

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)

Radiation Monitoring Using Manned Helicopter
around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station in the Fiscal Year 2014
(Contract Research)

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

Yukihisa SANADA, Airi MORI, Azusa ISHIZAKI, Masahiro MUNAKATA
Shinichi NAKAYAMA, Yukiyasu NISHIZAWA, Yoshimi URABE, Chika NAKANISHI
Tsutomu YAMADA, Mutsushi ISHIDA, Yoshiharu SATO, Hirokatsu HIRAYAMA
Yoshihide TAKAMURA, Katsuya NISHIHARA, Mitsuo IMURA, Kiyofumi TSUCHIDA
Satoshi ISHIBASHI, Mami YOSHIDA, Masamichi MAESHIMA, Youichi YUUKI
and Tatsuo TORII

安全研究・防災支援部門
安全研究センター

Nuclear Safety Research Center
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

July 2015

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2015

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)

日本原子力研究開発機構

安全研究・防災支援部門 安全研究センター

眞田 幸尚、森 愛理、石崎 梓^{※1}、宗像 雅広、中山 真一、
西澤 幸康^{※2}、卜部 嘉^{※3}、中西 千佳^{※2}、山田 勉^{※4}、石田 睦司^{※3}、
佐藤 義治⁺¹、平山 弘克^{※5}、高村 善英^{※5}、西原 克哉^{※5}、伊村 光生^{※6}、
土田 清文^{*2}、石橋 聖^{*3}、吉田 真美^{*4}、前島 正道^{*1}、結城 洋一^{*1}、
鳥居 建男⁺¹

(2015 年 4 月 21 日 受理)

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災による津波に起因した東京電力福島第一原子力発電所事故によって、大量の放射性物質が周辺に飛散した。事故直後より、放射線の分布を迅速かつ広範囲に測定する手法として、航空機等を用いた空からの測定方法が適用されている。本報告書には、平成 26 年度に実施した航空機モニタリングの結果についてまとめた。

本調査研究は、「平成 26 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。

安全研究センター：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

+1 福島研究開発部門 福島環境安全センター

※1 博士研究員

※2 技術開発協力員 (株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター)

※3 技術開発協力員 (株式会社 NESI)

※4 技術開発協力員 (日本放射線エンジニアリング株式会社)

※5 技術開発協力員 (検査開発株式会社)

※6 技術開発協力員 (静岡スカイテック株式会社)

*1 応用地質株式会社

*2 応用地質株式会社 (2014 年 12 月迄技術開発協力員)

*3 原電事業株式会社 (2015 年 3 月迄技術開発協力員)

*4 東京レコードマネジメント株式会社 (2015 年 3 月迄技術開発協力員)

**Radiation Monitoring Using Manned Helicopter
around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station in the Fiscal Year 2014
(Contract Research)**

Yukihisa SANADA, Airi MORI, Azusa ISHIZAKI^{*1}, Masahiro MUNAKATA, Shinichi NAKAYAMA,
Yukiyasu NISHIZAWA^{*2}, Yoshimi URABE^{*3}, Chika NAKANISHI^{*2}, Tsutomu YAMADA^{*4},
Mutsushi ISHIDA^{*3}, Yoshiharu SATO⁺¹, Hirokatsu HIRAYAMA^{*5},
Yoshihide TAKAMURA^{*5}, Katsuya NISHIHARA^{*5}, Mitsuo IMURA^{*6},
Kiyofumi TSUCHIDA^{*2}, Satoshi ISHIBASHI^{*3}, Mami YOSHIDA^{*4},
Masamichi MAESHIMA^{*1}, Youichi YUUKI^{*1} and Tatsuo TORII⁺¹

Nuclear Safety Research Center, Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 21, 2015)

By the nuclear disaster of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (NPS), Tokyo Electric Power Company (TEPCO), caused by the East Japan earthquake and the following tsunami occurred on March 11, 2011, a large amount of radioactive materials was released from the NPS. These results of the aerial radiation monitoring using the manned helicopter in the fiscal 2014 were summarized in the report.

Keywords: Aerial Radiation Monitoring, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Radiocesium, Map, Natural Nuclide

This report was summarized for results that JAEA carried out as commissioned business by "the projects of the radiation monitoring using manned helicopter around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station" of the Nuclear Regulation Authority in the fiscal 2014.

+ 1 Fukushima Environmental Safety Center, Sector of Fukushima Research and Development

※1 Post-Doctoral Fellow

※2 Collaborating Engineer (Visible Information Center, Inc.)

※3 Collaborating Engineer (NESI, Inc.)

※4 Collaborating Engineer (Japan Radiation Engineering Co.Ltd.)

※5 Collaborating Engineer (Inspection Development Co.Ltd.)

※6 Collaborating Engineer (Shizuoka Skytech Co.Ltd.)

* 1 OYO Corp.

* 2 OYO Corp. (Collaborating Engineer, until December 2014)

* 3 Nuclear Services Company Inc. (Collaborating Engineer, until March 2015)

* 4 Tokyo Records Management Company, Inc. Collaborating Engineer, until March 2015)

目次

1.	はじめに.....	1
2.	航空機モニタリングの経緯.....	3
3.	航空機モニタリングシステム.....	6
3.1.	航空機モニタリングシステム.....	6
3.2.	ヘリコプターの選定.....	8
3.3.	線源試験.....	10
3.4.	RSIシステムの保守.....	11
4.	データ取得及び解析方法.....	14
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.....	14
4.2.	データ取得方法.....	17
4.3.	キャリブレーションフライトによるパラメータ取得.....	19
4.4.	解析のフロー.....	24
4.5.	線量率への換算方法.....	25
4.5.1.	バックグラウンド (自己汚染及び宇宙線).....	25
4.5.2.	高度補正係数.....	27
4.5.3.	地上 1 m 高さの線量率への換算.....	30
4.5.4.	線量率への換算方法.....	36
4.6.	放射性セシウムの沈着量への換算方法.....	36
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.....	36
4.6.2.	線量率-放射能換算係数.....	38
4.7.	減衰補正.....	39
4.8.	検出下限値.....	40
4.8.1.	線量率の検出下限値.....	40
4.8.2.	放射性セシウムの沈着量の検出下限値.....	41
4.9.	不確かさ.....	41
4.10.	マッピング.....	41
4.11.	地上における測定値との比較.....	43
5.	モニタリング結果.....	45
5.1.	第 9 次モニタリング.....	45
5.2.	東日本第 5 次モニタリング.....	50
6.	モニタリング結果の考察.....	57
6.1.	過去のモニタリング結果との比較.....	57
6.2.	土地利用による線量率の変化傾向の違い.....	64
6.3.	空気中のラドン子孫核種の影響.....	67
6.4.	フライト高度と地形効果について.....	71
6.5.	天然放射性核種由来の線量率マップの作成.....	73

7. 今後の課題.....	78
8. まとめ.....	79
謝辞.....	79
参考文献.....	79

Contents

1.	Introduction	1
2.	Progress of radiation monitoring using manned helicopter	3
3.	Radiation monitoring system.....	6
3.1.	System	6
3.2.	Selection of helicopter	8
3.3.	Response of system by the point source.....	10
3.4.	Maintenance.....	11
4.	Data acquisition and analysis method	14
4.1.	Basic approach of the analysis	14
4.2.	Data acquisition	17
4.3.	Acquisition of analytical parameters with test flight.....	19
4.4.	Analysis method	24
4.5.	Conversion to dose rate.....	25
4.5.1.	Background (Cosmic ray, Self contamination)	25
4.5.2.	Attenuation factor (AF)	27
4.5.3.	Conversion to the dose rate on the 1 m height.....	30
4.5.4.	Procedure of conversion of dose rate.....	36
4.6.	Conversion from dose rate to radiocesium deposition.....	36
4.6.1.	Discrimination of natural radionuclide	36
4.6.2.	Conversion factor from dose rate to radiocesium deposition	38
4.7.	Decay correction	39
4.8.	Detection limit	40
4.8.1.	Detected limit of dose rate.....	40
4.8.2.	Detected limit of radiocesium deposition	41
4.9.	Uncertainty	41
4.10.	Mapping.....	41
4.11.	Comparison with the ground data.....	43
5.	Results of the radiation monitoring	45
5.1.	9th monitoring inside 80km from the FDNPS.....	45
5.2.	5th monitoring outside 80km from the FDNPS.....	50
6.	Consideration	57
6.1.	Comparison with past monitoring results.....	57
6.2.	Effect of land utilization with past monitoring results	64
6.3.	Effect of radon and daughters in the air	67
6.4.	Effect of variation of flight altitude and topography	71
6.5.	Mapping of the dose rate originated from natural radionuclides	73

7. Challenges for the future	78
8. Summary	79
Acknowledgement	79
References	79

Table List

Table 2-1	航空機モニタリングの経緯	4
Table 3-1	使用したヘリコプターと RSI システムのリスト	9
Table 3-2	ポイントソースによる機体の遮蔽状況の比較	10
Table 4-1	キャリブレーションフライトの一覧	20
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及び CR-index	27
Table 4-3	使用したパラメータのまとめ	28
Table 4-4	AF データ一覧	29
Table 4-5	CD データ一覧	33
Table 4-6	BG-index 一覧	38
Table 4-7	RSI システムの検出下限値	41
Table 6-1	森林部及び市街地部における線量率の比較	66
Table 6-2	使用した減弱係数 (m^{-1}) のまとめ	75

Figure List

Fig. 2-1	航空機モニタリングの実績.....	5
Fig. 3-1	RSI システムのブロック図	6
Fig. 3-2	RSI システムの写真	7
Fig. 3-3	ヘリ底に燃料タンクのない機体一覧.....	8
Fig. 3-4	線源試験イメージ	10
Fig. 3-5	RSI システムの半値幅及び Gain の変動 (RSI-1).....	12
Fig. 3-6	RSI システムの半値幅及び Gain の変動 (RSI-2).....	13
Fig. 4-1	対地高度と線量率の関係	15
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計数に対する線源位置の関係	15
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計数に対する線源位置の関係	16
Fig. 4-4	上空からの測定イメージ	16
Fig. 4-5	フライトイメージ	17
Fig. 4-6	予定したフライトの測線	18
Fig. 4-7	テストラインフライトのイメージ.....	21
Fig. 4-8	テストラインの場所	21
Fig. 4-9	テストポイントフライトのイメージ.....	22
Fig. 4-10	テストポイントの場所	23
Fig. 4-11	BG 天然核種フライトの場所、オーバーラップフライト場所	24
Fig. 4-12	解析のフロー	25
Fig. 4-13	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.....	26
Fig. 4-14	海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例.....	26
Fig. 4-15	対地高度と計数率の関係	28
Fig. 4-16	テストポイントにおける地上の線量率測定結果例	31
Fig. 4-17	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	32
Fig. 4-18	放射性セシウムの計数率の算出イメージ	37
Fig. 4-19	BG-index の算出例	37
Fig. 4-20	重量緩衝深度と線量率-放射能換算係数の関係.....	39
Fig. 4-21	IDW に入力するパラメータとマップの関係	42
Fig. 4-22	地上における線量率測定結果と航空機モニタリングによる線量率の比較	44
Fig. 4-23	地上における線量率測定結果との比較 (規制庁事業).....	44
Fig. 4-24	地上における in-situ Ge 測定結果との比較 (規制庁事業).....	44
Fig. 5-1	第 9 次モニタリングにおける線量率マップ	46
Fig. 5-2	第 9 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	47
Fig. 5-3	第 9 次モニタリングにおける ^{137}Cs 沈着量マップ	48
Fig. 5-4	第 9 次モニタリングにおける ^{134}Cs 沈着量マップ	49
Fig. 5-5	東日本第 5 次モニタリングにおける放射線量率マップ.....	51

Fig. 5-6	東日本第5次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	52
Fig. 5-7	東日本第5次モニタリングにおける ¹³⁷ Cs沈着量マップ	53
Fig. 5-8	東日本第5次モニタリングにおける ¹³⁴ Cs沈着量マップ	54
Fig. 5-9	東日本第5次モニタリングと第9次モニタリングにおける放射線量率マップ	55
Fig. 5-10	東日本第5次モニタリングと第9次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	56
Fig. 6-1	避難指示区域における過去の線量率マップの比較	59
Fig. 6-2	第4次モニタリング及び第9次モニタリングの線量率測定結果の比較	61
Fig. 6-3	第4次モニタリング及び第9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	61
Fig. 6-4	航空機モニタリングによる避難指示区域内の線量率の変化傾向	62
Fig. 6-5	航空機モニタリングによる避難指示区域内の ¹³⁷ Cs沈着量の変化傾向	62
Fig. 6-6	事故からの経過日数と重量緩衝深度の関係	63
Fig. 6-7	発電所から80 km圏内における土地利用図	65
Fig. 6-8	森林部及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9次モニタリングの比較)	66
Fig. 6-9	ラドン子孫核種の日変化(第9次モニタリング)	68
Fig. 6-10	ラドン子孫核種の日変化(東日本第5次モニタリング)	69
Fig. 6-11	フライトの高度と測定範囲の関係	71
Fig. 6-12	対地高度を変化させたフライトと線量率マップの関係及び地上における測定結果との相関	72
Fig. 6-13	関数適合法を用いた ¹³⁴ Csと ⁴⁰ Kの弁別	75
Fig. 6-14	テストポイントの地上の線量率と線量率換算係数(CD)の関係	75
Fig. 6-15	天然由来の線量率マップ, 放射性セシウム由来の線量率と自然放射線の線量率の比率	76
Fig. 6-16	航空機モニタリングによる自然放射線の線量率とゲルマニウム半導体検出器で得られた自然放射線の線量率の比較	76
Fig. 6-17	天然放射性核種による線量率マップ	77

This is a blank page.

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)が発生した。事故により、周辺環境に放射性物質が拡散し、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、ウラン探査の技術がベースとなり¹⁾、米国スリーマイル島(以下、スリーマイル島)の事故やチェルノブイル原子力発電所事故を契機として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開発されてきた。米国では、エネルギー省(DOE)を中心に多数の航空機モニタリングの機器を所有しており、核実験場等の計測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ル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し、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⁾。

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に利用されて以来、我が国でも旧日本原子力研究所を中心に開発が進められた。森内らは、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、原子力災害時の空気中の放射性プルームの評価を目的とし、シミュレーション計算を用いたガス状の放射性物質の測定手法に関する基礎研究が行われている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等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が、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。

事故直後、航空機モニタリングは、DOEと文部科学省(以下、文科省)により開始された^{10), 11), 12)}。航空機モニタリングの手法については、日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)を初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ある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及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4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、文科省事業であったが、2013年度に原子力規制庁(以下、規制庁)に移管されて定期的実施されており、その結果は規制庁のHPで随時公開されている¹⁹⁾。2014年度における本委託事業では、福島県及びその近隣県の航空機モニタリングを実施した。ここでは、その結果について報告する。

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 及び Fig. 2-1 に示す。航空機モニタリングは、2011年3月25日に文科省によりプレス発表された「文科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 NUSTEC によって「第1次モニタリング」として発電所から 80 km 圏内を実施した。また、2011年5月18日から「第2次モニタリング」として NUSTEC により発電所 80-100 km 圏が実施された。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、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、「警戒区域及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。線量率の比較的高い場所(0.2 μ Sv/h を超える地域とその周辺)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日及び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、前年に続き、「警戒区域及び避難指示区域における航空機モニタリング(第6.5次)」を実施した。

2013年度(平成25年度)は、事業主体が原子力規制庁に移管され、80 km 圏内について2013年8月27日及び2013年11月2日から「第7次モニタリング」及び「第8次モニタリング」を実施した。また、2013年9月3日から線量率の比較的高い場所を対象に「東日本第4次モニタリング」を実施した。なお、平成25年度の結果については、眞田らの報告書に詳しい²¹⁾。

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日から、発電所から 80 km 圏内を除く前年と同じ地域を対象に「東日本第5次モニタリング」を実施した。このように、航空機モニタリングの事業は日本全域について福島原子力発電所事故の影響の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。

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次航空機モニタリング	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次航空機モニタリング	発電所から80-100 km圏内	NUSTEC	NUSTEC	2011/5/18~5/26	2011/6/16
第3次航空機モニタリング	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1stモニタリング	青森→福井までの東日本 (2次, 3次実施部分除く)	JAEA (NUSTEC, OYO)	JAEA (NUSTEC, OYO)	2011/6/22~10/20	随時公表
第4次航空機モニタリング	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	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2ndモニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA (NUSTEC, OYO)	JAEA (NUSTEC, OYO)	2012/4/2~5/7	2012/9/28
第5次航空機モニタリング	発電所から80km圏内	分析センター(OYO)	分析センター(NUSTEC)	2012/6/22~6/28	2012/9/28
第6次航空機モニタリング	発電所から80km圏内	分析センター(OYO)	分析センター(NUSTEC)	2012/10/31~11/16	2013/3/1
東日本3rdモニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	NUSTEC	JAEA	2012/10/31~12/28	2013/3/1
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	警戒区域及び避難指示区域	分析センター(NUSTEC)	分析センター(NUSTEC)	2013/3/4~3/11	2013/5/13
第7次航空機モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2013/8/27~9/28	2013/12/25
東日本4thモニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2013/9/3~11/4	2014/3/7
第8次航空機モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2013/11/2~11/19	2014/3/7
第9次航空機モニタリング	発電所から80km圏内	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2014/9/1~9/20	2015/2/13
東日本5thモニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2014/9/21~11/7	2015/2/13

* DOE:米国エネルギー省、JAEA:(独)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、

分析センター:(公財)日本分析センター

年	2011 (平成23年度)			2012 (平成24年度)			2013 (平成25年度)			2014 (平成26年度)		
	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12
80 km 圏内	第1次 (4/6-4/29)	第3次 (5/31-7/2)	第4次 (10/25-11/5)	第5次 (6/22-6/28)	第6次 (10/31-11/16)	第7次 (8/27-9/28)	第8次 (11/2-11/19)	第9次 (9/1-9/20)				
	警戒区域・計画的避難準備区域 (4.5次) (2/6-2/10)											
	警戒区域・計画的避難準備区域 (6.5次) (3/4-3/11)											
80 km 圏外	第2次 80-100km圏内* (5/18-5/26)	東日本第1次 青森～福井・岐阜・愛知 (6/22-10/10)	西日本 + 北海道全域 京都・滋賀～沖縄 (1/30-5/31)	東日本第2次 (4/2～5/7)	東日本第3次 (10/31～12/28)	東日本第4次 (9/3～11/4)	東日本第5次 (9/21～11/7)					

↑ * 一部、120 km圏内

福島原子力発電所事故

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績

3. 航空機モニタリングシステム

3.1. 航空機モニタリングシステム

航空機モニタリングシステム (Aerial radiation monitoring system: ARMS) には、NaI シンチレーション検出器のような大型のスペクトル測定型の検出器の情報と 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 (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出来る。また、全体は外付けのバッテリーで駆動し、完全充電で 5 時間稼働が可能である。本書においては、RSI システムは 2 セットあるため、それぞれ RSI-1 及び RSI-2 と区別する。

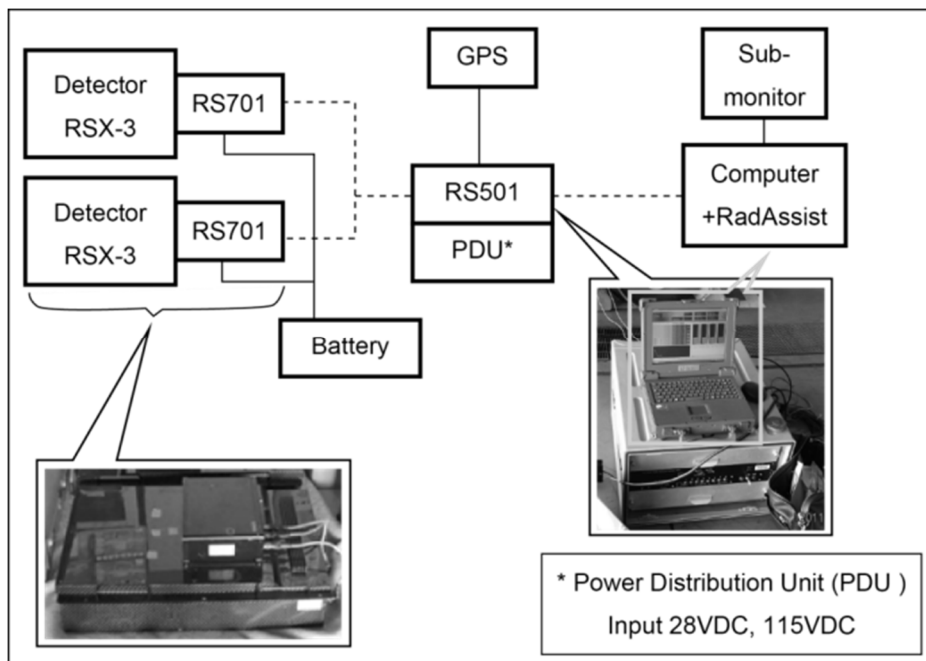


Fig. 3-1 RSI システムのブロック図

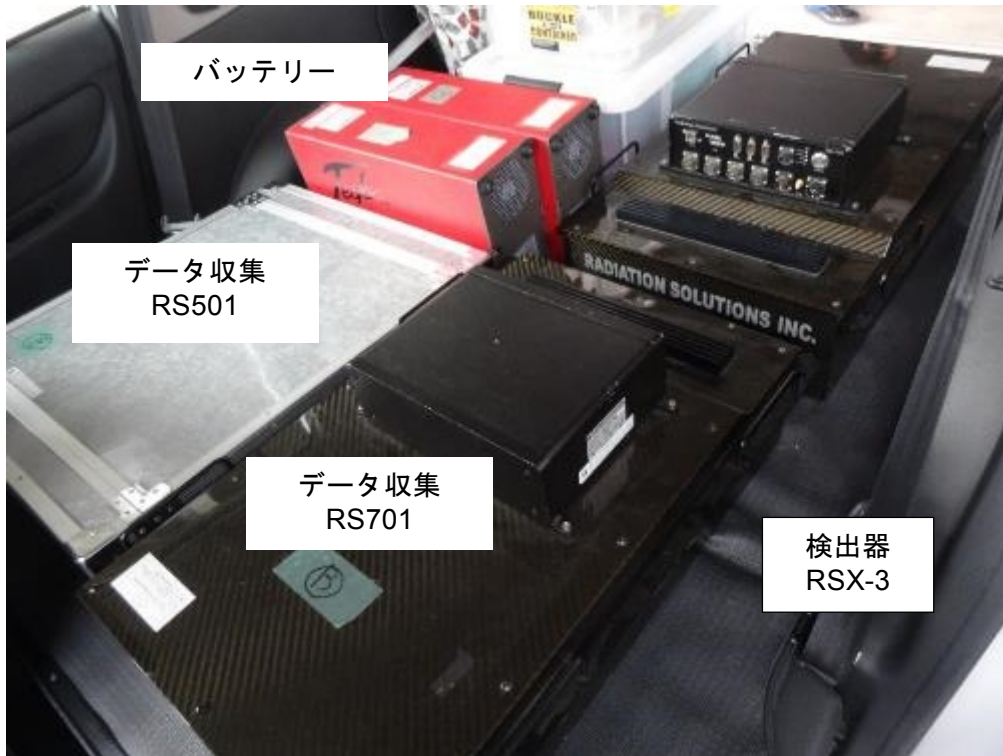


Fig. 3-2 RSI システムの写真

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、燃料タンクの材料及び燃料による放射線の遮へいを無視できず評価が難しくなる。そこで、燃料の遮蔽状況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 及び 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 ヘリ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	ヘリコプター			
			RSI-1		RSI-2	
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

() 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

3.2節で述べたように、機底に燃料タンクのない機体を選定しているが、機種によって遮蔽の程度は異なると考えられる。なお、この遮蔽状況の違いは、後述するパラメータフライトに含まれるため、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。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。なお、線源は、検出器からの距離を固定し (90 cm)、1 分間の平均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 (JA6928) の計数率が 10 %ほど低かったが、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。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も若干遮蔽状況は変わると考えられるので、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。

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 90 cm 位置に線源を配置)

No.	System	ヘリコプター	計数率	No.1を1として規格化
1	RSI-1	Bell430 (JA05TV) NNK	122,000	1.00
2	RSI-2	Bell412 (JA6928) AAC	108,000	0.89
3		Bell412 (JA6767) NNK	117,000	0.96

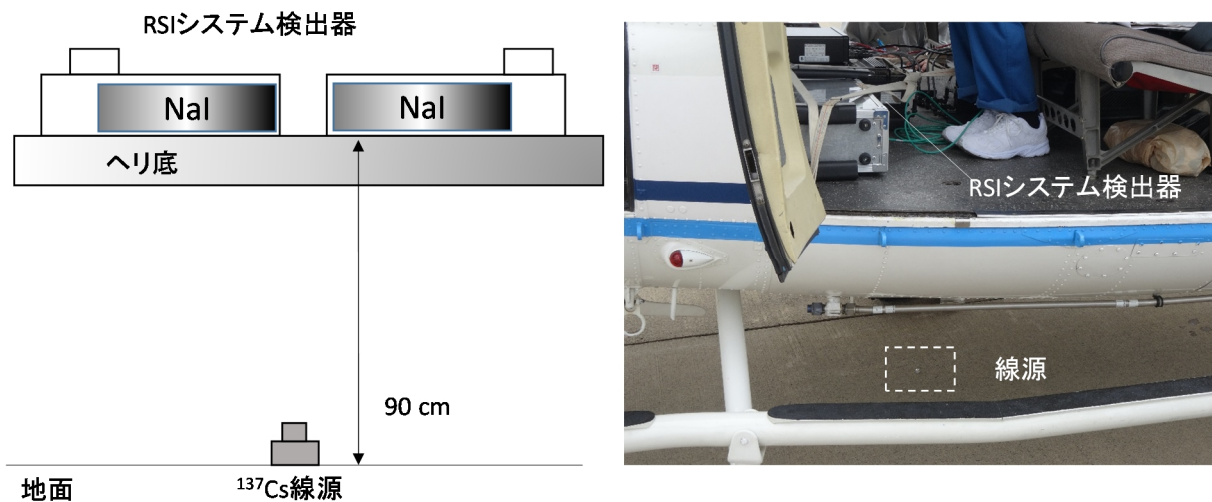


Fig. 3-4 線源試験イメージ

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、各フライト前に以下の事項を確認した。

- ・RSI システムの接続チェック: データ収集装置 (RS701 及び RS501) に表示されるエラーランプチェック
- ・チェックプログラムによる検出器の特性確認 (環境中に存在する ^{208}Tl の 2,614 keV のピークの半値幅 (Full Width at Half Maximum; FWHM) と信号増幅回路 (Amplifier; アンプ) の振幅利得 (gain; ゲイン) をチェック)

ピークの半値幅については、製造メーカーからの保守の推奨値として 6%以下とされている。日常の点検で常に数値を確認し、この推奨値を超えた場合には、高圧電源の電圧を変更するなど再調整を実施した。また、アンプのゲインについては 0.8 を下回る場合に再調整を行った。本事業における FWHM とアンプのゲインの推移について Fig.3-5, Fig.3-6 に示す。図中の RSI-1 以降の枝番は 3 台配置してある検出器番号である。このように、アンプのゲインは使用日数が長くなるにつれ若干上昇傾向にある。これは、気温の低下により検出器の信号が小さくなることに起因する。このことから、気温の低い時期のモニタリングの際には注意が必要であり、ヘリコプターの機内はなるべく気温が下がらないようにすることが望ましい。これらのデータは RSI システムの保守を行う際に参考となる。

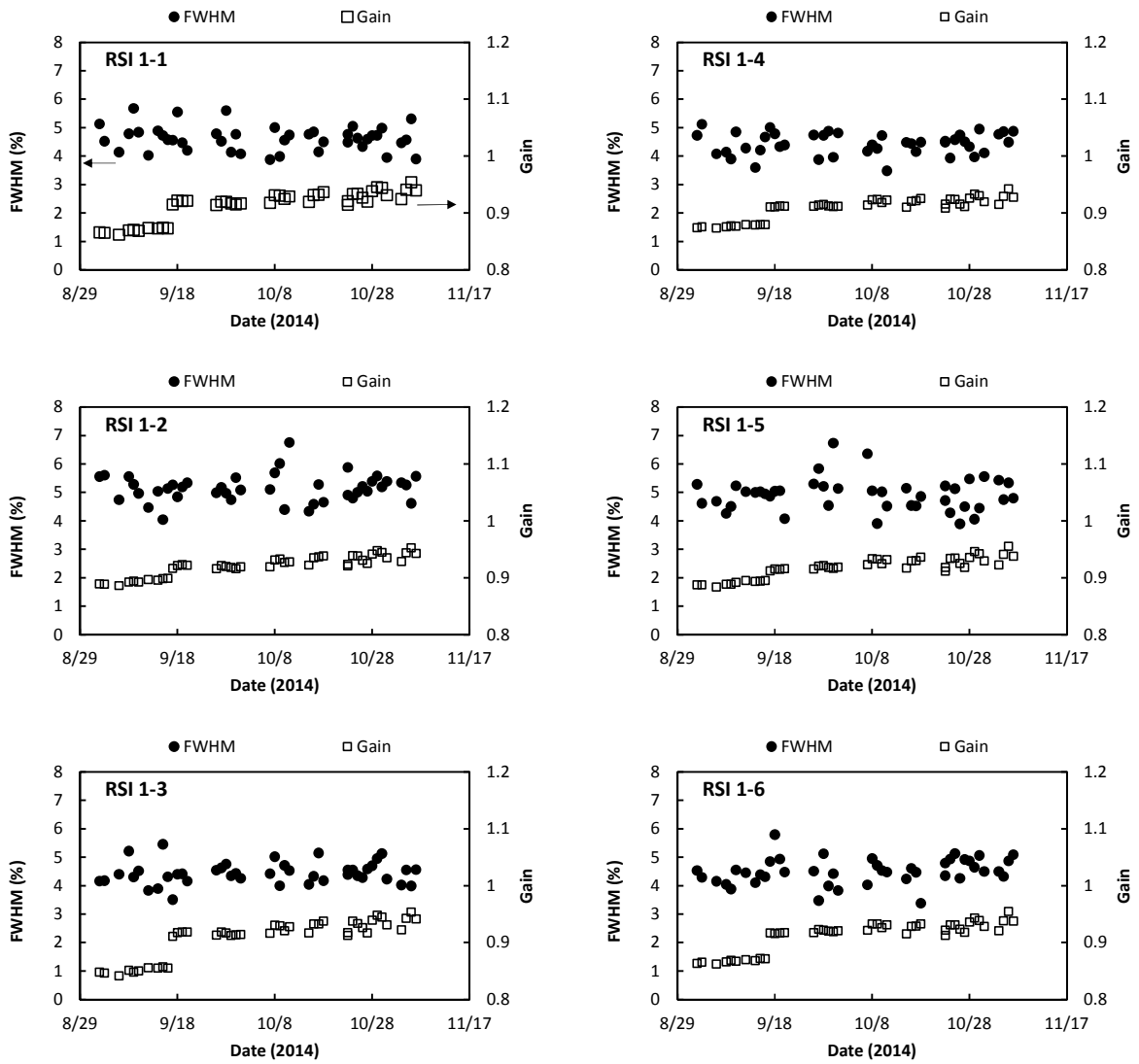


Fig. 3-5 RSI システムの半値幅及び Gain の変動 (RSI-1)

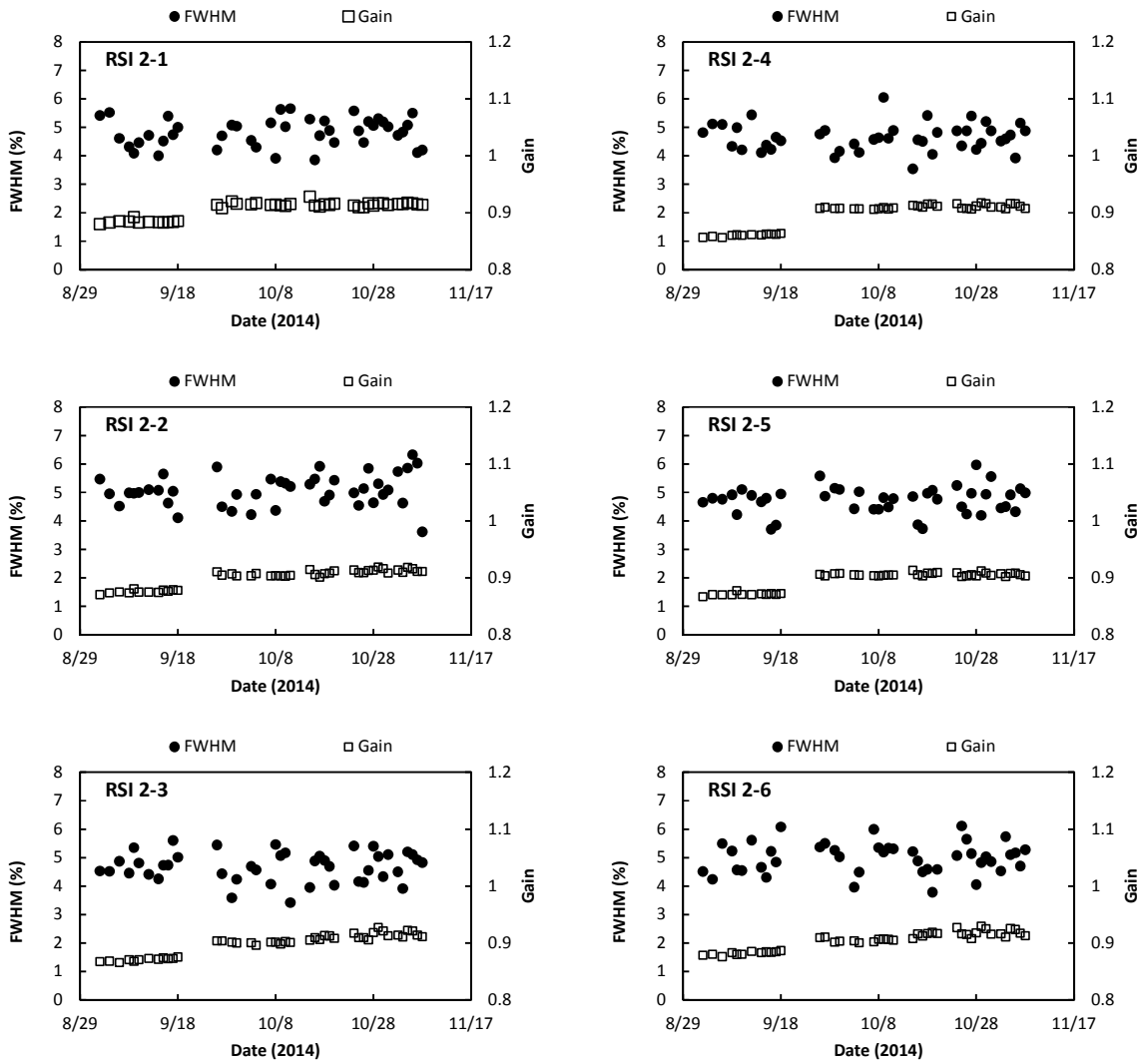


Fig. 3-6 RSI システムの半値幅及び Gain の変動 (RSI-2)

4. データ取得及び解析方法

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。
- ・ 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具体的に理解するため、 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、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とがわかる。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こと、線源からの距離をパラメータとした一定の指数関数の関係で放射線が減衰するが、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、放射線の減衰だけでなく影響を受ける線源の範囲が広がり、一定の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、高度が高くなるにつれ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、同ジオメトリにおける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, 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 毎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 及び 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、高度と測定範囲の関係が高度が引くにつれて、1:1 から逸脱し、測定範囲が大きくなることを示している。飛行する対地高度が変化することは、地上の測

定範囲が変化することになるが、上空から測定する不確かさを考慮すると、航空機モニタリングのデータの条件を一定にするには、対地高度は一定でフライトすること必要である。実際には、これらの理論や測定の不確かさ等を考慮し、対地高度 300 m を目安とし約 150 m～600 m 以内のデータを使用している。

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。

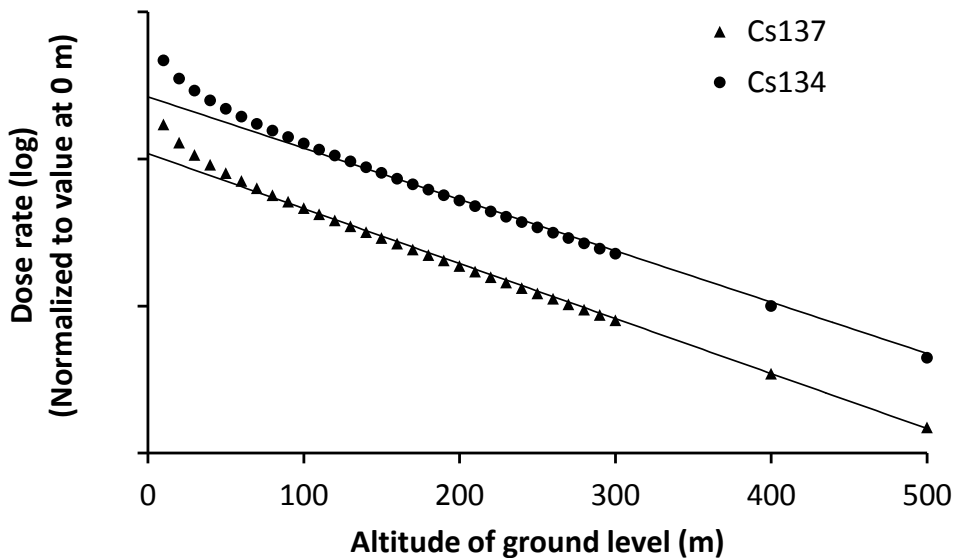


Fig. 4-1 対地高度と線量率の関係
(半径 2,000 m × 高さ 1 mm の円柱線源で計算, 縦軸は対数目盛)

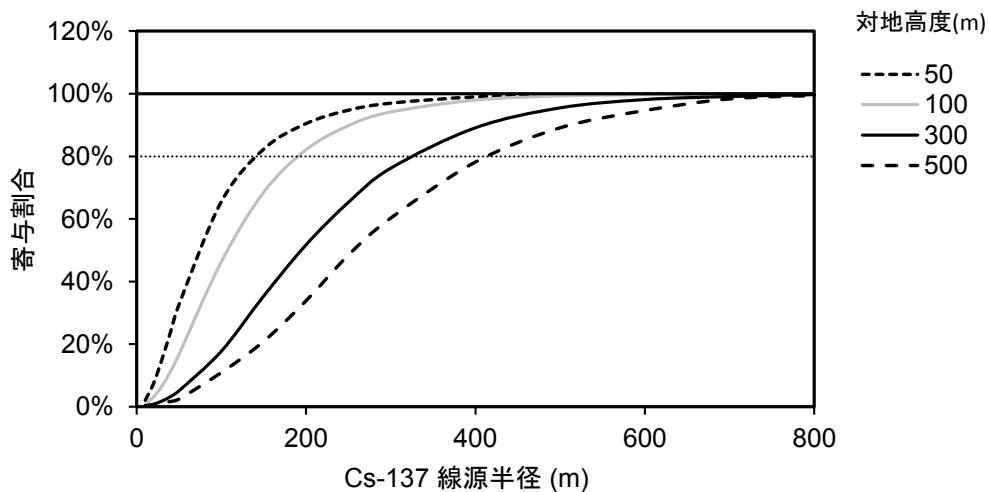


Fig. 4-2 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の計数に対する線源位置の関係
(上空での検出器の計数率を 100 % に規格化し、線源半径由来の計数率の割合を積算)

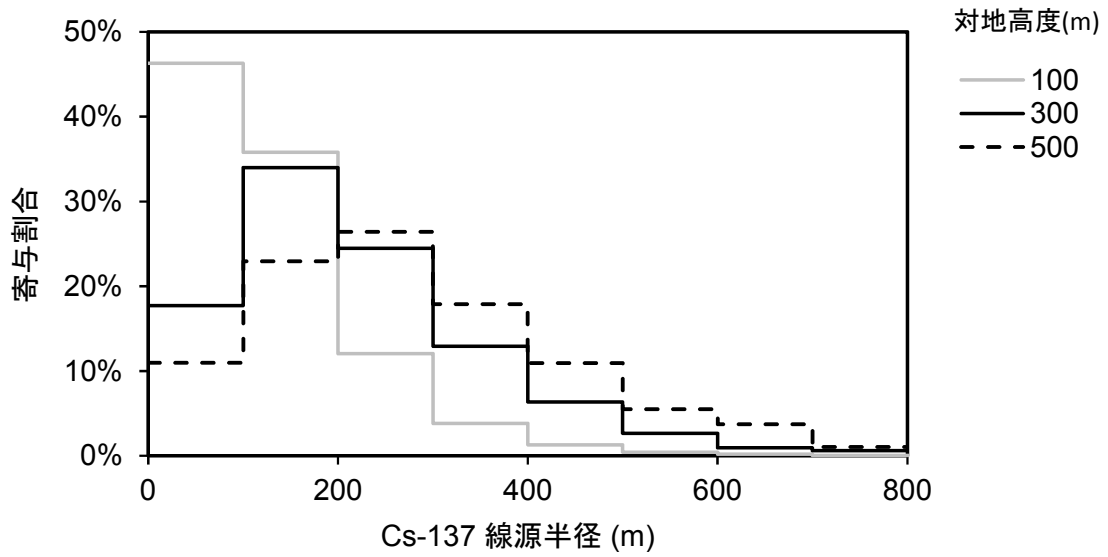


Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の計数に対する線源位置の関係 (上空での検出器の計数率を 100 %に規格化し、100 m ごとのドーナツ状の部分由来の計数率の割合)

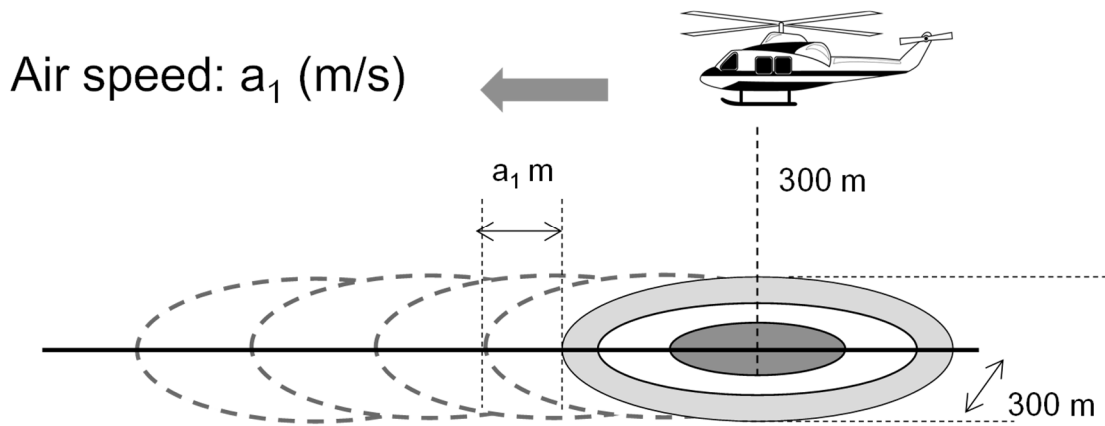


Fig. 4-4 上空からの測定イメージ

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。Fig. 4-5 にデータ取得のイメージを示す。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。Fig. 4-6 にフライトの予定測線について示す。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
 - 80km 圏内（発電所から 3 km 以内を除く）
 - 0.6 km：避難指示区域
 - 0.9 km：0.2 μ Sv/h 以上の地域
 - 1.8 km：その他の地域
 - 80km 圏外
 - 1.0 km：0.2 μ Sv/h 以上の地域
 - 3.0 km：0.2 μ Sv/h 未満の地域

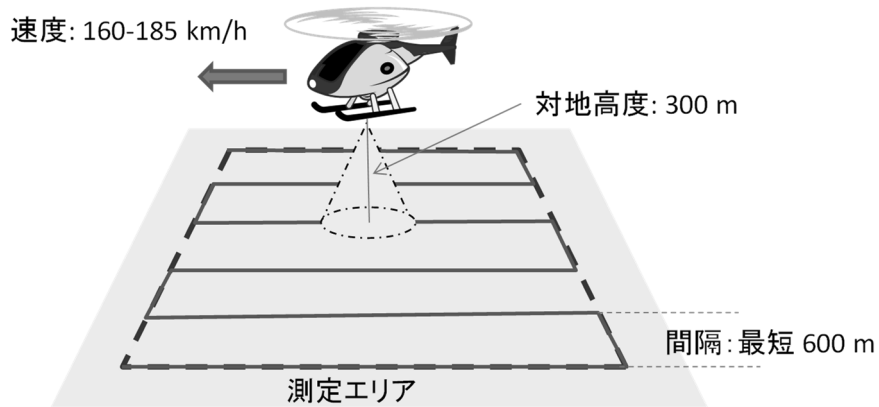


Fig. 4-5 フライトイメージ

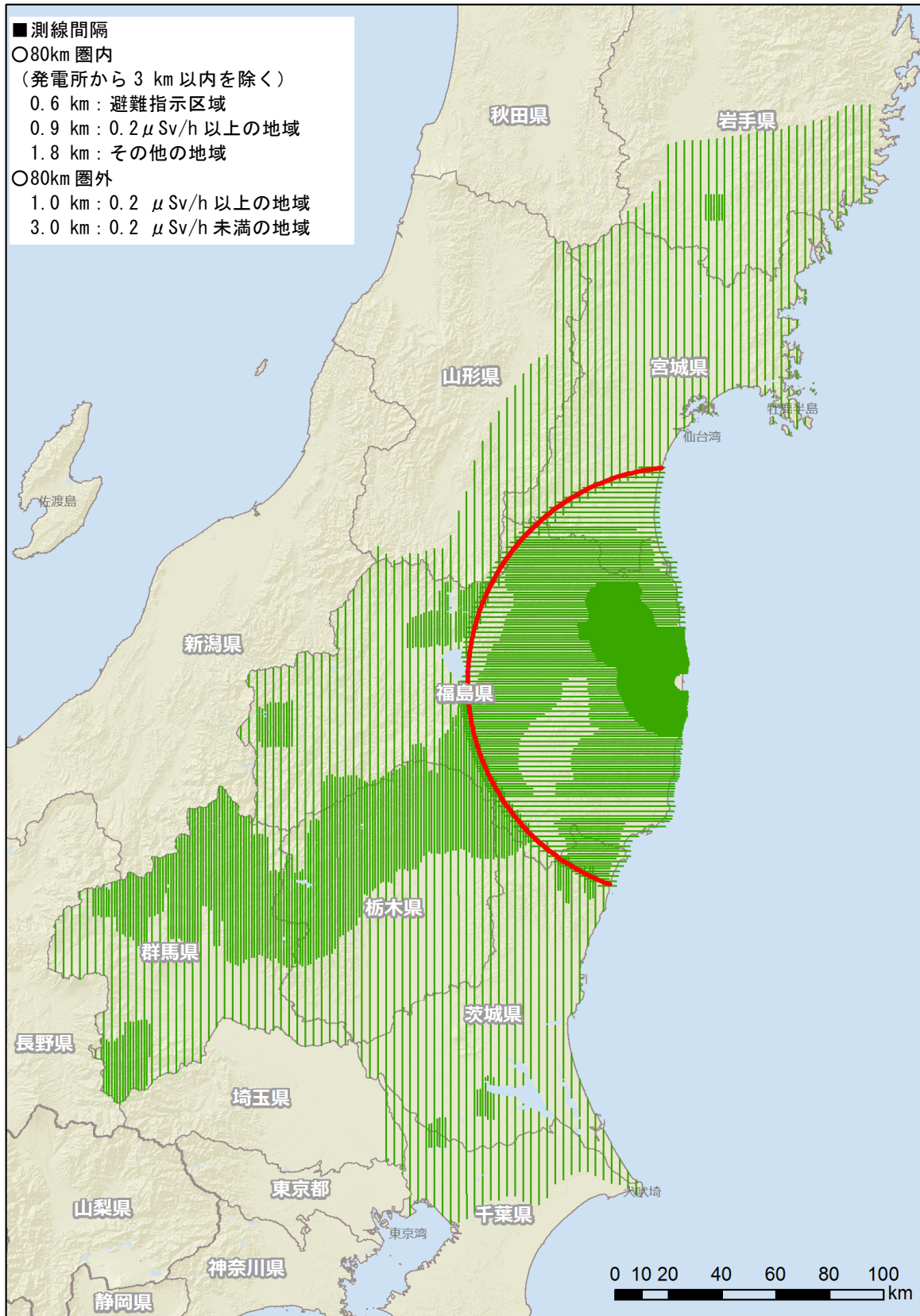


Fig. 4-6 予定したフライトの測線
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

4.3. キャリブレーションフライトによるパラメータ取得

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率や地表面の放射性セシウムの沈着量に換算するため、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、線量率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 m, 300 m, 450 m, 600 m, 750 m, 900 m, 1,500 m) フライトを実施した。得られたデータは高度毎に平均化し、高度と計数率のグラフを作成し、指数近似の傾きを AF とする。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。

テストポイントフライトとは、半径約 1,000 m の範囲内で線量率の勾配が小さい場所及び地形の平坦な地点を選定し、地上の線量率を測定した場所の上空をフライトし、基準高度 (300 m) における地上の線量率換算係数 (Conversion factor of Dose-rate, 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 (日立アロカメディカル製 TCS-171B) と電離箱式サーベイメータ (日立 ALOKA 社製 ICS-323C) を用いて、半径約 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テストラインで実施し、地上で測定した線量率との比較する線量率換算係数を算出するフライトはテストポイントで実施することになっている。

また、宇宙線の影響を差し引くために、海上を 300~2,500 m まで上昇し、データを取得する宇宙線フライトを週 1 回程度実施した。その他、BG フライトとして検出器及び機体のバックグラウンドを求めるために、地表に沈着した放射性セシウムの影響のない対地高度 900 m 上空でデータを取得する BG フライト及び天然核種のみ場所においてデータを取得し、 γ 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ための天然核種フライトが必要になる。天然核種フライトの場所を Fig. 4-11(左) に示す。さらに、Rn の影響を考察するために、決められた場所の上空 450~900 m までを直線的に上昇しデータを取得する Rn 影響フライトや異なる機体や 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するオーバーラップフライトがある。オーバーラップフライトの場所を Fig. 4-11 (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用いた。なお、各パラメータの詳細については次章以降で記述する。

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を変化させてフライト	週2回
テストポイントフライト	線量率換算係数を算出	指定の地点上で、300 m 高度で 2 分	週2回
宇宙線フライト	宇宙線の影響を調査する	海上を 300-2,500 m まで上昇	週 1 回
Rn 影響フライト	Rn の影響を調査する	フライト前に拠点近くの測線上を 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	1,000 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	天然核種のみの特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毎に 1 回

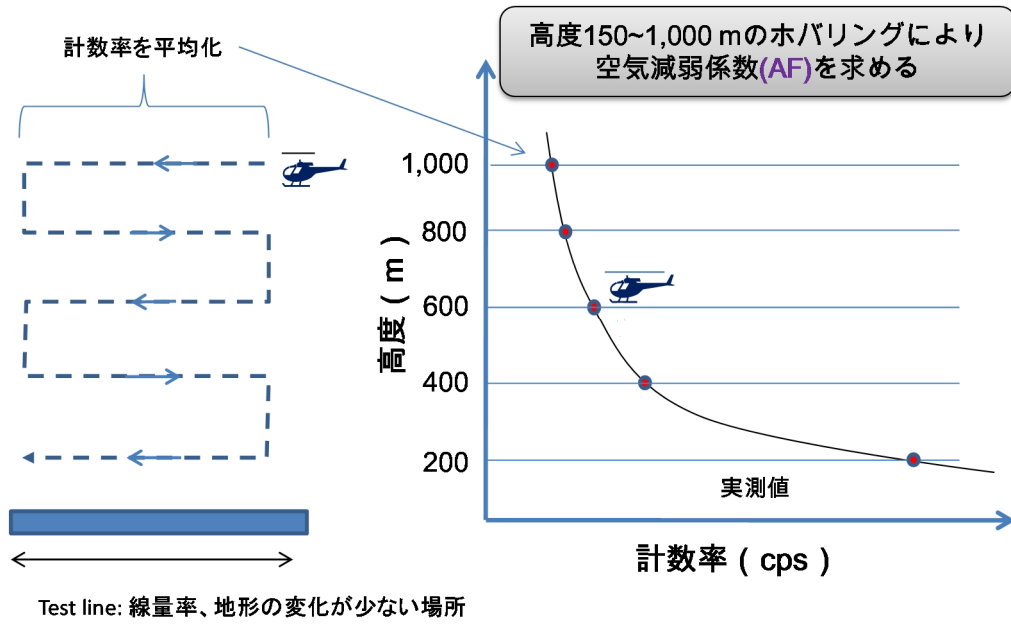
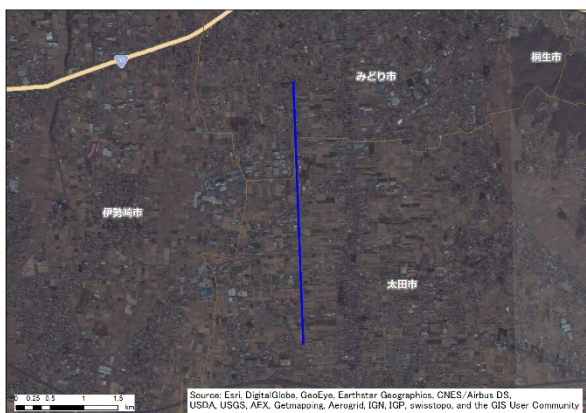
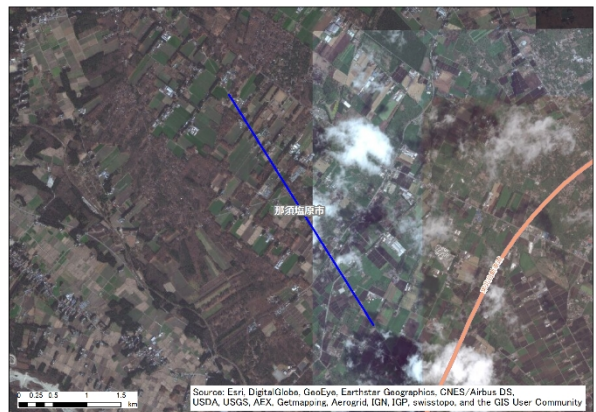


Fig. 4-7 テストラインフライトのイメージ



Test line 3 (群馬県みどり市)

Test line 4 (茨城県那珂市)

Fig. 4-8 テストラインの場所 (1/2)

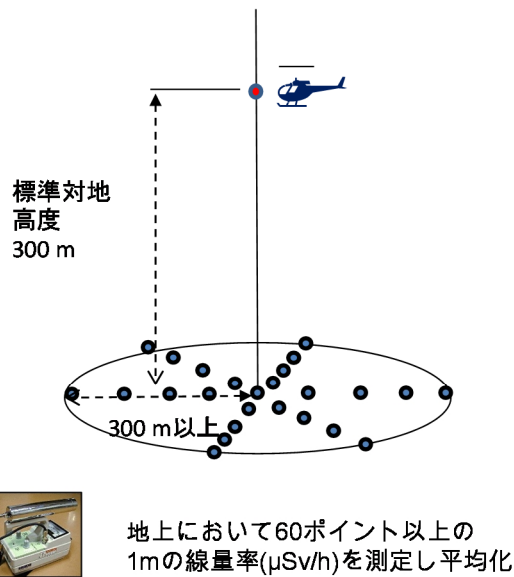
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



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)

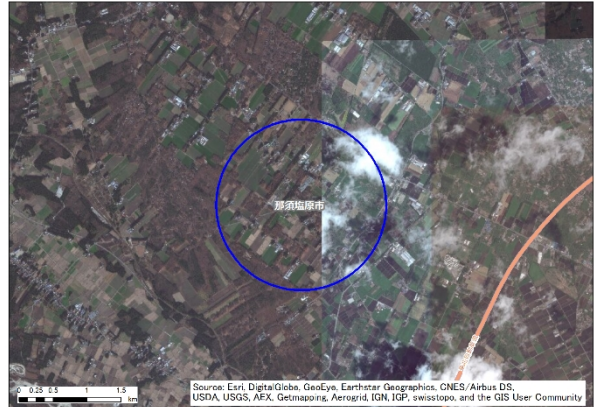


地上測定($\mu\text{Sv/h}$)と基準対地高度(300 m)
の計数率(cps)の比較から
線量率換算係数CDを求める

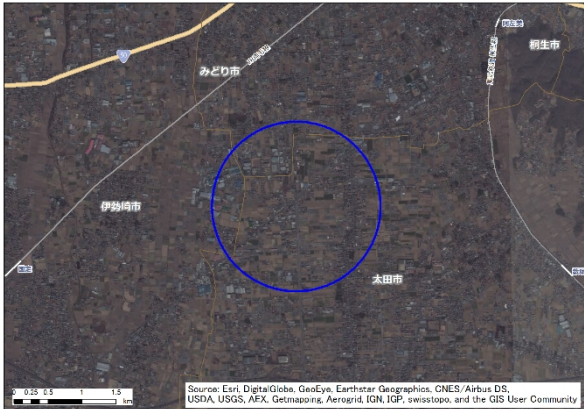
Fig. 4-9 テストポイントフライトのイメージ



Test point 1 (岩手県奥州市)



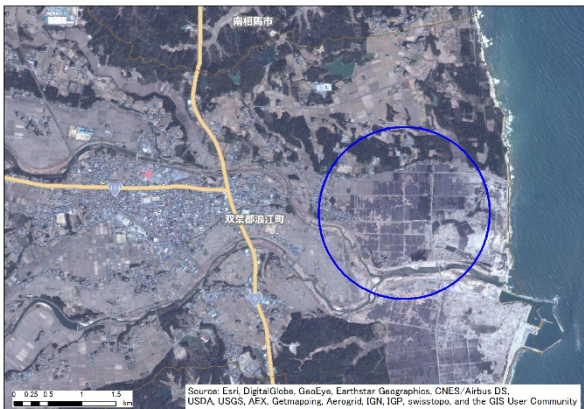
Test point 2 (栃木県那須塩原市)



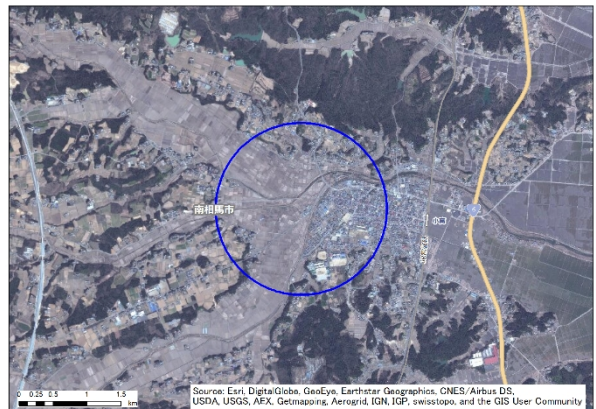
Test point 3 (群馬県みどり市)



Test point 4 (茨城県那珂市)

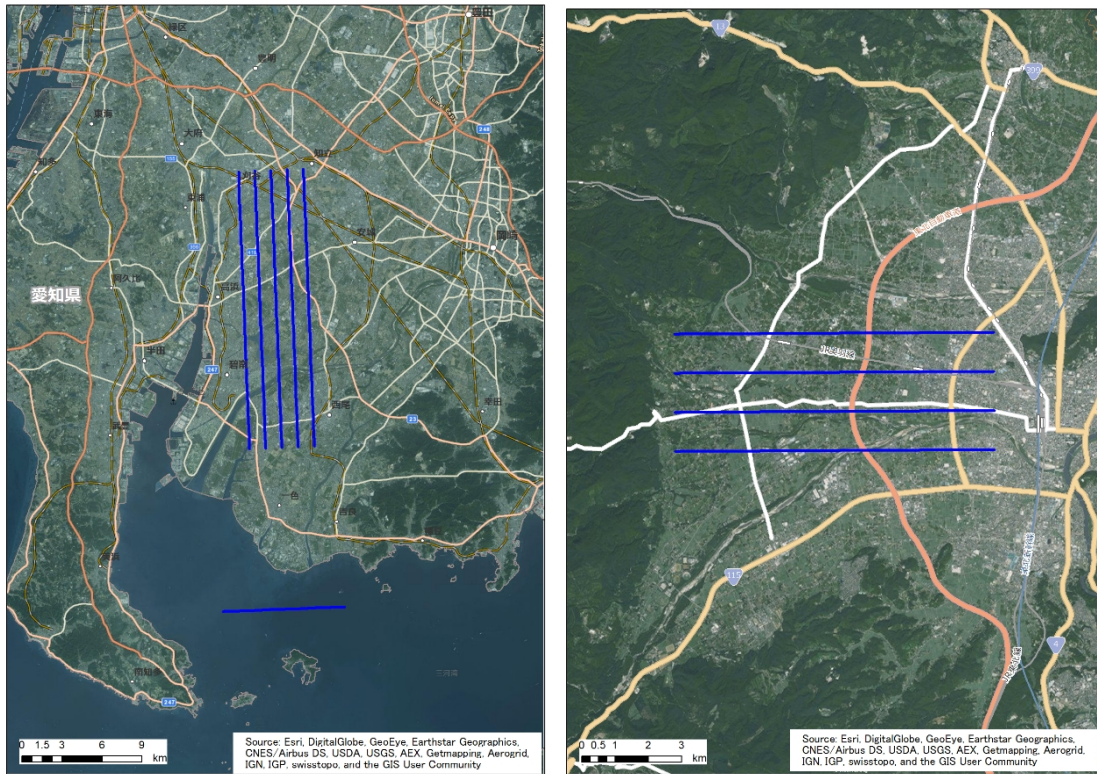


Test point A (福島県浪江町)



Test point D (福島県南相馬市)

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 BG 天然核種フライトの場所(左)、オーバーラップフライト場所(右)
(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. 4-12 に示す。なお、本章以降の線量率とは、周辺線量当量率 (1 cm 線量当量率) を意味する。

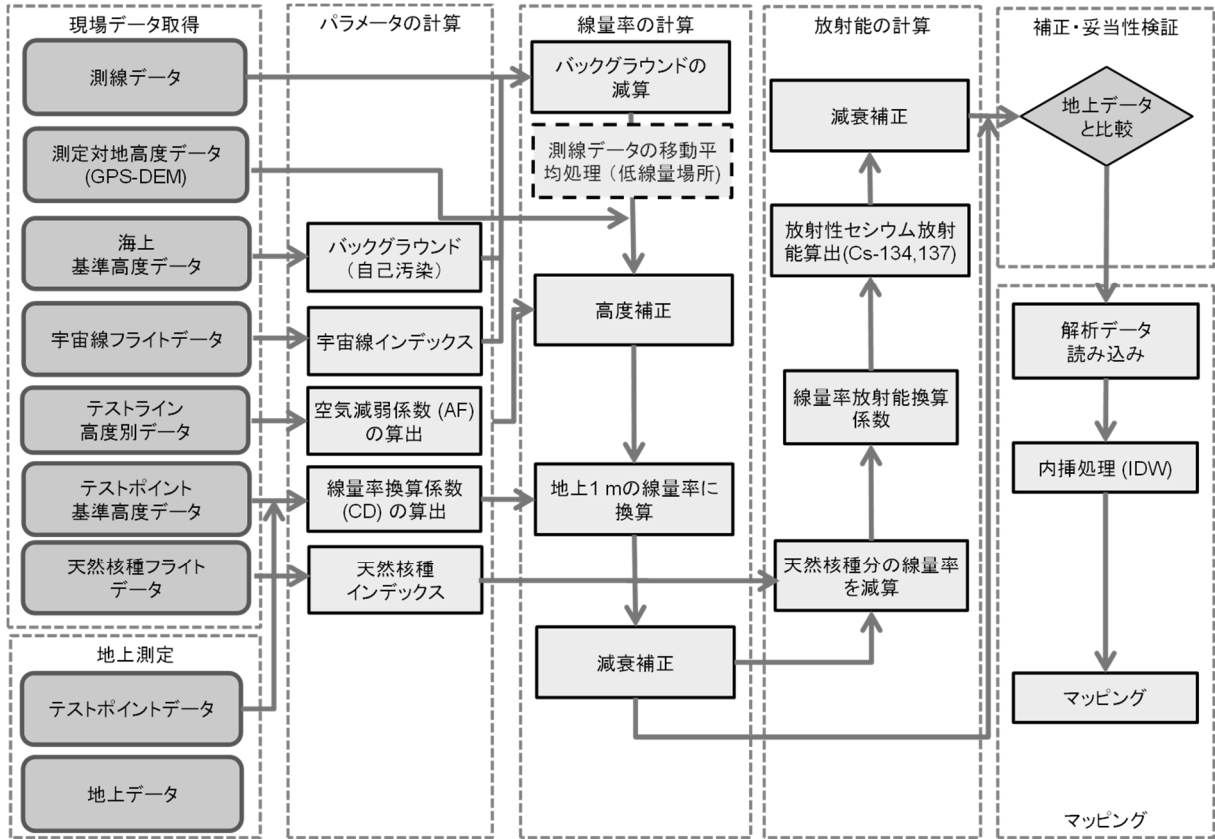


Fig. 4-12 解析のフロー

4.5. 線量率への換算方法

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

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

以下、上記項目の詳細について述べる。

4.5.1. バックグラウンド (自己汚染及び宇宙線)

航空機モニタリングにおいて、自己汚染及び宇宙線はバックグラウンドとなる。これらの減算方法について示す。自己汚染については、BGフライトとして実施した地上からの放射線が届かないと考えられる 1,000 m 以上のフライト (もしくは海上でフライトした際のデータ : 宇宙線フライト) を用いる。地上で測定したスペクトルと海上で取得したスペクトルの例を Fig. 4-13 に示す。

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。宇宙線の計数は、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 TI-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 以上の計数を用いる。Fig. 4-14 に海拔高度と宇宙線の計数率の関係を示す。この例は、沖縄と北海道での海上において、50 m~

2000 m の高度で取得したデータの 2,800 keV 以上の計数率をプロットしたものである。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。この関係は日本全国のどこでも同様であること、及び 2,800 keV 以上の計数率と 2,800 keV 以下の計数率の比 (CR-index) が一定であること、に着目し機体の検出器の組み合わせ毎に CR-index を計算した。その後、実際に測定したスペクトルの 2,800 keV 以上の計数率から全エネルギーの計数率を算出し、全計数率から差し引いた。実測したデータを基に計算した自己汚染の計数率及び 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。

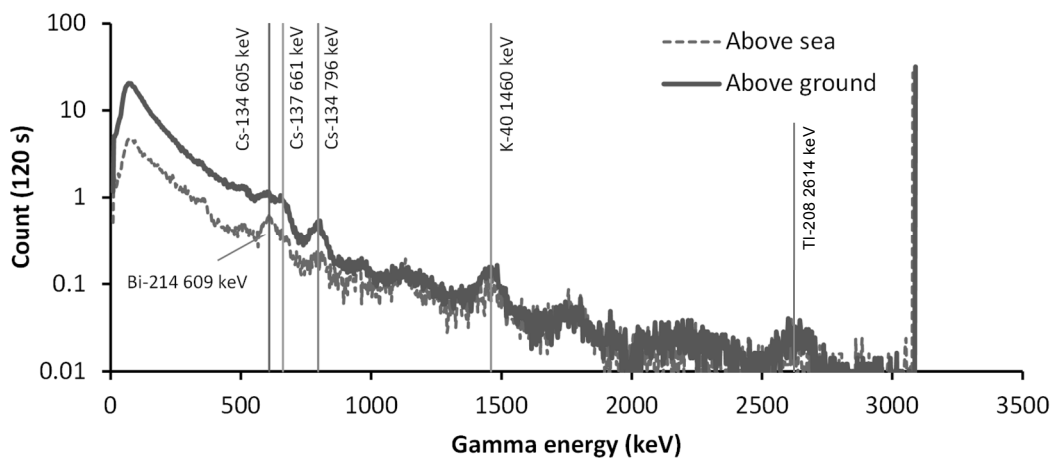


Fig. 4-13 RSI システムにおける地上で取得したγ線スペクトルと海上でのスペクトル例

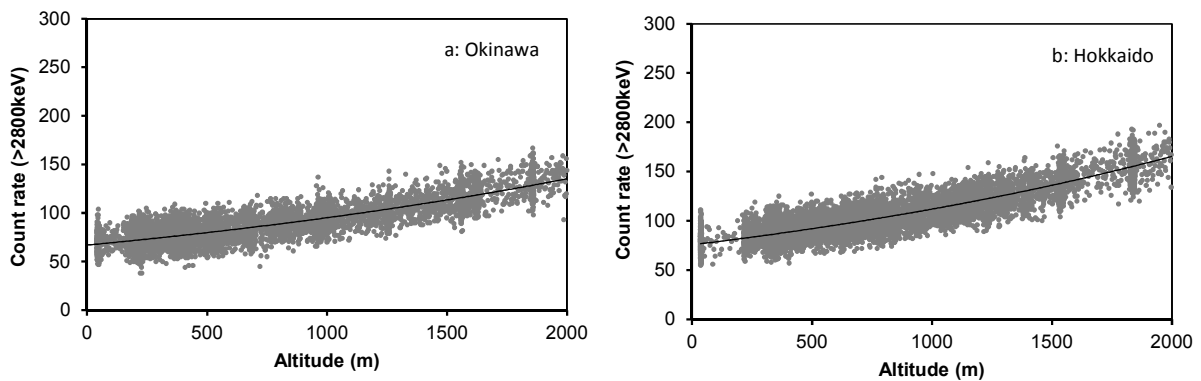


Fig. 4-14 海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例 (a: 沖縄海域, b: 北海道海域)

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及び 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 (JA6900)	AAC	545	3.41
	Bell 412 (JA6767)	NNK	273	3.41
RSIシステム2	Bell 412 (JA6928)	AAC	186	3.84
	Bell 430 (JA05TV)	NNK	358	3.84

4.5.2. 高度補正係数

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)²²⁾ 及びジオイド高度を差し引いて求めた*¹。Fig. 4-15 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、過去のデータ及び今回の評価結果の平均値を使用した。使用した数値と標準偏差 (σ) について Table 4-3 に示す。また、過去に実施した AF データ一覧の結果を Table 4-4 に示す。表中の R² は近似曲線の決定係数である。AF の数値は使用したヘリコプター 2 機種間で大きな違いはなかった。今後、本数値 (-0.0072 m⁻¹) を固定で使用しても問題ないと考えられる。なお、キャリブレーションのフライトは、RSI システムの健全性を確認する意味合いもあるため、今後も実施することが望ましいと考える。

*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。

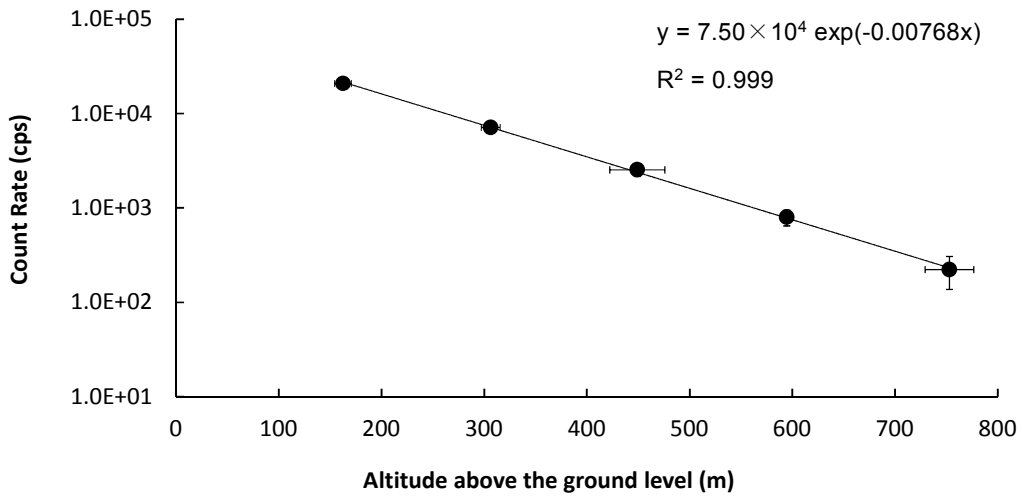


Fig. 4-15 対地高度と計数率の関係 (Bell 430 JA6900, 2013/11/5 実施, Test line A)

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	Value	Number
AF (m ⁻¹)	-0.0072 ± 0.00047	21	-0.0072 ± 0.00040	35
CD (cps/μSv/h)	10900 ± 2100	42	12800 ± 2800	65

Table 4-4 AF データ一覧

Monitoring No	System (Device Serial)	Helicopter	Body No	Operarion campany	location	Date	AF	
							m ⁻¹	R ²
E5th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 1	2014/9/26	-0.00678	0.99912
E5th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 1	2014/10/11	-0.00708	0.99984
E5th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 2	2014/10/24	-0.00768	0.99984
E5th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 4	2014/10/24	-0.00725	0.99913
E5th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 4	2014/11/3	-0.00710	0.99583
E5th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 2	2014/11/4	-0.00743	0.99990
E4th	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_line 2	2013/10/17	-0.00730	0.99999
E4th	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_line 2	2013/10/31	-0.00721	0.99995
E4th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 1	2013/9/19	-0.00699	0.99997
E4th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 1	2013/9/24	-0.00698	0.99997
E3th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 1	2012/10/31	-0.00733	1.00000
E3th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 1	2012/11/4	-0.00746	0.99997
E3th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 2	2012/11/14	-0.00746	0.99997
E3th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 2	2012/11/20	-0.00794	0.99997
E3th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 2	2012/11/28	-0.00814	0.99997
E3th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 3	2012/12/10	-0.00720	0.99997
E3th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 3	2012/12/14	-0.00584	0.99934
E3th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 3	2012/12/20	-0.00669	0.99934
9th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line A	2014/9/2	-0.00699	0.99988
9th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line A	2014/9/20	-0.00726	0.99954
8th	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_line A	2013/11/5	-0.00709	0.99987
8th	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_line A	2013/11/16	-0.00723	0.99994
8th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line A	2013/11/2	-0.00700	0.99997
8th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line A	2013/11/9	-0.00760	0.99866
7th	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_line A	2013/8/29	-0.00677	0.99975
7th	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_line A	2013/9/1	-0.00707	0.99944
7th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line A	2013/9/9	-0.00705	0.99920
7th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line A	2013/9/12	-0.00701	0.99980
7th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line A	2013/9/17	-0.00721	1.00000
6th	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_line 4	2012/10/31	-0.00761	0.99999
6th	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_line 4	2012/11/14	-0.00747	0.99996
5th	5043	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 4	2012/6/24	-0.00735	0.99921
5th	5043	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 4	2012/6/26	-0.00733	0.99935
5th	5043	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 4	2012/6/24	-0.00748	0.99858
5th	5043	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 4	2012/6/26	-0.00782	0.99701
E5th	5043	JA6928	Bell412	AAC	Test_line 2	2014/10/29	-0.00768	0.99987
E5th	5043	JA6928	Bell412	AAC	Test_line 4	2014/11/4	-0.00661	0.99933
E5th	5043	JA6928	Bell412	AAC	Test_line 2	2014/11/4	-0.00738	0.99980
E5th	5043	JA6928	Bell412	AAC	Test_line 4	2014/11/5	-0.00706	0.99950
E5th	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2014/9/26	-0.00691	0.99998
E5th	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 3	2014/9/30	-0.00688	0.99879
E5th	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 3	2014/10/11	-0.00707	0.99856
E5th	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2014/10/17	-0.00800	0.99960
E4th	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2013/9/20	-0.00675	0.99998
E4th	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 3	2013/9/28	-0.00663	0.99993
E3th	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2012/12/14	-0.00735	0.99934
E3th	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2012/12/23	-0.00735	0.99934
9th	5043	JA6928	Bell412	AAC	Test_line A	2014/9/2	-0.00681	0.99933
9th	5043	JA6928	Bell412	AAC	Test_line A	2014/9/6	-0.00702	0.99952
9th	5043	JA6928	Bell412	AAC	Test_line A	2014/9/18	-0.00734	0.99985
7th	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line A	2013/9/10	-0.00678	0.99993
7th	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line A	2013/9/18	-0.00710	0.99999
7th	5045	JA6928	Bell412	AAC	Test_line A	2013/8/29	-0.00709	0.99983
7th	5045	JA6928	Bell412	AAC	Test_line A	2013/9/3	-0.00691	0.99998
6.5th	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2013/3/4	-0.00817	0.99996
6.5th	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2013/3/7	-0.00817	0.99996
5th	5045	JA9660	AS332	NNK	Test_line 4	2012/6/23	-0.00647	0.95798
5th	5045	JA9660	AS332	NNK	Test_line 4	2012/6/26	-0.00825	0.95533

※ 赤文字部分：本年度取得データ

4.5.3. 地上 1 m 高さの線量率への換算

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。なお、地上の測定値は、ホバリングしたポイントの同軸上の地上の点を中心とした半径 500 m の円内に入る測定結果のみを抽出し平均化している。Fig. 4-16 に、テストポイント (テストポイント A 及びテストポイント B) における地上の測定例を示す。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。今年度実施したテストポイントフライトにより、求めた CD データ一覧を Table 4-5 に示す。ここでいう、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、天然核種による放射線量率が含まれる。

CD は、地上での線量率を評価する重要な係数であるため、不確かさを極力小さくする必要がある。CD の不確かさを小さくするには、テストポイントで取得する①上空での計数率、②地上の線量率及び③高度のデータについて値のばらつきが少ない方がよい。Table 4-5 には、取得したデータのばらつきについて、標準偏差 (2σ) を計算した結果を示す。また、本データの中で特に個別のデータのばらつきが大きかったデータを統計学的手法を用いて排除し、ヘリコプターの機種毎に平均値と数値の標準偏差 (σ) を計算した結果を、Table 4-3 に示す。

このように、各々の機体の CD をみると平均値に対し標準偏差は 20%ほどのばらつきがあった。テストポイントの線量率の分布や地形の勾配の条件が完全に同一な条件でないこと、フライトの高度も一定に保てないことを考慮すると、相当なデータであるといえる。一方、Bell 412 と Bell 430 の CD では 10%程度の差があった。これは機種による若干の機底の遮蔽状況の違いを反映していると考えられる。Bell 412 と Bell 430 については、データの数及び質ともに十分な信頼性を有すると考えられ、検出器の状況や機底の遮蔽状況に大きな違いがなければ、今後のモニタリングに本数値を使用することができると考えられる。

この機種ごとの数値の違いについてさらに妥当性を考察するため、Fig. 4-10 (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、ヘリコプター機種の相対的な効率の比較を行った (オーバーラップフライト)。フライトし得た測定値は、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. 4-17 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 0.85 であり、Fig. 4-16 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。

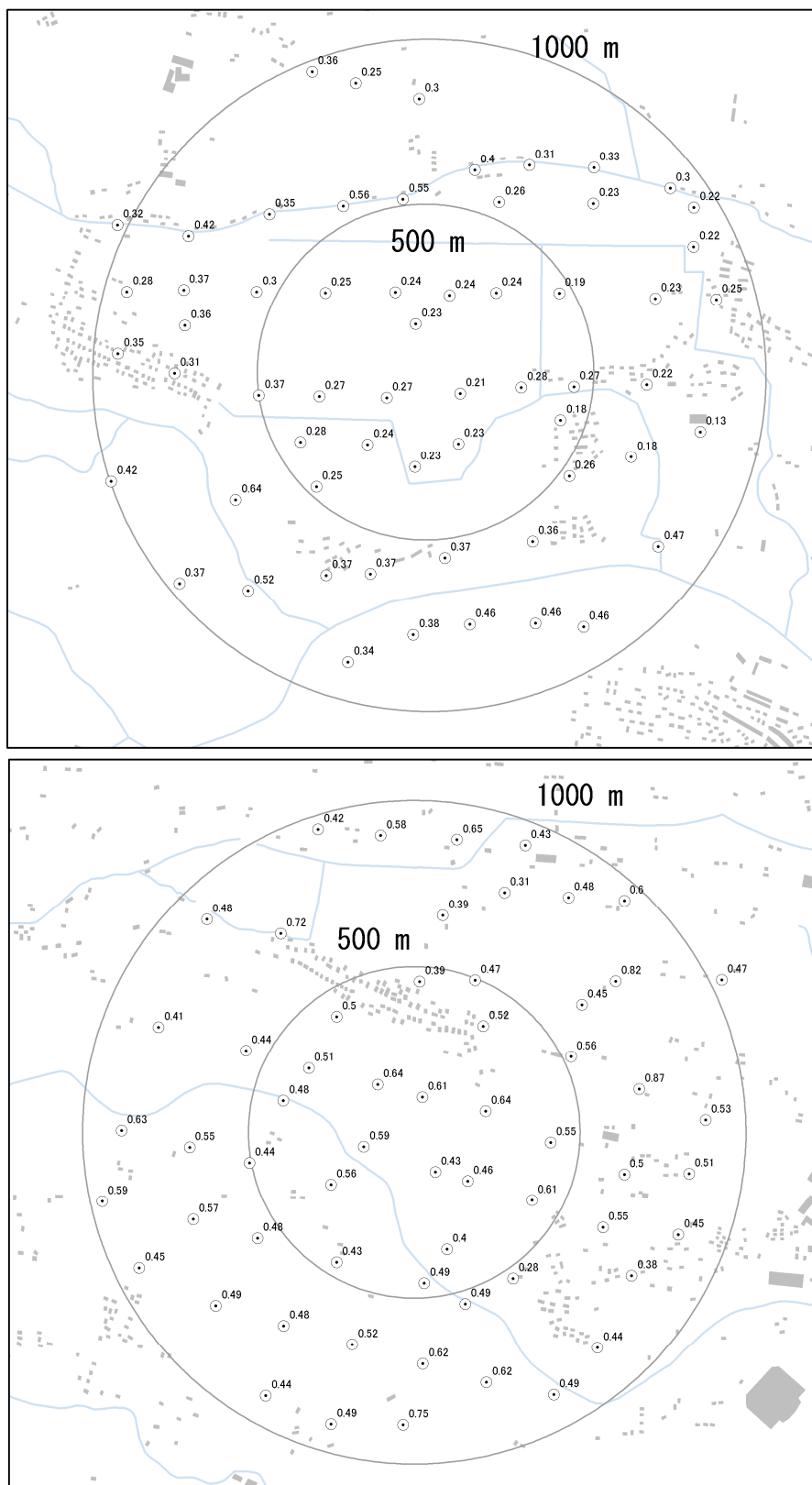


Fig. 4-16 テストポイントにおける地上の線量率測定結果例
 (上: テストポイント A, 下: テストポイント B)

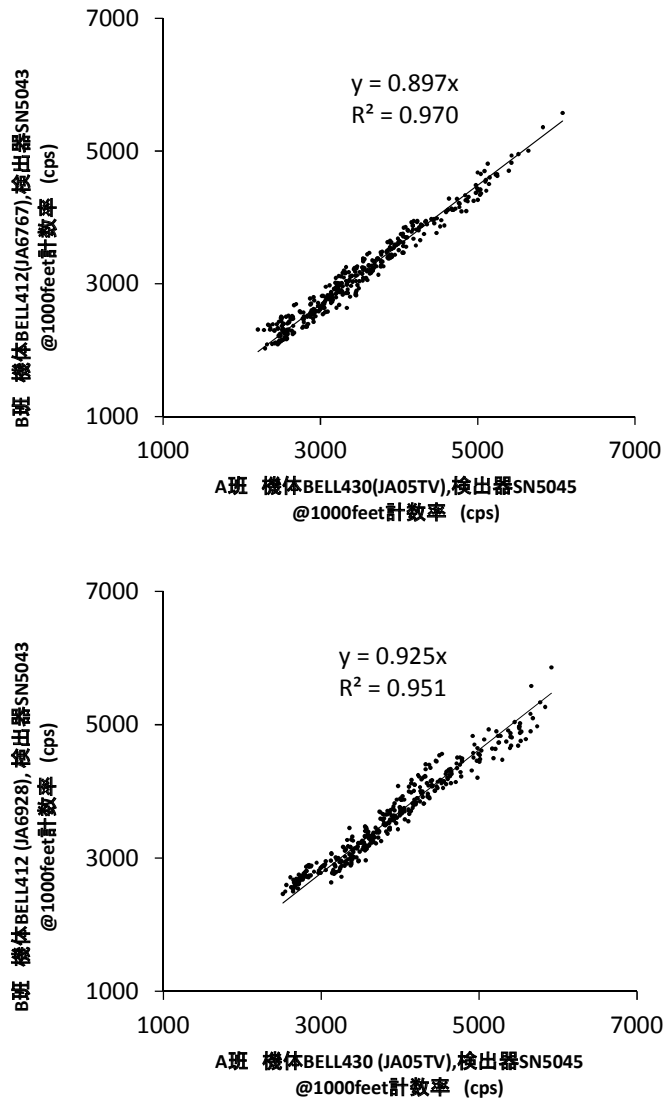


Fig. 4-17 ヘリコプターの機種とオーバーラップフライトにおける計数率の関係
 (上: 第9次モニタリング、下: 東日本第5次モニタリング)

Table 4-5 CD データ一覧 (1/3)

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)	(%)	AMS data (cps)	Stdev (2 σ)	(%)	AGL (m)	Stdev (2 σ %)	(%)	
E5h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint 1	2014/9/26	0.08	0.04	0.04	1634	122	7	886	46	5	11300
E5h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint 2	2014/10/11	0.08	0.04	0.04	1807	176	10	945	43	5	11600
E5h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint 1	2014/10/24	0.25	0.10	0.10	3745	243	7	945	48	5	10000
E5h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint 4	2014/10/24	0.09	0.03	0.03	1462	150	10	945	24	3	8000
E5h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint 4	2014/11/3	0.08	0.03	0.03	1698	138	8	1013	59	6	8900
E5h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint 2	2014/11/4	0.25	0.11	0.11	3204	558	17	1000	28	3	9600
E4h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point 2	2013/10/17	0.36	0.18	0.18	4382	292	7	329	17	5	12400
E4h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point 2	2013/10/31	0.36	0.19	0.19	5431	672	12	266	15	5	9900
E4h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point 2	2013/11/3	0.36	0.18	0.18	5073	517	10	313	27	9	13100
E4h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point 1	2013/9/19	0.10	0.03	0.03	2132	204	10	274	17	6	12200
E4h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point 1	2013/9/24	0.09	0.03	0.03	1790	141	8	295	15	5	12600
E4h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point 1	2013/9/29	0.10	0.03	0.03	2342	685	29	226	29	13	10900
E4h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/10/7	0.68	0.17	0.17	9397	803	9	287	8	3	11700
E4h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/10/12	0.69	0.17	0.17	8594	1267	15	298	8	3	11000
E4h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/10/21	0.68	0.17	0.17	8619	512	6	293	3	1	11100
E4h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/10/27	0.69	0.17	0.17	7411	1475	20	301	23	8	9700
E3h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point 1	2012/10/31	0.08	0.03	0.03	1587	127	8	291	7	2	8900
E3h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point 1	2012/11/4	0.12	0.03	0.03	2027	344	17	341	27	8	13600
E3h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point 2	2012/11/14	0.38	0.14	0.14	1959	190	10	339	12	4	15000
E3h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point 2	2012/11/20	0.38	0.14	0.14	4676	119	24	351	32	9	14500
E3h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point 2	2012/11/28	0.38	0.14	0.14	4521	670	15	342	17	5	12800
E3h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point 3	2012/12/10	0.07	0.02	0.02	1536	122	8	363	16	5	13000
E3h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point 3	2012/12/14	0.07	0.02	0.02	1525	120	8	339	16	5	15700
E3h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point 3	2012/12/20	0.07	0.02	0.02	1350	101	7	348	10	3	12700
9h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint D	2014/9/2	0.51	0.19	0.19	7607	736	10	927	29	3	17000
9h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint A	2014/9/2	0.24	0.06	0.06	4794	420	9	896	41	5	14000
9h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint D	2014/9/20	0.51	0.13	0.13	6466	1477	23	1076	45	4	13200
8h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point A	2013/11/5	0.78	0.17	0.17	4333	289	7	986	60	6	13200
8h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point A	2013/11/5	0.27	0.09	0.09	8621	2228	26	297	18	6	9700
8h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point B	2013/11/11	0.74	0.37	0.37	5194	366	7	285	4	1	14300
8h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point A	2013/11/16	0.27	0.10	0.10	9543	774	8	285	11	4	10300
8h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/11/16	0.73	0.36	0.36	5171	571	11	284	3	1	14500
8h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/11/2	0.74	0.36	0.36	9303	1709	18	315	11	4	12900
8h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/11/9	0.73	0.39	0.39	13210	3717	28	218	13	6	9200
7h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point B	2013/11/14	0.75	0.36	0.36	6285	816	13	324	10	3	8800
7h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point B	2013/8/29	0.68	0.19	0.19	7841	565	7	295	7	3	9200
7h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point B	2013/8/29	0.68	0.19	0.19	9394	1886	20	305	29	10	12700
7h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point B	2013/9/1	0.68	0.14	0.14	8855	1886	20	305	29	10	12700
7h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point B	2013/9/1	0.68	0.14	0.14	8855	911	10	328	8	3	14100
7h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line A	2013/9/12	0.71	0.80	0.80	8855	911	10	328	8	3	14200
7h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line A	2013/9/17	0.71	0.80	0.80	8575	1828	21	295	20	7	10600
									9851	2648	27	288	26	10	10100	

* 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

赤字部分: 本年度取得データ

Table 4-5 CD データ一覧 (2/3)

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 (μ Sv/h)	Stdev (2 σ)	Stdev (%)	AMS data (cps)	Stdev (2 σ)	Stdev (%)	AGL (m)	Stdev (2 σ : %)	Stdev (%)	
7h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/9/6	0.67	0.17	26	8918	965	11	351	16	4	17200
7h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/9/6	0.67	0.17	26	8918	965	11	351	16	4	17400
7h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/9/9	0.68	0.17	24	8861	947	11	292	12	4	11400
7h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/9/9	0.68	0.17	24	8861	947	11	292	12	4	11300
7h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/9/12	0.69	0.16	24	8213	857	10	318	4	1	12200
7h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/9/12	0.69	0.16	24	8213	857	10	318	4	1	12200
7h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/9/17	0.69	0.18	26	8638	566	7	293	5	2	11600
7h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/9/17	0.69	0.18	26	8638	566	7	293	5	2	11600
7h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/9/18	0.68	0.14	20	9000	1819	20	297	12	4	11400
7h	5045	JA05TV	Bell430	NNK	Test_point B	2013/9/18	0.68	0.14	20	9000	1819	20	297	12	4	11400
6h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_line 4	2012/10/31	0.81	0.27	34	11407	1390	12	339	21	6	17500
6h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_line 4	2012/11/14	0.81	0.27	34	11250	1527	14	339	18	5	17800
6h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point 4	2012/10/31	0.58	0.09	15	10439	791	8	320	6	2	18800
6h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point 4	2012/11/16	0.62	0.08	13	11148	2238	20	299	21	7	17900
6h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point 4	2012/11/15	0.62	0.08	13	11148	2712	24	315	22	7	17900
6h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point 4	2012/11/16	0.62	0.08	13	9906	2637	27	310	26	9	15900
6h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point 4	2012/10/31	0.36	0.07	18	6942	827	12	322	22	7	20000
6h	5043	JA6900	Bell430	AAC	Test_point 4	2012/11/15	0.36	0.07	18	7746	1583	20	305	11	4	19200
5h	5043	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 4	2012/6/24	0.89	0.31	35	10475	1953	19	344	9	3	14500
5h	5043	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 4	2012/6/26	0.89	0.31	35	10544	-	-	344	-	-	14500
5h	5043	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 4	2012/6/24	0.71	0.12	17	9326	1022	11	347	16	5	16200
5h	5043	JA05TV	Bell430	NNK	Test_line 4	2012/6/26	0.81	0.42	53	9858	1457	-	335	-	-	14900
E5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	TestPoint 4	2014/9/26	0.08	0.03	37	1407	99	7	955	13	1	7600
E5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	TestPoint 3	2014/9/30	0.06	0.02	39	1299	115	9	1018	23	2	11300
E5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	TestPoint 3	2014/10/11	0.06	0.02	39	1309	145	11	1171	32	3	11500
E5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	TestPoint 4	2014/10/17	0.08	0.03	36	1394	121	9	1006	38	4	7200
E5h	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint 2	2014/10/29	0.25	0.09	38	2734	625	23	999	108	11	8200
E5h	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint 4	2014/11/4	0.08	0.03	37	1517	119	8	1084	49	5	10900
E5h	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint 2	2014/11/4	0.25	0.10	41	3268	248	8	975	27	3	9300
E5h	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint 4	2014/11/4	0.09	0.03	38	1302	155	12	1011	99	10	7900
E4h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2013/9/20	0.10	0.04	40	1311	121	9	327	6	2	7700
E4h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 3	2013/9/28	0.07	0.02	34	1275	165	13	304	24	8	8800
E4h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point 4	2013/9/20	0.08	0.03	37	1394	162	12	332	15	5	10400
E4h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point 4	2013/9/27	0.08	0.03	36	1347	82	6	305	2	1	7900
E4h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point 3	2013/9/28	0.07	0.03	37	1267	193	15	320	38	12	9800
E4h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point 3	2013/10/2	0.07	0.03	35	1450	169	12	340	36	11	15000
E4h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point 3	2013/10/9	0.07	0.03	37	1305	141	11	325	23	7	9900
E3h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2012/12/14	0.17	0.03	16	2660	451	16	284	16	6	9900
E3h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2012/12/14	0.18	0.06	36	2951	283	16	284	27	9	10400
E3h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2012/12/23	0.17	0.03	16	2030	149	7	373	13	3	10300
E3h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2012/12/23	0.18	0.06	36	2564	486	19	318	36	11	9900
9h	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint A	2014/9/2	0.28	0.21	76	3604	751	21	1021	90	9	11300
9h	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint D	2014/9/6	0.52	0.19	36	6758	614	9	973	48	5	10800
9h	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint D	2014/9/18	0.52	0.16	30	7435	1123	15	948	70	7	11500
9h	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint D	2014/9/18	0.29	0.21	73	4640	500	11	923	53	6	11500
7h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line A	2013/9/10	0.71	0.80	112	7012	1434	20	315	37	12	9900

赤文字部分：本年度取得データ

Table 4-5 CD データ一覧 (3/3)

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 : %)		
7h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line A	2013/9/18	0.71	0.80	112	7662	1857	24	299	24	8	9500
7h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point B	2013/9/10	0.68	0.18	26	8067	1607	20	296	18	6	10500
7h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point B	2013/9/10	0.68	0.18	26	8067	1607	20	296	18	6	10500
7h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point_A	2013/9/18	0.31	0.12	38	4754	861	18	296	7	2	12700
7h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point_A	2013/9/18	0.31	0.12	38	4754	861	18	296	7	2	12700
7h	5045	JA6928	Bell412	AAC	Test_line A	2013/8/29	0.71	0.80	112	8958	1726	19	278	17	6	10000
7h	5045	JA6928	Bell412	AAC	Test_line A	2013/9/3	0.71	0.80	112	6162	1726	28	347	25	7	10800
7h	5045	JA6928	Bell412	AAC	Test_point B	2013/8/29	0.67	0.19	27	8976	1666	19	290	6	2	11200
7h	5045	JA6928	Bell412	AAC	Test_point B	2013/8/29	0.67	0.19	27	8976	1666	19	290	6	2	11200
6.5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2013/3/4	0.57	0.15	27	5944	1295	22	323	6	2	11100
6.5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2013/3/7	0.57	0.15	27	7821	2002	26	308	13	4	13000
6.5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_line 4	2013/3/9	0.57	0.15	27	7663	1084	14	345	17	5	15400
6.5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point 4	2013/3/4	0.37	0.14	38	4539	804	18	321	8	2	12300
6.5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point 4	2013/3/7	0.37	0.14	38	5334	962	18	322	11	3	14400
6.5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point 4	2013/3/9	0.37	0.14	38	5734	1388	24	308	24	8	14000
6.5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point 4	2013/3/4	0.63	0.19	30	6588	729	11	321	8	2	11100
6.5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point 4	2013/3/7	0.63	0.19	30	8534	2180	26	322	37	11	14600
6.5h	5043	JA6767	Bell412	NNK	Test_point 4	2013/3/9	0.63	0.19	30	7900	1262	16	327	6	2	15800
5h	5045	JA9660	AS332	NNK	Test_point 4	2012/6/23	0.89	0.31	35	11198	1786	16	307	31	10	14500
5h	5045	JA9660	AS332	NNK	Test_point 4	2012/6/26	0.89	0.31	35	11231	-	-	305	-	-	11900
5h	5045	JA9660	AS332	NNK	Test_line 4	2012/6/23	0.71	0.12	17	3659	-	-	473	-	-	10600
5h	5045	JA9660	AS332	NNK	Test_line 4	2012/6/26	0.81	0.42	53	4079	-	-	443	-	-	9600

4.5.4. 線量率への換算方法

ここまでで求めたパラメータを用いて線量率に換算する方法について以下に示す。また、計算式を式 [2]に示す。

- ① 測定で得られた γ 線スペクトルから以下の領域の計数率を計算する。
 - (ア) 全計数率 (C_{all})
 - (イ) 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 及び HF を用いて地表 1 m における線量率 D を算出

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

ここで、

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

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

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 1,400~2,800 keV 以上の計数率と全計数率の比 (BG-index) が一定であることに着目し、機体と検出器の組み合わせ毎に、あらかじめ放射性セシウムのない地域をフライトしたデータを基に、BG-index を設定し、実際のフライトデータの 1,400~2,800 keV 以上の計数率を基に全体の計数率から減算する。BG-index 算出に用いるスペクトルの ROI (Region of Interest; 関心領域) のイメージを Fig. 4-18 に示す。

BG-index の算出例を Fig. 4-19 に示す。本データは、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、放射性セシウム起源の計数率の算出手順を以下に示す。また、計算式を式 [3]に示す。なお、線量率-放射能換算係数 (Conversion Factor 以下、CF) については、4.6.2 項に記述する。

- ① 測定で得られた γ 線スペクトルから 1,400~2,800 keV の計数率 (C_{BG}) 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 4.5.5 項で求めた 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} を CD で割って HF を使用してから放射性セシウムだけの線量率 (D_{Cs}) を算出

する。

- ⑤ 式(3)より、線量率を CF (($\mu\text{Sv/h}$)/(kBq/m^2))で割って放射性セシウムの沈着量 Rd に換算する。

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

ここで、

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

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

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

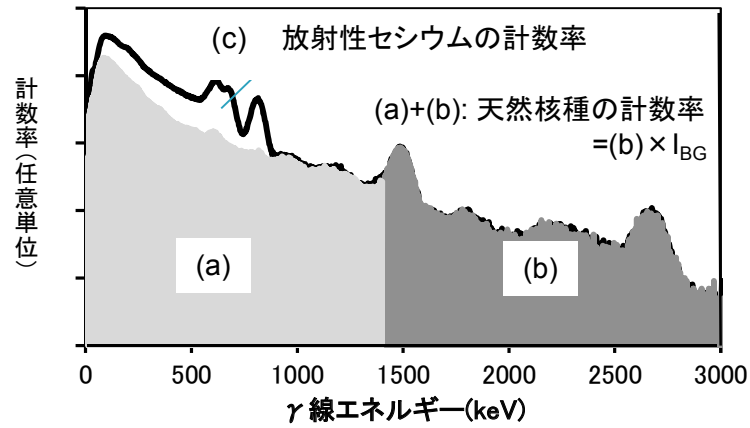


Fig. 4-18 放射性セシウムの計数率の算出イメージ (I_{BG} : BG-index)

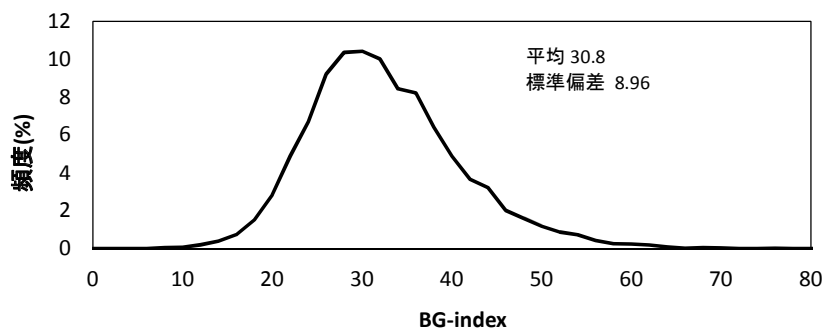


Fig. 4-19 BG-index の算出例 (関西西部において、1 秒ごとに測定した γ 線スペクトルから BG-index を求めヒストグラムで表示、全 16,000 データ: Bell 430)

Table 4-6 BG-index 一覧

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

4.6.2. 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²³⁾に示されるCF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²³⁾。これまで、航空機モニタリングにおいては、過去の比較を考慮し $\beta=1.0$ のCFを継続的に使用している (具体的には、Cs-134: $5.40 \times 10^{-3} (\mu\text{Sv/h})/(\text{kBq/m}^2)$ 、Cs-137: $2.10 \times 10^{-3} (\mu\text{Sv/h})/(\text{kBq/m}^2)$ 、この時 Sv/Gy=1.2 と仮定)。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^{24), 25)}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、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs とともに 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. 4-20 に参考文献²³⁾ 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の比較を考慮して、参考文献²³⁾ 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。

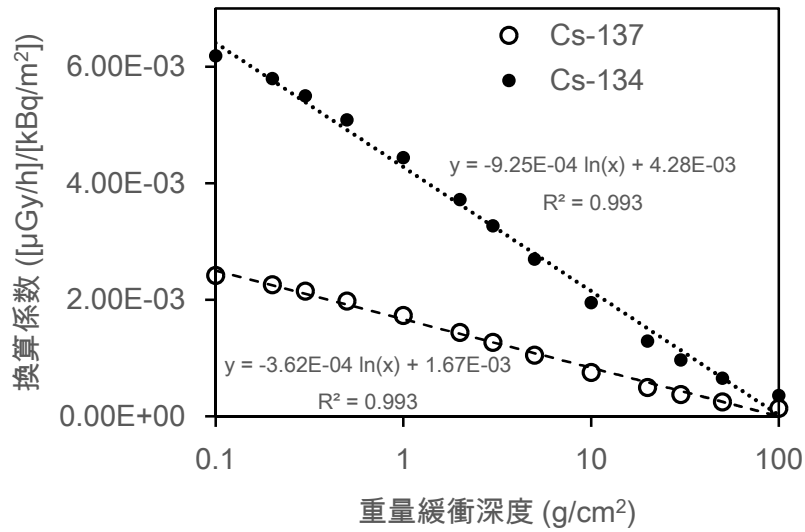


Fig. 4-20 重量緩衝深度と線量率-放射能換算係数の関係(参考文献²³⁾のデータより)
対数による近似曲線を表示

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、¹³⁴Csと¹³⁷Csが評価核種である。ここでは、線量率から放射能への¹³⁷Cs換算係数、¹³⁴Cs/¹³⁷Cs濃度比及び測定時点の線量率を評価時点の線量率に補正する暫定的な算出方法について記述する。4.6.2項でも記載した通り、線量率から放射能への換算は、緩衝深度 $\beta = 1.0$ の場合のCFを適用し、あらかじめ求めておいた¹³⁴Cs/¹³⁷Cs比を用いて、地上1m高さにおける線量率から地表における¹³⁴Cs、¹³⁷Csの放射性物質濃度に換算した。¹³⁴Cs/¹³⁷Cs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¹³⁴Cs/¹³⁷Cs=0.917 (B₀)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¹³⁷Cs及び¹³⁴Csの濃度C_{Cs137}、C_{Cs134}は、航空機サーバイデータから求まる全線量率から天然核種によるバックグラウンドの線量率を引いた線量率E_{Cs137+134}(μSv/h)及び評価時における¹³⁴Cs/¹³⁷Cs比(B)を用い、下記の式[4], [5]から算出する。

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

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

ここで、評価時の線量率からのCs-137濃度換算係数Aは、式(5)で表される。

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

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

線量率の減衰補正方法は、具体的に以下の手順を設定した。

- 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 減衰補正した放射能値に CF を乗じて線量率に換算する。
- ③ 換算した線量率にバックグラウンド線量率を足し、全線量率とする。

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。まず、式 [7] 及び式 [8] に RSI システムにおける全線量への換算方法及び放射性セシウムの沈着量の換算式を示す。本式をもとに、検出下限値及び信頼性について検討を行った。

$$D = (C_{\text{all}} - \text{BG}_{\text{self}} - \text{BG}_{\text{cos}}) \times \frac{1}{\text{CD}} \times \exp(\text{AF} \times (\text{H}_{\text{std}} - \text{H}_m)) \quad [7]$$

$$\text{Rd}_{134} = (C_{\text{all}} - \text{BG}_{\text{nat}} - \text{BG}_{\text{cos}} - \text{BG}_{\text{self}}) \times \frac{1}{\text{CD}} \times \exp(\text{AF} \times (\text{H}_{\text{std}} - \text{H}_m)) \times \frac{1}{\text{CF}} \times R_{\frac{134}{134+137}} \times \text{DC}_{134} \quad [8]$$

ここで、

- D: 全線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
- C_{all} : 全計数率 (cps)
- BG_{self} : 機体の汚染 (cps)
- CD: 線量率換算係数 (cps/ $\mu\text{Sv/h}$)
- 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) $C_{\text{BG}} \times \text{IBG}$ (C_{BG} : 1400-2800 keV の計数率; IBG : BG index)
- BG_{cos} : 宇宙線起源の計数率 (cps) $C_{\text{cos}} \times \text{I}_{\text{cos}}$ (C_{cos} : >2800 keV の計数率; I_{cos} : CR index)
- CF: 線量率-放射能換算係数 ($(\mu\text{Gy/h})/(\text{Bq/m}^2)$)¹⁾
- 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. 線量率の検出下限値

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、 $\text{BG}_{\text{self}} + \text{BG}_{\text{cos}} = 900$ 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 (σN_B) を式[9]に示した Currie の式²⁾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 (Bell 430 の場合の 12,800 cps/ $\mu\text{Sv/h}$, Table 4-3 参照) から線量率を計算すると、0.011 $\mu\text{Sv/h}$ 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) 及び AF (-0.0072 m^{-1}) で線量率に換算した。バックグラウンドの計数率は、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。この結果、放射性セシウムの沈着量の検出下限は、16 kBq/ m^2 と評価された (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	16

* Total BG count: 3,000 cps

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。本測定の実験を重ねてきた現在では、その不確かさは小さくなってきている。
- ・ 高度補正係数の選択：CD と同様に、キャリブレーションのためのデータ取得の状況により係数の選択時の不確かさが生じる。
- ・ 測定高度の誤差：現在使用している GPS (Global Positioning System) には衛星の位置等の状況により最大 30 m 程度の誤差がある。海拔高度の測定は GPS で実施しており、その誤差による不確かさが存在する。本誤差については、検証にまで至っておらず今後の課題である。
- ・ 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、6.5 節に述べる。

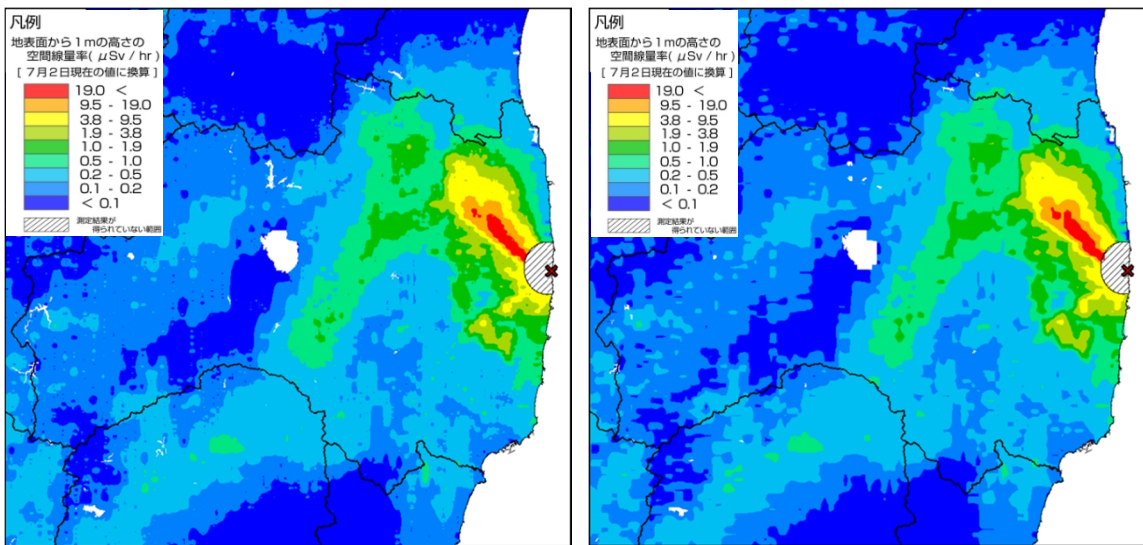
4.10. マッピング

線量率や放射性物質のマッピングについては、IAEA (International Atomic Energy Agency : 国際原子力機関) から標準的な方法が示されている²⁷⁾。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、以下の式で得られる²⁸⁾。

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

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. 4-21 にパラメータ設定の異なる場合の空間線量率マップを示す。一般的に、乗数が大きいくほど、近傍データの影響力が大きくなり、推定値の詳細度が高くなる。Fig. 4-21 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。



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. 4-21 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

測定対象区域から、ヘリコプターの測線下の点を選定し、地上において、1m 高さの線量率を NaI サーベイメータ（日立 ALOKA 社製 TCS-172B）を用いて線量率の測定を行った。Fig. 4-22 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）及び航空機の換算結果と地上の測定結果の差の地上の測定結果に対する相対偏差のヒストグラム（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、他の機関が実施している信頼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²⁹⁾ 地上の線量率の測定結果及び 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。また、放射性セシウムの沈着量は in-situ Ge 検出器（キャンベラジャパン製 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 1.8 g/cm^2 としている。放射線量率の比較及び 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. 4-23 及び Fig. 4-24 に示す。いずれの測定結果も、正の相関関係にあるり、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、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線量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。

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

- ① 測定の範囲の違い：空中からの測定値は、上空を頂点とし対地高度を高さとした円錐の底面部分に該当する地上の放射線の平均値となる。地上における測定は、地上 1 m 高さにおける測定でも測定範囲は半径 3 m 程度の円の平均値となる。よって、特に、地上の線量率の分布は均一でない場所では、測定結果が合わない可能性がある。
- ② 周辺からの影響：測定場所の近傍に、大きな建物や森林等がある場合には、建物や木自身に沈着している放射性物質が地上測定に影響する場合や、上空で測定する場合には、地表面が地下に沈着している放射性物質を遮蔽するため、単純に比較できない場所がある。

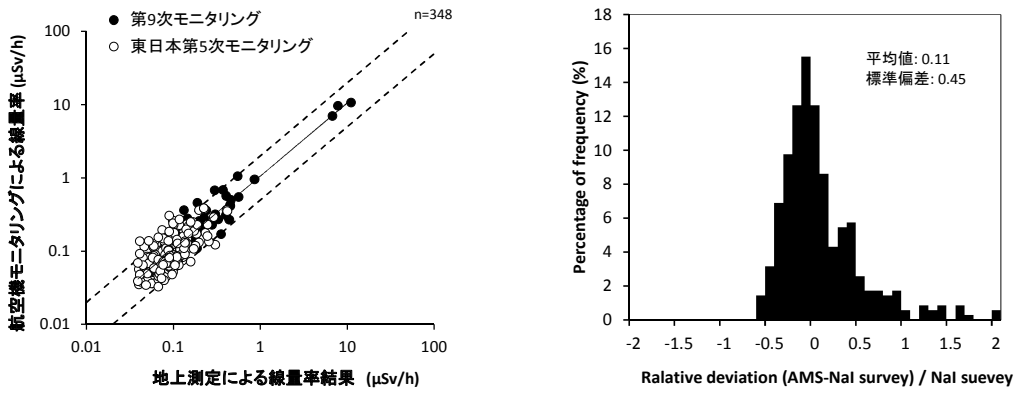


Fig. 4-22 地上における線量率測定結果と航空機モニタリングによる線量率の比較 (測線上の地点を選定)

左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム

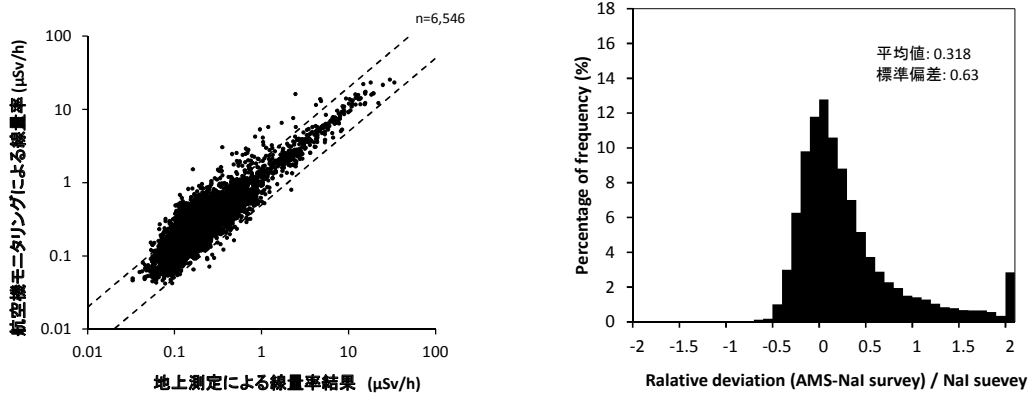


Fig. 4-23 地上における線量率測定結果との比較 (規制庁事業²⁹⁾)

左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム

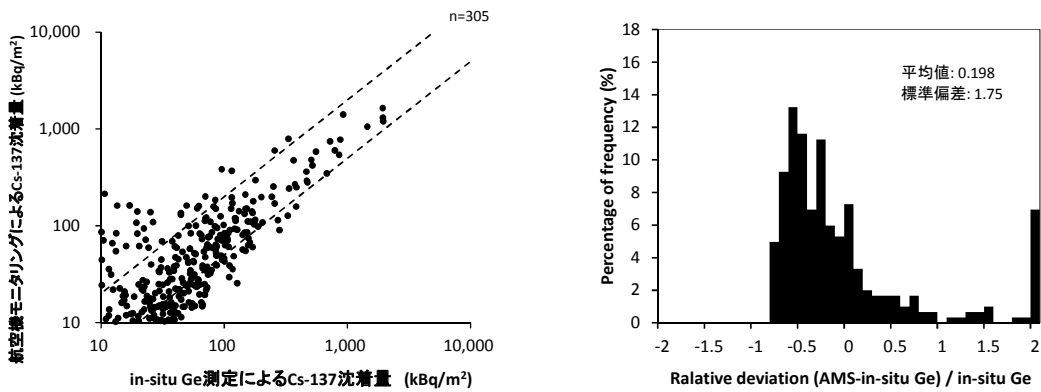


Fig. 4-24 地上における in-situ Ge 測定結果との比較 (規制庁事業²⁹⁾)

左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム

5. モニタリング結果

5.1. 第9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 及び ^{134}Cs の沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-3, Fig. 5-4 に示す。なお、マップの作成にあたっては、第9次の航空機モニタリングを実施した最終日である平成26年9月20日現在の値に減衰補正した。なお、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。

(線量率)

* 天然核種を含む線量率

- ・ 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

(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。

- ・ 3,000 kBq/m² = 1,000 kBq/m² の3倍
- ・ 1,000 kBq/m² = 基準
- ・ 600 kBq/m² = 300 – 1,000 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

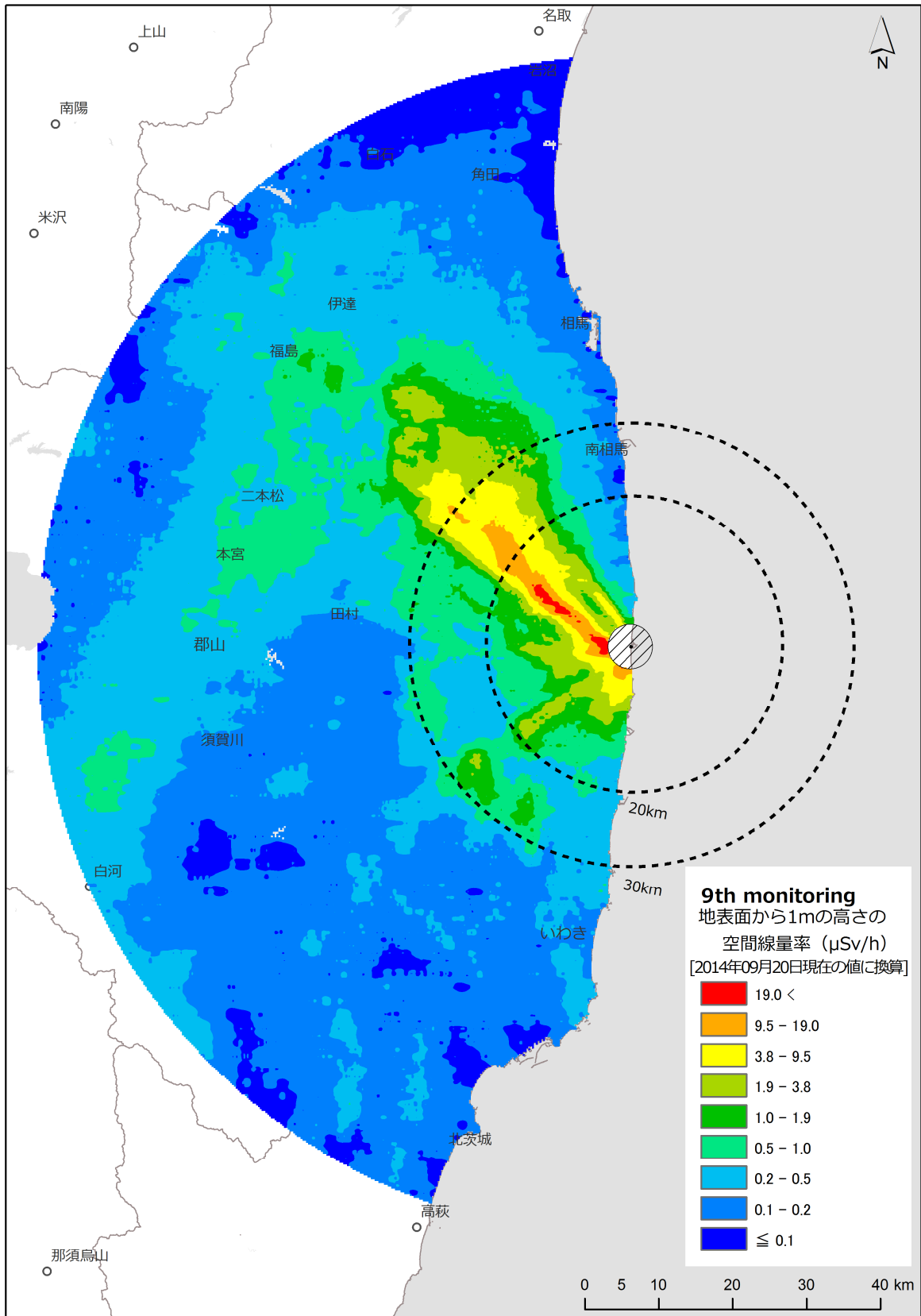


Fig. 5-1 第9次モニタリングにおける線量率マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

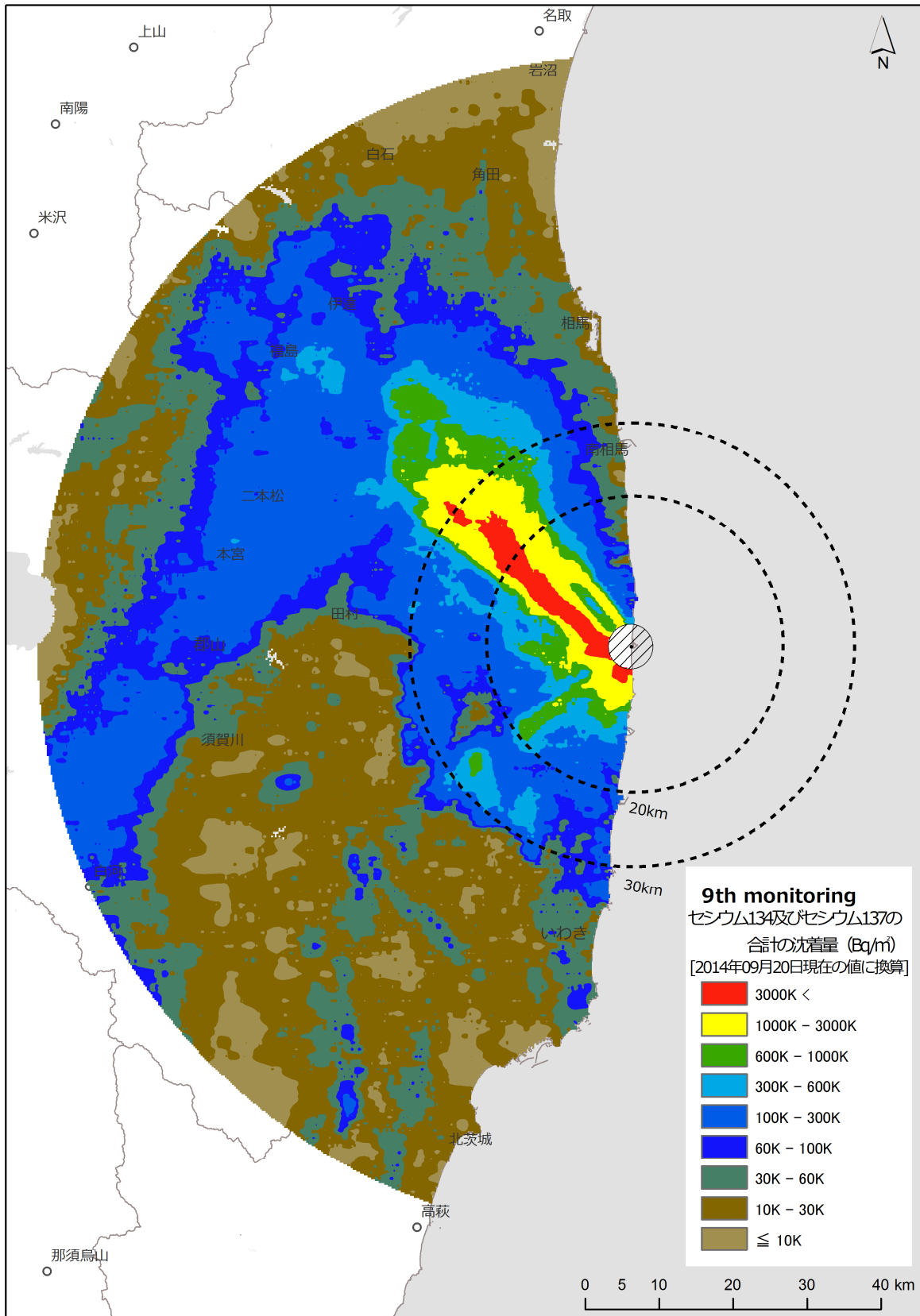


Fig. 5-2 第9次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

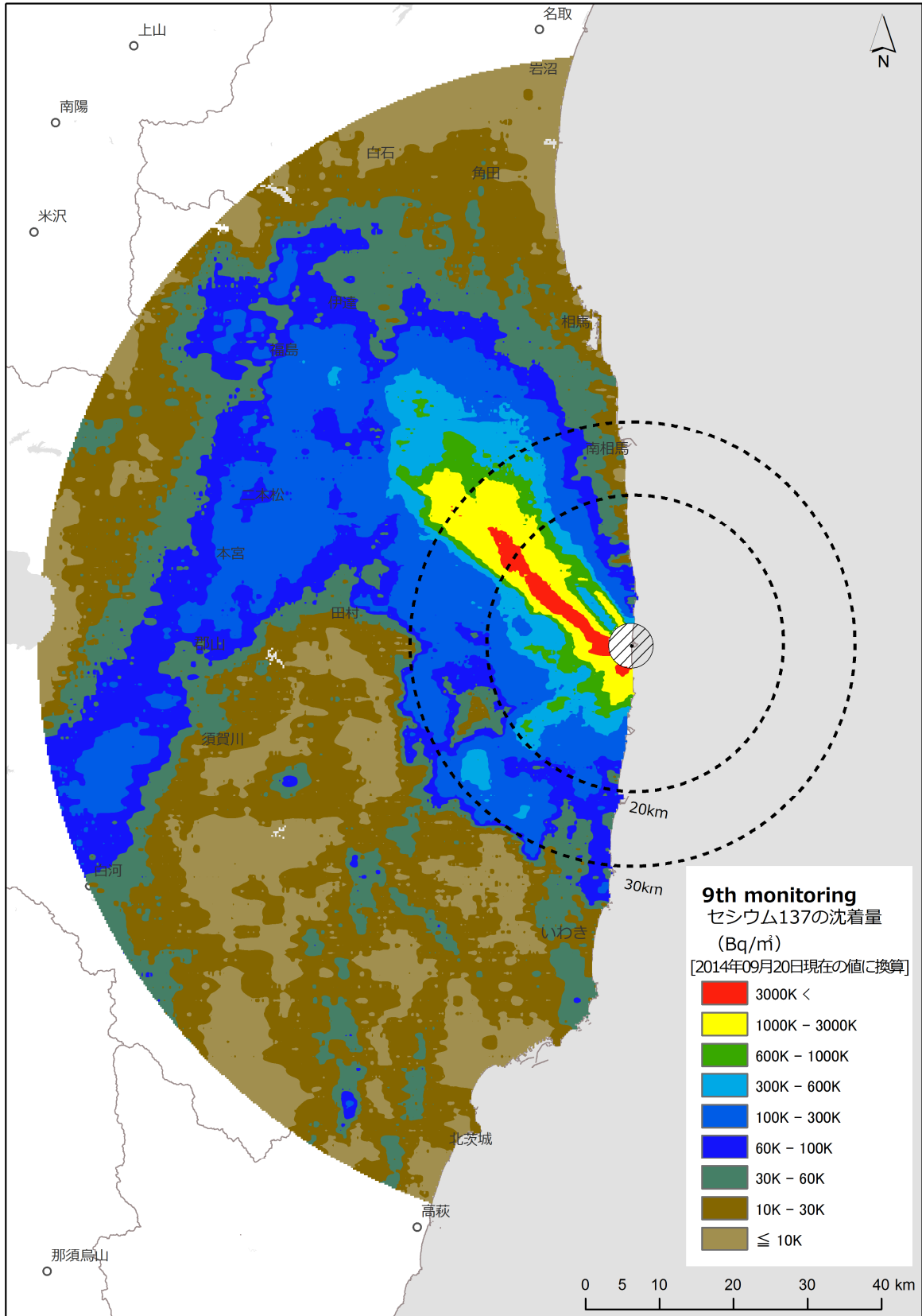


Fig. 5-3 第9次モニタリングにおける¹³⁷Cs沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

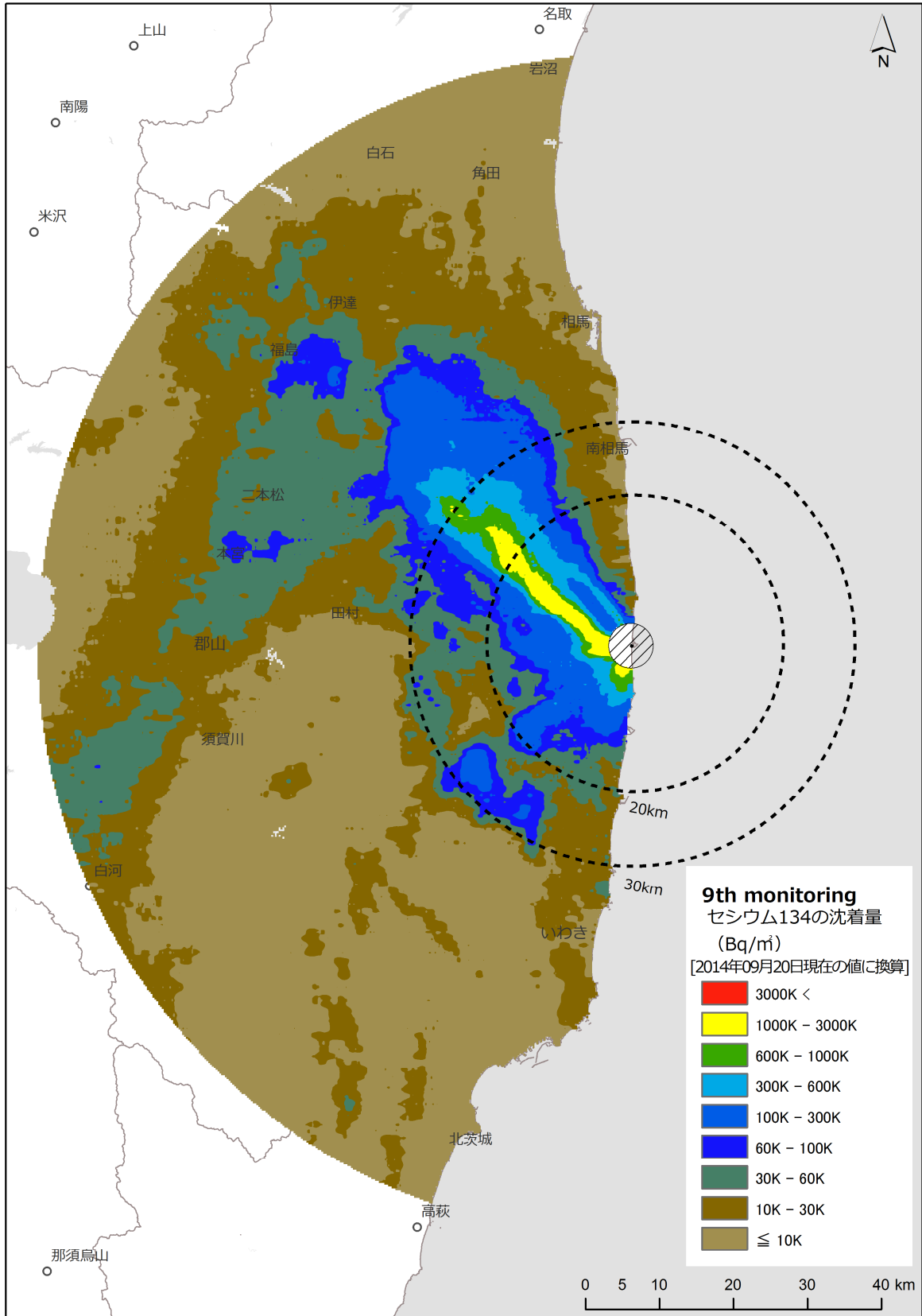


Fig. 5-4 第9次モニタリングにおける¹³⁴Cs沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

5.2. 東日本第 5 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 及び ^{134}Cs の沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-7 及び Fig. 5-8 に示す。なお、マップの作成にあたっては、東日本第 5 次の航空機モニタリングを実施した最終日である平成 26 年 11 月 7 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、第 9 次モニタリングのデータを東日本第 5 次の航空機モニタリングを実施した最終日である平成 26 年 11 月 7 日現在の値に減衰補正し、内挿した「空間線量率マップ」及び「放射性セシウム沈着量マップ」も含めたマップをそれぞれ、Fig. 5-9 及び Fig. 5-10 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。

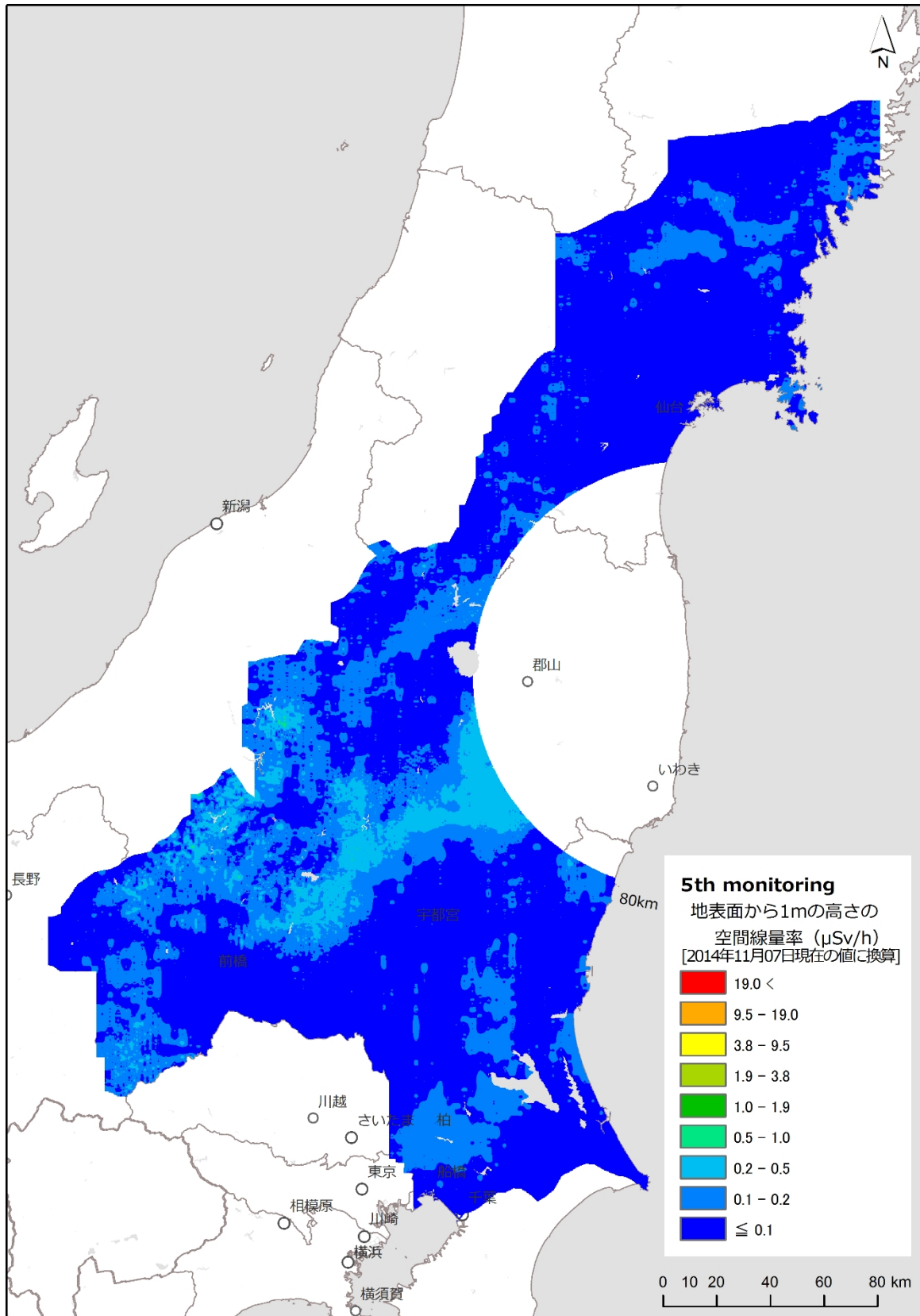


Fig. 5-5 東日本第5次モニタリングにおける放射線量率マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

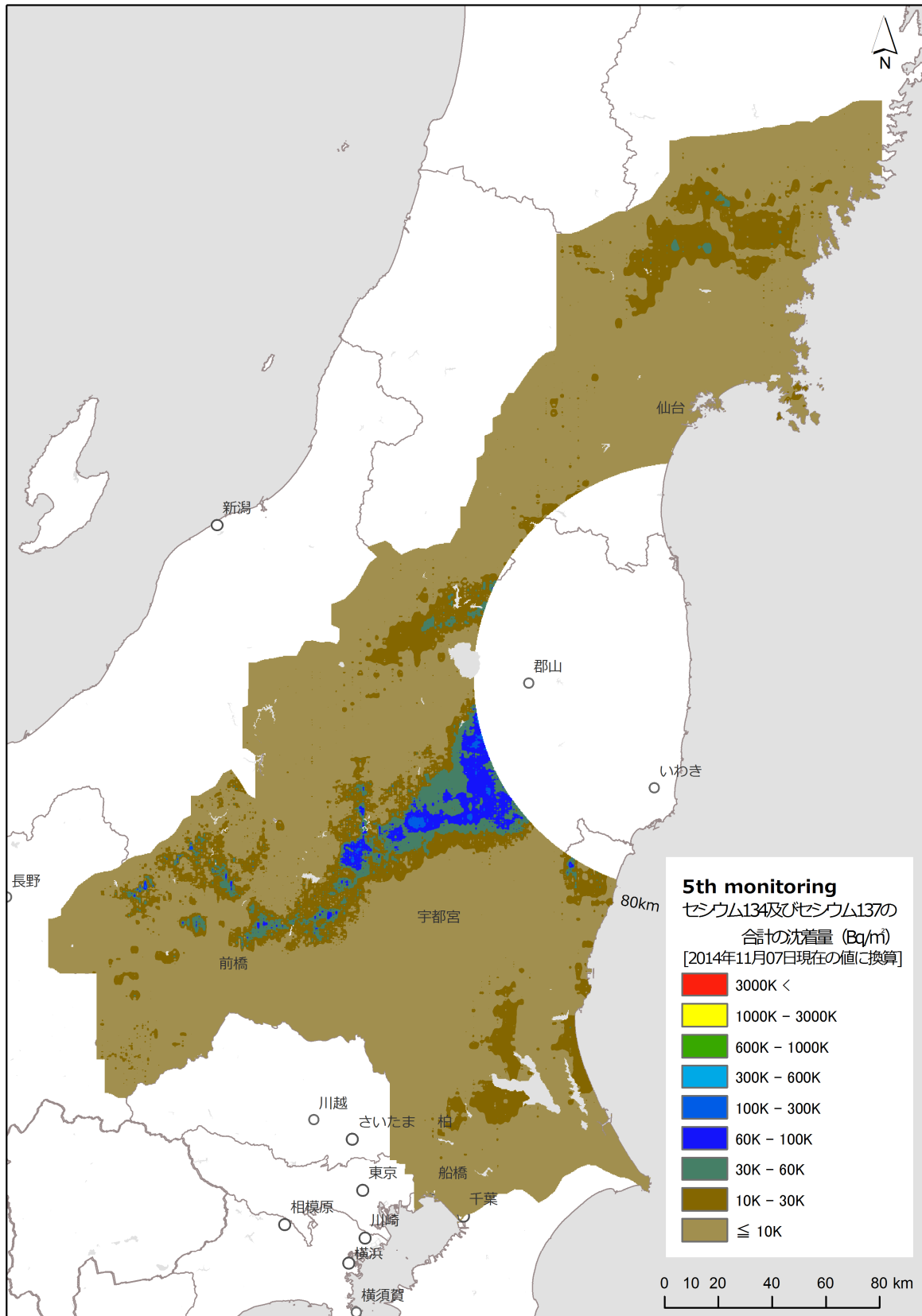


Fig. 5-6 東日本第5次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

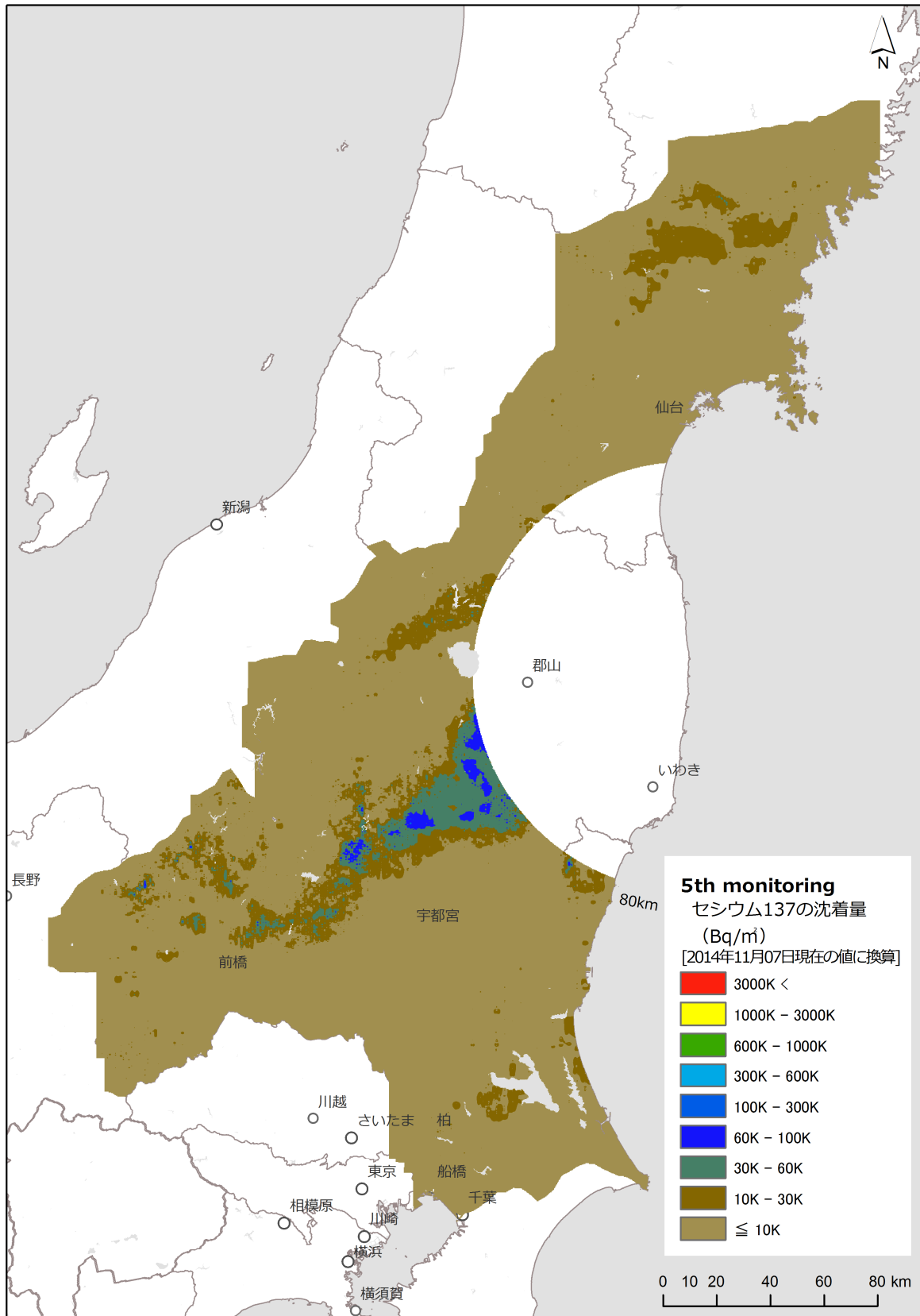


Fig. 5-7 東日本第5次モニタリングにおける¹³⁷Cs沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

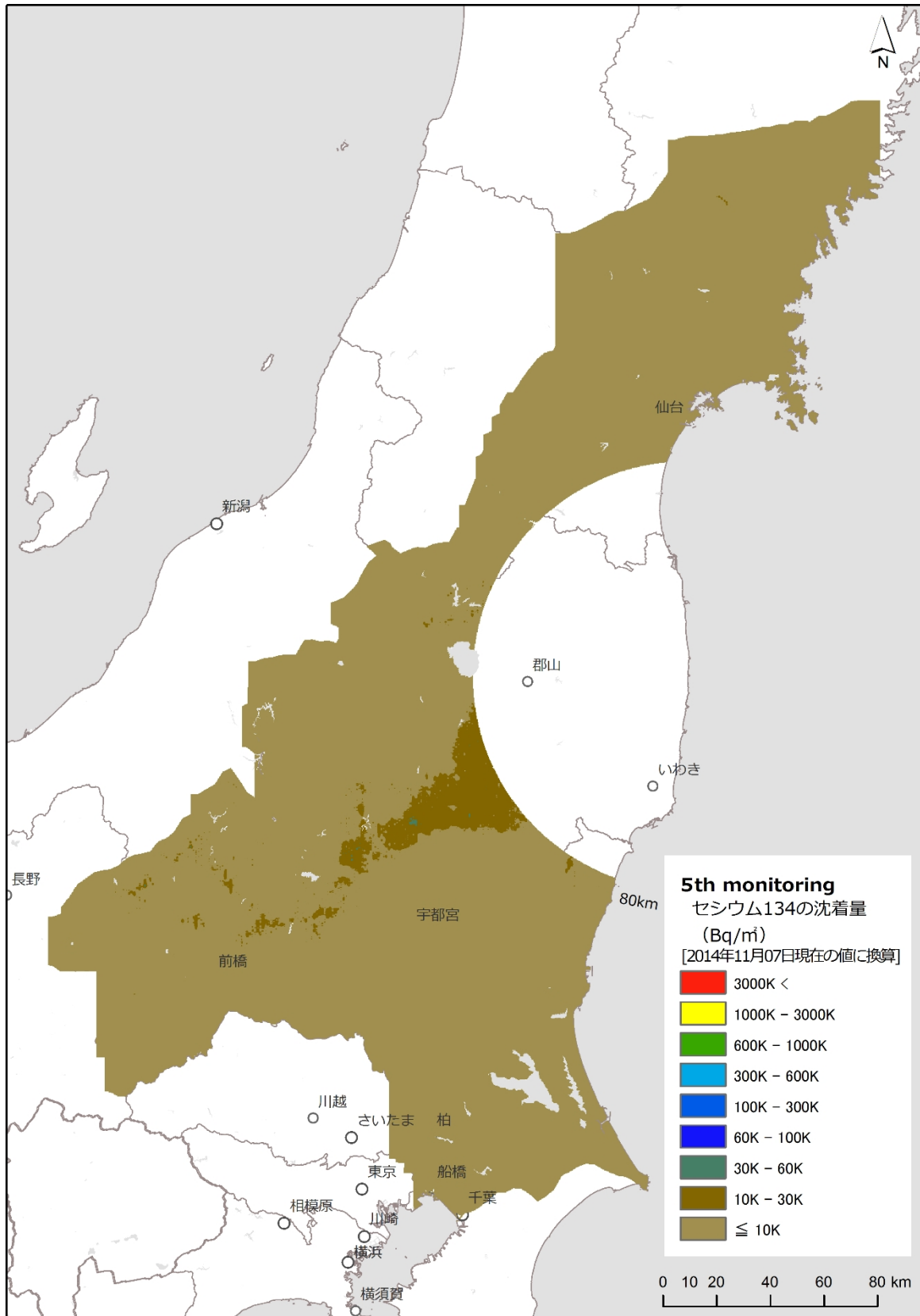


Fig. 5-8 東日本第5次モニタリングにおける¹³⁴Cs沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

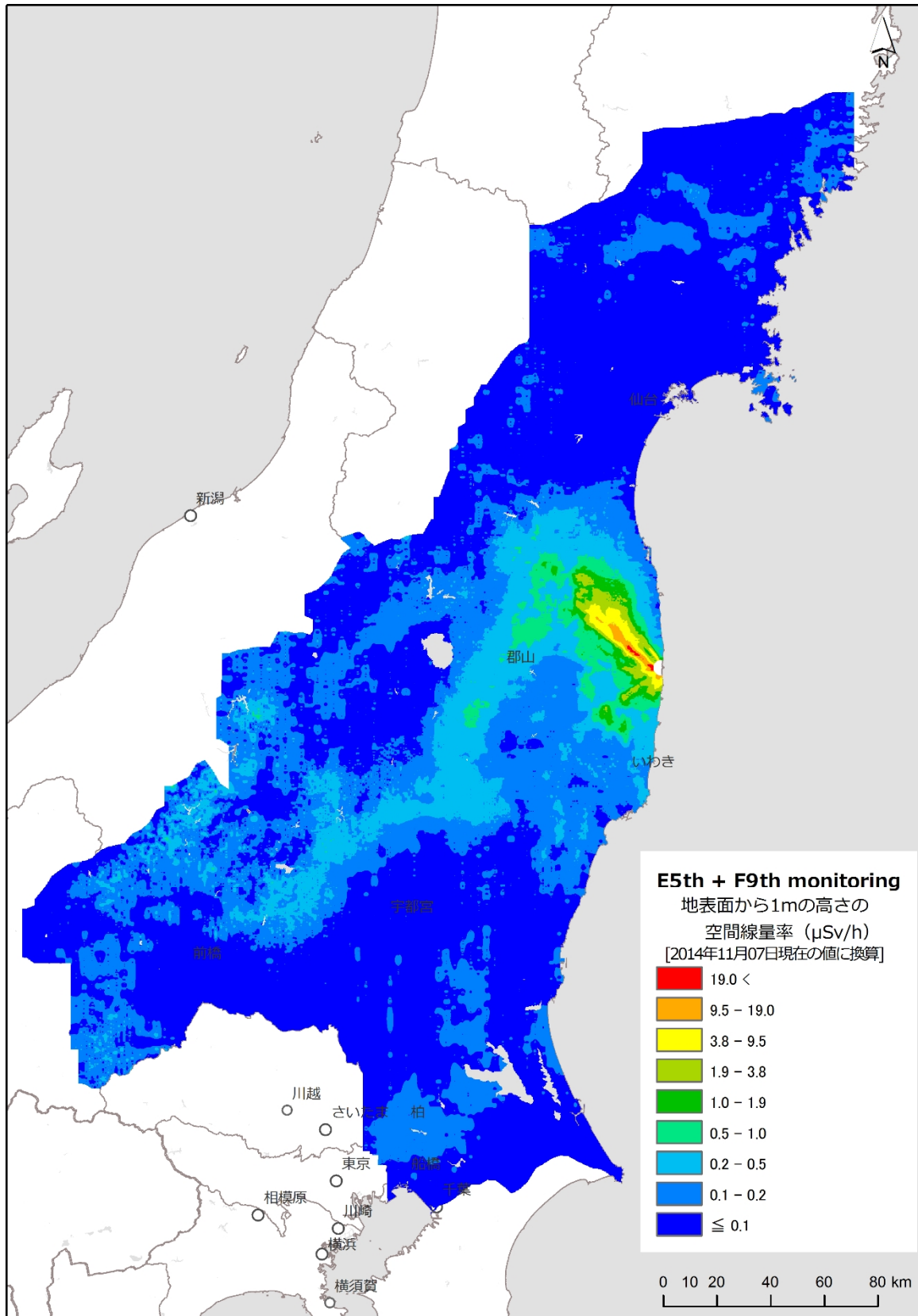


Fig. 5-9 東日本第5次モニタリングと第9次モニタリングにおける放射線量率マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

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

Fig. 6-1 に、過去の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、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。全体的な傾向を把握するために、定量的な比較方法を検討した。まず、天然の放射性核種の影響をなるべく小さくすることを考慮し避難指示区域内のデータのみを切り出し、250 m メッシュのデータに区切った。各メッシュの中心点の測定結果を測定時期ごとに比較した。また、それぞれのメッシュにおける変化量の割合 (相対偏差) を算出し、ヒストグラムとして示した。その際、過去の最も信頼できる測定結果である第4次モニタリングの結果を基準とした。第9次モニタリングと第4次モニタリングの線量率の比較をそれぞれ Fig. 6-2 に示す。また、第9次モニタリングと第4次モニタリングの¹³⁷Csの沈着量の比較を Fig. 6-3 に示す。線量率のヒストグラムと比較して、¹³⁷Csのヒストグラムはばらつきが大きい。これは、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、¹³⁷Cs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。

Fig. 6-4 に、第4次のモニタリングを基準とし、すべての80 km 圏内の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示す。また、Fig. 6-5 には同様に¹³⁷Csの沈着量について比較した図を示す。なお、エラーバーには、ヒストグラムの標準偏差 ($\sigma=1$) を示している。Fig. 6-4 より、半減期による放射性セシウムの減衰を起因とした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、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³⁰⁾。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 [11] で表すとき、

$$C = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) \quad [11]$$

$x=\beta$ 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及び 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、文科省及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²⁸⁾。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. 6-6 に示す。この報告結果から重量緩衝深度の変化を考慮し線量率を計算した。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26年度の重量緩衝深度を外挿した。線量から放射性セシウムの沈着量への換算する係数は、文科省「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法²³⁾」に重量緩衝深度毎に与えられている。与えられた数値間の換算係数については、Fig. 4-19 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線量率の経時変化の結果を Fig. 6-6 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。いずれにしろ、今後も航空機モニタリングのデータを解析・比較することは、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。

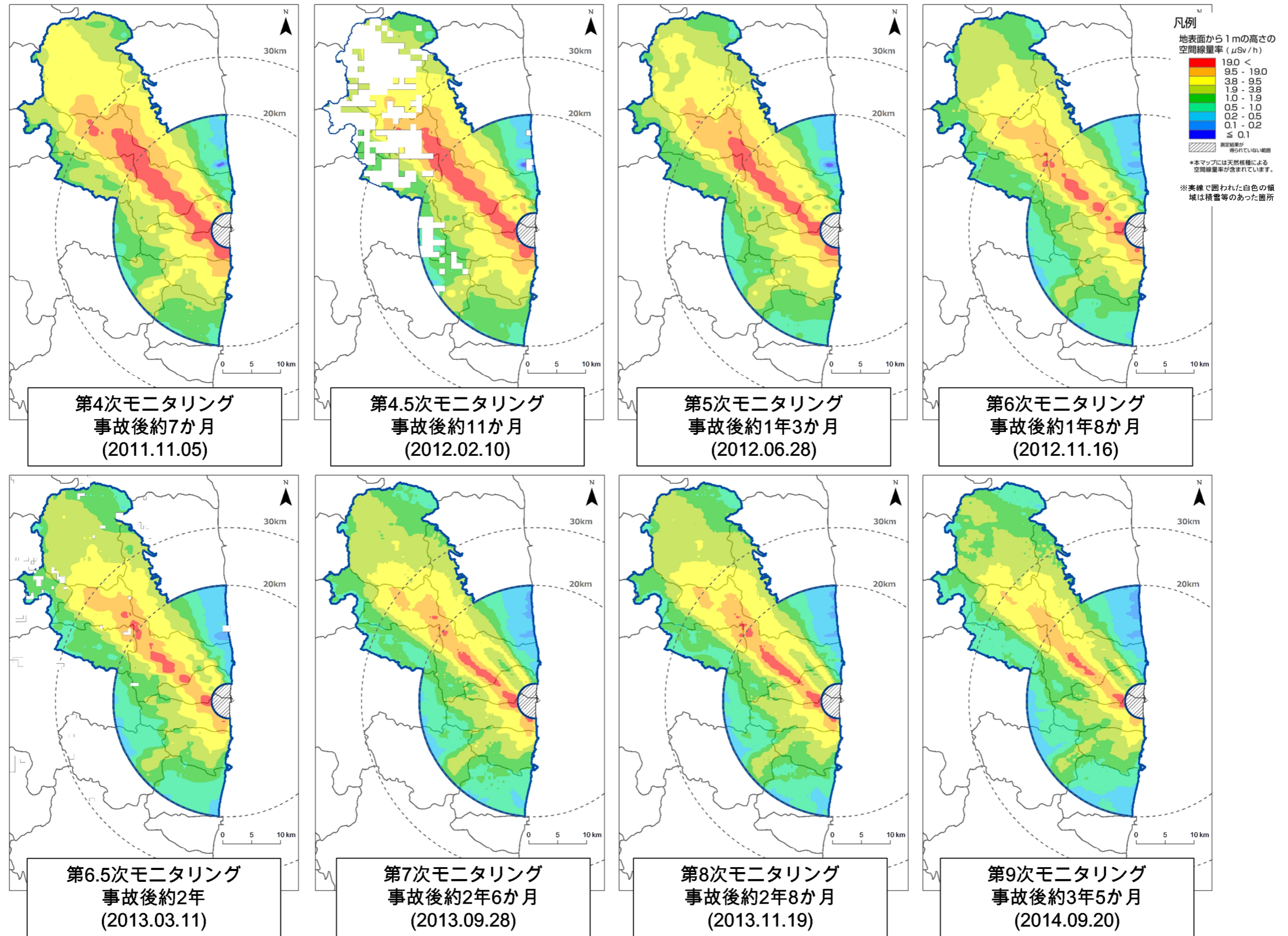


Fig. 6-1 避難指示区域における過去の線量率マップの比較(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

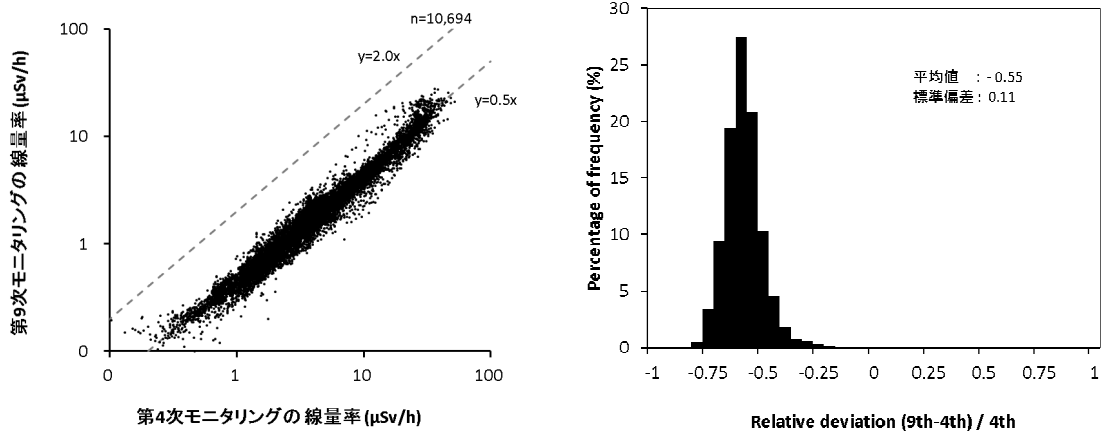


Fig. 6-2 第4次モニタリング及び第9次モニタリングの線量率測定結果の比較
左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム

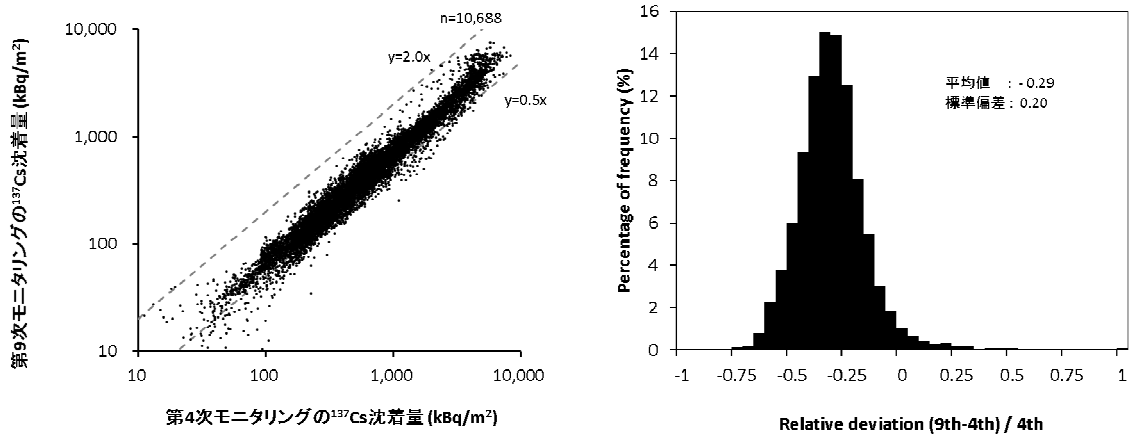


Fig. 6-3 第4次モニタリング及び第9次モニタリングの放射性セシウム沈着量測定結果の比較
左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム

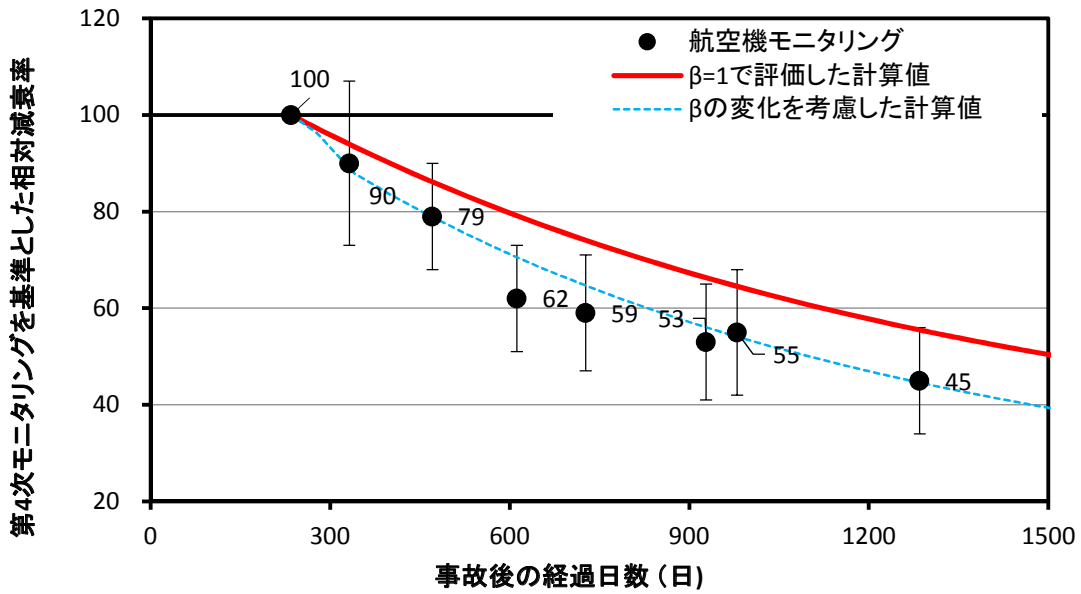


Fig. 6-4 航空機モニタリングによる避難指示区域内の線量率の変化傾向

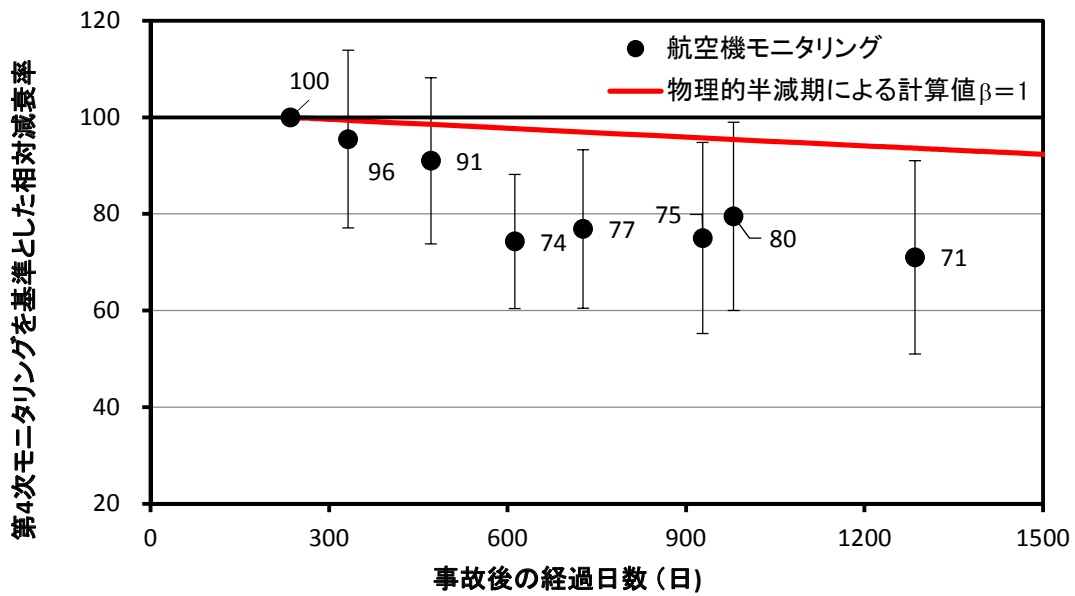


Fig. 6-5 航空機モニタリングによる避難指示区域内の¹³⁷Cs 沈着量の変化傾向

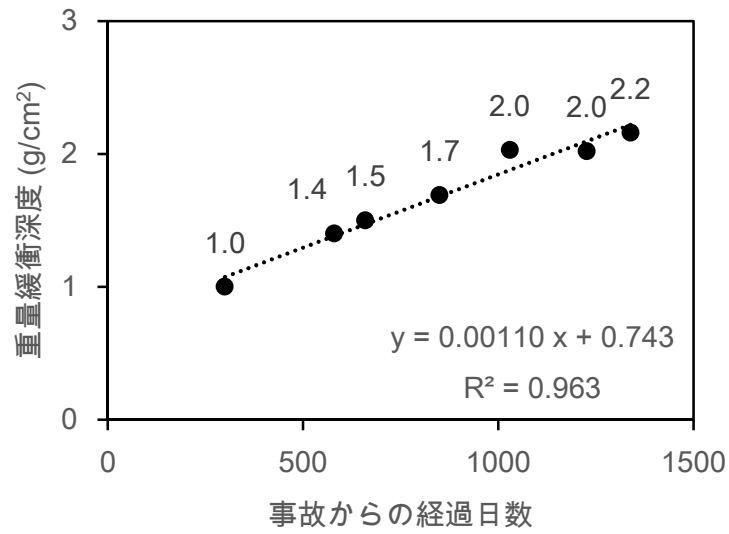


Fig. 6-6 事故からの経過日数と重量緩衝深度の関係

(文科省及び規制庁の実施した「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」事業の報告書から調査結果の平均値をプロットし、一次関数で近似(24),25),30))

6.2. 土地利用による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線量率の減少率の違いを考察するために、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³¹⁾」を利用した。80 km 圏内の土地利用図について、Fig. 6-7 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及び森林部について、過去の 80 km 圏内のモニタリングを比較し、線量率の減少率を比較した。市街地部及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. 6-7 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. 6-7 の凡例中、建物用地、道路、鉄道、その他用地を指す。

線量率の比較は、6.1 節に示したように、測定範囲を 250 m×250 m メッシュに区切り、同一メッシュ内の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 9 次モニタリングにおける市街地部及び森林部のメッシュ毎の相対偏差の頻度をヒストグラムにして Fig. 6-8 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けるそれぞれ土地利用における線量率の比率を 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 9 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 41 %、森林部が 44 %であることがわかった。すなわち、平均値で 3 %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。この違いは数値のばらつきを考えると有意な違いとは言い切れないが、傾向として森林部よりも市街地の方が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。

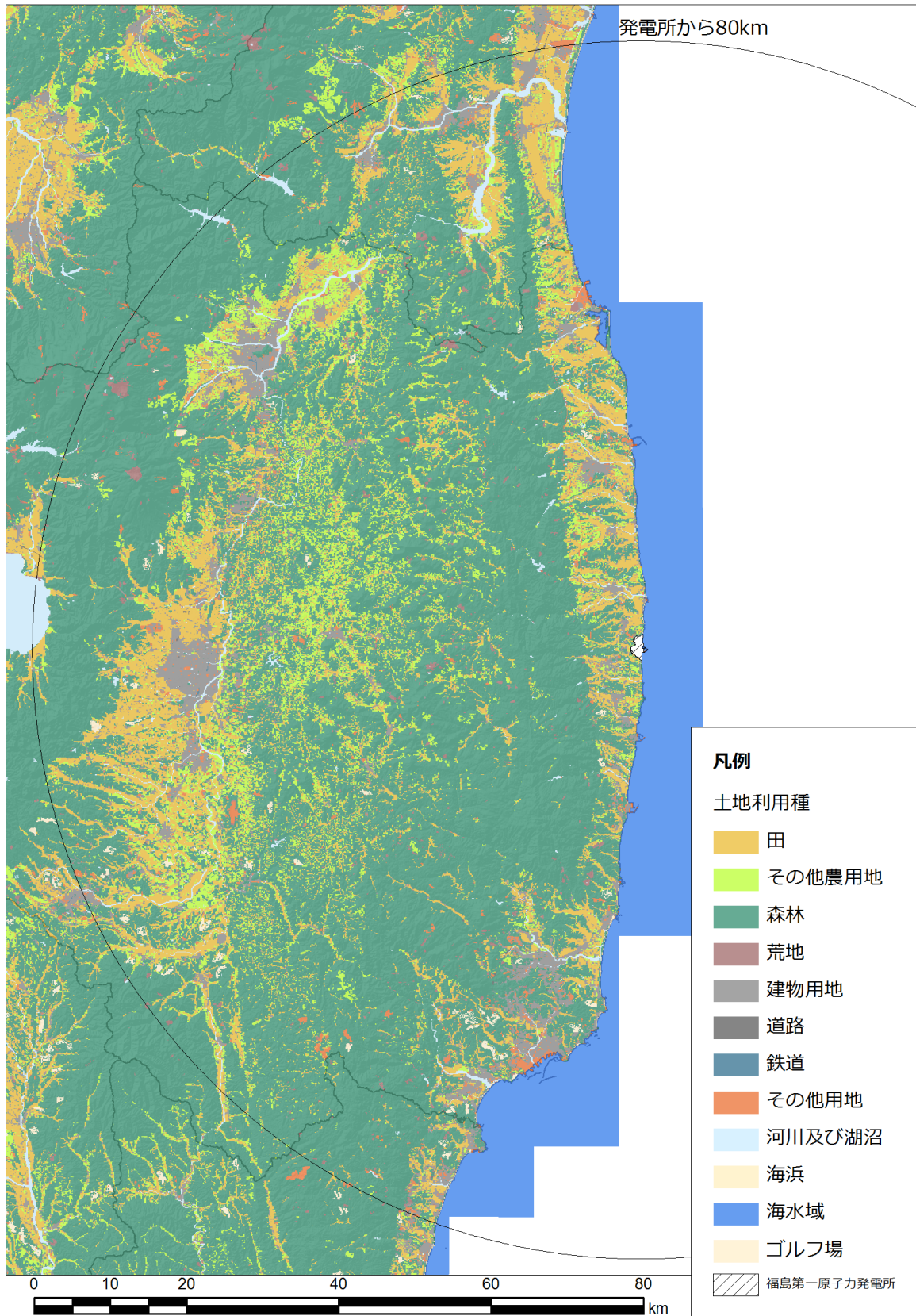


Fig. 6-7 発電所から 80 km 圏内における土地利用図
 (平成 21 年度 国土地理院土地利用調査データより)

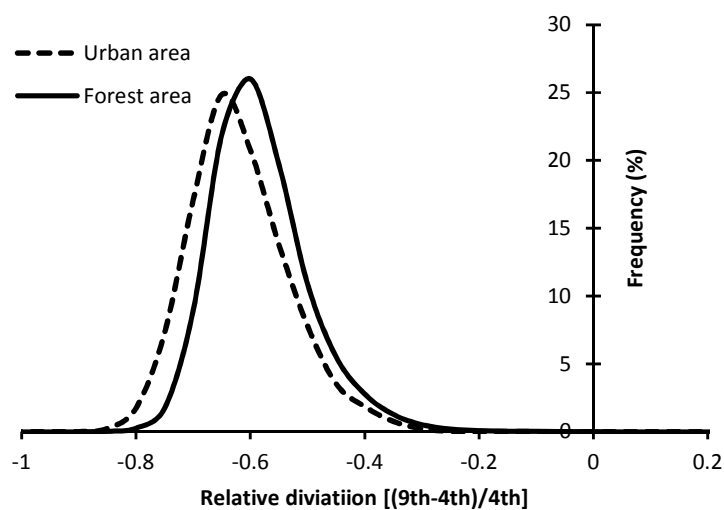


Fig. 6-8 森林部及び市街地における減衰率の比較 (第 4 次モニタリングと第 9 次モニタリングの比較)

Table 6-1 森林部及び市街地部における線量率の比較

	Gross area (km ²)	Ratio of dose rate (%)				
		5th/4th Ave. (%)	6th/4th Ave. (%)	7th/4th Ave. (%)	8th/4th Ave. (%)	9th/4th Ave. (%)
Urban area	732	70 ± 11	55 ± 8.8	50 ± 8.4	44 ± 9.7	41 ± 8.8
Forest area	5,841	77 ± 10	57 ± 8.5	54 ± 9.0	49 ± 9.2	44 ± 9.2
All area	8,923	72 ± 11	56 ± 9.0	53 ± 9.0	48 ± 10	43 ± 10

6.3. 空気中のラドン子孫核種の影響

航空機モニタリングの解析方法は、グロスカウント法を採用しているため、空気中のラドン子孫核種は、減算できない。これまでの航空機モニタリングの経験より、海上での測定結果から、フライトの時期や高度によって機体周辺の空気中の Rn 子孫核種が計数されることが分かっている。Rn 子孫核種が厄介であるのは、濃度が一定しないことにある。今回、ラドン子孫核種の影響について知見を得る方法について検討した。

ヘリコプターによるデータ採取時に、あらかじめ、地上の線量率が既知の場所において 400～1,000 m を直線的に上昇し、データを取得した。取得したデータはあらかじめ地上の線量率が分かっているため、式 [12] から地上からの放射線の影響、宇宙線及び自己汚染の計数率を減算し、残差をラドン子孫核種による計数率とした。

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

取得したデータの対地高度とラドン子孫核種由来の計数率の観測例を 80 km 圏内の測定結果を Fig. 6-9 に、80 km 圏外の測定結果を Fig. 6-10 示す。本鉛直分布は、式 (7) から求めたラドン子孫核種起因の計数率を対地高度 20 m 毎に平均した。最大値は、9 月 14 日に取得したデータの 300～500 m に観測され、計数率は 200 cps 程度であった。そのような計数率の上昇は、その他のデータでも観測されているが、概ね 500 m 以下であった。200 cps を、Table 4-3 の換算係数を当てはめて、地上 1m 高さの線量率に換算すると、0.018 μ Sv/h となる。すなわち、今回用いた航空機モニタリングの手法において、Rn 子孫核種は、最大で 0.018 μ Sv/h の妨害となることが、今回の結果から示唆される。80 km 圏内のような線量率の高い場所では、大きく影響しないが、80 km 以遠の線量率の低い場所であれば、比較的影響は大きいといえる。

実際のデータから Rn 子孫核種の影響を弁別するには、地上からの影響を遮蔽した別の測定器で計測するか、ピーク面積から線量率を換算する (コベル法) の適用が考えられる。本手法による影響調査は継続するとともに、Rn の影響弁別手法の確立が求められる。

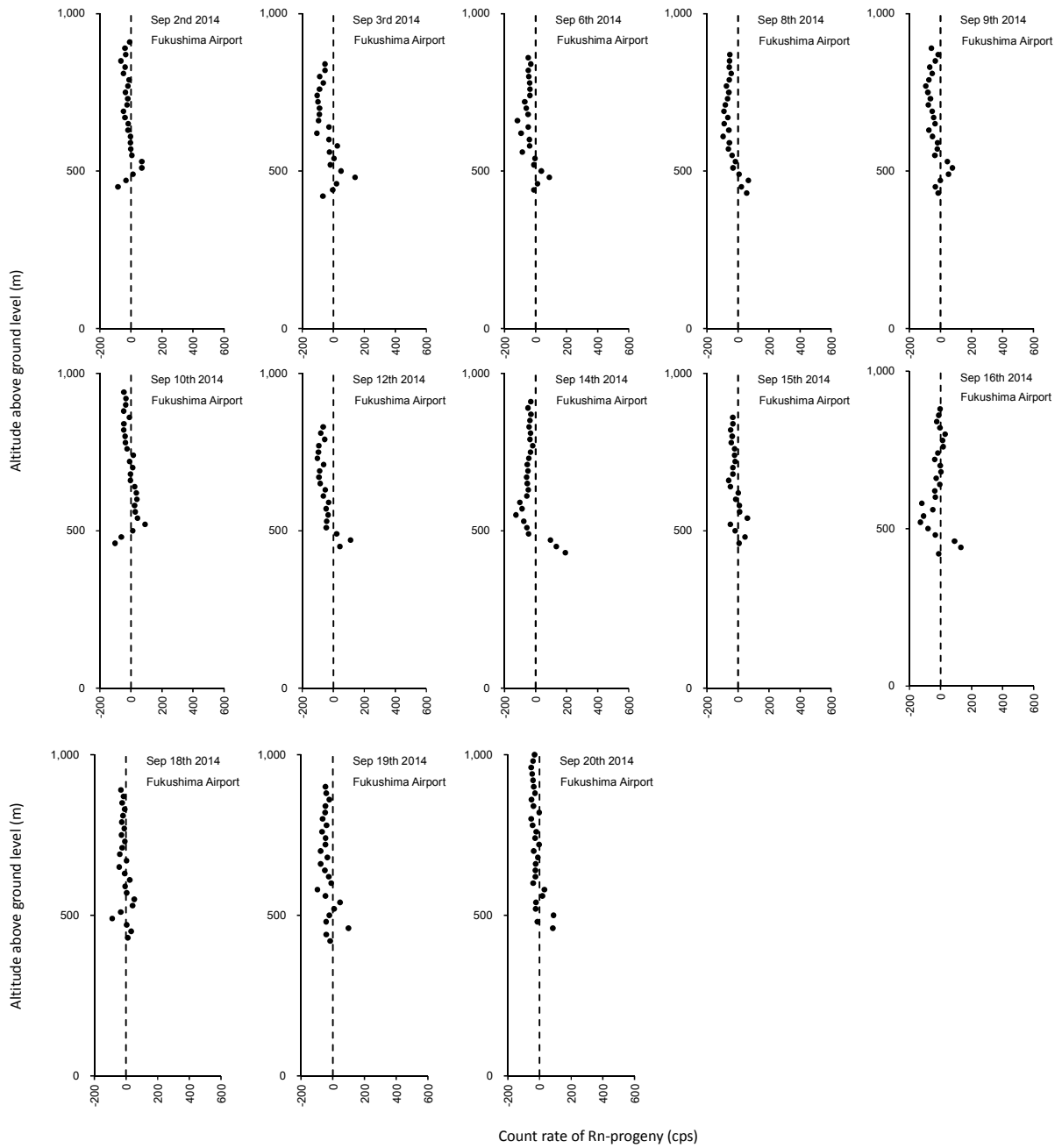


Fig. 6-9 ラドン子孫核種の日変化 (第9次モニタリング)

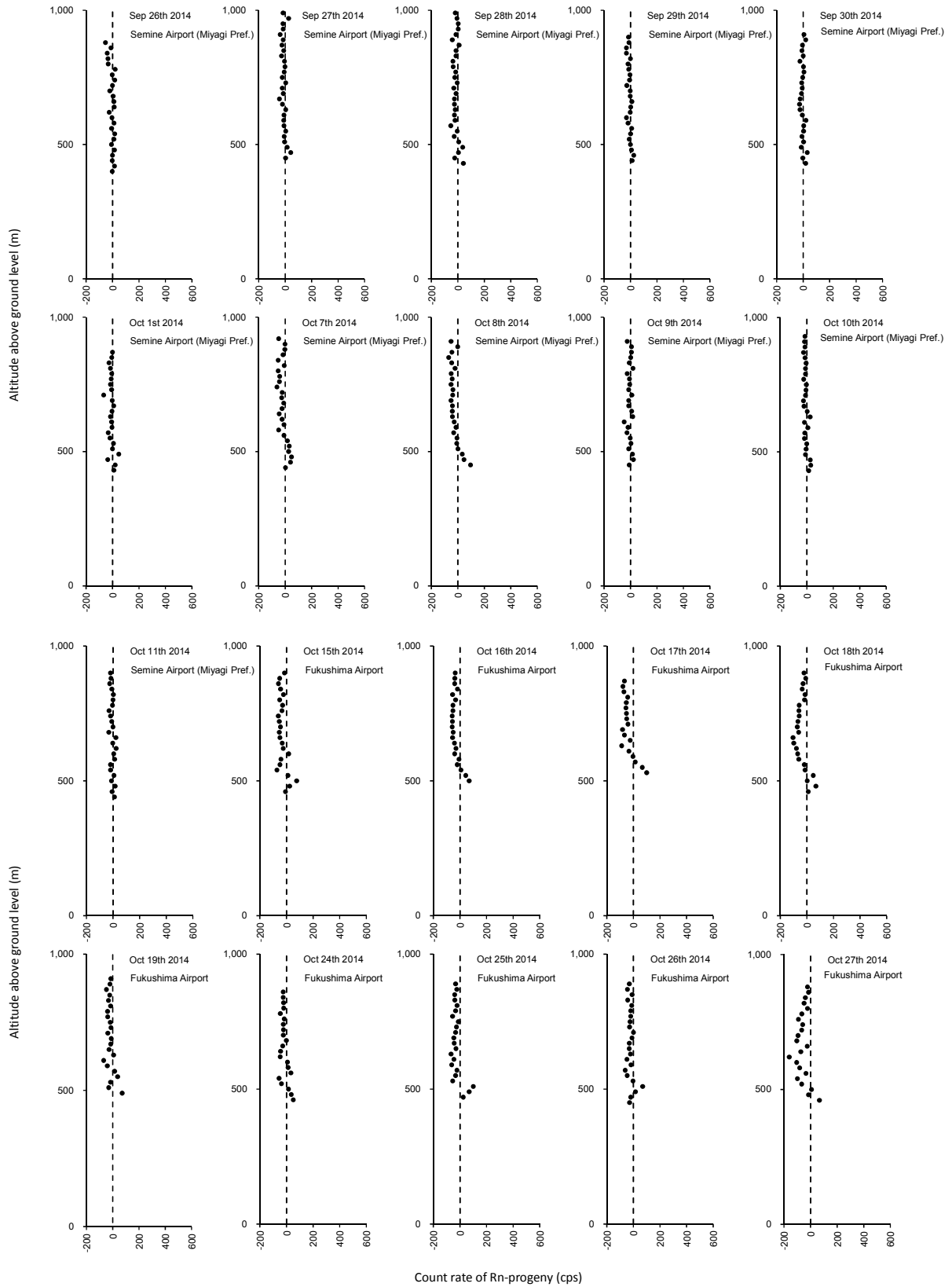


Fig. 6-10 ラドン子孫核種の日変化 (東日本第 5 次モニタリング)(1/2)

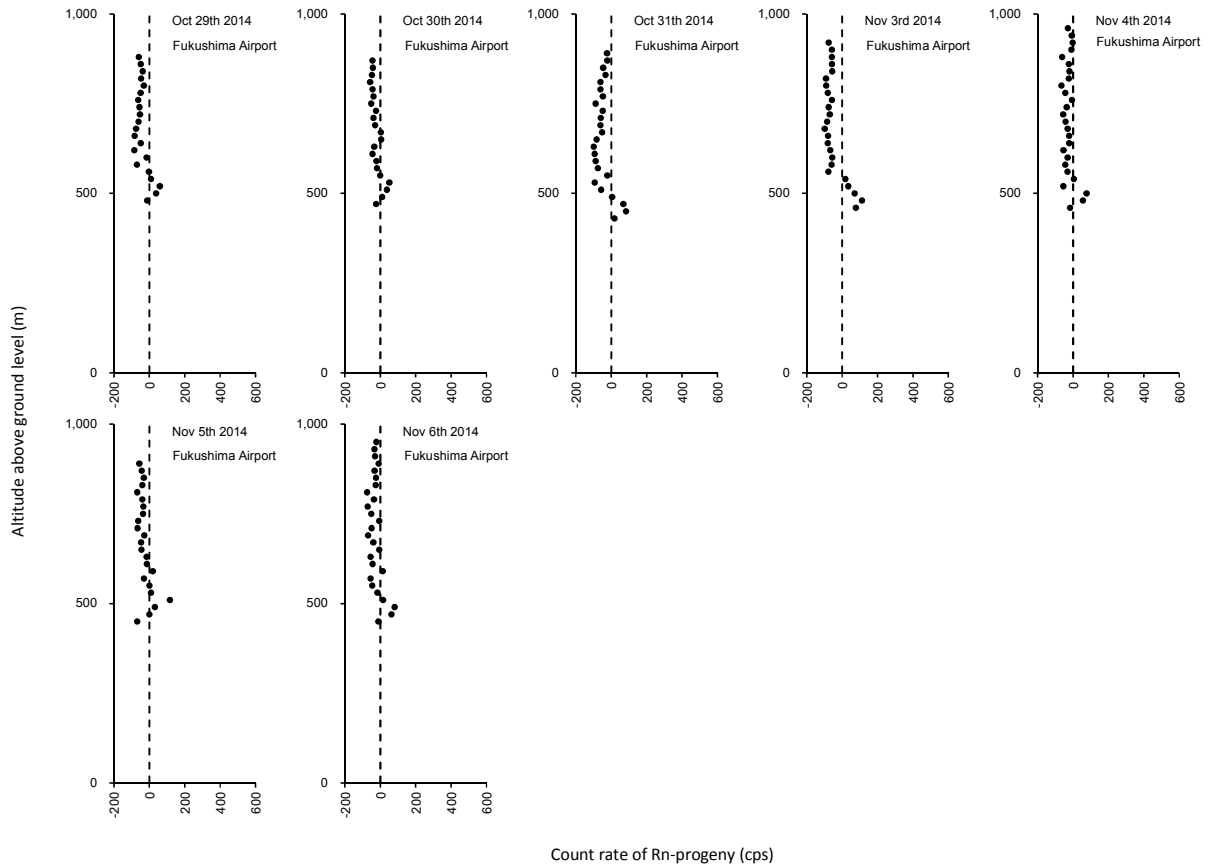
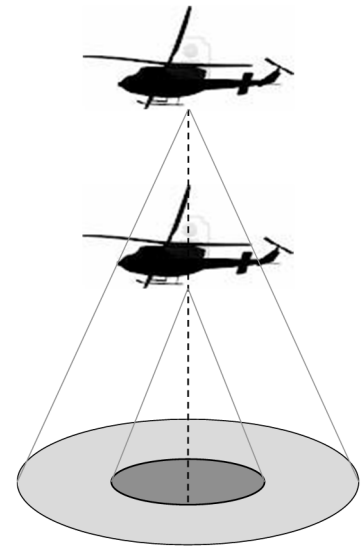


Fig. 6-10 ラドン子孫核種の日変化 (東日本第 5 次モニタリング)(2/2)

6.4. フライト高度と地形効果について

現状、フライト高度は 300 m を目途にデータを取得し、高度が上下した部分については実効的な減弱係数を用いて補正している。減弱係数は、平面で線量の均一な場所で取得しているため、現在の航空機モニタリングの手法は、地形が均一で平面と仮定した地上の線量率を換算しているといえる。実際には、高度の変化により測定の範囲が変わるため、各測定点のデータの不確かさが均一ではないという課題があった。Fig. 6-11 にフライト高度と測定範囲の関係を示す。このように、フライト高度が高くなると測定範囲は広がるため、対地高度はなるべく一定であることが望ましい。また、地形の複雑な山間部や地上に構造物がある場所では地上での測定結果を正確にトレースしていくという課題がある。過去の研究では、シミュレーション計算の結果から地形の効果は平面モデルと比較して放射線の測定値に対し、2~3 割程度の影響があるとするものもある³²⁾。また、森林や住宅地では、構造物自身が線源となり遮蔽となっている状況が容易に推定でき、その効果について評価する必要がある。



フライトの高度により
測定範囲が変化する。

Fig. 6-1 フライトの高度と測定範囲の関係

ここでは、対地高度の変化による線量率マップへの影響及び地形の効果について考察するために以下のデータを取得し、解析結果の比較を試みた。

- ・ 対地高度を 150 m, 300 m, 600 m と変化させ、線量率マップを作成。
- ・ 測定範囲の地上で 50 ポイントの線量率測定を実施し、作成したマップと比較。

測定場所は、発電所近傍の地形が複雑で線量率の勾配が大きい場所を選定した。測定結果を Fig. 6-12 に示す。まず、線量率マップを見ると対地高度 150 m と 300 m のデータに大きな違いは見られない。一方、対地高度 600 m では西側のエリアにおける円形状の線量の比較的高い場所が小さくなっていることが分かる。また、東側のエリアにおいても全体的に線量率が高くなっていることが分かる。これは、Fig. 6-11 で示したように、高度が高くなるにつれ測定範囲が大きくなり、より線量測定の「解像度」が荒くなっていることを示している。一方、地上の測定値との比較を見ると、どの対地高度で測定したデータも地上の線量率をよくトレースしていることが分かる。なお、散布図から求めた線形の近似直線の決定係数を見ると高度が高くなるにつれ数値が低くなる傾向にある。この結果も、上記の「解像度」の変化を支持していると考えられる。この結果から、山間部や構造物のある場所においても、地上の線量率分布を十分にトレースできるといえ、地形や構造物の航空機モニタリングに与える影響はデータ取得や解析時の不確かさとはいえ、比較して小さいことが示唆される。また、測定する対地高度の違い (150 m~600 m) によっても、顕著な違いは確認できなかったことから、高度の換算手法の妥当性を示している。いずれにしろ、更に地形の複雑さが顕著な場所や線量の勾配が大きい場所及び植生の異なる場所など、データの蓄積が必要と考える。

6.5. 天然放射性核種由来の線量率マップの作成

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、天然の放射性物質由来の線量率を放射性セシウムによる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、天然の放射性物質由来の線量率マップを作成することを試みた³³⁾。

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. 6-13 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的合法³⁴⁾ 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. 6-13 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 [13] を使用した。

$$S(i,j) = a + bE + c_i e^{-(E-E_i)^2/2\sigma_i^2} + c_j e^{-(E-E_j)^2/2\sigma_j^2} \quad [13]$$

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、1365keV の ^{134}Cs が 1400keV 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、放射線量率 (D_{nr}) への換算に使用した評価式を式 [14] 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 1,400keV 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。

$$D_{nr} = (C_{1400} - \text{BG}_{1400} - \text{Cs}_{1400}) \times I_{\text{BG}} \times \text{HF}_{1400} / \text{CD} \quad [14]$$

ここで、 C_{1400} は 1,400~2,800keV の積算計数率 (cps)、 BG_{1400} は宇宙線生成物、RSI システムの事故汚染およびラドン壊変生成物由来の 1,400~2,800keV 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 1,400~2,800keV の積算計数率の比率 (BG-index)、 HF_{1400} は 1,400~2,800keV の積算計数率の高度補正係数、 CD は線量率換算係数 (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、空間分解能は 1 km 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、1,400~2,800keV 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。Table 6-2 に、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線量率の関係を調べたところ、線量率が低い場所 (天然核種の寄与が大きい場所) と線量率の高い場所 (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。Fig. 6-14 に、地上の線量率と算出した CD の関係について示す。なお、ここでは、 $\text{Gy} : \text{Sv} = 1:1.2$ 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線量率に対する自然放射線の線量率の比率を Fig. 6-15 に示す。Fig. 6-15 (左) に示した天然放射線の分布図には Fig. 5-9 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. 6-15 (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、定量的な評価を主なうため、福島県の周辺でゲルマニウム半導体検出器を用いて In-situ 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. 6-16 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ことと考えられる。

本手法を用いた、自然放射線分布を評価した結果を Fig. 6-17 に示す。適用したデータは平成 25 年度に測定したデータと平成 26 年度に測定したデータである。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、過去に日本全国の線量率を計測した結果と比較しても矛盾しない³⁵⁾。このように、両マップとも同様な傾向を示し、本手法の妥当性を示している。

2 つの Gauss 分布を仮定した関数適合法を用いることで、 ^{134}Cs と ^{40}K の複合ピークを弁別でき、放射性セシウム由来の線量率を適切に取り除いた自然放射線分布を評価することが可能となった。関数適合法を用いたピークの弁別手法の特徴として、Gauss 分布の項を式に追加することで 2 つ以上の複合ピークの弁別ができ、さらにピーク面積の計数率の評価に一般逆行列を用いるため計算速度が速い。このことから、複数存在する放射性核種を迅速に弁別することができ、事故直後の汚染分布の調査に特に有用な手法であると考えられる。また、事故直後においては、 ^{134}Cs 濃度が高いことが予想され、見かけ上自然放射線の強度がさらに過大評価になると考えられることから、本手法を用いて ^{134}Cs の影響を取り除くことで自然放射線の強度を精度良く評価できると考えられる。

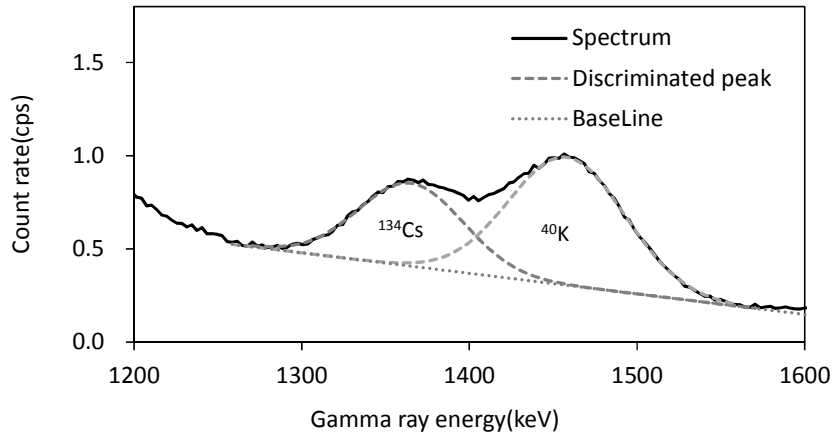


Fig. 6-13 関数適合法を用いた ^{134}Cs と ^{40}K の弁別

Table 6-2 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	-0.0059 ± 0.00024	11	-0.0060 ± 0.00031	8
50 - 3,000keV	-0.0072 ± 0.00047	21	-0.0072 ± 0.00040	35

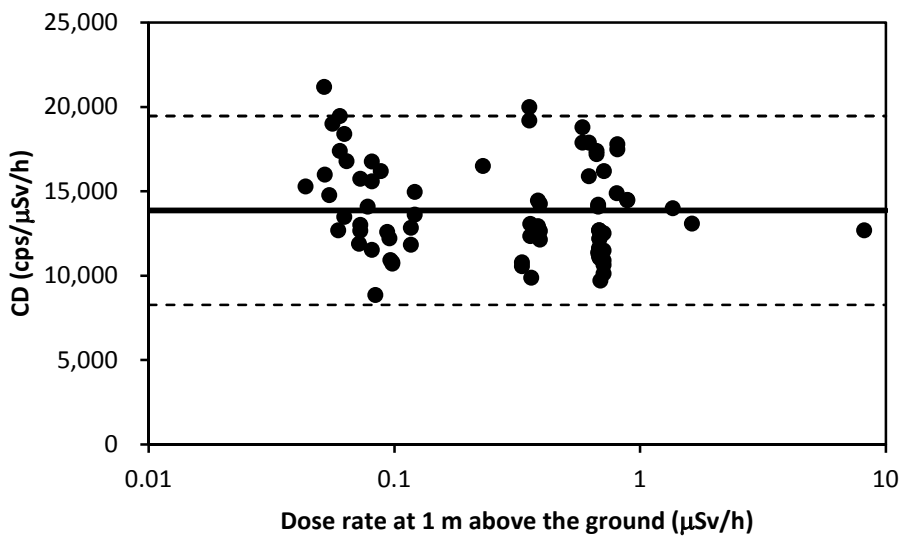


Fig. 6-14 テストポイントの地上の線量率と線量率換算係数 (CD) の関係

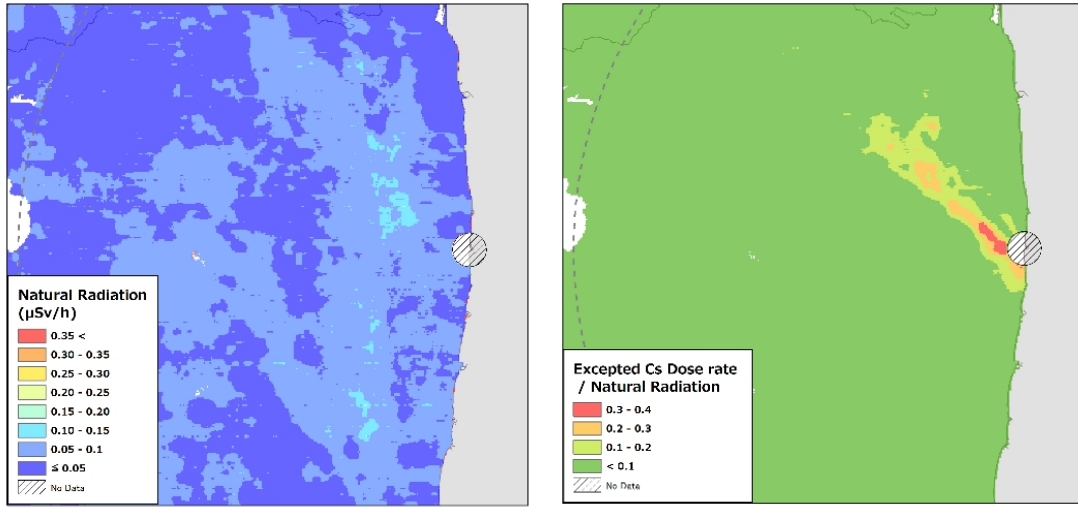


Fig. 6-15 天然由来の線量率マップ(左),放射性セシウム由来の線量率と自然放射線の線量率の比率(右)

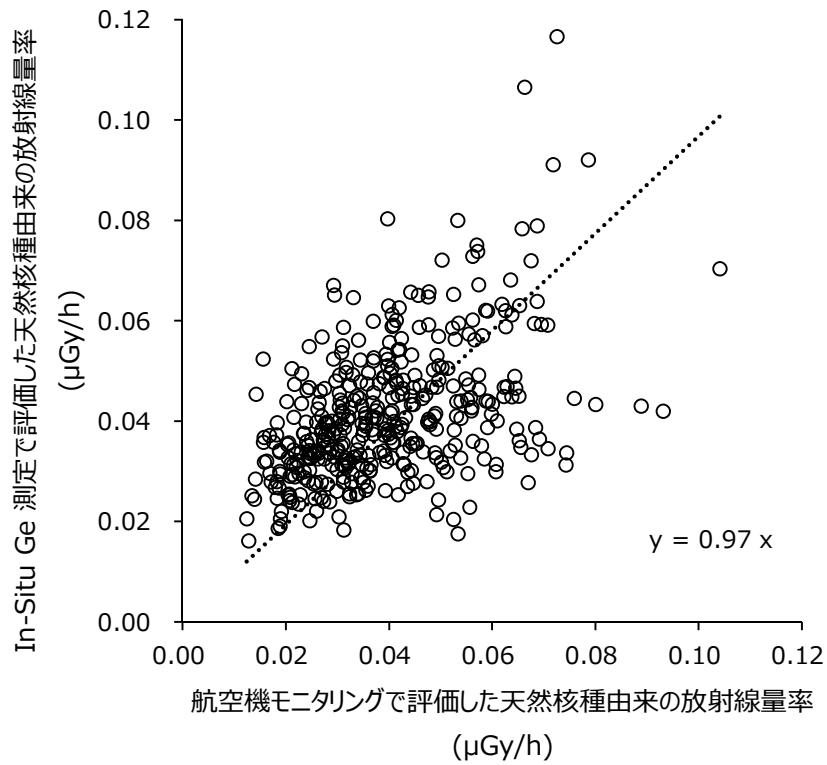


Fig. 6-16 航空機モニタリングによる自然放射線の線量率とゲルマニウム半導体検出器で得られた自然放射線の線量率の比較

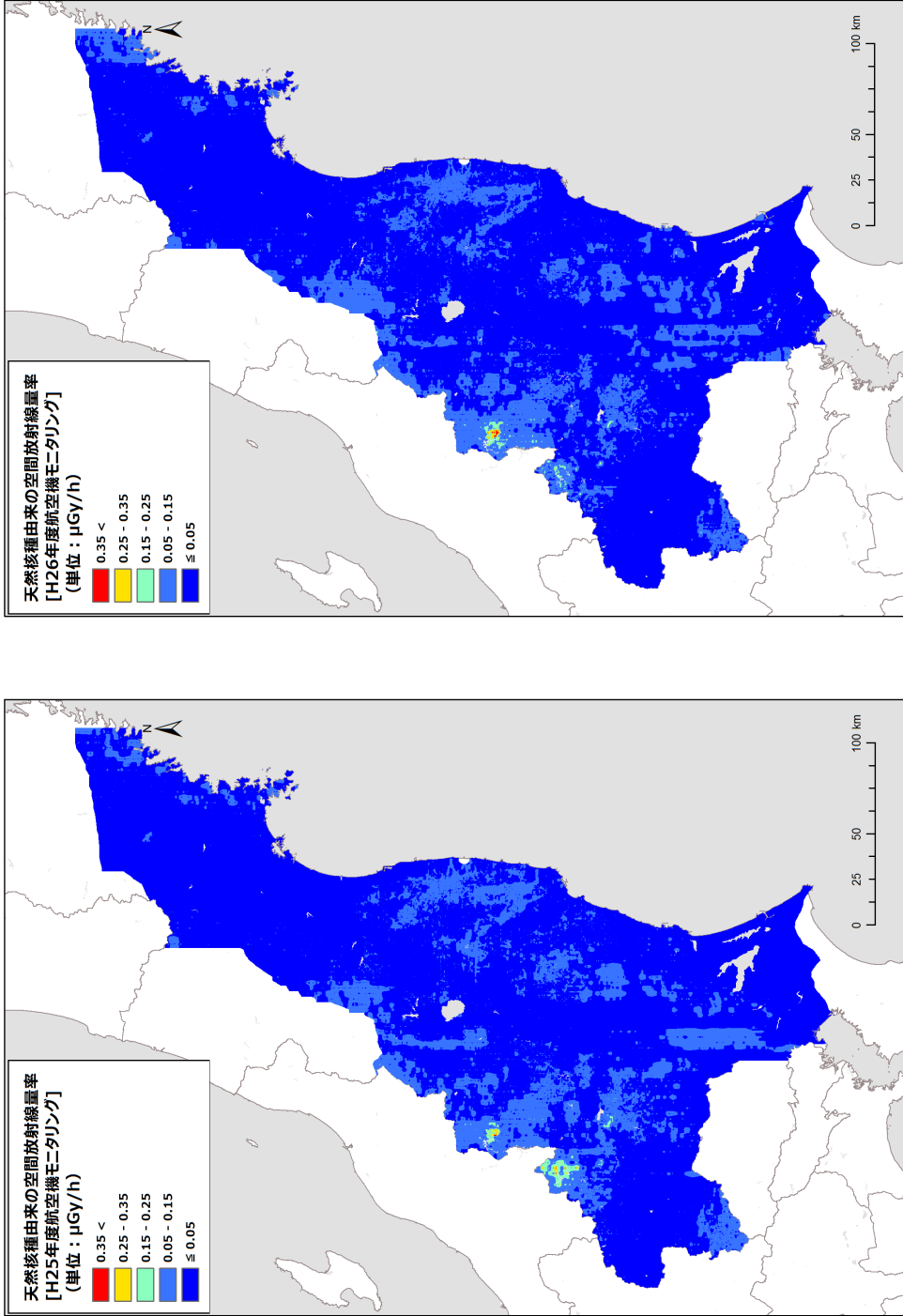


Fig. 6-17 天然放射性核種による線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

7. 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 4 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。

- ・ 線量率マップについて

昨年度まで、CD や AF 等のパラメータは、モニタリング毎に取得し、データの信頼性を考慮し、選定してきた。今年度は、4 年間の実施の中で、ヘリコプターと RSI システムの組み合わせで、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。

- ・ 山間部における放射性セシウム沈着量への換算方法について

6.4 節に示した様に、山間部での地上値と航空機モニタリングの比較を行った結果、線量率はよく一致した。地形の効果は、航空機モニタリングに含まれる不確かさからすると影響は大きくないように思われる。今後、更にデータを取得し、評価を行っていく。

- ・ ラドンの妨害について

6.8 節で示した様に、0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 程度以下の低線量率の領域では、ラドン子孫核種の影響は無視できないことが示唆されている。現状では、RSI システムのデータから空気中のラドン子孫核種の影響を除去することはできない。地上の影響を除去し、ラドンの放射線のみを評価する独立した検出器のデータを使用する方法が考えられる。今後、技術開発が必要なテーマである。

- ・ 地形効果補正の最適化について

複雑な地形の場所、すなわち山間部はもれなく森林になっており、樹木の影響についても評価が必要である。今後、手法の高精度化を目指して技術開発の必要なテーマである。

8. まとめ

平成 26 年度に予定された 80 km 圏内の航空機モニタリング 1 回及び 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、発電所事故の影響があったエリアの線量率の全体的な減少傾向を把握することができた。

事故以来、航空機モニタリングが日本で実施されて、4 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及び軽微なトラブルへの対応経験により、作成する放射線量率マップの精度は高まってきているといえる。ただし、測定者の技能にかかわらず、同じ測定結果が得られるまで、測定手法が確立しているとは言い難く、事故以来、専属的に行ってきた研究者、技術者の知識と経験に負うところはまだまだ大きい。今後、さらなるルーチン化を目指し、単純なシステム化が必要である。また、米国や英国のような、航空機モニタリング先進国の方法と比較し、手法の妥当性の国際的な担保を目指す必要があると考える。

謝辞

本調査研究は、「平成 26 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。日本原子力研究開発機構、応用地質（株）、（株）NESI 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と In-situ 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。また、本稿執筆に際し、督励していただいた原子力規制庁監視情報課・金子忠利企画官、海野幸広環境放射能対策官に深く感謝します。

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 -探査技術とりまとめ-, 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.
- 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, 182p.
- 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. et al., 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, 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> (2015 年 3 月 1 日閲覧).
- 20) 原子力規制庁, 航空機モニタリング行動計画, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5274/view.html> (2014 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, 110p.
- 22) 国土地理院ホームページ, <http://www.gsi.go.jp/kibanchizu/kibanchizu60004.html> (2014 年 3 月 1 日閲覧).
- 23) 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.

- 24) 原子力機構 HP, 平成 24 年度放射能測定調査委託事業「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」成果報告書,
<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry05.html> (2014 年 3 月 1 日閲覧).
- 25) 原子力機構 HP, 平成 25 年度放射能測定調査委託事業「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」成果報告書,
<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry06.html> (2014 年 3 月 1 日閲覧).
- 26) 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.
- 27) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003.
- 28) 杉浦綾, 野口伸, 石井一暢, 寺尾日出男, 産業用無人ヘリコプタを用いた農地情報のリモートセンシングシステム (第 2 報), 農業機械学会誌, 66, pp. 67-74, 2004.
- 29) 原子力機構, 平成 26 年度放射能測定調査委託事業「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」成果報告書, 2015.
- 30) ICRU, Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU report 53, 1994.
- 31) 国土地理院 HP, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>, (2014 年 3 月 1 日閲覧).
- 32) Schwarz, G. F., Klingele, E. E. and Rybach, L., How to handle rugged topography in airborne gamma-ray spectrometry surveys, FIRST BREAK, 10, pp. 11-17, 1992, DOI: 0.3997/1365-2397.1992001.
- 33) 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, pp.62-71, 2014
- 34) 文部科学省, ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー, 放射能測定法シリーズ 7, 1992.
- 35) 湊進, 日本における地表 γ 線の線量率分布, 地学雑誌, 115, pp.87-95, 2006.

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

