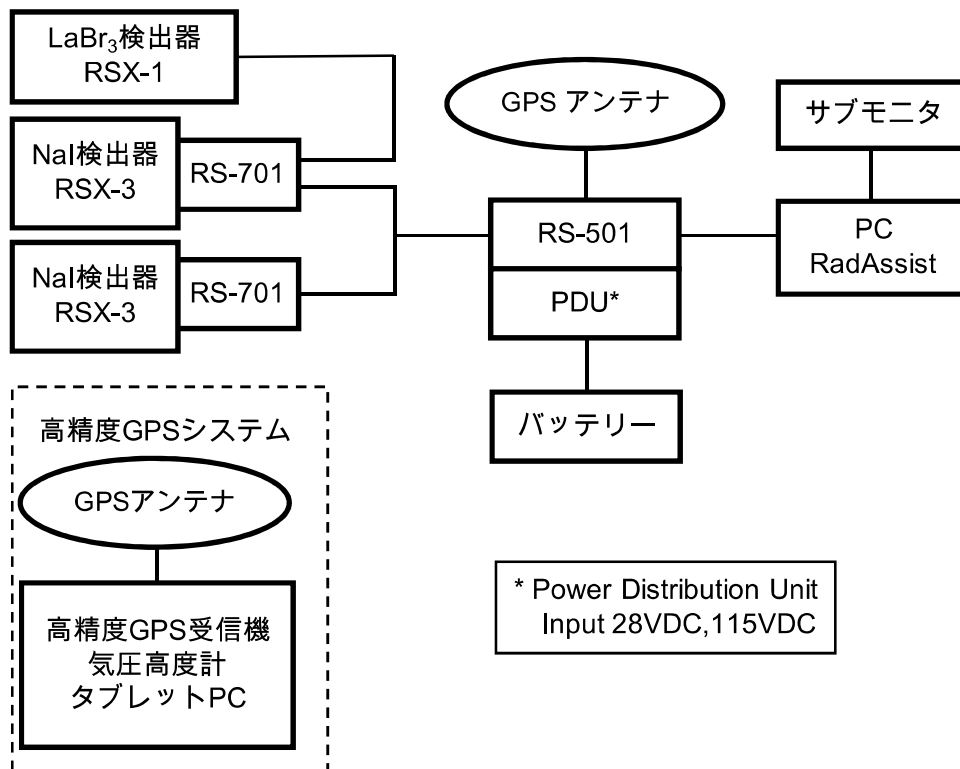


Fig. 3-1 RSI システムのブロック図

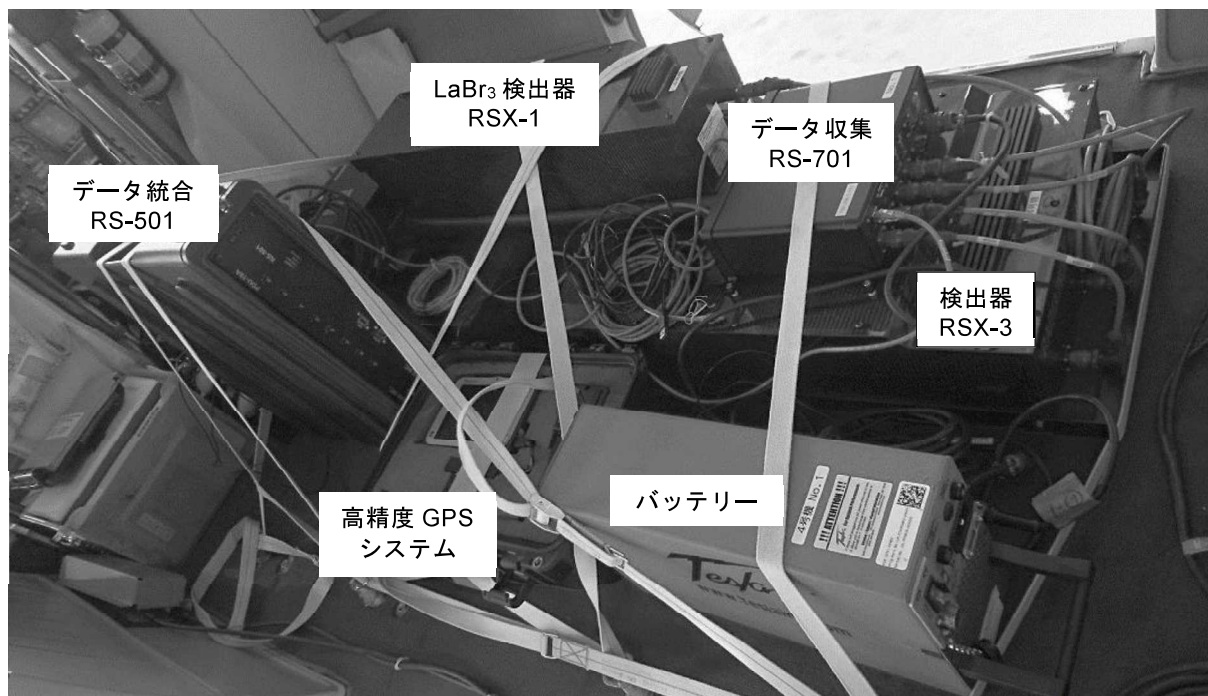


Fig. 3-2 RSI システムの外観

### 3.2. 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蔽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た。選定した機体について、Fig. 3-3に示す。また、2012年以降使用した機体とRSIシステムの組み合わせをTable 3-1に示す。2020年度は、機体繰りの都合から、Bell 412およびBell 430を使用した。



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. 3-3 機底に燃料タンクのない機体一覧

Table 3-1 使用したヘリコプターとRSIシステムのリスト

年度	モニタリング名	モニタリング期間	システム搭載ヘリコプター			
			RSI-1	RSI-2	RSI-3	RSI-4
2012	第5次航空機モニタリング	2012/6/22～6/28	Bell 430 (JA05TV) NNK	AS 332 (JA9660) NNK		
	第6次航空機モニタリング	2012/10/31～11/16	Bell 430 (JA6900) AAC			
	東日本第3次モニタリング	2012/10/31～12/28	Bell 412 (JA6767) NNK	Bell 430 (JA05TV) NNK		
	警戒区域及び避難指示区域における航空機モニタリング (第6.5次)	2013/3/4～3/11	Bell 412 (JA6767) NNK			
2013	第7次航空機モニタリング	2013/8/27～9/28	Bell 430 (JA6900) AAC	Bell 412 (JA6928) AAC		
			Bell 412 (JA6767) NNK	Bell 430 (JA05TV) NNK		
	東日本第4次モニタリング	2013/9/3～11/4	Bell 430 (JA6900) AAC	Bell 430 (JA05TV) NNK		
2014	第8次航空機モニタリング	2013/11/2～11/19	Bell 412 (JA6767) NNK			
	第9次航空機モニタリング	2014/9/1～9/20	Bell 430 (JA6900) AAC	Bell 430 (JA05TV) NNK		
	東日本第5次モニタリング	2014/9/21～11/7	Bell 430 (JA6900) AAC	Bell 412 (JA6928) AAC		
2015	第10次航空機モニタリング	2015/9/12～9/30	Bell 430 (JA05TV) NNK	Bell 412 (JA6928) AAC		
	東日本第6次モニタリング	2015/10/2～11/4	Bell 430 (JA05TV) NNK	Bell 412 (JA6767) NNK		
	川内原子力発電所BGモニタリング	2016/2/1～2/7			Bell 412 (JA6928) AAC	
2016	大飯・高浜発電所BGモニタリング	2016/7/20～8/1			Bell 412 (JA9584) AAC	
	第11次航空機モニタリング	2016/9/14～10/15	Bell 430 (JA05TV) NNK	S-76 (JA6901) AAC		
	東日本第7次モニタリング	2016/10/15～11/18	Bell 430 (JA05TV) NNK	Bell 412 (JA6767) NNK		
				Bell 412 (JA9616) AAC		
2017	伊方発電所BGモニタリング	2016/11/29～12/11			Bell 430 (JA05TV) NNK	
	泊発電所BGモニタリング	2017/7/24～8/2			Bell 412 (JA6767) NNK	
	柏崎刈羽原子力発電所BGモニタリング	2017/7/26～8/10				Bell 430 (JA05TV) NNK
	第12次航空機モニタリング	2017/9/30～10/1	Bell 430 (JA05TV) NNK	Bell 412 (JA9616) AAC		
	東日本第8次モニタリング	2017/9/29～11/16	Bell 430 (JA05TV) NNK	Bell 412 (JA6767) NNK		
2018	玄海原子力発電所BGモニタリング	2017/11/28～12/5			S76(JA6655) AAC	
	島根原子力発電所BGモニタリング	2018/7/20～7/27			Bell 430 (JA6900) AAC	
	第13次航空機モニタリング	2018/9/6～10/16	Bell 430 (JA05TV) NNK	Bell 430 (JA6900) AAC		
	東日本第9次モニタリング	2018/10/8～11/15	Bell 430 (JA05TV) NNK	Bell 412 (JA6767) NNK		
2019	浜岡原子力発電所BGモニタリング	2018/11/27～12/9			Bell 430 (JA05TV) NNK	
	東通・六ヶ所BGモニタリング	2019/6/26～7/10			Bell 430 (JA6900) AAC	
	第14次航空機モニタリング	2019/8/29～9/18	Bell 430 (JA05TV) NNK	Bell 412 (JA9616) AAC		
	東日本第10次モニタリング	2019/9/18～11/2	Bell 430 (JA05TV) NNK	Bell 412 (JA9616) AAC		
2020	志賀原子力発電所BGモニタリング	2019/11/21～11/29			Bell 430 (JA6900) AAC	
	美浜・敦賀BGモニタリング	2020/7/22～8/10			Bell 412 (JA9616) AAC	
	第15次航空機モニタリング	2020/8/25～10/2	Bell 430 (JA05TV) NNK	Bell 412 (JA6928) AAC		
	東日本第11次モニタリング	2020/9/22～10/30	Bell 412 (JA6767) NNK	Bell 412 (JA6928) AAC		
	近大炉・京大炉BGモニタリング	2020/11/12～11/19	Bell 430 (JA05TV) NNK	Bell 412 (JA6767) NNK		
					Bell 412 (JA6928) AAC	

( )内は機体登録番号

NNK: 中日本航空株式会社所有、AAC: 朝日航洋株式会社所有

### 3.3. 線源試験

ヘリコプターは、機底に燃料タンクのない機種を選定しているが、機種によって遮蔽の程度は異なると考えられる。ここでは、遮蔽効果を把握するためにポイントソース ( $^{137}\text{Cs}$ : 9.3 MBq) を用いて検出器で計数された計数率を比較した。比較結果を Table 3-2 に示す。線源は検出器からの距離を 50 cm に固定し、計数率の測定時間平均値で比較した。RSI システムと線源位置の関係について Fig. 3-4 に示す。なお、計数率の中には  $^{137}\text{Cs}$  の他に自然放射性核種による寄与も含まれている。

Bell 430 (JA05TV, No.1) における計数率を基準とした場合、Bell 412 (JA6767, No.2) および Bell 412 (JA6928, No.3) では 3 %ほど高く、Bell 412 (JA6767, No.4) では 1 %ほど高かったが、Bell 412 および Bell 430 の機種間の機体底部の構造の違いに起因する  $\gamma$  線遮蔽効果の差異が要因の一つと考えられる。また、Bell 412 同士で比較すると、JA6767 (No.2) に対する JA6928 (No.3) の計数率は、異なる RSI システムを使用しているものの、ほとんど同値であった。一方で、同じ JA6767 (No.2 および No.4) 同士であっても、使用する RSI システムが異なれば、2 %ほどの計数率差が生じた。以上のことから、RSI システム間で  $\gamma$  線の検出感度等が若干異なっており、また同機種であっても機体間で機体底部の構造がある程度異なることが示唆される。さらに言えば、機内における RSI システムの配置によって遮蔽状況は若干変わると思われるため、今後も今回のような線源試験を実施し、使用する機種・機体間の  $\gamma$  線計数率差をなるべく小さくできるような配置を決定することが望ましい。なお、この遮蔽状況の違いは、地上における空間線量率等への換算パラメータを設定する際に機種ごとでキャリブレーションを実施するため、単独でパラメータとして扱う必要はないが、数値の解析の際の参考情報となる。

Table 3-2 ポイントソースによる機体の遮蔽状況の比較  
(検出器から 50 cm 下方に線源を配置)

No.	System	ヘリコプター	運航会社	計数率( $\text{s}^{-1}$ ) at 50 cm	No.1を1に 規格化
1	RSI 1	Bell 430 (JA05TV)	NNK	$3.26 \times 10^3$	1.00
2	RSI 1	Bell 412 (JA6767)	NNK	$3.35 \times 10^3$	1.03
3	RSI 2	Bell 412 (JA6928)	AAC	$3.37 \times 10^3$	1.03
4	RSI 2	Bell 412 (JA6767)	NNK	$3.29 \times 10^3$	1.01

NNK: 中日本航空株式会社

AAC: 朝日航洋株式会社

※計数率は有効数字4桁目で四捨五入し、有効数字3桁で表記した。

※計数率は $^{137}\text{Cs}$ 線源の他に自然放射性核種による寄与も含んでいる。

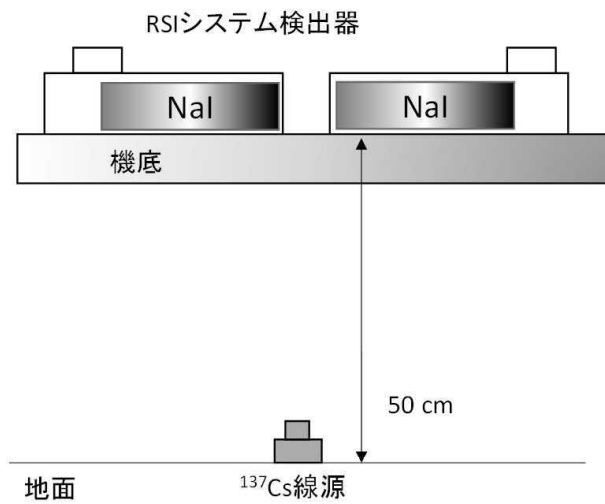


Fig. 3-4 線源試験イメージ

### 3.4. RSI システムの保守

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

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

2,614 keV のピークに対するエネルギー分解能については、メーカーから 6 %以下という保守の推奨値が示されている。日常の点検で数値を確認し、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は、同様にメーカーから示されている推奨値である 0.8 を下回る場合に高圧電源の電圧の再調整を行った。福島県およびその周辺県で行ったモニタリング時におけるエネルギー分解能とアンプのゲインの推移について Fig. 3-5 および Fig. 3-6 に示す。図は、RSI システムに組み込まれている計 6 本の検出器ごとに示している。エネルギー分解能はモニタリング期間を通じて 6 %未満であり、アンプのゲインが 0.8 を下回ることがなかったため、再調整を実施する必要性は生じなかった。なお、ゲインは測定日を経るにつれて緩やかな上昇傾向にあるが、これは機器の異常ではなく、測定日が夏から秋に移り変わり、周囲の気温が低下するにつれて機器自体の温度上昇も鈍くなることで、光電子増倍管に使用される電子素子のインピーダンスが減少しゲインが上昇するという、温度特性が反映されていると考えられる。RSI システムには一定期間ごとに自動でゲインを補正する機能があり、この温度特性はある程度までは補正可能である。また、実際には取得したデータを確認し、エネルギーピークの位置に変動がないことを確認している。



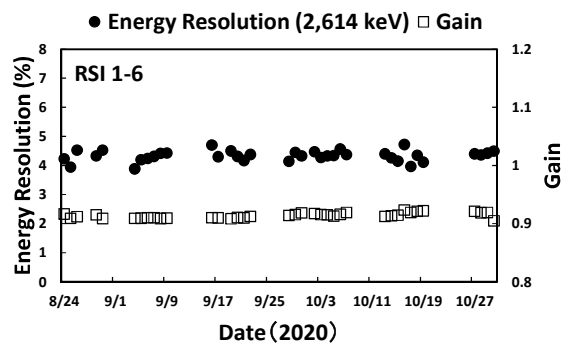
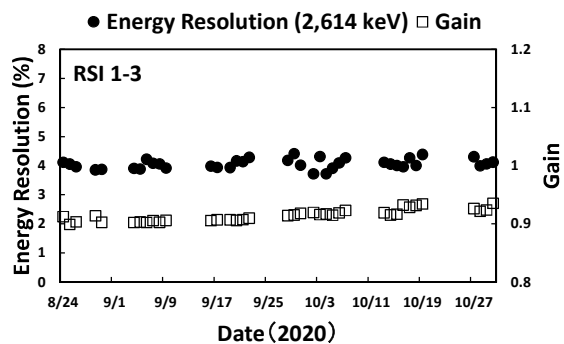
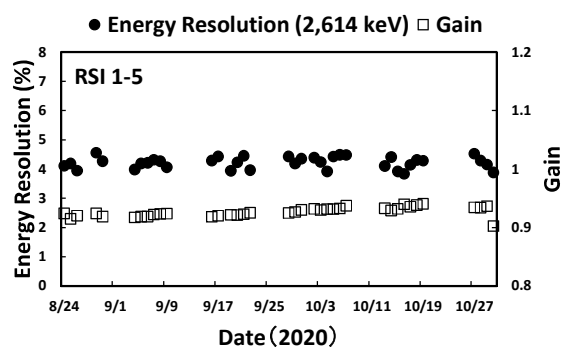
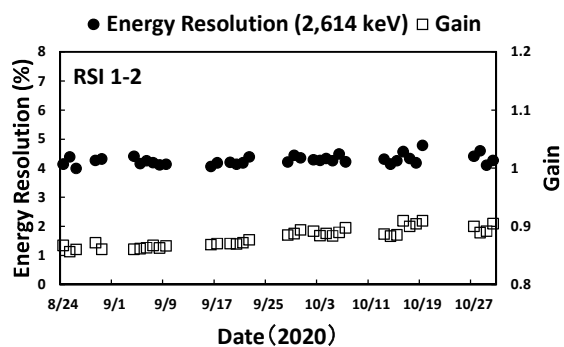
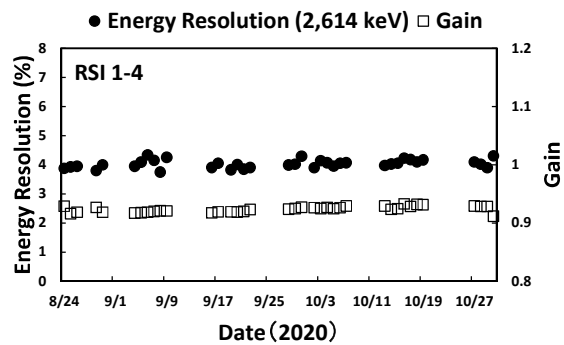
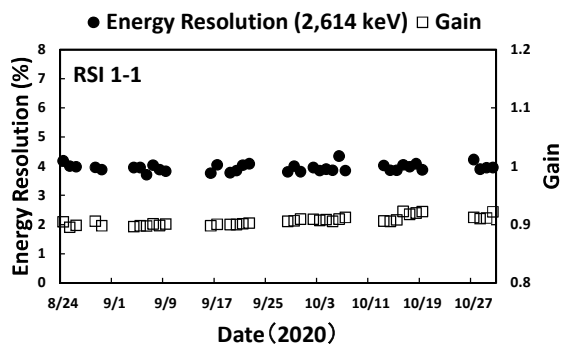


Fig. 3-5 RSI システムのエネルギー分解能および Gain の変動 (RSI 1)

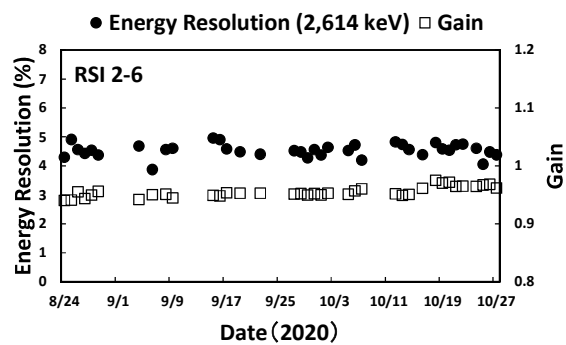
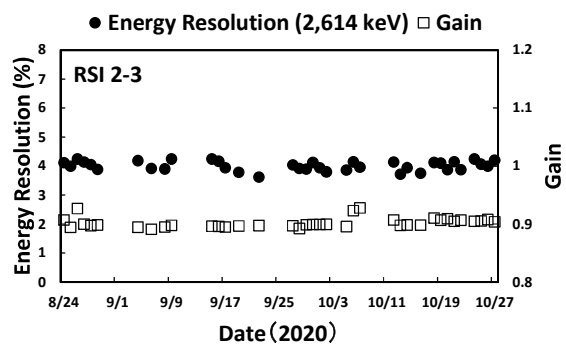
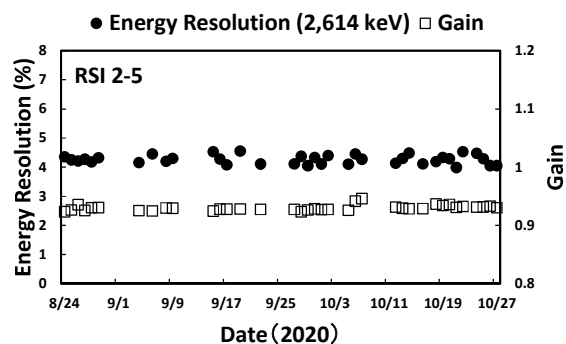
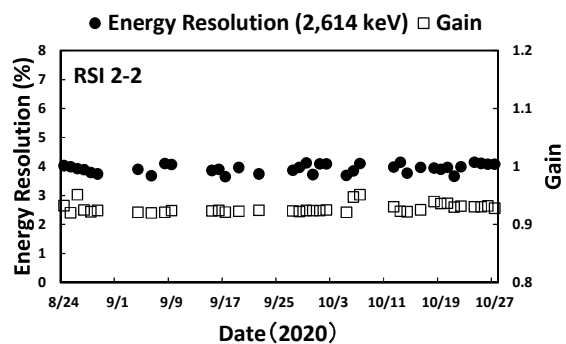
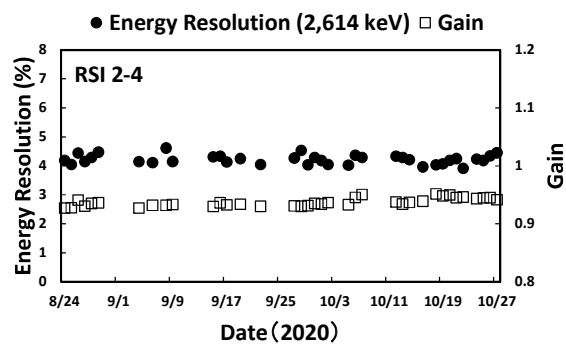
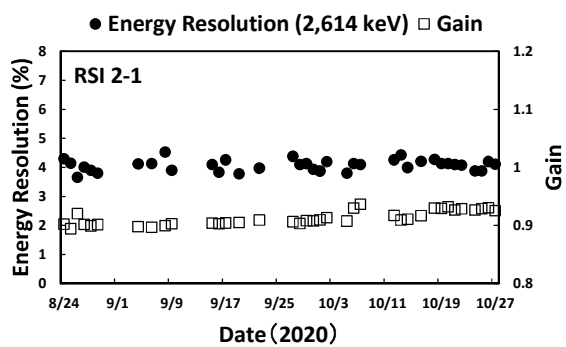


Fig. 3-6 RSI システムのエネルギー分解能および Gain の変動 (RSI 2)

## 4. データ取得および解析方法

### 4.1. 上空での測定値の地上への換算に関する基本的な考え方

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量の平均値とする。
- ・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。

このような条件において上空で測定されている計数値を考察するため、 $\gamma$ 線の遮蔽計算に広く用いられている点減衰核積分コード QAD-CGGP2R を用いてシミュレーションを行った。線源は、 $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  が無限平板 (実際の計算では、無限相当とした半径 2,000 m × 高さ 1 mm) で均一に分布していると仮定し、対地高度と空間線量率の関係を求めた。計算結果について Fig. 4-1 に示す。このように、対地高度 50 m 以上では、空間線量率と対地高度は指数の相関関係にあることが分かる。一方、50 m 以下では、指数の関係から外れる。これは、50 m 以上では地表からの放射線が検出器軸に対し平行入射に近いこと、線源からの距離をパラメータとした指数関数の関係で放射線が減衰するのに対し、50 m 以下では線源への距離がより近くなるため対地高度が低くなるにつれ影響を受ける線源の範囲が広がり、検出器軸に対し垂直に近い方向から入射する放射線が増えるため指数関数の関係から逸脱することが示唆される。

このように、上空から地上を測定する際には、高度が高くなると地上の対象となる範囲が広がる。上空における地上からの放射線の到達状況を定量的に理解するために計算コードを用いてシミュレーションを実施した例を示す。計算は、光子・電子挙動シミュレーション用として実績のあるカスケードモンテカルロ計算コード EGS5<sup>34)</sup> (Electron Gamma Shower Version 5) を使用した。まず、EGS5 により、RSI システムの検出器をモデル化した<sup>13)</sup>。次に、地上に無限平板状の半径 800 m × 高さ 1 mm の  $^{137}\text{Cs}$  円柱線源を模擬した。モデル化した検出器を線源円盤の中心軸上に配置し、線源円盤と検出器の距離を変化させ、検出器に入射する放射線の計数率を計算した。さらに、同ジオメトリにおいて検出器に到達する放射線の起源となる線源の位置を計算した。無限平板線源における任意の半径内の放射線が、検出器で計数される割合を Fig. 4-2 に示す。ここで、検出器と線源の距離は、50 m、100 m、300 m および 500 m の場合を計算した。航空機モニタリングの基準高度である 300 m から計測した場合、線源の概ね 300 m の円内の放射線の計数が 80 %以上の割合を占めることが分かる。また、検出器の位置から同軸上の線源位置を中心として、100 m ごとのドーナツ状の面積で分割し、その部分の放射線が検出器で計数される割合を Fig. 4-3 に示す。線源からの距離は 100 m、300 m、500 m の場合で比較した。高度 300 m の場合を見ると、100 m~200 m の位置が 30 %で最も割合が大きく、0 m~100 m および 200 m~300 m は 20 %程度であった。この割合の違いは計数効率を考慮すると大きくなく、イメージとしては、対地高度 300 m で測定されている地上の範囲は、対地高度と同じ 300m を半径とする円内の放射線の平均値と考えて良い。一方、比較として計算した検出器と線源の距離が 50 m の場合は 80%を占める線源半径は 120 m、検出器と線源の距離が 100 m の場合は線源半径が 200 m、500 m の場合は線源半径が 400 m となる。この傾向は Fig. 4-1

で示した高度と上空での計数率の関係と矛盾せず、高度が低くなるにつれて高度と測定範囲の半径の関係が 1 : 1 から逸脱し、高度と比較して測定範囲が広くなることを示している。飛行する対地高度が変化することは、地上の測定範囲が変化することになり、上空から測定する不確かさを考慮すると対地高度は一定でフライトすることが望ましい。実際には、これらの理論や測定の不確かさを考慮し、対地高度 300 m を基準として対地高度が 500 m までのデータを使用した。なお、この対地高度から逸脱した状態で測線フライトが 1 km 以上に及んだ場合には、再フライトによりデータを再取得した。

以上のことから、航空機によるモニタリングは、飛行する対地高度 (300 m) と同じ半径 (300 m) の円内の放射線を飛行方向に向かって移動しながら測定していると説明できる。Fig. 4-4 に航空機モニタリングの測定イメージを示す。

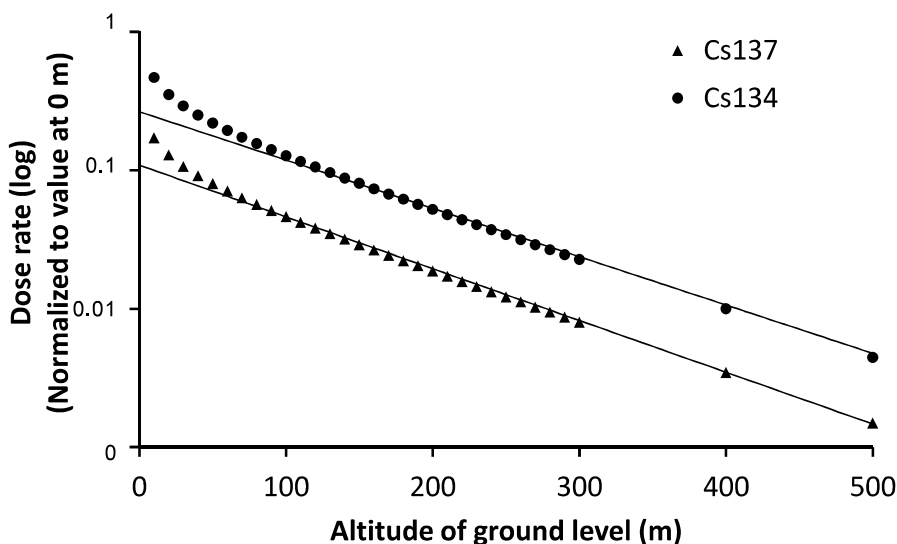


Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係  
(半径 2,000 m × 高さ 1 mm の円柱線源で計算、縦軸は対数目盛)

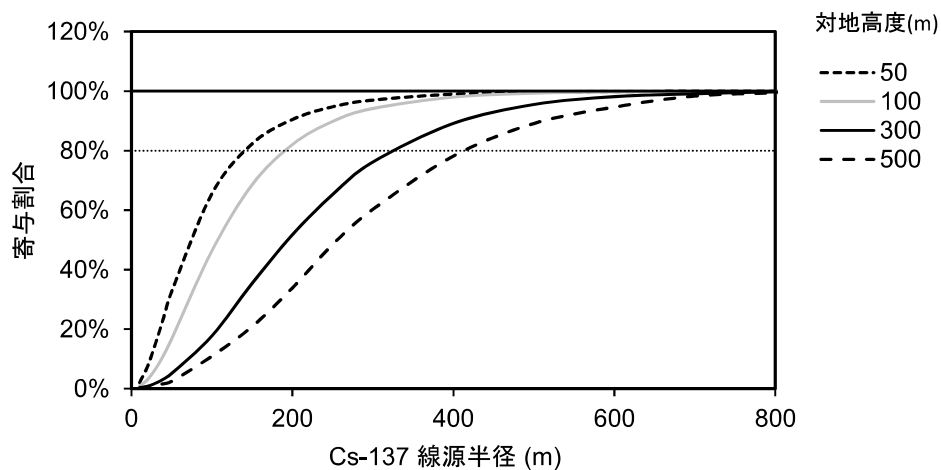


Fig. 4-2 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の積算計数に対する線源位置の関係  
(上空での検出器の計数率を 100 % に規格化し、線源半径由来の計数率の割合を積算)

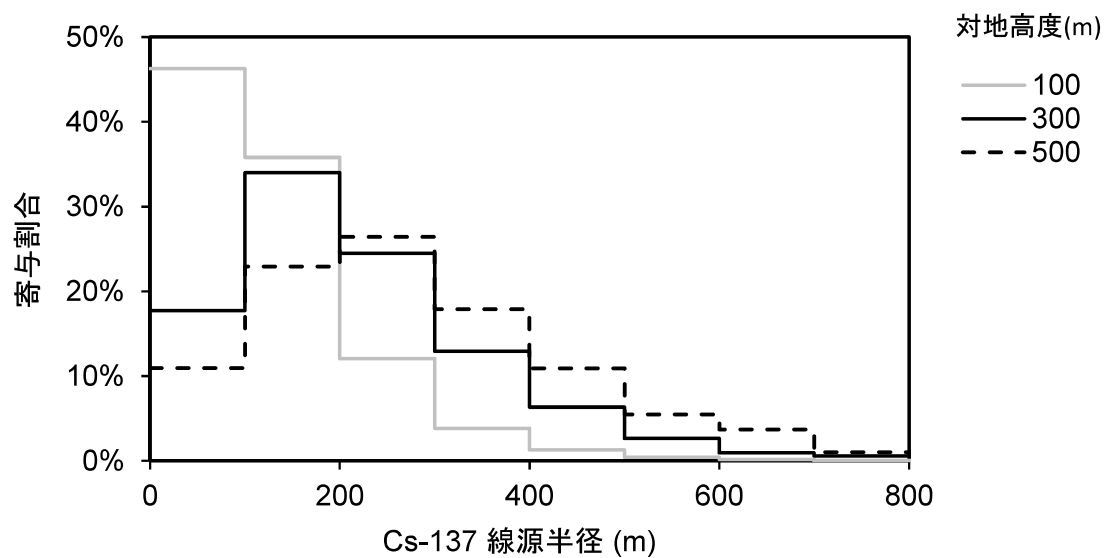


Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の線源位置ごとの計数の割合  
(上空での検出器の計数率を 100 % に規格化し、100 m ごとのドーナツ状部分由来の計数率の割合)

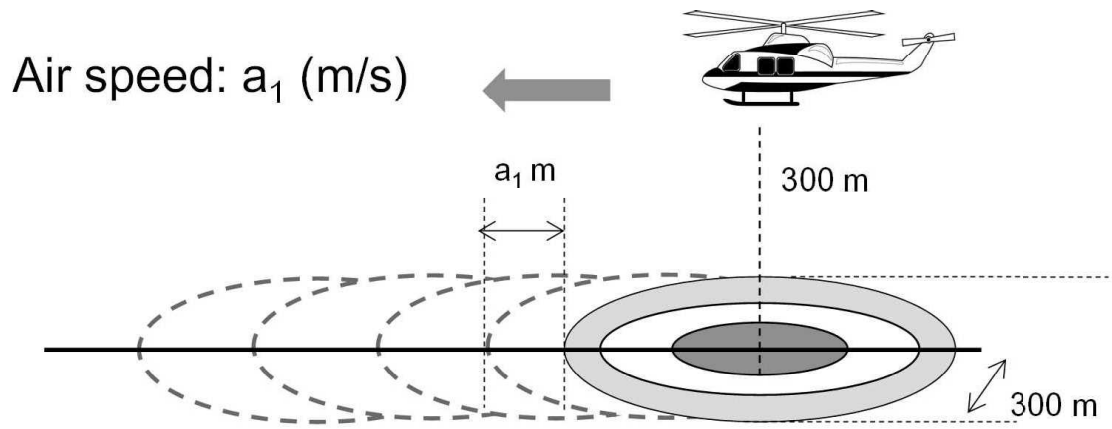


Fig. 4-4 上空からの測定イメージ

## 4.2. 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。なお、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。フライトイメージを Fig. 4-5 に示す。また、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、下記の許容範囲から逸脱した測定データは不確かさが比較的大きく含まれるため、空間線量率等の算出には用いないこととした。予定したフライト測線について Fig. 4-6 に示す。

[フライト条件]

- 速度：160 km/h～185 km/h (=86 kn～100 kn)
- 基準対地高度：300 m (= 1,000 ft)
- 対地高度の許容範囲：0 m～500 m (= 1,750 ft)
- 測線間隔
  - 80 km 圏内 (発電所から 3 km 以内を除く)
    - 0.6 km：避難指示区域 (2011 年 9 月 30 日時点における避難指示区域：以下、旧避難指示区域)
    - 0.9 km：0.2  $\mu$ Sv/h (約 1.0 mSv/年 相当、5.1 に詳述する。) 以上の地域
    - 1.8 km：その他の地域
  - 80 km 圏外
    - 1.0 km：0.2  $\mu$ Sv/h 以上の地域
    - 3.0 km および 6.0 km：その他の地域
- フライトに要した期間
  - 第 15 次: 2020 年 8 月 25 日～10 月 2 日 (のべ 46 フライト)
  - 東日本第 11 次: 2020 年 9 月 22 日～10 月 30 日 (のべ 71 フライト)

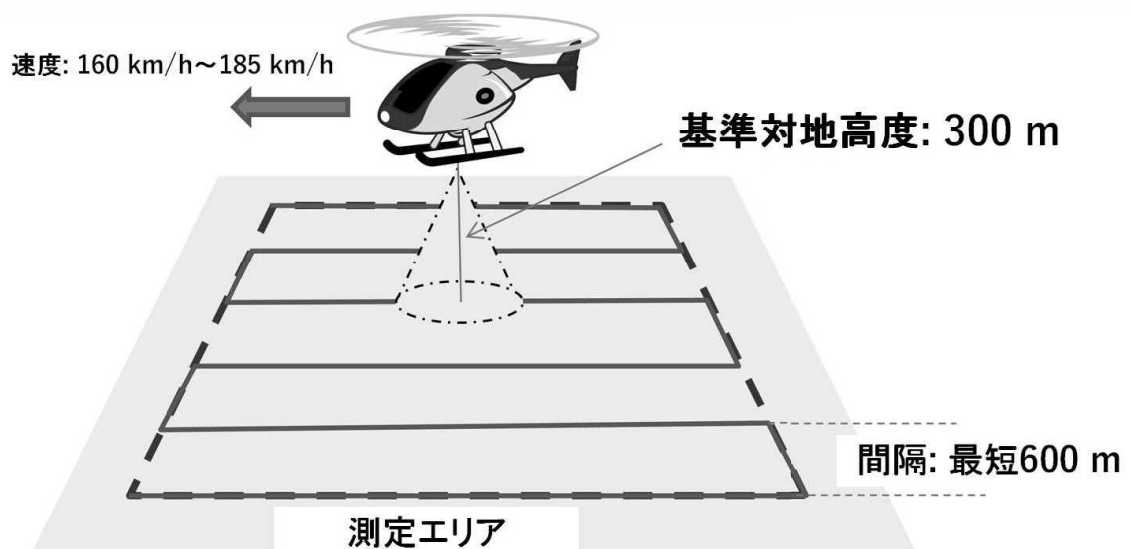


Fig. 4-5 フライトイメージ

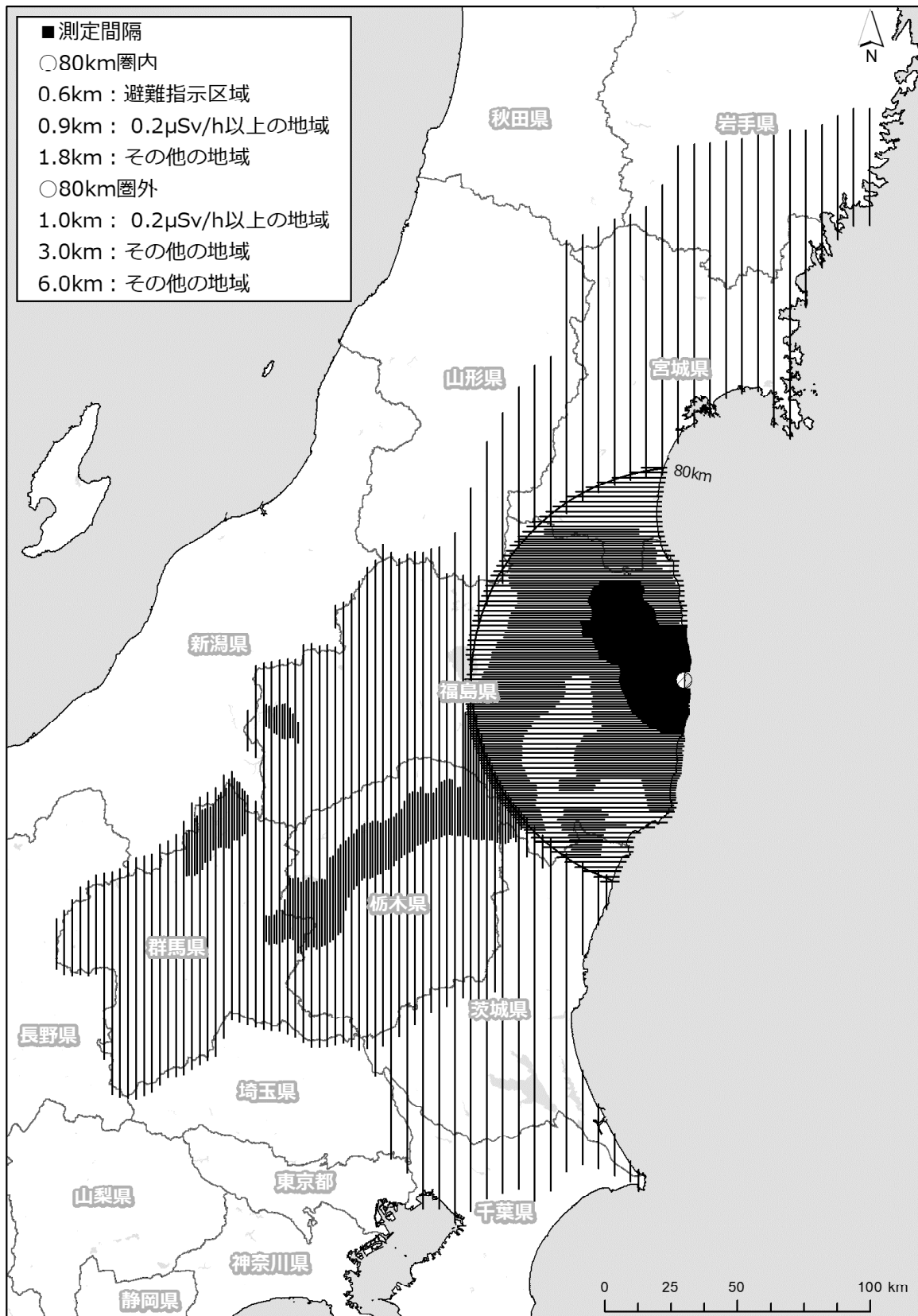


Fig. 4-6 予定したフライトの測線

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



#### 4.3. 設定パラメータ妥当性確認のためのキャリブレーションフライト方法

上空で取得したデータを、地表面から 1 m の高さの放射線量や地表面の放射性 Cs の沈着量に換算するためのパラメータについては、2014 年度までのデータを基に数値を決定している。2020 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以下に示す (Table 4-1)。

##### ・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: 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 (150 m、300 m、450 m、600 m、750 m、900 m および 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. 4-7 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. 4-8 に示す。また、テストライン付近において、NaI シンチレーション式サーベイメータ (日立製作所製 TCS-172B) を用いて、25 ポイントを目安に地表面から 1 m の高さの空間線量率の測定 (以下、地上測定) を行った。

##### ・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 ( $[\text{s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$ )) を求めるためのフライトである。また、テストポイントでは半径 1,000 m の範囲内で 60 ポイントを目安に地上測定を行った。Fig. 4-9 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. 4-10 に示す。

##### ・宇宙線フライト

宇宙線の影響を差し引くため、地上からの  $\gamma$  線の影響が極めて少ない海上を約 300 m~2,400 m まで上昇し、宇宙線に起因する  $\gamma$  線計数率データを取得するものである。宇宙線フライトのイメージを Fig. 4-11 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、天候等を見ながら太平洋上の適当な位置で実施する。ただし、天候等の問題で海上への移動が困難な状況下では、起伏の少ない陸地において当該フライトを実施する。なお、陸地で実施した場合でも対地高度約 300 m から 2,400 m まで上昇するが、地上からの放射線の影響がほとんどないと考えられる対地高度約 900 m 以上で取得された  $\gamma$  線計数率データを原則として用いることになる。

##### ・Rn 影響フライトおよび BG フライト

Rn 影響フライトは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 m~900 m までを直線的に上昇しデータを取得するものである。また、BG フライトとは、地上からの放射線の影響がほとんどないと考えられる、対地高度約 900 m を約 2 分間直線飛行することにより、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ものである。両フライトは原則として、セットで 1 日 1 回実施する。Rn 影響フ

ライトおよびBGフライトのイメージを Fig. 4-12 に示す。

- ・天然核種フライト

福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs による影響のないと考えられる場所において対地高度約 300 m をフライトすることによりデータを取得し、 $\gamma$  線スペクトルから天然核種の影響を差し引き、地表面における放射性 Cs 沈着量を算出するためのスペクトルインデックスを算出するものである。本フライトは、過去に使用した実績のない機体を用いる場合にのみ、1 回実施することとしている。天然核種フライトの場所の例を Fig. 4-13 (左) に示す。

- ・オーバーラップフライト

異なる機体やRSIシステムの組み合わせの相互評価のため、同じ場所をフライトしデータを比較するものである。オーバーラップフライトの場所を Fig. 4-13 (中央および右) に示す。これらのフライトの中でオーバーラップフライトのみ、実際の解析に使用するパラメータの取得が目的でなく、機器や機体間の相互評価に使用するものであり、パラメータの妥当性を検証することを目的としている。

Table 4-1 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 (150 m、300 m、450 m、600 m、750 m、900 m および 1,500 m) を変化させてフライト	測線 5,000 km をフライトするごとに 1 回実施
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	測線 5,000 km をフライトするごとに 1 回実施
宇宙線フライト	宇宙線の影響を調査	海上または陸上を 300 m ~2,400 m まで上昇	1 週間 1 回を目安
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対地高度 450 m ~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 を約 2 分間直線飛行(Rn 影響フライト後に実施)	毎日
天然核種フライト	天然核種の影響を減算し、放射性 Cs 沈着量を算出するためのスペクトルインデックスを算出	福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs による影響のないと考えられる場所でフライト	過去に機体の使用実績がなければ 1 回
オーバーラップフライト	機体間のレスポンス補正	特定の場所をフライト	機体と RSI システムの組み合わせごとに 1 回

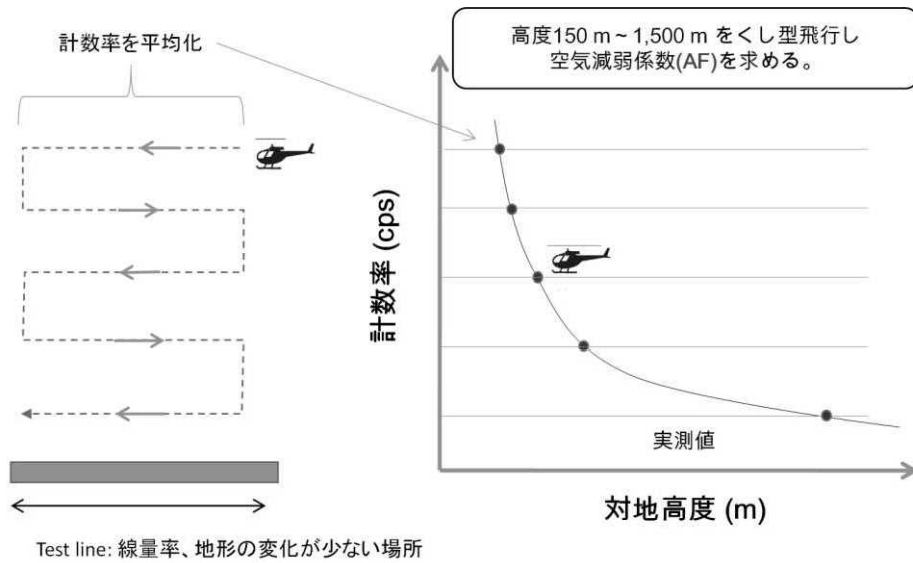
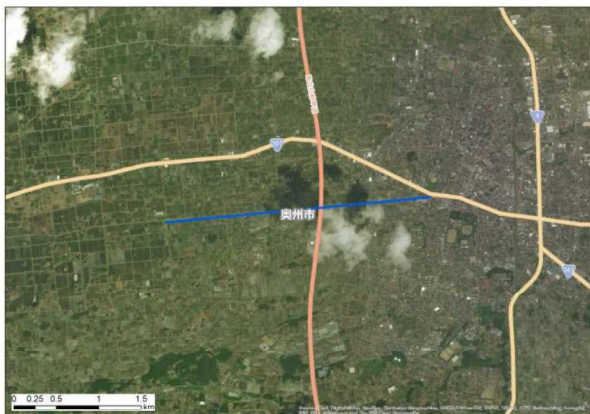


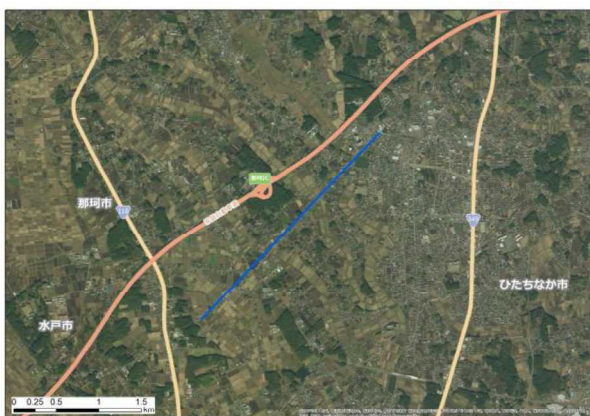
Fig. 4-7 テストラインフライトのイメージ



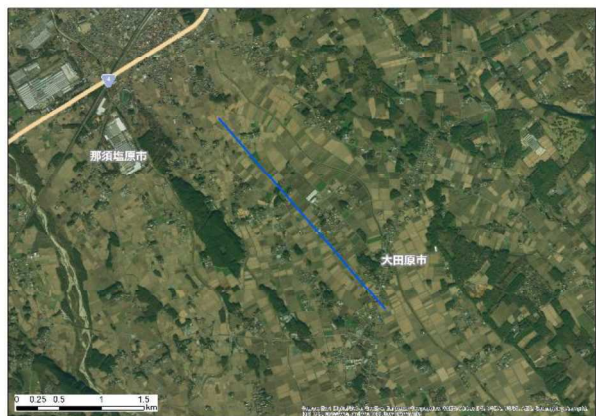
Test line 1 (岩手県奥州市)



Test line 3 (群馬県みどり市)



Test line 4 (茨城県那珂市)

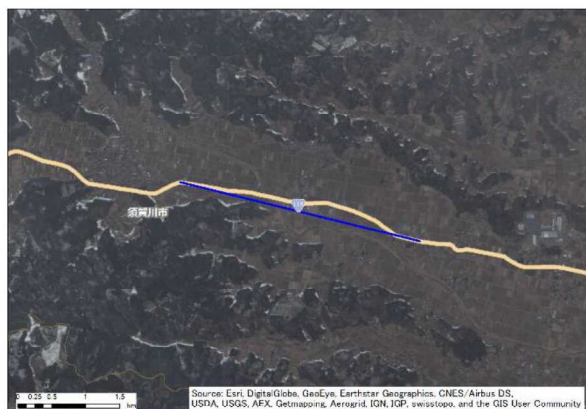


Test line 5 (栃木県大田原市)

Fig. 4-8 テストラインの場所

(1/2)

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

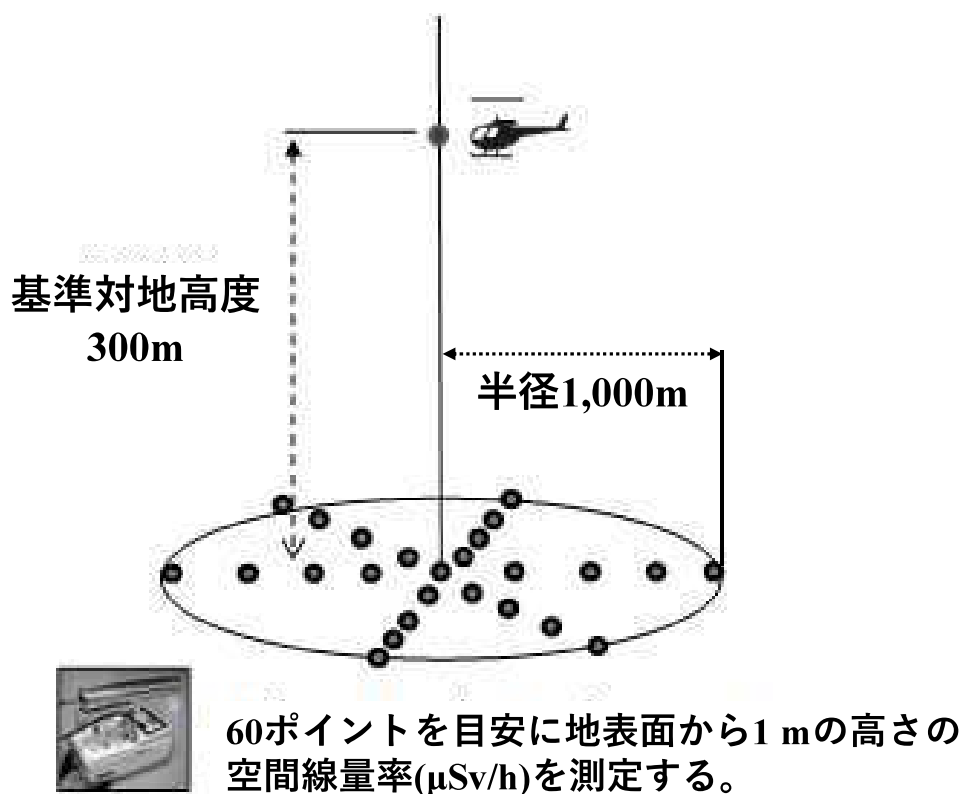


Test line A (福島県須賀川市)

Fig. 4-8 テストラインの場所

(2/2)

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



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

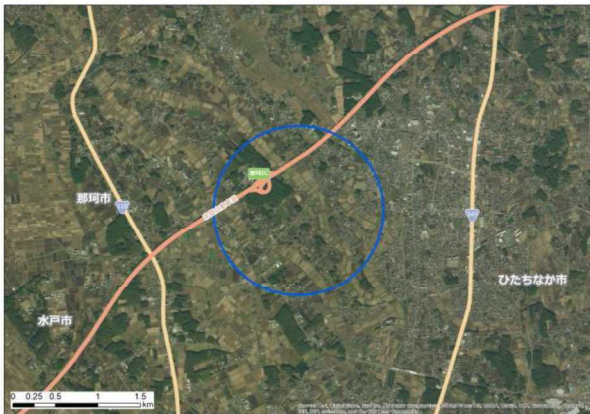
Fig. 4-9 テストポイントフライトのイメージ



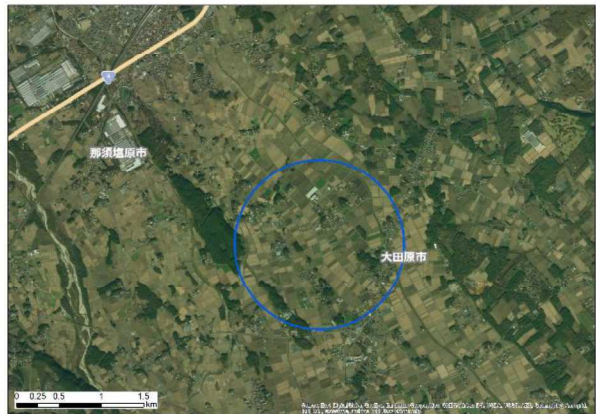
Test point 1 (岩手県奥州市)



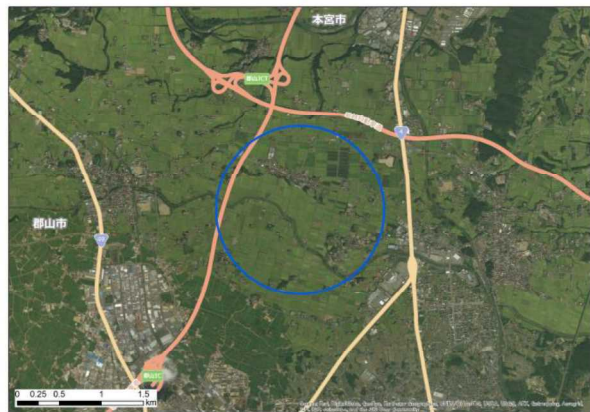
Test point 3 (群馬県みどり市)



Test point 4 (茨城県那珂市)



Test point 5 (栃木県大田原市)



Test point D (福島県郡山市)



Test point E (福島県浪江町)

Fig. 4-10 テストポイントの場所

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

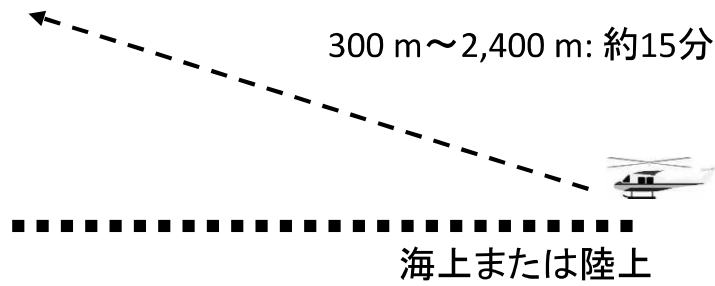


Fig. 4-11 宇宙線フライトのイメージ

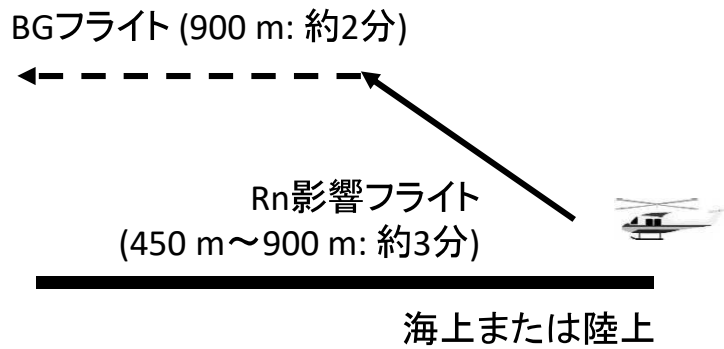
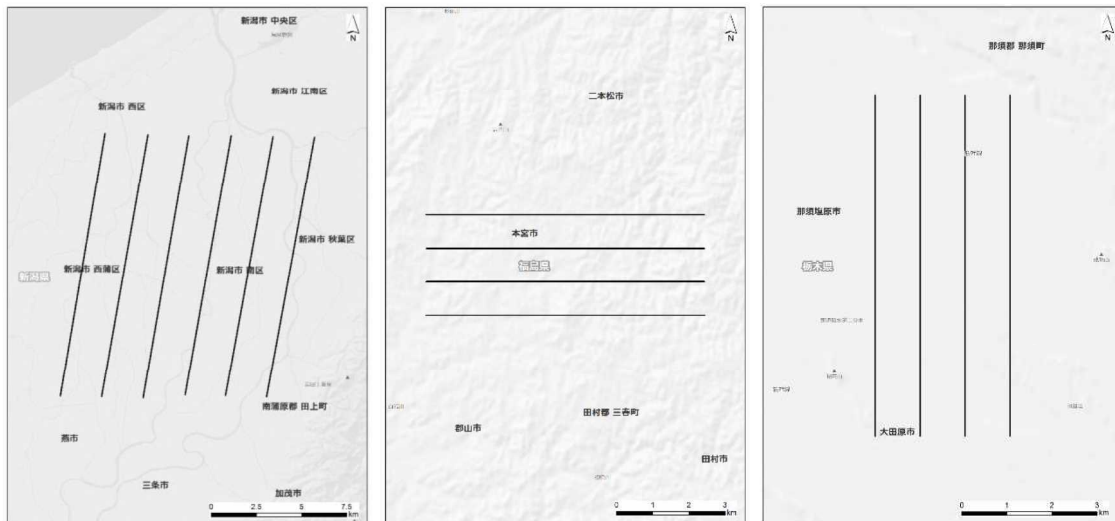


Fig. 4-12 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ



天然核種フライト測線

オーバーラップフライト測線  
(80 km 圏内)

オーバーラップフライト測線  
(80 km 圏外)

Fig. 4-13 天然核種フライトの測線とオーバーラップフライト場所  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

#### 4.4. 解析のフロー

本測定法により上空で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Csからの $\gamma$ 線
- ② 天然の放射性核種からの $\gamma$ 線
- ③ 宇宙線
- ④ その他(空气中ラドン子孫核種、自己汚染等を含む。)

航空機モニタリングでは、放射性Cs由来の $\gamma$ 線を測定することが主目的であるため、全計数率から②～④起源の計数率はバックグラウンドとして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. 4-14に示す。なお、本節以降の空間線量率とは、周辺線量当量率(1cm線量当量率)を意味する。

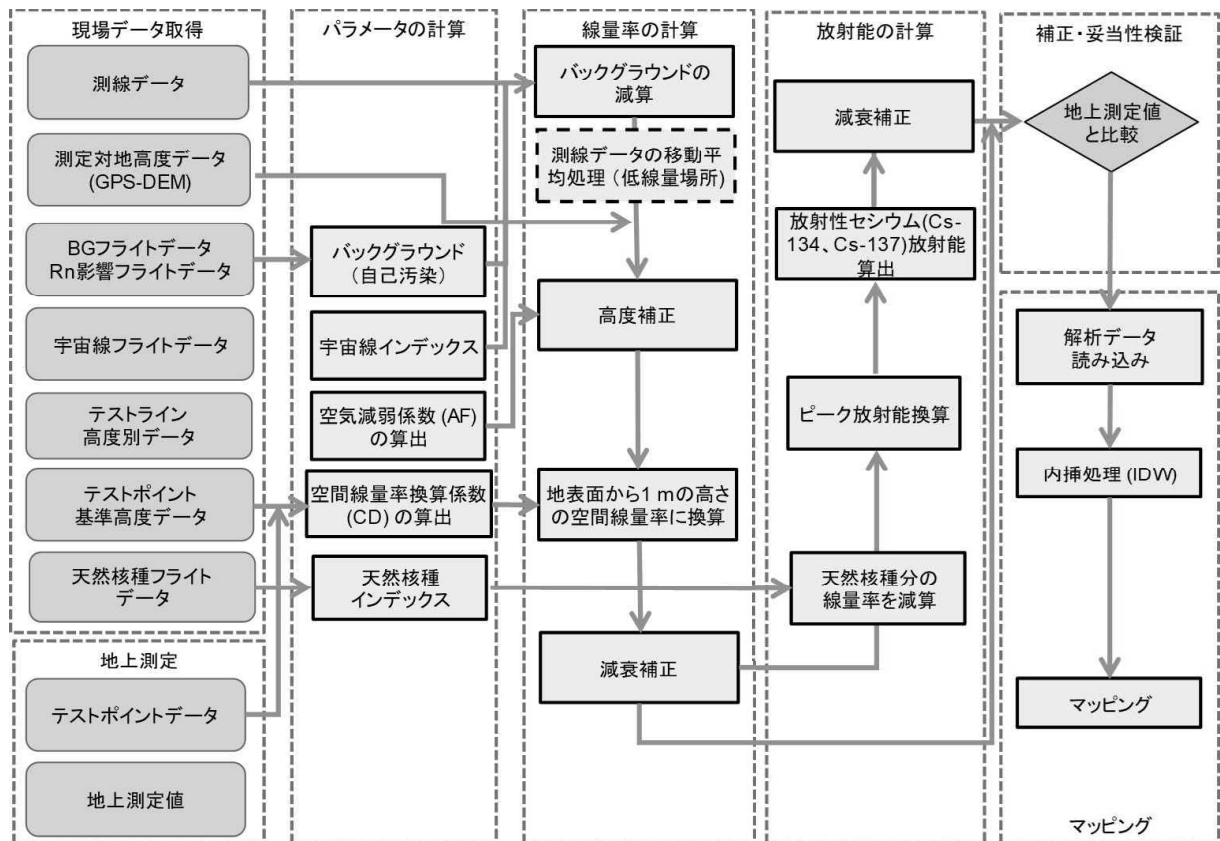


Fig. 4-14 解析のフロー



#### 4.5. 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、大まかに以下の通りである。

- ① バックグラウンド減算：全計数率から、前項で挙げたバックグラウンドの内、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により生じる、 $\gamma$ 線計数率の多寡を高度補正係数により補正する。
- ③ 空間線量率への換算：①、②を経て得られた計数率を空間線量率換算係数 (CD) により地上空間線量率に換算する。

以下、上記項目の詳細について述べる。

##### 4.5.1. バックグラウンド減算 (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や天然核種に起因する  $\gamma$  線計数率はバックグラウンドとなる。本項では、自己汚染および宇宙線に起因する  $\gamma$  線計数率の減算方法について示し、天然核種の減算方法は 4.6.1. に詳述する。自己汚染の減算については、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対地高度約 900 m 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。地上および海上で取得したスペクトルの例を Fig. 4-15 に示す。また、平均的な自己汚染の計数率を Table 4-2 に示す。なお、BG フライトには大気中ラドン子孫核種に起因する計数率も含まれており、大気中のラドン濃度は日単位や季節単位で変動することが知られている。よって BG フライトによる自己汚染の減算には、ある程度の不確かさが伴うことが推察される。標準的な解析手法では、自己汚染にラドン子孫核種による影響を含んでバックグラウンドとして取り扱う。なお、ラドン子孫核種による影響を除去して自己汚染を評価し、バックグラウンドを減算する手法 (ラドン弁別手法) については 8 章に詳述する。

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。宇宙線起因の放射線は、RSI システムが測定している全エネルギー範囲 (30 keV ~ 3,000 keV) で計数されるが、 $^{208}\text{Tl}$  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、宇宙線だけを計数していると考えられる 2,800 keV 以上の計数に着目した。Fig. 4-16 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 ~ 2,000 m の海拔高度で取得したデータのうち、2,800 keV 以上の  $\gamma$  線の計数率をプロットしたものである。なお、RSI システムにおいて、3,000 keV 以上の計数は最終チャンネル (1,023 ch) に積算される。このように、海拔高度と 2,800 keV 以上の  $\gamma$  線の計数率は正の相関にあり、計測する場所に影響されない。また、2,800 keV を超える  $\gamma$  線の計数率 ( $C_{>2,800 \text{ keV}}$ ) と 2,800 keV 以下の計数率 ( $C_{\leq 2,800}$ ) 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 を超える  $\gamma$  線の計数率から CR-index を用いて全エネルギーにおける宇宙線起因の  $\gamma$  線の計数率を算

出し、全計数率から差し引いた。実測したデータを基に算出した CR-index について Table 4-2 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。

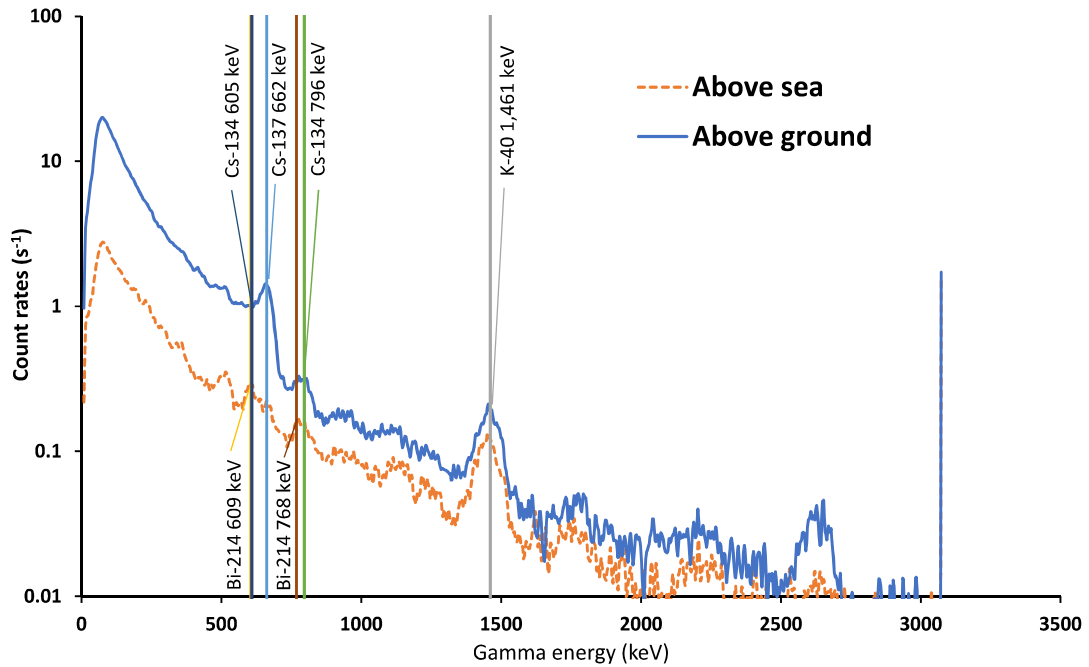


Fig. 4-15 RSI システムにおける地上で取得した  $\gamma$  線スペクトルと海上でのスペクトル例

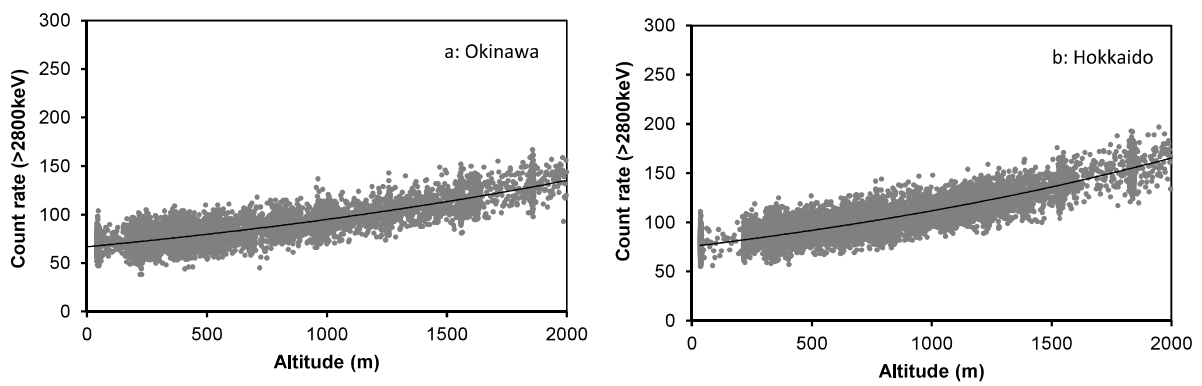


Fig. 4-16 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例  
(a: 沖縄海域、 b: 北海道海域)

Table 4-2 機体とシステムの組み合わせと自己汚染による計数率および CR-index

System	ヘリコプター	運航会社	自己汚染計数率 ( $s^{-1}$ )	CR-index
RSI 1	Bell 430 (JA05TV)	NNK	495	2.93
	Bell 412 (JA6767)	NNK	450	2.97
RSI 2	Bell 412 (JA6928)	AAC	430	2.97
	Bell 412 (JA6767)	NNK	505	2.97

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

#### 4.5.2. 高度補正

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 - ジオイド高度)

対地高度の算出には、GPS で記録した楢円対地高度から、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>35)</sup>およびジオイド高度<sup>35)</sup>を差し引いて求めた\*1。Fig. 4-17に対地高度と計数率の関係の例について示す。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 とした。実際の AF の数値は、2014 年度に採用した数値を使用した。使用した数値と標準偏差 ( $\sigma$ ) について Table 4-3 に示す。

なお、2020 年度においても、数値の妥当性および RSI システムの健全性を確認するために、キャリブレーションデータを取得した。取得したデータについて、Table 4-4 に示す。今回評価した AF の数値の平均値と採用した数値との差は、Table 4-3 で示した標準誤差の範囲内であ

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

り、採用した数値の妥当性を示していると考えられる。

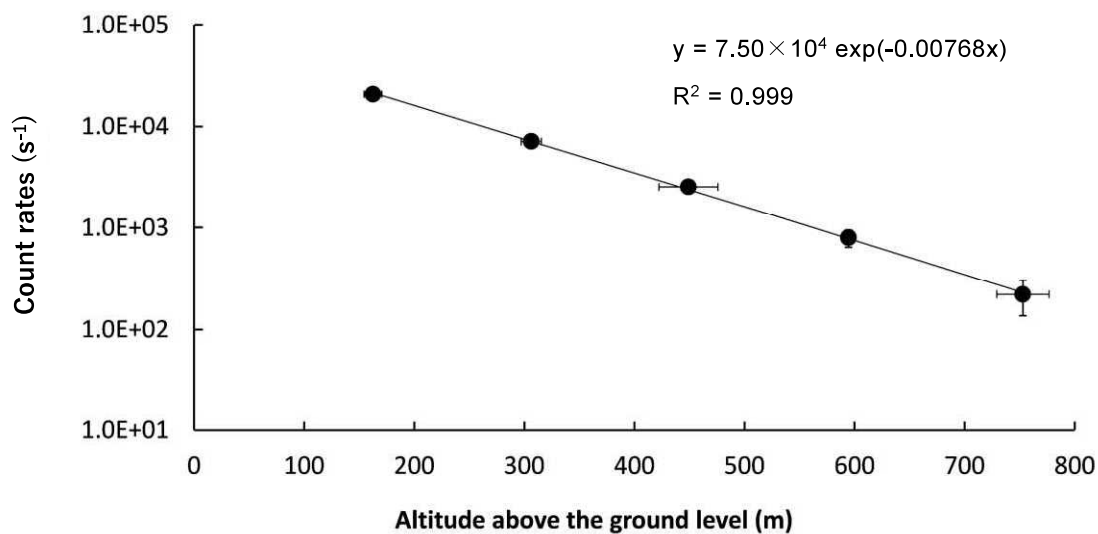


Fig. 4-17 対地高度と計数率の関係例  
(Bell 430 JA6900、2013年11月5日実施、Test line A)

Table 4-3 使用したパラメータのまとめ  
(表中の SD は各パラメータの標準偏差 (1σ) である)

	Bell412			Bell430		
	Value	SD(1σ)	Number of Data	Value	SD(1σ)	Number of Data
AF (m <sup>-1</sup> )	-0.0072	± 0.00042	21	-0.0072	± 0.00040	35
CD (cps/[μSv/h])	11000	± 2100	42	13000	± 2800	65

※SD:標準偏差

Table 4-4 2020 年度に取得した AF データ一覧

Group	Monitoring No.	System (Device Serial)	Helicopter	Body No.	Operation Company	Location	Date	AF	
								$\mu(m^{-1})$	R <sup>2</sup>
A	Fukushima15th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLineA	2020/09/06	-0.00690	0.99963
A	Fukushima15th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLineA	2020/09/21	-0.00715	0.99989
A	EastJapan11th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine5	2020/10/05	-0.00714	0.99974
A	EastJapan11th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLineA	2020/10/06	-0.00728	0.99988
A	EastJapan11th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine1	2020/10/15	-0.00701	0.99988
A	EastJapan11th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine4	2020/10/27	-0.00809	0.99482
A	EastJapan11th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine5	2020/10/28	-0.00718	0.99984
A	EastJapan11th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine5	2020/10/30	-0.00743	0.99985
Average(2020)								-0.00727	
Average(to 2019)								-0.00720	

Group	Monitoring No.	System (Device Serial)	Helicopter	Body No.	Operation Company	Location	Date	AF	
								$\mu(m^{-1})$	R <sup>2</sup>
B	Fukushima15th	5043	Bell412	JA6928	AAC	TestLineA	2020/08/26	-0.00679	0.99994
B	Fukushima15th	5043	Bell412	JA6928	AAC	TestLineA	2020/09/08	-0.00691	0.99982
B	EastJapan11th	5043	Bell412	JA6928	AAC	TestLine4	2020/09/22	-0.00618	0.99929
B	EastJapan11th	5043	Bell412	JA6928	AAC	TestLine3	2020/09/28	-0.00672	0.99959
B	EastJapan11th	5043	Bell412	JA6767	NNK	TestLine3	2020/10/26	-0.00647	0.99906
Average(2020)								-0.00661	
Average(to 2019)								-0.00671	

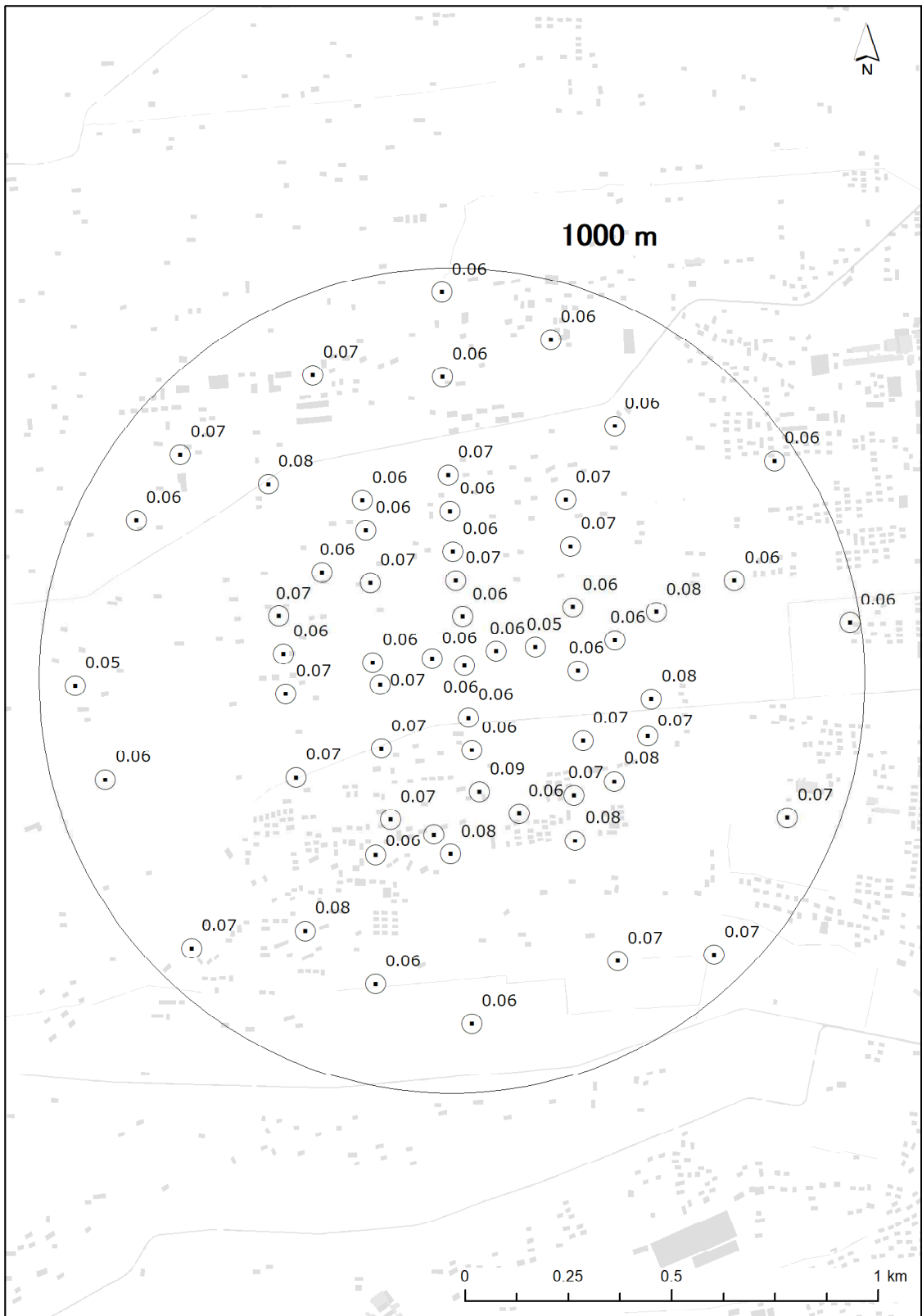
※R<sup>2</sup>: 近似した指数関数曲線の決定係数  
 ※NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

#### 4.5.3. 空間線量率への換算

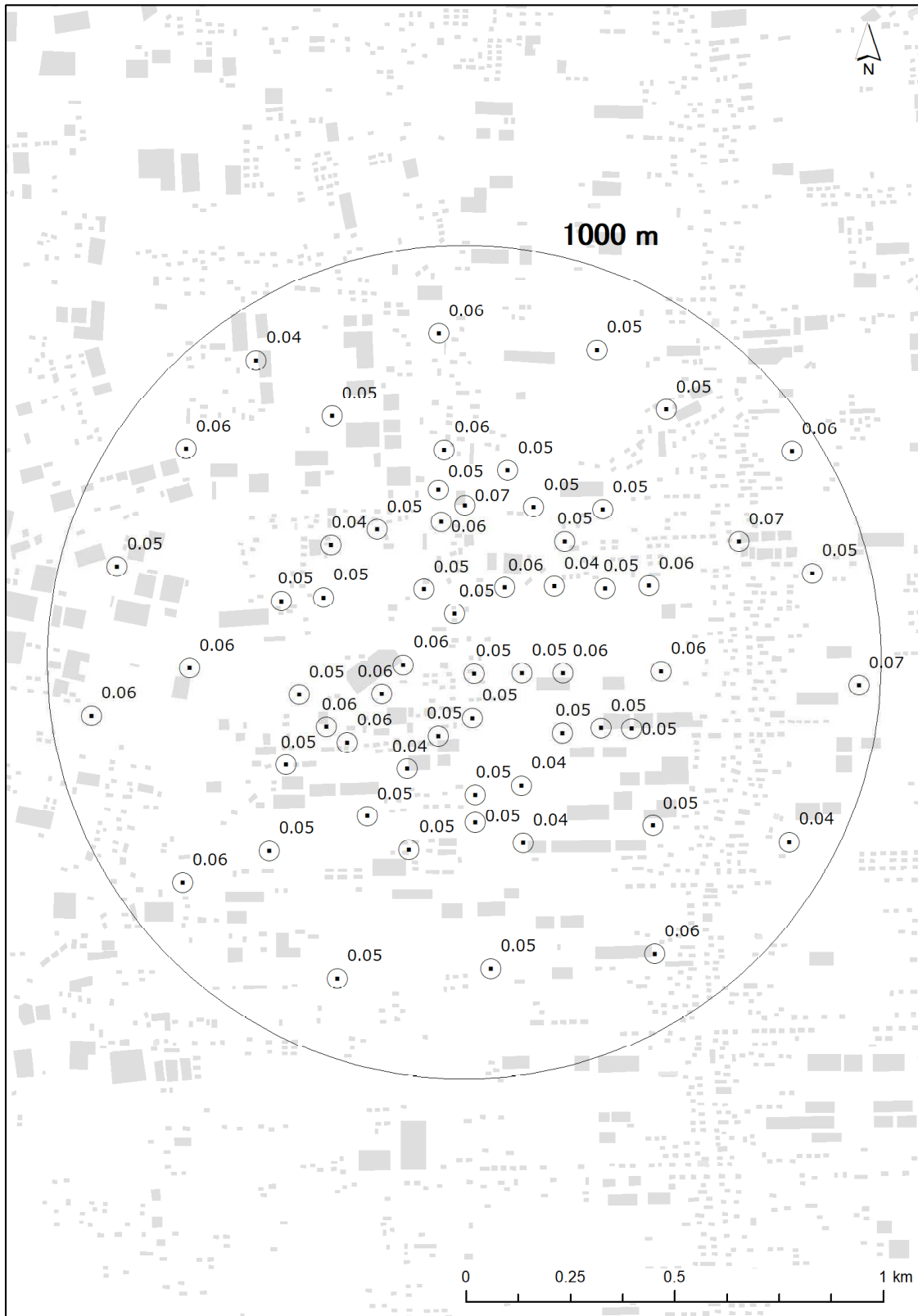
地表面から 1 m の高さの空間線量率に換算するための空間線量率換算係数 (Conversion factor of Dose-rate: CD) は、テストポイントの地上における測定点の平均値とその上空 300 m を 3 分間ホバリングして得られた計数率の平均値の比から求めた。地上測定値として、ヘリの 3 分間のホバリング中の緯度および経度の平均値を求め、その地点から半径 500 m 円内における平均値を用いた。RSI システムは機体の中に搭載するため、ヘリコプターの機底の遮蔽により CD は変化すると考えられることから、機体ごとに数値の設定が必要である。実際の数値は、2014 年度に決定した数値を使用した。使用した数値と標準偏差 (1 $\sigma$ ) については前項の Table 4-3 に示した。AF と同様に、2020 年度においても、数値の妥当性および RSI システムの健全性を確認するために、キャリブレーションデータを取得した。取得したデータについて、Table 4-5 および Table 4-6 に示す。また、地上のテストポイントにおける CD 算出のための空間線量率測定結果について、Fig. 4-18~Fig. 4-23 に示す。なお、ここでいう空間線量率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。

今回評価した CD の平均値と採用した数値との差は Table 4-3 で示した誤差範囲であり、採用した数値の妥当性を示していると考えられる。また、この数値の違いについてさらに妥当性を考察するため Fig. 4-13 (中央および右) に示した同じ測線において Bell 412 および Bell 430 によって対地高度 300 m でオーバーラップフライトを実施し、得られた計数率の比較を行った。当該フライトで得た測定値に対して実際にフライトした高度を HF により基準高度 (300 m) に補正し計数率を比較した。なお、Bell 430 (JA05TV) と Bell412 (JA6767) とのオーバーラップフライトは機体練りの都合上、2 回実施した。比較結果を Fig. 4-24 に示す。この計数率の比は Table 4-3 に示した CD の比と一致することが望ましい。Table 4-3 に示した CD 比は例えば Bell

412/Bell 430 で約 0.846 である。この比が Fig. 4-24 に示した回帰直線の傾きと大きく異なる場合、いずれかの機体の CD に対し、当該回帰直線における傾きと一致するように補正を施すことを検討する。2020 年度においては、CD 比と Fig. 4-24 に示した回帰直線の傾きは概ね等価であったため、補正を施す必要性は無かった。このように、オーバーラップフライトの結果は現在設定されている CD の数値が妥当であるか、再設定すべきかを検討する判断材料の一つとなると考えられる。

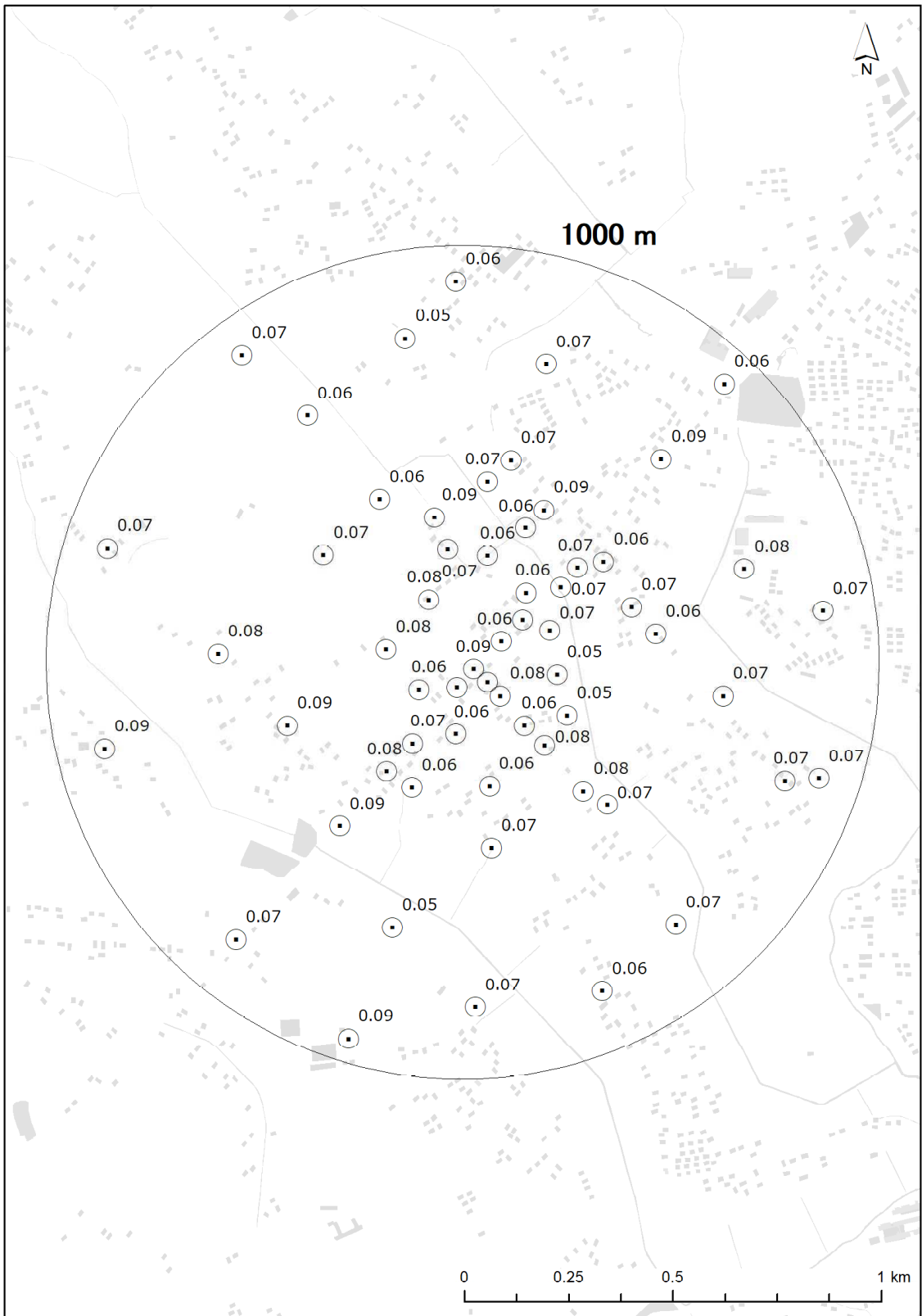


**Fig. 4-18 地上測定データ (Test Point 1)**  
 (空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )、天然核種による寄与を含む)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

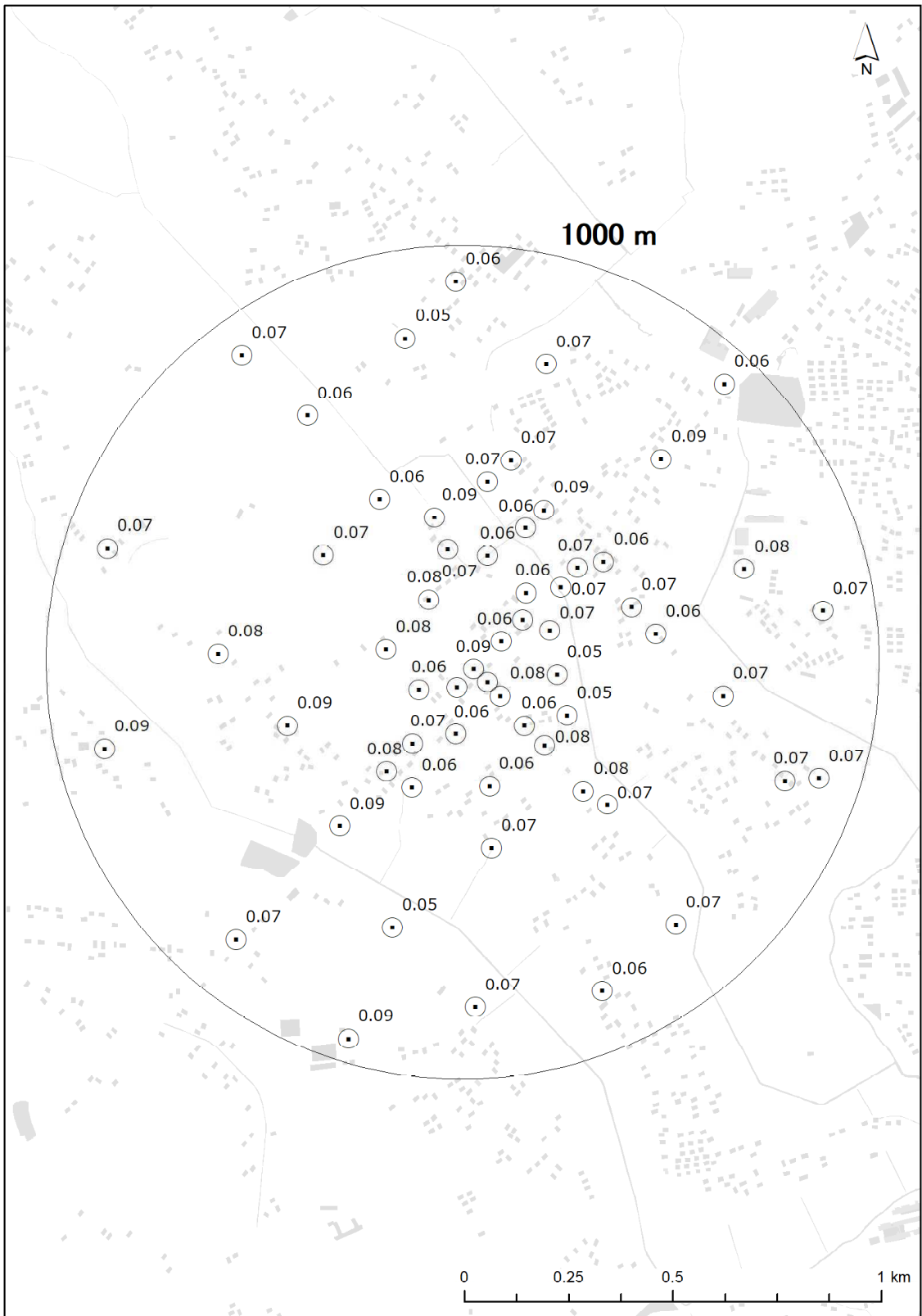


**Fig. 4-19 地上測定データ (Test Point 3)**  
 (空間線量率 (μSv/h)、天然核種による寄与を含む)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)





**Fig. 4-20 地上測定データ (Test Point 4)**  
 (空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )、天然核種による寄与を含む)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



**Fig. 4-21 地上測定データ (Test Point 5)**  
 (空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )、天然核種による寄与を含む)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

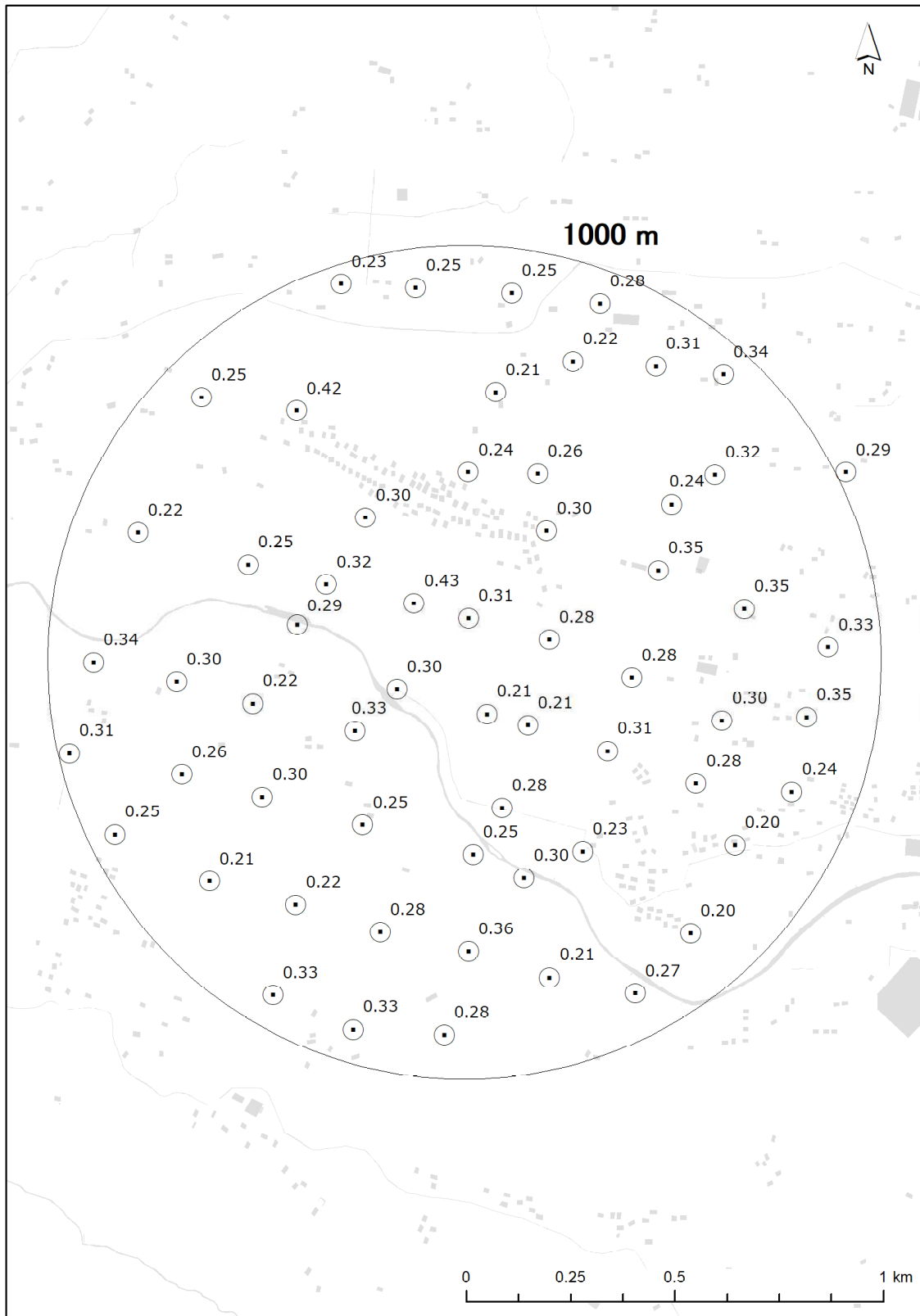


Fig. 4-22 地上測定データ (Test Point D)

(空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )、天然核種による寄与を含む)

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

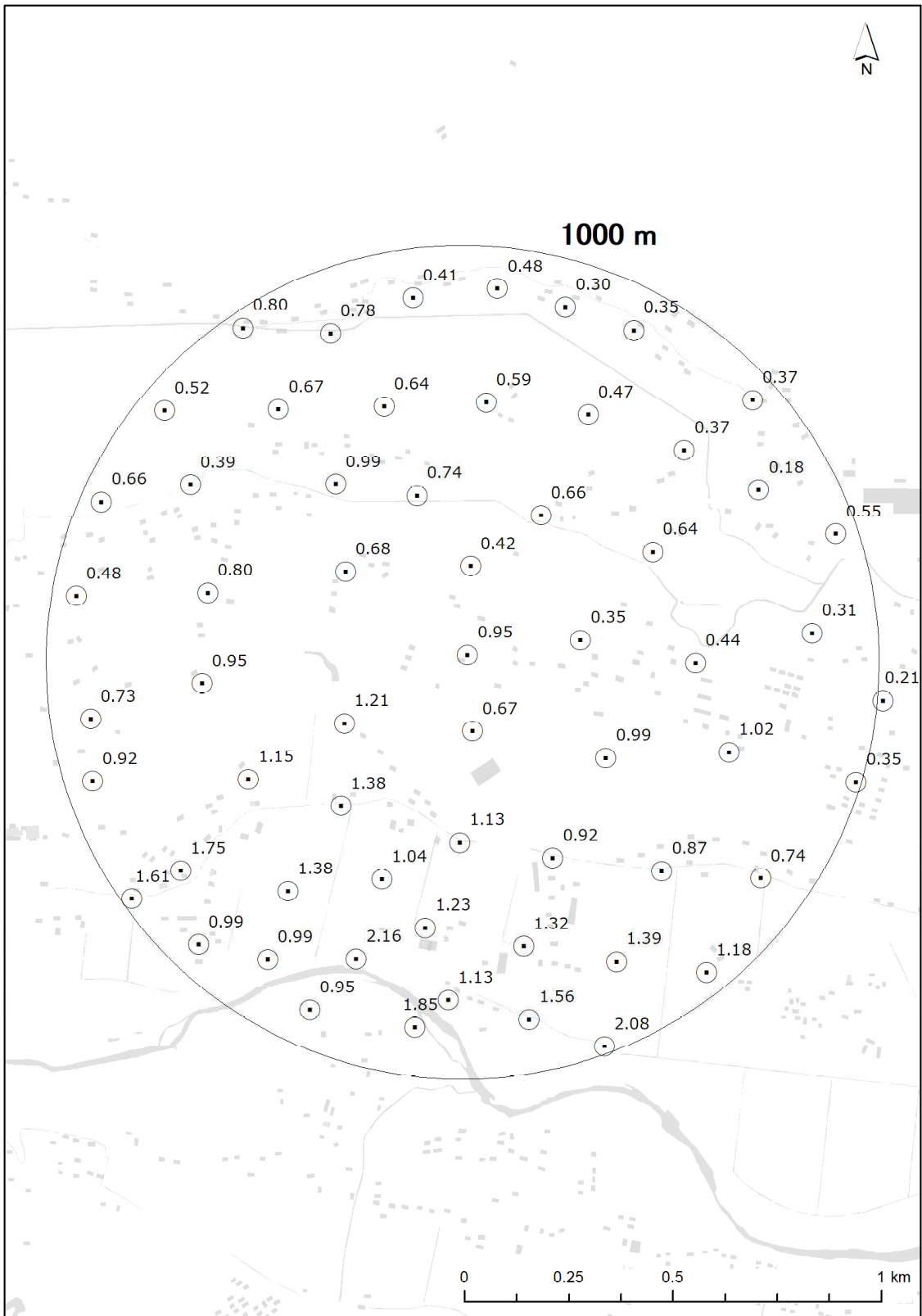


Fig. 4-23 地上測定データ (Test Point E)  
 (空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )、天然核種による寄与を含む)  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

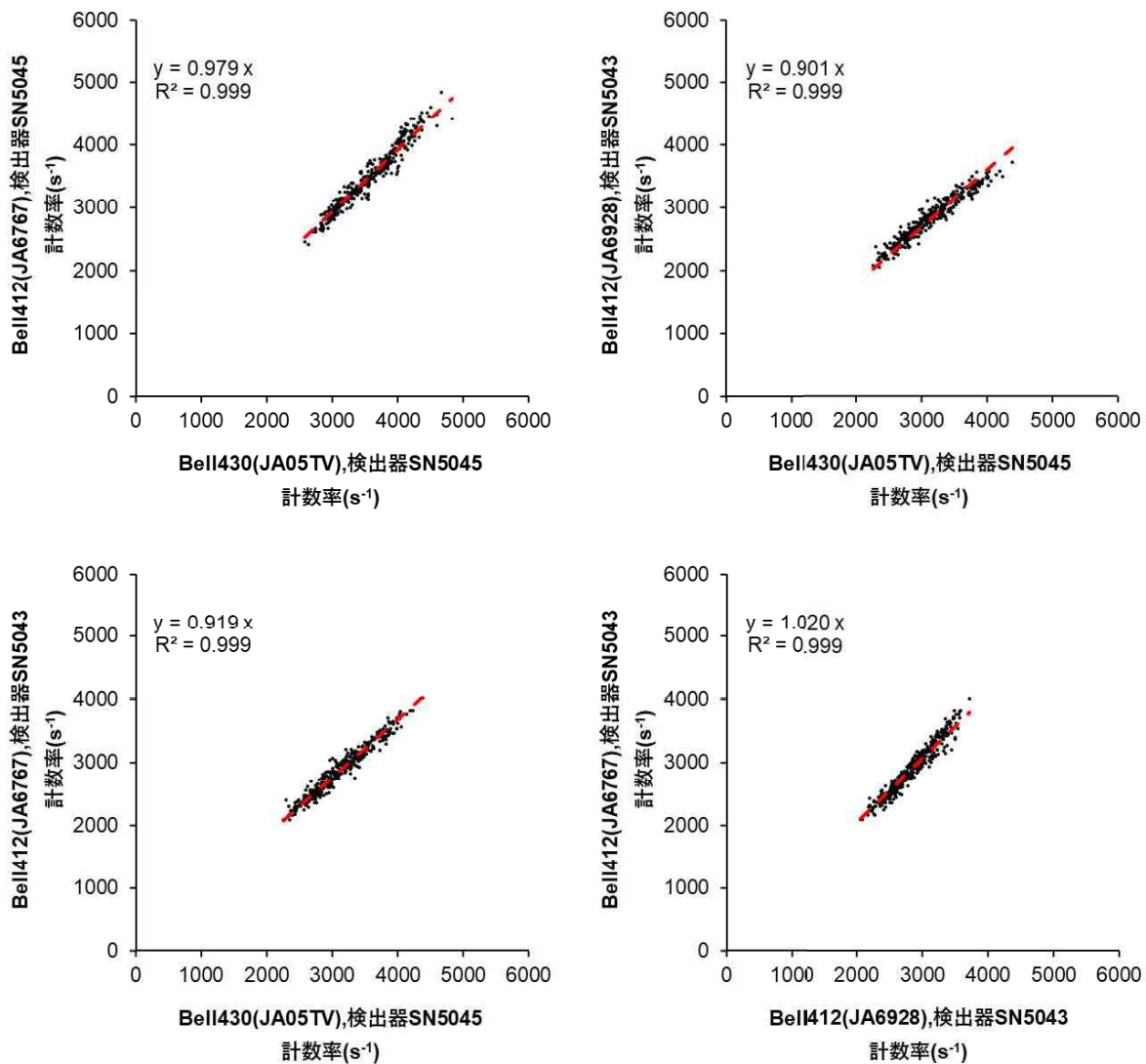


Fig. 4-24 ヘリコプターの機種とオーバーラップフライトにおける計数率の関係

Table 4-5 2020 年度に取得した CD データ一覧 (Bell 412)

Helicopter	Monitoring No.	Body No.	Operation Company	Date	System (Device Serial)	Detector	Location	Ground data (Nat survey)			AMS data			AGL (m)			CD ( $(s^{-1})\mu(Sv/h)$ )
								Survey (uSv/h)	SD (2 $\sigma$ )	RSD (%)	Count rates (s $^{-1}$ )	SD (2 $\sigma$ )	RSD (%)	AGL_GEOID (m)	SD (2 $\sigma$ )	RSD (%)	
Bell 412	Fukushima 15th	JA6928	AAC	2020/08/26	SN:5043	DPU1 SN:2536 SN:2539 SN:2559	TestPointD	0.28	0.103	37	4185	468	11	282	10	3	10100
						DPU2 SN:1305 SN:1311											
						DPU1 SN:2536 SN:2539											
						DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311											
						DPU1 SN:2536 SN:2539											
						DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311											
	EastJapan 11th	JA6767	NNK	2020/10/26	SN:5043	DPU1 SN:2536 SN:2539 SN:2559	TestPoint3	0.05	0.016	31	1212	79	7	321	4	1	10800
						DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311											
						DPU1 SN:2536 SN:2539											
						DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311											
						DPU1 SN:2536 SN:2539											
						DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311											
Bell 412	Fukushima 15th	JA6928	AAC	2020/09/08	SN:5043	DPU1 SN:2536 SN:2539 SN:2559	TestPointE	0.70	0.520	74	9721	3339	34	270	44	16	10000
						DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311											
						DPU1 SN:2536 SN:2539											
						DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311											
						DPU1 SN:2536 SN:2539											
						DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311											
	EastJapan 11th	JA6928	AAC	2020/09/22	SN:5043	DPU1 SN:2536 SN:2539 SN:2559	TestPoint4	0.07	0.023	33	1168	103	9	335	23	7	9300
						DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311											
						DPU1 SN:2536 SN:2539											
						DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311											
						DPU1 SN:2536 SN:2539											
						DPU2 SN:1303 SN:1305 SN:1311											

Average(2020) 10600  
Average(to 2019) 11600  
※NNK: 中日本航空株式会社, AAC: 朝日航空株式会社, SD: 標準偏差, RSD: 相対標準偏差

Table 4-6 2020 年度に取得した CD データ一覧 (Bell 430)

Helicopter	Monitoring No.	Body No.	Operation Company	Date	System Device Serial	Detector	Location	Ground data (Nalsurvey)				AMS data				ASL (m)				CD (ft <sup>3</sup> /l(Swh))
								Survey (l/Swh)	SD (2σ)	RSD (%)	Count (ft <sup>3</sup> )	SD (2σ)	RSD (%)	AGL_CEQD (m)	SD (2σ)	RSD (%)	AGL_CEQD (m)	SD (2σ)	RSD (%)	
Bell 430	Fukushima 15th	JA05TV	NNK	2020/09/06	SN5045	DFU1 SN2806	TestPointD	0.29	0.106	36	3801	637	17	328	17	12900				
						SN7179 SN2807														
						SN2808														
						DFU2 SN3029														
						SN3031														
						SN7184 SN3032														
	2020/09/21	SN5045	DFU1 SN2806	TestPointE	0.77	0.545	71	9192	1294	14	314	17	11900							
			SN7179 SN2807																	
			SN2808																	
			DFU2 SN3029																	
			SN3031																	
			SN7184 SN3032																	
2020/10/05	SN5045	DFU1 SN2806	TestPointD	0.29	0.113	39	4310	579	13	307	20	12000								
		SN7179 SN2807																		
		SN2808																		
		DFU2 SN3029																		
		SN3031																		
		SN7184 SN3032																		
2020/10/06	SN5045	DFU1 SN2806	TestPointE	0.86	0.606	71	19629	1250	9	303	14	14600								
		SN7179 SN2807																		
		SN2808																		
		DFU2 SN3029																		
		SN3031																		
		SN7184 SN3032																		
2020/10/15	SN5045	DFU1 SN2806	TestPointD	0.11	0.023	22	2360	236	10	286	5	8200								
		SN7179 SN2807																		
		SN2808																		
		DFU2 SN3029																		
		SN3031																		
		SN7184 SN3032																		
2020/10/27	SN5045	DFU1 SN2806	TestPoint	0.30	0.125	42	3324	468	14	360	5	12200								
		SN7179 SN2807																		
		SN2808																		
		DFU2 SN3029																		
		SN3031																		
		SN7184 SN3032																		
2020/10/28	SN5045	DFU1 SN2806	TestPointD	0.07	0.013	20	1334	107	8	311	12	10700								
		SN7179 SN2807																		
		SN2808																		
		DFU2 SN3029																		
		SN3031																		
		SN7184 SN3032																		
2020/10/30	SN5045	DFU1 SN2806	TestPointD	0.07	0.024	34	1258	153	12	297	22	7200								
		SN7179 SN2807																		
		SN2808																		
		DFU2 SN3029																		
		SN3031																		
		SN7184 SN3032																		
2020/10/30	SN5045	DFU1 SN2806	TestPointD	0.11	0.035	32	2128	305	14	302	22	12600								
		SN7179 SN2807																		
		SN2808																		
		DFU2 SN3029																		
		SN3031																		
		SN7184 SN3032																		
2020/10/30	SN5045	DFU1 SN2806	TestPointD	0.10	0.021	20	2077	234	11	300	22	11400								
		SN7179 SN2807																		
		SN2808																		
		DFU2 SN3029																		
		SN3031																		
		SN7184 SN3032																		

Average(2020) 11400  
Average(to 2019) 12100

※NNK 中日本航空株式会社、SD: 標準偏差、RSD: 相対標準偏差

#### 4.5.4. 空間線量率への換算方法

ここ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] 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 ( $C_{all}$ )
  - (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 を用いて地表面から 1 m の高さの空間線量率  $D$  を算出する。

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

ここで、

HF: 高度補正係数

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

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

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

である。

#### 4.6. 放射性 Cs の沈着量への換算方法

##### 4.6.1. 天然核種の弁別と放射性 Cs 起源の計数率の算出

天然核種の弁別方法は DOE が開発したいわゆる MMGC 法 (Man Made Gross Count) を参考にした<sup>3)</sup>。本方法は天然核種のみを含む地域を測定して得られる  $\gamma$  線スペクトルにおいて、放射性 Cs が放出する  $\gamma$  線を含まない 1,400 keV~2,800 keV の計数率と全計数率の比 (BG-index) が一定であることに着目するものである。機体と検出器の組み合わせごとに、あらかじめ放射性 Cs による汚染がない地域をフライトして得られたデータを基に BG-index を設定し、実際のフライトデータの 1,400 keV~2,800 keV 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. 4-25 に示す。また、BG-index の算出例を Fig. 4-26 に示す。本データは、2011 年度に関西地方において、1 秒ごとに測定した  $\gamma$  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 4-7 に示す。



これらのパラメータを用いた放射性 Cs の沈着量の算出手順を以下に示す。また、計算式を式 [3] に示す。

- ① 測定で得られた  $\gamma$  線スペクトルから 1,400 keV~2,800 keV の計数率 ( $C_{BG}$ ) を計算する。
- ②  $C_{BG}$  に BG-index ( $I_{BG}$ ) を乗じて天然核種起源の計数率 ( $BG_{nat}$ ) を算出する。
- ③  $C_{net}$  ( $= C_{all} - BG_{cos} - BG_{self}$ ) から  $BG_{nat}$  を差し引き、放射性 Cs のみの計数率 ( $C_{Cs}$ ) を求める。
- ④  $C_{Cs}$  に HF を乗じ、CD で除することで放射性 Cs のみの空間線量率 ( $D_{Cs}$ ) を算出する。
- ⑤ 式 [3] より、空間線量率を空間線量率—放射能換算係数 (CF [ $\mu\text{Sv/h}$ ]/[ $\text{kBq/m}^2$ ]); 4.6.2. にて詳述する。) で除して放射性 Cs の沈着量  $Rd$  ( $\text{kBq/m}^2$ ) を求める。

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

ここで、

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

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

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

である。なお、詳細は後述するが、CF の単位は本来 [ $\mu\text{Gy/h}$ ]/[ $\text{kBq/m}^2$ ] であり、[ $\mu\text{Sv/h}$ ]/[ $\text{kBq/m}^2$ ] に換算するにあたり、 $\text{Gy} : \text{Sv} = 1 : 1.2$  とした。

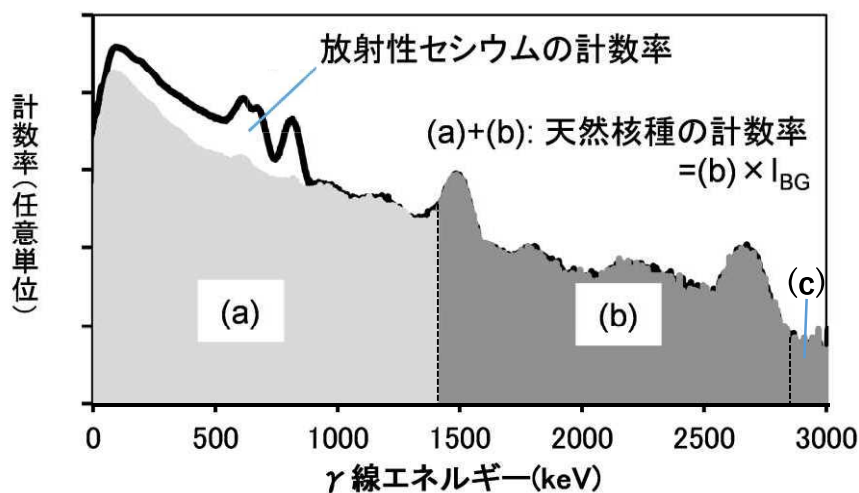


Fig. 4-25 放射性 Cs の計数率の算出イメージ

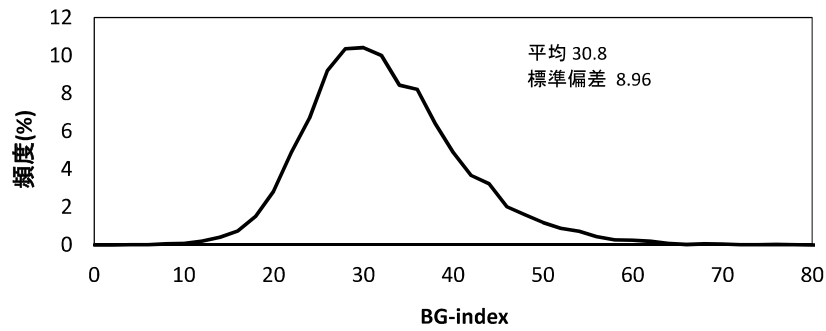


Fig. 4-26 BG-index の算出例

(関西地方において、1秒ごとに測定した $\gamma$ 線スペクトルからBG-indexを求めヒストグラムで表示、全16,000データ: Bell 430)

Table 4-7 BG-index 一覧

System	ヘリコプター	運航会社	BG-index
RSI-1	Bell 430 (JA05TV)	NNK	31
	Bell 412 (JA6767)	NNK	27
RSI-2	Bell 412 (JA6928)	AAC	26
	Bell 412 (JA6767)	NNK	27

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

#### 4.6.2. 空間線量率－放射能換算係数

航空機モニタリングでは、地上の放射性Csの沈着量に換算する場合に、文献<sup>36),37)</sup>に示される空間線量率－放射能換算係数 (Conversion Factor: CF ( $[\mu\text{Gy/h}]/[\text{kBq/m}^2]$ )) を使用する。CFは、土壌への放射性Cs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<sup>36)</sup>。これまで、航空機モニタリングにおいては、過去との比較を考慮し $\beta = 1.0$  ( $\text{g/cm}^2$ ) のときのCFを継続的に使用している。一方、規制庁と原子力機構が行っている放射性物質分布状況等調査の結果<sup>38),39)</sup>から、福島原子力発電所から80 km圏内の土壌において、重量緩衝深度 ( $\beta$ ) が年々変化していることが報告されている。ここで調査されている重量緩衝深度は、環境中での放射性Csの動態観測が目的であるため、人間活動の影響の少ない土壌を対象としている。一方、航空機モニタリングの対象は森林のような人間活動が希少な場所から住宅地や農地のような人間活動がある程度活発な場所まで多様な土地を含んでいる。さらに、その土地の利用の方法や程度は年々変わってゆく。このような多面的な因子を考えると、 $\beta$  を固定することは合理的ではないが、従来との比較のためにあえて1.0とした場合について解析するとともに、 $\beta$  に他の値を与えた場合に換算係数がどの程度影響があるかを以下に示す。

Fig. 4-27 に文献<sup>36),37)</sup>に示されている重量緩衝深度とCFの関係について示す。本図では、対数による近似曲線を記載したように、重量緩衝深度とCFは対数関係にある。例えば、 $\beta = 1.0$  ( $\text{g/cm}^2$ ) と $\beta = 2.0$  ( $\text{g/cm}^2$ ) にした際の放射性Csの沈着量と地表面から1 mの高さの空間線量率

の換算係数 ( $[\mu\text{Gy/h}]/[\text{kBq/m}^2]$ ) には、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  ともに 16 % 程度の差がある。このように、 $\beta$  の設定により放射性 Cs に対する CF は変化するため、適切な  $\beta$  の設定を行って航空機モニタリングの測定データ解析に適用することは今後の課題である。本報告における解析の基本的な方針としては、Fig. 4-27 に示した  $\beta$  の設定値が及ぼす放射性 Cs 沈着量換算係数への影響は参考情報に留め、過去との比較を考慮して緩衝深度  $\beta = 1.0$  ( $\text{g/cm}^2$ ) の場合の換算係数<sup>36),37)</sup>を適用した。

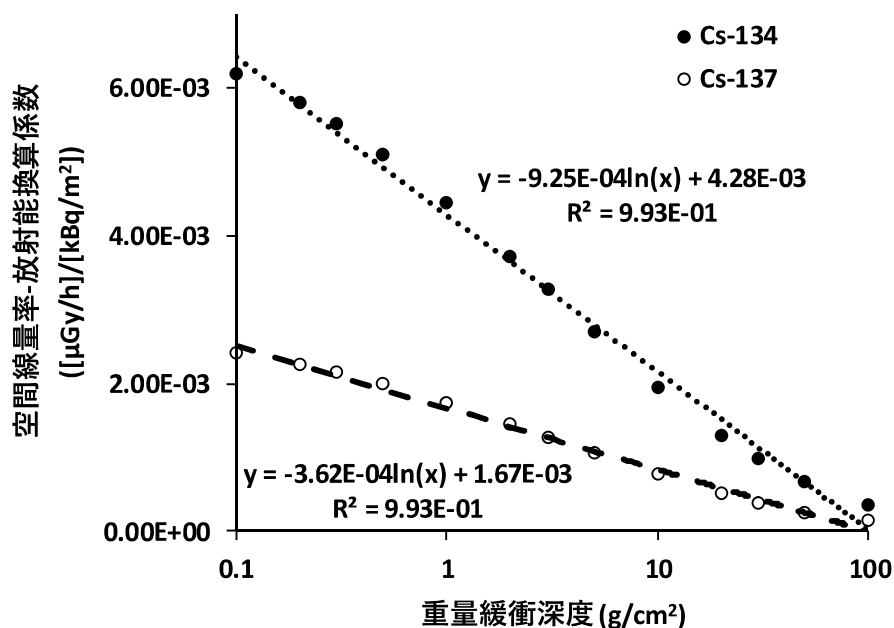


Fig. 4-27 重量緩衝深度と空間線量率－放射能換算係数の関係  
(文献<sup>36),37)</sup>のデータを基に対数による近似曲線を表示)

#### 4.7. 減衰補正

福島原子力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検出されないレベルにまで減衰しており、2011年8月13日以降では、 $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ が評価核種である。ここでは、空間線量率から放射能への $^{137}\text{Cs}$ 換算係数、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比および測定時点の空間線量率を評価時点の空間線量率に補正する方法について記述する。空間線量率から放射能への換算は、重量緩衝深度 $\beta = 1.0$  ( $\text{g/cm}^2$ )の場合の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、地表面から1mの高さの空間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ポイント以上の可搬型Ge半導体検出器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<sub>0</sub>)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完了日に減衰計算して換算した。評価時における $^{137}\text{Cs}$ および $^{134}\text{Cs}$ 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める全空間線量率から天然核種によるバックグラウンドの空間線量率を引いた空間線量率 $E_{\text{Cs}137+134}$  ( $\mu\text{Sv/h}$ )および評価時における $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 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、評価時の空間線量率からの  $^{137}\text{Cs}$  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 年 8 月 13 日) からの経過時間、 $\lambda_{Cs137}$  および  $\lambda_{Cs134}$ : 崩壊定数 (0.693/半減期) としている。

なお、放射性 Cs の物理的減衰を考慮した空間線量率は、以下のような手順に基づいて算出している。

- ① 換算した放射性 Cs 放射能を航空機モニタリングの取得完了日に合わせて減衰補正する。
- ② ①で得られた値を CF で除して、放射性 Cs 由来の空間線量率に換算する。
- ③ ②で得られた値にバックグラウンド空間線量率を加算し、全空間線量率とする。

#### 4.8. 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。式 [7] および式 [8] に航空機モニタリングにおける全線量への換算方法および放射性 Cs の沈着量の換算式について示す。本式をもとに、検出下限値および信頼性について検討を行った。

$$D = (C_{all} - BG_{self} - BG_{cos}) \times \frac{1}{CD} \times \exp(AF \times (H_{sd} - H_m)) \quad [7]$$

$$Rd_{134} = (C_{all} - BG_{nat} - BG_{cos} - BG_{self}) \times \frac{1}{CD} \times \exp(AF \times (H_{sd} - H_m)) \times \frac{1}{CF} \times R_{\frac{134}{134+137}} \times DC_{134} \quad [8]$$

ここで、

D: 全空間線量率 ( $\mu\text{Sv}/h$ )

$C_{all}$ : 全計数率 ( $s^{-1}$ )

$BG_{self}$ : 機体の汚染 ( $s^{-1}$ )

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

AF: 空気減弱係数 ( $m^{-1}$ )

$H_{sd}$ : 基準高度 (300 m)

$H_m$ : 測定高度 (m)

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

$BG_{nat}$ : 天然起源の計数率( $s^{-1}$ )  $C_{BG} \times I_{BG}$  ( $C_{BG}$ : 1400 keV~2800 keV の計数率;  $I_{BG}$ : BG index)

$BG_{cos}$ : 宇宙線起源の計数率( $s^{-1}$ )  $C_{cos} \times I_{cos}$  ( $C_{cos}$ : > 2800 keVの計数率;  $I_{cos}$ : CR index)

CF: 空間線量率 - 放射能換算係数 ( $[\mu\text{Gy/h}]/[\text{Bq/m}^2]$ )<sup>28),29)</sup>

R: 放射性 Cs に対する  $^{134}\text{Cs}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ) の割合

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

#### 4.8.1. 空間線量率の検出下限値

航空機モニタリングにより算出される空間線量率は  $BG_{self}$  と  $BG_{cos}$  に影響を受ける。これまでの測定結果<sup>21),22),23),24),26),28),30)</sup>を見ると、 $BG_{cos}$  は概ね  $200\text{ s}^{-1} \sim 500\text{ s}^{-1}$  の範囲に入ることが分かっている。また、 $BG_{self}$  は海上の測定データから宇宙線成分を減算することにより算出した結果、約  $400\text{ s}^{-1}$  であったことから、バックグラウンド計数率 ( $N_B$ ) を  $N_B = BG_{self} + BG_{cos} = 900\text{ s}^{-1}$  として検出下限値の評価を行った。

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 [9] に示した Currie の式<sup>40)</sup>に当てはめ、検出下限値 ( $N_D$ ) を算出する。

$$N_D = 4.653\sigma_{N_B} + 2.706 \quad [9]$$

$N_B$  を  $900\text{ s}^{-1}$  とすると、 $N_D$  は  $142\text{ s}^{-1}$  となる。これに、RSI システムの標準的な CD ( $13,000\text{ [s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$ ) から RSI システムによる空間線量率の検出下限値を計算すると、約  $0.011\text{ }\mu\text{Sv/h}$  となる (Table 4-8)。

#### 4.8.2. 放射性 Cs の沈着量の検出下限値

放射性 Cs 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、機体の自己汚染) を差し引き求めている。放射性 Cs の沈着量の検出下限を求める上で、実際の測定データから、差し引くバックグラウンドを考慮し、各々の計数誤差の  $3\sigma$  を計算した。この数値を計数率の検出下限とし、RSI システムの標準的な CD ( $13,000\text{ [s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$ ) および  $\beta = 1\text{ (g/cm}^2)$  の場合の CF で空間線量率に換算する。実際のバックグラウンドの計数率の数値は、空間線量率の場合に用いた  $BG_{self}$  と  $BG_{cos}$  以外に  $BG_{nat}$  が含まれる。ここでは、バックグラウンド計数率を標準的な  $3,000\text{ s}^{-1}$  とし計算を行った。この条件を、式 [9] に当てはめると、 $767\text{ s}^{-1}$  となる。これに、標準的な CD ( $13,000\text{ [s}^{-1}]/[\mu\text{Sv/h}]$ ) を用いて空間線量率に換算する。さらに  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の比を第 15 次モニタリングの減衰補正日である 2020 年 10 月 2 日における  $0.053$  とし、 $\beta = 1$  における CF ( $^{134}\text{Cs}$ :  $5.33 \times 10^{-3}\text{ }[\mu\text{Sv/h}]/[\text{kBq/m}^2]$ ,  $^{137}\text{Cs}$ :  $2.08 \times 10^{-3}\text{ }[\mu\text{Sv/h}]/[\text{kBq/m}^2]$ ) を用いて、放射性 Cs の沈着量の検出下限値を求めた。なお、CF の単位を  $[(\mu\text{Gy/h})]/[\text{kBq/m}^2]$  から  $[(\mu\text{Sv/h})]/[\text{kBq/m}^2]$  に換算する際、 $\text{Gy} : \text{Sv} = 1 : 1.2$  とした。この結果、放射性 Cs の沈着量の検出下限値は、約  $26\text{ kBq/m}^2$  と評価できた (Table 4-8)。

Table 4-8 RSI システムの検出下限値

System	Limit of detection	
	Dose rate at 1m above the ground ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Radioactivity of deposition radiocesium ( $\text{kBq/m}^2$ )*
RSI	0.011	26

\* Total BG count:  $3,000 \text{ s}^{-1}$

Evaluated value at 2, Oct. 2020

#### 4.9. 不確かさ

本手法において、航空機モニタリングにより算出される空間線量率における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：Table 4-3 に示したように、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 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。
- ・ ラドン子孫核種の影響：日本においては、特に冬場に大陸由来のラドンの影響が知られている。これまでの測定の中でもラドンの影響を示唆するデータが取得されており、その詳細については 8 章に述べる。

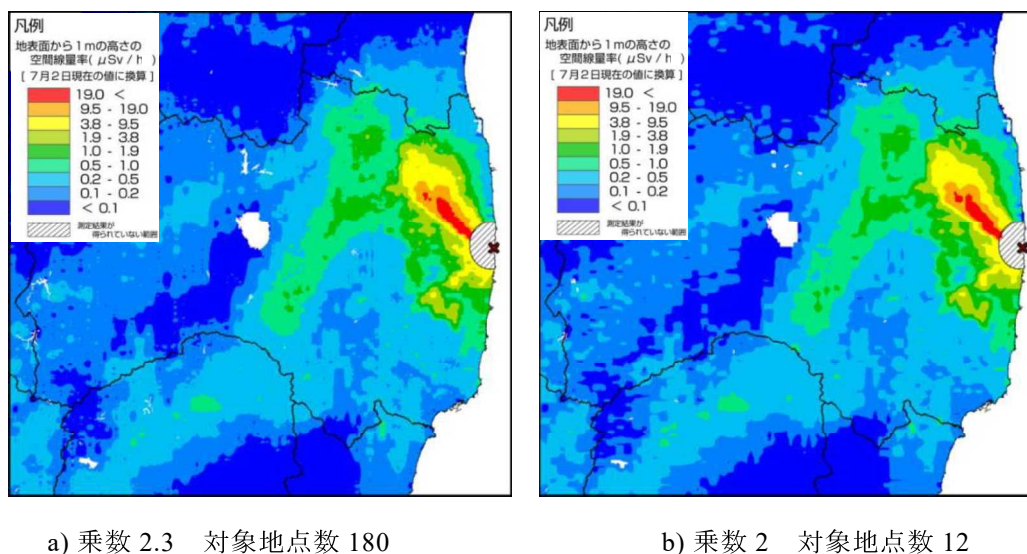
#### 4.10. マッピング

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>41)</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。本報告では、2011 年 4 月 6 日～29 日にかけて実施された第 1 次航空機モニタリングの解析を担当した DOE が用いた IDW を踏襲し、それ以後の解析を行った。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 [10] で表される<sup>42)</sup>。

$$\hat{z}_0 = \frac{\sum_{i=1}^s d_{NT}(p_0, p_i)^{-\lambda} z_i}{\sum_{i=1}^s d_{NT}(p_0, p_i)^{-\lambda}} \quad [10]$$

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RMSE(Root Mean Squared Error: 二乗平均平方根誤差)は0.208であった。Fig. 4-28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. 4-28のa)とb)を比べると、両者とも概ねの分布傾向は一緒であるが、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Fig. 4-4に示した通り、対地高度約300 mから測定を実施するが、ヘリコプター直下の地上を中心とする半径300 m円内における放射線量の平均値が測定される。空間線量率等のマッピングにおいては、地域基準メッシュ(1 km)をベースとしつつ、上記の測定範囲を考慮して250 mにメッシュサイズを決定した。



\*第3次航空機モニタリングの測定結果を使用

Fig. 4-28 IDWに入力するパラメータとマップの関係

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

#### 4.11. 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であつた航空機モニタリング測線下の地点を選定し、地上測定を行った。なお、航空機モニタリング測線と地上測定地点間の水平距離は概ね 50 m 以内である。Fig. 4-29 に、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示す。比較は散布図 (左) および地上測定値に対する航空機の換算結果と地上測定値の差の比 (相対誤差: (航空機の換算結果 - 地上測定値) / 地上測定値) のヒストグラム (右) で行った。散布図を見ると、測定結果の 97 % (全 350 点中、338 点) がファクター 0.5~2.0 の間に入り、地上の測定値と非常に良く整合した。相対誤差のヒストグラムは 0 以上 (航空機モニタリングの結果の方が高い) の領域に分布の偏りが見られるものの、ピークは 0 付近に位置しており、その中央値は 0 に近い値を示した。以上のことから両者はよく一致していると考えられる。

また、他の信頼のできる地上測定結果として、同時期に実施された規制庁と原子力機構が行っている、福島県内における NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ (日立製作所製 TCS-172B) を用いた地上測定値および可搬型 Ge 半導体検出器 (Canberra 製 Falcon 5000) を用いた  $^{137}\text{Cs}$  の沈着量の測定値<sup>39)</sup>と比較した。なお、可搬型 Ge 半導体検出器による測定結果の解析における緩衝深度 ( $\beta$ ) として 4.12 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) が設定されている。空間線量率の比較および可搬型 Ge 半導体検出器による放射性 Cs の沈着量の比較について、Fig. 4-30 および Fig. 4-31 にそれぞれ示す。いずれの測定結果においても散布図を見ると正の相関関係にあり、ファクター 0.5~2.0 を指標とすると、空間線量率においては 87 % (全 5,005 点中 4,373 点)、 $^{137}\text{Cs}$  沈着量においては 57 % (全 216 点中 123 点) が収まっており、概ね地上測定値を再現できていると思われる。一方、相対誤差のヒストグラムを詳細に見ると、空間線量率については、ピークは 0 付近に位置しているものの、0 以上 (航空機モニタリングの結果の方が高い) に分布が偏っている。これは、除染等により局所的に空間線量率の低くなった場所を航空機モニタリングの結果が追従できていないことが考えられる。可搬型 Ge 検出器による  $^{137}\text{Cs}$  沈着量測定結果との比較を見ると、空間線量率に比べて相対誤差のばらつきが大きく、-0.5 付近 (航空機モニタリングの方が 0.5 倍程度過小評価) にヒストグラムのピークがあり、2.0 以上 (航空機モニタリングの方が 3 倍以上過大評価) にも 10 %以上の頻度が確認できる。 $^{137}\text{Cs}$  の分布は空間線量率と異なり局所的なばらつきが大きいと考えられ、その状況が反映されていると考えられる。また、航空機のデータに関しては前述の通り森林域や道路の多い都市域の重量緩衝深度の推定が難しいため、測定範囲全域で  $\beta = 1$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) を一律に設定しており、その違いも影響していると考えられる。今後、このように地上値との比較をしつつ、より最適な線量率-放射能換算係数の設定値について検討していく必要がある。

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。実際には、測定される範囲は地上の半径 300 m 円内における放射線量の平均値となる。一方、地上測定による測定範囲は半径 30 m 程度の円の放射線量の平均値となる。よって、地上の放射線分布が一様の場所では整合し



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、建物や樹木に沈着している放射性物質が地上測定に影響する可能性がある。また、上空で測定する場合においては、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。

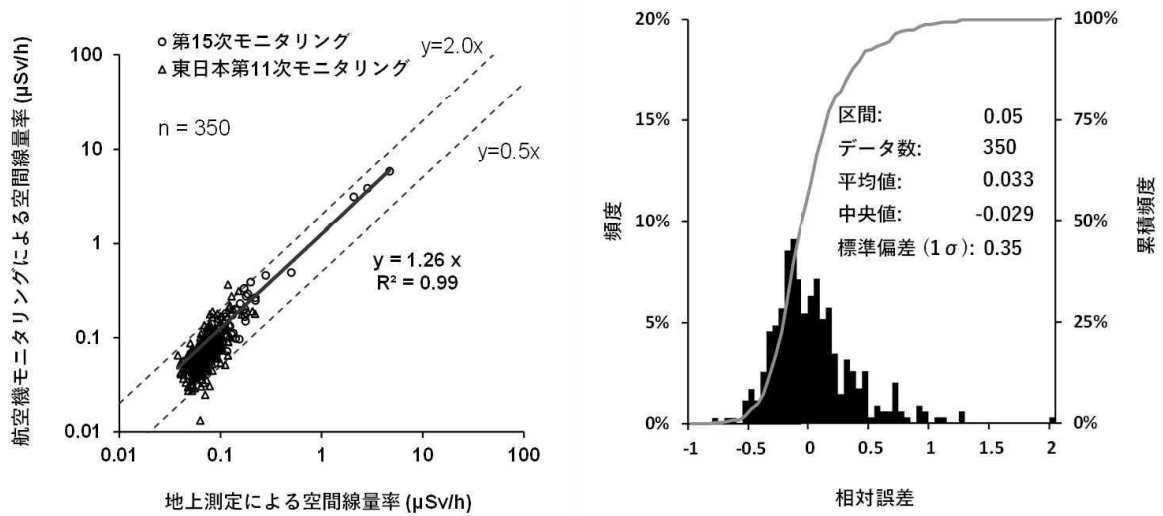


Fig. 4-29 地上の測線上における空間線量率測定値との比較  
(左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

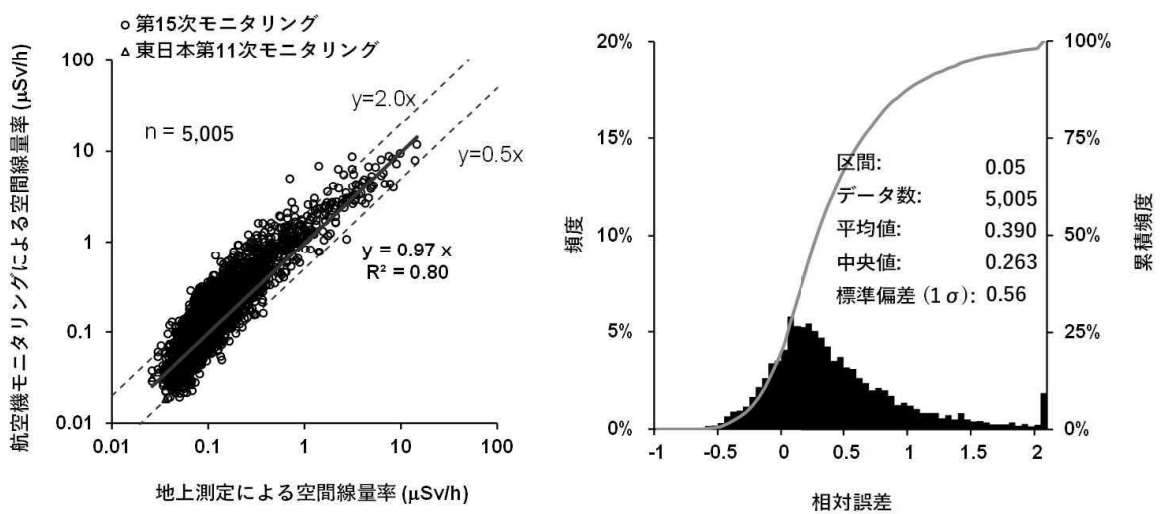


Fig. 4-30 地上のランダムな位置における空間線量率測定結果との比較  
(地上値：原子力規制庁事業<sup>39)</sup> 左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

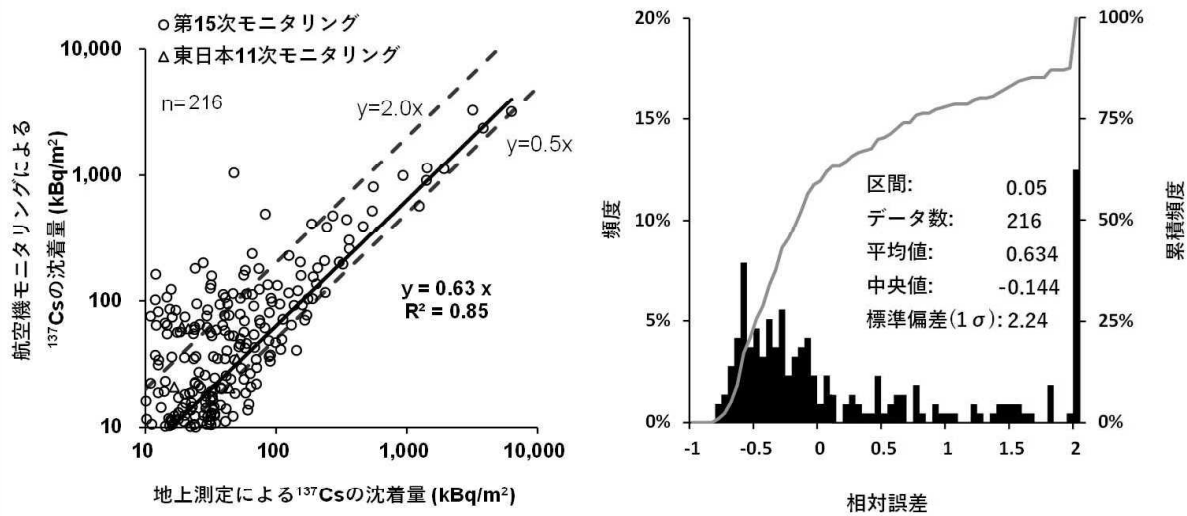


Fig. 4-31 地上における可搬型 Ge 検出器による測定値との比較  
(地上値：原子力規制庁事業<sup>39)</sup>左: 散布図、右: 相対誤差のヒストグラム)

#### 4.12. 天然放射性核種由来の空間線量率マップの作成

天然放射性核種由来の空間線量率マップの作成手法については 2014 年度に開発した<sup>22),43)</sup>。航空機モニタリングで使用している RSI システムは  $\gamma$  線のエネルギーを計測しているため、天然の放射線由来の空間線量率を放射性 Cs による空間線量率と弁別して計測が可能である。しかしながら、これまで、放射性 Cs の影響の大きな地域においては、 $^{40}\text{K}$  の放出する 1,461 keV のエネルギーピークの領域に、 $^{134}\text{Cs}$  の放出する 1,365 keV (放出率 3.0 %) が干渉するため、正確な評価が難しかった。今回、これらのピーク弁別に関数適合法を適用することによって、天然の放射線由来の空間線量率マップを作成した。

航空機モニタリングで使用している NaI シンチレータでは前述のように一定以上の放射性 Cs の影響のある地域では  $^{40}\text{K}$  のエネルギーを弁別することは難しい。Fig. 4-32 に典型的な  $\gamma$  線スペクトルの例を示す。このような、干渉したスペクトルを弁別する手法として関数適合法<sup>36)</sup>が考えられる。本手法は、ピークを関数でフィッティングし、干渉している部分の推定を行う手法である。実際には Fig. 4-32 のようにエネルギーピークを 2 つの Gauss 分布が干渉していると仮定した式 [11] を使用した。

$$S(i, j) = a + bE + c_i e^{-(E-E_i)^2/2\sigma_i^2} + c_j e^{-(E-E_j)^2/2\sigma_j^2} \quad [11]$$

ここで、 $S(i, j)$  は計数率、 $E$  は  $\gamma$  線エネルギー (keV)、 $E_i$  はピークエネルギー (keV)、 $\sigma^2$  はピークの分散 (keV)、 $a+bE$  はベースライン、 $c$  は正味のピーク計数率、 $i, j$  は複合ピークのそれぞれの核種である。ピークの平均エネルギーや分散はフライト中に変わらないと仮定し、予め平

均データから決定した。ここから、一般逆行列を用いて1秒ごとに a、b、c<sub>i</sub>、c<sub>j</sub> を求め、1,365 keV の <sup>134</sup>Cs が 1,400 keV 以上のエネルギーへ与える寄与割合から、<sup>134</sup>Cs 由来の 1,400 keV～2,800 keV に与える積算計数率 (C<sub>S1400</sub>) を算出した。

次に、地表面から 1 m の高さの空間線量率 (D<sub>nr</sub>) への換算に使用した評価式を式 [12] に示す。従来の航空機モニタリング手法で使用している換算式に、C<sub>S1400</sub> を除外するために必要な計数を追加した。

$$D_{nr} = (C_{1400} - BG_{1400} - C_{S1400}) \times I_{BG} \times \frac{HF_{1400}}{CD} \quad [12]$$

ここで、C<sub>1400</sub> は 1,400 keV～2,800 keV の積算計数率 (s<sup>-1</sup>)、BG<sub>1400</sub> は宇宙線生成物、C<sub>S1400</sub> は RSI システムの自己汚染およびラドン壊変生成物由来の 1,400 keV～2,800 keV の積算計数率 (s<sup>-1</sup>)、I<sub>BG</sub> は、放射性 Cs が沈着していない地域における全計数率と 1,400 keV～2,800 keV の積算計数率の比率 (BG-index)、HF<sub>1400</sub> は 1,400 keV～2,800 keV の積算計数率の高度補正係数、CD は空間線量率換算係数 ([s<sup>-1</sup>]/[μSv/h]) である。これらの係数は、計数率が比較的小さいので検出限界値を低くするために積算計数率に対し 21 点 (21 秒) の移動平均を使用した。ヘリコプターの平均移動速度を約 50 m/s とすると、平均した測定エリアは 1 km (50 m/s × 21 s ≒ 1,000 m) となる。HF<sub>1400</sub> については、過去のパラメータフライトの結果から、1,400 keV～2,800 keV に相当するチャンネルの積算計数率のフライト高度による変化を算出し、対地高度と計数率の関係式の傾きから求めた。本手法で使用した空気減弱係数および通常の航空機モニタリングで使用している、全エネルギー領域で算出した空気減弱係数を参考データとして Table 4-9 に示す。全エネルギー領域で求めた空気減弱係数と比較して、本手法において対象としている核種の平均 γ 線エネルギーが比較的大きいため、数値が小さくなっていることが分かる。CD については、各使用機体 (Bell 412 および Bell 430) において、2012 年度から 2020 年度までに求めた数値と地表面から 1 m の高さの空間線量率との関係を調べたところ、空間線量率依存性が特に認められなかったことから、Table 4-3 の数値を代表値として使用した。地上測定値と算出した CD の関係について Fig. 4-33 および Fig. 4-34 に示す。

4.3 節に記載した通り、CD の算出には地上測定値として NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータにより計測された地表面から 1 m の高さの空間線量率 (μSv/h) を用いている。空間放射線量の測定単位に Sv を用いている NaI(Tl)サーベイメータは通常、1 cm 線量当量 (周辺線量当量) で校正されているため、航空機モニタリングで算出される空間線量率は必然的に 1 cm 線量当量率 (周辺線量当量率) を意味することになる。しかしながら、本項で作成する空間線量率マップは環境放射線に起因する空間放射線量を表現したものであり、このようなマップでは通常、放射線量率の単位として空気吸収線量率 (μGy/h) が用いられるため、単位換算が必要となる。空気吸収線量 (または自由空気中空気カーマ) から 1 cm 線量当量 (周辺線量当量) への換算手法についてはモンテカルロ法を用いた計算による評価例<sup>44)</sup>や自然放射線の実測から算出した例<sup>45)</sup>がある。自然環境中における γ 線の実効的エネルギーが 0.5 MeV 付近であると仮定した場合、いずれの例においても空気吸収線量 (Gy) : 1 cm 線量当量 (Sv) は概ね 1 : 1.2 と評価さ

れている。以上のことから、式 [12] で求めた地表面から 1 m の高さの空間線量率 $D_{nr}$  ( $\mu\text{Sv/h}$ ) を 1.2 で除することにより、航空機モニタリングによる空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) を空気吸収線量率 ( $\mu\text{Gy/h}$ ) に変換して、天然核種由来の空間線量率マップを作成した。

福島原子力発電所周辺の放射性 Cs の寄与分を取り除いた天然放射線の分布と、取り除かれた放射性 Cs 由来の空間線量率マップを Fig. 4-35 に示す。Fig. 4-35 (左) に示した天然放射線由来のマップには Fig. 4-35 (右) に示したマップのような発電所から北西方向への分布が見られない。このことから、本手法により放射性 Cs の影響を減算できていると思われる。一方で、定量的な評価を行うため、福島県内における可搬型 Ge 半導体検出器による測定で得られた天然放射性核種の放射線量率<sup>39)</sup>と航空機モニタリングで評価した天然核種由来の空気吸収線量率を比較した結果を Fig. 4-36 に示す。可搬型 Ge 半導体検出器による測定では天然放射性核種として、 $^{40}\text{K}$  (1,461 keV)、ウラン系列では $^{214}\text{Pb}$  (352 keV) および $^{214}\text{Bi}$  (1,765 keV)、トリウム系列では $^{208}\text{Tl}$  (583 keV) および $^{228}\text{Ac}$  (911 keV) を評価対象としており、Fig. 4-36 にプロットされているのは上記核種に由来する空気吸収線量率 (空気カーマ率) の合計値である。散布図 (Fig. 4-36 (左)) を見てみると、ばらつきはあるものの、ファクター0.5~2.0に94% (全348点中328点) が収まった。相対誤差のヒストグラム (Fig. 4-36 (右)) における分布は0以上 (航空機モニタリングの結果の方が過大評価) の領域に僅かに偏りが見られるものの、0付近をピークとした分布を示した。以上から、2つの Gauss 分布を仮定した関数適合法により、一定の精度で放射性 Cs を弁別できると考えられる。

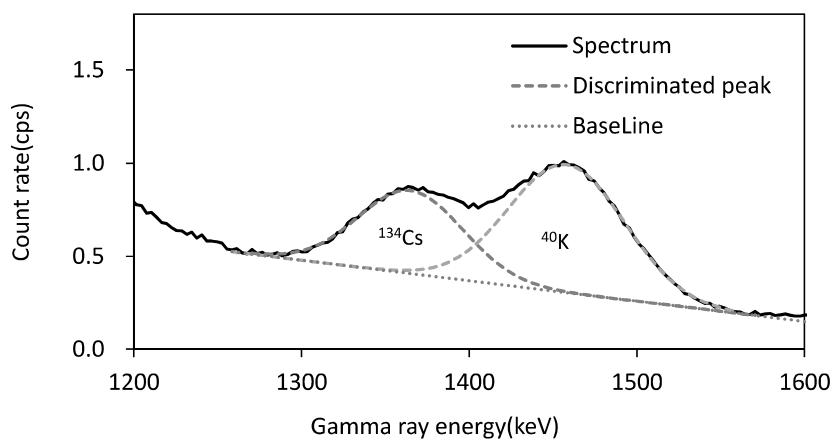


Fig. 4-32 関数適合法を用いた  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{40}\text{K}$  の弁別

Table 4-9 使用した減弱係数 ( $\text{m}^{-1}$ ) のまとめ  
(表中の SD は各パラメータの標準偏差 ( $1\sigma$ ) である。)

Energy range	Bell412		Bell430	
	Value $\pm$ SD( $1\sigma$ )	Number	Value $\pm$ SD( $1\sigma$ )	Number
1,400 - 2,800keV	-0.0058 $\pm$ 0.00080	11	-0.0060 $\pm$ 0.00102	8
30 - 2,800keV	-0.0072 $\pm$ 0.00042	21	-0.0072 $\pm$ 0.00040	35

※SD: 標準偏差

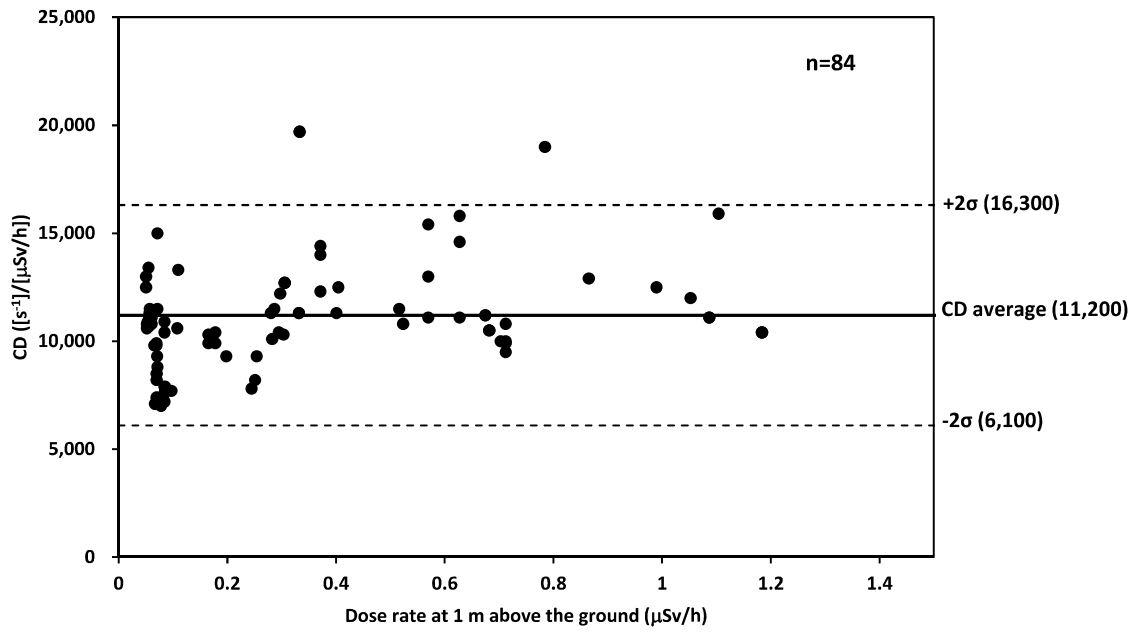


Fig. 4-33 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell 412)

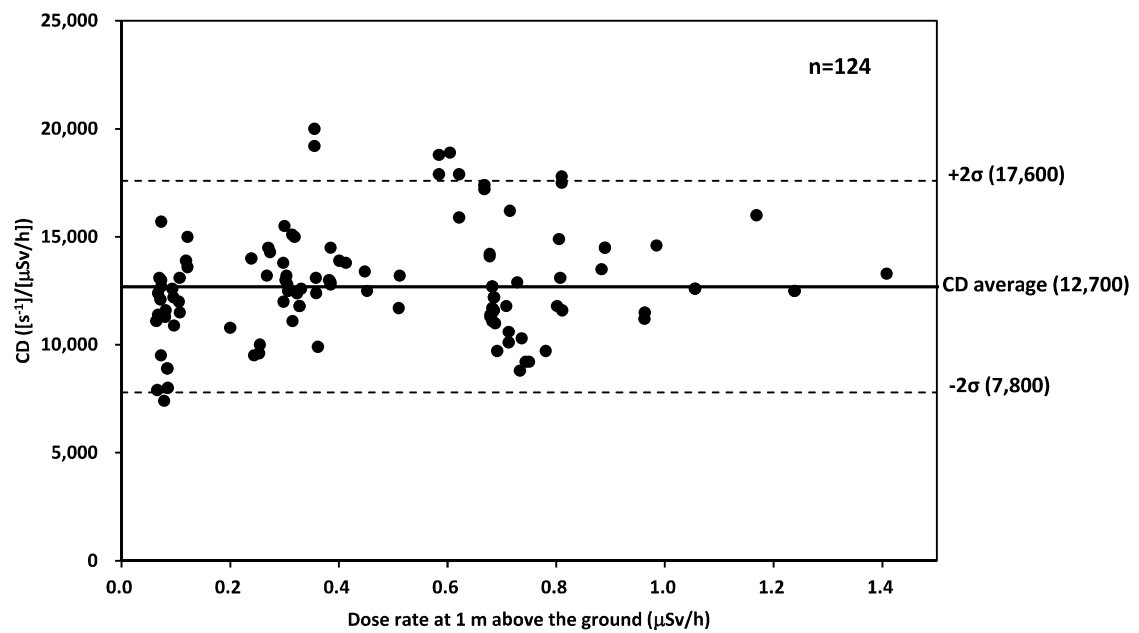
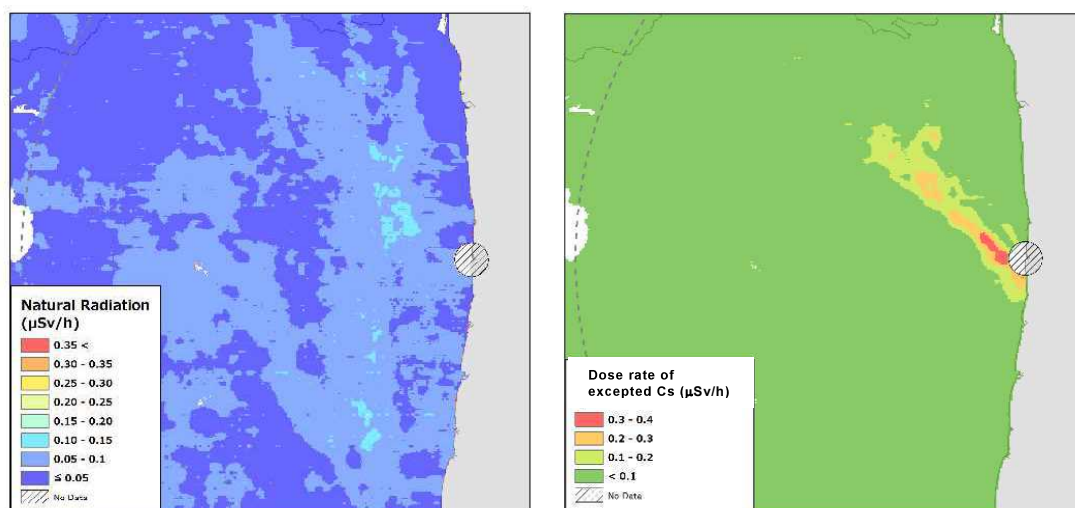


Fig. 4-34 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (CD) の関係 (Bell 430)



天然由来の空間線量率マップ

放射性 Cs 由来の空間線量率マップ

Fig. 4-35 福島原子力発電所周辺の天然の空間線量率マップの作成例  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

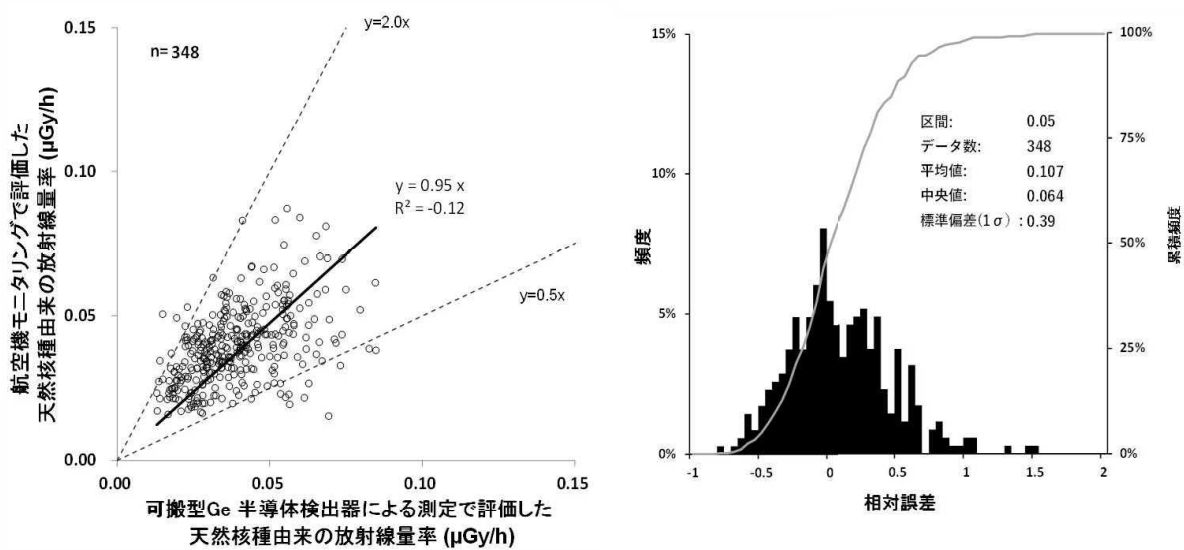


Fig. 4-36 航空機モニタリングによる天然核種由来の空間線量率と可搬型 Ge 半導体検出器で得られた天然核種由来の空間線量率の比較