

平成 29 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

平成 30 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、「平成 29 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)事業の成果をと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.....	15
4. データ取得および解析方法.....	18
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.....	18
4.2. データ取得方法.....	21
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.....	23
4.4. 解析のフロー.....	29
4.5. 空間線量率への換算方法.....	30
4.5.1. バックグラウンド (自己汚染および宇宙線).....	30
4.5.2. 高度補正.....	32
4.5.3. 空間線量率への換算.....	33
4.5.4. 空間線量率への換算方法.....	39
4.6. 放射性セシウムの沈着量への換算方法.....	39
4.6.1. 天然核種の弁別と放射性セシウム起源の計数率の算出.....	39
4.6.2. 空間線量率-放射能換算係数.....	41
4.7. 減衰補正.....	42
4.8. 検出下限値.....	43
4.8.1. 空間線量率の検出下限値.....	43
4.8.2. 放射性セシウムの沈着量の検出下限値.....	44
4.9. 不確かさ.....	44
4.10. マッピング.....	45
4.11. 地上における測定値との比較.....	46
4.12. 天然放射性核種由来の空間線量率マップの作成.....	49
5. モニタリング結果.....	53
5.1. 第12次モニタリング.....	53
5.2. 東日本第8次モニタリング.....	58
6. モニタリング結果の考察.....	69
6.1. 過去のモニタリング結果との比較.....	69
6.2. 土地利用による空間線量率の変化傾向の違い.....	77
7. 地形補正手法のシステム化.....	80

7.1.	背景.....	80
7.2.	地形影響評価システムの概要.....	80
7.3.	地形データ抽出.....	82
7.4.	PHITS 入力ファイル作成.....	83
7.5.	PHITS 出力データ抽出.....	85
7.6.	まとめ.....	86
8.	高精度GPSによる精度向上.....	87
8.1.	はじめに.....	87
8.2.	GPS 受信機の構成.....	87
8.3.	測定期間及びデータ取得実績.....	88
8.4.	解析方法.....	89
8.5.	RSI システム GPS と高精度 GPS の位置情報取得結果の比較.....	94
9.	ラドン除去手法のシステム化.....	98
9.1.	ラドン子孫核種.....	98
9.2.	ラドン弁別手法の理論.....	99
9.3.	パラメータ (GI および RI) の決定.....	101
9.4.	GI の高度補正方法.....	103
9.5.	80 km 圏外データへの適用.....	104
9.6.	従来手法の評価.....	109
10.	今後の課題.....	112
11.	まとめ.....	113
	謝辞.....	113
	参考文献.....	113

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	24
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	31
Table 4-3 使用したパラメータのまとめ	33
Table 4-4 2017 年度に取得した AF データ一覧	33
Table 4-5 2017 年度に取得した CD データ一覧	38
Table 4-6 BG-index 一覧	41
Table 4-7 RSI システムの検出下限値	44
Table 4-8 使用した減弱係数 (m^{-1}) のまとめ	50
Table 6-1 森林部および市街地部における空間線量率の比較	79
Table 8-1 使用した受信機の比較	87
Table 8-2 宇宙線寄与係数一覧	91
Table 8-3 高度補正係数 (AF) 一覧	91
Table 8-4 線量率換算係数 (CD) 一覧	92
Table 9-1 ラドン子孫核種の放出する γ 線	99

Figure list

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績.....	7
Fig. 3-1 RSI システムのブロック図	10
Fig. 3-2 RSI システムの写真	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.....	14
Fig. 3-5 RSI システムの半値幅および Gain の変動 (RSI 1).....	16
Fig. 3-6 RSI システムの半値幅および Gain の変動 (RSI 2).....	17
Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係	19
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..	19
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	20
Fig. 4-4 上空からの測定イメージ	20
Fig. 4-5 フライトイメージ.....	21
Fig. 4-6 予定したフライトの測線	22
Fig. 4-7 テストラインフライトのイメージ.....	25
Fig. 4-8 テストラインの場所	25
Fig. 4-9 テストポイントフライトのイメージ	26
Fig. 4-10 テストポイントの場所.....	27
Fig. 4-11 宇宙線フライトのイメージ.....	28
Fig. 4-12 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ	28
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	28
Fig. 4-14 解析のフロー	29
Fig. 4-15 RSI システムにおける地上で取得した γ 線スペクトルと海上でのスペクトル例	31
Fig. 4-16 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例	31
Fig. 4-17 対地高度と計数率の関係例.....	32
Fig. 4-18 地上測定データ	35
Fig. 4-19 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.....	37
Fig. 4-20 放射性セシウムの計数率の算出イメージ	40
Fig. 4-21 BG-index の算出例	40
Fig. 4-22 重量緩衝深度と空間線量率・放射能換算係数の関係.....	42
Fig. 4-23 IDW に入力するパラメータとマップの関係.....	46
Fig. 4-24 地上の測線上における空間線量率測定結果との比較	48
Fig. 4-25 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	48
Fig. 4-26 地上における in-situ Ge 測定結果との比較	48
Fig. 4-27 関数適合法を用いた ^{134}Cs と ^{40}K の弁別	50
Fig. 4-28 テストポイントの地上の空間線量率と空間線量率換算係数 (CD) の関係.....	51
Fig. 4-29 福島第一原子力発電所周辺の天然の空間線量率マップの作成例	51

Fig. 4-30 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 in-situ Ge 半導体検出器で得られた天然核種由来の放射空間線量率の比較.....	52
Fig. 5-1 第 12 次モニタリングにおける空間線量率マップ	54
Fig. 5-2 第 12 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	55
Fig. 5-3 第 12 次モニタリングにおける ^{137}Cs 沈着量マップ	56
Fig. 5-4 第 12 次モニタリングにおける ^{134}Cs 沈着量マップ	57
Fig. 5-5 東日本第 8 次モニタリングにおける空間線量率マップ	59
Fig. 5-6 東日本第 8 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ.....	60
Fig. 5-7 東日本第 8 次モニタリングにおける ^{137}Cs 沈着量マップ.....	61
Fig. 5-8 東日本第 8 次モニタリングにおける ^{134}Cs 沈着量マップ.....	62
Fig. 5-9 東日本第 8 次モニタリングと第 12 次モニタリングにおける空間線量率マップ.....	63
Fig. 5-10 東日本第 8 次モニタリングと第 12 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	64
Fig. 5-11 東日本第 8 次モニタリングと第 12 次モニタリングにおける ^{137}Cs 沈着量マップ.....	65
Fig. 5-12 東日本第 8 次モニタリングと第 12 次モニタリングにおける ^{134}Cs 沈着量マップ.....	66
Fig. 5-13 東日本第 8 次モニタリングと第 12 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	67
Fig. 5-14 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.....	68
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	71
Fig. 6-2 発電所から 80km 圏内における第 4 次モニタリングおよび第 12 次モニタリングの空間線量率測定結果の比較	73
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 12 次モニタリングの空間線量率	74
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 12 次モニタリングの放射性セシウム	74
Fig. 6-5 航空機モニタリングによる旧避難指示区域内の空間線量率の変化傾向.....	75
Fig. 6-6 航空機モニタリングによる旧避難指示区域内の ^{137}Cs 沈着量の変化傾向.....	75
Fig. 6-7 事故からの経過日数と重量緩衝深度の関係.....	76
Fig. 6-8 発電所から 80km 圏内における土地利用図.....	78
Fig. 6-9 森林部および市街地における減衰率の比較.....	79
Fig. 7-1 システム全体のフロー	81
Fig. 7-2 地形データ抽出 GUI	82
Fig. 7-3 DEM データの抽出結果	83
Fig. 7-4 PHITS 入力ファイル作成 GUI	84
Fig. 7-5 PHITS 上の計算体系	84
Fig. 7-6 DEM を変換して得られる TIN 及び三角ポリゴン	85
Fig. 7-7 三角ポリゴン頂点座標の出力例	85
Fig. 7-8 PHITS 出力データ抽出 GUI.....	86
Fig. 8-1 GPS の接続図と外観.....	88

Fig. 8-2 データマッチングのフロー図	88
Fig. 8-3 高精度 GPS による航跡図（測線上のみ）	89
Fig. 8-4 2017/11/10 宇宙線フライトにおける RSI 内蔵型 GPS データの異常	93
Fig. 8-5 高精度 GPS データを用いた空間線量率マップと比画像	95
Fig. 8-6 RSI 由来の位置情報で解析した空間線量率と高精度 GPS 由来の位置情報で解析した空間 線量率の比較	96
Fig. 8-7 微地形図と線量の比の重ね合わせ図	96
Fig. 8-8 測線フライト中の飛行高度、DEM、PDOP の確認図	97
Fig. 8-9 飛行中の GPS 衛星受信状況のイメージ	97
Fig. 9-1 ウラン系列およびトリウム系列	98
Fig. 9-2 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	100
Fig. 9-3 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	101
Fig. 9-4 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	102
Fig. 9-5 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	102
Fig. 9-6 計算体系のイメージ	103
Fig. 9-7 計算体系のベンチマーク	104
Fig. 9-8 シミュレーションによる測定高度と GI の関係	104
Fig. 9-9 ラドン影響弁別手法適用後の東日本 8 次の空間線量率マップ	106
Fig. 9-10 東日本 8 次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	107
Fig. 9-11 ラドン影響弁別後の地上測定データとの比較（東日本 8 次）	108
Fig. 9-12 従来手法とラドン弁別手法の比較	110
Fig. 9-13 Rn 影響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と同日にフライ トしたデータにラドン弁別手法を適用し求めたラドン子孫核種の計数率の平均値の比較	111

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事故(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。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が所有されており、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^{2,3)}。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⁴⁾。

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(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 γ 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^{5,6)}。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⁷⁾。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⁸⁾。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指針⁹⁾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と文部科学省により開始された^{10,12)}。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行ってきた。特に、地上高さ1mにおける空間線量率や放射性セシウムの沈着量等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、最適化を行ってきた。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や地上の線量に換算するパラメータの設定には、試行錯誤を重ねてきた^{13,14)}。福島原子力発電所事故後に行った航空機モニタリングは、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結果であり、作成した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¹⁵⁾。さらに、高度な解析例として、鳥居ら^{16,17)}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 γ 線スペクトルをコベル法により再解析し、得られた ^{131}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東京電力福島第一原子力発電所（以下、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}I や放射性セシウム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¹⁸⁾。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7年以上経過した現在では、放射性物質の環境中における移行状況の解明が必要となっており、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、文部科学省事業であったが、2013年度に原子力規制庁（以下、規制庁）に移管されて定期的実施されており、その結果は規制庁のHPで随時公開されている¹⁹⁾。

ここでは、2017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更なる高精度化を目的とし、地形補正手法についてシステム化し、補正前後での精度変化について考察を加えた。また、昨年度に構築した大気中のラドンとの弁別手法のシステムを用いて線量率マップの作成を試みた。

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日に文部科学省（以下、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²⁰⁾」に則り、2011年4月6日からDOEと文科省（測定：NUSTEC）により「第1次モニタリング」として発電所から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80-100 km 圏を実施した。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、発電所から80 km 圏内を実施した。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、発電所から80km 圏内を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（ $0.2\mu\text{Sv/h}$ 以上）で発電所から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11月2日から「第5次モニタリング」、「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、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（ $0.2\mu\text{Sv/h}$ 以上）で発電所から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。平成25年度の結果については、眞田ら(2014)²¹⁾に詳しく報告されている。

2014年度（平成26年度）は、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。平成26年度の結果については、眞田ら(2015)²²⁾に詳しく報告されている。

2015年度（平成27年度）については、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、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、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。平成 27 年度の結果については、眞田ら(2016)²³⁾ に詳しく報告されている。

2016 年度（平成 28 年度）については、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、関西電力大飯原子力発電および高浜原子力発電所周辺ならびに四国電力伊方原子力発電所周辺のモニタリングを実施した。平成 28 年度の結果については、眞田ら(2017)²⁴⁾ に詳しく報告されている。

2017 年度（平成 29 年度）については、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ならびに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。このように、これまで本事業では、日本全域の汚染分布全体像を示すとともに、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。

これらの定常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的に解析できる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 (DEM: Digital Elevation Model) 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、発電所から 80 km 圏内の谷や山地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、取得される γ 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、今まで弁別が難しかった ^{134}Cs 起源の 1,365 keV と ^{40}K 起源の 1,461 keV を弁別する手法を開発した。本手法は、原子力発電所事故直後等の複数の γ 線放出核種の評価等に適用可能である。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 (LaBr₃: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の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、80 km 圏外のデータに適用した。また、2015 年度には、積雪の前後において、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²⁵⁾。この手法は、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る。2016 年には、近年、精度が向上している最新のグローバル測位衛星システム（以下、GNSS）を

用いて航空機モニタリングデータの取得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、地上の空間線量率への換算に与える位置情報の精度について評価した。

今年度は、Ishizaki et al. (2017)²⁶⁾ が開発した地形の勾配を詳細に補正する手法を広い範囲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。

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯

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	発電所から80km圏内	DOE: 60 km圏内 NUSTEC: 60-80 km圏内	DOE	2011/4/6~4/29	2011/5/6
第2次モニタリング	発電所から80-100 km圏内	NUSTEC	NUSTEC	2011/5/18~5/26	2011/6/16
第3次モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA, NUSTEC: 40 km圏内 NUSTEC: 40-80 km圏内	JAEA, NUSTEC	2011/5/31~7/2	2011/7/8
東日本第1次モニタリング	青森一福井までの東日本 (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	発電所から80km圏内	JAEA, NUSTEC: 40 km圏内 NUSTEC: 40-80 km圏内	JAEA, NUSTEC	2011/10/22~11/5	2011/12/16
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 μ Sv/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	発電所から80km圏内	JCAC(OYO)	JCAC(NUSTEC)	2012/6/22~6/28	2012/9/28
第6次モニタリング	発電所から80km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 μ Sv/h以上)	NUSTEC	JAEA	2012/10/31~12/28	2013/3/1
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	発電所から80km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 μ Sv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2013/9/3~11/4	2014/3/7
第8次モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2013/11/2~11/19	2014/3/7
第9次モニタリング	発電所から80km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 μ Sv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2014/9/21~11/7	2015/2/13
第10次モニタリング	発電所から80km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 μ Sv/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80km圏内	JAEA	JAEA	2016/2/1~2/7	-
H28_BGモニタリング(1)	大飯・高浜発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2016/7/20~8/1	-
第11次モニタリング	発電所から80km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 μ Sv/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80km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80km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80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2017/7/26~8/10 2017/9/30~10/11	-
第12次モニタリング	発電所から80km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 μ Sv/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80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA	2017/11/28~12/5	-

DOE: 米国エネルギー省、JAEA:(国研)日本原子力研究開発機構、NUSTEC:(公財)原子力安全技術センター
OYO: 応用地質株式会社、JCAC:(公財)日本分析センター

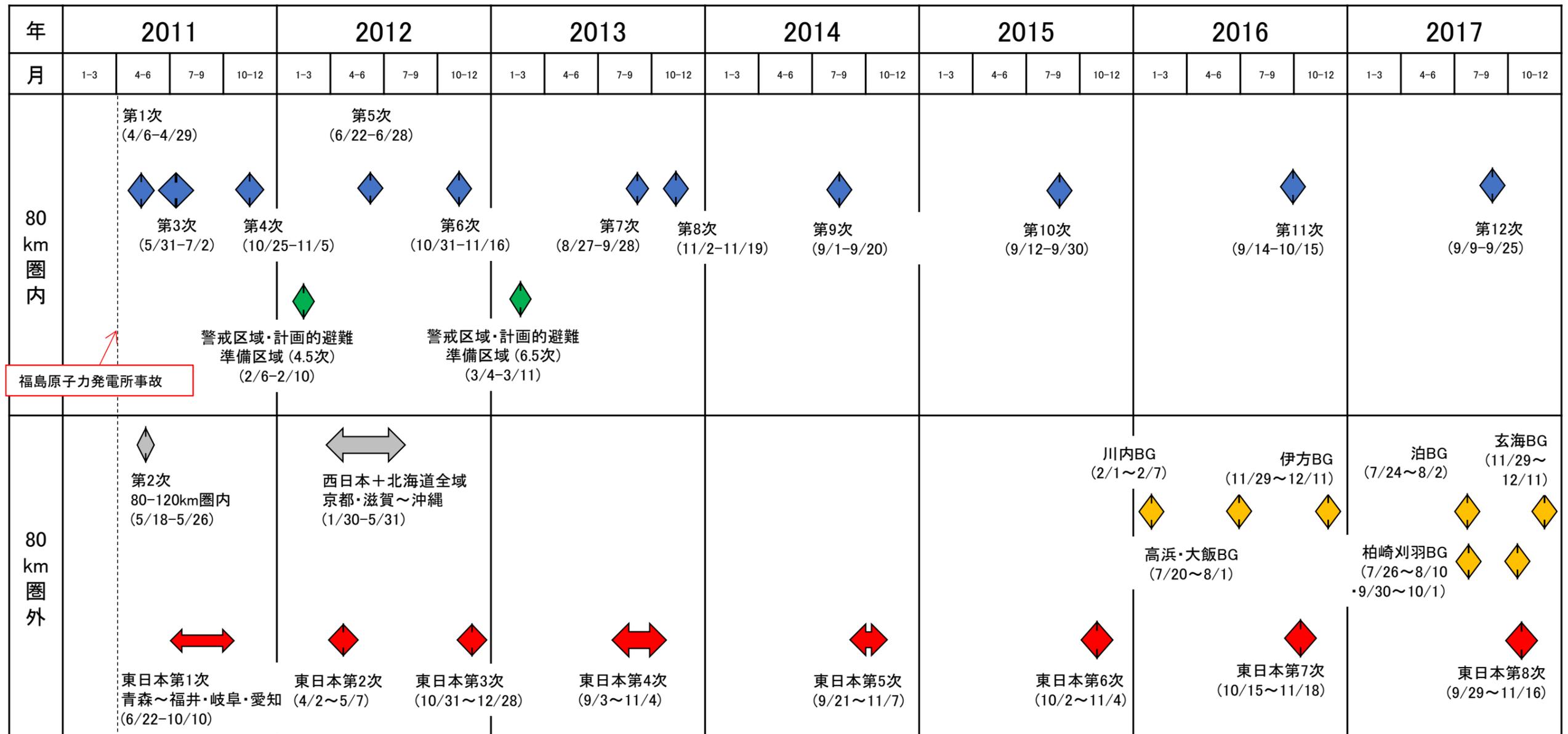


Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績

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	前年度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。
	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。
2013 (H25)	地形の影響調査	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。
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	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 ^{134}Cs 起源の 1,365 keV と ^{40}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。
	フライト高度による測定精度の評価	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。
2015 (H27)	空気中ラドン子孫核種減算用検出器の導入	空気中ラドン子孫核種の影響を評価するための $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 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。
	積雪の影響評価手法の開発	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。
2016 (H28)	空気中ラドン子孫核種減算システム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、80 km 圏外のデータに適用した。
	GPS の精度評価	近年、精度が向上している最新の GNSS を用いて航空機モニタリングデータの取得と同時にデータを取得し、既存の GPS の性能を比較評価するとともに、地上の空間線量率への換算に与える位置情報の精度について評価した。
2017 (H29)	地形補正手法の高度化	Ishizaki et al. (2017) ²⁶⁾ が開発した地形の勾配を詳細に補正する手法を広い範囲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。

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システム (以下、RSI システム) は、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、Radiation Solution Inc. (RSI, Canada) 製の機内に装着するタイプである。RSI システムのブロック図を Fig. 3-1 に示し、外観を Fig. 3-2 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 (検出器容量合計: 12.6 L)。検出器で計測した 1,024 ch の γ 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、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 γ 線の計数率情報をリアルタイムに確認できる。また、全体は外付けのバッテリーで駆動し、完全充電で 5 時間の稼働が可能である。以下、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、それぞれ RSI 1 および RSI 2 と区別する。

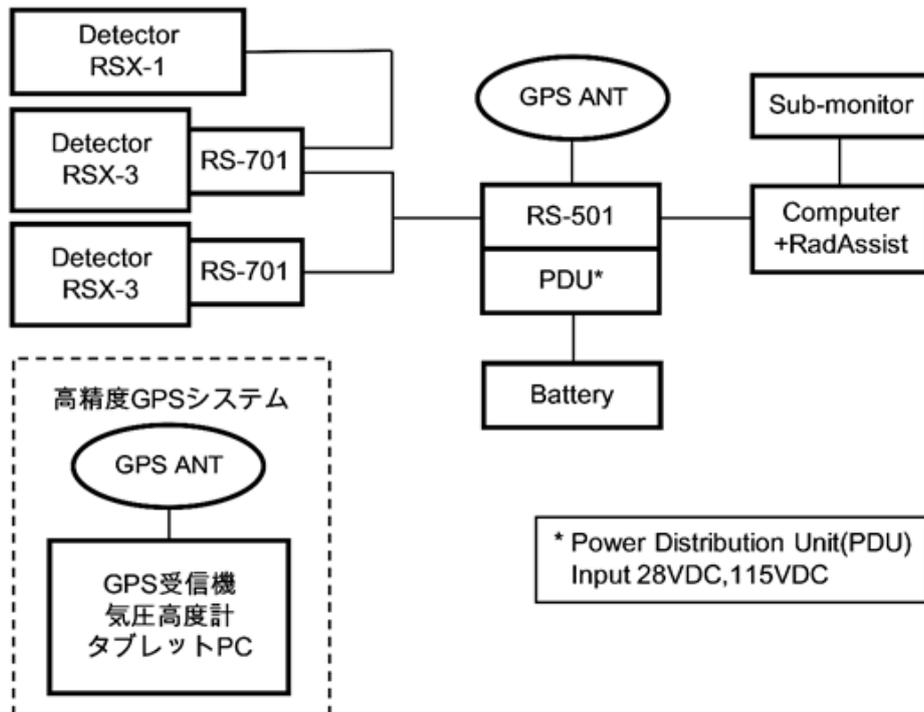


Fig. 3-1 RSI システムのブロック図

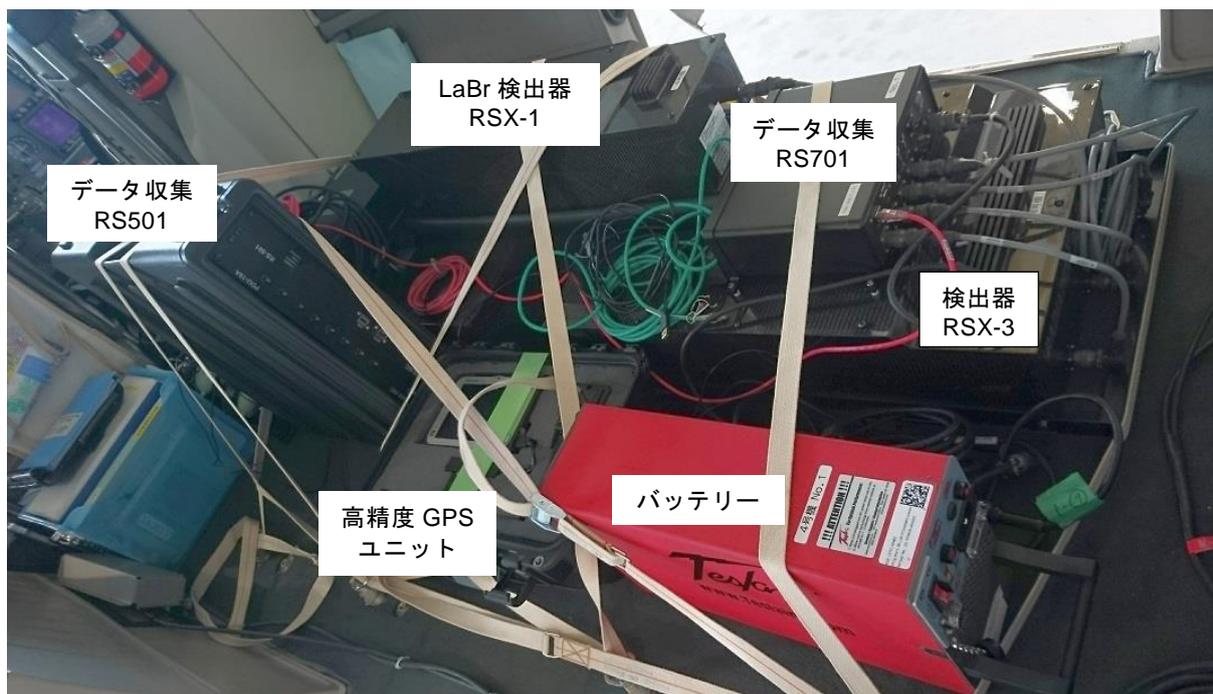


Fig. 3-2 RSI システムの写真

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。今年度は、機体繰りの都合から、Bell 430、Bell 412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 (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4次モニタリング	2013/9/3～11/4	Bell 430 (JA6900)	AAC	Bell 430 (JA05TV)	NNK		
			Bell 412 (JA6767)	NNK				
	第8次航空機モニタリング	2013/11/2～11/19	Bell 430 (JA6900)	AAC	Bell 430 (JA05TV)	NNK		
2014	第9次航空機モニタリング	2014/9/1～9/20	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6928)	AAC		
	東日本5次モニタリング	2014/9/21～11/7	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6767)	NNK		
					Bell412 (JA6928)	AAC		
2015	第10次航空機モニタリング	2015/9/12～9/30	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6928)	AAC		
	東日本6次モニタリング	2015/10/2～11/4	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6767)	NNK		
					Bell412 (JA6928)	AAC		
		川内原発BGモニタリング	2016/2/1～2/7			Bell412 (JA6928)	AAC	
	大飯・高浜原発BGモニタリング	2016/7/20～8/1			Bell412 (JA9584)	AAC		
2016	第11次航空機モニタリング	2016/9/14～10/15	Bell430 (JA05TV)	NNK	S76 (JA6901)	AAC		
	東日本7次モニタリング	2016/10/15～11/18	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6767)	NNK		
					Bell412 (JA9616)	AAC		
		伊方原発BGモニタリング	2016/11/29～12/11			Bell430 (JA05TV)	NNK	
2017	泊原発BGモニタリング	2017/7/24～8/2			Bell412 (JA6767)	NNK		
	柏崎刈羽原発BGモニタリング	2017/7/26～8/10 2017/9/30～10/1					Bell430 (JA05TV)	NNK
	第12次航空機モニタリング	2017/9/9～9/25	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA9616)	AAC		
	東日本8次モニタリング	2017/9/29～11/16	Bell430 (JA05TV)	NNK	Bell412 (JA6767)	NNK		
					Bell412 (JA9616)	AAC		
	玄海原発BGモニタリング	2017/11/28～12/5			S76(JA6655)	AAC		

()内は機体登録番号

AAC: 朝日航洋所有
NNK: 中日本航空所有

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}Cs : 10 MBq) を用いて検出器の計数する計数率を相互比較した。比較結果を Table 3-2 に示す。線源は、検出器からの距離を固定し (50 cm)、1 分間の計数率で比較した。RSI システムと線源位置の関係について Fig. 3-4 に示す。

今回使用した機体では、Bell 412 (JA6767) の計数率が 14 %ほど高かったが、これは Bell 412 と Bell 430 の機体底部の構造の違いによるものと考えられる。機体間の線源試験と比較して高低差があるものの 15 %以内に収まっていたため、機体内の検出器の配置位置は妥当であると判断できる。このように機体の違いや機体が同一であっても、検出器を配置する位置によって若干遮蔽状況は変わると考えられる。今後も今回のような線源試験を実施し、配置位置を決めるのがよい。なお、この遮蔽状況の違いは、地上値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 位置に線源を配置)

No	System	ヘリコプター	(2017)計数率 at 50 cm	No.1を1に 規格化
1	RSI-1	Bell430 (JA05TV) NNK	215,500	1.00
2	RSI-2	Bell412 (JA9616) AAC	233,000	1.08
3	RSI-2	Bell412 (JA6767) NNK	246,000	1.14
4	RSI-2	Bell412 (JA6928) AAC	227,000	1.05

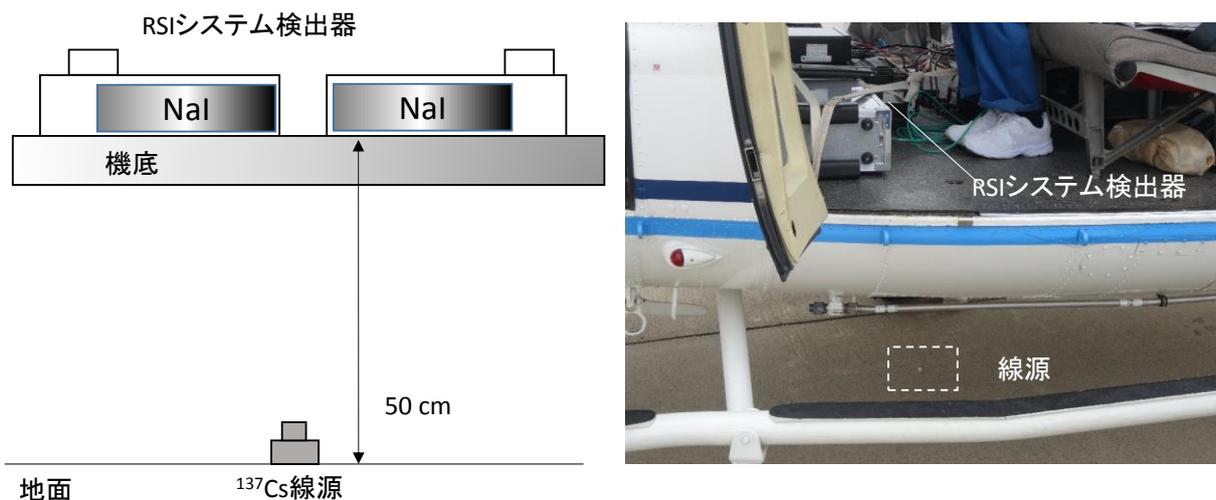


Fig. 3-4 線源試験イメージ

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、フライト前の1日1回、以下の事項を確認した。

- ・RSI システムの接続チェック：データ収集装置 (RS701 および RS501) に表示されるエラーランプチェック
- ・チェックプログラムによる検出器の特性確認（環境中に存在する ^{208}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 FWHM 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。福島およびその周辺県で行ったモニタリング時における FWHM 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。ピークの FWHM については、概ね 6% 以下を推移していることが分かる。また、アンプのゲインは測定日と緩やかな上昇傾向にある。これは、機器の異常ではなく、光電子増倍管の温度特性を反映し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。

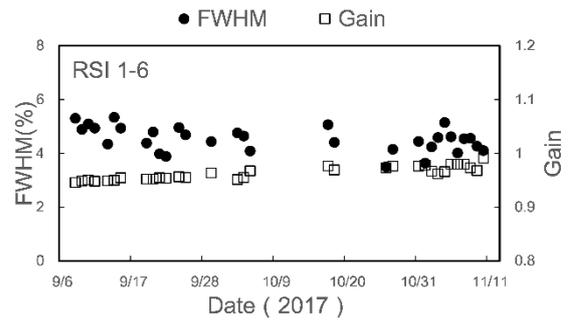
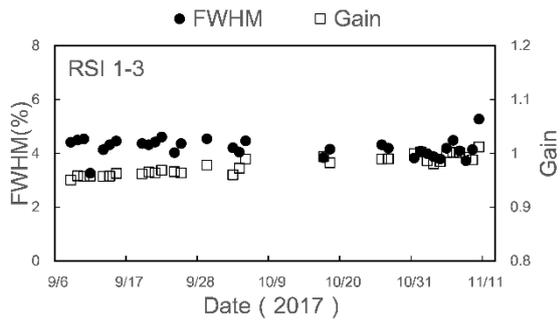
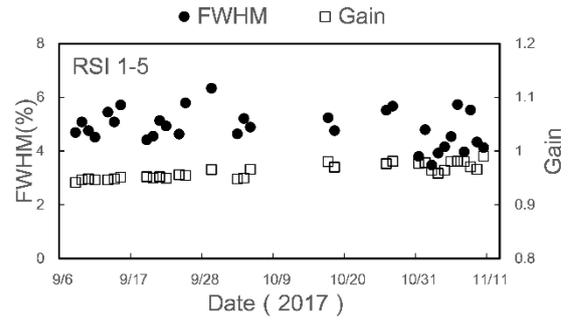
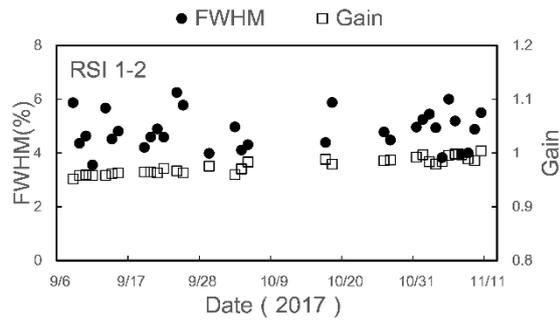
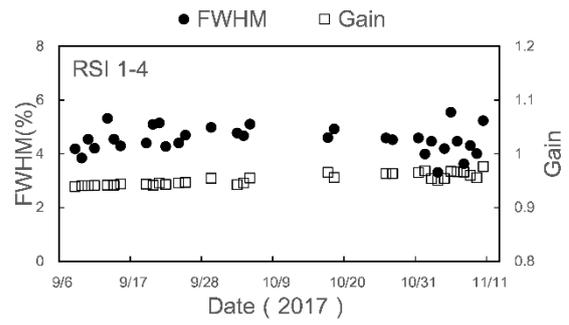
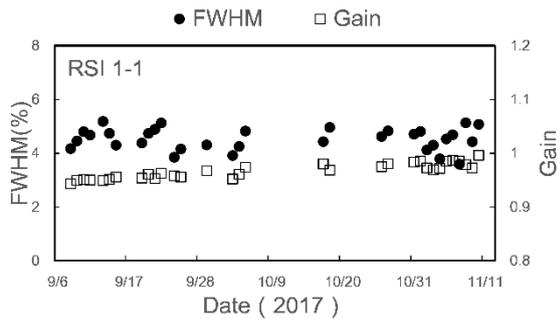


Fig. 3-5 RSI システムの半値幅および Gain の変動 (RSI 1)

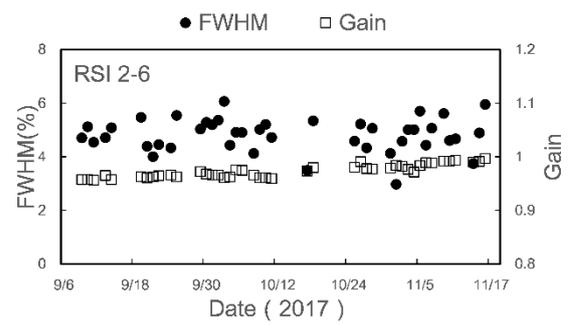
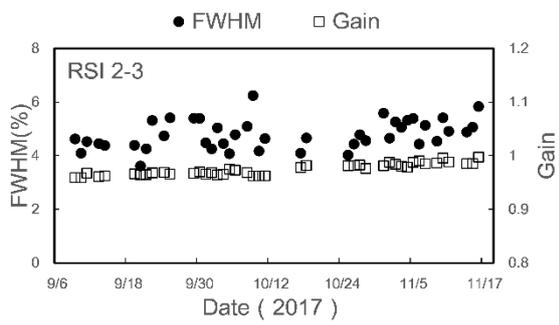
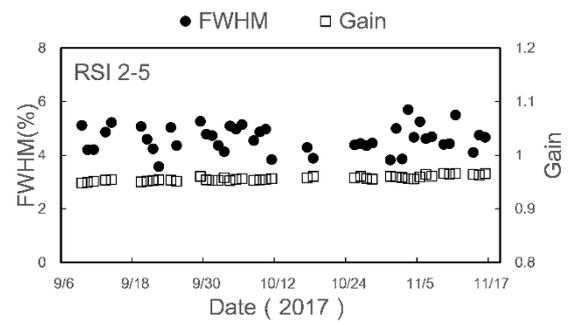
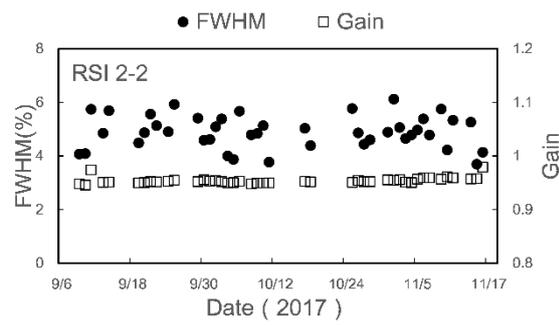
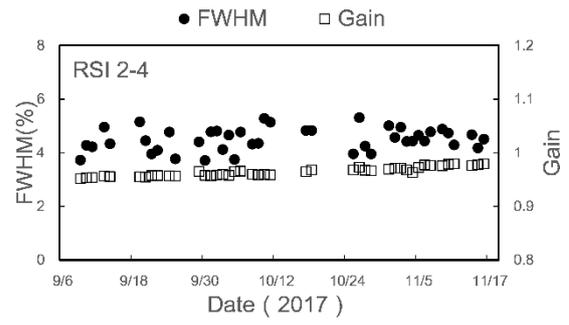
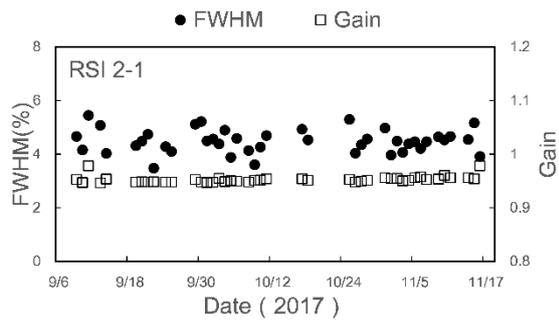


Fig. 3-6 RSI システムの半値幅および Gain の変動 (RSI 2)

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ける上空で測定されている計数値を考察するため、 γ 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}Cs と ^{137}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わかる。一方、50 m 以下では、指数の関係から外れる。これは、50 m 以上では地表面からの放射線が検出器に対し平行入射に近いと、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、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 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¹³⁾。次に、地上に無限平板の ^{137}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、100、300 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、300、500 m の場合で比較した。高度 300 m の場合を見ると、100~200 m の位置が 30 % で最も割合が大きく、0~100 m および 200~300 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 300 m 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が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 を目安とし対地高度 150 m から 600 m までのデータを使用した。なお、この対地高度の逸脱が 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。

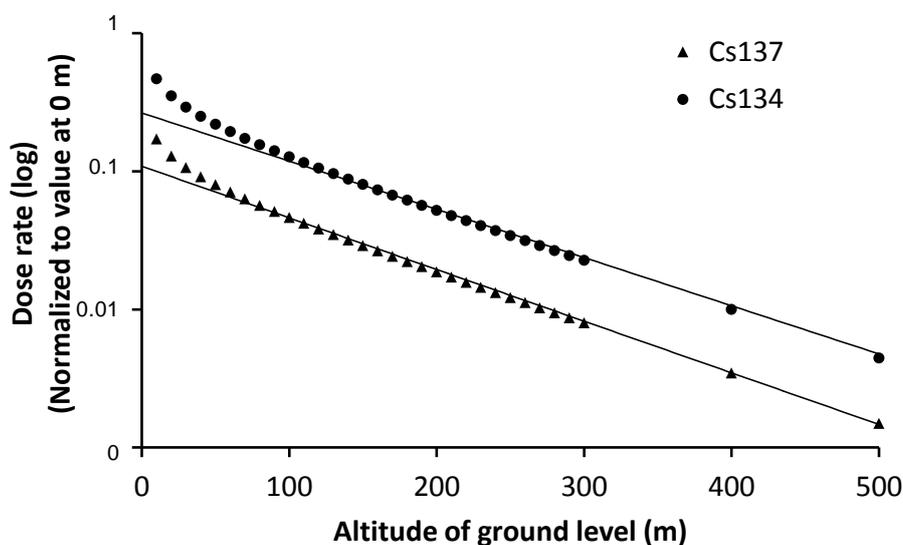


Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係
(半径 2,000 m × 高さ 1 mm の円柱線源で計算、縦軸は対数目盛)

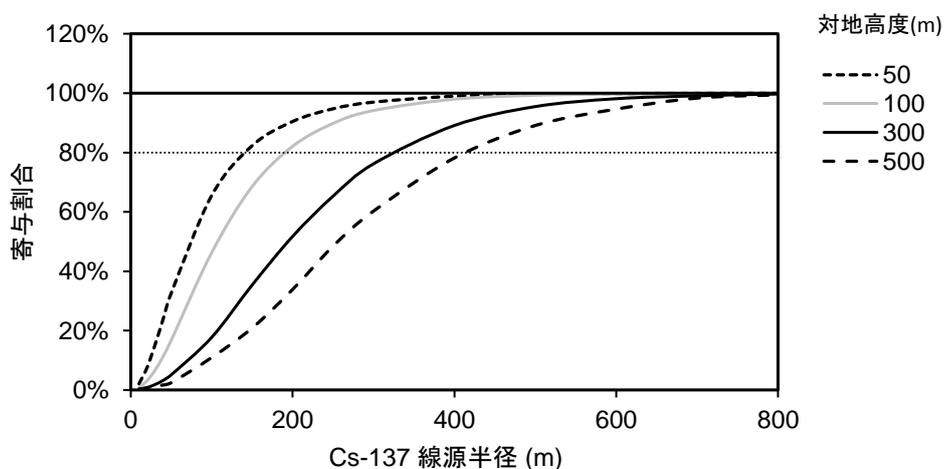


Fig. 4-2 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の積算計数に対する線源位置の関係
(上空での検出器の計数率を 100% に規格化し、線源半径由来の計数率の割合を積算)

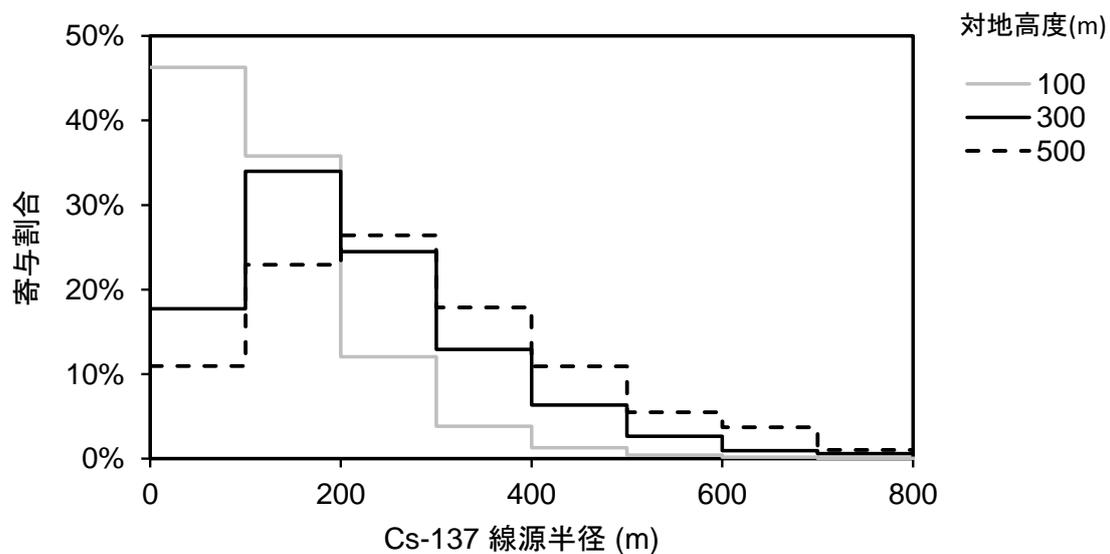


Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の線源位置ごとの計数の割合
 (上空での検出器の計数率を 100 % に規格化し、100 m ごとのドーナツ状の部分由来の計数率の割合)

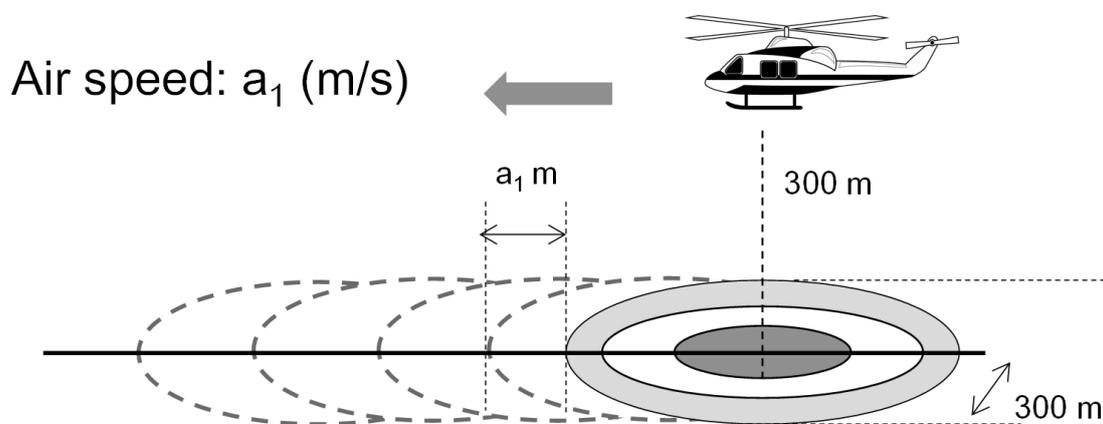


Fig. 4-4 上空からの測定イメージ

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 γ 線のスペクトルを記録した。フライトの予定測線について Fig. 4-6 に示す。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：160～185 km/h (=86～100 knot)
- 対地高度：300 m (=1,000 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（平成 23 年 9 月 30 日時点における避難指示区域：以下、旧避難指示区域と表記）
 - 0.9 km：0.2 μ Sv/h 以上の地域
 - 1.8 km：その他の地域
 - 80 km 圏外
 - 1.0 km：0.2 μ Sv/h 以上の地域
 - 3.0 km：その他の地域
- フライトに要した期間
 - 第 12 次：平成 29 年 9 月 9 日～9 月 25 日（のべ 49 フライト）
 - 東日本第 8 次：平成 29 年 9 月 29 日～11 月 16 日（のべ 85 フライト）

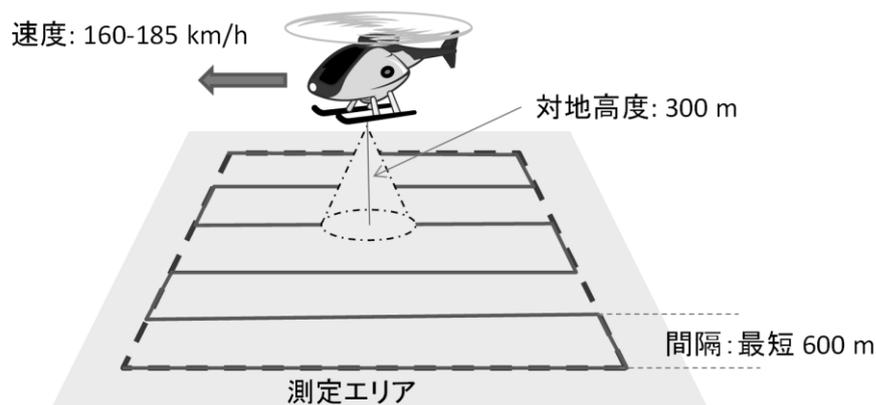


Fig. 4-5 フライトイメージ

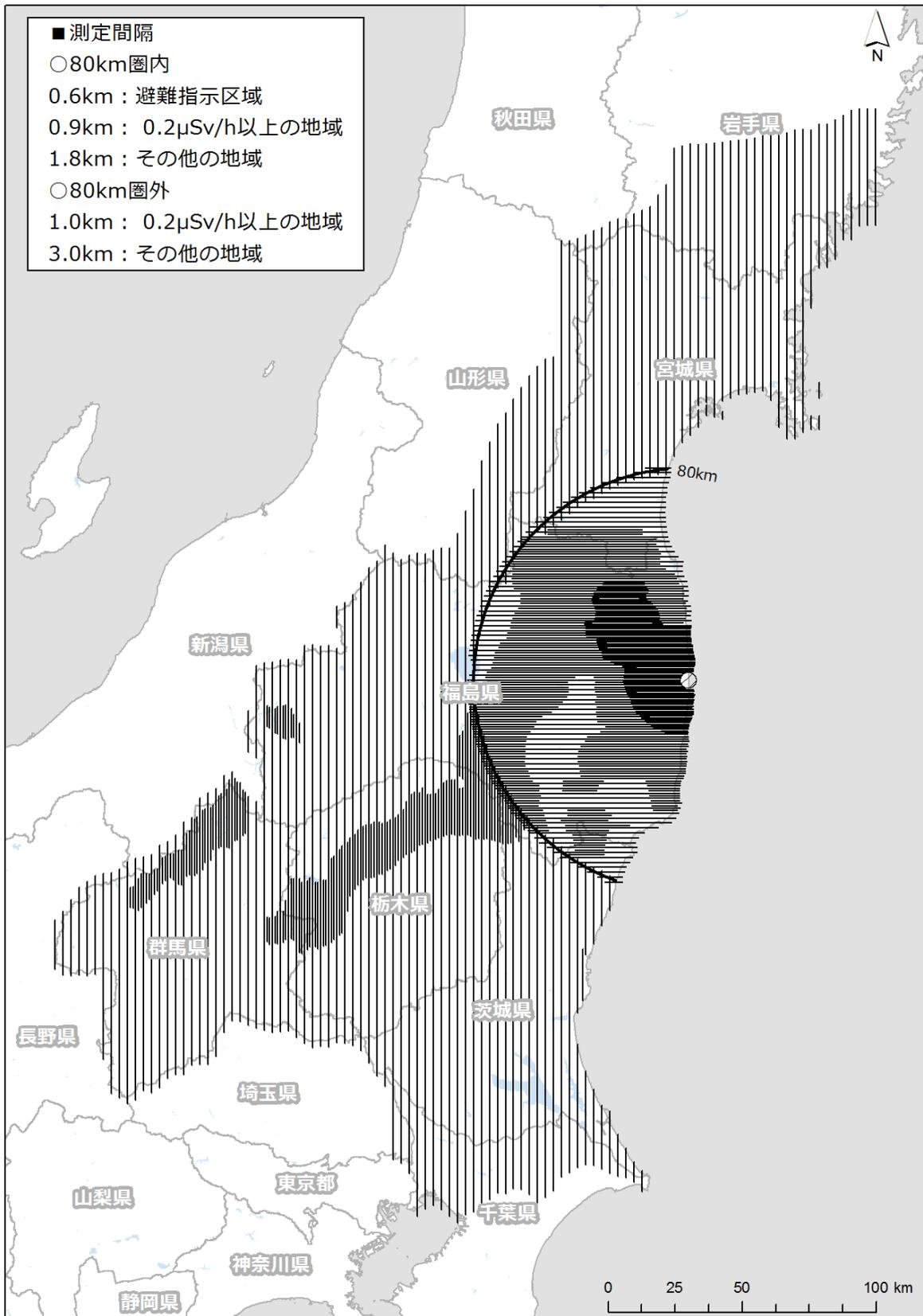


Fig. 4-6 予定したフライトの測線

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

4.3. 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、地上 1 m 高さにおける放射線量や地表面の放射性セシウムの沈着量に換算するためのパラメータについては、2014 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 4-1 に示す。

テストラインフライトとは、高度を補正するための実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor 以下、AF) 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 (150、300、450、600、750、900 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。テストライン上では 25 ポイントの地上測定を行っている。

テストポイントフライトとは、半径 1,000 m の範囲内で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を選定し、地上の空間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) における地上の空間線量率換算係数 (Conversion factor of Dose-rate, CD: cps/[μ Sv/h]) を求めるためのフライトである。テストポイントでは、人手により NaI シンチレーション式サーベイメータ (日立製作所製 TCS-172B) を用いて、半径 1,000 m の範囲内で 60 ポイントを目安に 1 m 高さの空間線量率の測定を行った。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。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算出するフライトはテストラインで実施し、地上で測定した空間線量率と比較する空間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ことになっている。

宇宙線フライトとは、宇宙線の影響を差し引くため、海上を 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. 4-11 に示す。フライト場所は、海上であればどこでもいいので、天候等を見ながら太平洋上の適当な位置で実施する。

Rn 影響フライトとは、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 450~900 m までを直線的に上昇しデータを取得する。また、BG フライトとは、地上からの放射線の影響のない対地高度 900 m に機体を保ち約 2 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および検出器のバックグラウンドデータを取得する。BG フライトは、Rn 影響フライトとセットで 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。

天然核種フライトとは、天然核種のみ場所において対地高度 300 m をフライトすることにより、データを取得し、線スペクトルから天然核種の影響を差し引くスペクトルインデックスを算出する。本フライトは、過去に使用した実績のない機体について 1 回実施することとする。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とは、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。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、300、450、600、750、900 および 1,500 m)を変化させてフライト	測線 5,000 km 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、高度 300 m 高度で 2 分	測線 5,000 km ごとに 1 回実施
宇宙線フライト	宇宙線の影響を調査	海上を高度 300-2,500 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 450-900 m まで直線的に上昇	毎日
BG フライト	機体のバックグラウンドを調査	高度 900 m を 2 分 (Rn 影響フライト後に実施)	毎日
天然核種フライト	天然核種のみスペクトルインデックスを算出	Cs の影響のない場所でフライト	過去に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	指定場所をフライト	機体と RSI システムの組み合わせごとに 1 回

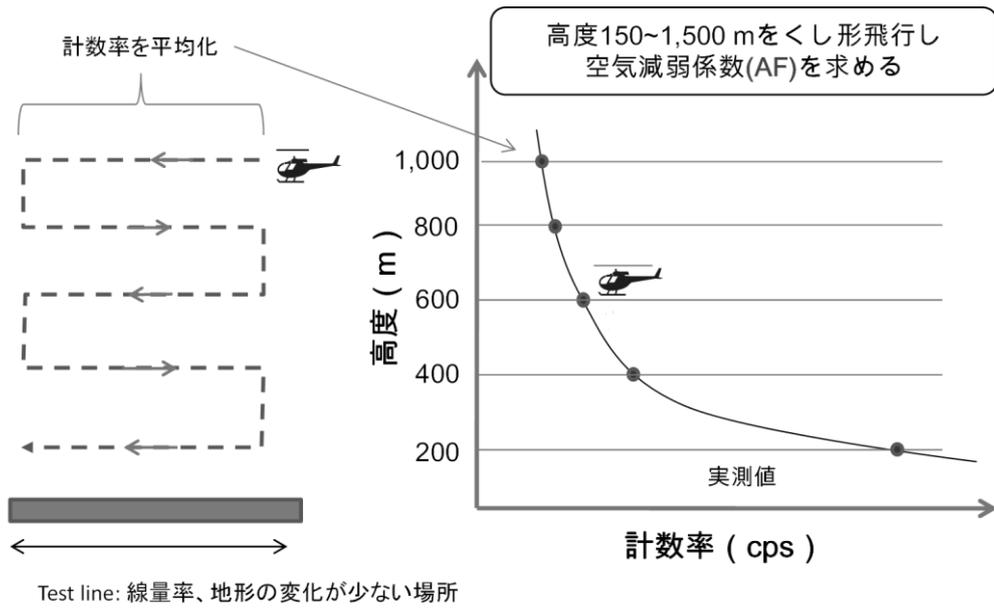
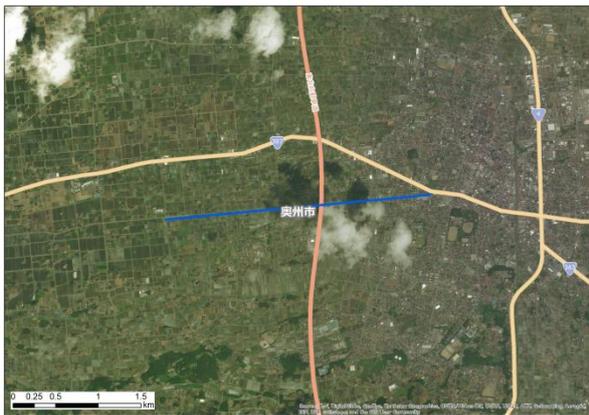


Fig. 4-7 テストラインフライトのイメージ



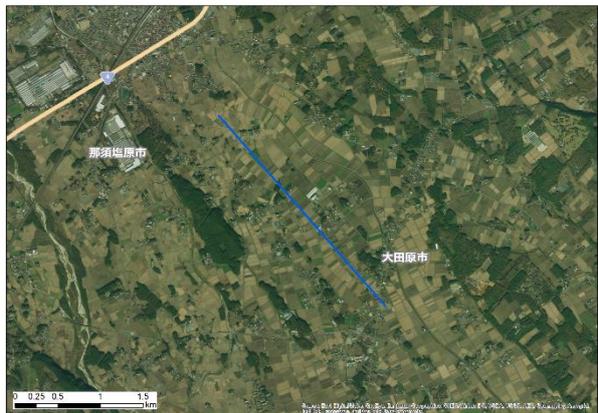
Test line 1 (岩手県奥州市)



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、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)



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、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)

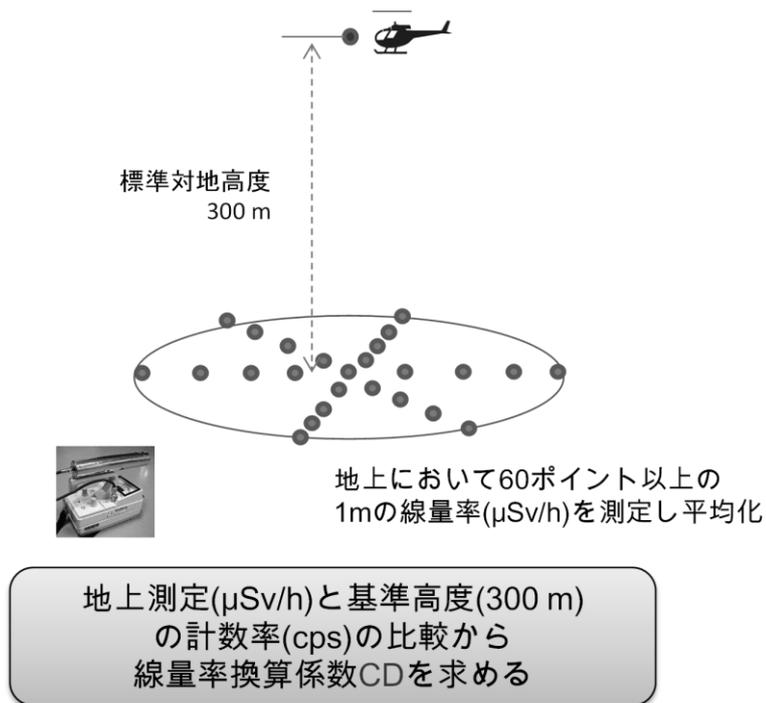
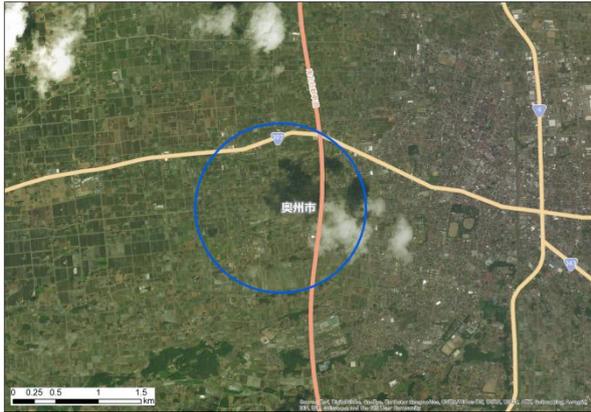


Fig. 4-9 テストポイントフライトのイメージ



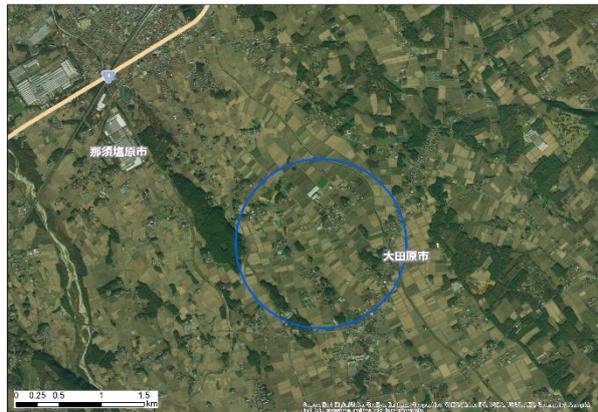
Test point 1 (岩手県奥州市)



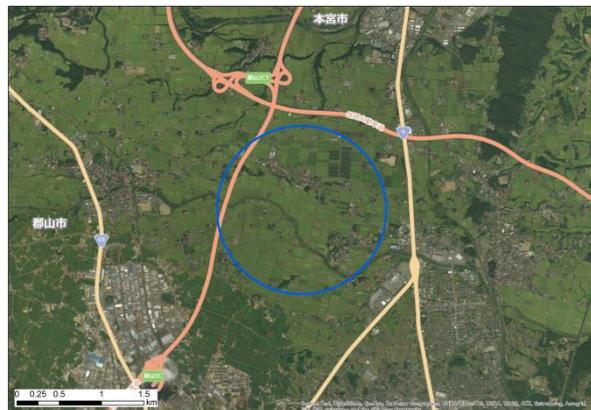
Test point 3 (群馬県みどり市)



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、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)

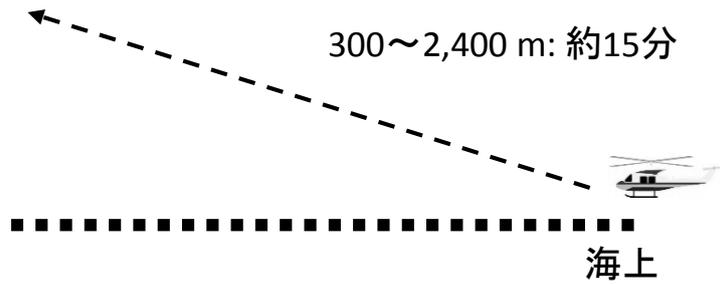


Fig. 4-11 宇宙線フライトのイメージ

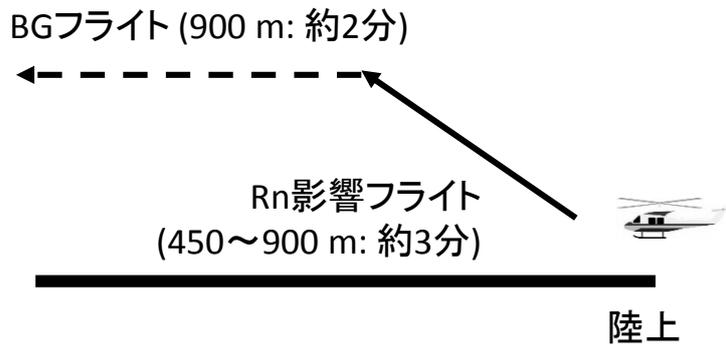


Fig. 4-12 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ

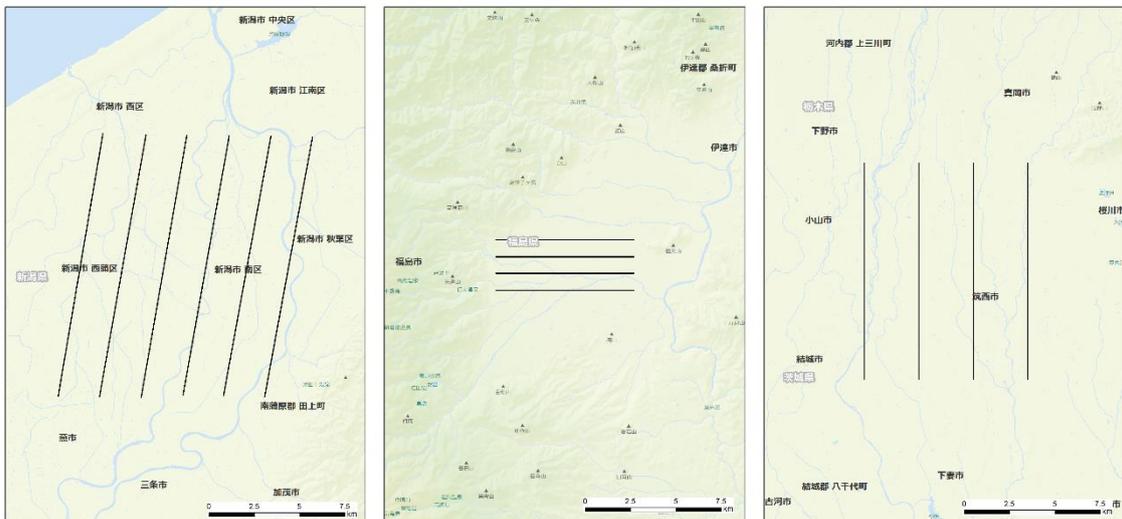


Fig. 4-13 天然核種フライトの測線とオーバーラップフライト場所

図は左から天然核種フライト測線、中央が 80km 圏内オーバーラップフライト、
右が 80km 圏外オーバーラップフライト場所である。

(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)

4.4. 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 γ 線
- ② 天然の放射性核種からの γ 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. 4-14 に示す。なお、本章以降の空間線量率とは、周辺線量当量率 (1 cm 線量当量率) を意味する。

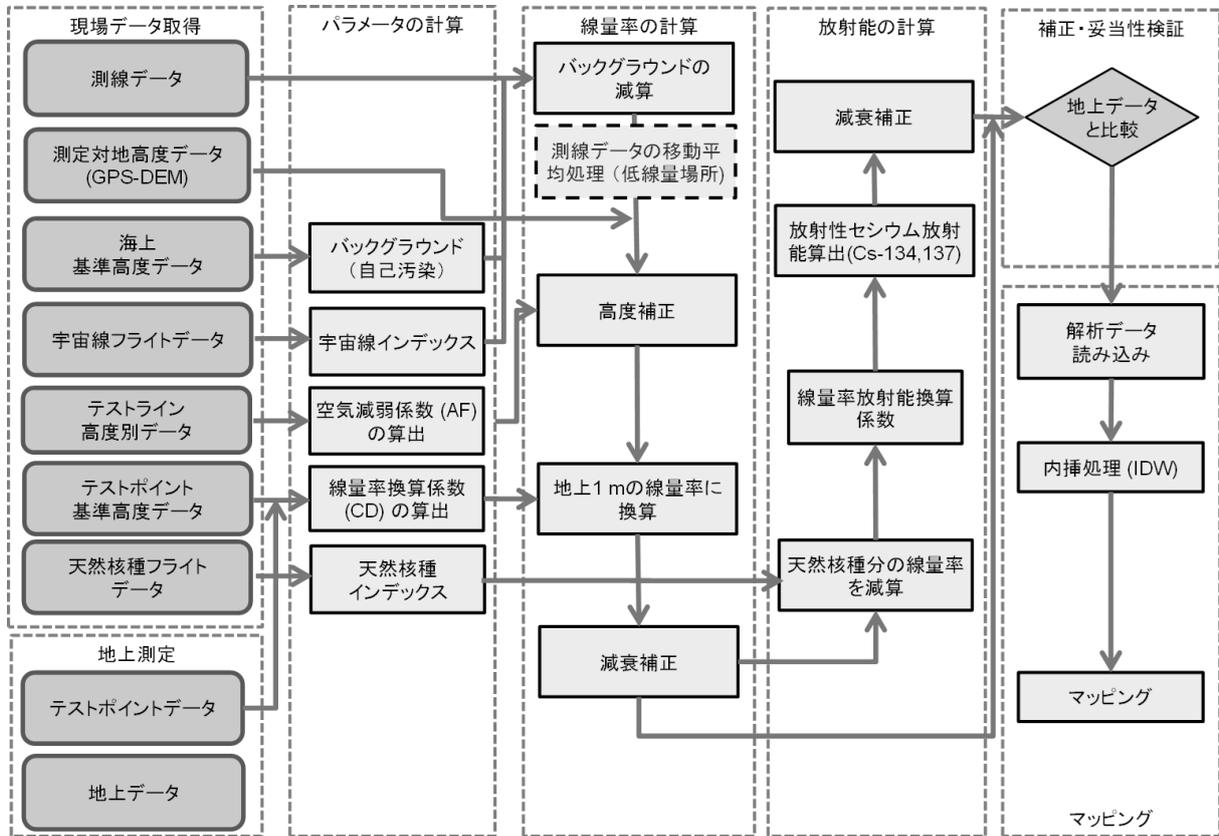


Fig. 4-14 解析のフロー

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、大まかに以下の手順となる。

- ① バックグラウンド: 全計数率からバックグラウンド計数率 (自己汚染および宇宙線由来の計数率) 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 空間線量率への換算: 空間線量率換算係数により地上空間線量率に換算

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 (自己汚染および宇宙線)

航空機モニタリングにおいて、自己汚染および宇宙線はバックグラウンドとなる。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 900 m 以上のフライト (もしくは海上でフライトした際のデータ: 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. 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。

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 γ 線の影響により、2,614 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。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。このように、海拔高度と計数率は指数の相関関係にあるが、計測する場所や時間帯に影響されない。また、2,800 keV 以上の計数率 ($C_{>2,800 \text{ keV}}$) と全計数率 (C_{all}) の比 ($\text{CR-index} = C_{\text{all}} / C_{>2,800 \text{ keV}}$) は高度に依存せず一定の数値を示すことから、CR-index を機体と検出器の組み合わせごとに設定した。その後、実際に測定したスペクトルの 2,800 keV 以上の計数率から CR-index を用いて全エネルギーにおける宇宙線起因の計数率を算出し、全計数率から差し引いた。実測したデータを基に CR-index について Table 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。

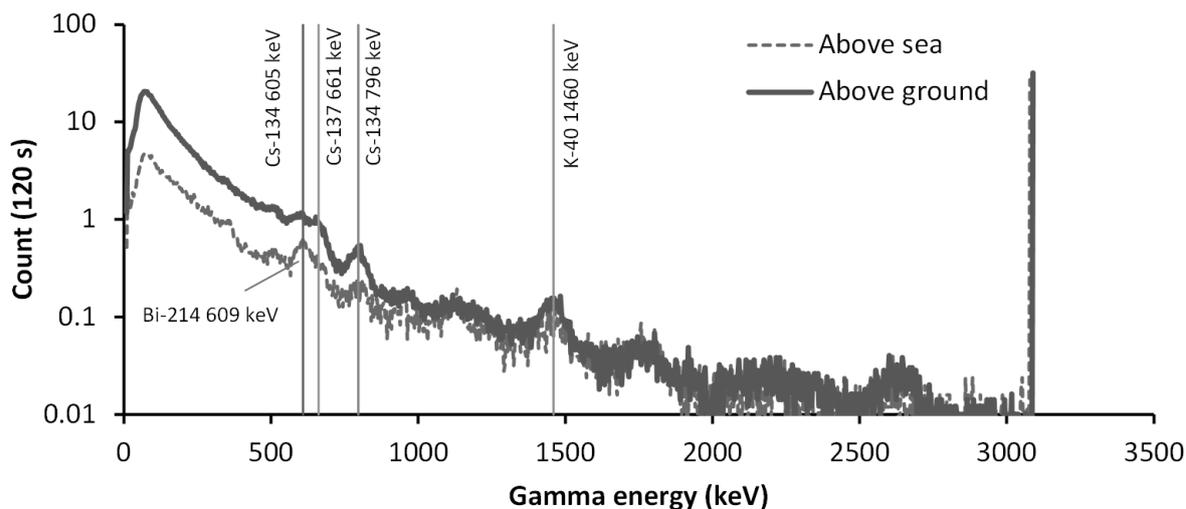


Fig. 4-15 RSI システムにおける地上で取得した γ 線スペクトルと海上でのスペクトル例

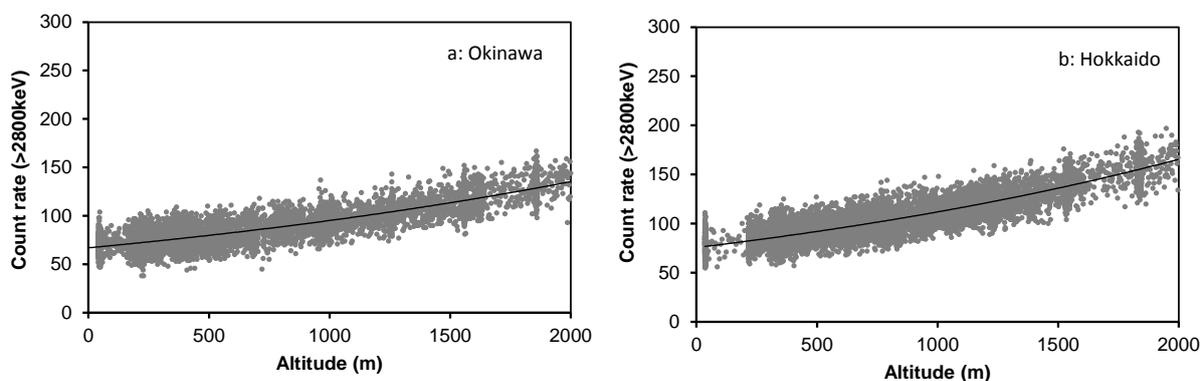


Fig. 4-16 海拔高度と2,800 keV 以上の計数率の関係の例

(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	自己汚染 計数率	CR-index	
RSIシステム1	Bell 430 (JA05TV)	NNK	513	2.93
RSIシステム2	Bell 412 (JA9616)	AAC	495	2.97
	Bell 412 (JA6767)	NNK	482	2.97
	Bell 412 (JA6928)	AAC	566	2.97

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: 以下、HF)

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) ²⁷⁾ およびジオイド高度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 (σ) について Table 4-3 に示す。

なお、2017 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。

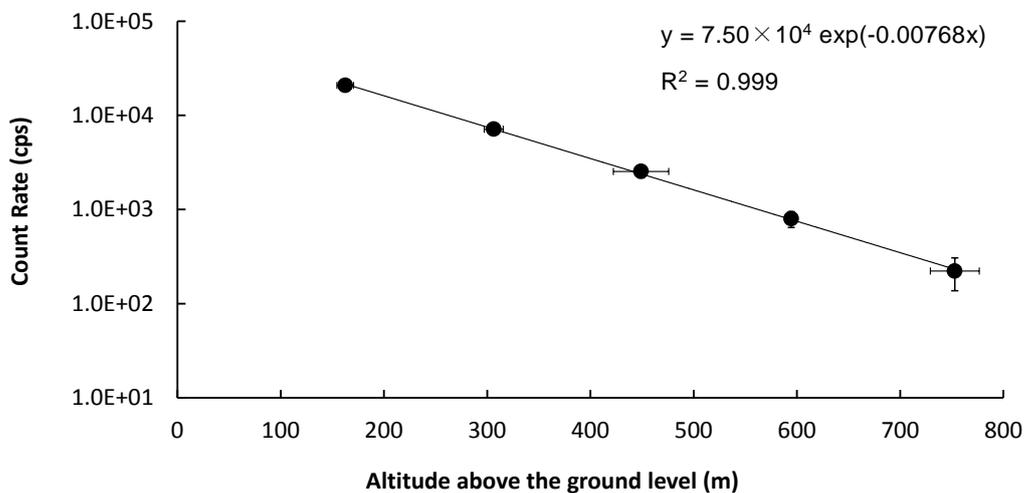


Fig. 4-17 対地高度と計数率の関係例
(Bell 430 JA6900, 2013/11/5 実施, Test line A)

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

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(σ))

	Bell412			Bell430		
	Value		Number of Data	Value		Number of Data
AF (m ⁻¹)	-0.0072 ± 0.00047		21	-0.0072 ± 0.00040		35
CD (cps/μSv/h)	12600 ± 2600		29	12800 ± 2800		65

Table 4-4 2017 年度に取得した AF データ一覧

Monitoring No	System (Device Serial)	Helicopter	Body No	Operarion campany	location	Date	AF	
							μ(m-1)	R2
F12th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	Sukagawa_TestLine	2017/9/9	-0.00710	0.99960
F12th	5089	Bell430	JA05TV	NNK	Sukagawa_TestLine	2017/9/24	-0.00702	0.99875
E8th	5089	Bell430	JA05TV	NNK	Sukagawa_TestLine	2017/10/5	-0.00774	0.99978
E8th	5089	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine5	2017/10/18	-0.00701	0.99972
E8th	5089	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine1	2017/11/1	-0.00659	0.99962
Average							-0.00709	
F12th	5043	Bell412	JA9616	AAC	Sukagawa_TestLine	2017/9/9	-0.00756	0.99990
F12th	5043	Bell412	JA9616	AAC	Sukagawa_TestLine	2017/9/19	-0.00707	0.99888
E8th	5043	Bell412	JA6767	NNK	TestLine4	2017/9/30	-0.00687	0.99980
E8th	5043	Bell412	JA6767	NNK	TestLine3	2017/10/18	-0.00482	0.99603
E8th	5043	Bell412	JA9616	AAC	TestLine5	2017/11/7	-0.00589	0.99678
E8th	5043	Bell412	JA6928	AAC	TestLine4	2017/11/16	-0.00670	0.99988
Average							-0.00649	

* R²: 近似した指数関数曲線の決定係数

F12th: 第12次モニタリング、E8th: 東日本第8次モニタリング

4.5.3.空間線量率への換算

地表面から高さ 1 m における空間線量率に換算するために設定する空間線量率換算係数 (Conversion Dose-rate 以下、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 年度決定した数値を使用した。使用した数値と標準偏差 (σ) について Table 4-3 に示す。AF と同様に、2017 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 に示す。また、地上のテストポイントにおける CD 算出のための地上測定結果について、Fig. 4-18 に示す。なお、ここでいう空間線量率には、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 の数値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 と Bell 430 によって対地高度 300 m でフライトを実施し、相対的な効率の比較を行った (オーバーラップフライト)。フライトで得た測定値は、実際にフライトした高度の補正を行い、同じ場所の計数率を比較した。結果を Fig. 4-19 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 の比は、Bell 412/Bell 430 で 0.9 となった。この数値は、Fig. 4-19 に示した近似直線の傾きと概ね等価であり、オーバーラップフライトの結果も CD の数値の妥当性を支持するものであると考えられる。



Test point 1

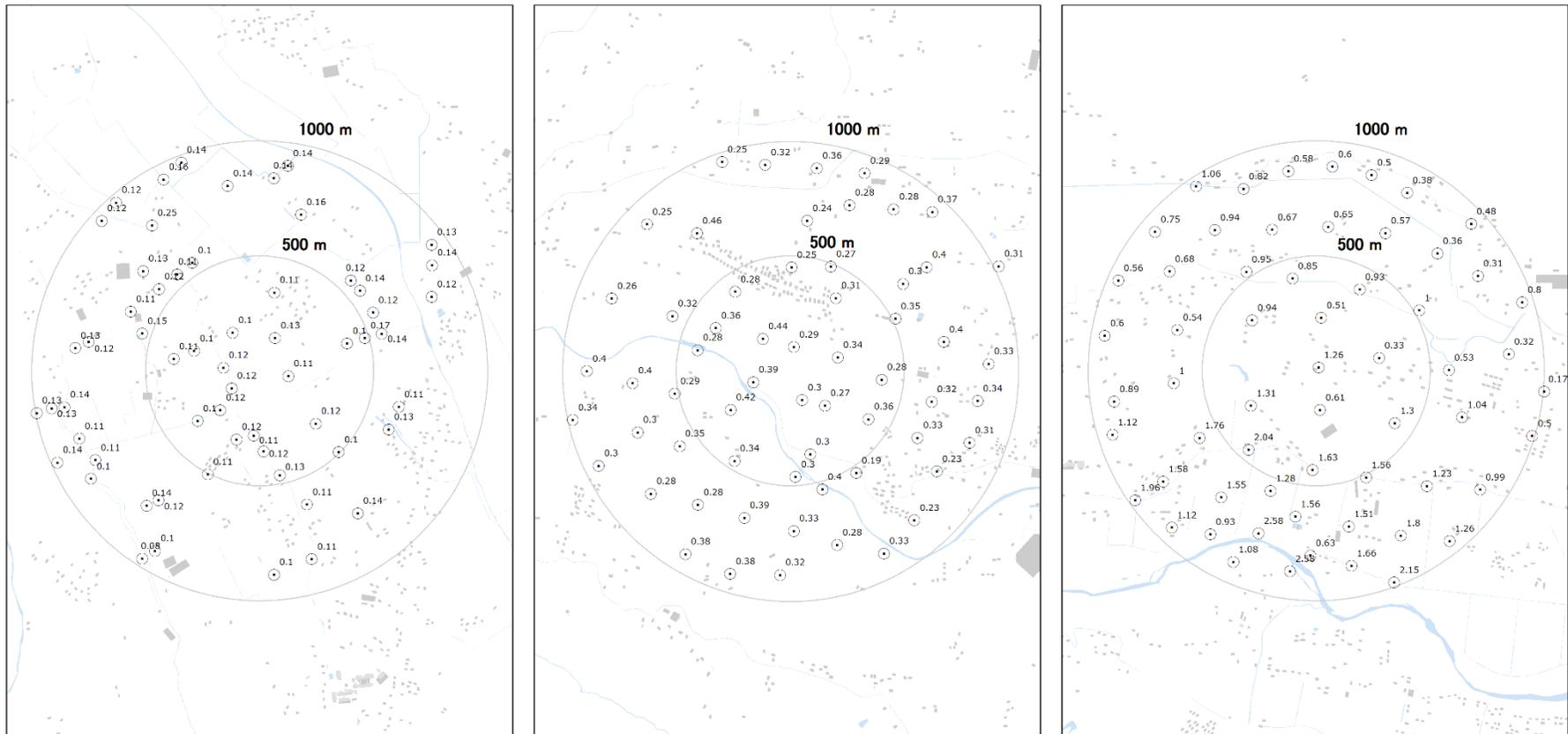
Test point 3

Test point 4

Fig. 4-18 地上測定データ

(1/2)

(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)



Test point 5

Test point D

Test point E

Fig. 4-18 地上測定データ

(2/2)

(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)

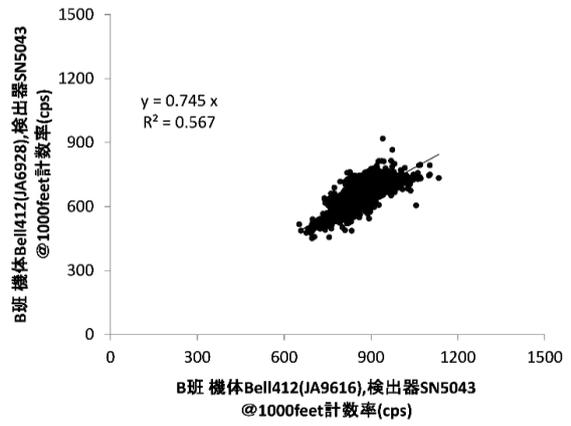
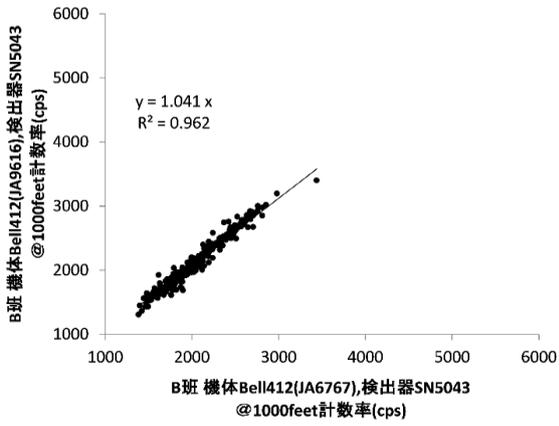
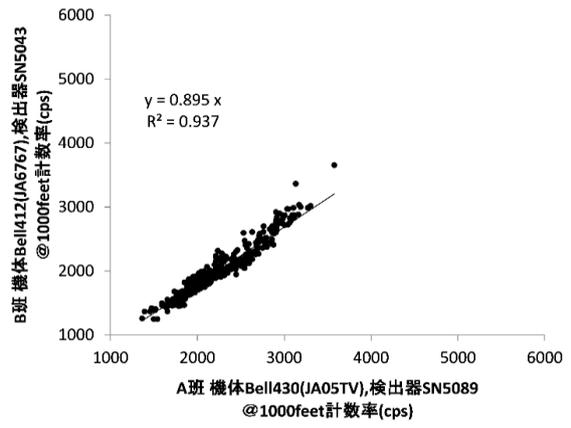
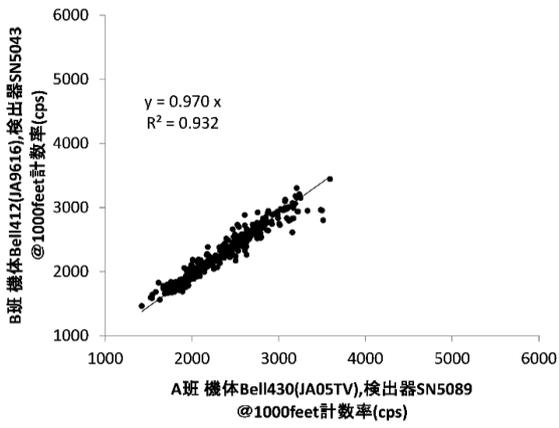


Fig. 4-19 ヘリコプターの機種とオーバーラップフライトにおける計数率の関係

Table 4-5 2017 年度に取得した CD データ一覧

Monitoring No.	System (Device Serial)	Body No.	Helicopter	Operation company	Location	Date	Ground data (Nal survey)			AMS data			AGL (m)			CD (cps[μ Sv/h] ⁻¹)
							Survey (uSv/h)	Stdev (2 σ)	Stdev (%)	AMS data (cps)	Stdev (2 σ)	Stdev (%)	AGL (m)	Stdev (2 σ : %)	Stdev (%)	
F12th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint D	2017/9/9	0.33	0.108	33	5739	604	11	269	12	5	11,800
F12th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint E	2017/9/9	1.24	1.020	82	20999	6326	30	269	50	19	12,500
F12th	5089	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint D	2017/9/24	0.32	0.108	33	5154	949	18	294	6	2	12,400
F12th	5089	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint E	2017/9/24	1.06	0.967	92	15676	9569	61	290	41	14	12,600
E8th	5089	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint D	2017/10/5	0.33	0.130	39	4705	1222	26	311	25	8	12,600
E8th	5089	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint5	2017/10/18	0.12	0.033	28	2306	279	12	315	25	8	13,900
E8th	5089	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint1	2017/11/1	0.07	0.016	24	1432	89	6	300	13	4	11,400
Average															12,457	
F12th	5043	JA9616	Bell412	AAC	TestPoint D	2017/9/9	0.33	0.126	38	5410	1058	20	275	10	4	11,300
F12th	5043	JA9616	Bell412	AAC	TestPoint E	2017/9/9	1.18	1.021	86	14286	3471	24	292	8	3	10,400
F12th	5043	JA9616	Bell412	AAC	TestPoint D	2017/9/19	0.33	0.108	33	4416	317	7	386	24	6	19,700
F12th	5043	JA9616	Bell412	AAC	TestPoint E	2017/9/19	1.09	0.999	92	13014	6345	49	303	10	3	11,100
E8th	5090	JA6767	Bell412	NNK	TestPoint 4	2017/9/30	0.07	0.025	36	1154	76	7	325	3	1	8,500
E8th	5090	JA6767	Bell412	NNK	TestPoint 3	2017/10/18	0.06	0.017	30	1376	85	6	333	5	2	13,400
E8th	5090	JA9616	Bell412	AAC	TestPoint 5	2017/11/7	0.11	0.033	30	2348	407	17	282	5	2	13,300
E8th	5090	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint 4	2017/11/16	0.07	0.031	44	1425	99	7	293	15	5	7,400
Average															11,888	

* 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
F12th: 第12次モニタリング, E8th: 東日本第8次モニタリング

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 γ 線スペクトルから以下の領域の計数率を計算する。
 - (1) 全計数率 (C_{all})
 - (2) 2,800 keV 以上の計数率 (C_{cos})
- ② 式(2)のように、 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
- ③ BG フライトで取得したデータを自己汚染による計数率 (BG_{self}) とする
- ④ C_{all} から BG_{cos} と BG_{self} を差し引いた計数率を C_{net} とし、CD および HF を用いて地表 1 m における空間線量率 D を算出

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

ここで、

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

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

4.6. 放射性セシウムの沈着量への換算方法

4.6.1.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 が開発したいわゆる MMGC 法 (Man Made Gross Count) を参考にした^{13), 21)}。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 から 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し、機体と検出器の組み合わせごとに、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 から 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. 4-20 に示す。

BG-index の算出例を Fig. 4-21 に示す。本データは、平成 23 年度に関西西部において、1 秒ごとに測定した 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 4-6 に示す。

これらのパラメータを設定し、放射性セシウム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 γ 線スペクトルから 1,400~2,800 keV の計数率 (C_{BG}) を計算する。
- ② C_{BG} に BG-index (I_{BG}) をかけて天然核種起源の計数率 (BG_{nat}) を算出する。

- ③ C_{net} から BG_{nat} を差し引き、放射性セシウムだけの計数率 (C_{Cs}) を求める。
- ④ C_{Cs} に CD と HF を使用してから放射性セシウムだけの空間線量率 (D_{Cs}) を算出する。
- ⑤ 式(3)より、空間線量率に空間線量率-放射能換算係数 ($CF, [\mu Sv/h]/[kBq/m^2]$) を除して放射性セシウムの沈着量 Rd を求める。

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

ここで、

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

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

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

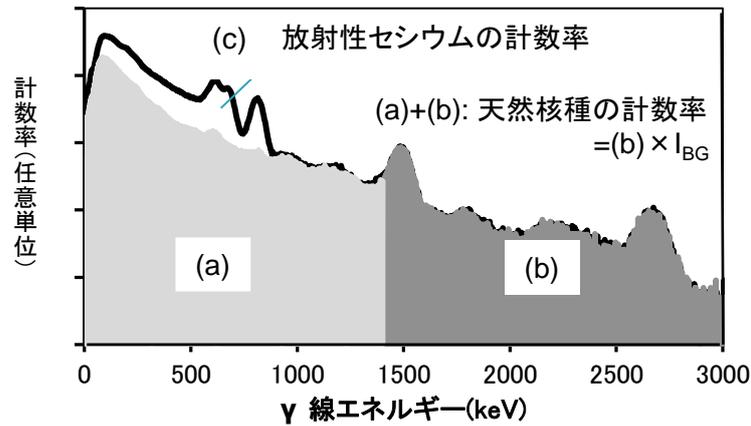


Fig. 4-20 放射性セシウムの計数率の算出イメージ

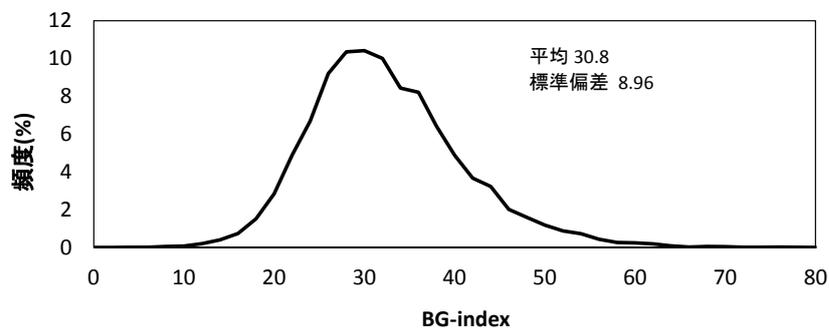


Fig. 4-21 BG-index の算出例

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

Table 4-6 BG-index 一覧

System	ヘリコプター	BG-index
RSIシステム1	Bell 430 (JA05TV) NNK	31
RSIシステム2	Bell 412 (JA9616) AAC	27
	Bell 412 (JA6767) NNK	27
	Bell 412 (JA6928) AAC	26

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、地上の放射性セシウムの沈着量に換算する場合に、参考文献^{28,29)}に示される空間線量率-放射能換算係数 (Conversion Factor, CF: $[\mu\text{Sv/h}]/[\text{kBq/m}^2]$) を使用する。CF は、土壌への放射性セシウムの浸透度をしめす重量緩衝深度 (β)によって異なった値が設定されている²⁶⁾。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 $\beta=1.0$ 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³⁰⁾から、発電所から80 km 圏内の土壌において、緩衝深度 (β) 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、環境中での放射性セシウム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、従来のように、 β に一つの固定的な値を与えることは合理的ではない。そこで、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、 β 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。

$\beta=1.0$ と $\beta=2.0$ にした際の放射性セシウムの沈着量と地上1 m高さでの空間線量率の換算係数 ($[\mu\text{Gy/h}]/[\text{kBq/m}^2]$) は、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs ともに16 %程度の差がある。どの数値を選択するのかは、換算値への影響が大きいため、さらなる検証が必要であろうと考える。Fig. 4-22に文献^{28,29)}に示されている重量緩衝深度とCFの関係について示す。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1次対数の関係にある。解析の基本的な方針としては、今年度についても過去との比較を考慮して、文献^{28,29)}に記載のある緩衝深度 $\beta=1.0$ の場合の換算係数を適用した。

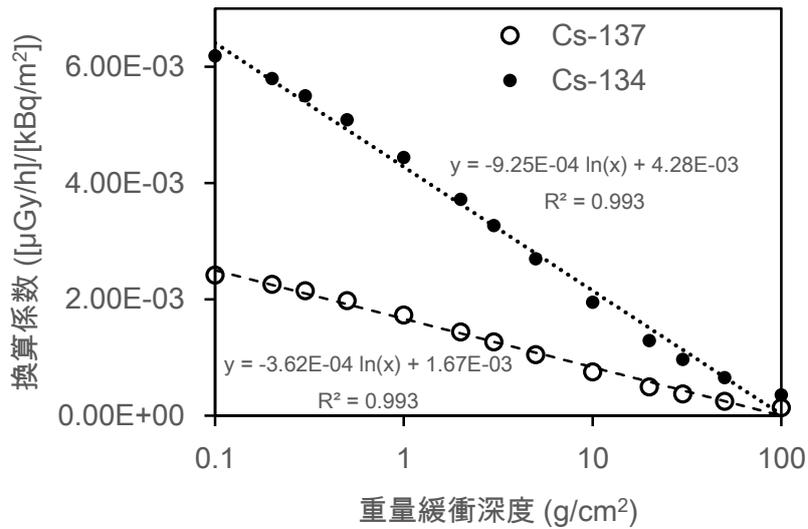


Fig. 4-22 重量緩衝深度と空間線量率-放射能換算係数の関係
(文献 28, 29 のデータを基に対数による近似曲線を表示)

4.7. 減衰補正

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}Cs と ^{137}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}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、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 高さにおける空間線量率から地表における ^{134}Cs 、 ^{137}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}Cs および ^{134}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。

$$C_{\text{Cs}137} = A \cdot E_{\text{Cs}137+134} \quad [4]$$

$$C_{\text{Cs}134} = B \cdot C_{\text{Cs}137} \quad [5]$$

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

$$A = \frac{\exp(-\lambda_{\text{Cs}137} \cdot t)}{CF_{\text{Cs}137} \cdot \exp(-\lambda_{\text{Cs}137} \cdot t) + B_0 \cdot CF_{\text{Cs}134} \cdot \exp(-\lambda_{\text{Cs}134} \cdot t)} \quad [6]$$

ここで、 t : 基準日 (2011/8/13) からの経過時間、 $\lambda_{\text{Cs}137}$ および $\lambda_{\text{Cs}134}$: 崩壊定数 (0.693/半減期) としている。

空間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 を乗じて空間線量率に換算する。
- ③ 換算した空間線量率にバックグラウンド空間線量率を足し、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セシウム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。

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

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

ここで、

- D: 全空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
- C_{all} : 全計数率 (cps)
- BG_{self} : 機体の汚染 (cps)
- CD: 空間線量率換算係数 (cps/ $\mu\text{Sv/h}$)
- 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) $C_{\text{BG}} \times I_{\text{BG}}$ (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) $C_{\text{cos}} \times I_{\text{cos}}$ (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 ($[\mu\text{Gy/h}]/[\text{Bq/m}^2]$)^{28, 29)}
- 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 ($=\exp[-\lambda\tau]$) (* τ : 経過時間)

4.8.1. 空間線量率の検出下限値

空間線量率は BG_{self} と BG_{cos} に依存する。これまでの測定結果を見ると、 BG_{cos} は概ね 200-500 cps 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 cps であったことから、 $BG_{\text{self}}+BG_{\text{cos}}=900$ cps 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 (σ) を式[9]に示した Currie の式³²⁾ に当てはめ、検出下限値 (N_D) を算出する。

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

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/ μ Sv/h) から空間線量率を計算すると、0.011 μ Sv/h となる (Table 4-7)。

4.8.2.放射性セシウムの沈着量の検出下限値

放射性セシウムの沈着量は、 γ 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。放射性セシウム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 3σ 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 (12,800 cps/ μ Sv/h) および $\beta=1$ の場合の空間線量率-放射能換算係数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 cps とし計算を行った。この条件を、式[9]に当てはめると、767 cps となる。これに、標準的な CD (12,800 cps/ μ Sv/h) を用いて空間線量率に換算する。さらに ^{134}Cs と ^{137}Cs の比を第 12 次モニタリングの減衰補正日である 2017 年 9 月 25 日における 0.252 と $\beta=1$ における空間線量率-放射能換算係数 (^{134}Cs : 5.33×10^{-3} [μ Sv/h]/[kBq/m²], ^{137}Cs : 2.08×10^{-3} [μ Sv/h]/[kBq/m²]) を用いて、放射性セシウムの沈着量の検出下限値を求めた。この結果、放射性セシウムの沈着量の検出下限は、22 kBq/m²と評価できた (Table 4-7)。

Table 4-7 RSI システムの検出下限値

System	Limit of detection	
	Dose rate at 1m above the ground (μ Sv/h)	Radioactivity of deposition radiocesium (kBq/m ²) *
RSI	0.011	22

* Total BG count: 3,000 cps

Evaluated value at 25, Sep. 2017

4.9. 不確かさ

本手法において、不確かさの要因としては、式 [7] から、以下の事項が上げられる。

- ・ 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。本誤差を評価するため、近年商用利用を開始した準天頂衛星に対応する GPS で取得したデータとの比較を行った。詳細は、8章に示す。

- ・ 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9章に述べる。

4.10. マッピング

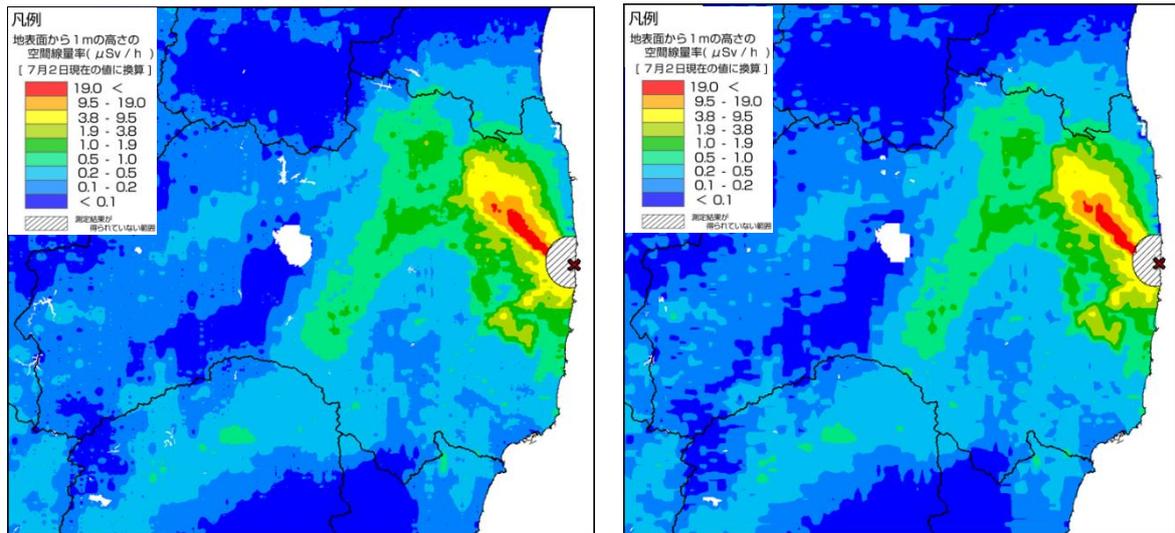
空間線量率や放射性物質のマッピングについては、IAEA から標準的な方法が示されている³¹⁾。補間方法には、IDW (Inverse Distance Weighted : 逆距離加重法)、クリギング (Kriging)、スプライン (Spline)、Natural Neighbor 等の多くの方法が存在する。本事業では、2011年4月6日～29日にかけて実施された第1次航空機モニタリングの解析を担当した DOE が用いた IDW を踏襲し、それ以後の解析を行った。IDW は、補間する地点の近傍にある複数の地点の測定値を平均し、推定する方法である。IDW とは、補間点からサンプル点までの水平距離の逆数の二乗を重みとした平均であり、以下の式[10]で得られる³³⁾。

$$\tilde{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{e_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{e_i^2}} \quad [10]$$

ここで、 \tilde{Z} は補間点における推定地表高度(この場合は空間線量率)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. 4-23 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。一般的に乗数が高いほど、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. 4-23 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わかる。

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



a) 乗数 2.3 対象地点数 180

b) 乗数 2 対象地点数 12

*第3次航空機モニタリングの測定結果を使用

Fig. 4-23 IDWに入力するパラメータとマップの関係

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がかつヘリコプターの測線下の点を選定し、地上において、1m 高さの空間線量率を NaI サーベイメータ（日立製作所製 TCS-172B）を用いて空間線量率の測定を行った。Fig. 4-24 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（右）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。

また、他の機関が実施した信頼のできる地上での測定結果として、同時期に実施された規制庁と原子力機構が行っている地上の空間線量率の測定結果および in-situ Ge を用いた放射性セシウムの沈着量の測定結果と比較した³¹⁾。また、放射性セシウムの沈着量は in-situ Ge 検出器（Canberra 社製 Falcon 5000）を用いている。in-situ Ge 検出器の解析条件は、緩衝深度 (β) を 3.52 g/cm^2 としている。放射空間線量率の比較および in-situ Ge による放射性セシウムの沈着量の比較について、それぞれ Fig. 4-25 および Fig. 4-26 に示す。いずれの測定結果も、正の相関関係にあり、今回の結果は、概ね地上での測定値を再現できるといってよい。一方、空間線量率については、詳細にヒストグラムを見ると、0.5 以上（航空機の結果の方が高い）に分布があることが分かる。これは、除染等により局所的に空間線量率の低い場所を航空機モニタリングの結果が追従していないことが考えられる。In-situ Ge 検出器の測定結果との比較を見ると、空間線量率に比べてばらつきが大きく、ヒストグラムを見ると、0 以下（航空機モニタリングの方が過小評価）にヒストグラムのピークがあるとともに、2.0 以上（航空機モニタリングの方が

過大評価)にも10%以上の頻度が確認できる。放射性セシウムの分布は、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の緩衝深度の推定が難しいため $\beta=1$ として算出しており、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。

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、地上の測定される範囲は地上の半径300 m円内における放射線の平均値となる。一方、地上1 m高さにおける測定範囲は半径30 m程度の円の平均値となる。よって、地上の放射線分布が一様な場所では整合しやすいが、地上の空間線量率の分布が均一でない場所では、測定結果が整合しにくいと考えられる。
- ② 周辺からの影響：地上の測定場所の近傍に大きな建物や森林等がある場合には、建物や木自身に沈着している放射性物質が地上測定に影響する可能性がある。また、上空で測定する場合には、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。

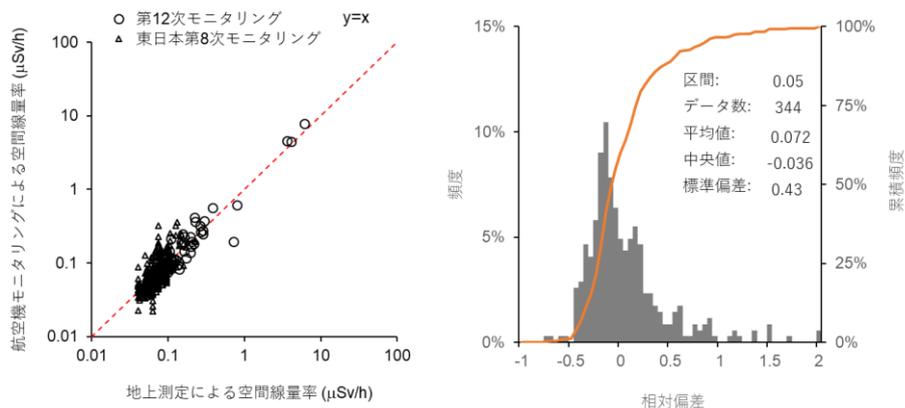


Fig. 4-24 地上の測線上における空間線量率測定結果との比較 (測線上の地点を選定) 左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム

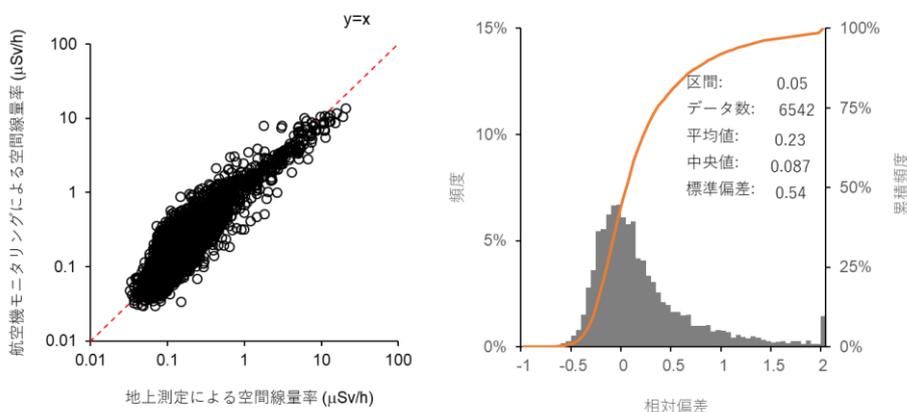


Fig. 4-25 地上のランダムな位置における空間線量率測定結果との比較 (地上値:原子力規制庁事業³¹⁾) 左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム

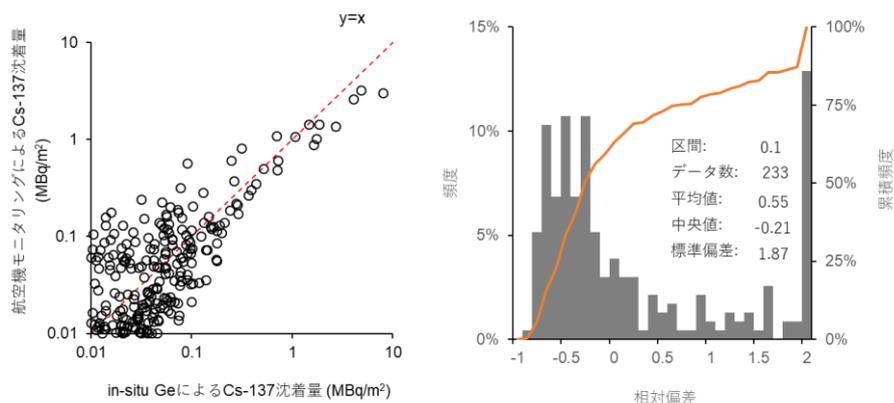


Fig. 4-26 地上における in-situ Ge 測定結果との比較 (地上値:原子力規制庁事業³¹⁾) 左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム

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平成 26 年度に開発した^{22, 34)}。航空機モニタリングで使用している RSI システムは、 γ 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セシウム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、放射性セシウムの影響の大きな地域においては、 ^{40}K の放出する 1,461 keV のエネルギーピークの領域に、 ^{134}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セシウムの影響のある地域では ^{40}K のエネルギーを弁別することは難しい。Fig. 4-27 に典型的な γ 線スペクトルの例を示す。このような、緩衝したスペクトルを弁別する手法として関数適合法³⁵⁾ 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、緩衝している部分の推定を行う手法である。実際には Fig. 4-27 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 はエネルギー (keV)、 E_i はピークエネルギー (keV)、 σ^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_i 、 c_j を求め、1,365 keV の ^{134}Cs が 1,400 keV 以上のエネルギーへ与える寄与割合から Cs_{1400} を算出した。

次に、放射空間線量率 (D_{nr}) 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、 ^{134}Cs 由来の 1,400 keV 以上に与える積算計数率 (Cs_{1400}) を除外するために必要な計数を追加した。

$$D_{nr} = (C_{1400} - \text{BG}_{1400} - \text{Cs}_{1400}) \times I_{\text{BG}} \times \text{HF}_{1400} / \text{CD} \quad [12]$$

ここで、 C_{1400} は 1,400~2,800 keV の積算計数率 (cps)、 BG_{1400} は宇宙線生成物、RSI システムの自己汚染およびラドン壊変生成物由来の 1,400~2,800 keV の積算計数率 (cps)、 I_{BG} は、放射性セシウムが沈着していない地域における全計数率と 1,400~2,800 keV の積算計数率の比率 (BG-index)、 HF_{1400} は 1,400~2,800 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 (cps/[$\mu\text{Sv/h}$]) である。これらの計数は、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 (50m \times 21 s \approx 1,000) となる。 HF_{1400} については、過去のパラメータフライトの結果から、1,400~2,800 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、高度と計数率の関係式の傾きから求めた。使用した減弱

係数と参考に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減弱係数について Table 4-8 に示す。全エネルギー領域で求めた減弱係数と比較して、エネルギーが大きい分、数値が小さくなっていることが分かる。CD については、これまでパラメータフライトで求めた数値と地上の空間線量率の関係を調べたところ、空間線量率が低い場所（天然核種の寄与が大きい場所）と空間線量率の高い場所（天然核種の寄与が小さい場所）で傾向がみられなかったことから、Table 4-3 の数値を使用した。地上の空間線量率と算出した CD の関係について Fig. 4-28 に示す。なお、ここでは、Gy : Sv = 1:1.2 とした。

発電所周辺の放射性セシウムの寄与分を取り除いた天然放射線の分布と、その取り除いた放射性セシウム由来の空間線量率に対する自然放射線の空間線量率の比率を Fig. 4-29 に示す。Fig. 4-29 (左) に示した天然放射線の分布図には Fig. 5-1 でみられるような発電所から北西方向への分布が確認されない。一方、Fig. 4-29 (右) に示した比率をみると、発電所から北西方向への分布が見られ、本手法により、放射性セシウムの影響を減算できているように見える。一方で、定量的な評価を行なうため、福島県の周辺で in-situ Ge 測定器を用いて測定した天然放射性核種の空気吸収線量と自然放射線強度を比較した結果を Fig. 4-30 に示す。ばらつきはあるものの地上測定結果と相関関係にあり、近似直線の傾きは 1 に近い数値を示した。以上から、2 つの Gauss 分布を仮定した関数適合法により放射性セシウムを適切に弁別できると考えられる。

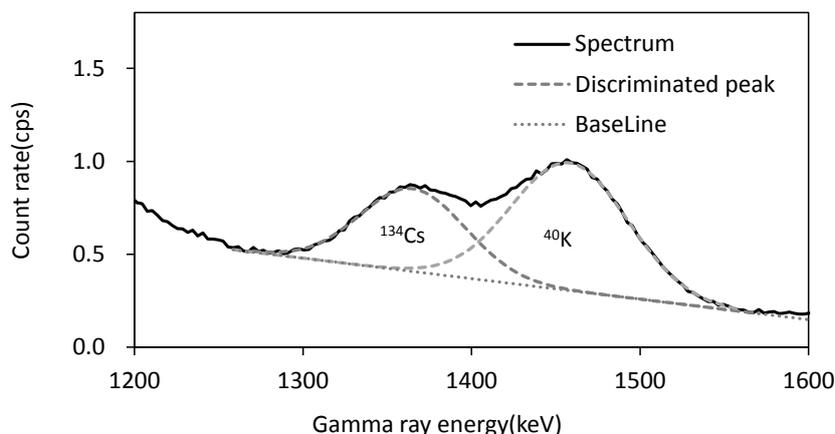


Fig. 4-27 関数適合法を用いた ^{134}Cs と ^{40}K の弁別

Table 4-8 使用した減弱係数 (m^{-1}) のまとめ
(誤差は測定結果の標準偏差 (σ))

Energy range	Bell412		Bell430	
	Value	Number	Value	Number
1,400 - 2,800keV	-0.0058 \pm 0.00080	11	-0.0060 \pm 0.00102	8
50 - 3,000keV	-0.0072 \pm 0.00047	21	-0.0072 \pm 0.00040	35

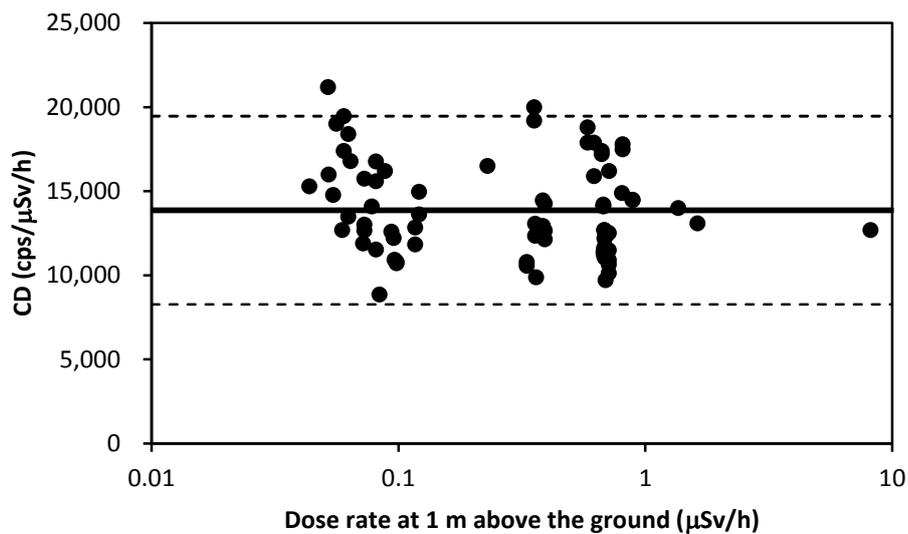


Fig. 4-28 テストポイントの地上の空間線量率と空間線量率換算係数 (CD) の関係

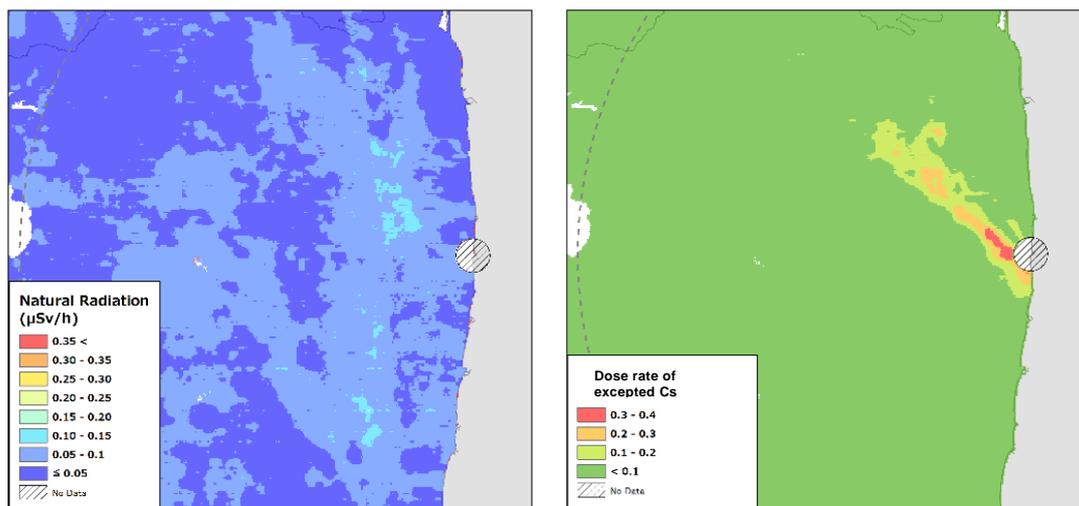


Fig. 4-29 福島第一原子力発電所周辺の天然の空間線量率マップの作成例
 (左) 天然由来の空間線量率マップ、(右) 放射性セシウム由来の空間線量率と自然放射線の空間線量率の比率

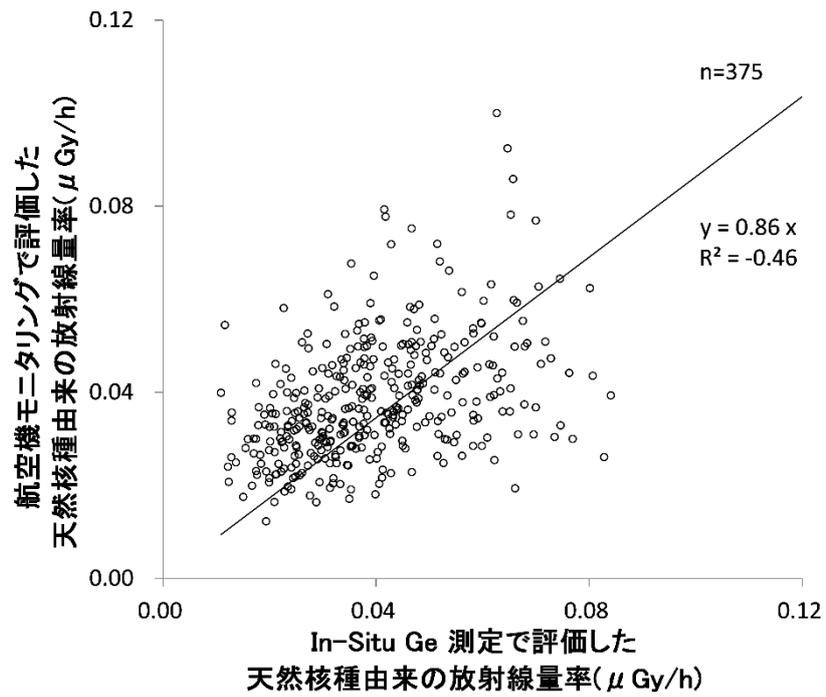


Fig. 4-30 航空機モニタリングによる天然核種由来の空間線量率と in-situ Ge 半導体検出器で得られた天然核種由来の放射空間線量率の比較

5. モニタリング結果

5.1. 第 12 次モニタリング

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. 5-1 に示す。また、放射性セシウムの沈着量の状況を示した「放射性セシウム沈着量マップ」を Fig. 5-2 に示す。 ^{137}Cs および ^{134}Cs の沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-3 および Fig. 5-4 に示す。なお、マップの作成にあたっては、第 12 次の航空機モニタリングを実施した最終日である平成 29 年 9 月 25 日現在の値に減衰補正した。なお、空間線量率マップの色合いについては、以下の考え方で分けている。

① 天然核種を含む空間線量率

- ・ 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ = 約 0.5 mSv/年 相当
- ・ 0.2 $\mu\text{Sv/h}$ = 約 1.0 mSv/年 相当
- ・ 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ = 約 2.5 mSv/年 相当
- ・ 1.0 $\mu\text{Sv/h}$ = 約 5.0 mSv/年 相当
- ・ 1.9 $\mu\text{Sv/h}$ = 約 10 mSv/年 相当
- ・ 9.5 $\mu\text{Sv/h}$ = 約 50 mSv/年 相当

② 放射性セシウムの沈着量

玄米中の放射性セシウム濃度が 2011 年当時の食品衛生法上の暫定規制値 (500 Bq/kg) となる土壌中の放射性セシウム濃度の上限値は、5,000 Bq/kg である。この濃度の放射能が 5 cm までに沈着している水田の土壌を深さ 15 cm まで採取し、攪拌した場合の濃度を計算すると、約 1,000 kBq/m² となる。この時、深さ 15 cm までの土壌の体積は密度 1.3 kg/L とした。

$$(150 \text{ L/m}^2 \times 1.3 \text{ kg/L} \times 5,000 \text{ Bq/kg} = 975,000 \text{ Bq/m}^2 \div 1,000 \text{ kBq/m}^2)$$

- ・ 3,000 kBq/m² = 1,000 kBq/m² の 3 倍
- ・ 1,000 kBq/m² = 基準
- ・ 600 kBq/m² = 300 - 1000 kBq/m² の中間値
- ・ 300 kBq/m² = 1,000 kBq/m² の約半桁下 ($10^{-0.5}$)
- ・ 100 kBq/m² = 1,000 kBq/m² $\times 1/10$
- ・ 60 kBq/m² = 600 kBq/m² $\times 1/10$
- ・ 30 kBq/m² = 300 kBq/m² $\times 1/10$
- ・ 10 kBq/m² = 100 kBq/m² $\times 1/10$

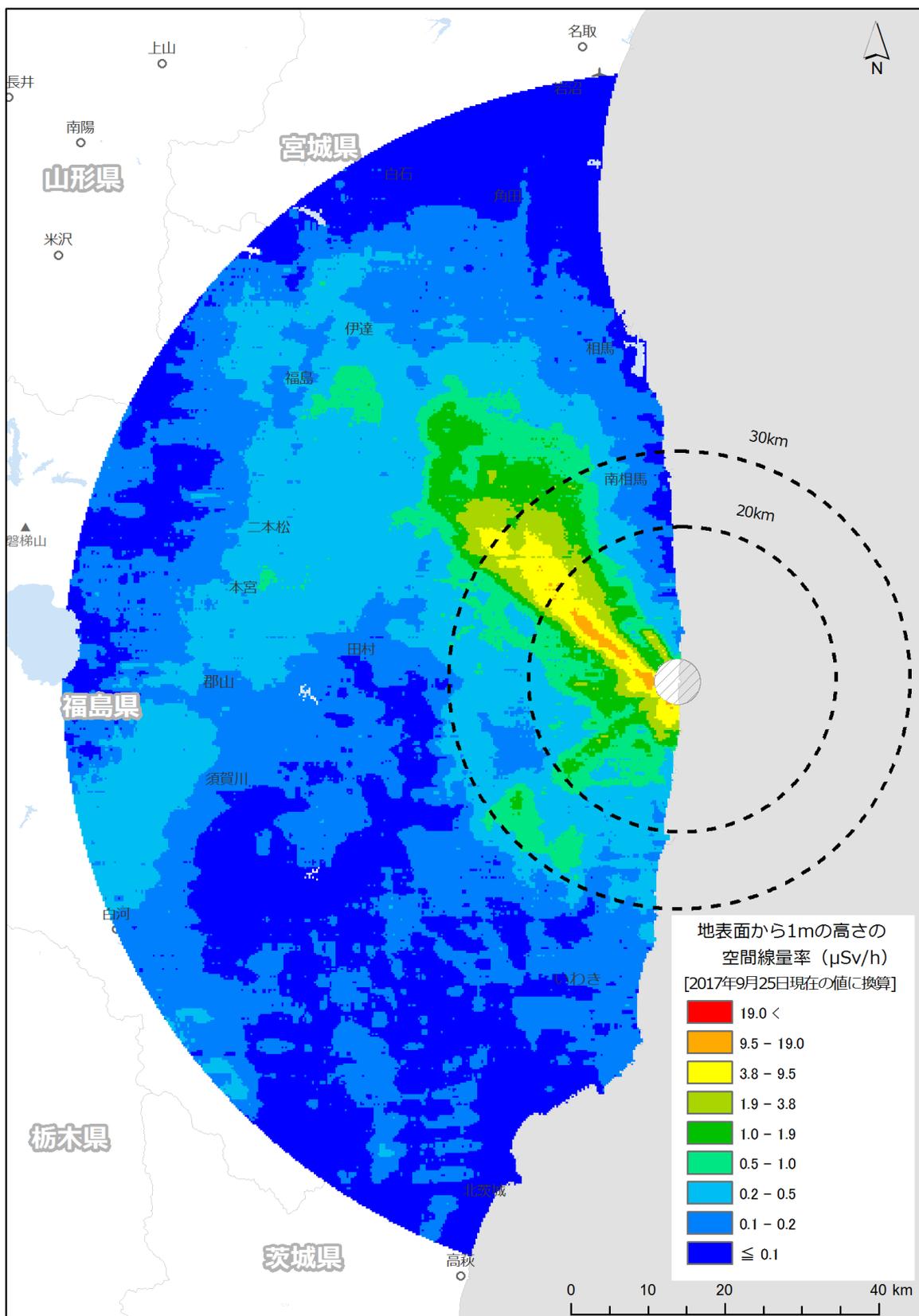


Fig. 5-1 第12次モニタリングにおける空間線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

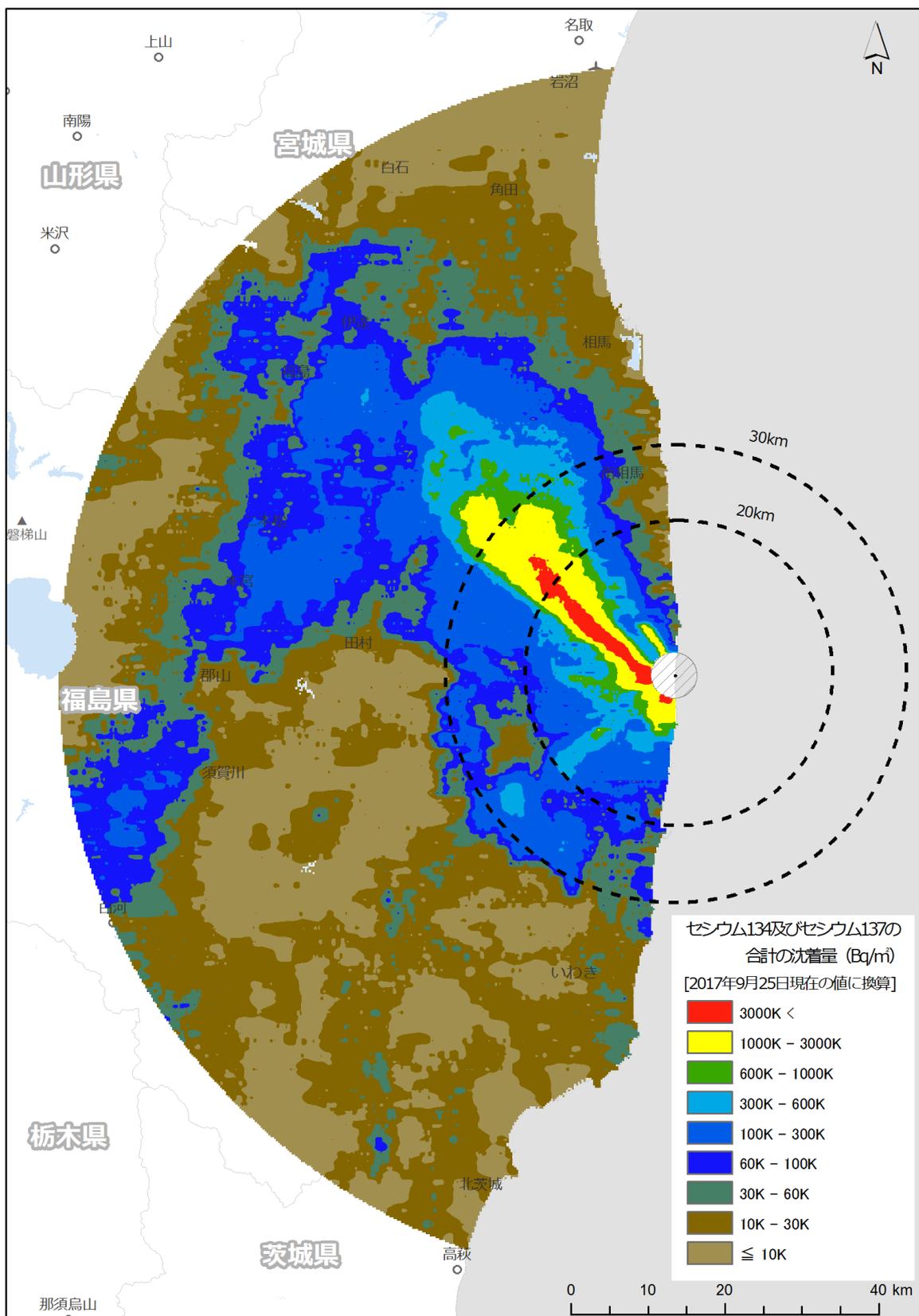


Fig. 5-2 第12次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

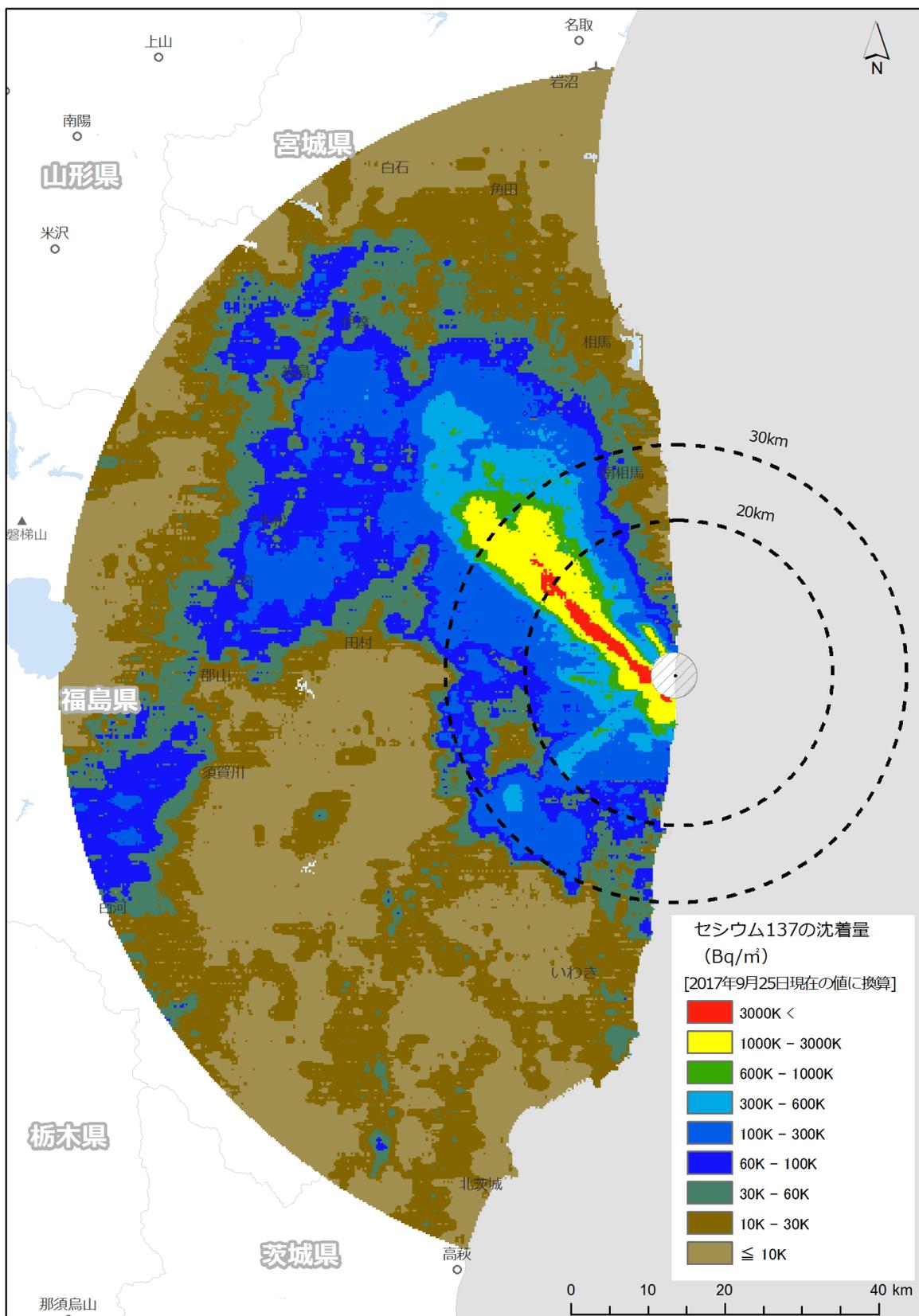


Fig. 5-3 第12次モニタリングにおける¹³⁷Cs沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

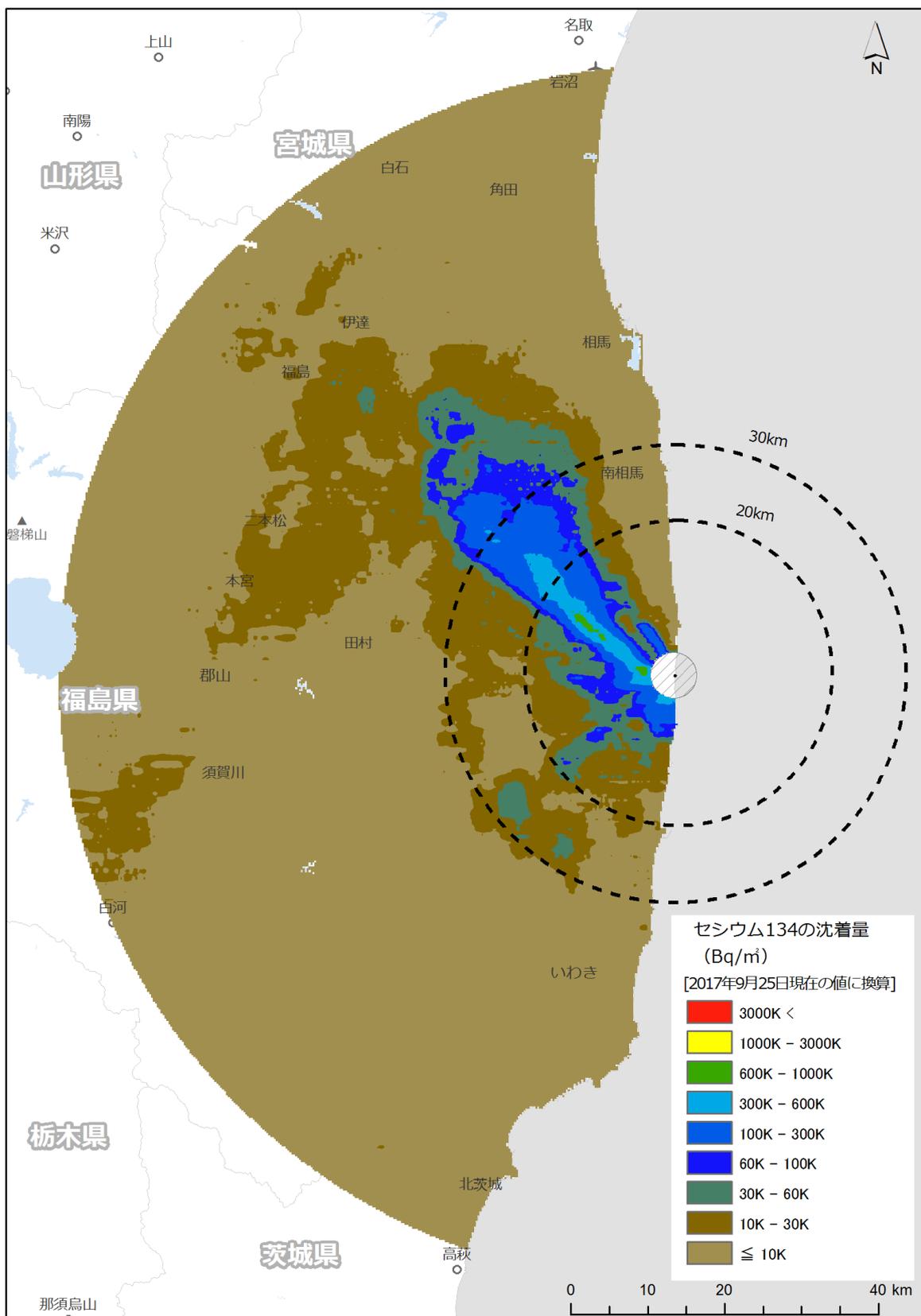


Fig. 5-4 第12次モニタリングにおける¹³⁴Cs沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

5.2. 東日本第 8 次モニタリング

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. 5-5 に示す。また、放射性セシウムの沈着量の状況を示した「放射性セシウム沈着量マップ」を Fig. 5-6 に示す。 ^{137}Cs および ^{134}Cs の沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-7 および Fig. 5-8 に示す。なお、マップの作成にあたっては、東日本第 8 次の航空機モニタリングを実施した最終日である平成 29 年 11 月 16 日現在の値に減衰補正した。

また、80 km 圏内のモニタリングとの整合性を確認するために、東日本第 8 次モニタリングを実施した最終日である平成 29 年 11 月 16 日現在の値に減衰補正し、内挿した「空間線量率マップ」および「放射性セシウム沈着量マップ」をそれぞれ、Fig. 5-9 および Fig. 5-10 に示す。 ^{137}Cs および ^{134}Cs の沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-11 および Fig. 5-12 に示す。境界部分のマップの整合性も違和感がなく、良く一致していることが分かる。

天然核種由来の空間線量率マップを Fig. 5-13 に示す。空間線量率の分布をみると新潟県と福島県の県境に天然の放射線量が高い場所が存在する。ここは、帝釈山地という花崗岩地帯として知られた場所であり、過去に日本全国の空間線量率を計測した結果と比較しても矛盾しない³⁴⁾。天然核種由来の空間線量率は、地すべり等の大きな地形の変化がなければ測定年度ごとに変化しないと考えられ、過去のデータと比較して同様な結果が得られていることを確認することは解析結果の妥当性を表すものと考えられる。そこで、天然放射性核種起源の空間線量率解析手法が確立した平成 26 年度以降のデータから、作成した天然核種由来の空間線量率マップ比較を Fig. 5-14 に示す。

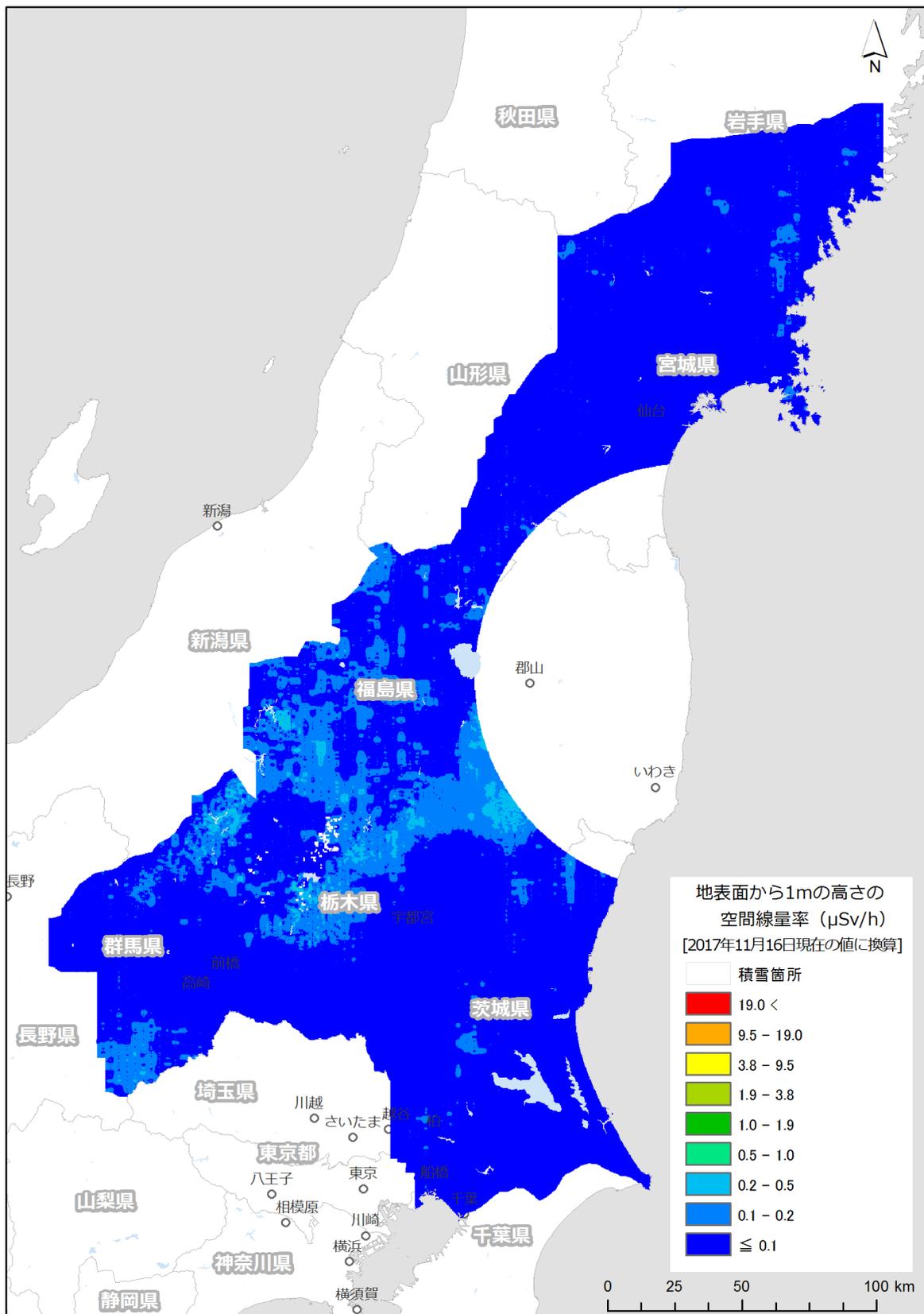


Fig. 5-5 東日本第8次モニタリングにおける空間線量率マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

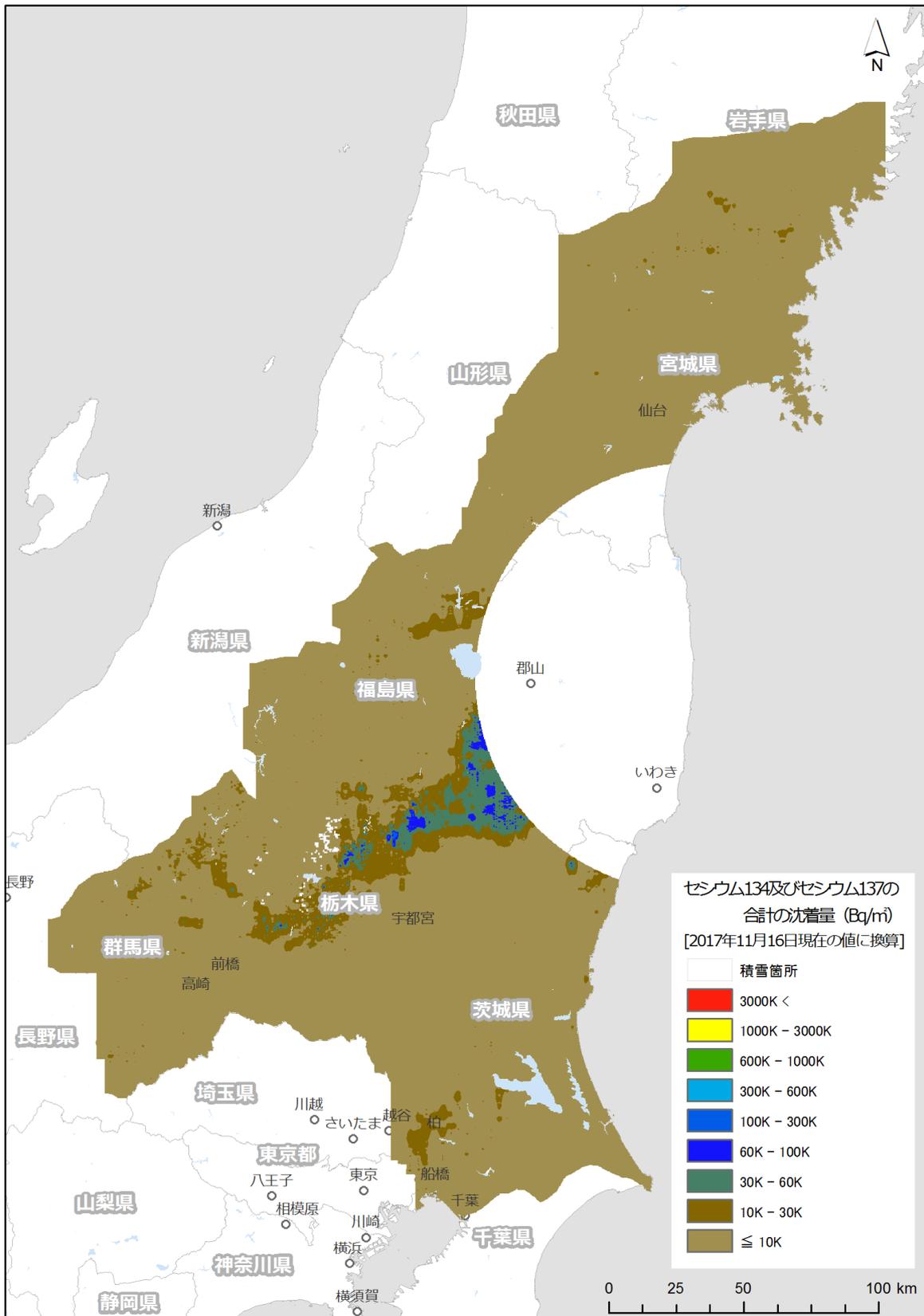


Fig. 5-6 東日本第 8 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

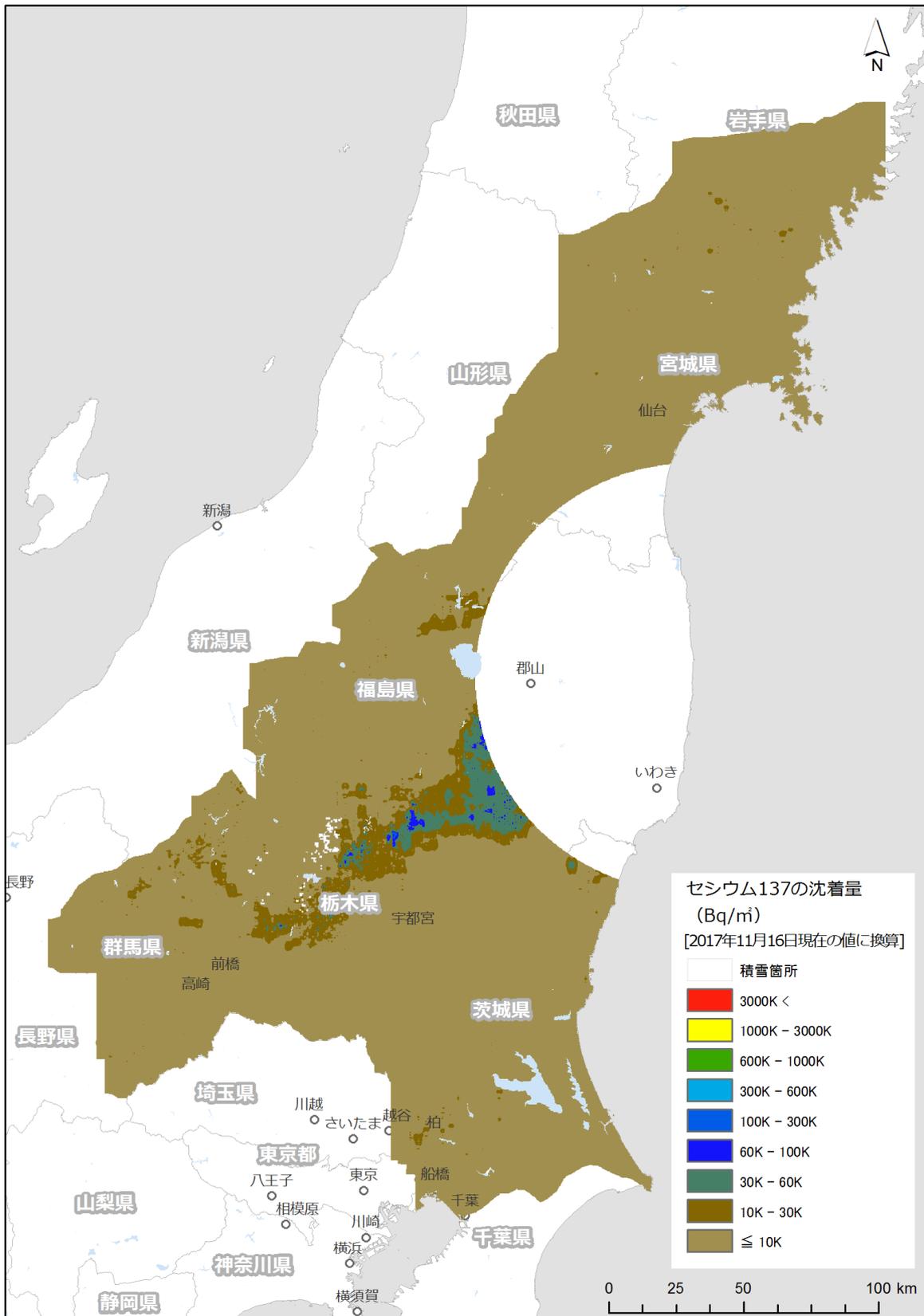


Fig. 5-7 東日本第8次モニタリングにおける¹³⁷Cs沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

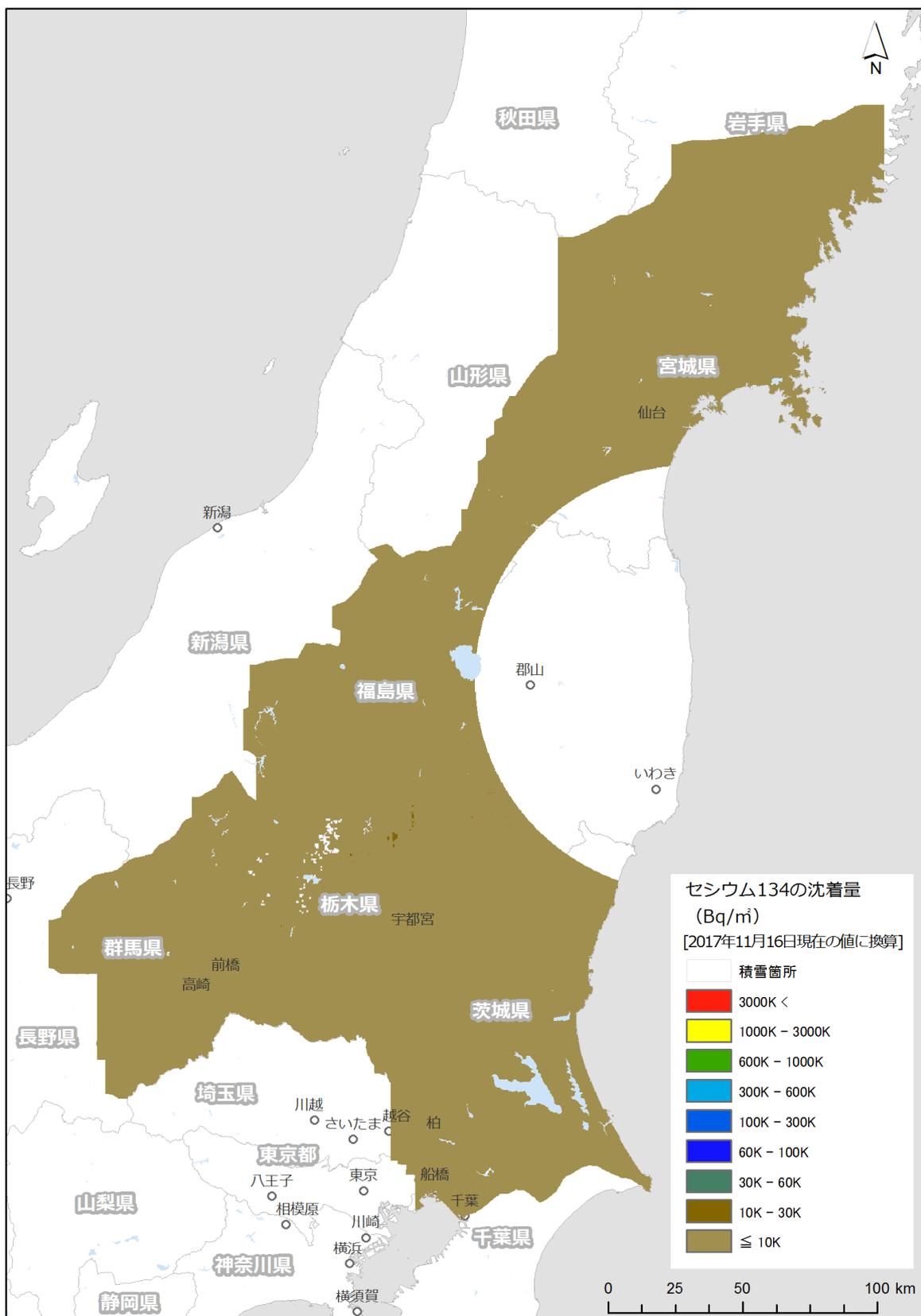


Fig. 5-8 東日本第8次モニタリングにおける¹³⁴Cs沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

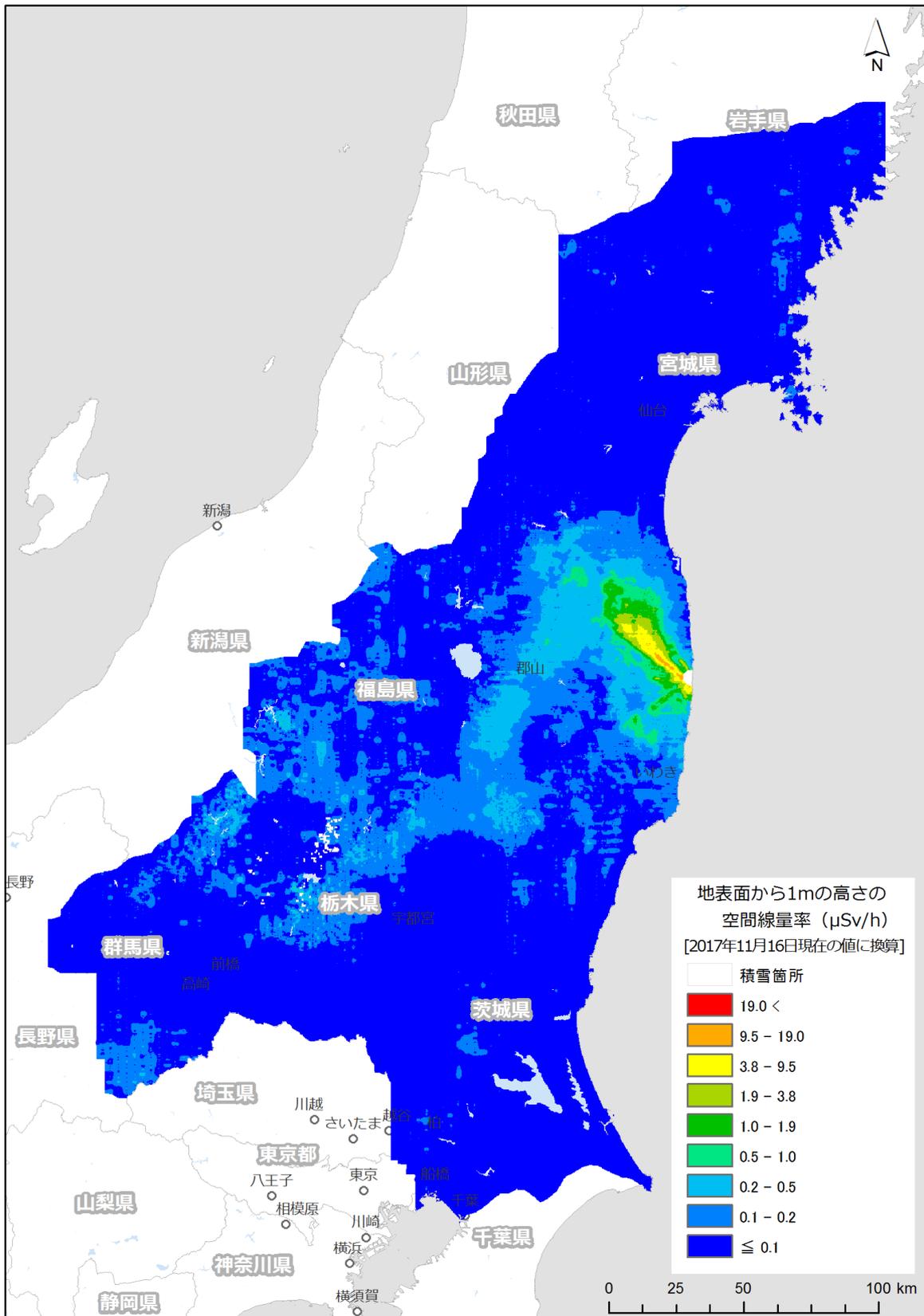


Fig. 5-9 東日本第 8 次モニタリングと第 12 次モニタリングにおける空間線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

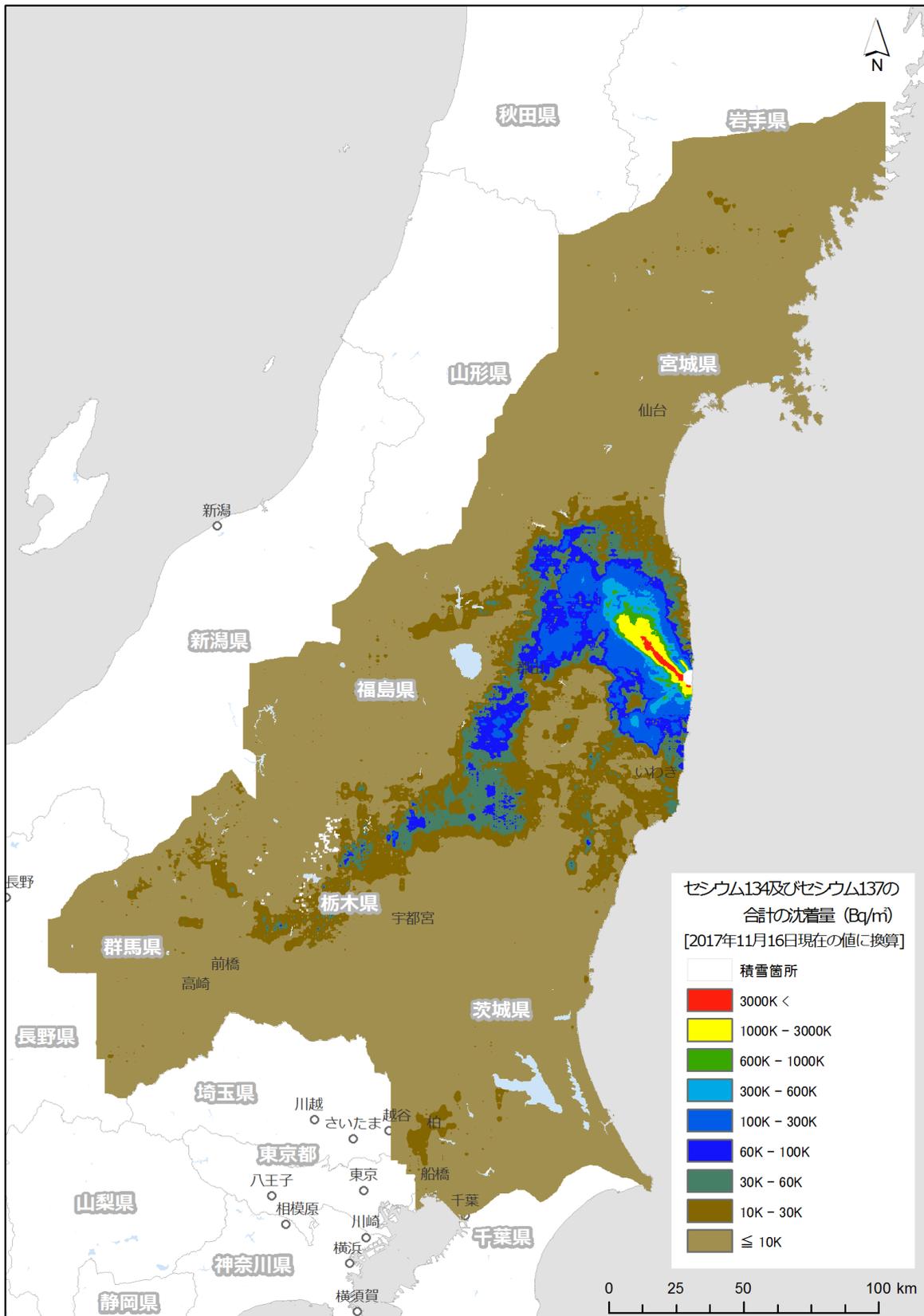


Fig. 5-10 東日本第 8 次モニタリングと第 12 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

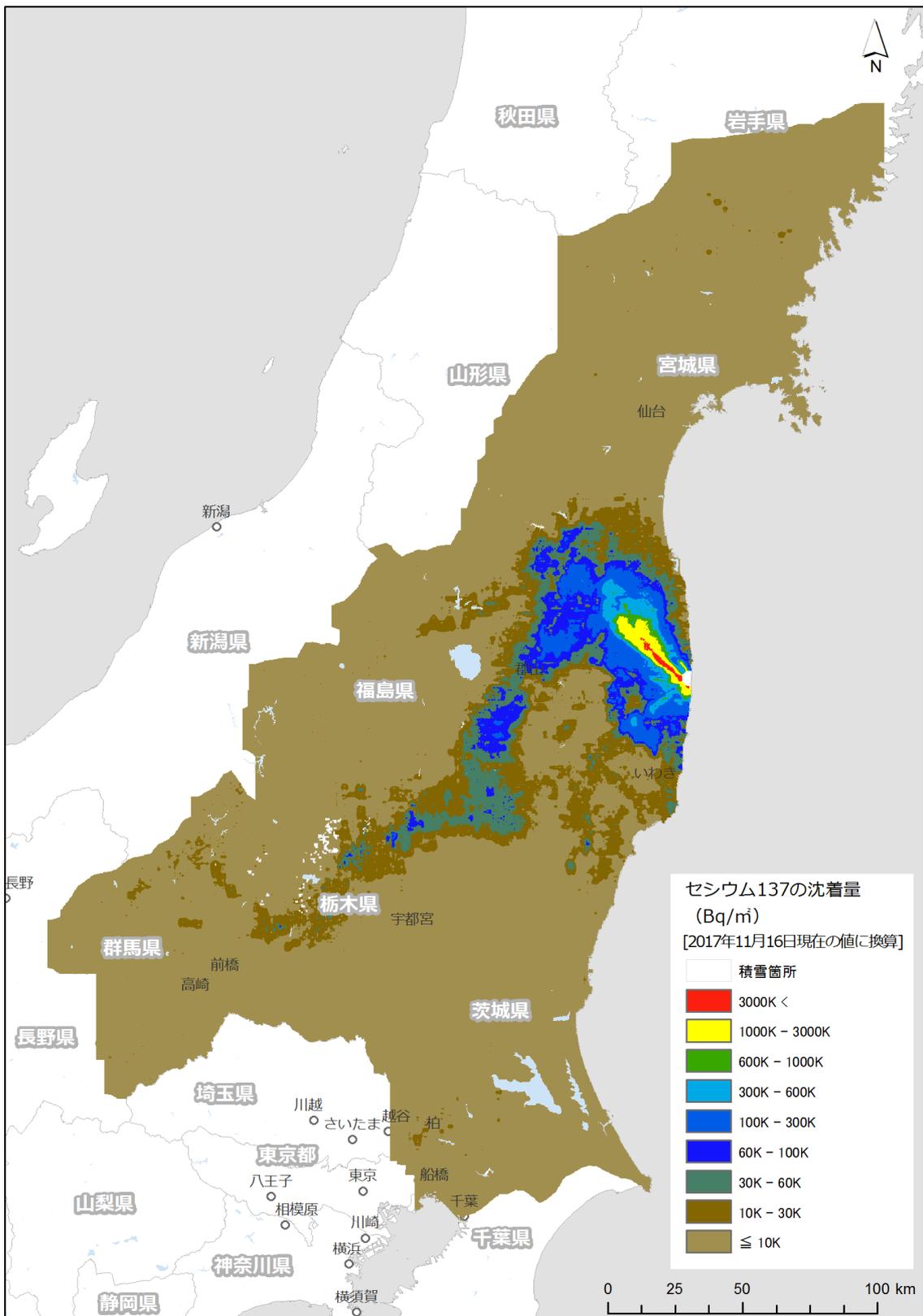


Fig. 5-11 東日本第 8 次モニタリングと第 12 次モニタリングにおける ¹³⁷Cs 沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

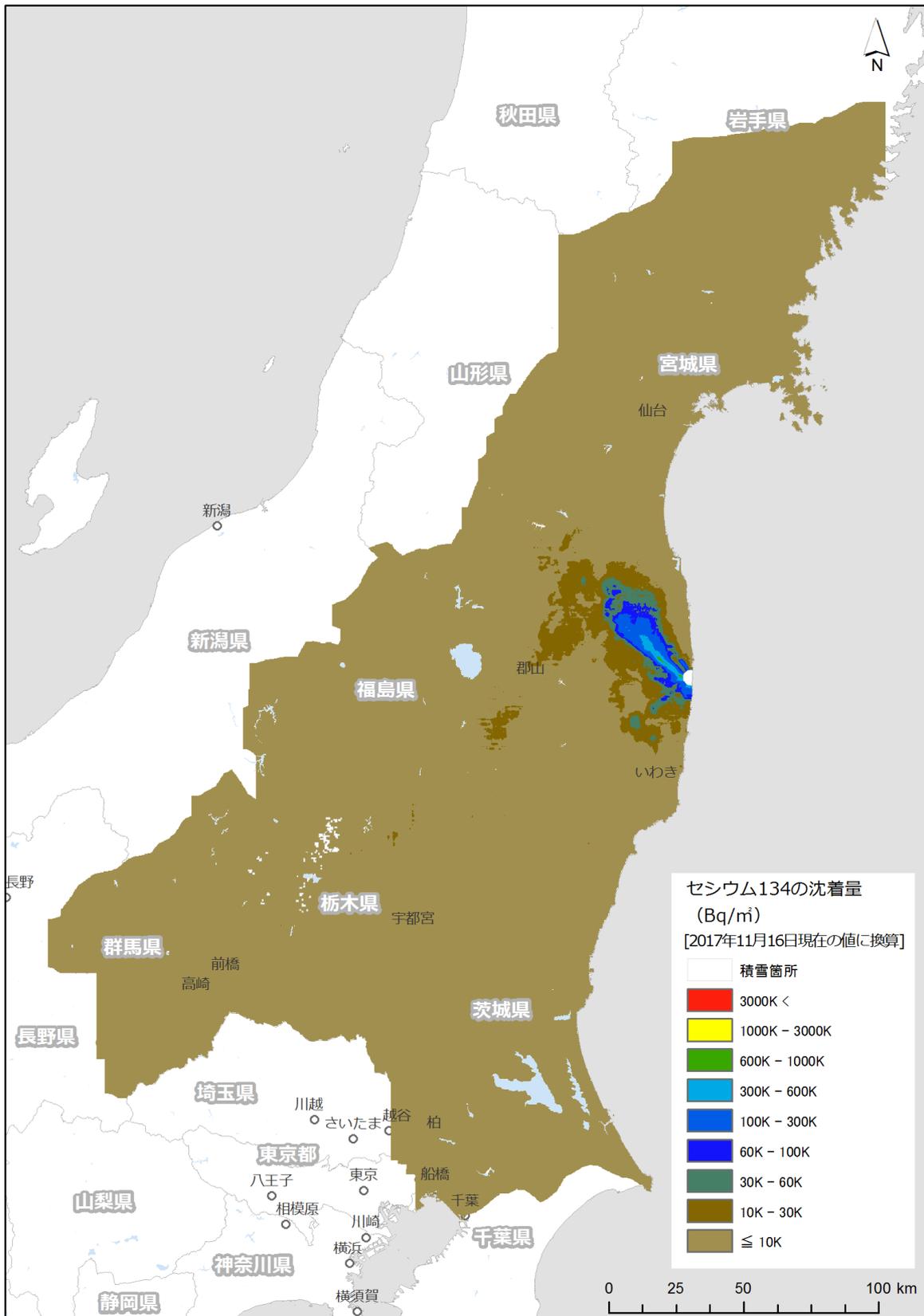


Fig. 5-12 東日本第 8 次モニタリングと第 12 次モニタリングにおける ¹³⁴Cs 沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

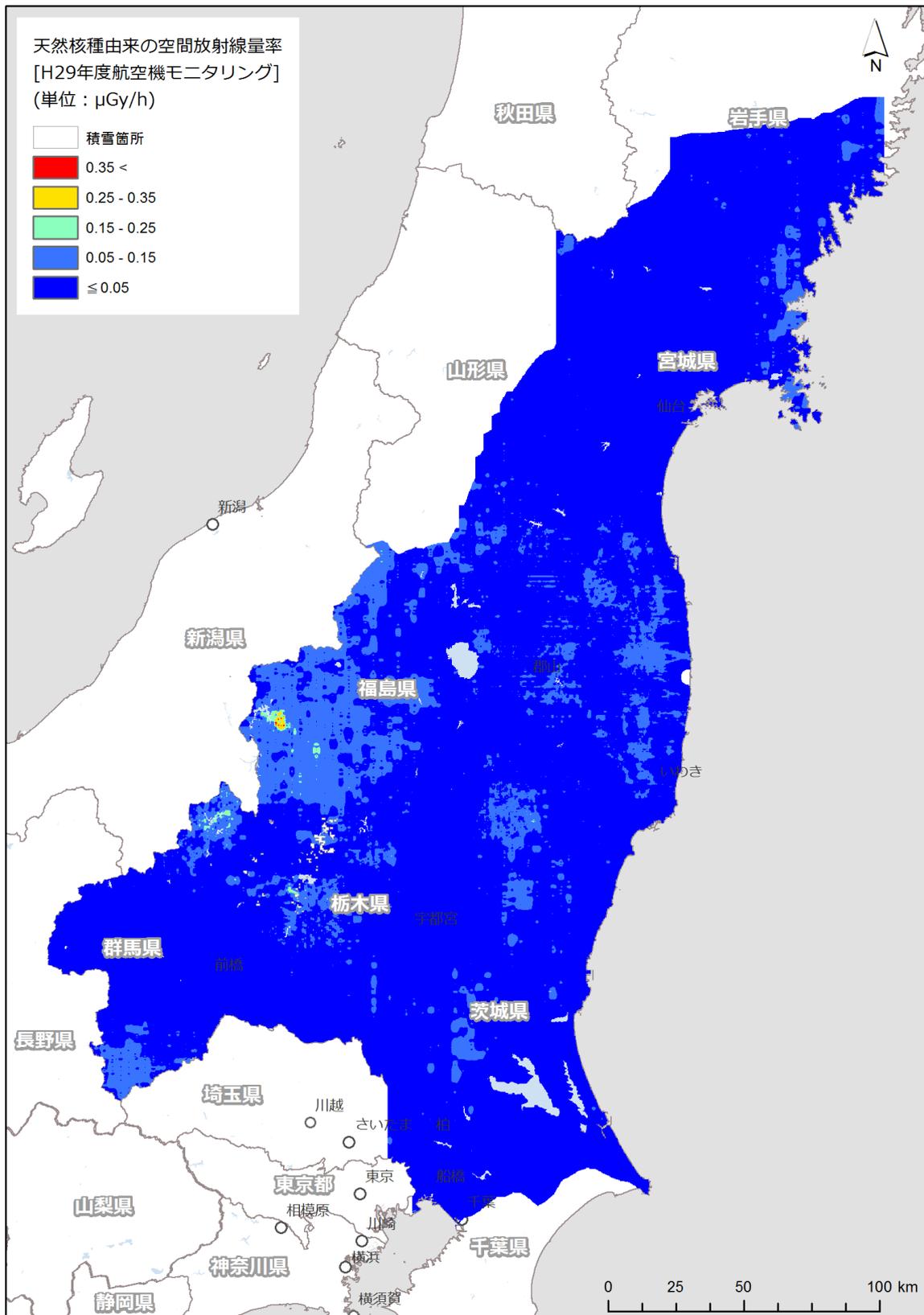
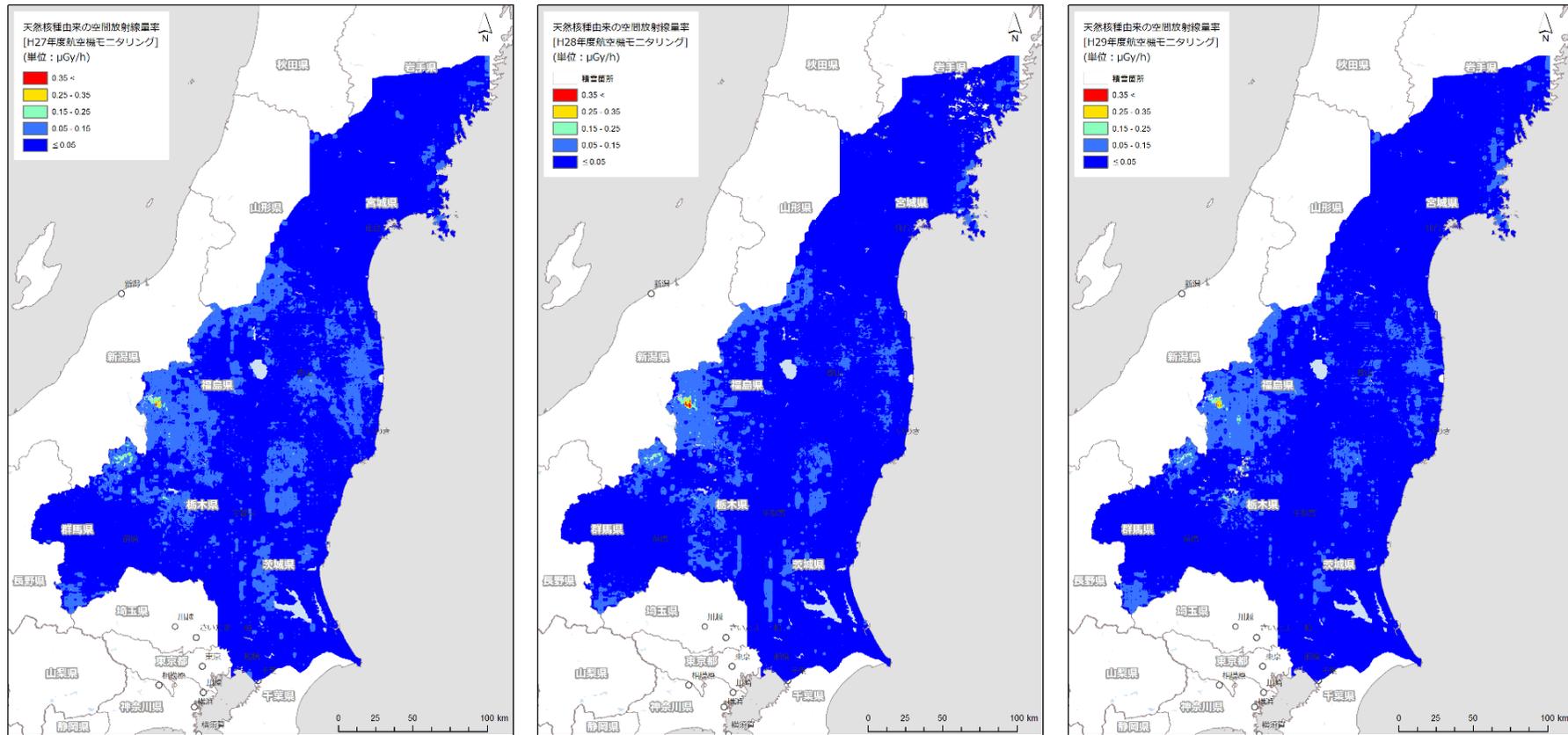


Fig. 5-13 東日本第 8 次モニタリングと第 12 次モニタリングにおける天然核種由来の空間線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



2015年のデータを解析

2016年のデータを解析

2017年のデータを解析

Fig. 5-14 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
 (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)

6. モニタリング結果の考察

6.1. 過去のモニタリング結果との比較

これまでの旧避難指示区域における航空機モニタリングの結果について示す。このように、空間線量率の高い暖色系の面積が小さくなっていることが分かる。このような空間線量率の減少傾向を定量的に把握するための比較方法を検討した。比較方法は、時期の異なるモニタリングデータについて 250 m メッシュのデータに区切り、各メッシュの中心点の測定結果の比を算出することで行った。現状と同じ手法で実施したもっとも古いデータである第 4 次モニタリングと今回の第 12 次モニタリングの全領域における比較結果を散布図として Fig. 6-2 に示す。なお、第 4 次モニタリング以前については、自衛隊のヘリを使用し、簡易的なパラメータを適用していたことから、過去の結果との定量比較の基準としては第 4 次を採用している。Fig. 6-2 に示したように、回帰直線の傾きを全体の空間線量率の平均的な減少傾向としてみるができる。図中に、重量緩衝深度 (β) を 1 と仮定し、放射性セシウムの半減期から算出した理論的な減衰を表す直線を示す。このように、航空機モニタリングの測定結果は、半減期による理論直線よりも大きく減少する傾向を示していることが分かる。一方で、80 km 圏内には、 $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 以下の天然放射性核種による影響の大きな場所が多く、放射性セシウムによる減少傾向を見るには、天然放射性核種による影響の無視できる比較的空間線量率の高い場所を選定するのがよい。また、最小 2 乗法による近似は、数値の大きな結果に影響を受けやすいので、より平均的な減少率を評価できる方法として空間線量率の比をヒストグラムとして表示することを検討した。

まず、Fig. 6-1 に示した旧避難指示区域のみを抽出し、それぞれのメッシュにおける変化量の割合 (相対減少率) を算出し、ヒストグラムとして示した。例として、第 12 次モニタリングと第 4 次モニタリングの空間線量率の比較をそれぞれ Fig. 6-3 に示す。また、第 12 次モニタリングと第 4 次モニタリングの ^{137}Cs の沈着量の比較をそれぞれ Fig. 6-4 に示す。空間線量率のヒストグラムと比較して、 ^{137}Cs のヒストグラムはばらつきが大きい。これは、空間線量率が宇宙線と自己汚染を差し引いて換算しているのに対し、 ^{137}Cs の沈着量はこれに加えて天然核種のバックグラウンドを差し引いているので計数誤差を含む数値が相対的に多くなることに起因する。このような、ヒストグラムの平均値を各モニタリングの平均的な相対減少率とし、標準偏差をばらつきとして比較した。第 4 次のモニタリングを基準とし、旧避難指示区域の空間線量率の測定結果について相対偏差のヒストグラムを求め、その平均値をプロットした図を Fig. 6-5 に示す。また、Fig. 6-6 には同様に ^{137}Cs の沈着量について比較した図を示す。Fig. 6-5 より、半減期による放射性セシウムの減衰を起因とした空間線量率の減衰傾向よりも、航空機モニタリングで測定された空間線量率の変化傾向は多く減衰していることが分かる。

本原因の考察の一助として、土壌中への浸透度合いの評価について検討した。過去の原子力施設の事故の経験から、年月ともに土壌深さ方向に放射性セシウムは移動・拡散することは知られており、前述したように重量緩衝深度 (β) によりパラメータ化され、空間線量率から放射性セシウムの沈着量に換算する係数が与えられている^{25,27)}。重量緩衝深度とは、地中の放射

性セシウムの分布形を指数関数の数式 [13] で表すとき、

$$C = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) \quad [13]$$

$x=\beta$ となる深さである。この時、 C : 地中の放射性セシウム濃度、 C_0 : 地表面放射性セシウム濃度および x : 地中の深さ (g/cm^2) である。発電所から 80 km 圏内における重量緩衝深度については、事故以降、文部科学省および規制庁により攪乱の少ない土壌サンプル (85 か所) において継続的に調査されている^{30,31)}。各調査年度における重量緩衝深度の平均値をプロットし、線形近似を行った図を Fig. 6-7 に示す。この報告結果から重量緩衝深度の変化を考慮し空間線量率を計算した。重量緩衝深度は、経過時間と一次関数の関係にあると仮定し、平成 29 年度の重量緩衝深度は外挿により求めた。線量から放射性セシウムの沈着量へ換算する係数は、文科省「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法²⁸⁾」に重量緩衝深度ごとに与えられている。与えられた数値間の換算係数については、Fig. 4-22 で示したように対数で近似した近似式から推定した。これらの条件で計算した空間線量率の経時変化の結果を Fig. 6-5 に示す。このように、航空機モニタリングの測定結果と計算結果はよく一致することが分かる。この結果は、土壌中への浸透度合いが空間線量率の変化に大きな影響を与えることを示唆している。しかしながら、航空機モニタリングによる測定の場合、平坦で攪乱の少ない土壌の場所だけでなく、森林、山林や住宅地なども測定範囲に含むため、単純な重量緩衝深度の考え方が適用できない場所も多いことから、見かけ上、数値が一致しているだけの可能性もある。今後、土地利用状況との関連や森林や構造物の上空を測定した場合の評価方法の検討が必要と考える。今後も航空機モニタリングのデータを解析・比較することにより、放射性セシウムの環境中での移行の重要な知見となると考えられる。

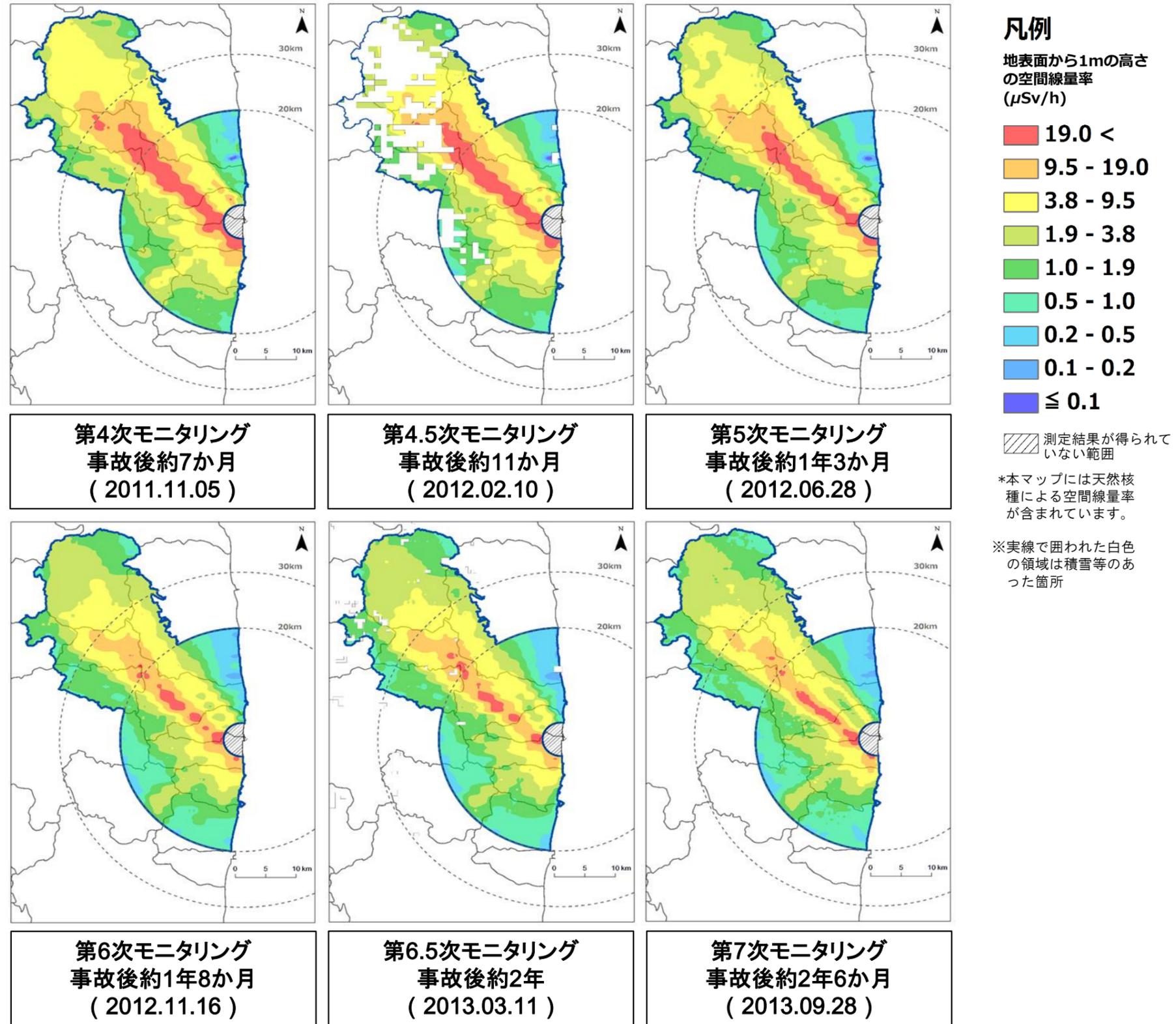


Fig. 6-1 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(1/2)

(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)

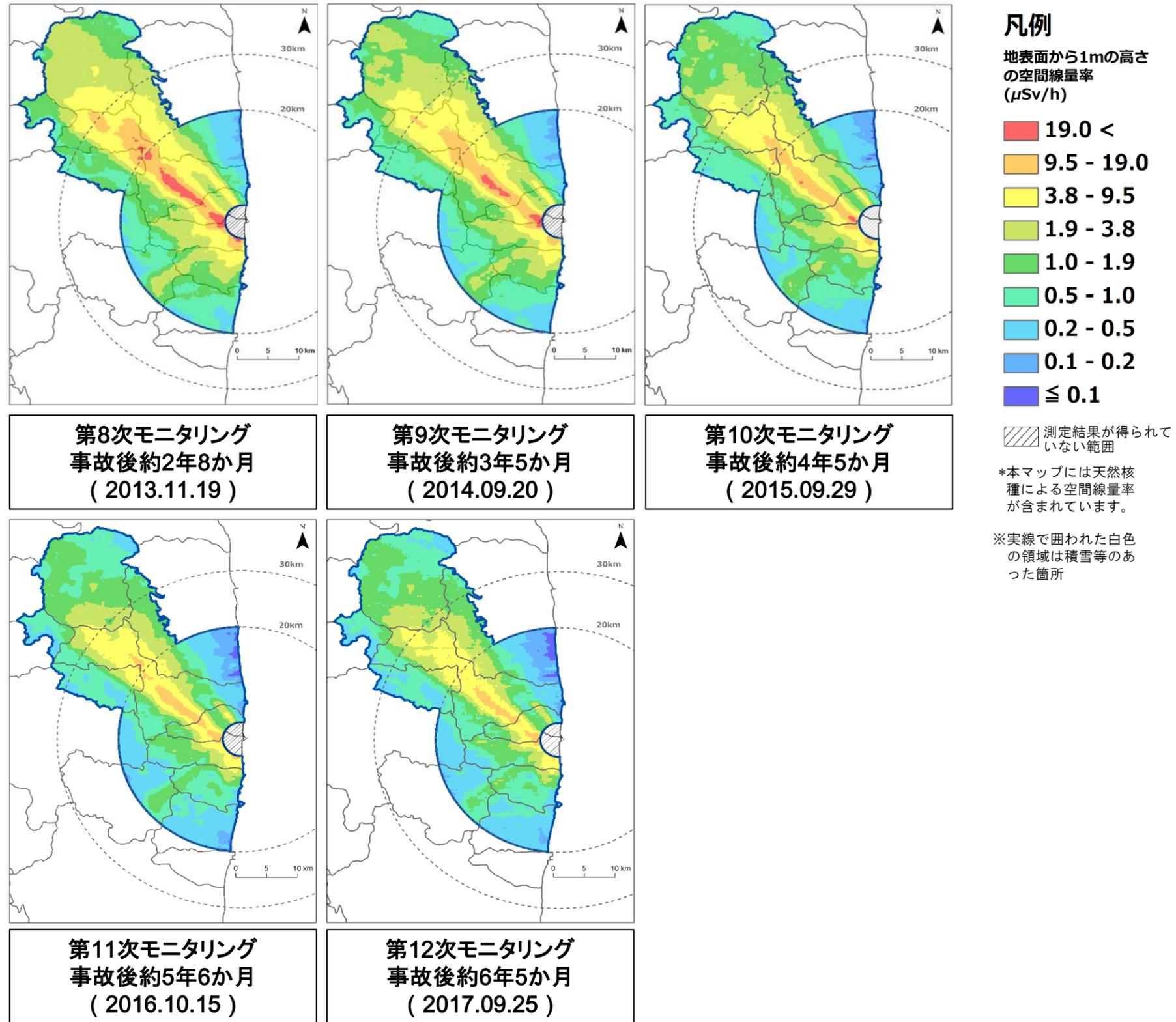


Fig.6-1 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(2/2)

(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)

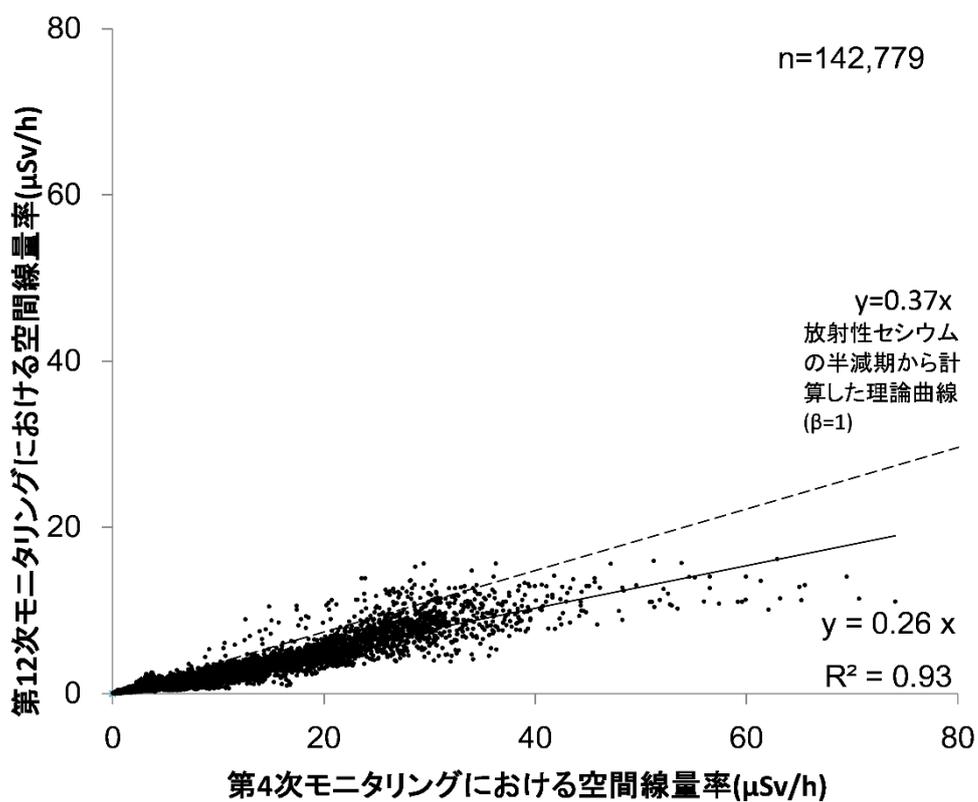


Fig. 6-2 発電所から80km圏内における第4次モニタリングおよび第12次モニタリングの空間線量率測定結果の比較

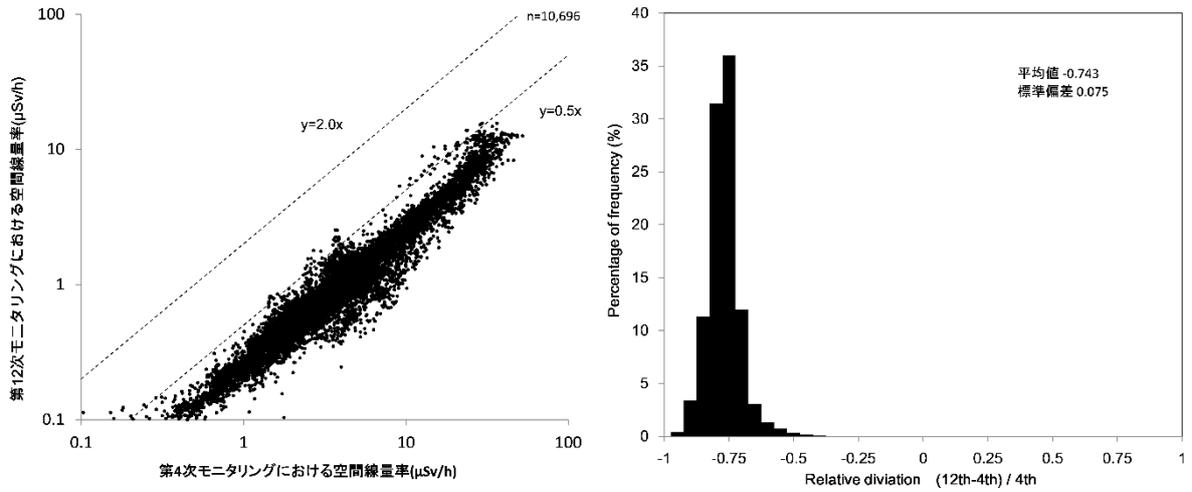


Fig. 6-3 旧避難指示区域における第 4 次モニタリングおよび第 12 次モニタリングの空間線量率測定結果の比較
(左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム)

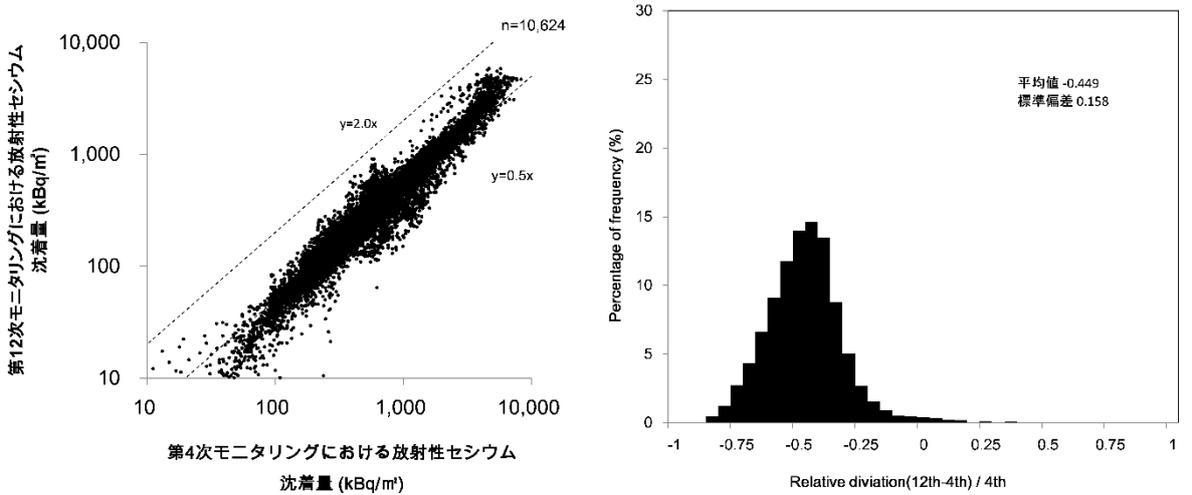


Fig. 6-4 旧避難指示区域における第 4 次モニタリングおよび第 12 次モニタリングの放射性セシウム沈着量測定結果の比較
(左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム)

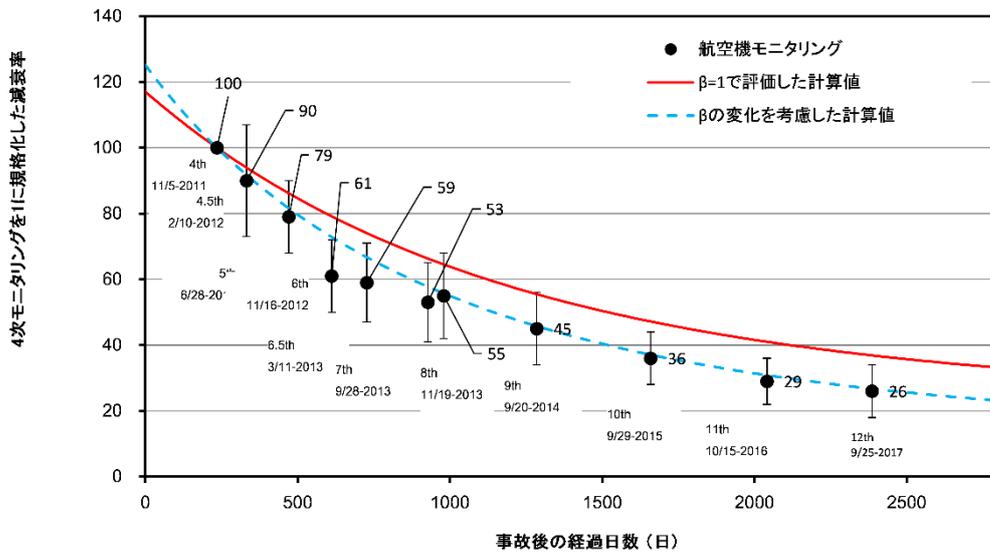


Fig. 6-5 航空機モニタリングによる旧避難指示区域内の空間線量率の変化傾向

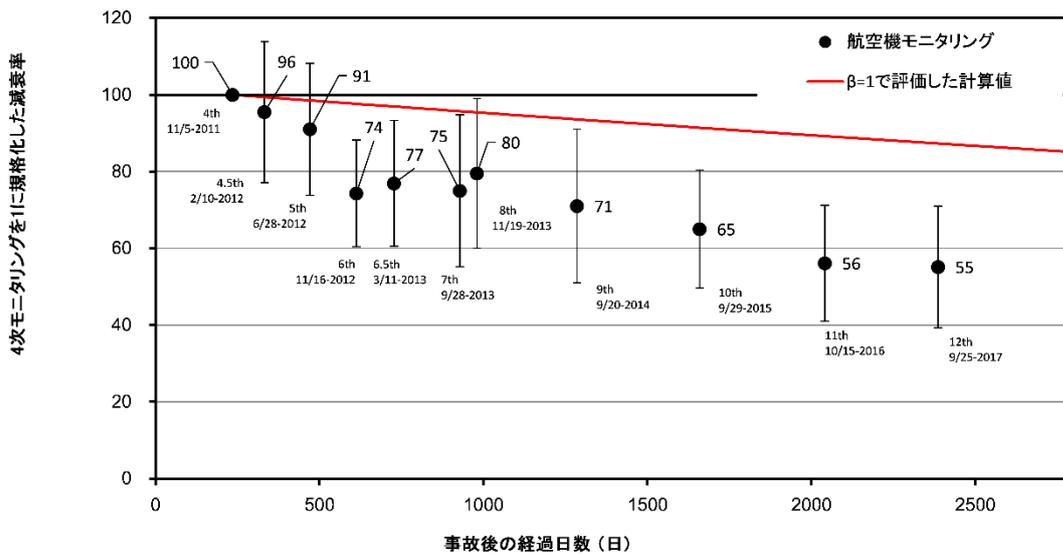


Fig. 6-6 航空機モニタリングによる旧避難指示区域内の ¹³⁷Cs 沈着量の変化傾向

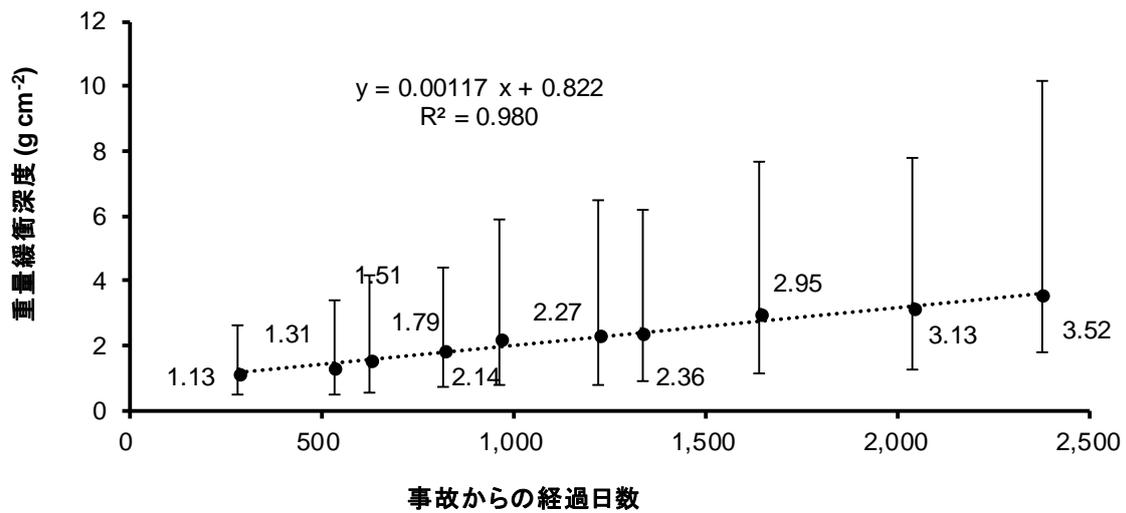


Fig. 6-7 事故からの経過日数と重量緩衝深度の関係

文部科学省および原子力規制庁の実施した「東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」事業の報告書^{30, 31)}から調査結果の平均値をプロットし、一次関数で近似

6.2. 土地利用による空間線量率の変化傾向の違い

発電所周辺における土地利用形態による空間線量率の減少率の違いを考察するため、国土地理院が提供している「国土数値情報土地利用細分メッシュデータ³⁷⁾」を利用した。80 km 圏内の土地利用図について、Fig. 6-8 に示す。これらの土地利用区分の内、最も違いが現れると考えられる市街地部および森林部について、過去の80 km 圏内のモニタリングを比較し、空間線量率の減少率を比較した。市街地部および森林部の定義は以下の通りである。

- ・森林部: 多年生植物の密生している地域とする。Fig. 6-8 の凡例中、森林を指す。
- ・市街地部: 住宅地、市街地等で建物が密集しているところ、鉄道、操車場、道路などで、面的にとらえられるもの、運動競技場、空港、競馬場、野球場、学校港湾地区、人工造成地の空地等とする。Fig. 6-8 の凡例中、建物用地、道路、鉄道、その他用地を指す。

空間線量率の比較は、6.1 項に示したように、測定範囲を 250 m×250 m メッシュに区切り、同一メッシュ上の空間線量率の相対偏差を算出し、平均値と標準偏差を求めた。比較の例として、第 4 次モニタリングと第 12 次モニタリングにおける市街地部および森林部のメッシュごとの相対偏差の頻度をヒストグラムにして Fig. 6-9 に示す。第 4 次モニタリングを基準にして、過去のモニタリングにおいてのそれぞれ土地利用における空間線量率の比率を Table 6-1 に示す。なお、誤差として示したのは、相対偏差の標準偏差 ($\sigma=1$) である。第 12 次モニタリングと第 4 次モニタリングの比をみると、平均値で市街地部が 27 %、森林部が 29 %であることがわかった。すなわち、平均値で 2 %程度、市街地部の方が森林部より減少率が大きい。これは、市街地において行われている除染やアスファルト上の放射性物質が雨水等で洗い流された効果によるものと考えられる。また、過去のモニタリングの結果においても、森林部よりも市街地の方が、2 ~ 7 %減少率が大きいことがわかった。この結果から、傾向として森林部よりも市街地の方が空間線量率の減少幅が大きい傾向にあることを示していると考えられる。また、全エリアの減少率と森林部の状況は概ね同様であった。これは、80 km 圏内の土地利用の 65 %が森林部であることに起因すると考えられる。規制庁による発電所近傍の車両モニタリングや人手による空間線量率測定結果から解析した報告書³¹⁾をみると、森林部においては森林部以外と比較して減衰傾向が小さいことが示されており、本データも矛盾しない。ただし、地上の測定結果と比較して航空機モニタリングの方が減衰率の差が小さいのは、航空機モニタリングによる空間線量率の位置分解能と地上測定の位置分解能の差に起因すると考えられる。

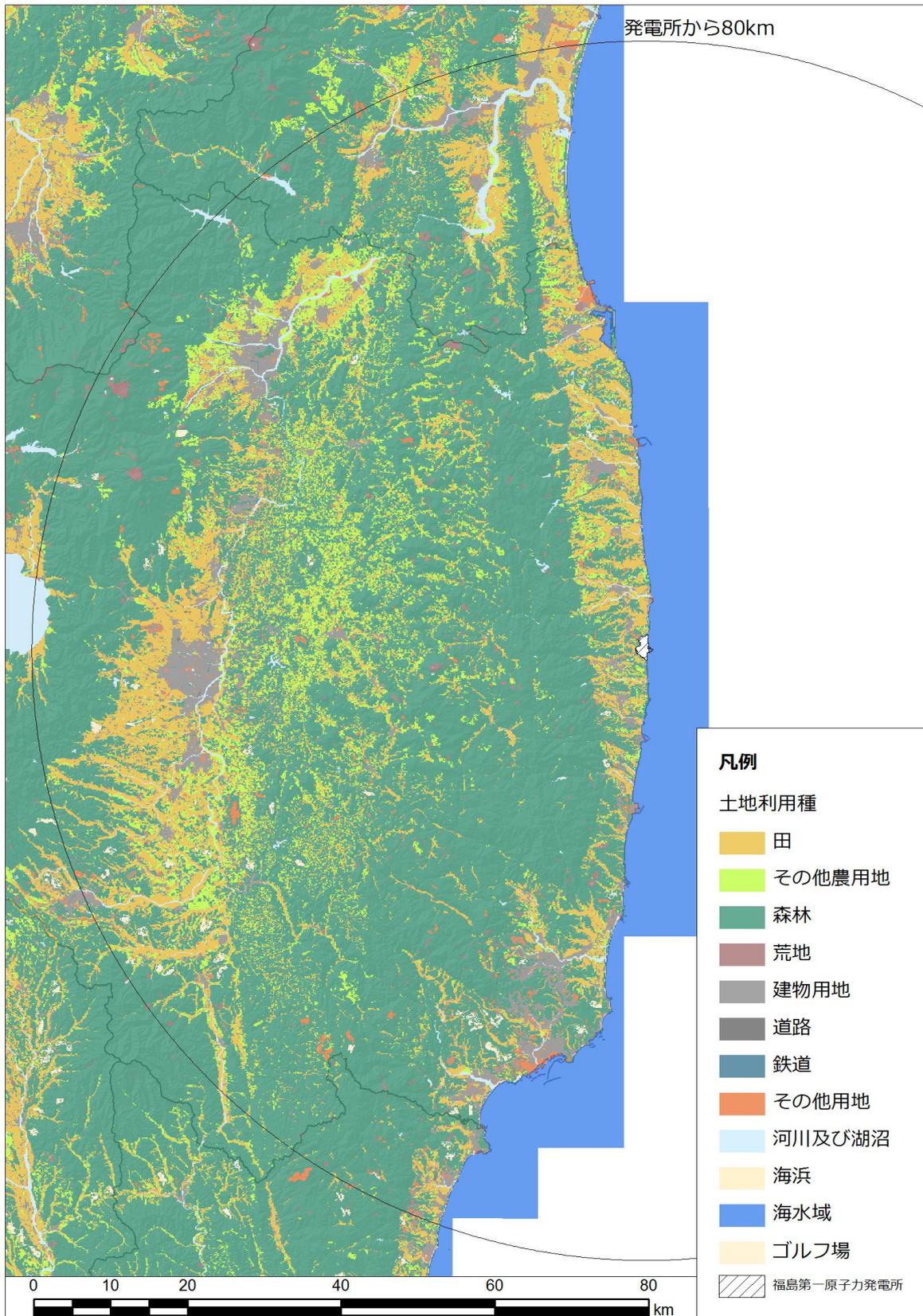


Fig. 6-8 発電所から80km圏内における土地利用図
(平成21年度 国土地理院土地利用調査データより)

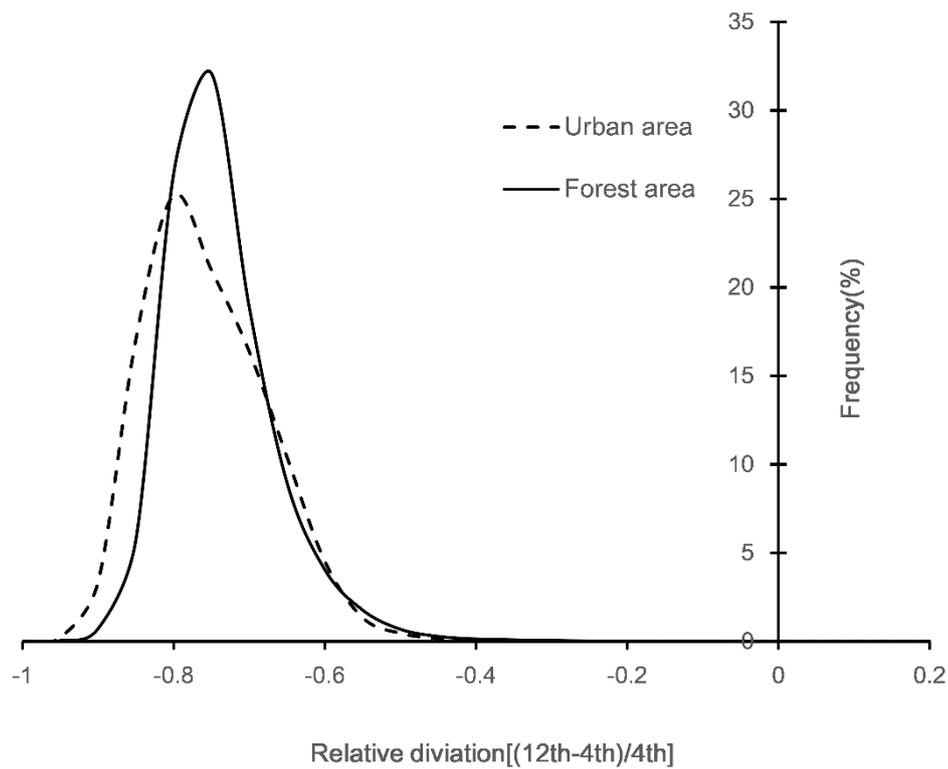


Fig. 6-9 森林部および市街地における減衰率の比較
(第4次モニタリングと第12次モニタリングの比較)

Table 6-1 森林部および市街地部における空間線量率の比較

	Gross area (km ²)	Ratio of dose rate (%)							
		5th/4th Ave. (%)	6th/4th Ave. (%)	7th/4th Ave. (%)	8th/4th Ave. (%)	9th/4th Ave. (%)	10th/4th Ave. (%)	11th/4th Ave. (%)	12th/4th Ave. (%)
Urban area	732	70 ± 11	55 ± 8.8	50 ± 8.4	44 ± 9.7	41 ± 8.8	34 ± 8.7	27 ± 6.7	27 ± 8.1
Forest area	5,841	77 ± 10	57 ± 8.5	54 ± 9.0	49 ± 9.2	44 ± 9.2	37 ± 8.1	30 ± 6.4	29 ± 7.4
All area	8,923	72 ± 11	56 ± 9.0	53 ± 9.0	48 ± 10	43 ± 10	37 ± 8	29 ± 7	28 ± 7.5

7. 地形補正手法のシステム化

7.1. 背景

航空機モニタリングで取得されたデータを解析する際、測定対象地形は平坦であるという前提の基、空間線量率等への換算が行われている。実際の地形は平坦なものや山地等の起伏のある場合があり、特に日本は国土の7割が山地である。福島県内の限定された範囲内に対して、地形影響補正を適用した例があり、その結果、補正により一定の精度向上効果が得られたことが示された²⁶⁾。このことから、さらなる地形影響評価と今後の航空機モニタリング事業において日本全国の様々な地形に対して換算精度を維持するため、地形を考慮した航空機モニタリングデータの解析のための実用的なソフトウェアシステムを作成した。

7.2. 地形影響評価システムの概要

本システムでは、モンテカルロ粒子輸送コード PHITS³⁸⁾を用いて、空間線量率換算に用いられる換算係数（航空機モニタリングで測定される計数率に対する地上空間線量の比）を地形に応じて計算する。PHITS の入力ファイルには線源および土壌表層を定義する必要があるが、これらは数値標高モデル DEM を基に GIS データ解析から Esri 社製 ArcGIS³⁹⁾を用いてモデル化し、入力する。さらに、地形の起伏度を数値として示し、簡易的な補正へ利用することを検討するため、DEM データの解析結果から簡易的な補正係数を算出するシステムも作成した。システム全体のフローを Fig. 7-1 に示す。

本システムの動作の流れを以下に示す。

(1) 地形データ抽出：

航空機モニタリングデータの各測定ポイント直下から任意の半径内の DEM データを抽出する。

(2) PHITS 入力ファイル作成：

測定ポイントごとに抽出された DEM を基に PHITS の入力ファイルを作成する。

(3) PHITS 出力データ抽出：

PHITS の出力データのうち、必要なデータを抽出し、換算係数を出力する。

(4) 簡易換算係数算出：

測定ポイントごとに抽出された DEM データごとに平均値や分散等の値を解析し、簡易的な換算係数を出力する。

以上の(1)~(4)の各項目について以降に詳細を述べる。

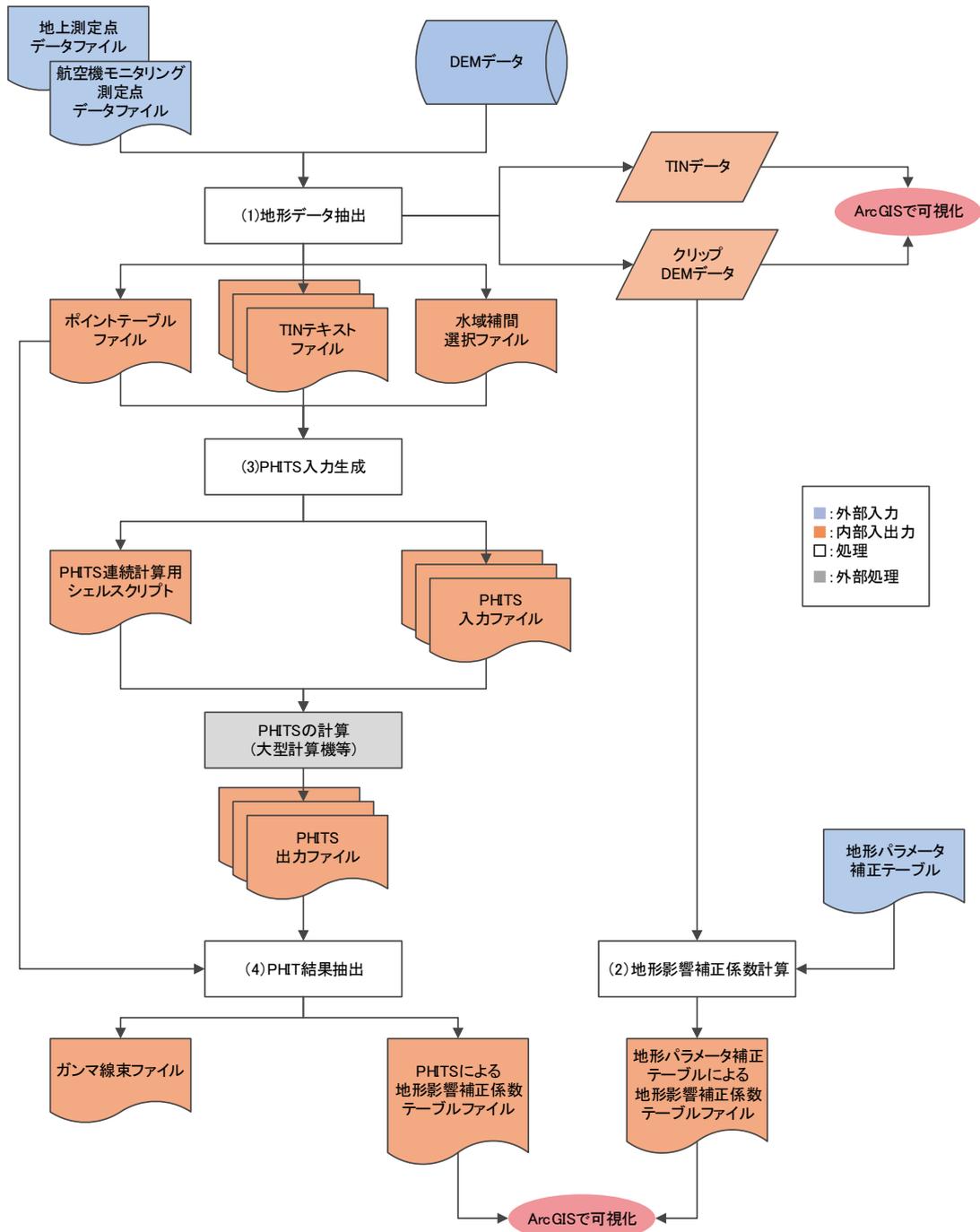


Fig. 7-1 システム全体のフロー

7.3. 地形データ抽出

航空機モニタリング測定点ごとのDEMデータを抽出する。DEMデータは10mメッシュのDEMを用いる。このほか、1mおよび5mメッシュも使用可能である。Fig. 7-2にシステムのGUIを示す。GUI上では、抽出したDEMデータや以降のPHITS入力ファイル作成等で出力される各データを格納するためのプロジェクトの作成、航空機モニタリング測定点データ、DEMのメッシュサイズ、DEMを抽出する半径が選択できる。さらに、地上測定データとの比較を目的として、航空機モニタリング測定点に近接した地上測定点の抽出も行える機能も整備されている。本GUIを用いて、DEMデータを抽出した例をFig. 7-3に示す。このようなDEMが測定点数分抽出される。

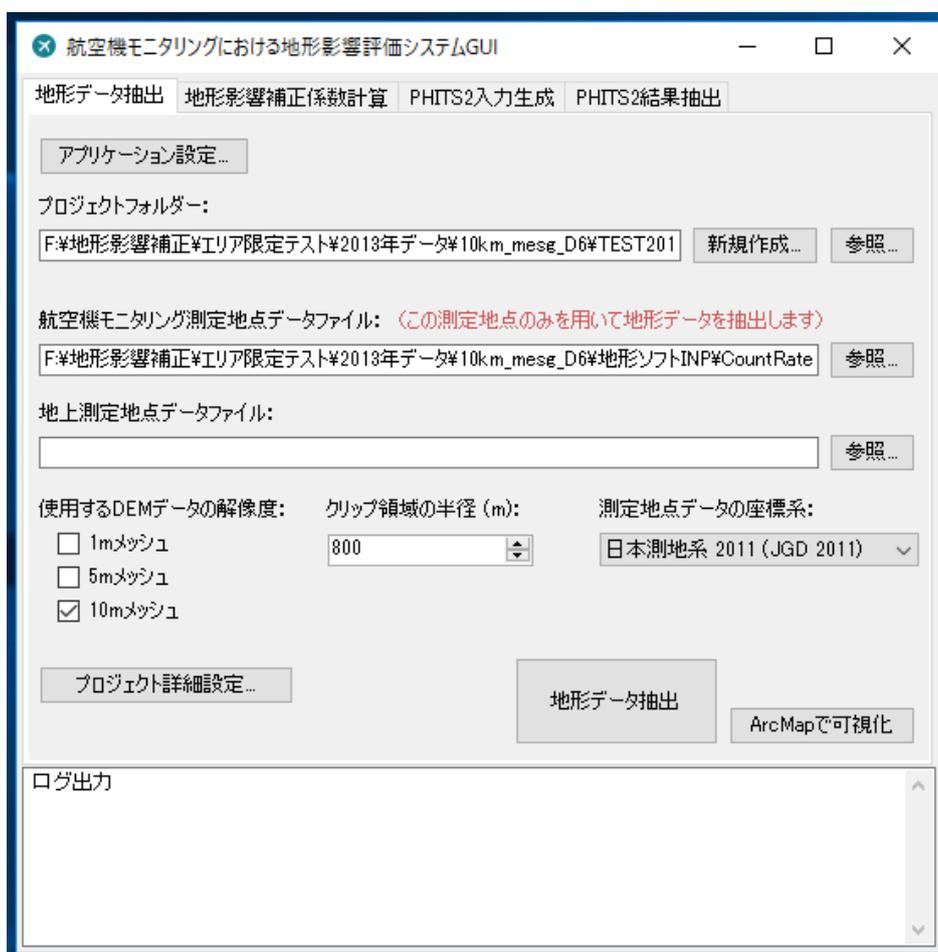


Fig. 7-2 地形データ抽出 GUI

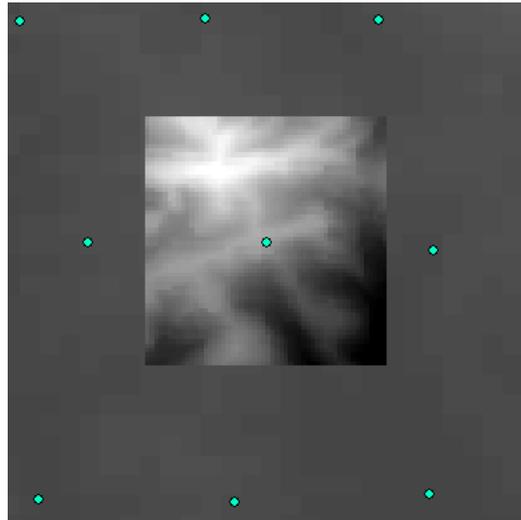


Fig. 7-3 DEM データの抽出結果
緑丸は航空機モニタリング測定点を示す。

7.4. PHITS 入力ファイル作成

抽出した DEM データから PHITS の入力ファイルを作成する GUI を Fig. 7-4 に示す。作成する入力ファイルは PHITS ver. 3.02 で実行可能な形式とした。PHITS 上では Fig. 7-5 に示すような起伏地形表面から任意の高度におけるガンマ線フラックスの計算を行う。測定点ごとの地形の起伏と地表面に沈着した放射性核種を設定するためには、[Surface]、[Source]のセクションにてそれぞれの条件に応じた設定を行う必要がある。これらの設定のため、DEM データを TIN 変換し、さらに三角ポリゴンに変換する (Fig. 7-6)。三角ポリゴンを ASCII 変換すると、Fig. 7-7 のように三角形の頂点座標が出力される。この座標を用いて、PHITS 入力ファイル内の[SURFACE] セクション内で面を定義する。[Source]セクションでは三角柱形状分布ソースを三角ポリゴンごとに定義する。三角柱形状分布ソースは上表面から指数関数的に線源強度を減衰させる分布を定義できるため、放射性核種が沈着した時点からの日数に応じた緩衝深度の設定を行う。また、ガンマ線フラックスの計算出力は[T-Point]タリーを用いる。ガンマ線フラックスの計算高度は航空機モニタリング測定点データから抽出された対地高度が設定される他、対地高度 300m 及び 1m についても出力される。また、ガンマ線フラックスは 50 のエネルギー bin ごとに出力される。これは、以降の処理で地上 1m のガンマ線フラックスと換算係数を用いて空間線量率に変換する場合に備えてである。

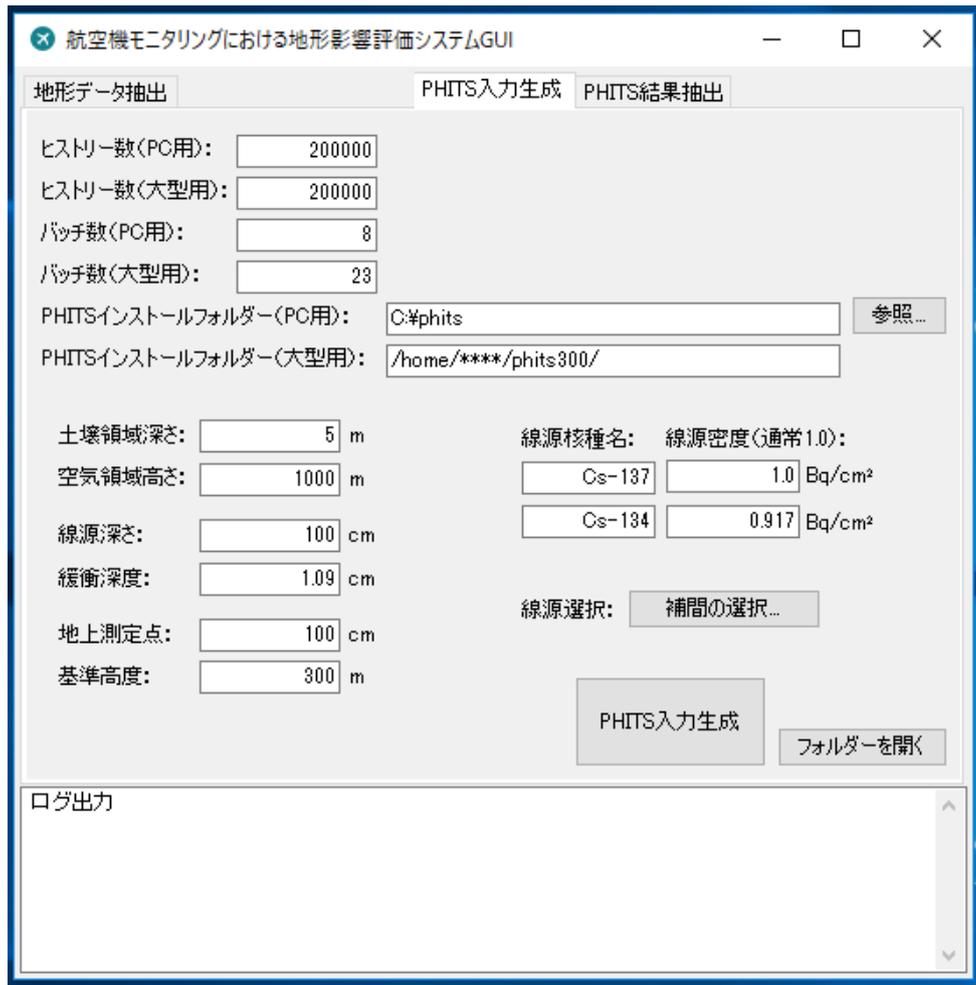


Fig. 7-4 PHITS 入力ファイル作成 GUI

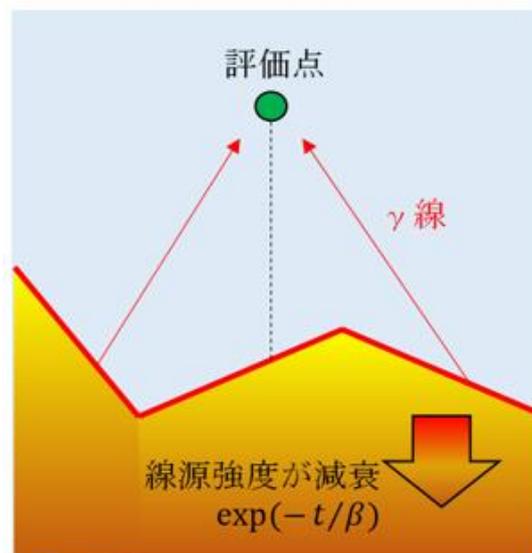


Fig. 7-5 PHITS 上の計算体系

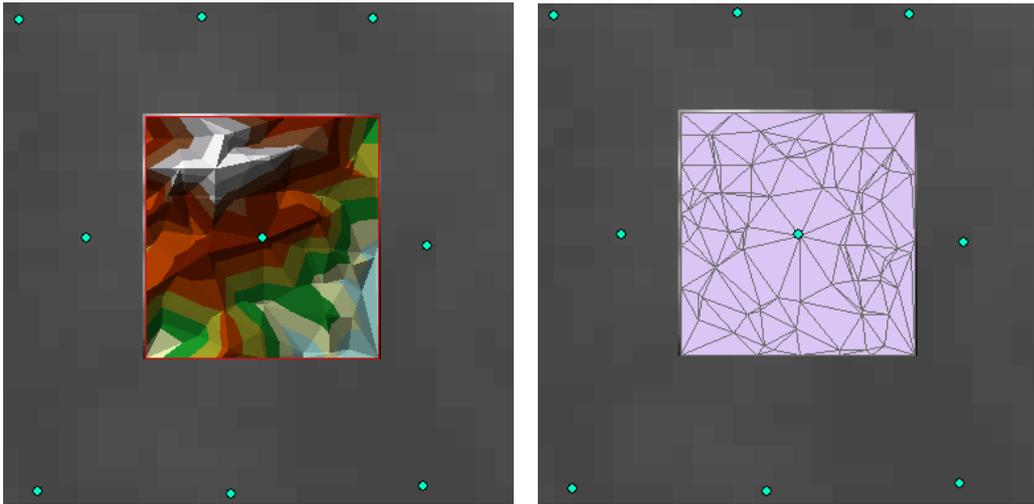


Fig. 7-6 DEM を変換して得られる TIN 及び三角ポリゴン
(左) TIN 、(右) 三角ポリゴン

```

1
79946.3698378101 191167.6083053036 526.4000
80001.8561669192 191245.2891657464 541.5000
80079.5370276729 191145.4137737483 530.5000
79946.3698378101 191167.6083053036 526.4000
END
2
80135.0233567820 191267.4836973010 519.5000
80079.5370276729 191145.4137737483 530.5000
80001.8561669192 191245.2891657464 541.5000
80135.0233567820 191267.4836973010 519.5000
END
3
80212.7042175354 191200.9001026361 529.1000
80079.5370276729 191145.4137737483 530.5000
80135.0233567820 191267.4836973010 519.5000
80212.7042175354 191200.9001026361 529.1000
END
4
80079.5370276729 191145.4137737483 530.5000
80212.7042175354 191200.9001026361 529.1000
80179.4124200700 191123.2192421935 500.3000
80079.5370276729 191145.4137737483 530.5000
END

```

Fig. 7-7 三角ポリゴン頂点座標の出力例

7.5. PHITS 出力データ抽出

作成した PHITS 入力ファイルを実行後に航空機モニタリング測定点の数だけ出力される。複数の出力ファイルを一度に解析するため、それぞれの出力ファイルから必要な値を抽出する GUI を作成した (Fig. 7-8)。出力ファイル群から抽出したガンマ線束データを航空機モニタリング測定点高度における計数率(C)、平坦な地形上の計数率(C_{flat})地上 1m 空間線量率(D_{1m})に変換する。

ここからさらに、式(1)、(2)のように地上 1m 線量率換算係数(CD)および地形影響補正係数(F)を出力する。

$$CD = C/D_{1m} \quad (1)$$

$$F = C/C_{flat} \quad (2)$$

ここで得られた CD を用いて、航空機モニタリングデータの空間線量率への換算を行う。

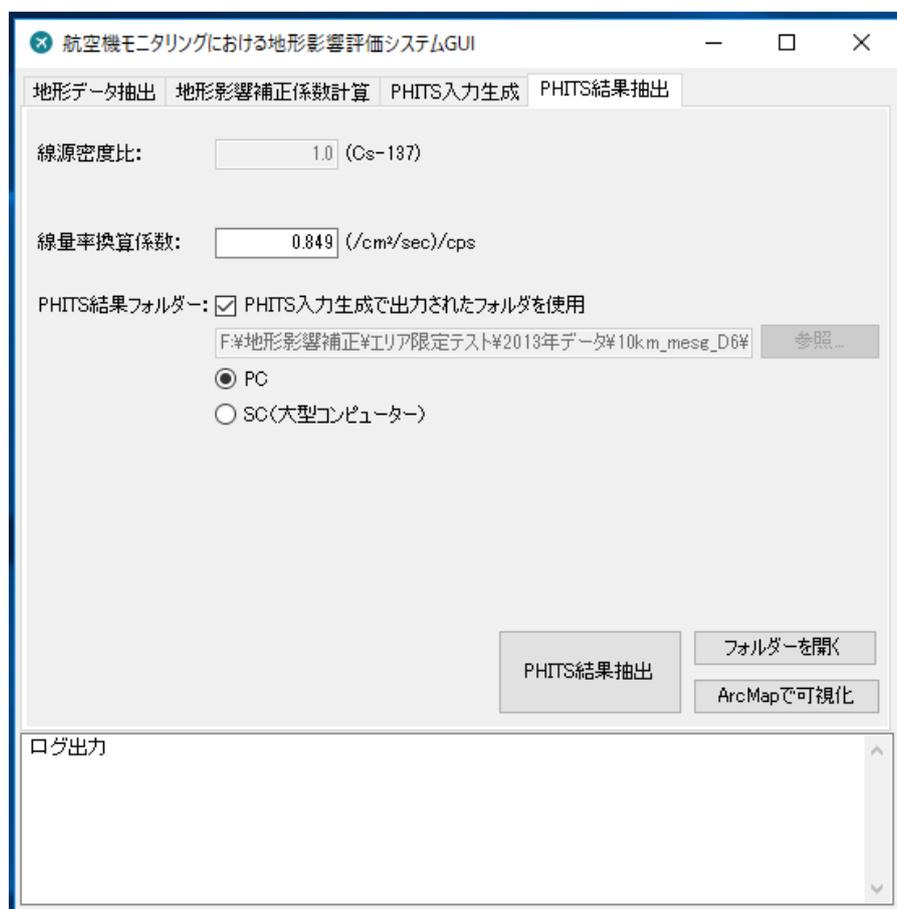


Fig. 7-8 PHITS 出力データ抽出 GUI

7.6. まとめ

航空機モニタリングにおける解析精度向上および地形影響評価のため、地形影響評価システムを整備した。今後、本システムを用いてこれまでに取得された膨大な航空機モニタリングデータの解析を行い、実用化に向けた地形影響評価を進める。同時に、簡易補正手法の開発を視野に起伏度と地形の影響についての知見を蓄積する。

8. 高精度 GPS による精度向上

8.1. はじめに

航空機モニタリングでは、上空において測定した放射線の計数率を高度補正計数 HF により補正し、地上 1m 高さでの計数率に変換している。よって、上空での位置情報の精度は地上 1m での空間線量率の計算値に影響を及ぼす。また、キャリブレーションフライト実施時の位置情報の精度は、補正計数の決定に影響を及ぼす。以上のような背景から、平成 28 年度に複数の GPS 受信機の性能比較を行い、導入機種を選定を行った。今年度の計測において実際にデータ取得を実施し、解析パラメータの再算出、地上 1m での空間線量率の計算を行い地上の空間線量率換算に与える影響について調査を行った。

8.2. GPS 受信機の構成

導入した GPS と既存の RSI システムの受信機の機能の比較を Table 8-1 に示す。導入した GPS 受信機は平成 28 年度に実施した試験において、航空機モニタリングに適した受信機として報告された CORE 社の受信機である。試験時には「CD311」として発売されていたがメーカー生産中止となったため、後継機種である「QZ-NAV」を採用した。「QZ-NAV」は「CD311」と同型の処理用チップを使用しているため性能面の差はない。「QZ-NAV」では既存の RSI 内蔵の GPS 受信機と比較し、利用できる信号が増加している。QZSS（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。

導入した機材の外観および各機器の接続図を Fig. 8-1 に示す。各機器は航空機への搭載が容易となるように耐衝撃、耐水性のペリカンケースに収められている。各機器はペリカンケース内部で接続されており、各機器への電源供給はタブレット PC の USB ケーブルを介して行われている。そのため別途外部電源を必要としない。また、高度情報の参考データとして気圧高度計を搭載している。

RSI システムにより取得された計数率データと高性能 GPS 装置により取得された位置情報を各機材によって収録された GPSTime をキーとしてとしてデータマッチングを行い、解析用データの作成を実施した。データマッチングのフロー図を Fig. 8-2 に示す。

Table 8-1 使用した受信機の比較

メーカー	製品名	利用信号	収集周期	備考
CORE (日本)	QZ-NAV	GPS L1, L2	10Hz	参考データとして気圧高度を収録
		QZSS L1, L1-SAIF SBAS		
Trimble (米国)	CopernicusII	GPS L1 SBAS	1Hz	RSIシステムに内蔵



Fig. 8-1 GPS の接続図と外観

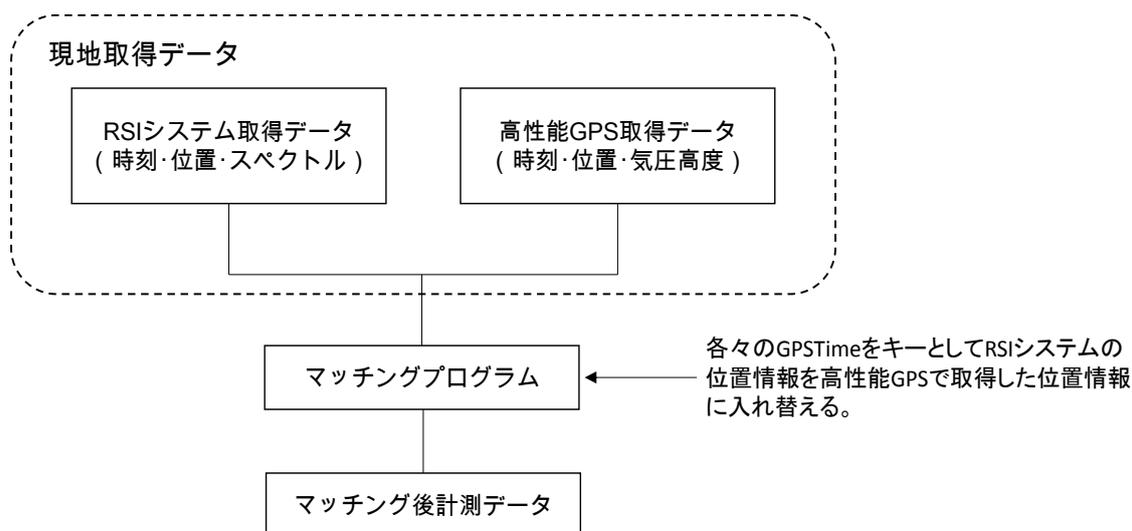


Fig. 8-2 データマッチングのフロー図

8.3. 測定期間及びデータ取得実績

平成 29 年度の第 12 次モニタリング及び東日本第 8 次モニタリングの全期間（平成 29 年 9 月 9 日～11 月 16 日）において高性能 GPS 装置を RSI システムと同時に搭載し測定を行った。高性能 GPS により取得した航跡図を Fig. 8-3 に示す。航跡は測線上のみを表示している。期間中に一部フライトにおいて機器トラブル等により高性能 GPS データが取得できていない箇所が存在した。

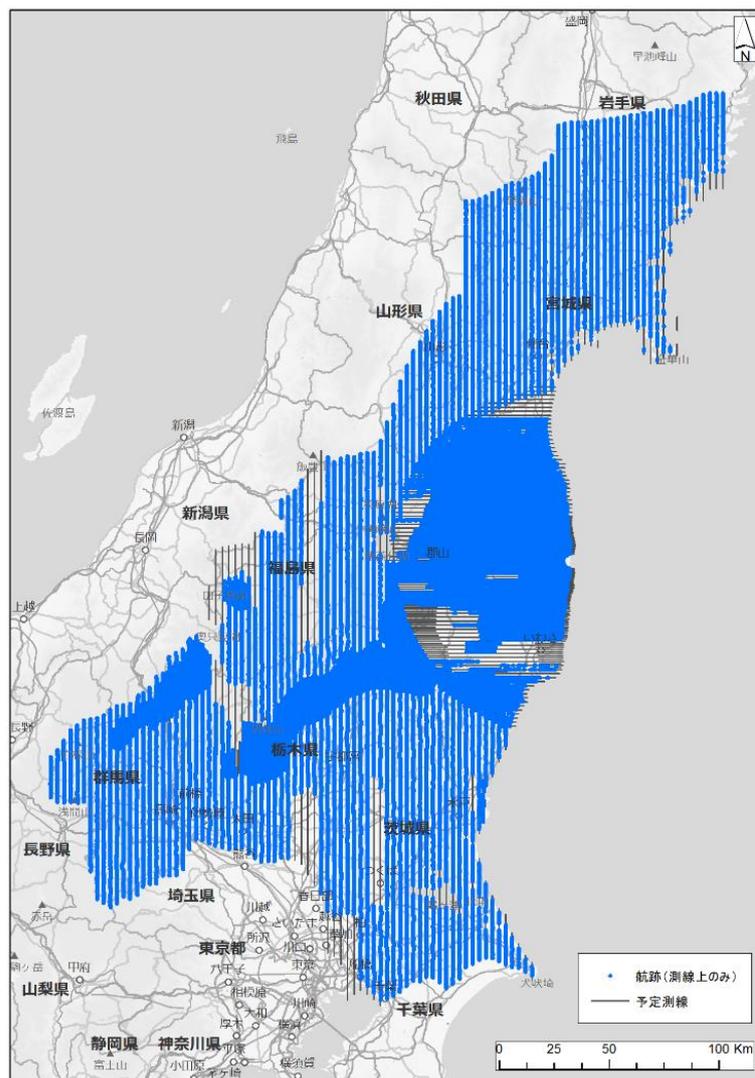


Fig. 8-3 高精度 GPS による航跡図(測線上のみ)

8.4. 解析方法

解析パラメータについては、今年度行ったキャリブレーションフライト時に高精度 GPS についてもデータを取得し、高精度 GPS のデータを元に解析パラメータを算出した。パラメータの算出方法自体は第 4 章に示した手法を適用した。Table 8-2 に宇宙線寄与係数、Table 8-3 に高度補正係数 AF、Table 8-4 に空間線量率換算係数 CD の算出結果を示す。各パラメータとも RSI にて算出した結果と概ね整合している。なお、CD 値を算出するためのフライトにおいて高度情報の異常値が見られた。

宇宙線寄与係数を算出するための宇宙線フライトデータにおいて、高精度 GPS の有効性を示す例が確認された。2017/11/10 に実施した宇宙線寄与係数を算出するフライトにおいて、RSI 内蔵型 GPS が異常値を示す事例があった。宇宙線寄与係数を算出するフライトでは一定の上昇率を保つ

て高度 8000ft まで上昇する。フライトの途中で上昇率を変化することは考えにくい。しかし、Fig. 8-4 に示すとおり高度 1000m 付近を境に RSI 内蔵型 GPS 受信機の飛行高度が不安定となった。GPS の位置精度低下率 PDOP (Position Dilution of Precision : 天空における GPS 衛星の配置によって決まる測位精度の低下率を表す値。数値が大きくなるほど精度が低くなる) 値を確認すると同時刻を境に急激な悪化が確認できる。しかし、高精度 GPS 受信機においては飛行高度が安定的に取得されており、PDOP 値も安定していた。RSI 内蔵型受信機の PDOP 値が悪化した理由に関しては不明だが、同様な受信状況にある高精度 GPS 受信機は安定的にデータを受信できているため、一方のデータに異常値がある場合でも後続作業を実施できるため有用といえる。

高精度 GPS の結果を用いた解析パラメータには、高精度 GPS の位置情報を使用して得られたパラメータフライト解析結果の平均値を採用した。なお、高精度 GPS のデータが得られていない箇所 (図中網掛け部) においては内挿補完によりデータが作成されているため、実際の値と異なる。算出したパラメータを基に、空間線量率マップを作成した。

Table 8-2 宇宙線寄与係数一覧

FlightNo	System (Device Serial)	Helicopter	Body No	Operarion campany	Date	RSI				高精度GPS				高精度GPS/RSI			
						30keV ~ 2800keV	450keV ~ 2800keV	900keV ~ 2800keV	1400keV ~ 2800keV	30keV ~ 2800keV	450keV ~ 2800keV	900keV ~ 2800keV	1400keV ~ 2800keV	30keV ~ 2800keV	450keV ~ 2800keV	900keV ~ 2800keV	1400keV ~ 2800keV
F12A	5045	Bell430	JA05TV	NNK	2017/09/09	6.166	1.268	0.590	0.266	高精度GPSデータなしのため算出不可				-			
F12A	5089	Bell430	JA05TV	NNK	2017/09/24	2.187	0.583	0.297	0.208	2.095	0.599	0.242	0.204	0.96	1.03	0.81	0.98
E8A	5089	Bell430	JA05TV	NNK	2017/10/05	2.338	0.704	0.346	0.232	2.414	0.746	0.375	0.244	1.03	1.06	1.08	1.05
E8A	5089	Bell430	JA05TV	NNK	2017/11/10	GPSデータ異常のため算出不可				3.889	1.020	0.488	0.318	-			
Average						2.263	0.644	0.322	0.220	2.255	0.673	0.309	0.224	1.00	1.04	0.95	1.02
F12B	5043	Bell412	JA9616	AAC	2017/09/09	2.288	0.701	0.373	0.226	1.916	0.620	0.348	0.231	0.84	0.88	0.93	1.02
F12B	5043	Bell412	JA9616	AAC	2017/09/19	2.590	0.751	0.368	0.230	2.702	0.750	0.380	0.244	1.04	1.00	1.03	1.06
E8B	5043	Bell412	JA6767	NNK	2017/10/01	2.296	0.660	0.311	0.204	2.291	0.657	0.302	0.189	1.00	1.00	0.97	0.93
E8B	5043	Bell412	JA6767	NNK	2017/10/10	外乱により算出不可				外乱により算出不可				-			
E8B_50	5043	Bell412	JA6767	NNK	2017/10/10	3.525	0.894	0.432	0.263	3.476	0.878	0.430	0.259	0.99	0.98	1.00	0.98
Average						2.675	0.752	0.371	0.231	2.596	0.726	0.365	0.231	0.97	0.97	0.98	1.00

宇宙線除去後の計数が負値となるため不採用

Table 8-3 高度補正係数(AF)一覧

Monitiring No	System (Device Serial)	Helicopter	Body No	Operarion campany	location	Date	AF (RSI)		AF (高精度GPS)		高精度 GPS/RSI
							$\mu(m-1)$	R2	$\mu(m-1)$	R2	
F12th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	Sukagawa_TestLine	2017/9/9	-0.00710	0.99960	高精度GPSデータなしのため算出不可		-
F12th	5089	Bell430	JA05TV	NNK	Sukagawa_TestLine	2017/9/24	-0.00702	0.99875	-0.00702	0.99988	1.00
E8th	5089	Bell430	JA05TV	NNK	Sukagawa_TestLine	2017/10/5	-0.00774	0.99978	-0.00738	0.99999	0.95
E8th	5089	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine5	2017/10/18	-0.00701	0.99972	-0.00705	0.99995	1.01
E8th	5089	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine1	2017/11/1	-0.00659	0.99962	-0.00741	0.91835	1.13
Average							-0.00709		-0.00722		1.02
F12th	5043	Bell412	JA9616	AAC	Sukagawa_TestLine	2017/9/9	-0.00756	0.99990	-0.00689	0.99969	0.91
F12th	5043	Bell412	JA9616	AAC	Sukagawa_TestLine	2017/9/19	-0.00707	0.99888	-0.00585	0.98860	0.83
E8th	5043	Bell412	JA6767	NNK	TestLine4	2017/9/30	-0.00687	0.99980	-0.00718	0.99969	1.04
E8th	5043	Bell412	JA6767	NNK	TestLine3	2017/10/18	-0.00482	0.99603	高精度GPSデータなしのため算出不可		-
E8th	5043	Bell412	JA9616	AAC	TestLine5	2017/11/7	-0.00589	0.99678	-0.00591	0.99491	1.00
E8th	5043	Bell412	JA6928	AAC	TestLine4	2017/11/16	-0.00670	0.99988	-0.00705	0.99991	1.05
Average							-0.00649		-0.00658		1.01

Table 8-4 線量率換算係数(CD)一覧

Monitoring No.	System (Device Serial)	Body No.	Helicopter	Operation company	Location	Date	Ground data (Nal survey)			AMS data			RSI			高精度GPS				高精度 GPS/RSI	
							Survey (uSv/h)	Stdev (2σ)	Stdev (%)	AMS data (cps)	Stdev (2σ)	Stdev (%)	AGL (m)	Stdev (2σ: %)	Stdev (%)	CD (cps[μ Sv/h] ⁻¹)	AGL (m)		CD (cps[μ Sv/h] ⁻¹)		
																	Stdev (2σ: %)	Stdev (%)			AGL (m)
F12th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint D	2017/9/9	0.33	0.108	33	5739	604	11	882	40	5	11,800	高精度GPSデータなしのため算出不可				
F12th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint E	2017/9/9	1.24	1.020	82	20999	6326	30	881	165	19	12,500					
F12th	5089	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint D	2017/9/24	0.32	0.108	33	5154	949	18	966	18	2	12,400	1001	85	8	13,800	1.11
F12th	5089	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint E	2017/9/24	1.06	0.967	92	15676	9569	61	952	134	14	12,600	990	162	16	13,800	1.10
E8th	5089	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint D	2017/10/5	0.33	0.130	39	4705	1222	26	1020	82	8	12,600	1007	129	13	12,200	0.97
E8th	5089	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint5	2017/10/18	0.12	0.033	28	2306	279	12	1034	81	8	13,900	2306	279	12	11,000	0.79
E8th	5089	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint1	2017/11/1	0.07	0.016	24	1432	89	6	985	43	4	11,400	367	34	9	2,800	0.25
Average																12,457	Average			12,700	0.99
F12th	5043	JA9616	Bell412	AAC	TestPoint D	2017/9/9	0.33	0.126	38	5410	1058	20	902	33	4	11,300	951	91	10	12,200	1.08
F12th	5043	JA9616	Bell412	AAC	TestPoint E	2017/9/9	1.18	1.021	86	14286	3471	24	958	27	3	10,400	1045	106	10	12,400	1.19
F12th	5043	JA9616	Bell412	AAC	TestPoint D	2017/9/19	0.33	0.108	33	4416	317	7	1266	80	6	19,700	1065	38	4	12,000	0.61
F12th	5043	JA9616	Bell412	AAC	TestPoint E	2017/9/19	1.09	0.999	92	13014	6345	49	993	32	3	11,100	1080	126	12	13,200	1.19
E8th	5090	JA6767	Bell412	NNK	TestPoint 4	2017/9/30	0.07	0.025	36	1154	76	7	1066	8	1	8,500	1100	35	3	9,100	1.07
E8th	5090	JA6767	Bell412	NNK	TestPoint 3	2017/10/18	0.06	0.017	30	1376	85	6	1091	18	2	13,400	1103	40	4	11,400	0.85
E8th	5090	JA9616	Bell412	AAC	TestPoint 5	2017/11/7	0.11	0.033	30	2348	407	17	925	18	2	13,300	996	122	12	13,100	0.98
E8th	5090	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint 4	2017/11/16	0.07	0.031	44	1425	99	7	962	48	5	7,400	1025	53	5	8,400	1.14
Average																11,888	Average			11,475	1.01

高精度情報が異常値のため不採用

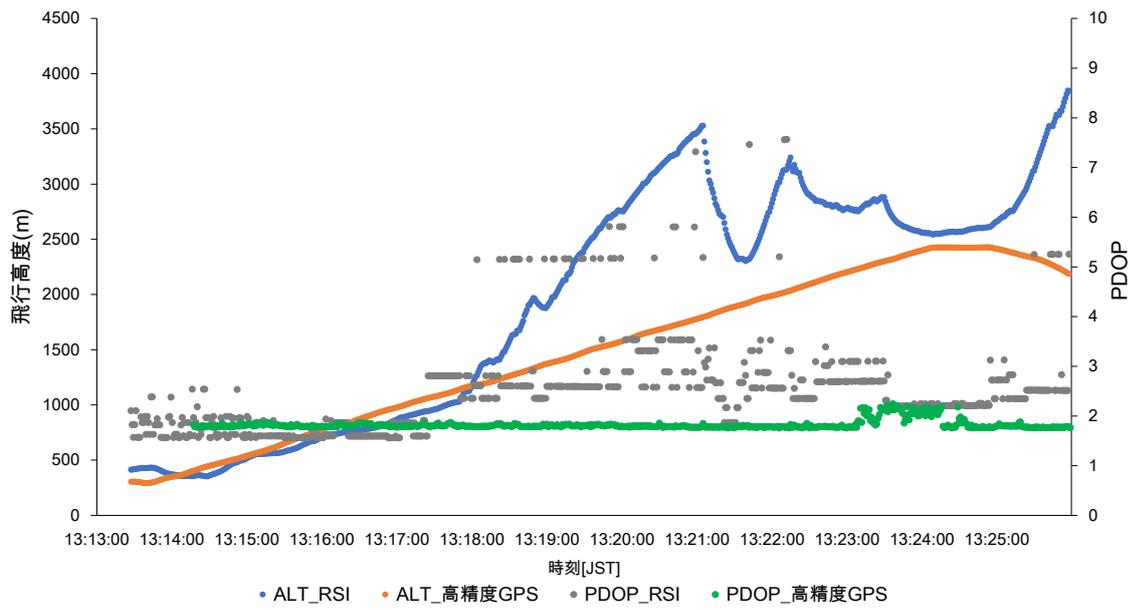


Fig. 8-4 2017/11/10 宇宙線フライトにおけるRSI内蔵型GPSデータの異常

8.5. RSI システム GPS と高精度 GPS の位置情報取得結果の比較

高精度 GPS の情報を基に作成した空間線量率マップを Fig. 8-5 に示す。なお、比較として RSI 内蔵 GPS 由来の位置情報を用いた解析結果についても示す。このように、マップの外観としては大きな違いは見られない。さらに、定量的に比較するために解析結果をメッシュ単位で比較した。比較は高精度 GPS データが正常に取得できていると思われる範囲で実施した。Fig. 8-6 に空間線量率の散布図（左）とヒストグラム（右）を示す。散布図を見ると全体的な傾向はよい相関関係にあるが、プロットはばらつきが確認できる。ヒストグラムで見ると平均値は 0.072、標準偏差は 0.271 となり、場所によっては最大±0.5 の差があることが分かった。

差が大きい場所を特定するため Fig. 8-5(c) に両者の比を表す画像を示す。両者の比を表す画像を確認すると、栃木県、群馬県にまたがる山岳地域において差が存在する地域が確認された。周辺の地形と線量率の差を確認するため、数値地形データから傾斜角と曲率を重ね合わせ表現した微地形図を用いた。Fig. 8-7 に当該地域の微地形図を示す。図を確認すると谷部において RSI の線量率が高く評価され、尾根部においては RSI の線量率が低く評価されていることがわかる。これはモニタリング実施時には地形に追従するために航空機の高度を常に変化させ、一定の対地高度を保つフライトを実施しているが、その際の高度変化に RSI 内蔵の GPS 受信機が追従できていないことが考えられる。谷部における線量率の差について、当該測線をフライトした際の PDOP 値を確認した。Fig. 8-8 に確認図を示す。この図に示すとおり、谷部に地形がなっている部分で RSI 内蔵 GPS の PDOP が大きく悪化している。そのため位置精度が悪化し線量の差につながっていることが原因と考えられる。PDOP が大きく悪化した原因として Fig. 8-9 に示すとおり周辺地形の影響で GPS 衛星の可視衛星が減少し、位置精度が悪化した可能性が高い。高精度 GPS 装置については準天頂衛星「みちびき」の電波を利用していることにより谷部における可視衛星数の減少による影響を小さくすることができ、位置精度を確保することができたものと推測される。谷部から尾根部に大きく地形が変化していく箇所においては、谷部で可視衛星数が減少したのち、再度 GPS 衛星を補足し測位計算を始めて安定した位置情報を得られるまでの間に谷部から尾根部へ地形が変化し、位置の計算結果が不安定になっている可能性が高い。

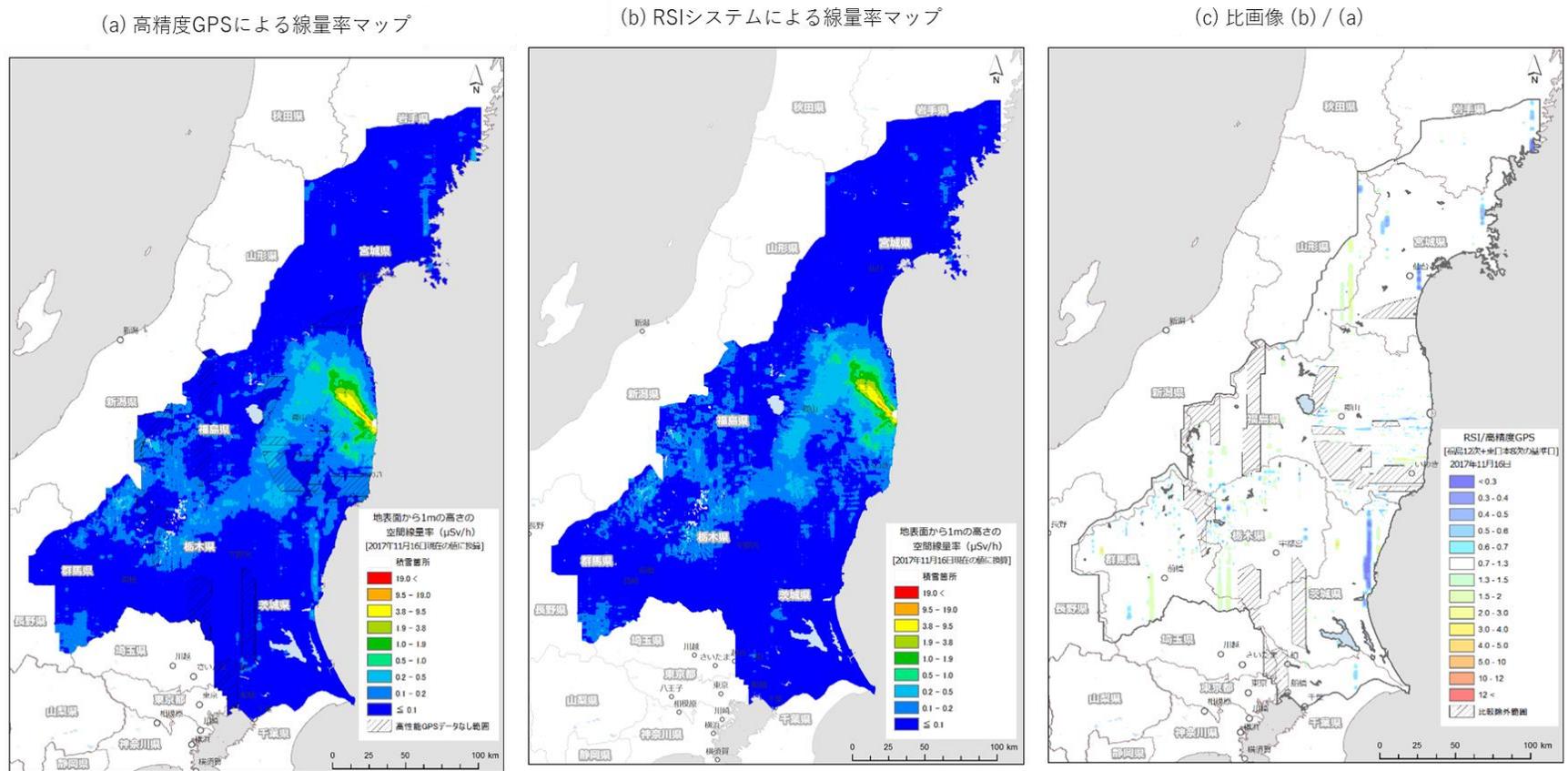


Fig. 8-5 高精度 GPS データを用いた空間線量率マップと比画像

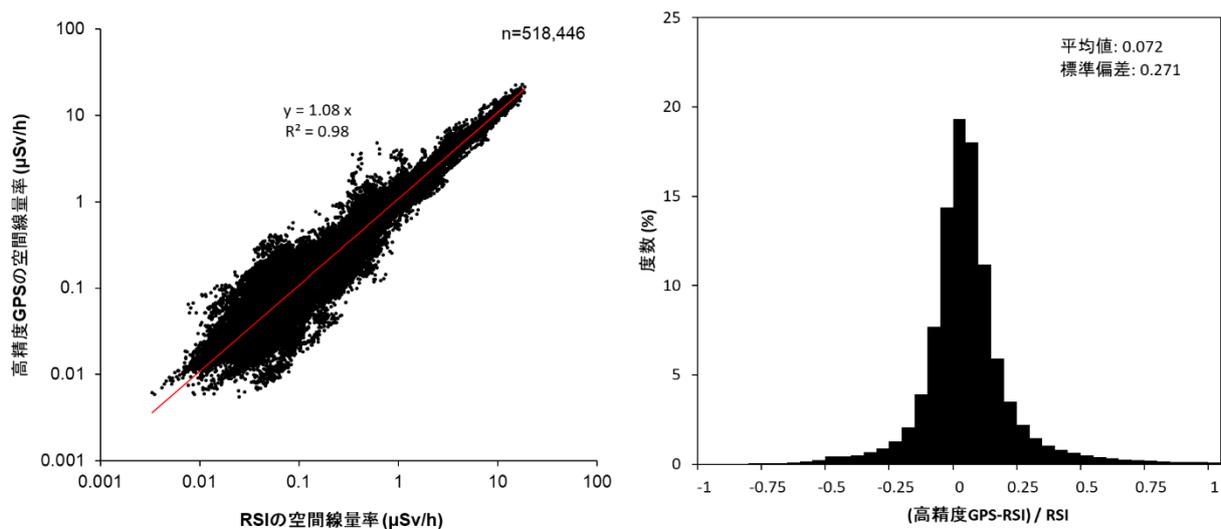


Fig. 8-6 RSI 由来の位置情報で解析した空間線量率と高精度 GPS 由来の位置情報で解析した空間線量率の比較

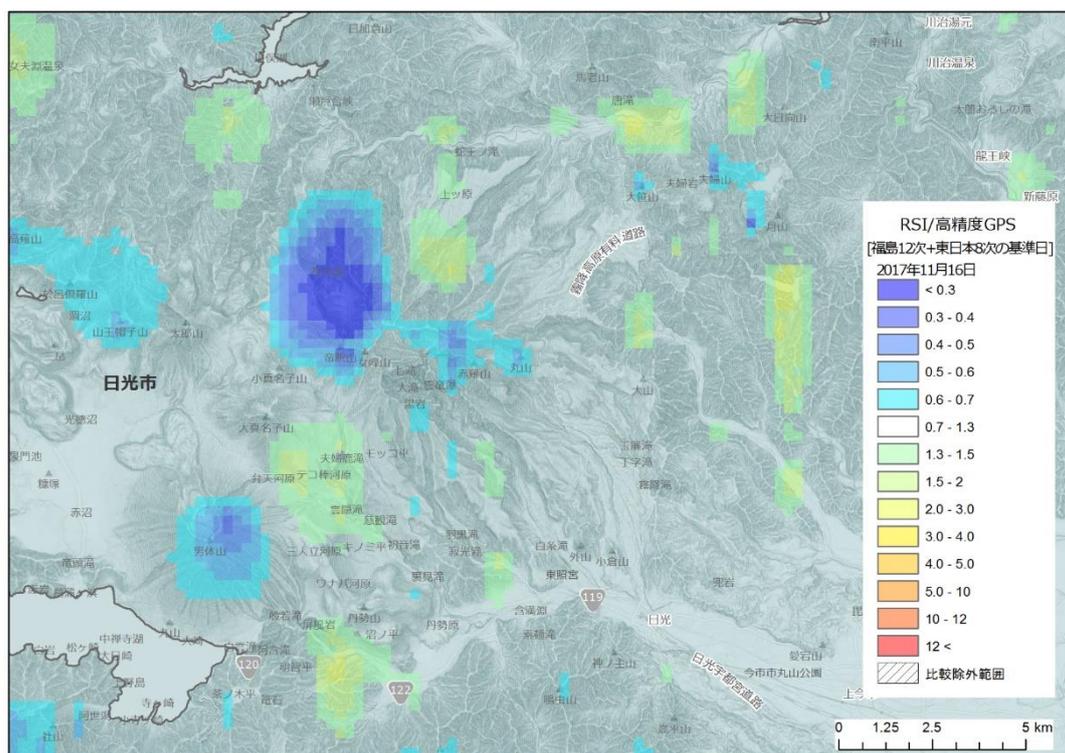


Fig. 8-7 微地形図と線量の比の重ね合わせ図

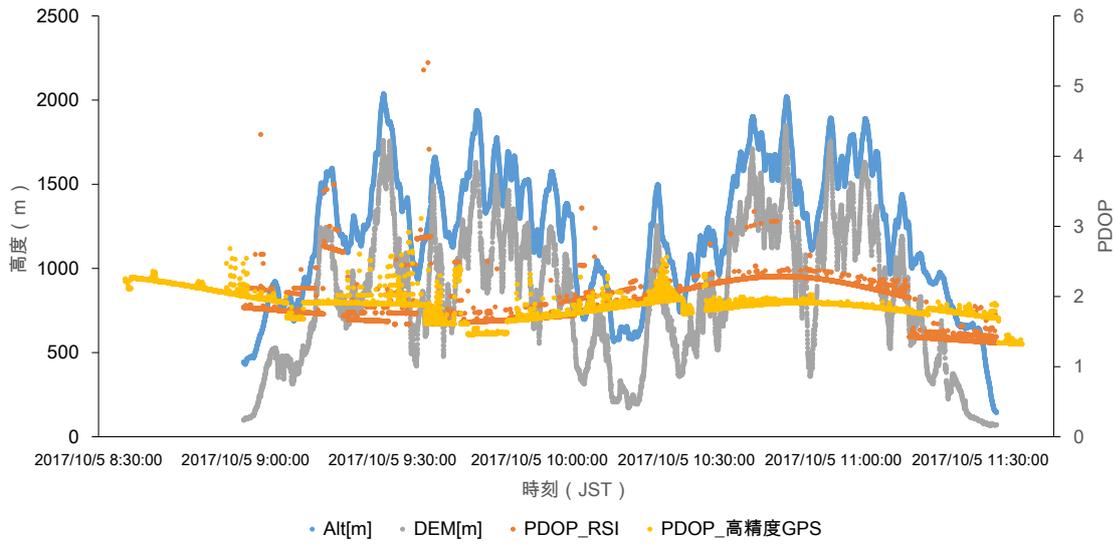


Fig. 8-8 測線フライト中の飛行高度、DEM、PDOP の確認図

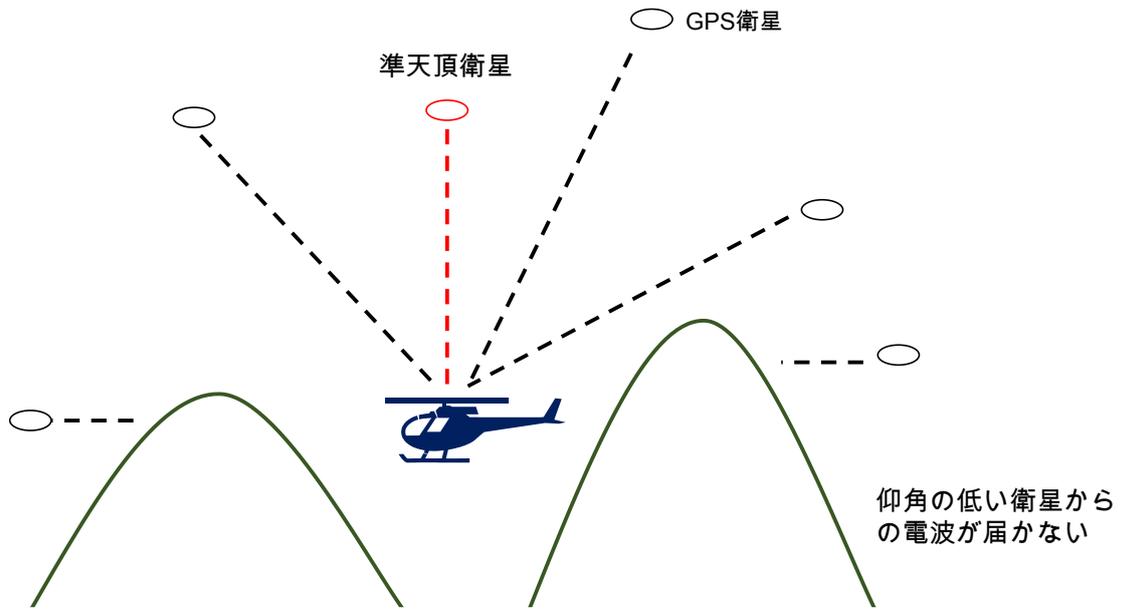


Fig. 8-9 飛行中の GPS 衛星受信状況のイメージ

9. ラドン除去手法のシステム化

9.1. ラドン子孫核種

地殻中に存在するウランやトリウムの変遷系列には、気体であるラドン (Rn) が存在し、ラドンの一部は大気中に散逸する。Fig. 9-1 に主な天然の放射性核種系列であるウラン系列とトリウム系列について示す。大気中に散逸したラドンは、Po、Pb および Bi などのラドン子孫核種に壊変し、大気中の微粒子に吸着して大気中を浮遊する。航空機モニタリングの測定高度、対地 300 m 付近におけるラドン子孫核種濃度は測定されていないものの、地上におけるラドン濃度は広く測定されており、日本の屋外における濃度レベルは 6 Bq/m^3 程度となっている⁴⁰⁾。これらのラドンの濃度レベルは低いものの、航空機モニタリングにおいては、ヘリコプターの周辺に存在するため検出器との距離が近く、一定の影響があると考えられる。また、日単位や季節単位で濃度が変動することが知られており、航空機モニタリングへの影響も一定ではない⁴¹⁾。

ラドン子孫核種の放出する γ 線は、地殻にも同じ核種が存在するので、地上からの放射線との γ 線スペクトル上で弁別が難しい。また、放射性セシウムの放出するエネルギーに似ているため、福島原子力発電所事故の近傍ではなおさらである。Table 9-1 にラドン子孫核種の放出する γ 線エネルギーについて示す。これらのラドン子孫核種の影響を除去し、航空機モニタリングによる空間線量率への換算を高精度化する検討を平成 27 年度に実施した。平成 28 年度は、開発した手法を大量のデータに適用できるように既存の航空機モニタリング解析システムに組み込んだ。本システムを本年度の結果に適用し妥当性を考察した。以下、大気中のラドン子孫核種の影響の除去手法を「ラドン弁別手法」と表記する。

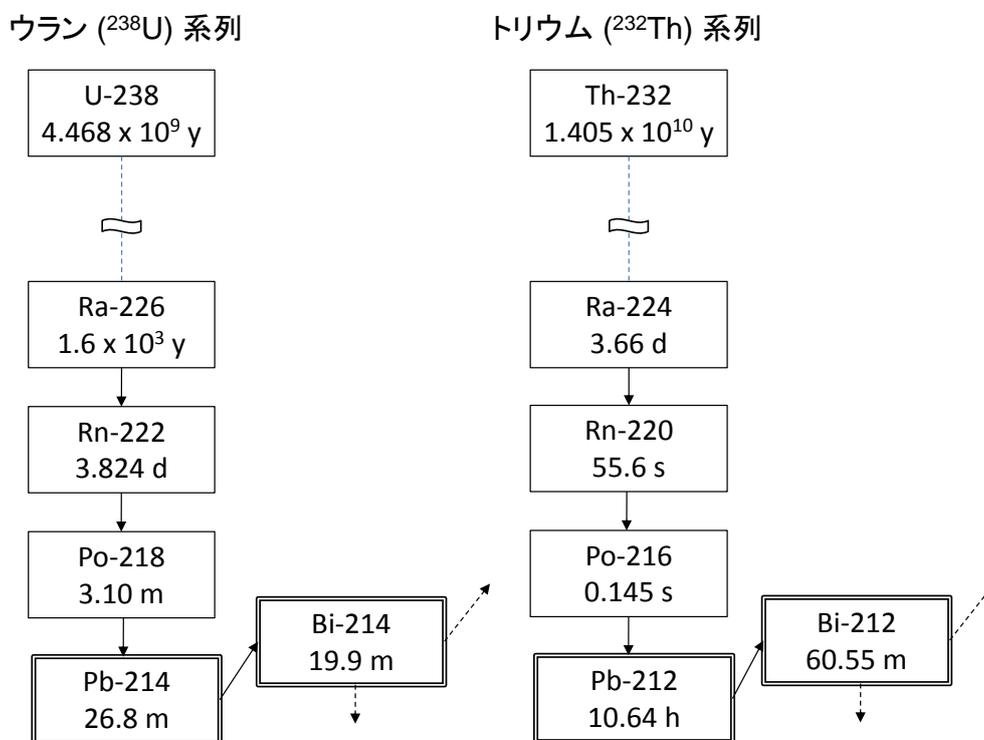


Fig. 9-1 ウラン系列およびトリウム系列

Table 9-1 ラドン子孫核種の放出するγ線

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

9.2. ラドン弁別手法の理論

前述したように、ラドン子孫核種は大気中だけでなく、地表面および地殻にも存在することから、γ線のエネルギーによって大気中のラドン子孫核種の影響と地上のラドン子孫核種の影響を区別することは難しい。また、¹³⁴Cs と ²¹⁴Bi は放出するγ線エネルギーが似通っているため、福島原子力発電所事故の影響を受けた地域ではさらに困難である。航空機モニタリングにおけるラドン子孫核種の影響を弁別する方法として、航空機モニタリング用の検出器以外にラドン子孫核種の検出器を搭載し、その比較からラドン子孫核種の影響を弁別する方法が知られている⁴²⁾。

今回、ラドン子孫核種の影響を弁別する手法を検討するため、RSI (Radiation Solution Inc.) 社製 LaBr₃ シンチレータ (3 インチφ×3 インチ H) を用いた航空機モニタリング機器 (以下、LaBr RSI システム) を採用し、フライトデータの取得および換算パラメータの最適化を行った。採用した LaBr RSI システムをヘリコプター内に搭載した状況について Fig. 9-2 に示す。写真のように、地上からの放射線を遮蔽することを目的とし、通常用いている NaI シンチレーション検出器 (以下、NaI RSI システム) の上方に配置した。

手法の理論としては、空気中のラドン子孫核種からの放射線と地表面からの放射線の距離の差に着目する。Fig. 9-3 にヘリコプター内の検出器と線源の位置関係のイメージについて示す。このように、大気中のラドン子孫核種と検出器の位置は近いため、検出器内に搭載した検出器は、地上の放射性核種からのγ線と比較して検出されやすい。また、γ線は検出器に等方向より放射されることから、LaBr RSI システムの下方に置いた NaI RSI システムの遮蔽としての影響は小さい。一方、地上から LaBr RSI システムに到達するγ線は、下方からの照射となるため NaI RSI システムに遮蔽されやすい。すなわち、大気中のラドン子孫核種を計測した NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比 (LaBr RSI システム/NaI RSI システム)、地上の放射性核種起源の計数率の比よりも大きくなると考えられる。

実際には、地上からのγ線による影響のない海上で取得したデータから、ラドン子孫核種起源の NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比を求めておき、この数値をラドンインデックスと定義する。一方、ラドン子孫核種の影響が無視できるほど、地上からの影響が大きなエリアで取得したデータから地上の放射性核種起源の求めた NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比を求めておき、この数値をグラウンドインデックスと

定義して、この2つの定数の差を利用してラドン子孫核種の影響を弁別する。これらを数式で表すと式 [15] で表すことができ、ここに式 [16] を代入してラドン子孫核種の影響を弁別した NaI RSI システムの全計数率 (N_g) について解くと、式 [17] が導かれる。

$$N_g = N_{all} - N_r \quad [15]$$

$$N_r = RI \cdot L_r \quad [16]$$

$$N_g = \frac{GI \cdot N_{all} - GI \cdot RI \cdot L_{all}}{GI - RI} \quad [17]$$

ここで、

N_g : ラドン子孫核種の影響を除去した NaI RSI システムの全計数率

L_g : ラドン子孫核種の影響を除去した LaBr RSI システムの全計数率

N_r : ラドン子孫核種のための NaI RSI システムの計数率

L_r : ラドン子孫核種のための LaBr RSI システムの計数率

GI : グラウンドインデックス: 陸上における対地高度 300 m での NaI RSI システムと LaBr RSI システムの測定データにおける近似曲線の傾き

RI : ラドンインデックス: 海上における海拔高度 300 m での NaI RSI システムと LaBr RSI システムの測定データにおける近似曲線の傾き

L_{all} : LaBr RSI システムの全計数率

N_{all} : NaI RSI システムの全計数率

である。

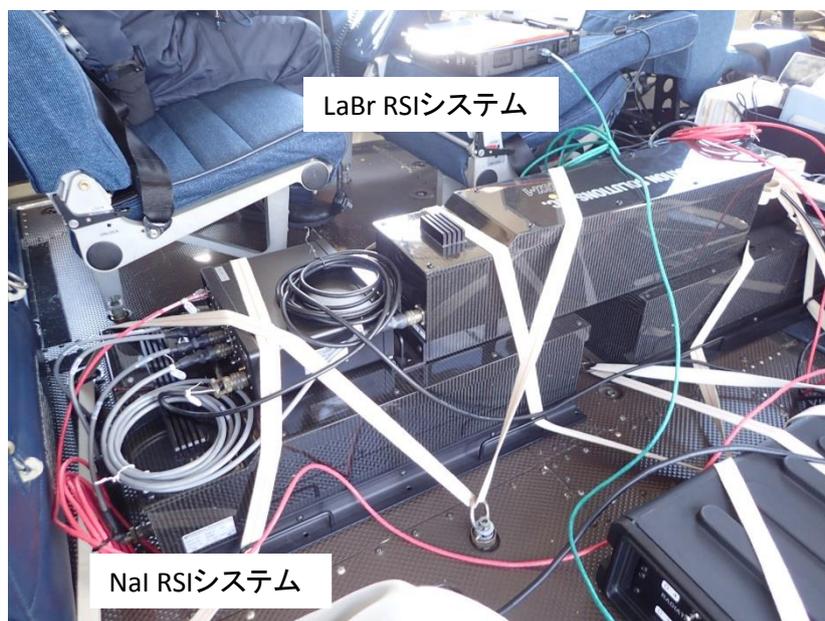


Fig. 9-2 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況

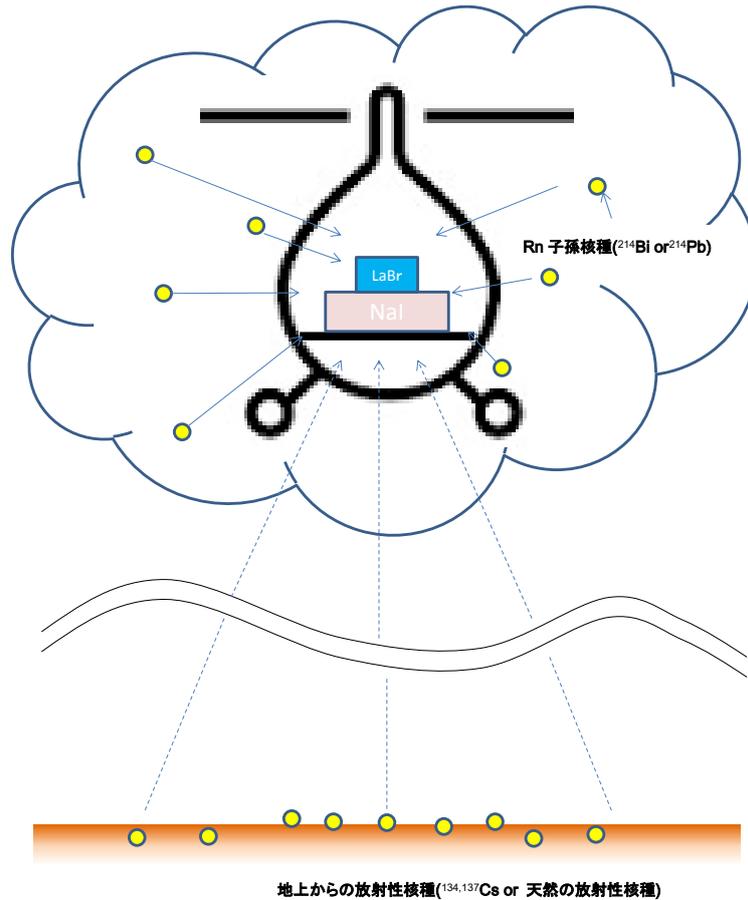


Fig. 9-3 空気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ

9.3. パラメータ (GI および RI) の決定

式 [17] に記載したように、ラドン子孫核種と地上からの寄与を弁別する信頼性は、GI と RI の設定に依存する。GI と RI については、ヘリコプターの遮蔽によって変化するため、東日本第 8 次で使用したヘリコプターごとで実測データから数値を決定した。測定データは 40 秒ごとに取得した計数率を積算した。積算したデータから宇宙線および自己汚染の寄与分を差し引き GI の算出に使用した。また、GPS データは中間値を採用した。東日本第 8 次で取得した地上高さ 300 m 位置 (実際のフライトの対地高度が 290~320 m のデータ) における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係を Fig. 9-4 に示す。なお、東日本 8 次では、Bell 412 (JA6767、JA9616、JA6928) および Bell 430 (JA05TV) を使用しており、それぞれ E8th_A および E8th_B と記述する。これらのデータにはラドン子孫核種の影響が含まれているが、完全にラドン子孫核種の影響のない環境でのデータ取得は困難であること、多くのデータを取得し平均化していることから、地上からの放射線の計数と比較してラドン子孫核種の影響が小さいと仮定する。一方、RI については、海上の 300 m 位置 (実際のフライトの対地高度が 290~320 m のデータ) で取得したデータを抽出し、GI と同様なバックグラウンドの減算を行った。各ヘリコプターにおける NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係を Fig. 9-5 に示す。本散布図の近似直線の傾きを RI とする。

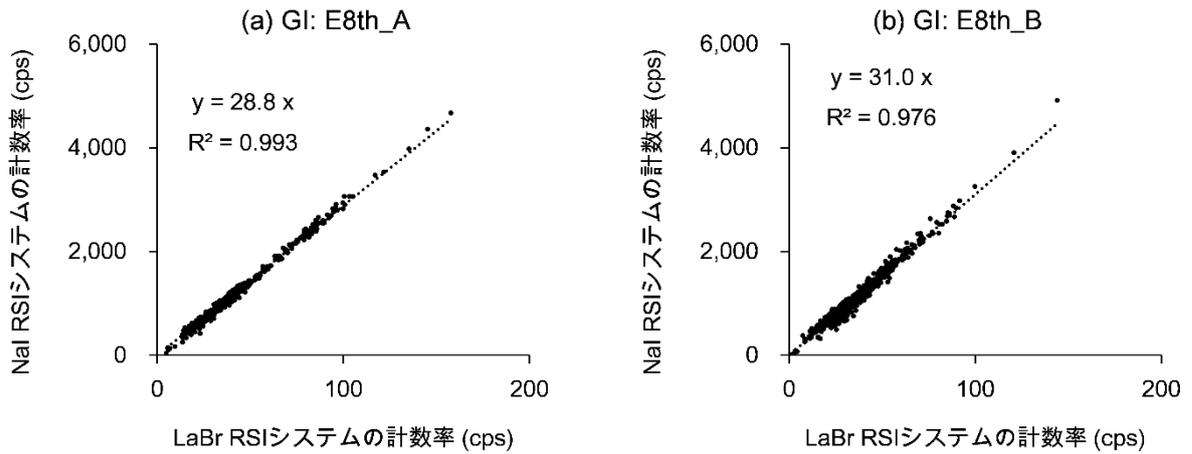


Fig. 9-4 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係
 (1 次近似曲線の傾きを GI と定義)

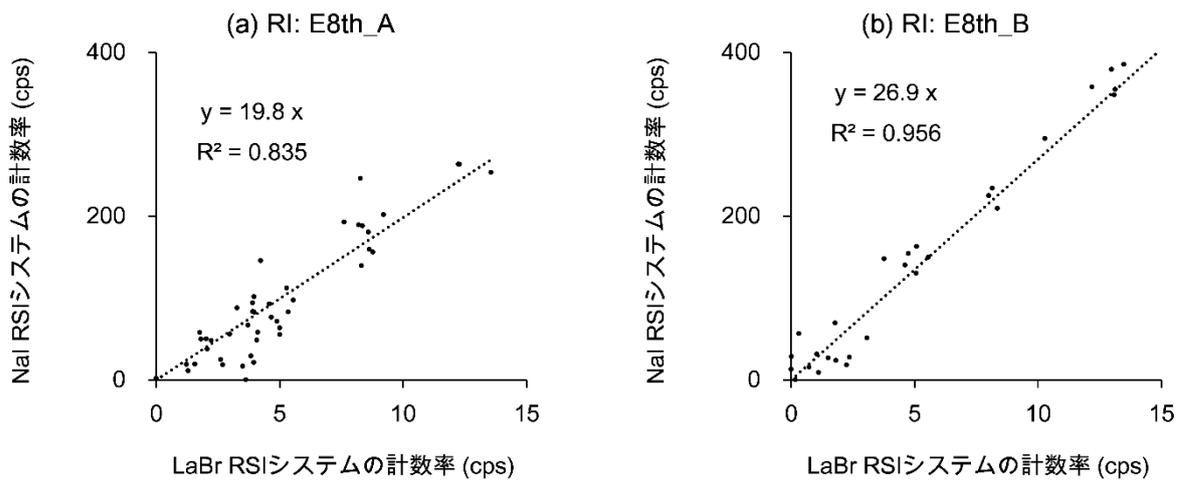


Fig. 9-5 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係
 (1 次近似曲線の傾きを RI と定義)

9.4. GI の高度補正方法

GI については、平成 27 年度に実施した予備的な調査により、対地高度に依存して数値が変化することが分かっている。しかしながら、実測のデータではラドン子孫核種の寄与がないデータを取得することは不可能であるため、計算シミュレーションにより実際の測定体系を模擬し、GI の高度補正手法について検討した。

シミュレーションに用いた計算コードは、モンテカルロ計算コードの一種である電磁カスケードモンテカルロコード EGS5 とし、ヘリコプター内の検出器の体系を簡易的に Fig. 9-6 のように模擬した。計算体系の妥当性については、正面および横の周辺からの点線源を模擬した場合の検出器のレスポンスを計算した結果と、実際に有人のヘリコプターに検出器 (NaI RSI システム) を搭載した状態で、点線源 (^{137}Cs) を照射することによって求めた検出器のレスポンスの結果を比較してベンチマークとした。Fig. 9-7 に計算結果と実測結果の比と線源の照射方向の関係について示す。このように概ね一致している。一部値が外れている部分は、計算体系に考慮されていない局所的な構造物が影響していると考えられるが、全体として構築した体系は、検出器のレスポンスを再現するのに十分な精度を有する。本体系に対し、地上の無限平板線源を模擬し、距離を変化させることにより GI の測定高度との関係を計算した。なお、実際の計算では NaI RSI システムと LaBr RSI システムを別で実施した。LaBr RSI システムの計算時には、下部の NaI RSI システムを体系に加えた。線源の模擬体系は、以下の条件を設定した。土壌中の天然放射性核種濃度は、全国的な地上における測定結果から平均値を採用した⁴³⁾。

- ・ 空気 (1 km×1 km×1.3 km) と土壌 (深さ 1 m, 密度 ρ :1.6 g cm⁻³)
- ・ 山等の地面の凹凸を再現せずに地面は平坦
- ・ 地面中の自然放射性核種 (U 系列、Th 系列、 ^{40}K) は一様分布
- ・ 地面中の人工放射性核種 (^{134}Cs と ^{137}Cs) 表層から深さ方向に指数関数的な分布 (緩衝深度 β =3 g/cm²)
- ・ 土壌中の放射性核種濃度 ^{40}K : 500 Bq/kg、U 系列: 20 Bq/kg、Th 系列: 10 Bq/kg、 ^{134}Cs : 50 kBq/m²、 ^{137}Cs : 200 kBq/m²

検出器と線源の距離 (測定高度) と GI の計算結果を Fig. 9-8 に示す。このように測定高度と GI は正の相関関係にある。この結果における近似直線の傾きを採用し、測定高度ごとに GI を補正した。

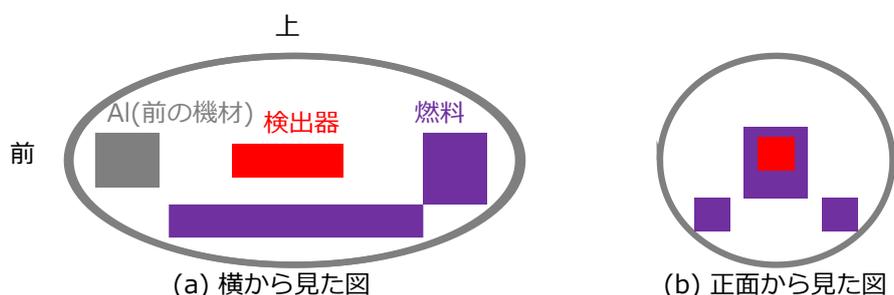


Fig. 9-6 計算体系のイメージ

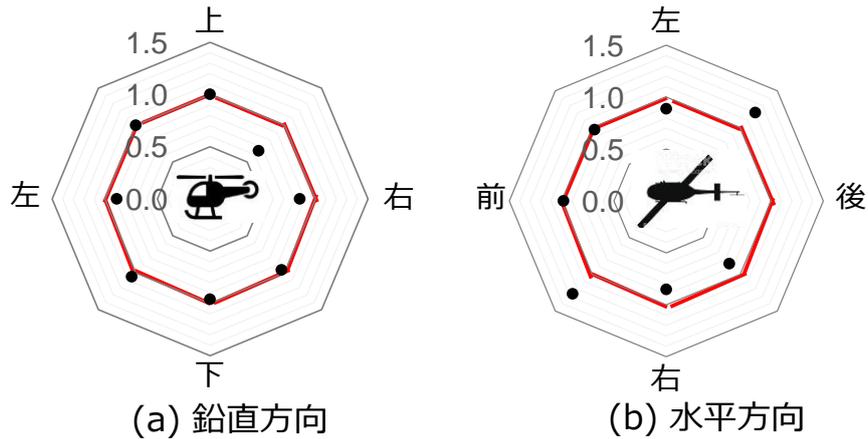


Fig. 9-7 計算体系のベンチマーク
(計算結果と実測結果の比)

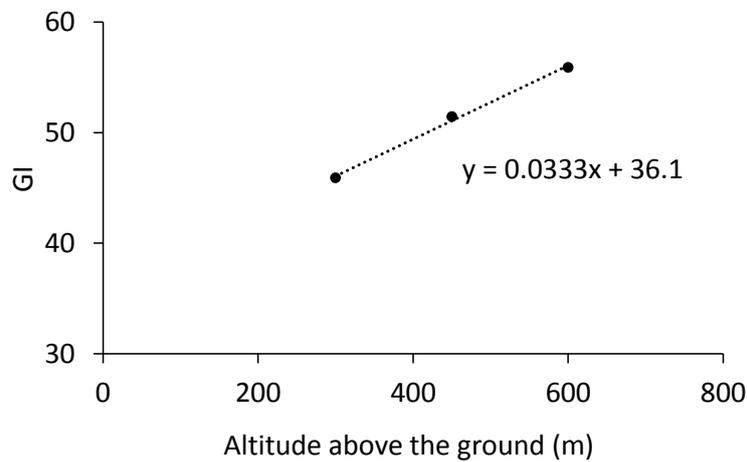


Fig. 9-8 シミュレーションによる測定高度とGIの関係

9.5. 80 km 圏外データへの適用

ラドン弁別手法を今年度の測定結果に適用した。本手法は、大気中のラドン子孫核種の計数率と地上からの計数率が拮抗している場所に効果的であり、地上からの影響が著しく大きな場所では計数誤差の影響により適用が難しく、そもそも放射性セシウムの影響が大きな地域では大気中のラドン子孫核種の影響は無視できるため、適用評価には発電所から 80 km 以遠のデータ（東日本 8 次）のみに適用した。本手法は GI の数値により大きく変化すると考えられるため、Fig. 9-4 に示したヘリコプターごとの GI の数値（±0）に-1 および-2 とした場合についても解析した。解析の結果は、地上における測定結果 296 点と比較し、その妥当性について考察した。なお、4 章で示した従来の空間線量率換算法においては、これまでの経験から Table 4-1 で示すように、Rn 影響フライトとして測定日ごとに測定前に拠点近くの測線上を 450-900 m まで直線的に上昇して得られたデータをバックグラウンドとして差し引いているため、ある程度のラドン子孫核種の影響は弁別されていると考えられる。本手法の検証には、Rn 影響フライトで取得したバックグラウンドを減算せずにラドン弁別手法を適用する。よって、ラドン弁別手法なしの空間線量率マップは

Fig. 5-5 で示したマップとは異なる。Rn 影響フライトから求めたバックグラウンド減算によるラドン子孫核種の弁別効果については 9.6 節で評価する。

Fig. 9-9 にラドン弁別手法を適用した東日本 8 次の空間線量率マップを示す。比較としてラドン弁別手法を適用しない解析結果についても示している。傾向としては、GI の数値が大きいほど空間線量率は低くなる傾向があることが分かる。さらに、ラドン子孫核種の影響の高い地域について考察するために、ラドン弁別手法で減算した NaI RSI システムの計数率を抽出し、計数率マップを作成した。また、本マップは測定の時間が場所により異なるので、瞬間的な空気中のラドン子孫核種の影響が時間的につぎはぎ状態でマップとして表現されている。Fig. 9-10 に東日本 8 次の測定結果から計算した空気中のラドン子孫核種由来の計数率のマップを示す。このように、ラドン子孫核種の検出されたエリアは、越後山脈から関東山地に向けての比較的標高の高いエリアであることが分かる。一方、標高の低い関東平野ではほとんど検出されていない。ラドン子孫核種の起源としては中国大陸からの輸送と地殻からの放出が考えられ、後者由来のものは濃度の時間変化は小さいと考えられる。ラドン子孫核種の検出された標高の高いエリアは、地質的に地殻由来のラドン子孫核種濃度が高いとすると、この結果は矛盾しない。

結果の妥当性を評価するために、地上値との比較を行った。比較結果を Fig. 9-11 に示す。結果を見るとラドン弁別手法を適用しない場合と適用した場合を比較すると、近似直線の傾きと決定係数は地上測定データに近くなることが分かる。一方、GI が大きくなるほど近似直線の傾きは 1 に若干近くなるものの、有意な差とは言い難い。この結果から、ラドン弁別手法の適用により地上の空間線量率を過小評価しない観点から、GI はなるべく小さく評価することが望ましいと考えられる。本手法には、高度補正の手法や GI の数値決定方法に若干の不正確さが残っているため、今後もこのような解析経験を積み上げ、最適化を行っていくことが必要である。

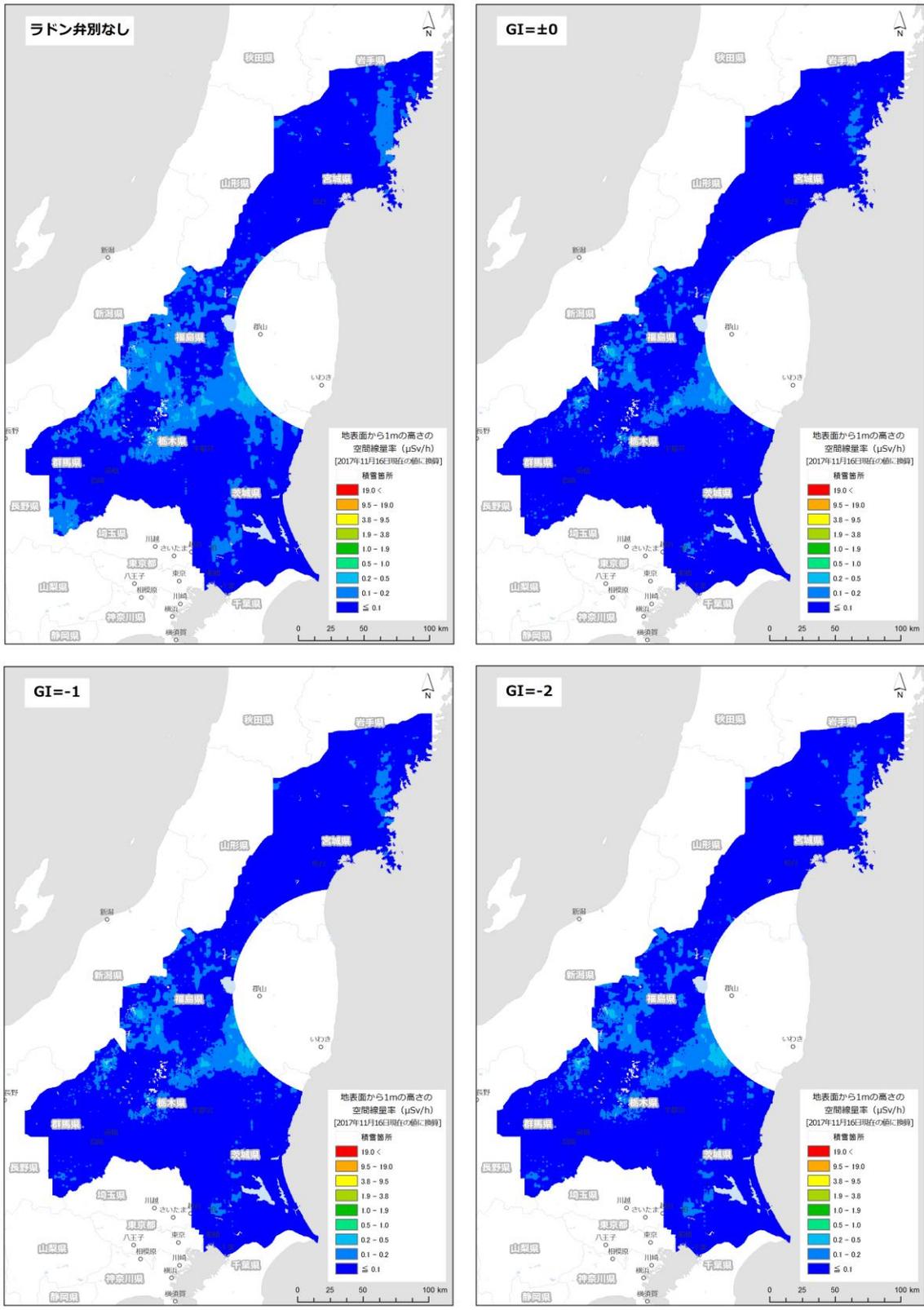


Fig. 9-9 ラドン影響弁別手法適用後の東日本 8 次的空間線量率マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

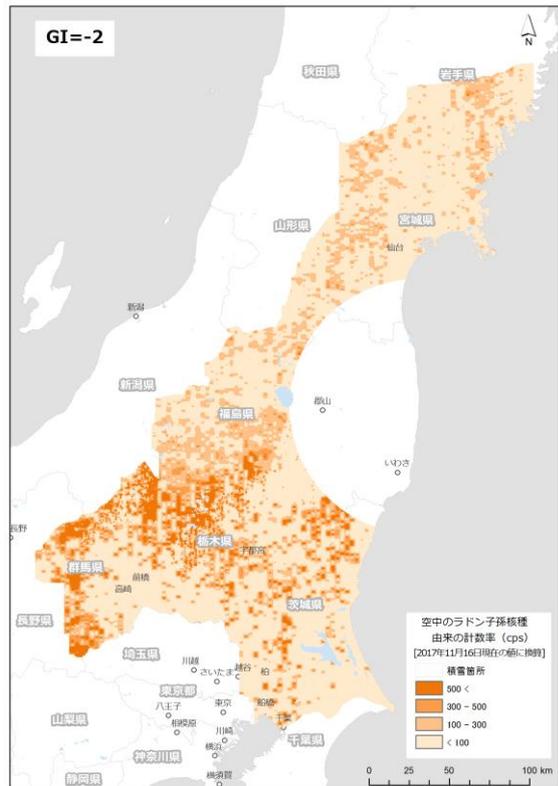
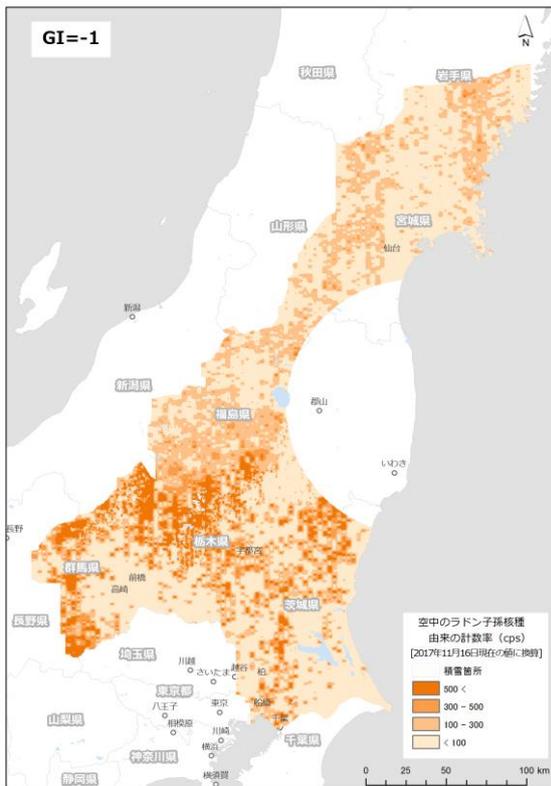
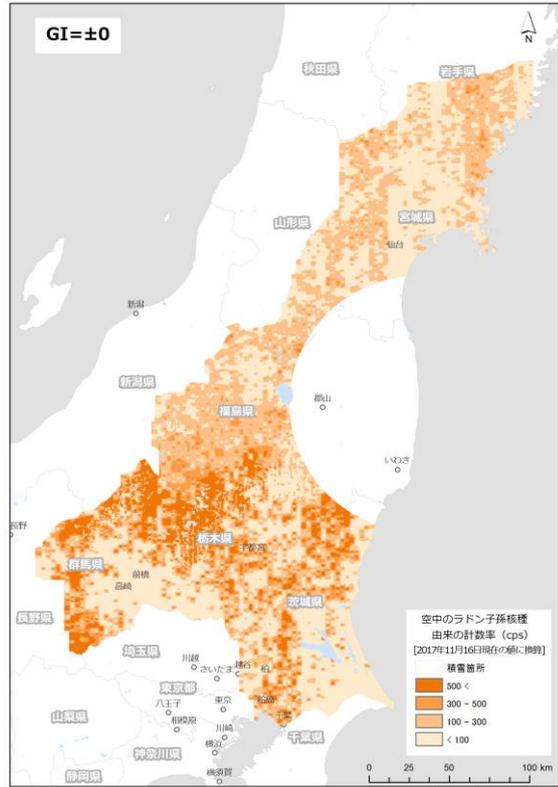
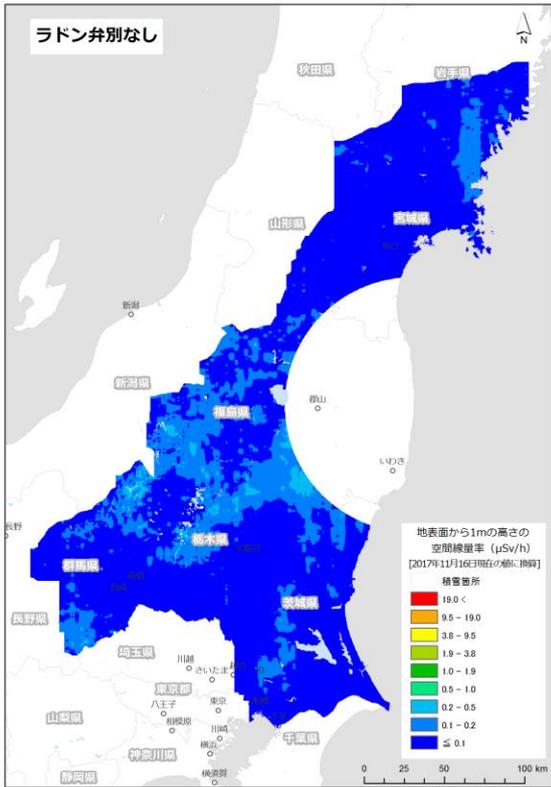


Fig. 9-10 東日本 8 次の測定結果から計算した空気中のラドン子孫核種の NaI RSI システムで検出された計数率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

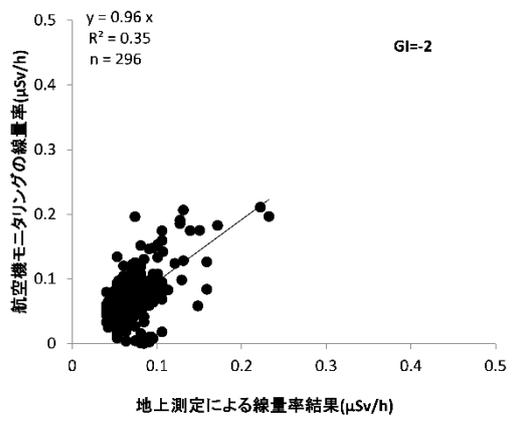
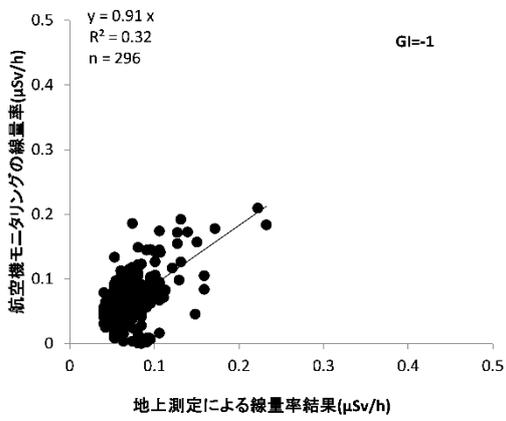
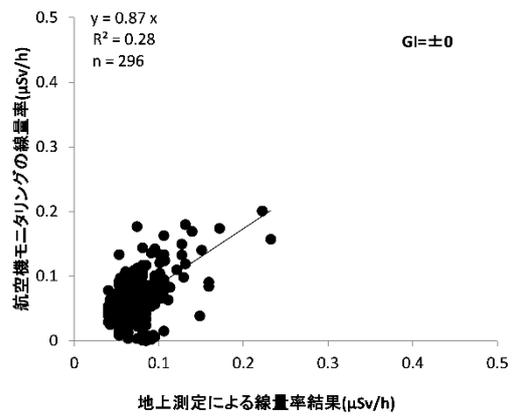
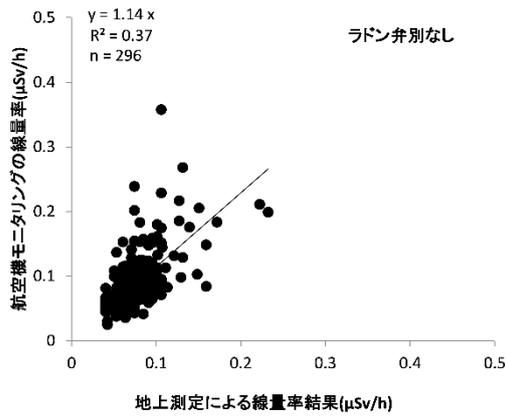
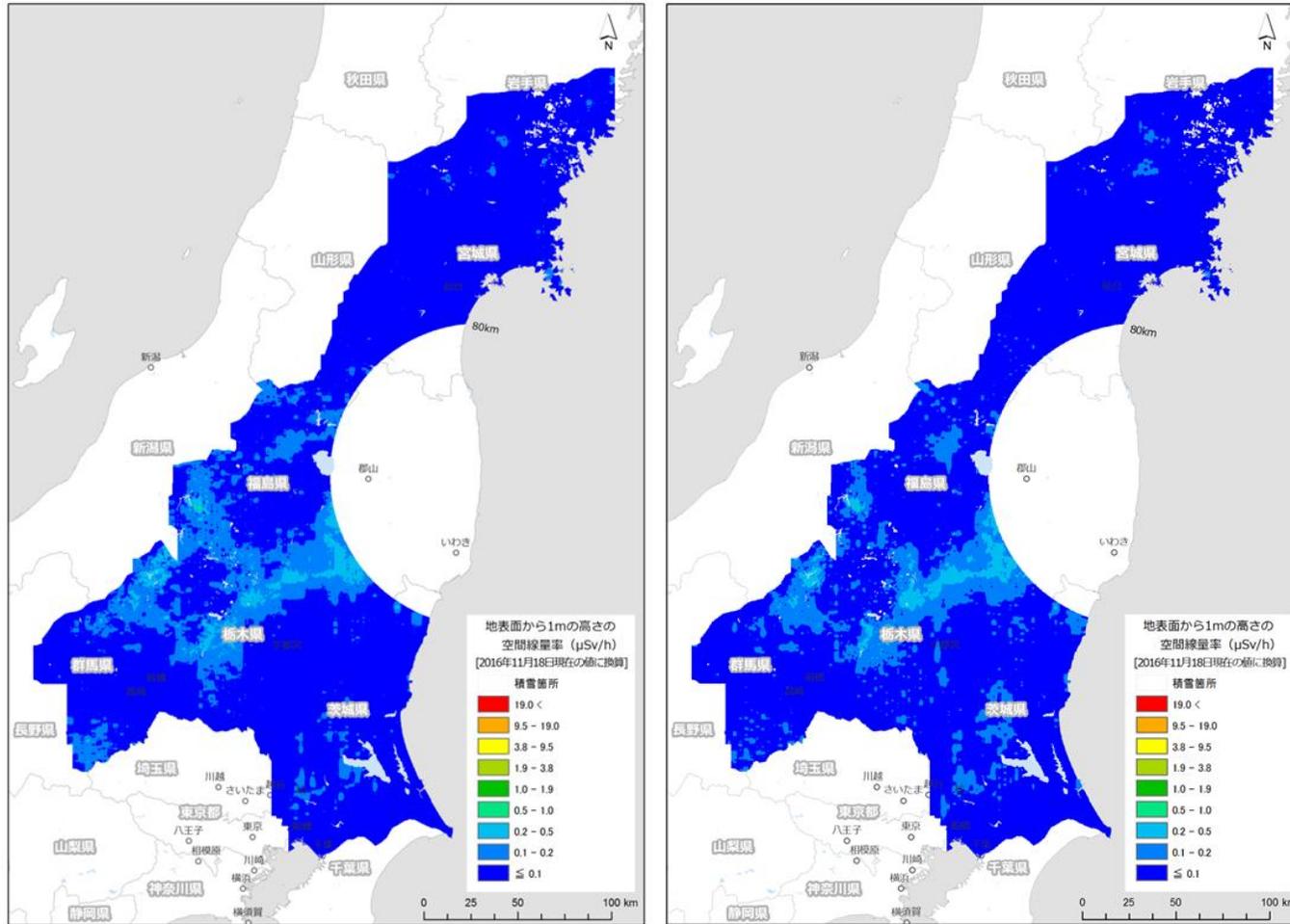


Fig. 9-11 ラドン影響弁別後の地上測定データとの比較(東日本 8 次)

9.6. 従来手法の評価

前章で言及したように、従来手法においても Rn 影響フライトとして測定日ごとに測定前に拠点近くの測線上を 450-900 m まで直線的に上昇して得られたデータをバックグラウンドとして差し引いているため、ある程度のラドン子孫核種の影響は弁別されていると考えられる。従来手法によるラドン子孫核種弁別の効果と上記の新たなラドン弁別手法の有効性を評価するために、Fig. 5-5 で示した従来手法の空間線量率マップとラドン弁別手法を適用した $GI \pm 0$ を適用した空間線量率マップを Fig. 9-12 に示す。このように全体的な傾向は概ね一致しており、従来手法であってもラドン子孫核種の影響はある程度除去できていることが分かる。一方、詳細に見ると、会津地方や群馬県の北部など従来手法の結果において空間線量率の高い場所が散見され、岩手県南部などではラドン弁別手法を適用した方が空間線量率の高くなっている場所があることが分かる。

これらの違いを定量的に理解するために、従来法で求めた測定日ごとのバックグラウンド計数率と同日における新たなラドン弁別手法で求めた計数率の平均値の比較を Fig. 9-13 に示す。図には比較のため、放射性セシウムの存在しない泊発電所、柏崎刈羽原子力発電所および玄海原子力発電所のバックグラウンドを航空機モニタリングで求めたデータもプロットしている。このように一定の正の相関関係にあるものの、ばらつきが大きいことが分かる。プロット自体は放射性セシウムの有無に関わらず固まっており、従来手法でもラドン子孫核種の弁別はある程度できることが示唆される。しかしながら、従来手法は必ず目的の測線のデータ取得の前にラドン影響フライトを行わなければならないという手間があること、大気中のラドン子孫核種濃度が 1 日を通して測定範囲で一定である場合のみ効果があることを考慮すると、新たな弁別手法によりコストに関係するフライト時間の短縮やラドン弁別の精度が向上することが期待できる。



(a) 従来手法

(b) ラドン弁別手法 (GI \pm 0)

Fig. 9-12 従来手法とラドン弁別手法の比較
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

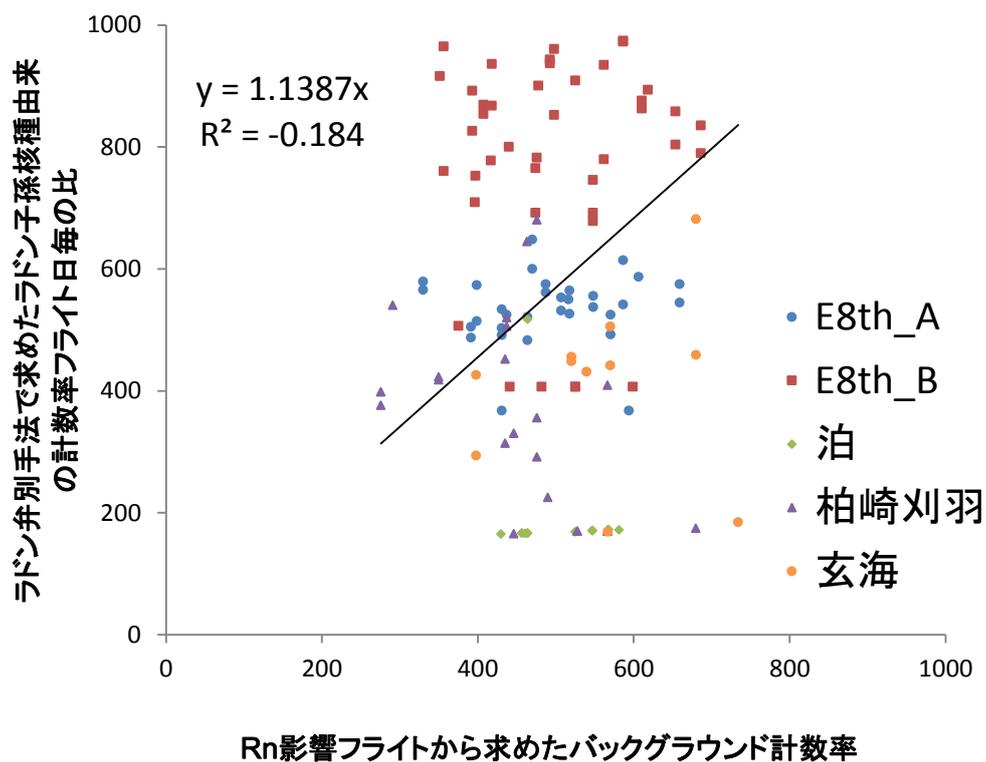


Fig. 9-13 Rn 影響フライトから求めた NaI RSI システムのバックグラウンド計数と同日にフライトしたデータにラドン弁別手法を適用し求めたラドン子孫核種の計数率の平均値の比較

10. 今後の課題

今年度得られた成果をまとめ、今後の課題について示す。

- ・RSIシステムの保守方法について

規制庁所有のRSIシステムも8年目となり、軽微な異常が何件か発生している。例えば、GPSのエラーによるデータの未取得やRSIシステムのバグ等である。本RSIシステムの保守・運用についても、時間が経つにつれて必要性が増すため、メーカーを含めた体制作りが必要と考える。

- ・空間線量率マップについて

ヘリコプターとRSIシステムの組み合わせによりデータの蓄積が行われ、信頼性の高い数値の選択が可能になってきたと判断し、あらかじめ定めた1つの数値を用いた。結果として、地上測定の結果ともよく整合し、今後も同様な方法で問題ないと考ええる。しかしながら、パラメータフライトは、確認・参考データの位置づけにし、今後も実施していくことが望ましい。

- ・地形効果補正のシステム化について

今回、地形情報とモンテカルロシミュレーションを組み合わせた新たな地形補正手法を大量なデータに適用できるような地形補正手法のシステム化を行った。今後、過去のデータにさかのぼり、データの精度の変化について考察を行っていく。

- ・位置情報取得方法の最適化について

昨年度、複数のGPSの性能を評価し、コスト面や性能で最適と判断したCORE社製の「QZ-NAV」により、通常のRSIシステムに付属のGPSと同時にデータを取得して実際に解析することで結果を比較した。その結果、場所によって20%ほどの差が出ることが分かった。特に山間部の谷間では位置情報の精度に差があると考えられる。今後もデータを比較し、精度評価を行っていく。

- ・ラドン子孫核種の弁別手法について

昨年度に続いて、80 km 圏外の航空機モニタリングデータにラドン弁別手法を適用した。その結果、地上の測定値と比較した結果から有効性が示された。一方で、これまで経験的に採用してきた測定日ごとにラドン影響フライトを行って減算する手法についても精度的に劣るものでないことが分かった。しかしながら、ラドン影響フライトの手間がなくなりフライト時間が短縮できること、および場所ごとに大気中のラドン子孫核種の影響が除去できることから、新たな方法のメリットは大きい。今後、本手法について従来手法と比較しつつ、データを蓄積し最適化していくことが望ましい。

11. まとめ

平成 29 年度に予定された 80 km 圏内の航空機モニタリング 1 回および 80 km 圏外の航空機モニタリング 1 回を確実に実施した。今回の結果を過去のモニタリングの結果と比較し、福島原子力発電所事故の影響があったエリアの空間線量率の全体的な減少傾向を把握することができた。また、複数の異なった位置情報取得手法を比較し、各機器の性能について評価するとともに、航空機モニタリングの換算手法に与える影響について評価した。さらに、空気中のラドン子孫核種の弁別手法についてシステム化を行い、初めて発電所から 80 km 圏外のデータに適用した。

事故以来、航空機モニタリングが日本で実施されて、7 年目となった。事故当時、定まっていなかった手法についてもある程度確立し、パラメータの精度や RSI システムの定期的な保守および軽微なトラブルへの対応経験により、作成する放射空間線量率マップの精度は高まってきているといえる。測定者の技能にかかわらず同じ測定結果が得られることを目的とし、専用の解析システムについて開発を継続的に実施してきており、今年度は新たな地形補正手法についてもシステム化を行った。今後、システムの最適化を行うとともに新たな手法の精度向上の効果について評価していくことが望ましい。

謝辞

本調査研究は、「平成 29 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（80 km 圏内外における航空機モニタリング）事業」の成果をとりまとめたものである。原子力機構、応用地質（株）、(株)NESI、エイ・ティ・エス(株)により 30 余名が、航空機に搭乗しての測定、地上での空間線量率測定、さらにデータ解析とそのマップ化に取り組んだ。航空機の運航は、朝日航洋（株）、中日本航空（株）が行った。ここに本モニタリングに参加された皆様に謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 飯田義正; 伊藤洋昭; 笹尾英嗣; 鶴田忠彦; 永島礼二; 三谷稔; 小林孝男: 海外ウラン資源探査—探査技術取りまとめ—, 核燃料サイクル機構技術資料, JNC-TN7410 2001-007, 2001.
- 2) Barasch G. E. and Richard H. B., Aerial radiological measuring surveys of the nuclear fuel services plant, west valley, New York, 1968 and 1969, AEC Report No. ARMS-68.6.9, 1972.
- 3) Hendricks, T. and Riedhauser, S., An aerial radiological survey of the Nevada test site., DOE/NV/11718-324, 1999.
- 4) Sanderson D.C.W., Cresswell A.J., Lang J.J. eds. An International Comparison of Airborne and Ground Based Gamma Ray Spectrometry. Results of the ECCOMAGS 2002 Exercise held 24th May to 4th June 2002, Dumfries and Galloway, Scotland. University of Glasgow, Glasgow. ISBN 0 85261 783 6., 2003, 387p.
- 5) 長岡鋭, 森内茂: 航空機 γ 線サーベイシステム ARSAS, 保健物理, 25, pp. 391-398, 1990.
- 6) 森内茂, 長岡鋭, 坂本隆一, 堤正博, 斎藤公明, 天野光, 松永武, 柳瀬信之, 笠井篤, 緊急時における航空機サーベイ法確立とシステム実用化に関する検討, JAERI-M 89-017, 1989, 82p.
- 7) Saito, K. and Moriuchi, S., Conversion factors for estimating release rate of gaseous radioactivity by an aerial survey., JAERI-M 88-016, 1988, 84p.
- 8) 大西亮一: 無人ヘリコプタを活用した空中放射線測定システムについて, 航空と宇宙, 671, pp.

8-14, 2009.

- 9) 原子力安全委員会: 環境放射線モニタリング指針, 平成 20 年 3 月.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) Sanada, Y., Sugita, T., Nishizawa, Y., Kondo, A., and Torii, T., The aerial radiation monitoring in Japan after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, Prog. Nuc. Sci. Tech., 4, pp.76-80, 2014.
- 15) IAEA, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -(Second Report), 2011.
- 16) 鳥居建男, 事故後初期の航空機モニタリングから得られたヨウ素 131 沈着量の分布, 日本原子力学会誌 (ATOMOZ), 55, pp. 702-706, 2013.
- 17) Torii, T., Sugita, T., Okada, C. E., Reed, M. S. and Blumenthal, D. J., Enhanced Analysis Methods to Derive the Spatial Distribution of ¹³¹I deposition on the Ground by Airborne Surveys at an Early Stage after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Health. Phys., 105, pp. 92-200, 2013.
- 18) Inomata, Y., Aoyama, M., Hirose, K., Sanada, Y., Torii, T., Tsubono, T., Tsumune, D. and Yamada, M., Distribution of radionuclides in surface seawater obtained by an aerial radiological survey. J., Nucl. Sci. Tech., 51, pp. 1059-1063, 2014.
- 19) 原子力規制庁 HP, 航空機モニタリング結果, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/191/list-1.html> (2018 年 3 月 1 日閲覧).
- 20) 原子力規制庁, 文部科学省航空機モニタリング行動計画, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5274/view.html> (2018 年 3 月 1 日閲覧).
- 21) 眞田幸尚, 西澤幸康, 卜部嘉, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 土田清文, 石橋聖, 前島正道, 結城洋一, 鳥居建男, 平成 25 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2014-012, 2014.
- 22) 眞田幸尚, 森愛理, 石崎梓, 宗像雅広, 中山真一, 西澤幸康, 卜部嘉, 中西千佳, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 土田清文, 石橋聖, 吉田真美, 前島正道, 結城洋一, 鳥居建男, 平成 26 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2015-006, 2015.
- 23) 眞田幸尚, 宗像雅広, 森愛理, 石崎梓, 嶋田和真, 廣内淳, 西澤幸康, 卜部嘉, 中西千佳, 山田勉, 石田睦司, 佐藤義治, 佐々木美雪, 平山弘克, 高村善英, 西原克哉, 伊村光生, 宮本賢治, 岩井毅行, 松永祐樹, 豊田政幸, 飛田晋一郎, 工藤保, 中山真一, 平成 27 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2016-016, 2016.
- 24) 眞田幸尚; 森愛理; 岩井毅行; 瀬口栄作; 松永祐樹; 河端智樹; 豊田政幸; 飛田晋一郎; 平賀祥吾; 佐藤義治; 卜部嘉; 石崎梓; 嶋田和真; 廣内淳; 工藤保, 平成 28 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究). JAEA-Technology 2017-034, 2017.
- 25) Ishizaki, A., Sanada, Y., Mori, A., Imura, M., Ishida, M. and Munakata, M., Investigation of snow cover effects and attenuation correction of gamma ray in aerial radiation monitoring, Remote Sens., 8(11), 892; doi:10.3390/rs8110892, 2016.

- 26) Ishizaki, A., Sanada, Y., Ishida, M., and Munakata, M., Application of topographical source model for air dose rates conversions in aerial radiation monitoring., *J. Environ. Radioact.*, 180, 82-89, 2017.
- 27) 国土地理院ホームページ, <http://www.gsi.go.jp/kibanchizu/kibanchizu60004.html> (2018年3月1日閲覧).
- 28) 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.
- 29) ICRU, Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU report 53, 1994.
- 30) 原子力機構 HP, 平成 28 年度放射能測定調査委託事業「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約」成果報告書, <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry03.html> (2018年3月1日閲覧).
- 31) 原子力機構, 平成 29 年度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「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約」成果報告書, in press.
- 32) 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.
- 33) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003.
- 34) Nishizawa, Y., Sugita, T., Sanada, Y. and Torii, T., Analytical method for distribution of natural radionuclides after the FDNPP accident by aerial monitoring, Proceedings of the Twenty-First EGS Users' Meeting in Japan, KEK Tsukuba, 62-71, 2014.
- 35) 文部科学省, ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトロメトリー, 放射能測定法シリーズ 7, 1992.
- 36) 湊進, 日本における地表 γ 線の空間線量率分布, 地学雑誌, 115, pp. 87-95, 2006.
- 37) 国土地理院 HP, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>, (2018年3月1日閲覧).
- 38) Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, *J. Nucl. Sci. Technol.*, (2018)
- 39) Esri Japan Home Page, <https://www.esri.com/products/arcgis/>(2018年3月1日閲覧)
- 40) Oikawa S., Nobuyuki, K., Sanada, T., Ohashi, N., Uesugi, M., Sato, K., Abukawa, J. and Higuchi, H. A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan. *J. Environ. Radioact.*, 65, pp. 203-213, 2003.
- 41) 西川嗣雄, ラドン族(2) -自然放射線環境, 福井大学地域環境研究教育センター研究紀要「日本海地域の自然と環境」, 5, pp. 83-94, 1998.
- 42) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003.
- 43) 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/> (2018年3月1日閲覧).