

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)

Radiation Monitoring using Manned Helicopter around
the Nuclear Power Station in the Fiscal Year 2015
(Contract Research)

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

Yukihisa SANADA, Masahiro MUNAKATA, Airi MORI, Azusa ISHIZAKI,
Kazumasa SHIMADA, Jun HIROUCHI, Yukiyasu NISHIZAWA, Yoshimi URABE
Chika NAKANISHI, Tsutomu YAMADA, Mutsushi ISHIDA, Yoshiharu SATO
Miyuki SASAKI, Hirokatsu HIRAYAMA, Yoshihide TAKAMURA, Katsuya NISHIHARA
Mitsuo IMURA, Kenji MIYAMOTO, Takeyuki IWAI, Yuki MATSUNAGA
Masayuki TOYODA, Shinichiro TOBITA, Tamotsu KUDO and Shinichi NAKAYAMA

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

October 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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, 2016

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)

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、宗像 雅広、森 愛理、石崎 梓^{*1}、嶋田 和真、廣内 淳、西澤 幸康^{*2}、
卜部 嘉^{*3}、中西 千佳^{*1}、山田 勉^{*2}、石田 睦司^{*3}、佐藤 義治⁺¹、佐々木 美雪⁺¹、
平山 弘克^{*3}、高村 善英^{*3}、西原 克哉^{*3}、伊村 光生^{*3}、宮本 賢治^{*4}、岩井 毅行^{*5}、
松永 祐樹^{*6}、豊田 政幸^{*7}、飛田 晋一郎^{*6}、工藤 保⁺²、中山 真一⁺³

(2016 年 8 月 8 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。ここでは、平成 27 年度に実施した福島第一原子力発電所周辺におけるモニタリング結果と川内原子力発電所周辺で行ったバックグラウンド線量率のモニタリング結果についてまとめた。また、これまで課題となっていた空気中のラドン子孫核種の弁別手法及び積雪時の測定手法について新たに開発を行った。

本調査研究は、「平成 27 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」及び「平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費 (九州電力川内原子力発電所 80 km 圏内における航空機モニタリング等) 事業」の成果をとりまとめたものである。

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 福島環境安全センター

+2 原子力緊急時支援・研修センター

+3 企画調整室

※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 (応用地質株式会社)

※5 特定課題推進員 (株式会社 NESI)

※6 特定課題推進員 (検査開発株式会社)

※7 特定課題推進員 (原子力エンジニアリング株式会社)

*1 株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター (2016 年 7 月迄技術開発協力員)

*2 日本放射線エンジニアリング株式会社 (2016 年 4 月迄技術開発協力員)

*3 応用地質株式会社 (2016 年 4 月迄技術開発協力員)

**Radiation Monitoring using Manned Helicopter
around the Nuclear Power Station in the Fiscal Year 2015
(Contract Research)**

Yukihisa SANADA, Masahiro MUNAKATA, Airi MORI, Azusa ISHIZAKI^{※1}, Kazumasa SHIMADA,
Jun HIROUCHI, Yukiyasu NISHIZAWA^{※2}, Yoshimi URABE^{※3}, Chika NAKANISHI^{*1},
Tsutomu YAMADA^{*2}, Mutsushi ISHIDA^{※3}, Yoshiharu SATO⁺¹, Miyuki SASAKI⁺¹,
Hirokatsu HIRAYAMA^{*3}, Yoshihide TAKAMURA^{*3}, Katsuya NISHIHARA^{*3}, Mitsuo IMURA^{*3},
Kenji MIYAMOTO^{*4}, Takeyuki IWAI^{※5}, Yuki MATSUNAGA^{※6}, Masayuki TOYODA^{※7},
Shinichiro TOBITA^{※6}, Tamotsu KUDO⁺² and Shinichi NAKAYAMA⁺³

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

(Received August 8, 2016)

By the nuclear disaster of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS), 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. After the nuclear disaster, airborne radiation monitoring using manned helicopter was conducted around FDNPS. In addition, background dose rate monitoring was conducted around the Sendai Nuclear Power Station. These results of the aerial radiation monitoring using the manned helicopter in the fiscal 2015 were summarized in the report. In addition, we developed the discrimination technique of the Rn-progenies and the evaluation of radiation attenuation by snow.

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

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" and "the projects of the radiation monitoring using manned helicopter around the Sendai Nuclear Power Station" of the Nuclear Regulation Authority in the fiscal 2015.

+1 Fukushima Environmental Safety Center

+2 Nuclear Emergency Assistance and Training Center

+3 Planning and Co-ordination Office

※1 Post-Doctoral Fellow

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

※3 Collaborating Engineer (NESI, Inc.)

※4 Collaborating Engineer (OYO corp.)

※5 Special Topic Researcher (NESI, Inc.)

※6 Special Topic Researcher (Inspection Development Co.Ltd.)

※7 Special Topic Researcher (Nuclear Engineering Co.,Ltd.)

*1 Visible Information Center, Inc. (Collaborating Engineer until July, 2016)

*2 Japan Radiation Engineering Co.Ltd. (Collaborating Engineer until April, 2016)

*3 OYO corp. (Collaborating Engineer until April, 2016)

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.....	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.....	15
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.....	15
4.2.	データ取得方法.....	18
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.....	20
4.4.	解析のフロー.....	26
4.5.	線量率への換算方法.....	27
4.5.1.	バックグラウンド（自己汚染及び宇宙線）.....	27
4.5.2.	高度補正.....	29
4.5.3.	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.....	42
4.11.	地上における測定値との比較.....	43
4.12.	天然放射性核種由来の線量率マップの作成.....	46
5.	モニタリング結果.....	50
5.1.	第10次モニタリング.....	50
5.2.	東日本第6次モニタリング.....	55
6.	モニタリング結果の考察.....	66
6.1.	過去のモニタリング結果との比較.....	66
6.2.	土地利用による線量率の変化傾向の違い.....	75

6.3.	測定時間と線量率マップ	78
7.	航空機モニタリングにおける積雪の影響.....	80
7.1.	背景と目的.....	80
7.2.	写真測量の理論	80
7.3.	データ取得.....	81
7.3.1.	対象エリア	81
7.3.2.	放射線計測.....	81
7.3.3.	航空地形測量	81
7.3.4.	地上データ取得.....	82
7.4.	結果	85
7.5.	放射線の減衰量と積雪深さの関係.....	88
7.6.	写真測量データの精度向上のための検討	93
8.	空気中のラドン子孫核種の影響調査.....	96
8.1.	ラドン子孫核種	96
8.2.	地上線量率が既知の場所におけるラドン子孫核種の検出	97
8.3.	ラドン子孫核種用検出器を用いた減算手法.....	100
9.	九州電力川内原子力発電所におけるバックグラウンドモニタリング.....	108
9.1.	はじめに	108
9.2.	モニタリングの方法	110
9.2.1.	測線の設定.....	110
9.2.2.	解析手法	112
9.2.3.	解析パラメータ.....	112
9.2.4.	地上における測定値との比較	115
9.3.	モニタリング結果.....	117
9.4.	天然の放射性核種濃度への換算方法の検討.....	120
9.5.	緊急時モニタリングに資する知見の整理	126
10.	今後の課題	127
11.	まとめ	128
	謝辞.....	128
	参考文献.....	128

Contents

1. Introduction.....	1
2. History of airborne monitoring.....	3
3. Measurement system and helicopter	6
3.1. System of airborne radiation monitoring system	6
3.2. Helicopter	8
3.3. Source test.....	10
3.4. Maintenance of RSI system.....	11
4. Data acquisition and analysis	15
4.1. Basic concept of conversion to dose rate at 1 m above the ground	15
4.2. Conditions of data acquisition.....	18
4.3. Calibration flight.....	20
4.4. Outline of analysis method.....	26
4.5. Conversion procedure of dose rate at 1 m above the ground.....	27
4.5.1. Background (self-contamination and cosmic-ray)	27
4.5.2. Height correction.....	29
4.5.3. Conversion factor from count rate to dose rate	30
4.5.4. Conversion flow to a dose rate	36
4.6. Conversion procedure of radiocesium deposition	36
4.6.1. The discrimination of count rate by nature nuclide	36
4.6.2. Conversion factor from dose rate to radiocesium deposition	38
4.7. Decay correction	39
4.8. Detected 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.....	42
4.11. Comparison with ground measurement data	43
4.12. Map of dose rate of natural nuclide	46
5. Monitoring results	50
5.1. 10 th monitoring at area of 80 km range from the F1NPS	50
5.2. 6 th monitoring at East Japan	55
6. Discussion.....	66
6.1. Comparison with the past monitoring results.....	66
6.2. Difference in tendency to change of the dose rate by the land use.....	75
6.3. Dependence of the measurement time	78
7. Evaluation of attenuation effect of the snow	80

7.1. Introduction.....	80
7.2. Concept of airborne photogrammetry	80
7.3. Data acquisition	81
7.3.1. Area.....	81
7.3.2. Airborne radiation monitoring	81
7.3.3. Airborne laser survey.....	81
7.3.4. Data acquisition at ground	82
7.4. Results	85
7.5. Relations of radiation attenuation and the snow depth.....	88
7.6. Examination for precision improvement of photographic data	93
8. Influence investigation of radon progenies.....	96
8.1. Radon progenies	96
8.2. The detection of the radon progenies in the reference place	97
8.3. Subtraction technique using the detector for radon progenies.....	100
9. Background airborne radiation monitoring at the Kyushu Electric Power Company Sendai Nuclear Power Station	108
9.1. Introduction.....	108
9.2. Monitoring method.....	110
9.2.1. Setting of flight plan	110
9.2.2. Analysis method	112
9.2.3. Analysis parameter	112
9.2.4. Comparison with ground measurement data	115
9.3. Results of monitoring.....	117
9.4. Examination of the conversion method to natural radionuclide	120
9.5. Knowledge to contribute to emergency monitoring.....	126
10. Future work.....	127
11. Summary	128
Acknowledgement.....	128
References	128

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	21
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	28
Table 4-3 使用したパラメータのまとめ	30
Table 4-4 2015 年度取得した AF データ一覧	30
Table 4-5 2015 年度取得した CD データ一覧	35
Table 4-6 BG-index 一覧	38
Table 4-7 RSI システムの検出下限値	41
Table 4-8 使用した減弱係数 (m^{-1}) のまとめ	48
Table 6-1 森林部及び市街地部における線量率の比較	77
Table 7-1 データ取得条件	82
Table 8-1 ラドン子孫核種の放出する γ 線	97
Table 8-2 フライト一覧	103
Table 9-1 原子力災害対策指針における OIL	109
Table 9-2 使用したパラメータのまとめ	114
Table 9-3 天然の放射性核種濃度に換算するためのパラメータ一覧	121

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. 3-7	RSI システムの半値幅及び Gain の変動 (RSI 3)	14
Fig. 4-1	対地高度と線量率の関係	16
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	16
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毎の計数の割合	17
Fig. 4-4	上空からの測定イメージ	17
Fig. 4-5	フライトイメージ	18
Fig. 4-6	予定したフライトの測線	19
Fig. 4-7	テストラインフライトのイメージ	22
Fig. 4-8	テストラインの場所	22
Fig. 4-9	テストポイントフライトのイメージ	23
Fig. 4-10	テストポイントの場所	24
Fig. 4-11	宇宙線フライトのイメージ	25
Fig. 4-12	Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージ	25
Fig. 4-13	BG 天然核種フライトの測線 (左)、オーバーラップフライト場所 (右)	25
Fig. 4-14	解析のフロー	26
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	28
Fig. 4-16	海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例	28
Fig. 4-17	対地高度と計数率の関係例	29
Fig. 4-18	地上測定データ	32
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	34
Fig. 4-20	放射性セシウムの計数率の算出イメージ	37
Fig. 4-21	BG-index の算出例	37
Fig. 4-22	重量緩衝深度と線量率・放射能換算係数の関係	39
Fig. 4-23	IDW に入力するパラメータとマップの関係	43
Fig. 4-24	地上の測線上における線量率測定結果との比較	45
Fig. 4-25	地上のランダムな位置における線量率測定結果との比較	45
Fig. 4-26	地上における in-situ Ge 測定結果との比較	45
Fig. 4-27	関数適合法を用いた ^{134}Cs と ^{40}K の弁別	48
Fig. 4-28	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	48

Fig. 4-29 福島第一原子力発電所周辺の天然の線量率マップの作成例	49
Fig. 4-30 航空機モニタリングによる天然核種由来の線量率と In-situ Ge 半導体検出器で得られた天然核種由来の放射線量率の比較	49
Fig. 5-1 第 10 次モニタリングにおける線量率マップ	51
Fig. 5-2 第 10 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	52
Fig. 5-3 第 10 次モニタリングにおける ¹³⁷ Cs 沈着量マップ	53
Fig. 5-4 第 10 次モニタリングにおける ¹³⁴ Cs 沈着量マップ	54
Fig. 5-5 東日本第 6 次モニタリングにおける線量率マップ	56
Fig. 5-6 東日本第 6 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	57
Fig. 5-7 東日本第 6 次モニタリングにおける ¹³⁷ Cs 沈着量マップ	58
Fig. 5-8 東日本第 6 次モニタリングにおける ¹³⁴ Cs 沈着量マップ	59
Fig. 5-9 東日本第 6 次モニタリングと第 10 次モニタリングにおける線量率マップ	60
Fig. 5-10 東日本第 6 次モニタリングと第 10 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ	61
Fig. 5-11 東日本第 6 次モニタリングと第 10 次モニタリングにおける ¹³⁷ Cs 沈着量マップ	62
Fig. 5-12 東日本第 6 次モニタリングと第 10 次モニタリングにおける ¹³⁴ Cs 沈着量マップ	63
Fig. 5-13 東日本第 6 次モニタリングと第 10 次モニタリングにおける天然核種由来の線量率マップ	64
Fig. 5-14 測定年度における天然放射性核種による線量率マップの比較.....	65
Fig. 6-1 旧避難指示区域における過去の線量率マップの比較.....	68
Fig. 6-2 発電所から 80 km 圏内における第 4 次モニタリング及び第 10 次モニタリングの線量率測定結果の比較.....	71
Fig. 6-3 旧避難指示区域における第 4 次モニタリング及び第 10 次モニタリングの線量率測定結果の比較	72
Fig. 6-4 旧避難指示区域における第 4 次モニタリング及び第 10 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	72
Fig. 6-5 航空機モニタリングによる旧避難指示区域内の線量率の変化傾向	73
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.....	73
Fig. 6-7 事故からの経過日数と重量緩衝深度の関係	74
Fig. 6-8 発電所から 80 km 圏内における土地利用図.....	76
Fig. 6-9 森林部及び市街地における減衰率の比較.....	77
Fig. 6-10 測定時間の違いとコンターマップ.....	79
Fig. 7-1 写真測量の原理イメージ.....	81
Fig. 7-2 放射線測定及び地形測量の測線と地上測定地点	83
Fig. 7-3 測量器材の写真	84
Fig. 7-4 スノーサンプラ	84
Fig. 7-5 積雪前後における空間線量率の減衰	86
Fig. 7-6 平均積雪面密度と地上測定データによる線量率測定結果の積雪前後の比.....	87

Fig. 7-7	平均積雪面密度と航空機モニタリングデータによる線量率測定結果の積雪前後の比	87
Fig. 7-8	オルソ 3D マップ例	89
Fig. 7-9	写真測量及び LP-DEM による積雪マップ	90
Fig. 7-10	地上測定及び航空測量における積雪深の測定結果の比較	91
Fig. 7-11	LP-DEM による積雪深と航空機モニタリングにおける線量率比の関係	91
Fig. 7-12	LP-DEM による積雪深と航空機モニタリングにおける線量率比の関係	92
Fig. 7-13	GCP 補正前後の Ortho-DSM の比較	94
Fig. 7-14	GCP 補正後の Ortho-DSM から求めた積雪深と放射線の減衰量の関係	94
Fig. 7-15	構造物の高さ別のエリアにおける Ortho-DSM による積雪深と減衰率の関係	95
Fig. 7-16	構造物の高さ別のエリアにおける LP-DEM による積雪深と減衰率の関係	95
Fig. 8-1	ウラン系列及びトリウム系列	96
Fig. 8-2	ラドンの鉛直分布	98
Fig. 8-3	ラドン子孫核種の日変化	99
Fig. 8-4	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	102
Fig. 8-5	測線マップ	102
Fig. 8-6	フライト方法	103
Fig. 8-7	フライトと高度の関係	104
Fig. 8-8	取得したスペクトル例 (測線上の 30 分データの平均値)	105
Fig. 8-9	海上で取得したデータ (海拔高度 300 m) における NaI RSI システムと LaBr RSI システムの全計数率の関係	106
Fig. 8-10	海上で取得した NaI RSI システムのデータ (海拔高度 300 m) における全計数率と 2.8 MeV 以上の計数率の関係	106
Fig. 8-11	陸上で取得した NaI RSI システムと LaBr RSI システムの全計数率の関係	106
Fig. 8-12	Rn 減算前後の計数率	107
Fig. 9-1	地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果	110
Fig. 9-2	予定したフライトの測線	111
Fig. 9-3	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	112
Fig. 9-4	テストライン及びテストポイントの場所	113
Fig. 9-5	対地高度と計数率の関係例	113
Fig. 9-6	地上測定データ	114
Fig. 9-7	地上における測定点	115
Fig. 9-8	地上における線量率測定結果との比較 (散布図)	116
Fig. 9-9	地上における線量率測定結果との比較 (相対偏差)	116
Fig. 9-10	川内原子力発電所周辺の線量率マップ	118
Fig. 9-11	川内原子力発電所周辺の線量率マップと地質から求めた線量率マップの比較	119
Fig. 9-12	天然の放射性核種によるピーク解析例	121
Fig. 9-13	天然の放射性核種別の高度と計数率の関係	121
Fig. 9-14	川内原子力発電所周辺の K-40 濃度マップ	122

Fig. 9-15 川内原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ	123
Fig. 9-16 川内原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ	124
Fig. 9-17 川内原子力発電所周辺の放射性核種濃度測定結果と地球化学図比較	125

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、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¹⁾開発されてきた。現在、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(現原子力機構)を中心に開発が進められた。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、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、(公財)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(以下、文科省)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、日本原子力研究開発機構(以下、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⁾。

ここでは、2015年度に行われた、福島県及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、積雪による放射線の遮蔽効果及びラドンの影響についてフライトデータを取得し考察を行った。さらに、バックグラウンド放射線の把握を目的とし、九州電力川内原子力発電所において行ったバックグラウンドモニタリングの結果について示す。

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 と文科省 (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 ($0.2 \mu\text{Sv/h}$ 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、1 年前に続き、「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 ($0.2 \mu\text{Sv/h}$ 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⁾ に詳しい。

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⁾ に詳しい。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。

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、バックグラウンド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。

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→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 μSv/h以上)	JAEA (NUSTEC, OYO)	JAEA (NUSTEC, OYO)	2012/4/2~5/7	2012/9/28
第5次モニタリング	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
東日本第3次モニタリング	線量率の比較的高い場所 (0.2 μSv/h以上)	NUSTEC	JAEA	2012/10/31~12/28	2013/3/1
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	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 μSv/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 μSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2014/9/21~11/7	2015/2/13
第10次モニタリング	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 μSv/h以上)	JAEA (OYO)	JAEA (OYO)	2015/10/2~11/4	2016/2/2
H27_BGモニタリング	川内原子力発電所から80km圏内	JAEA	JAEA	2016/2/1~2/7	-

* 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				2012				2013				2014				2015			
	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12
80 km 圏内	第1次 (4/6-4/29)   				第5次 (6/22-6/28)  				第7次 第8次 第9次 第10次    											
	第3次 (5/31-7/2) (10/25-11/5) 				第4次 (10/31-11/16) 				第6次 (8/27-9/28) (11/2-11/19) (9/1-9/20) 											
福島原子力発電所事故 				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 80-120km圏内 (5/18-5/26) 				西日本+北海道全域 京都・滋賀～沖繩 (1/30-5/31) 				東日本第2次 (10/31-12/28) (9/3-11/4) 				東日本第5次 (9/21-11/7) 				東日本第6次 (10/2-11/4) 			
	東日本第1次 青森～福井・岐阜・愛知 (6/22-10/10) 				東日本第3次 (10/31-12/28) (9/3-11/4) 				東日本第4次 (9/21-11/7) 				東日本第5次 (9/21-11/7) 				東日本第6次 (10/2-11/4) 			

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績

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。以下、福島及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 及び RSI 2 と区別する。また、川内原子力発電所で使用したシステムについては RSI 3 と表記する。

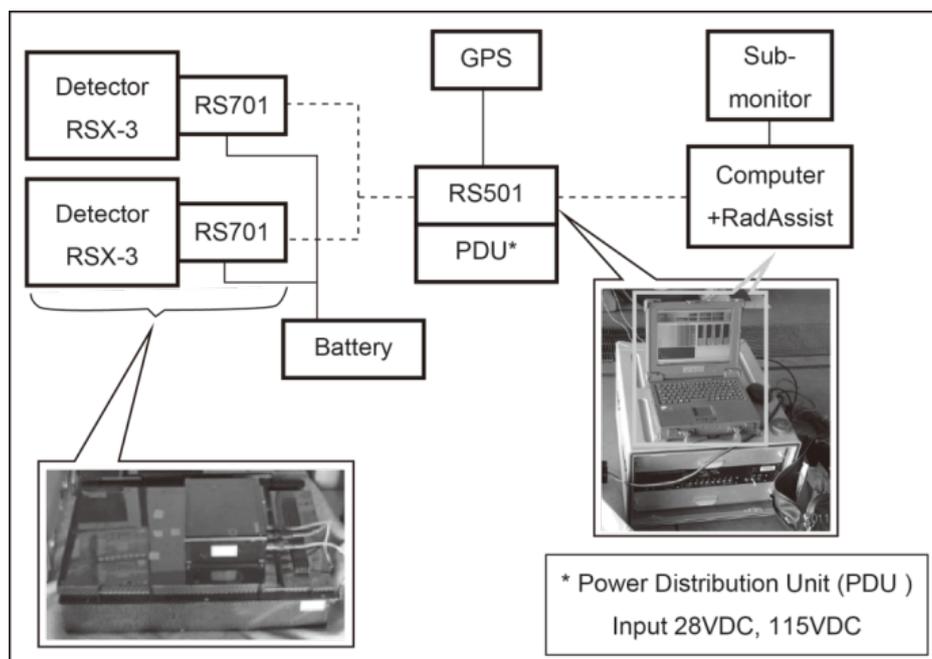


Fig. 3-1 RSI システムのブロック図

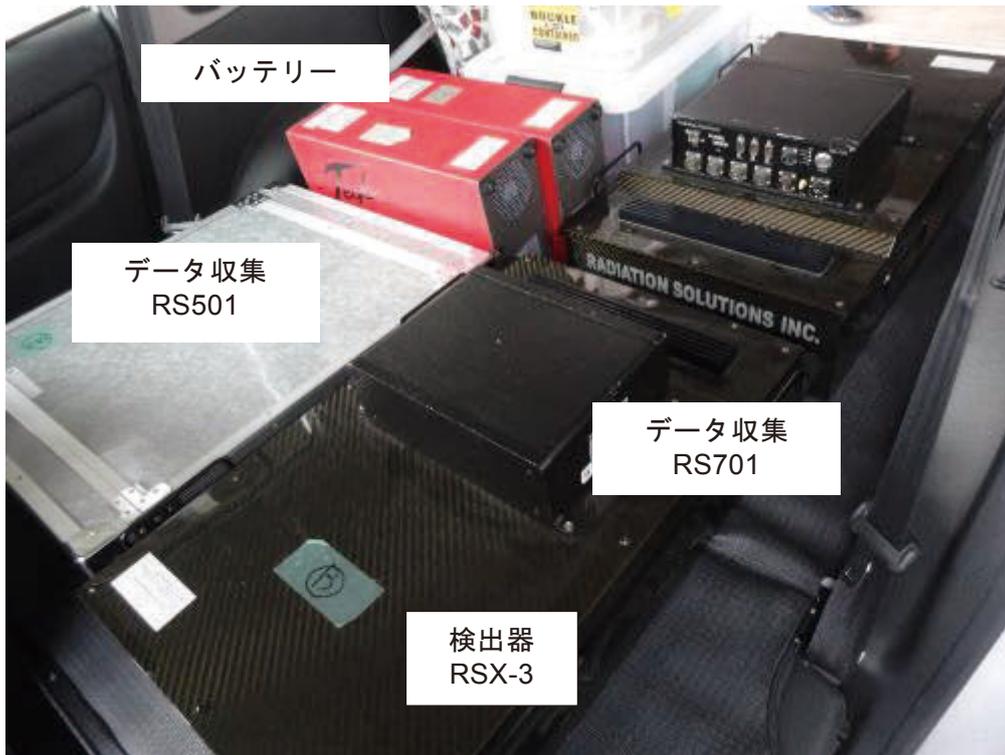


Fig. 3-2 RSI システムの写真

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 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	RSI-3	
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
	第8次航空機モニタリング	2013/11/2～11/19	Bell 412 (JA6767)	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	2015/10/2～10/14	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

() 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。なお、Table 3-2 に比較として 2015 年度に行った線源試験の結果を示している。線源の距離の違いは、現場におけるヘリコプター下の地面を考慮したものである。

今回使用した機体では、Bell 412 (JA6767) の計数率が 10 %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。2015 年度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、実測データに大きな影響を与えないものと判断した。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 90 cm 位置に線源を配置)

No	System	ヘリコプター		(2015) 計数率 at 50 cm	No1を1に 規格化	(2014) 計数率 at 90 cm	No1を1に 規格化
1	RSI-1	Bell430 (JA05TV)	NNK	146,000	1.00	122,000	1.00
2	RSI-2	Bell412 (JA6928)	AAC	150,000	1.03	108,000	0.89
3	RSI-2	Bell412 (JA6767)	NNK	167,000	1.14	117,000	0.96

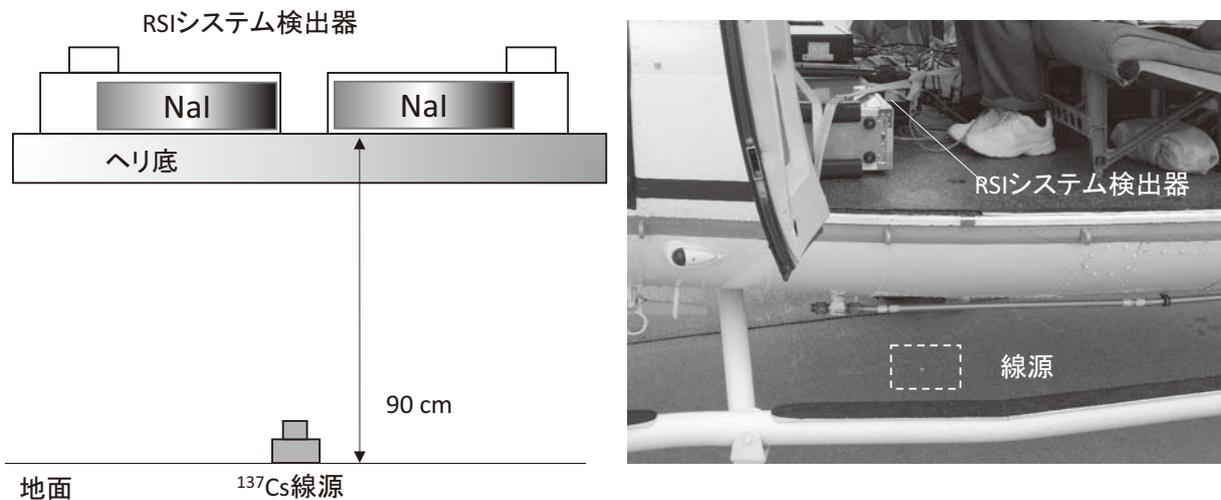


Fig. 3-4 線源試験イメージ

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、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 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、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。福島及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 及び Fig.3-6 に示す。また、川内原子力発電所で行ったバックグラウンドモニタリング時における保守・点検結果について、Fig. 3-7 に示す。図は、RSI システムに組み込まれている計 6 本の検出器毎に示している。ピークの半値幅については、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。

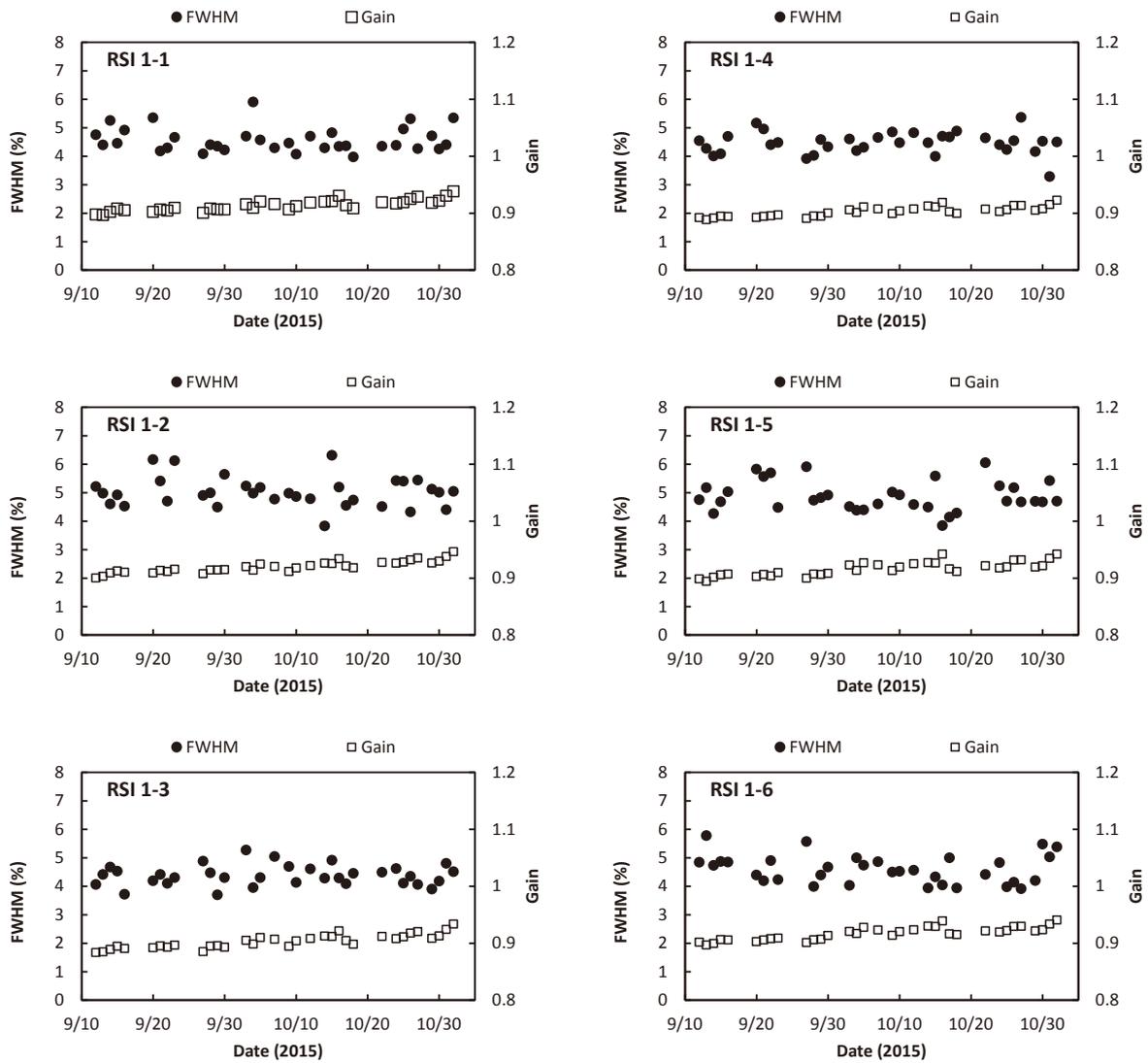


Fig. 3-5 RSI システムの半値幅及び Gain の変動 (RSI 1)

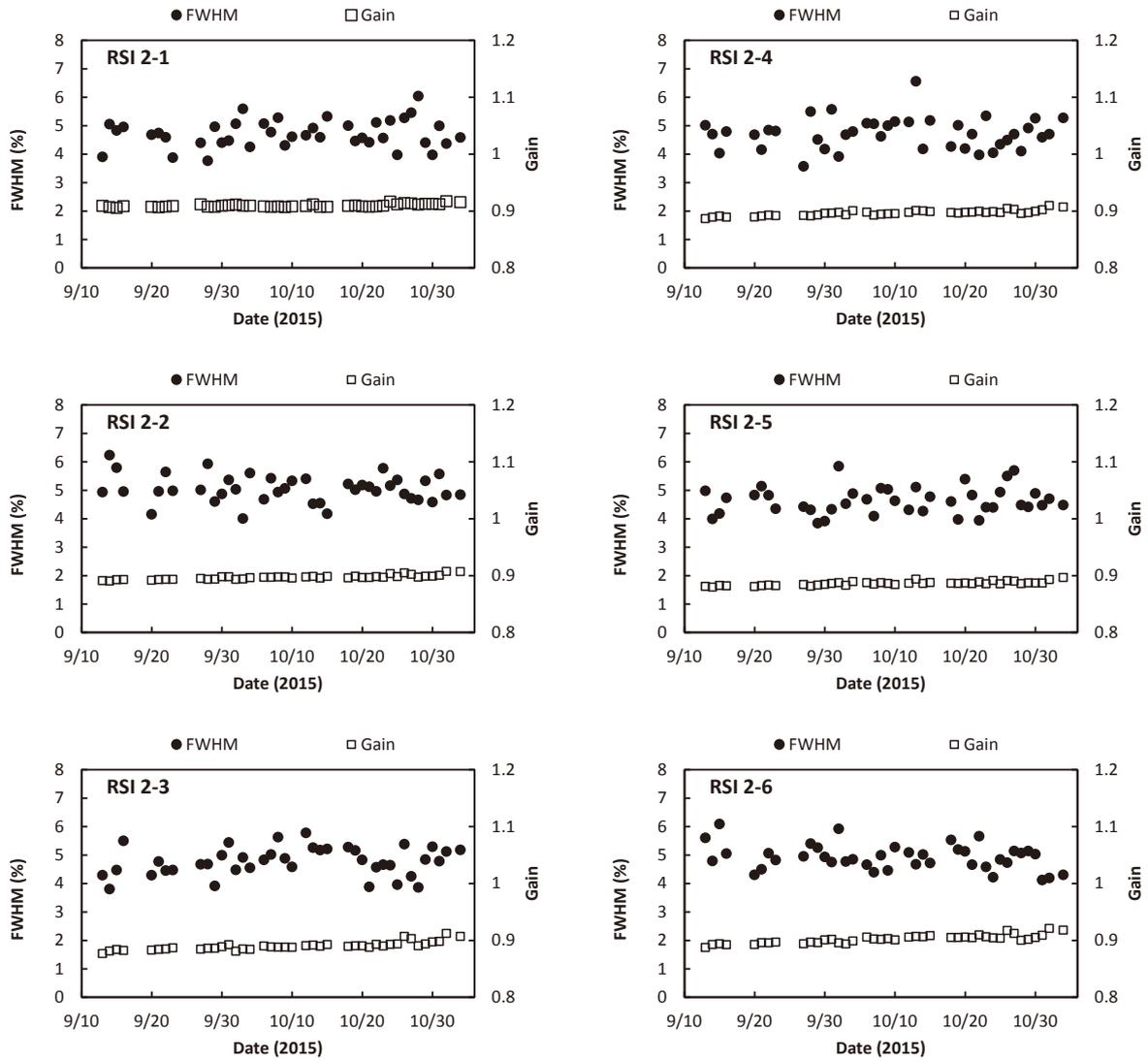


Fig. 3-6 RSI システムの半値幅及び Gain の変動 (RSI 2)

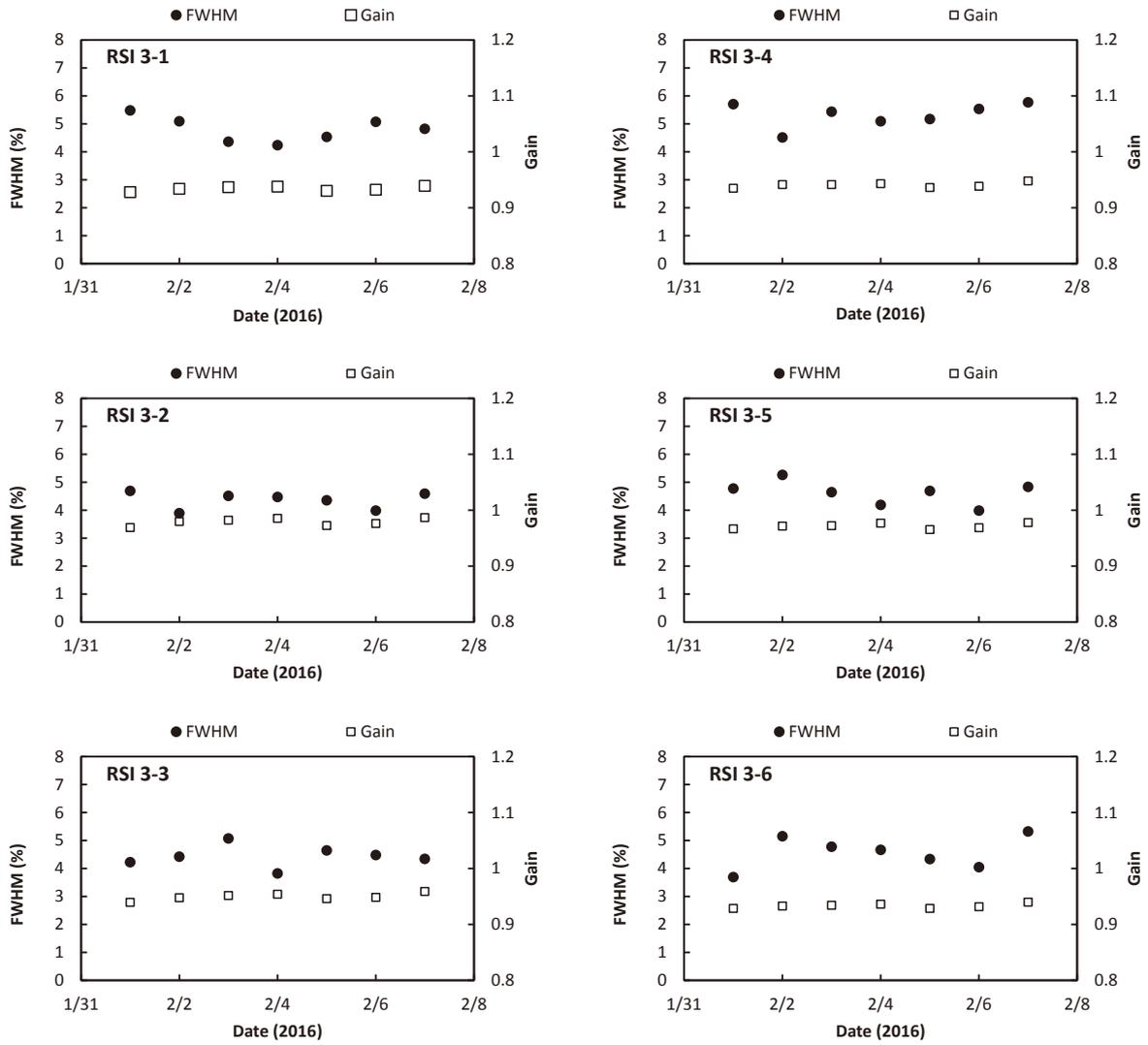


Fig. 3-7 RSI システムの半値幅及び Gain の変動 (RSI 3)

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¹¹⁾。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 及び 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 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 300m を半径とする円内の放射線の平均値と考えて良い。一方、比較として計算した検出器と線源の距離が 50 m の場合は 80 %を占める線源半径は 120 m、検出器と線源の距離が 100 m の場合は線源半径が 200 m、500 m の場合は線源半径が 400 m となる。この傾向は Fig. 4-1 で示した高度と上空での計数率の関係と矛盾せず、高度が低くなるにつれて高度と測定範囲の半径の関係が 1:1

から逸脱し、高度と比較して測定範囲が広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。

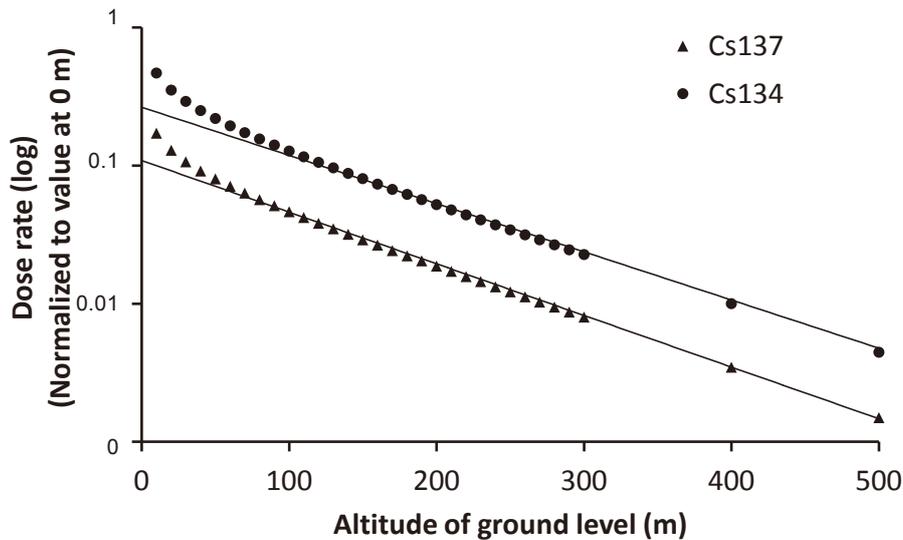


Fig. 4-1 対地高度と線量率の関係

(半径 2,000 m × 高さ 1 mm の円柱線源で計算、縦軸は対数目盛)

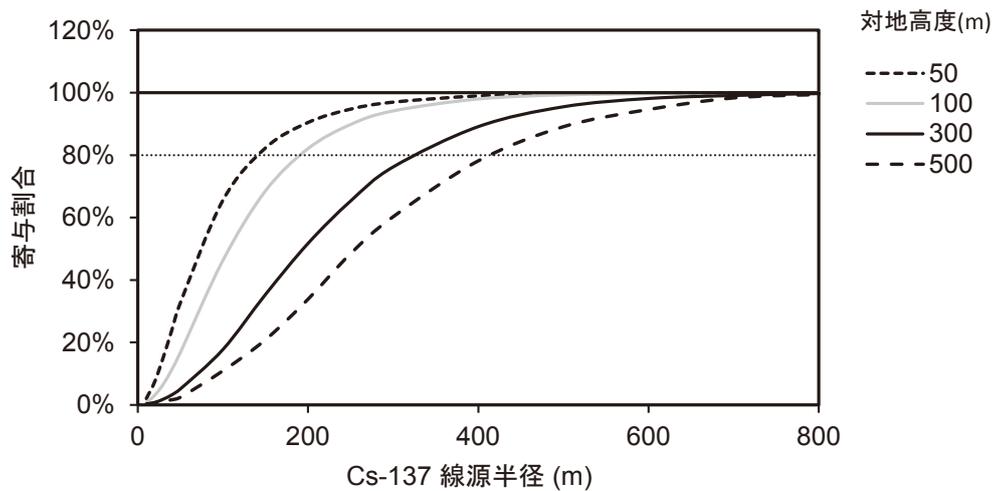


Fig. 4-2 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の積算計数に対する線源位置の関係

(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)

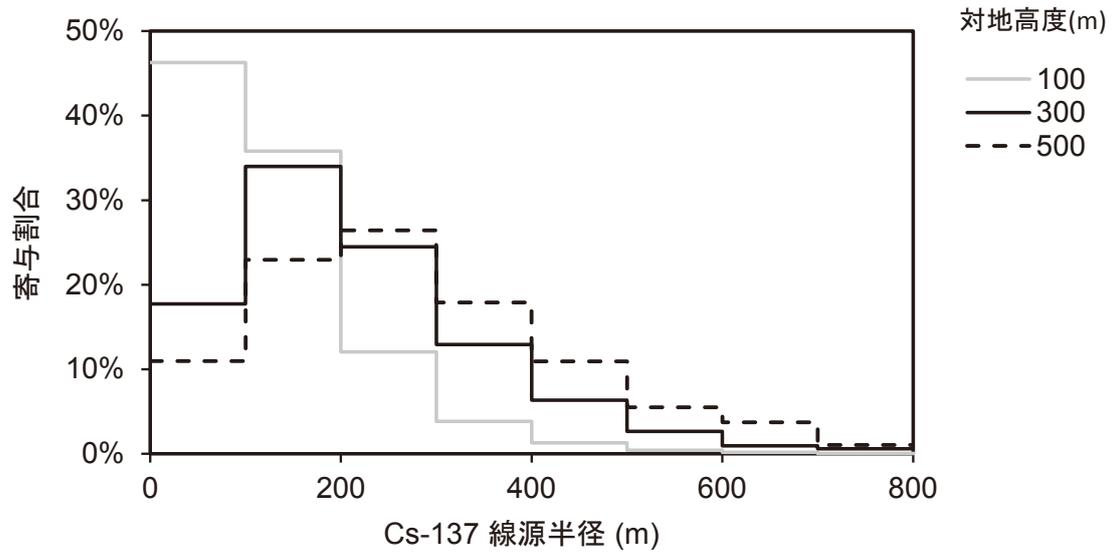


Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の線源位置毎の計数の割合
 (上空での検出器の計数率を 100 % に規格化し、100 m ごとのドーナツ状の部分由来の計数率の割合)

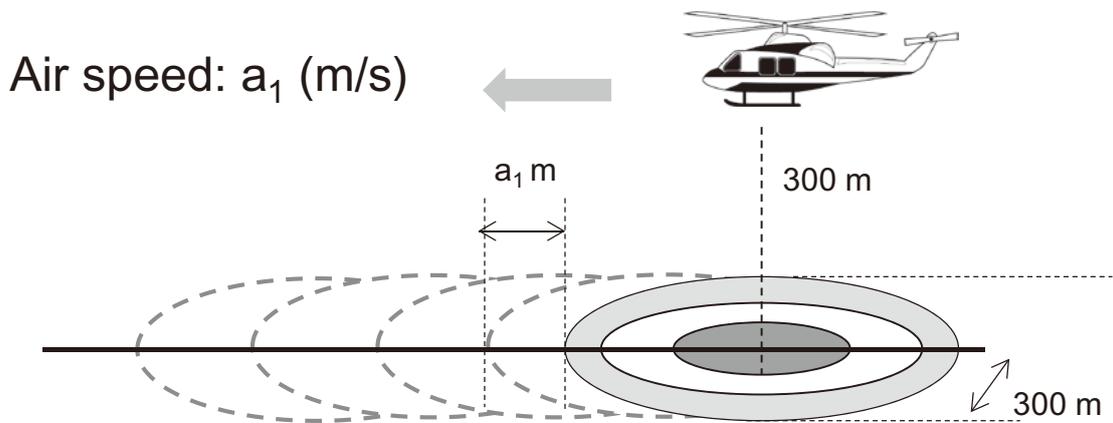


Fig. 4-4 上空からの測定イメージ

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。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
 - 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
 - 川内原子力発電所から 80 km 圏内：5.0 km
- フライトに要した期間
 - 第 10 次：平成 27 年 9 月 12 日～9 月 30 日（のべ 47 フライト）
 - * 測線のフライトは 9/29 まで（9/30 はパラメータフライト実施）
 - 東日本第 6 次：平成 27 年 10 月 2 日～11 月 4 日（のべ 94 フライト）
 - 川内原子力発電所から 80 km 圏内：5.0 km

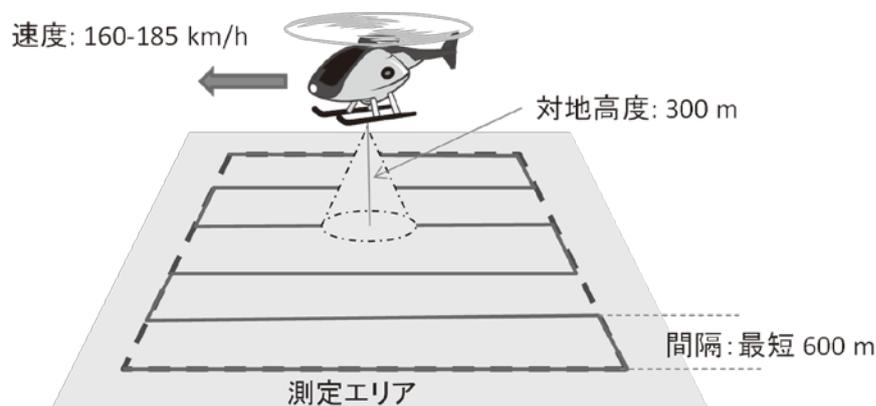


Fig. 4-5 フライトイメージ

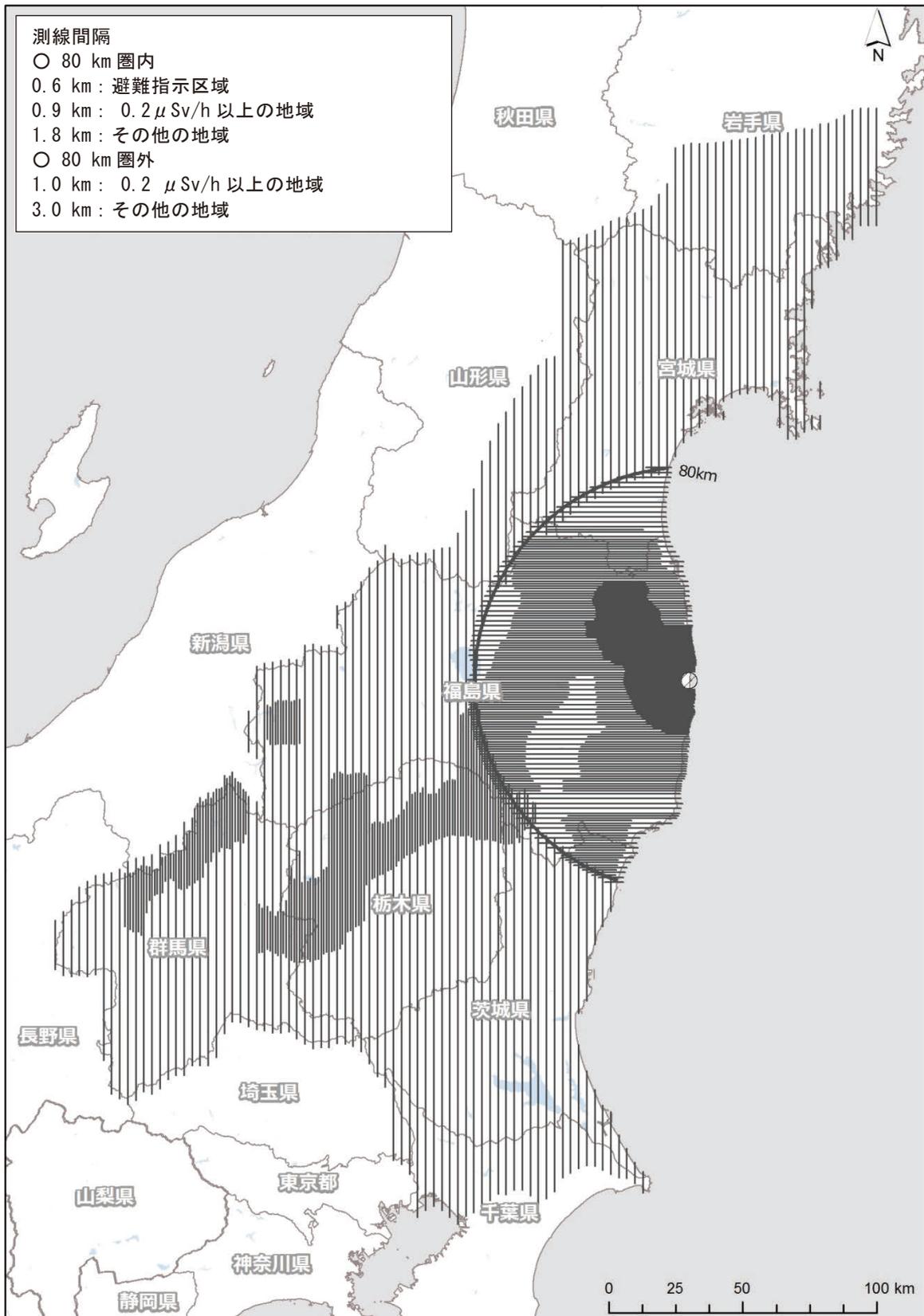


Fig. 4-6 予定したフライトの測線

(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、昨年度までのデータを基に数値を決定している。今年度は、決定したパラメータの妥当性を確認する目的で、キャリブレーションフライトを行った。キャリブレーションフライトの種類と目的について Table 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 m, 300 m, 450 m, 600 m, 750 m, 900 m 及び 1,500 m) フライトを実施する。得られたデータは高度毎に平均化し、高度と計数率のグラフを作成し、指数近似の傾きによって、高度を補正する。テストラインフライトのイメージを Fig. 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 ALOKA 社製 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 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、地上で測定した線量率と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。

宇宙線フライトとは、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 Rn 子孫核種の影響を考察するために、決められた場所の上空において対地高度 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及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 影響フライト及び 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、機体毎に 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 (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	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する	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	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	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

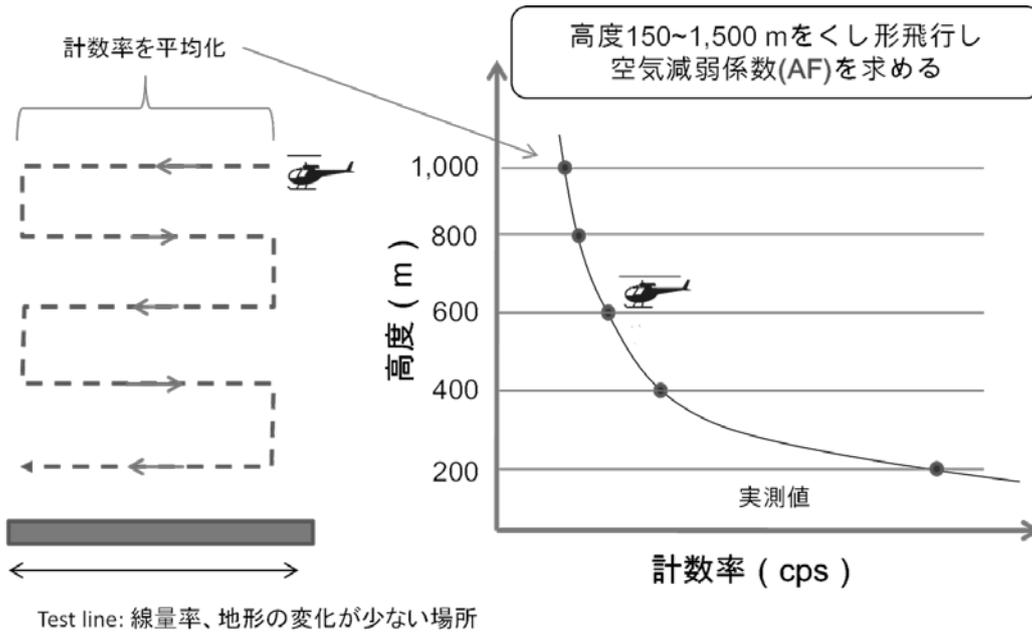
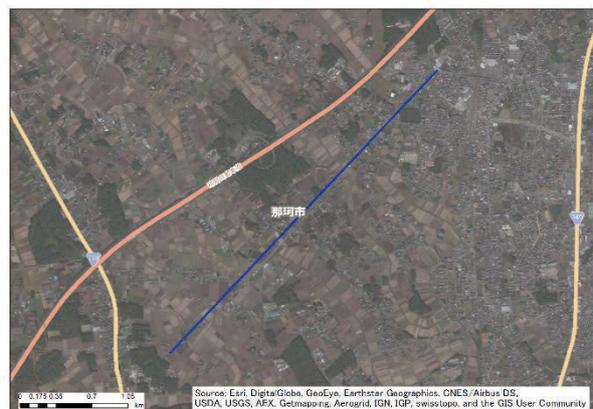


Fig. 4-7 テストラインフライトのイメージ



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)

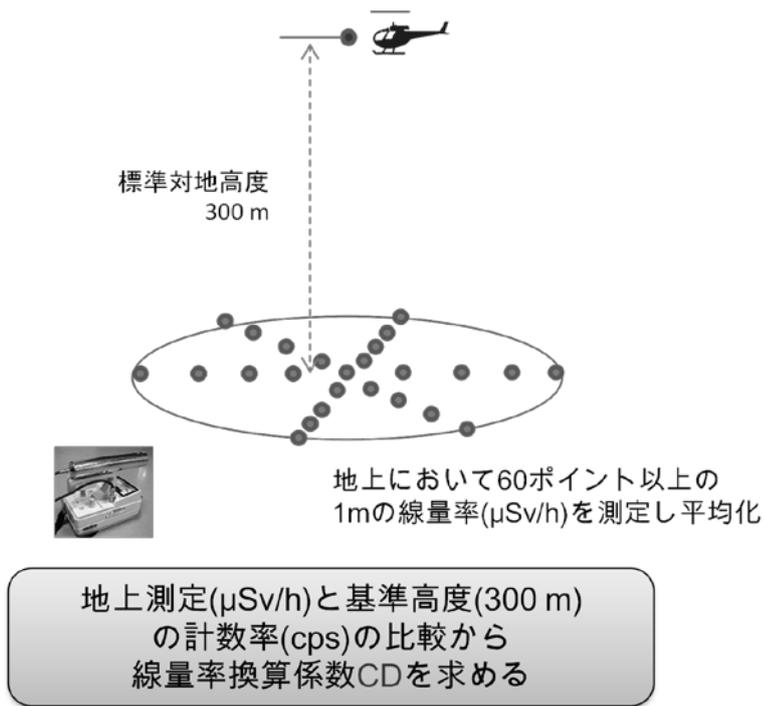
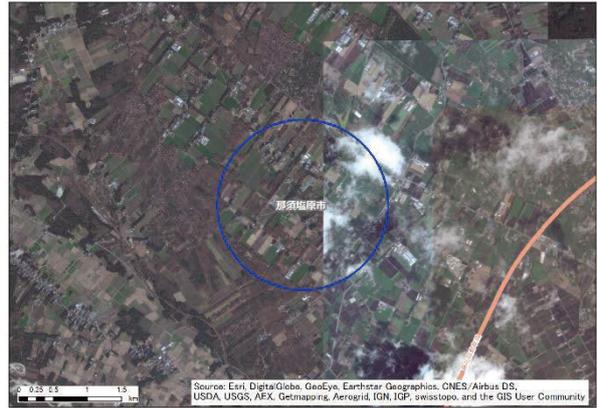


Fig. 4-9 テストポイントフライトのイメージ



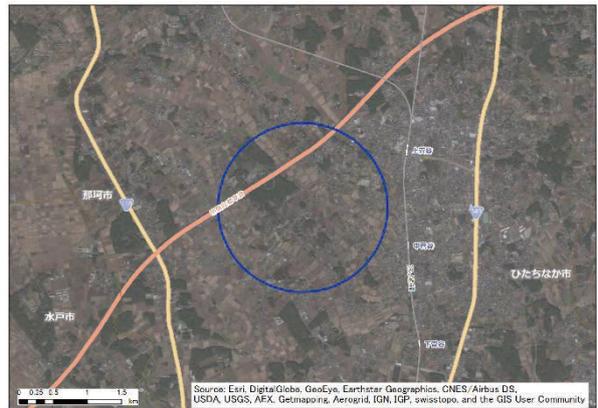
Test point 1 (岩手県奥州市)



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 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)

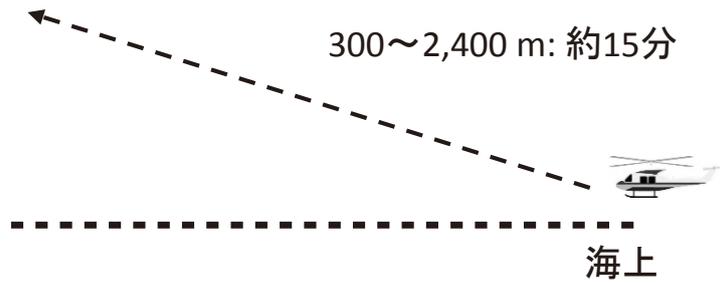


Fig. 4-11 宇宙線フライトのイメージ

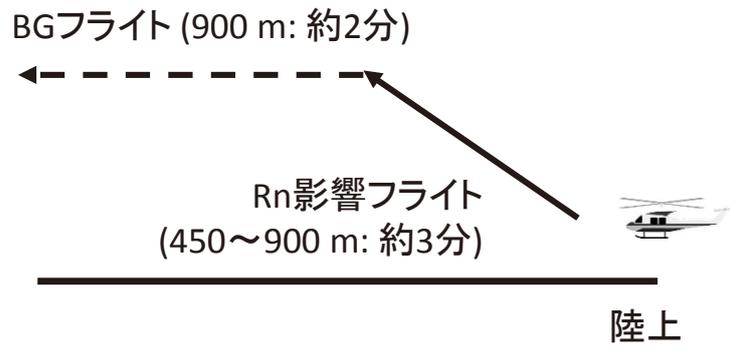


Fig. 4-12 Rn 影響フライト及び BG フライトのイメージ

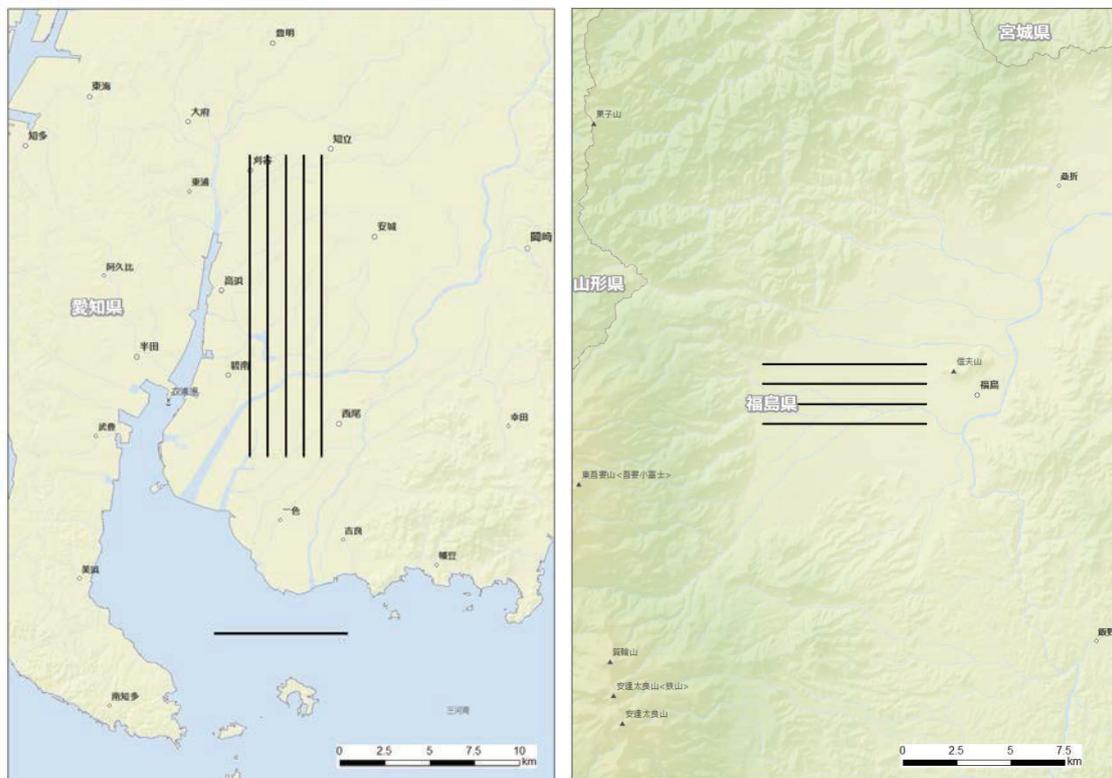


Fig. 4-13 BG 天然核種フライトの測線(左)、オーバーラップフライト場所(右)
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

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. 4-14 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。

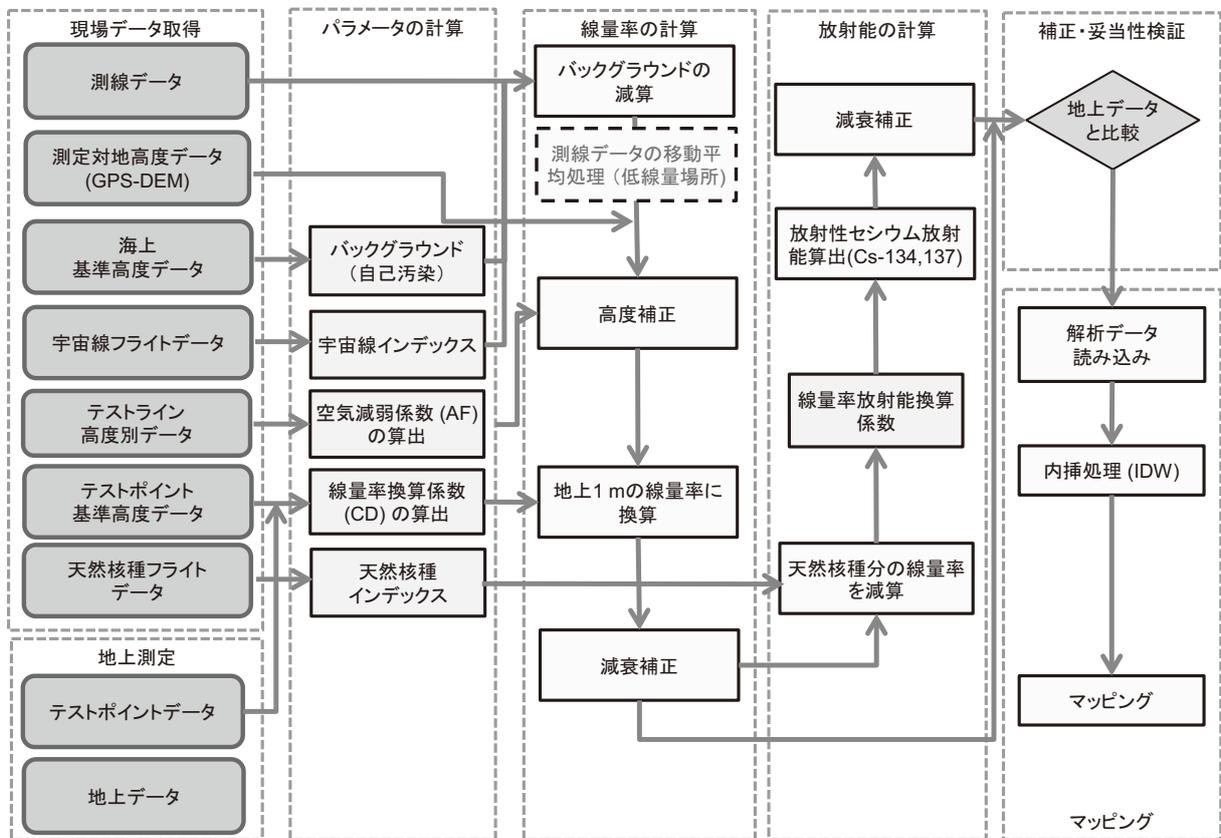


Fig. 4-14 解析のフロー

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 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毎に設定した。その後、実際に測定したスペクトルの 2,800 keV 以上の計数率から CR-index を用いて全エネルギーにおける宇宙線起因の計数率を算出し、全計数率から差し引いた。実測したデータを基に CR-index について Table 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。

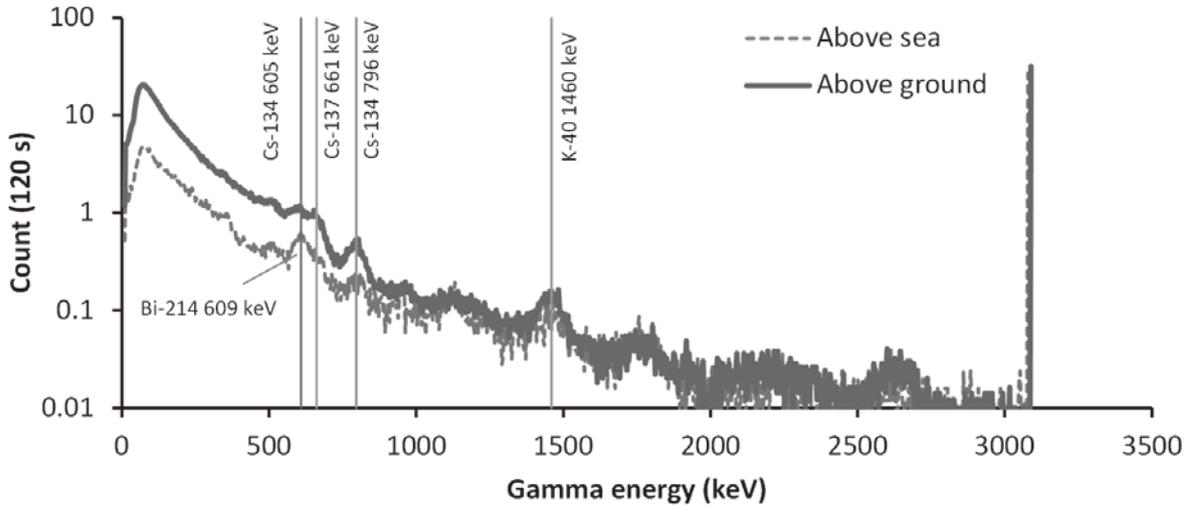


Fig. 4-15 RSI システムにおける地上で取得したγ線スペクトルと海上でのスペクトル例

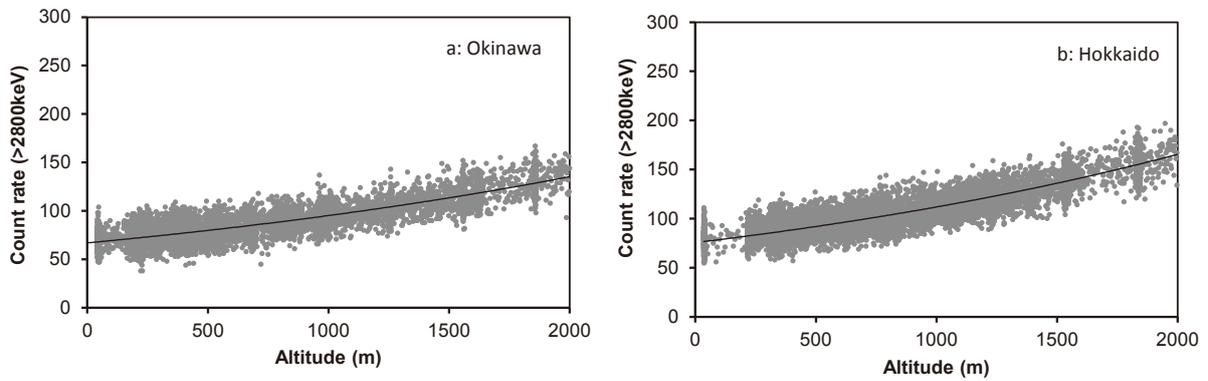


Fig. 4-16 海拔高度と2,800 keV 以上の計数率の関係の例

(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 (JA05TV)	NNK	481	3.69
RSIシステム2	Bell 412 (JA6928)	AAC	489	3.87
	Bell 412 (JA6767)	NNK	497	3.87

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)²³⁾ 及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、2015 年度においても、数値の妥当性及び 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。

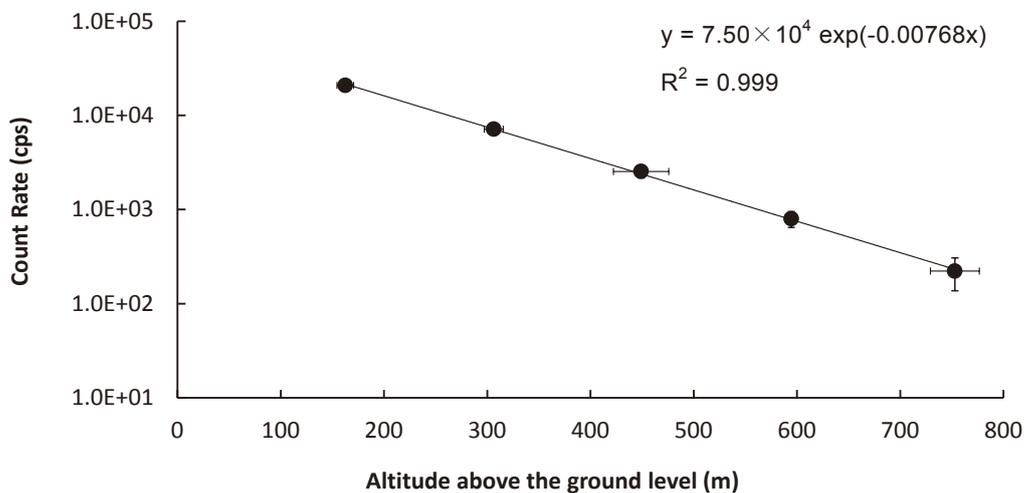


Fig. 4-17 対地高度と計数率の関係例
(Bell 430 JA6900, 2013/11/5 実施, Test line A)

*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 \pm 0.00047		21	-0.0072 \pm 0.00040		35
CD (cps/ μ Sv/h)	10900 \pm 2100		42	12800 \pm 2800		65

Table 4-4 2015 年度取得した AF データ一覧

Monitoring No	System (Device Serial)	Helicopter	Body No	Operarion company	location	Date	AF	
							μ (m^{-1})	R ²
F10th	5043	Bell412	JA6928	AAC	TestLineA	09/20/2015	-0.00693	0.99959
F10th	5043	Bell412	JA6928	AAC	TestLineA	09/30/2015	-0.00724	0.99975
E6th	5043	Bell412	JA6767	NNK	TestLine4	10/03/2015	-0.00681	0.99965
E6th	5043	Bell412	JA6767	NNK	TestLine3	10/13/2015	-0.00694	0.99971
E6th	5043	Bell412	JA6928	AAC	TestLine3	10/20/2015	-0.00616	0.99989
E6th	5043	Bell412	JA6928	AAC	TestLine2	10/28/2015	-0.00705	1.00000
E6th	5043	Bell412	JA6928	AAC	TestLine4	11/03/2015	-0.00659	0.99995
Average							-0.00682	
F10th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLineA	09/20/2015	-0.00697	0.99979
F10th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLineA	09/29/2015	-0.00717	0.99982
E6th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine1	10/03/2015	-0.00718	0.99999
E6th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine1	10/14/2015	-0.00720	0.99986
E6th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLineA	10/17/2015	-0.00738	0.99969
E6th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine2	10/24/2015	-0.00720	0.99990
E6th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLineA	10/30/2015	-0.00735	0.99999
E6th	5045	Bell430	JA05TV	NNK	TestLine4	11/01/2015	-0.00703	0.99666
Average							-0.00722	

* R²: 近似した指数関数曲線の決定係数

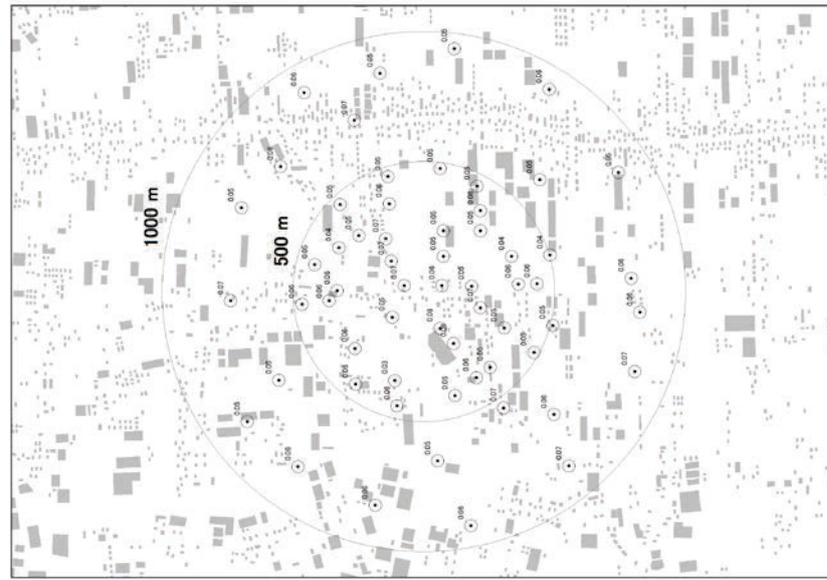
F10th: 第 10 次モニタリング、E6th: 東日本第 6 次モニタリング

4.5.3. 線量率への換算

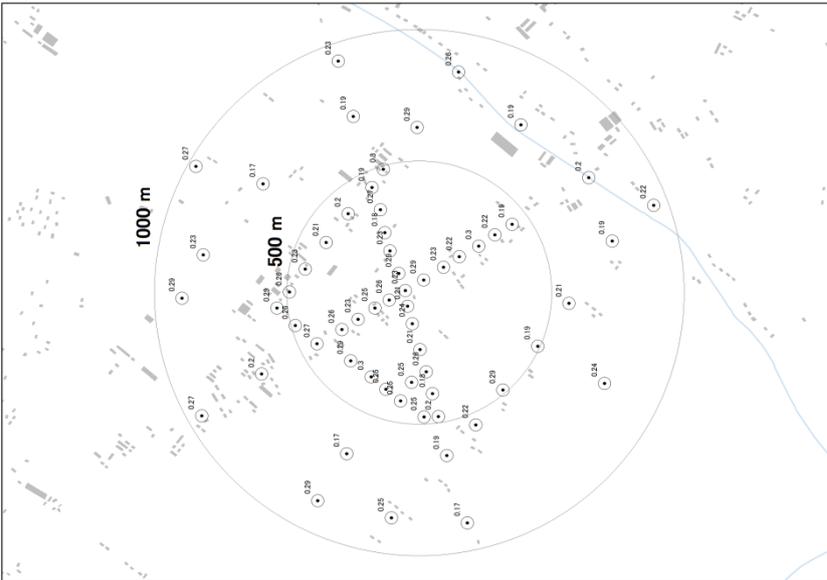
地表面から高さ 1 m における線量率に換算するために設定する線量率換算係数 (Conversion Dose-rate 以下、CD) は、テストポイントの地上における測定点の平均値とその上空 300 m をフライトした計数率の平均値の比を取って求めた。RSI システムは、機体の中に搭載するため、ヘリコプターの機底の遮蔽により、CD は変化すると考えられることから機体毎に数値の設定が必要である。実際の数値は、2014 年度決定した数値を使用した。使用した数値と標準偏差(σ)について Table 4-3 に示す。AF と同様に、2015 年度においても、数値の妥当性及び RSI システムの健全性を確認するために、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。

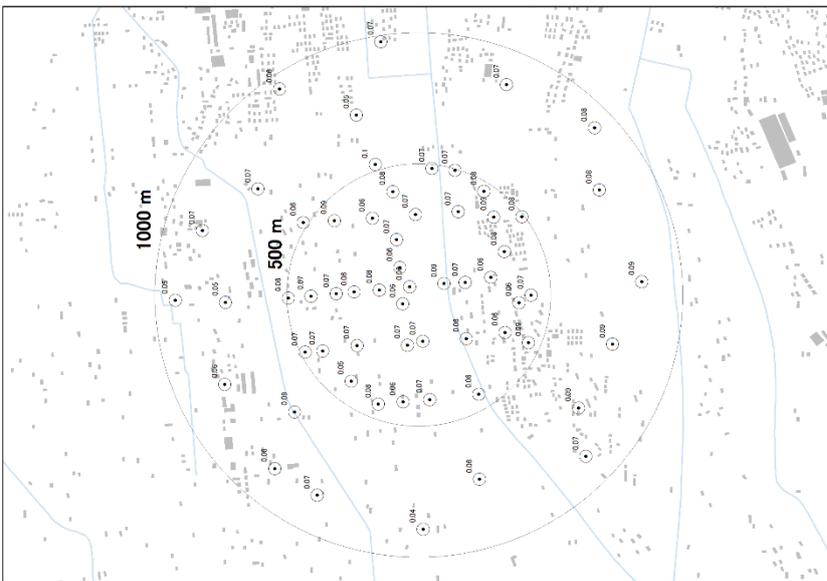
今回評価した CD の数値の平均値と採用した数値との差は、Table 4-3 で示した誤差範囲であり、採用した数値の妥当性を示していると考えられる。また、この数値の違いについてさらに妥当性を考察するため、Fig. 4-13 (右) に示した同じ測線において Bell 412 と Bell 430 によって対地高度 300 m でフライトを実施し、相対的な効率の比較を行った (オーバーラップフライト)。フライトで得た測定値は、実際にフライトした高度の補正を行い同じ場所の計数率を比較した。結果を Fig. 4-19 に示す。この計数率の比は、Table 4-3 に示した CD の比と一致することが望ましい。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 3



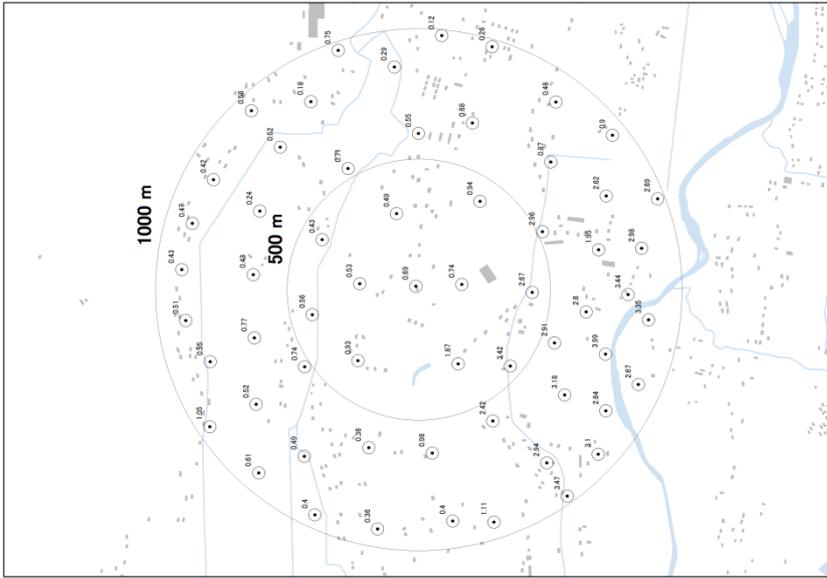
Test point 2



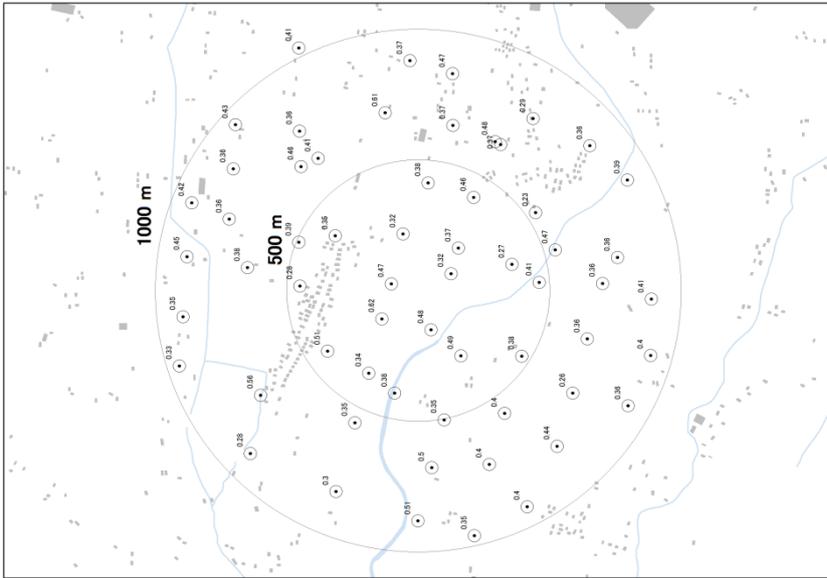
Test point 1

Fig. 4-18 地上測定データ (1/2)

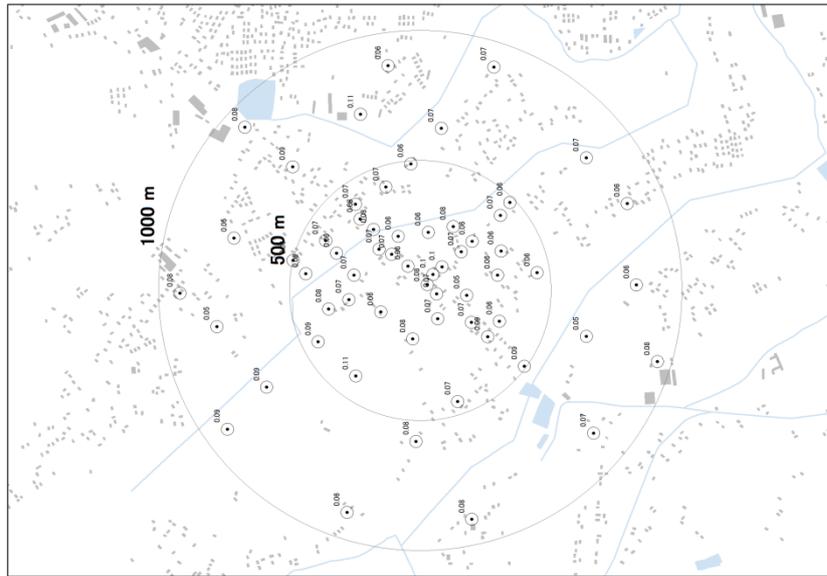
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



Test point E



Test point D



Test point 4

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)

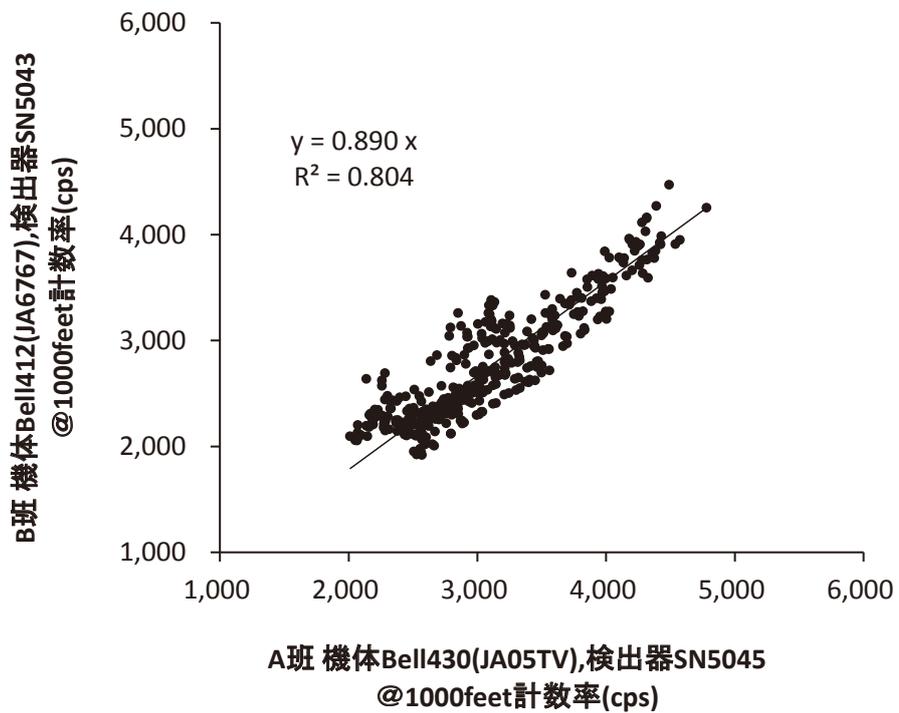
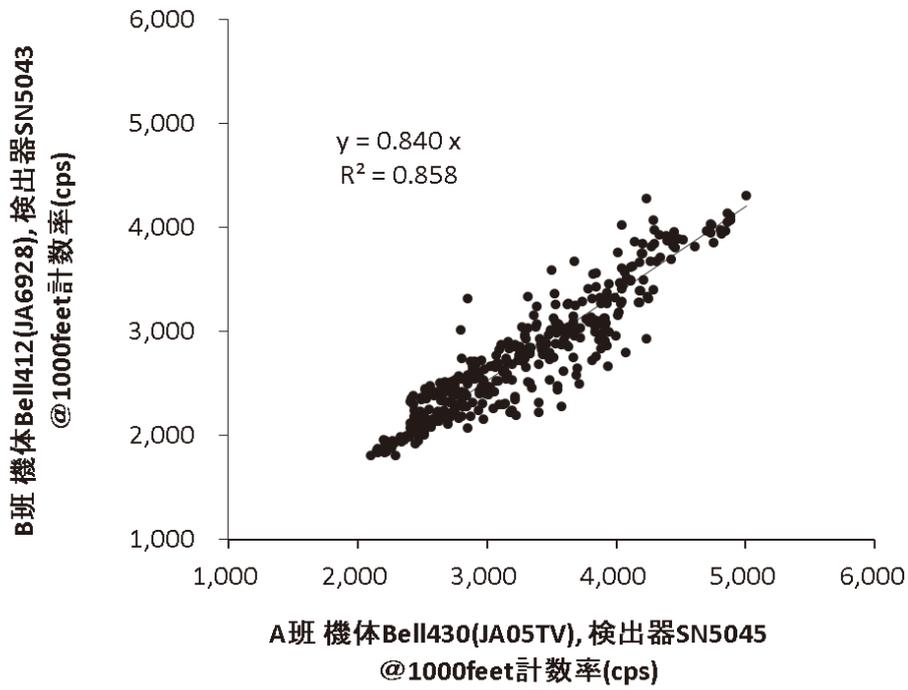


Fig. 4-19 ヘリコプターの機種とオーバーラップフライトにおける計数率の関係

Table 4-5 2015 年度取得した 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 (%)	
F-10th	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint D	2015/9/20	0.40	0.201	50	6585	939	14	931	66	7.1	12,500
F-10th	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint E	2015/9/20	1.10	1.772	160	19377	1642	8.5	973	45	4.6	15,900
F-10th	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint D	2015/9/30	0.40	0.188	47	5849	626	11	949	19	2.0	11,300
F-10th	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint E	2015/9/30	0.78	0.796	101	14370	3180	22	1,044	74	7.1	19,000
E6th	5043	JA6767	Bell412	NNK	TestPoint 4	2015/10/3	0.07	0.026	36	1582	138	8.7	944	23	2.5	11,500
E6th	5043	JA6767	Bell412	NNK	TestPoint 3	2015/10/13	0.06	0.020	36	2103	276	13	667	41	6.1	10,700
E6th	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint 3	2015/10/20	0.06	0.016	29	1385	124	9.0	1,012	52	5.1	11,100
E6th	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint 2	2015/10/28	0.24	0.077	32	2805	370	13	999	54	5.4	7,800
E6th	5043	JA6928	Bell412	AAC	TestPoint 4	2015/11/3	0.07	0.023	33	1222	105	8.6	982	29	3.0	8,200
Average																
F-10th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint D	2015/9/20	0.40	0.189	47	5200	742	14	1,089	26	2.3	13,900
F-10th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint E	2015/9/20	0.60	0.386	64	11656	2995	26	1,022	33	3.2	18,900
F-10th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint D	2015/9/29	0.41	0.173	42	6566	445	6.8	1,006	34	3.3	13,800
F-10th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint E	2015/9/29	1.17	1.938	186	19151	3291	17	1,014	9	0.9	16,000
E6th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint 1	2015/10/3	0.07	0.020	29	1684	115	6.8	989	33	3.3	13,100
E6th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint 1	2015/10/14	0.07	0.017	25	1611	155	10	905	57	6.3	12,400
E6th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint D	2015/10/17	0.45	0.174	39	7142	1070	15	966	35	3.6	13,400
E6th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint 2	2015/10/24	0.24	0.071	29	3480	429	12	967	31	3.2	9,500
E6th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint D	2015/10/30	0.45	0.200	44	6600	965	15	993	8	0.8	12,500
E6th	5045	JA05TV	Bell430	NNK	TestPoint 4	2015/11/1	0.07	0.026	35	1509	98	6	961	33	3.5	9,500
Average																
13,300																

* 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
 F10th: 第 10 次モニタリング、E6th: 東日本第 6 次モニタリング

4.5.4. 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 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 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 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線量率 (D_{Cs}) を算出する。
- ⑤ 式(3)より、線量率に線量率-放射能換算係数 (CF, ($\mu\text{Sv/h}$)/(kBq/m^2)) を除して放射性セシウムの沈着量 R_d を求める。

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

ここで、

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

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

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

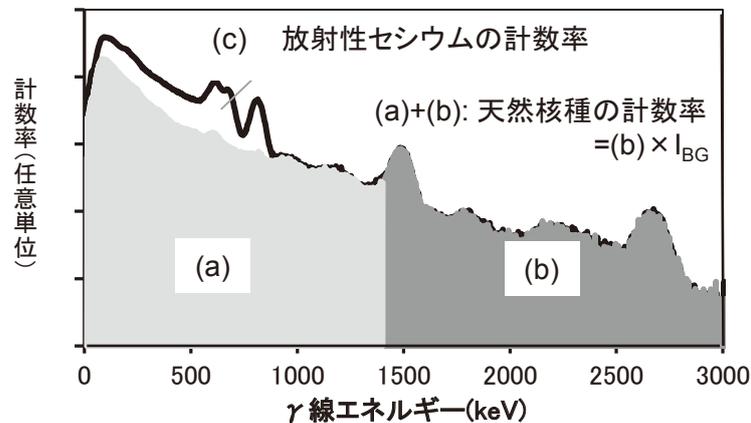


Fig. 4-20 放射性セシウムの計数率の算出イメージ

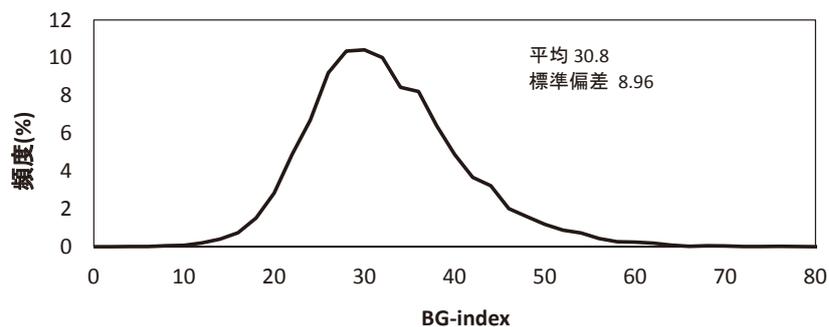


Fig. 4-21 BG-index の算出例

(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 (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^{24, 25)}に示される線量率-放射能換算係数 (Conversion factor, CF: ($\mu\text{Sv/h}$)/(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²⁴⁾。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^{26, 27)}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ので、さらなる検証が必要であろうと考える。Fig. 4-22に文献^{24, 25)}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^{24, 25)}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。

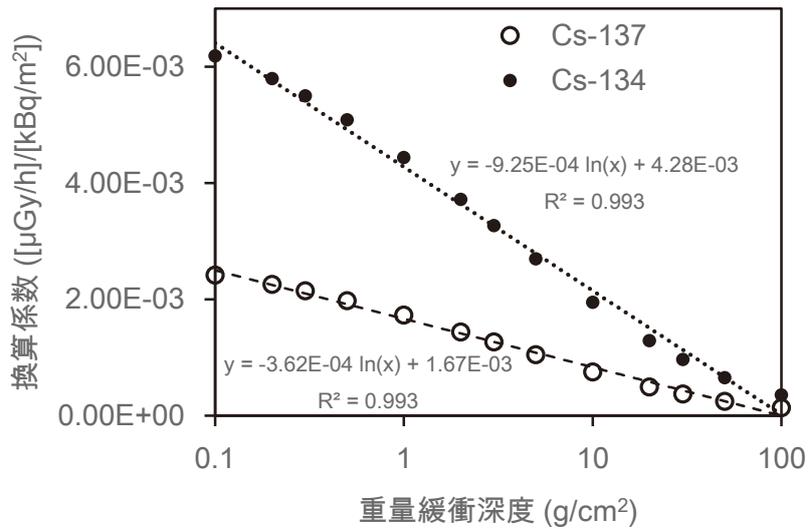


Fig. 4-22 重量緩衝深度と線量率-放射能換算係数の関係
(文献 24, 25 のデータを基に対数による近似曲線を表示)

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、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方法について記述する。線量率から放射能への換算は、緩衝深度β = 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、航空機サーベイデータから求まる全線量率から天然核種によるバックグラウンドの線量率を引いた線量率E_{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[6]で表される。

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

ここで、t: 基準日(2011/8/13)からの経過時間、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、以下のような手順を設定した。

- ① 換算した放射能を航空機モニタリングの取得日に合わせて減衰補正する。

- ② 減衰補正した値に CF を乗じて線量率に換算する。
- ③ 換算した線量率にバックグラウンド線量率を足し、全線量率とする。

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] 及び式 [8] に航空機モニタリングにおける全線量への換算方法及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、検出下限値及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) $C_{\text{BG}} \times I_{\text{BG}}$ (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: 線量率-放射能換算係数 ($(\mu\text{Gy/h})/(\text{Bq/m}^2)$)¹¹⁾
- 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、 $BG_{\text{self}}+BG_{\text{cos}}=900$ 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²⁸⁾ 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/μSv/h) から線量率を計算すると、0.011 μSv/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/μSv/h) 及びβ=1 の場合の線量率-放射能換算係数で線量率に換算する。実際のバックグラウンドの計数率の数値は、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/μSv/h) で線量率に換算し、¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs の比を 10 次モニタリングの減衰補正日である 2015 年 9 月 29 日における 0.252 と β=1 における線量率-放射能換算係数(¹³⁴Cs: $5.33 \times 10^{-3} (\mu\text{Sv/h})/(\text{kBq/m}^2)$, ¹³⁷Cs: $2.08 \times 10^{-3} (\mu\text{Sv/h})/(\text{kBq/m}^2)$) 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 (μSv/h)	Radioactivity of deposition radiocesium (kBq/m ²) *
RSI	0.011	22

* Total BG count: 3,000 cps

Evaluated value at 29, Sep. 2015

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 (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、その詳細については8章に述べる。

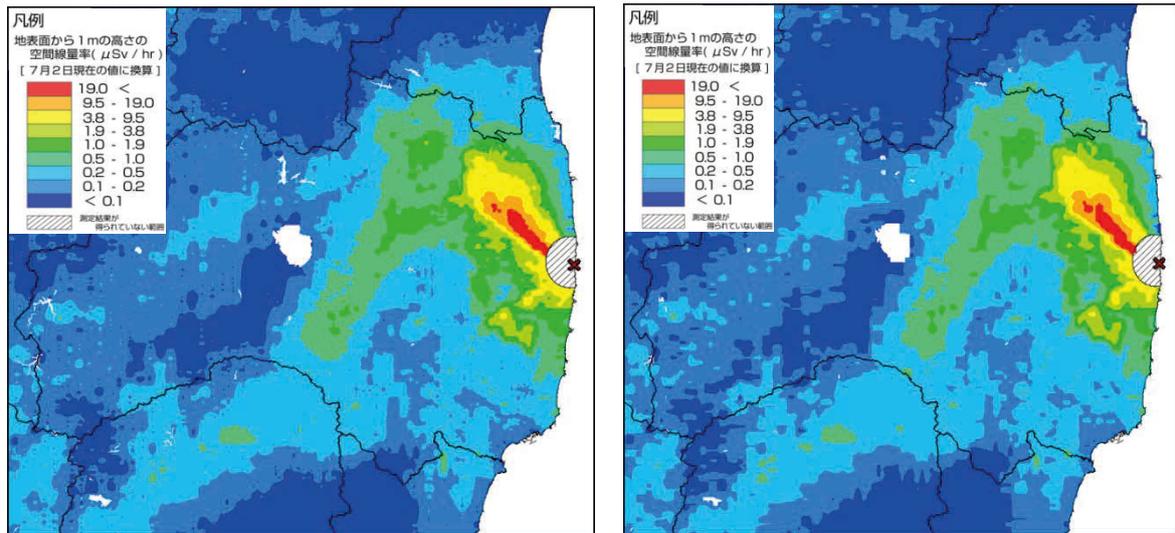
4.10. マッピング

線量率や放射性物質のマッピングについては、IAEA から標準的な方法が示されている²⁹⁾。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²⁹⁾。

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

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、影響が小さくなるのが前提になる。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. 4-23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300m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300m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250mメッシュに区切り、実測データから内挿しコンターマップを作成した。



a) 乗数 2.3 対象地点数 180

b) 乗数 2 対象地点数 12

*第3次航空機モニタリングの測定結果を使用

Fig. 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. 4-24 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）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³⁰⁾。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 2.6 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. 4-25 及び 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、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。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、地上における測定は、地上 1 m 高さにおける測定で測定範囲は半径 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：一般的に、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場合や、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、条件がよい場所であるといえる。

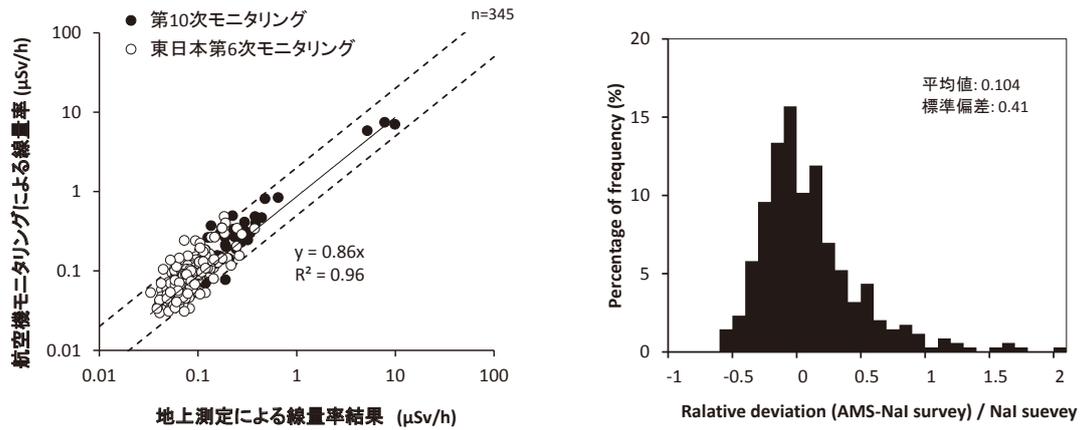


Fig. 4-24 地上の測線上における線量率測定結果との比較
(測線上の地点を選定) 左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム

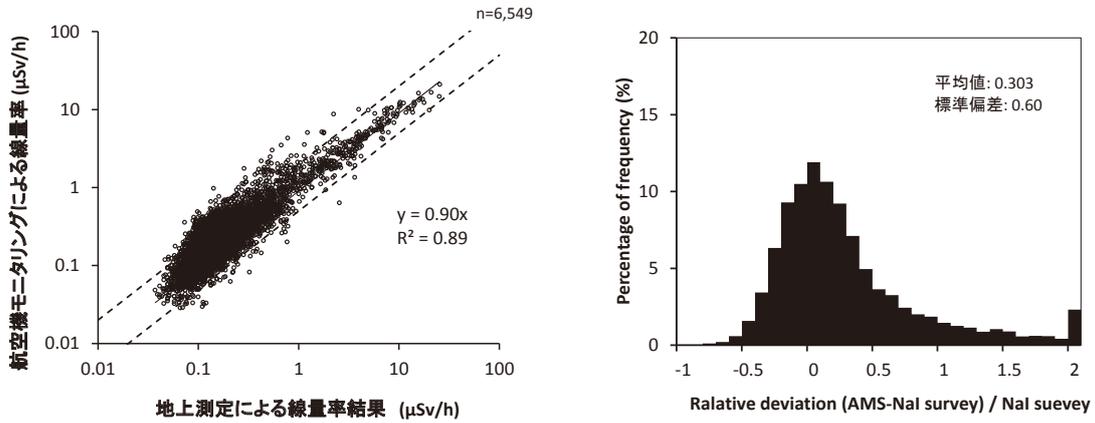


Fig. 4-25 地上のランダムな位置における線量率測定結果との比較
(地上値: 規制庁事業³⁰⁾) 左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム

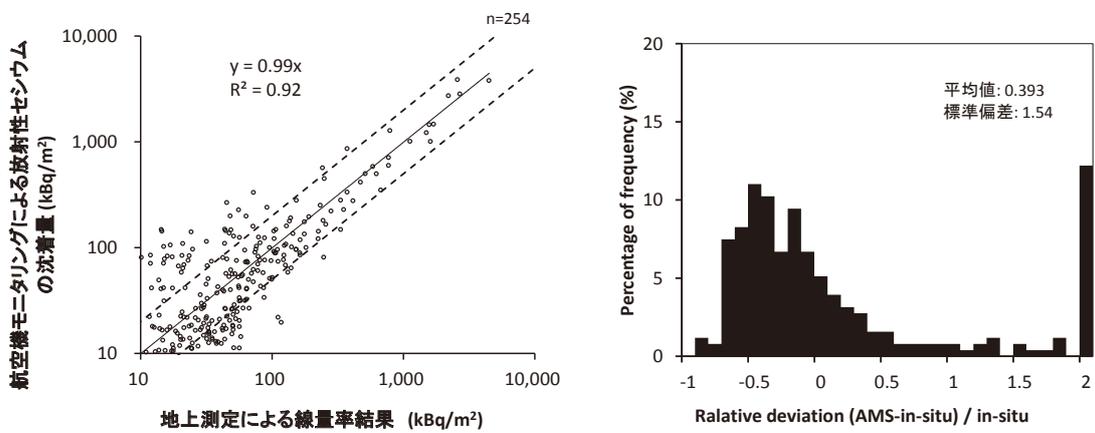


Fig. 4-26 地上における in-situ Ge 測定結果との比較
(地上値: 規制庁事業³⁰⁾) 左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム

4.12. 天然放射性核種由来の線量率マップの作成

平成 26 年度に開発した 天然放射性核種由来の線量率マップの作成手法を述べる^{22,31)}。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、天然の放射線由来の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³²⁾ 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 1,400keV 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 [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 1,400keV 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。

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

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 システムの自己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 (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。Table 4-8 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. 4-28 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、 $Gy : Sv = 1:1.2$ 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線量率に対する自然放射線の線量率の比率を 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. 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。

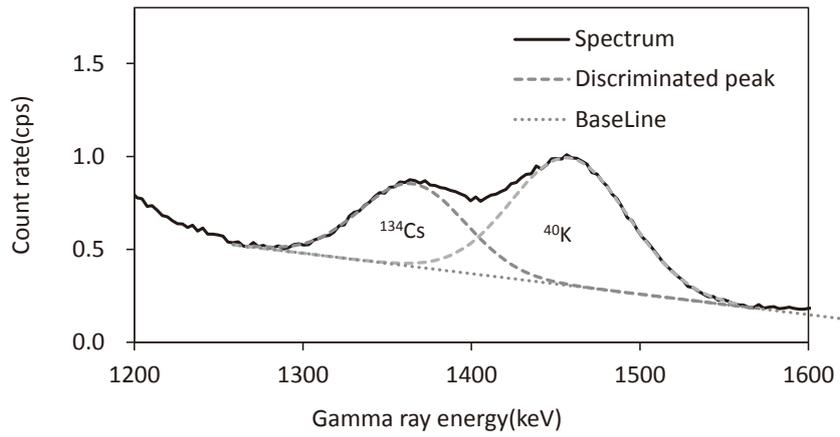


Fig. 4-27 関数適合法を用いた¹³⁴Csと⁴⁰Kの弁別

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		Number
	Value	Number	Value	Number	
1,400 - 2,800keV	-0.0059 ± 0.00024	11	-0.0060 ± 0.00031	8	8
50 - 3,000keV	-0.0072 ± 0.00047	21	-0.0072 ± 0.00040	35	35

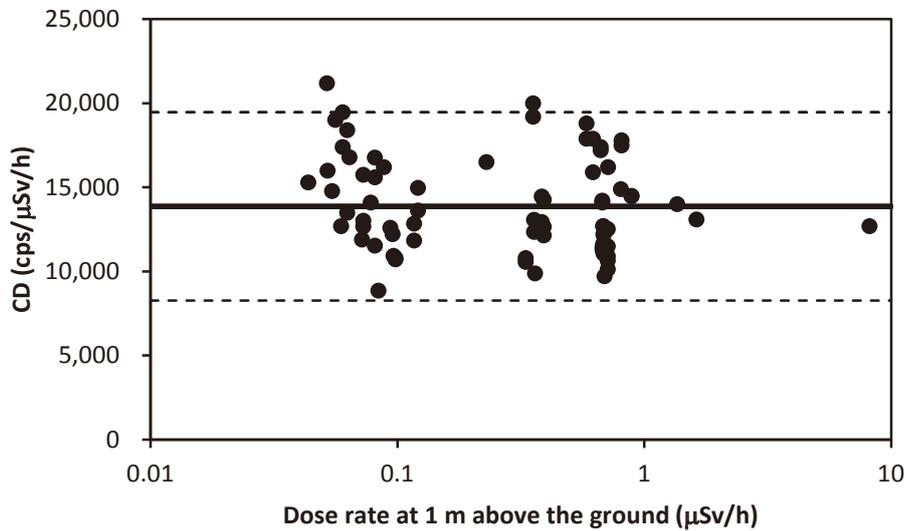


Fig. 4-28 テストポイントの地上の線量率と線量率換算係数 (CD) の関係

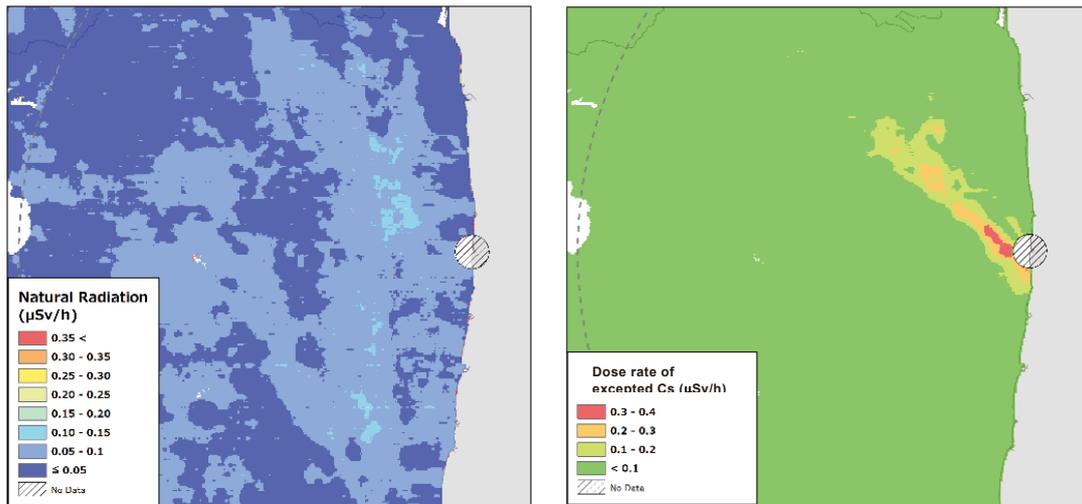


Fig. 4-29 福島第一原子力発電所周辺の天然の線量率マップの作成例

(左) 天然由来の線量率マップ、(右) 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

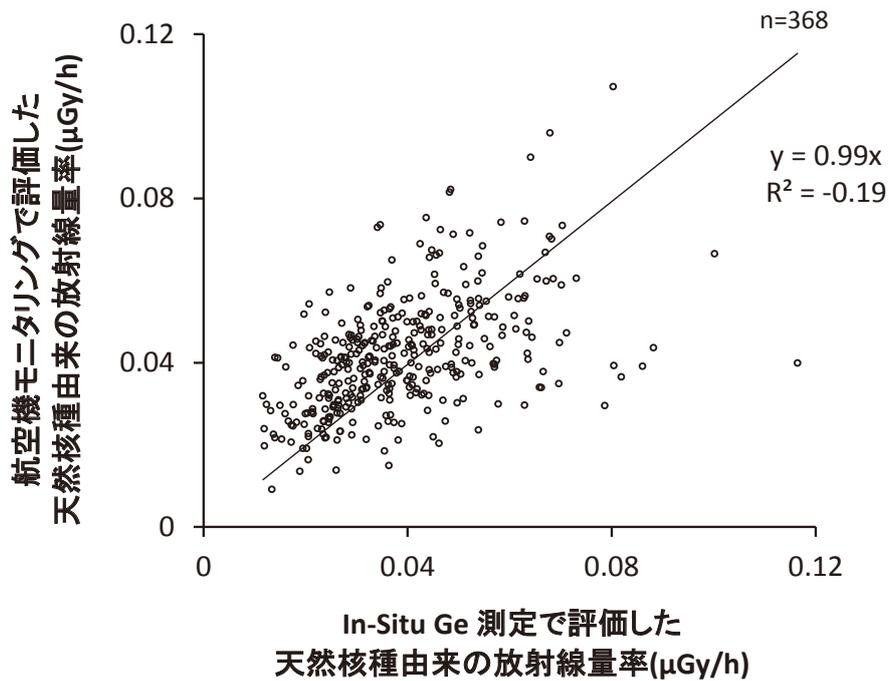


Fig. 4-30 航空機モニタリングによる天然核種由来の線量率と In-situ Ge 半導体検出器で得られた天然核種由来の放射線量率の比較

5. モニタリング結果

5.1. 第10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。¹³⁷Cs 及び ¹³⁴Cs の沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-3 及び Fig. 5-4 に示す。なお、マップの作成にあたっては、第10次の航空機モニタリングを実施した最終日である平成27年9月29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 μSv/h = 約 0.5 mSv/年 相当
- ・ 0.2 μSv/h = 約 1.0 mSv/年 相当
- ・ 0.5 μSv/h = 約 2.5 mSv/年 相当
- ・ 1.0 μSv/h = 約 5.0 mSv/年 相当
- ・ 1.9 μSv/h = 約 10 mSv/年 相当
- ・ 9.5 μSv/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。

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

- ・ 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 $\times 1/10$

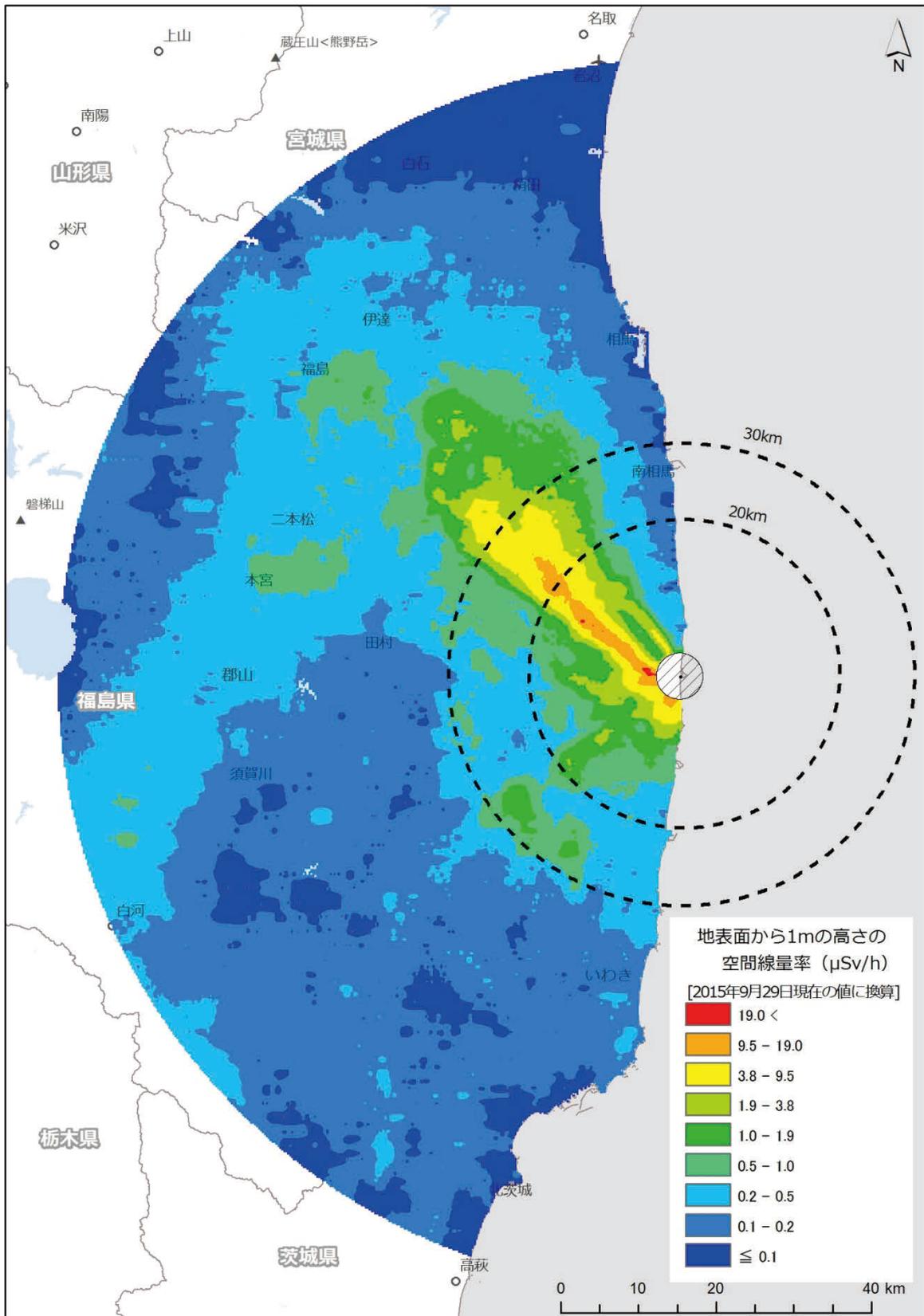


Fig. 5-1 第 10 次モニタリングにおける線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

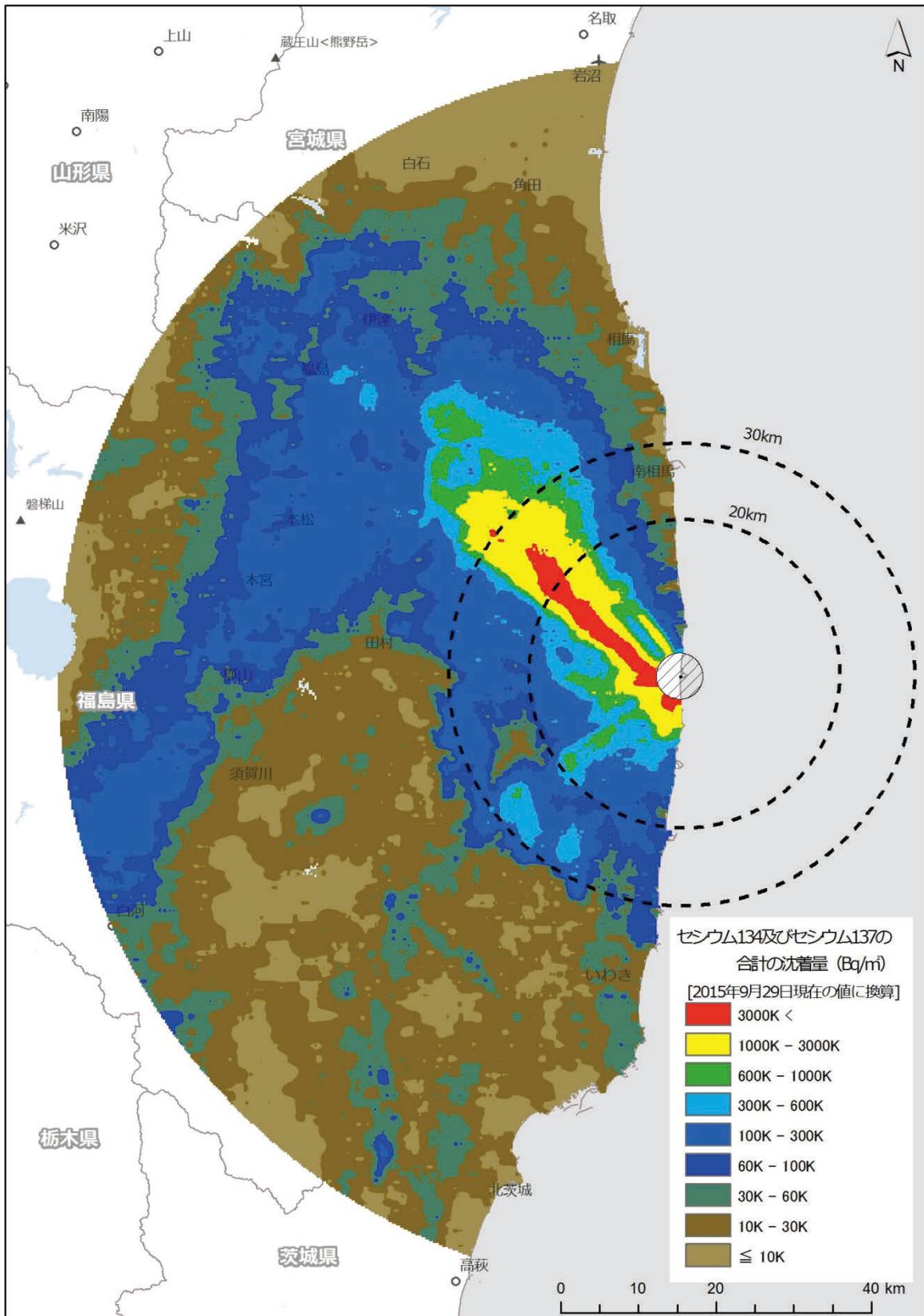


Fig. 5-2 第 10 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

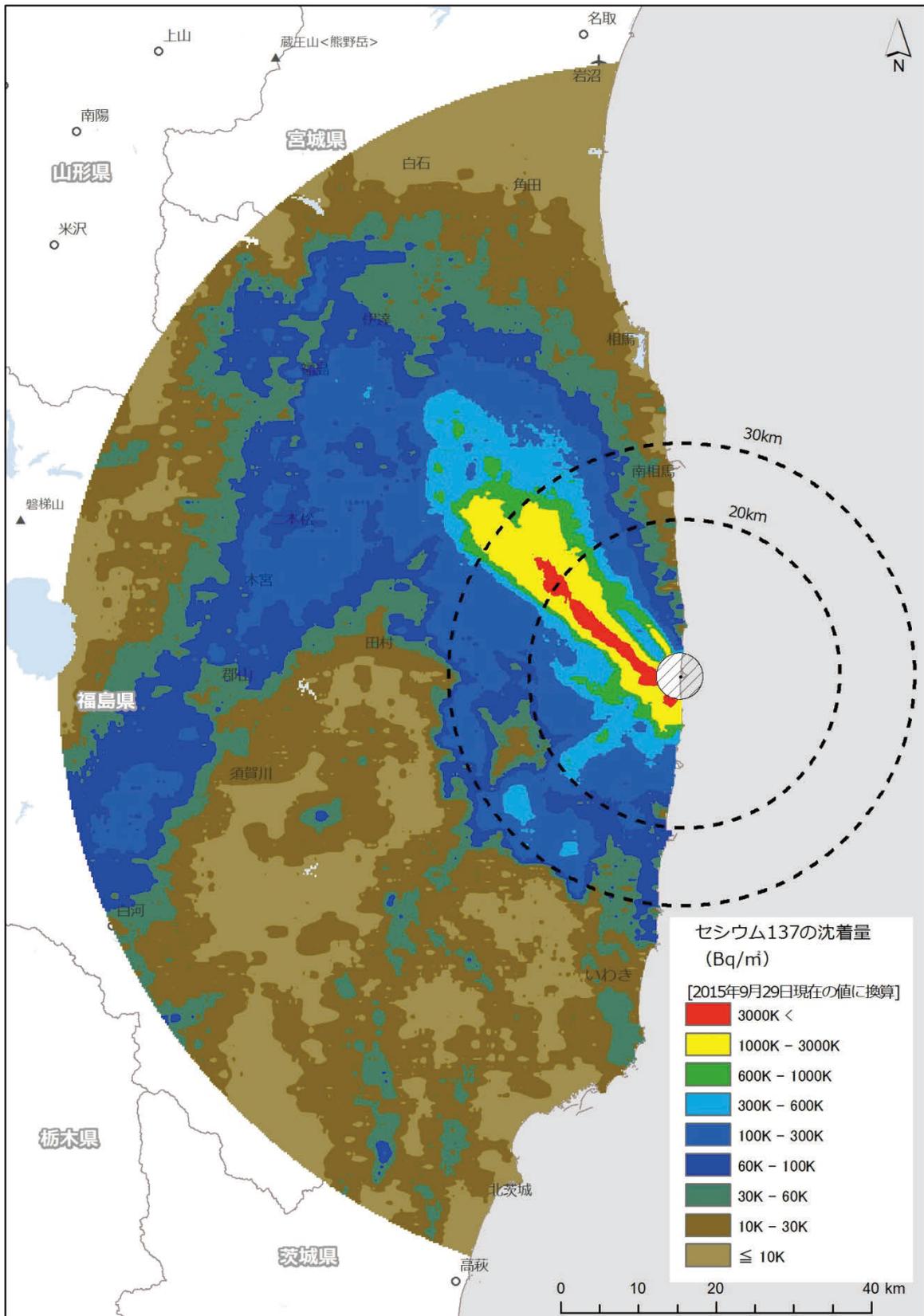


Fig. 5-3 第 10 次モニタリングにおける ¹³⁷Cs 沈着量マップ

(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)

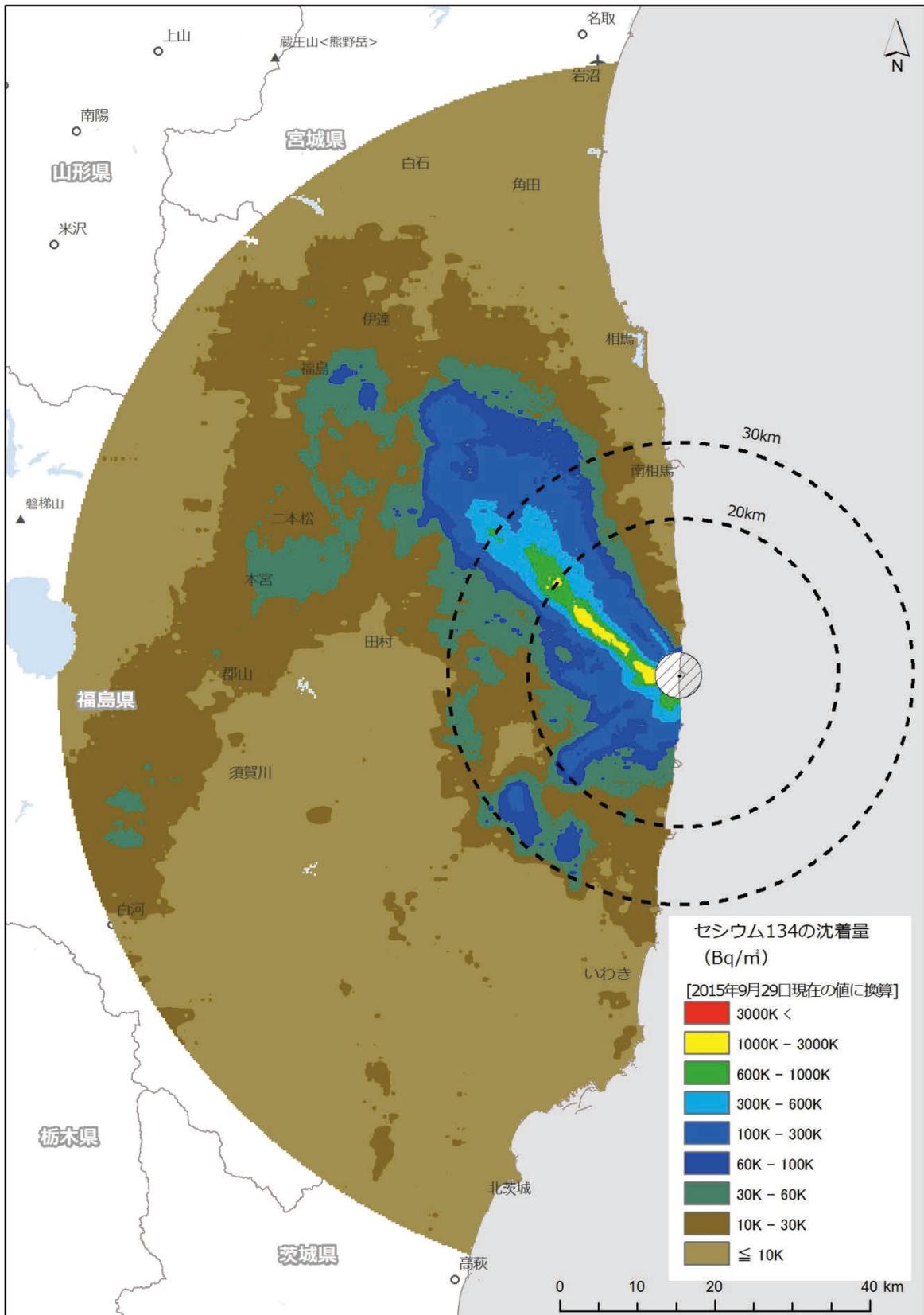


Fig. 5-4 第10次モニタリングにおける¹³⁴Cs沈着量マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

5.2. 東日本第6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6次の航空機モニタリングを実施した最終日である平成27年11月4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6次モニタリングを実施した最終日である平成27年11月4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」をそれぞれ、Fig. 5-9 及び Fig. 5-10 に示す。 ^{137}Cs 及び ^{134}Cs の沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-11 及び 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。

天然核種由来の線量率マップを Fig. 5-13 に示す。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³³⁾。また、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との比較を Fig. 5-14 に示す。

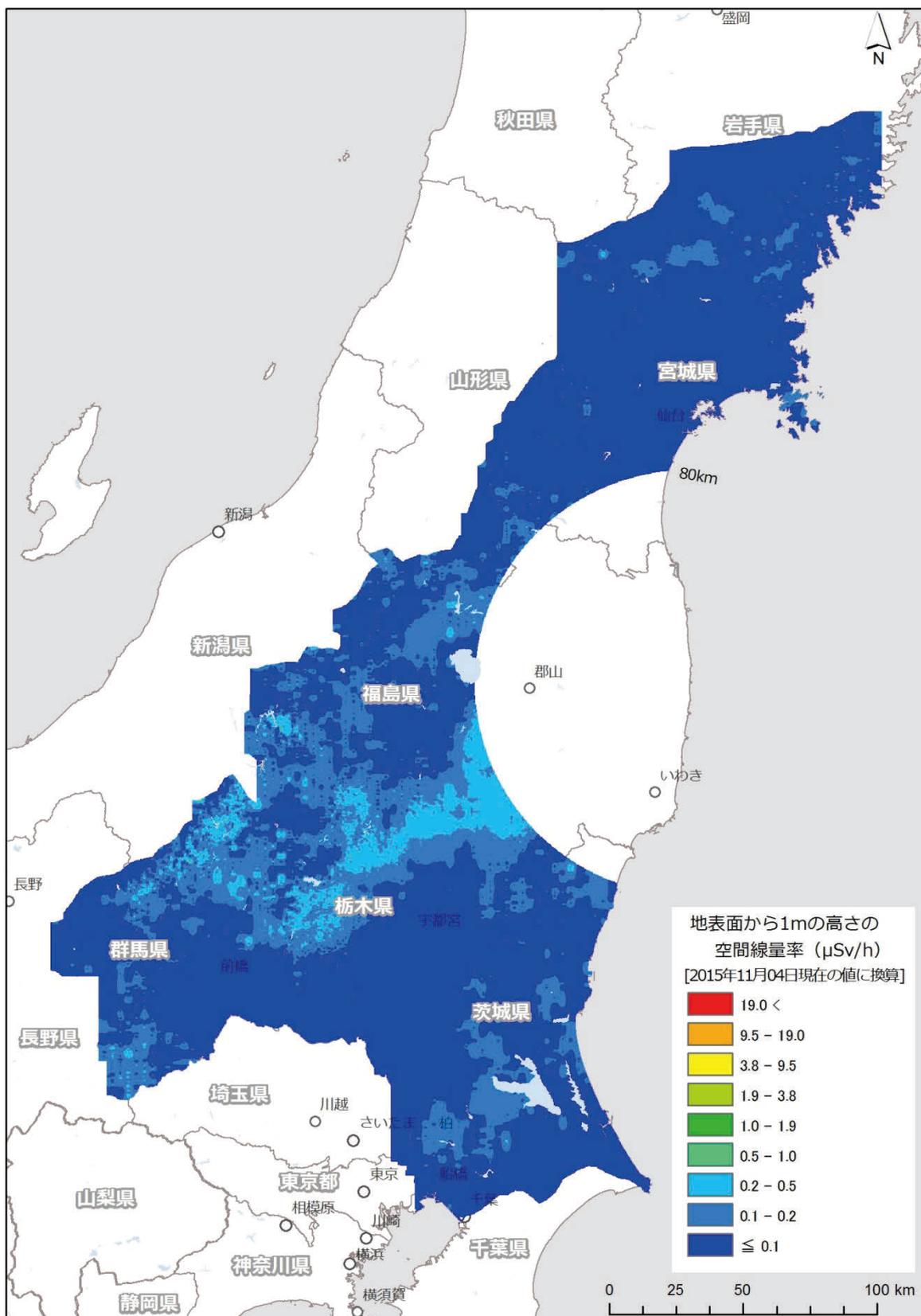


Fig. 5-5 東日本第 6 次モニタリングにおける線量率マップ

(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)

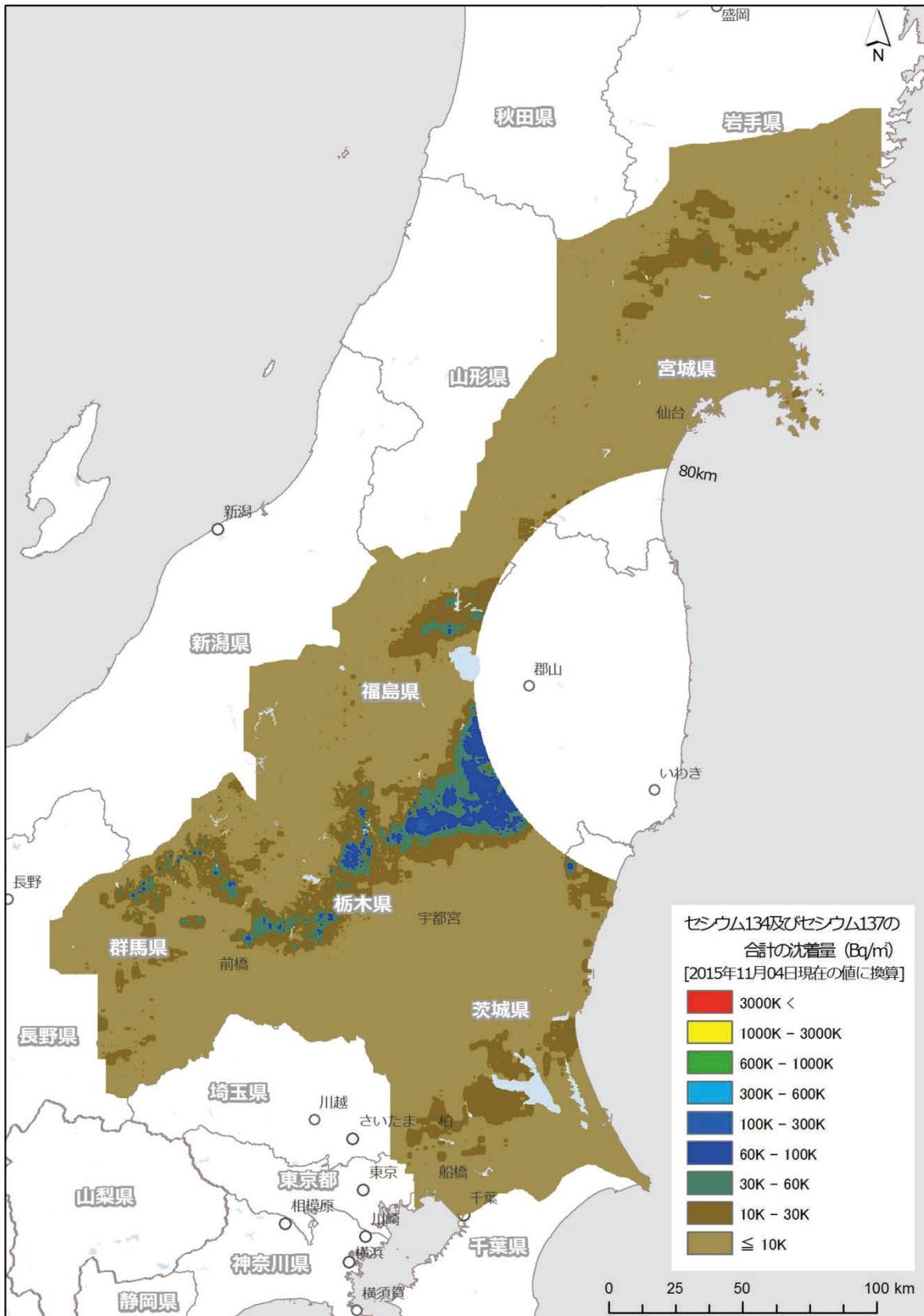


Fig. 5-6 東日本第 6 次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

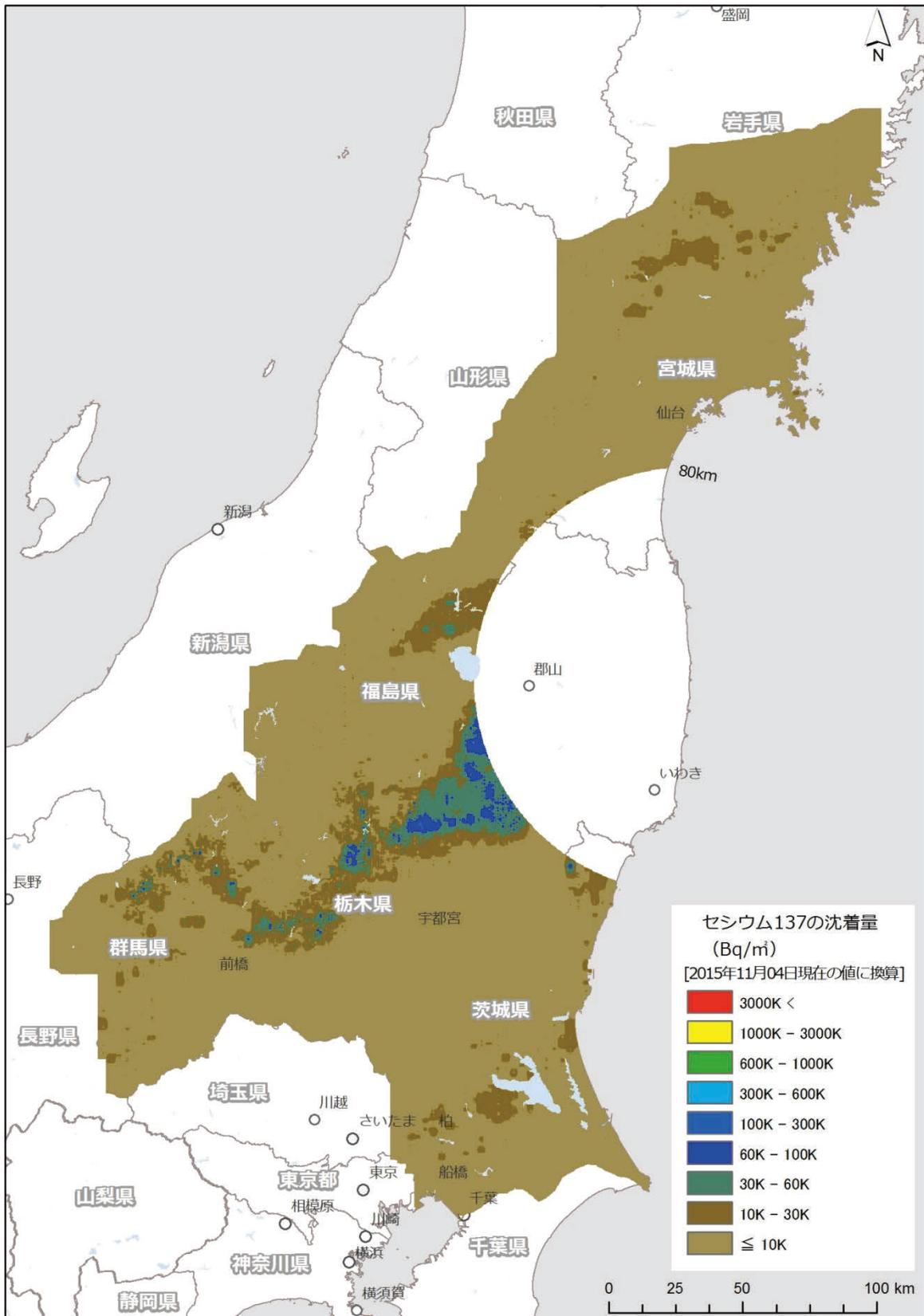


Fig. 5-7 東日本第6次モニタリングにおける¹³⁷Cs沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

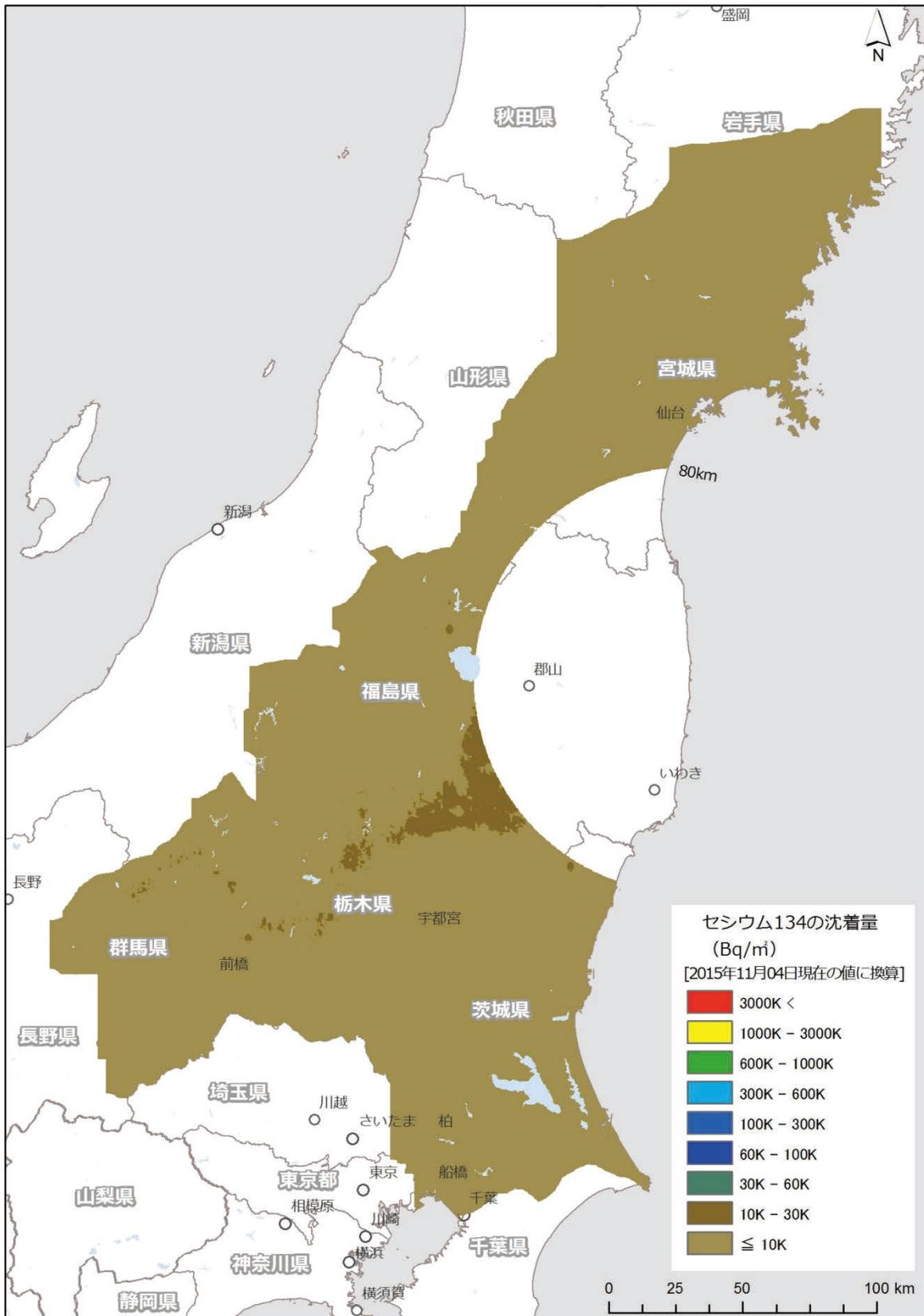


Fig. 5-8 東日本第6次モニタリングにおける¹³⁴Cs沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

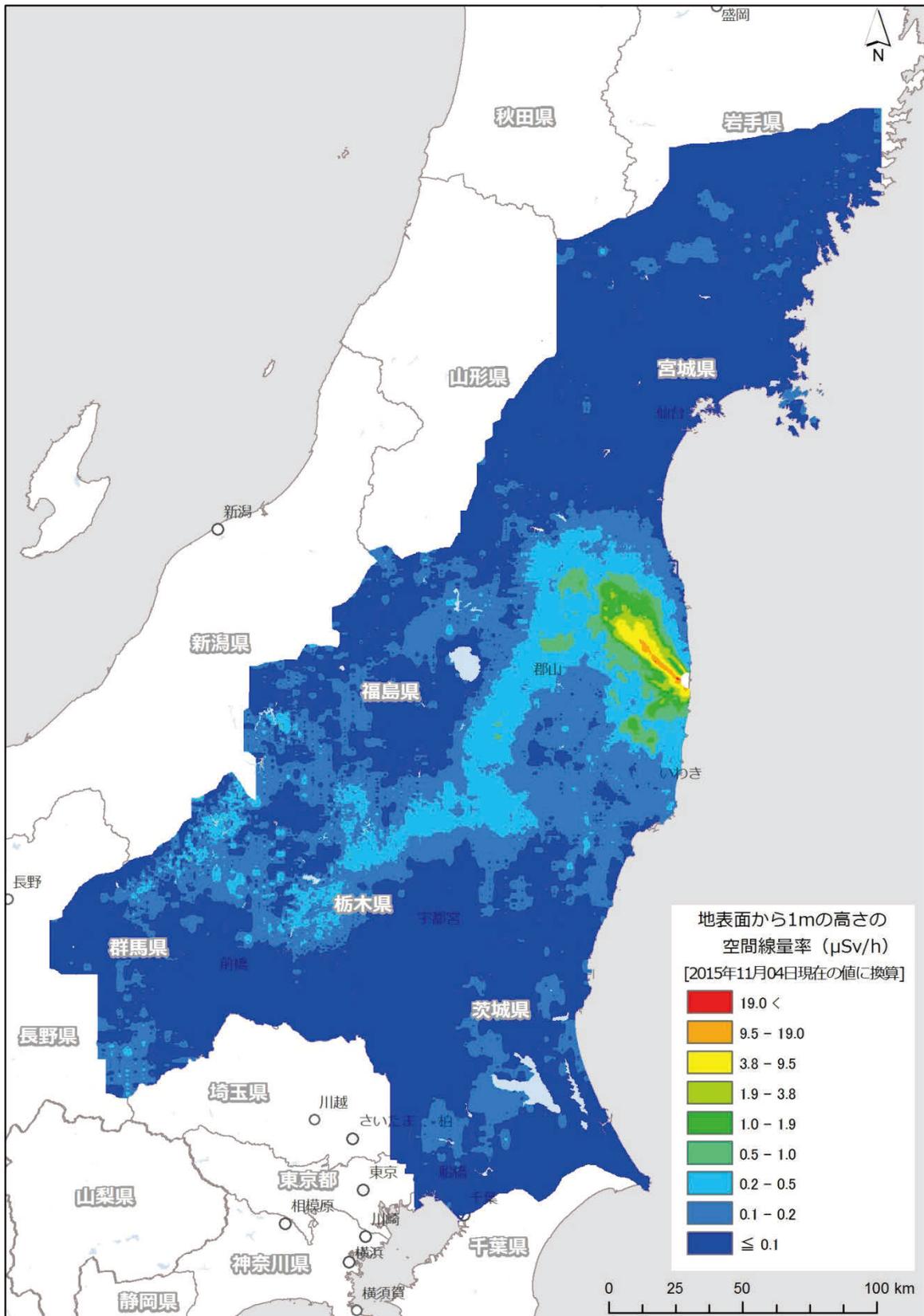


Fig. 5-9 東日本第 6 次モニタリングと第 10 次モニタリングにおける線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

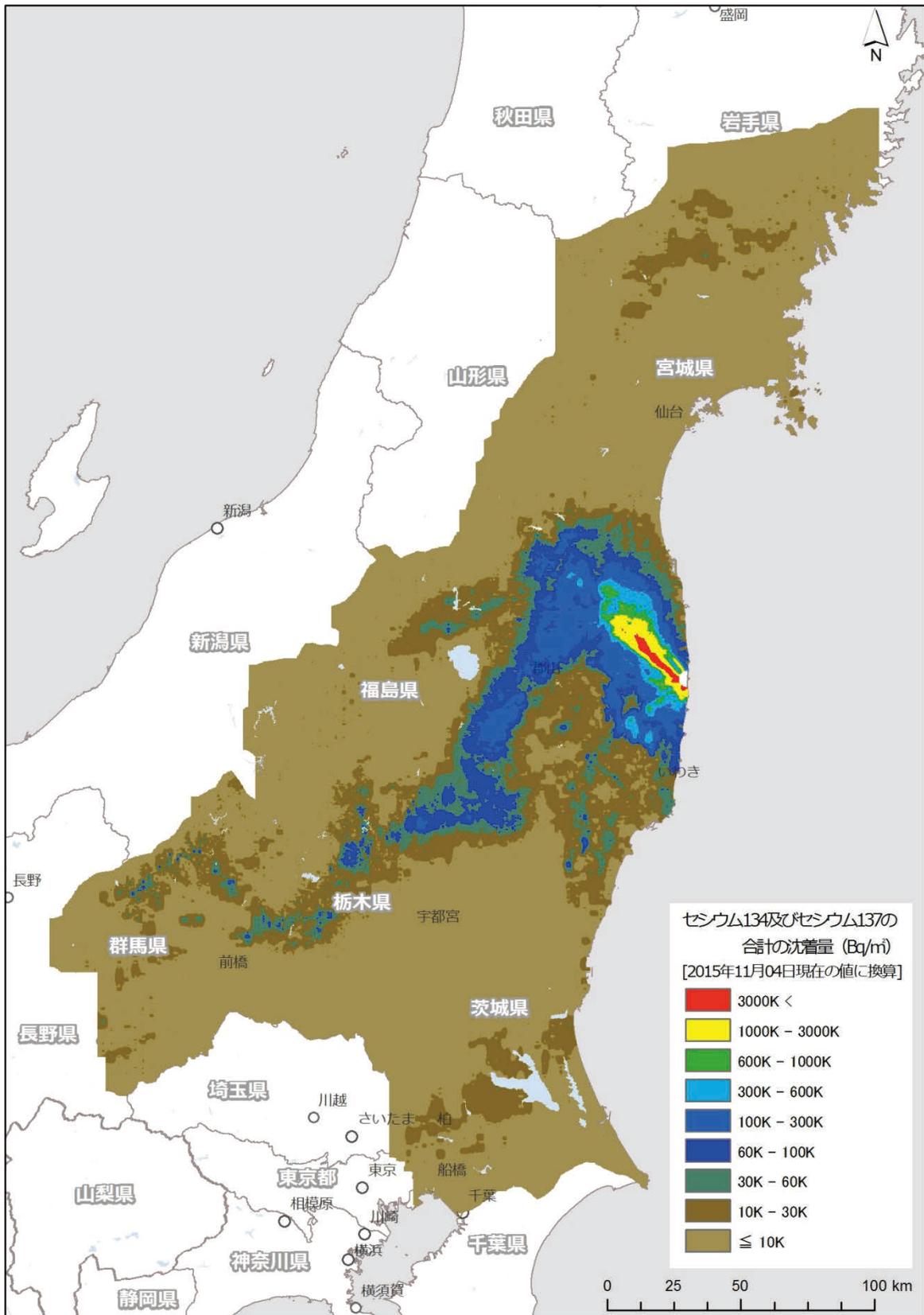


Fig. 5-10 東日本第6次モニタリングと第10次モニタリングにおける放射性セシウム沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

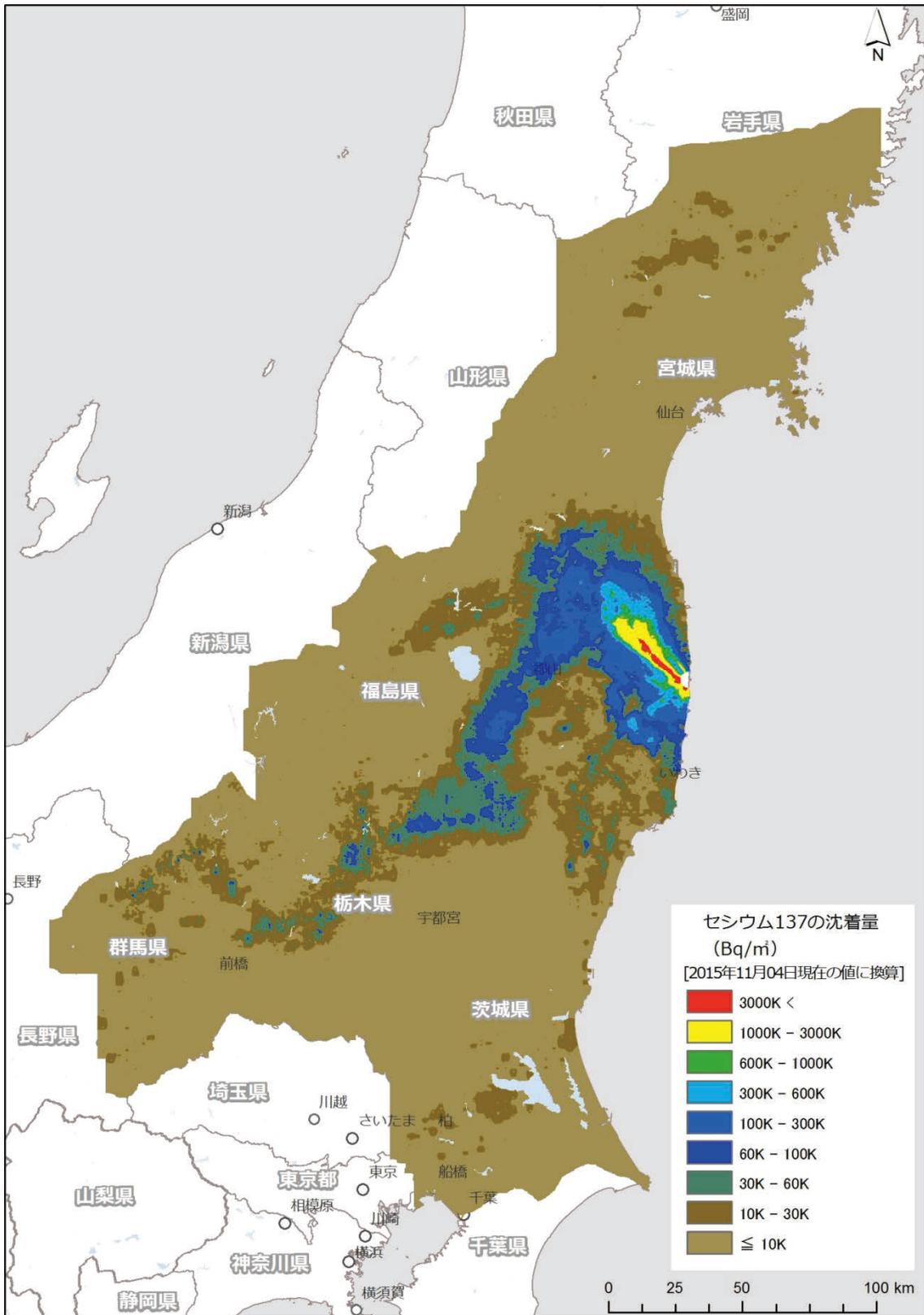


Fig. 5-11 東日本第 6 次モニタリングと第 10 次モニタリングにおける ¹³⁷Cs 沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

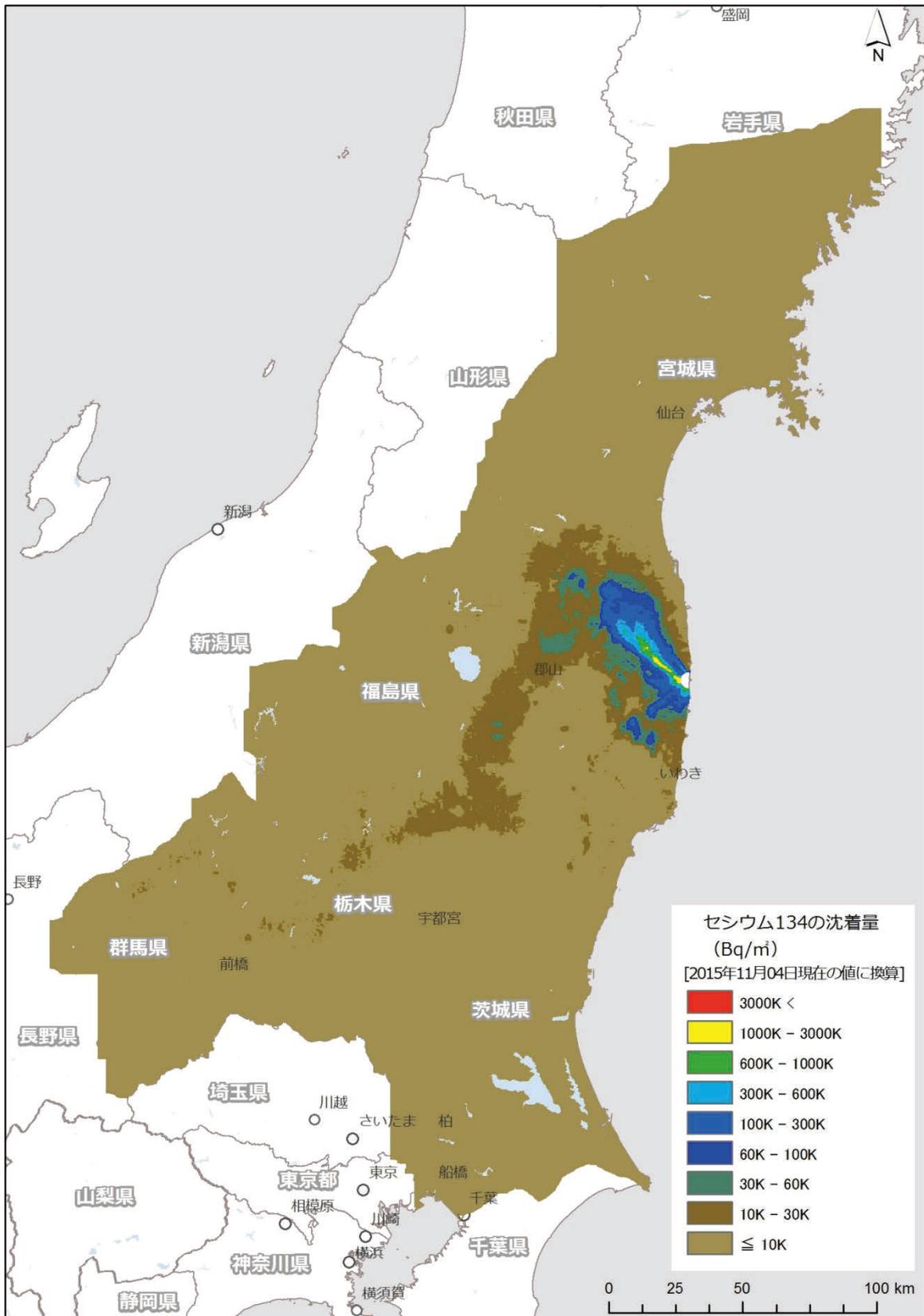


Fig. 5-12 東日本第 6 次モニタリングと第 10 次モニタリングにおける ¹³⁴Cs 沈着量マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

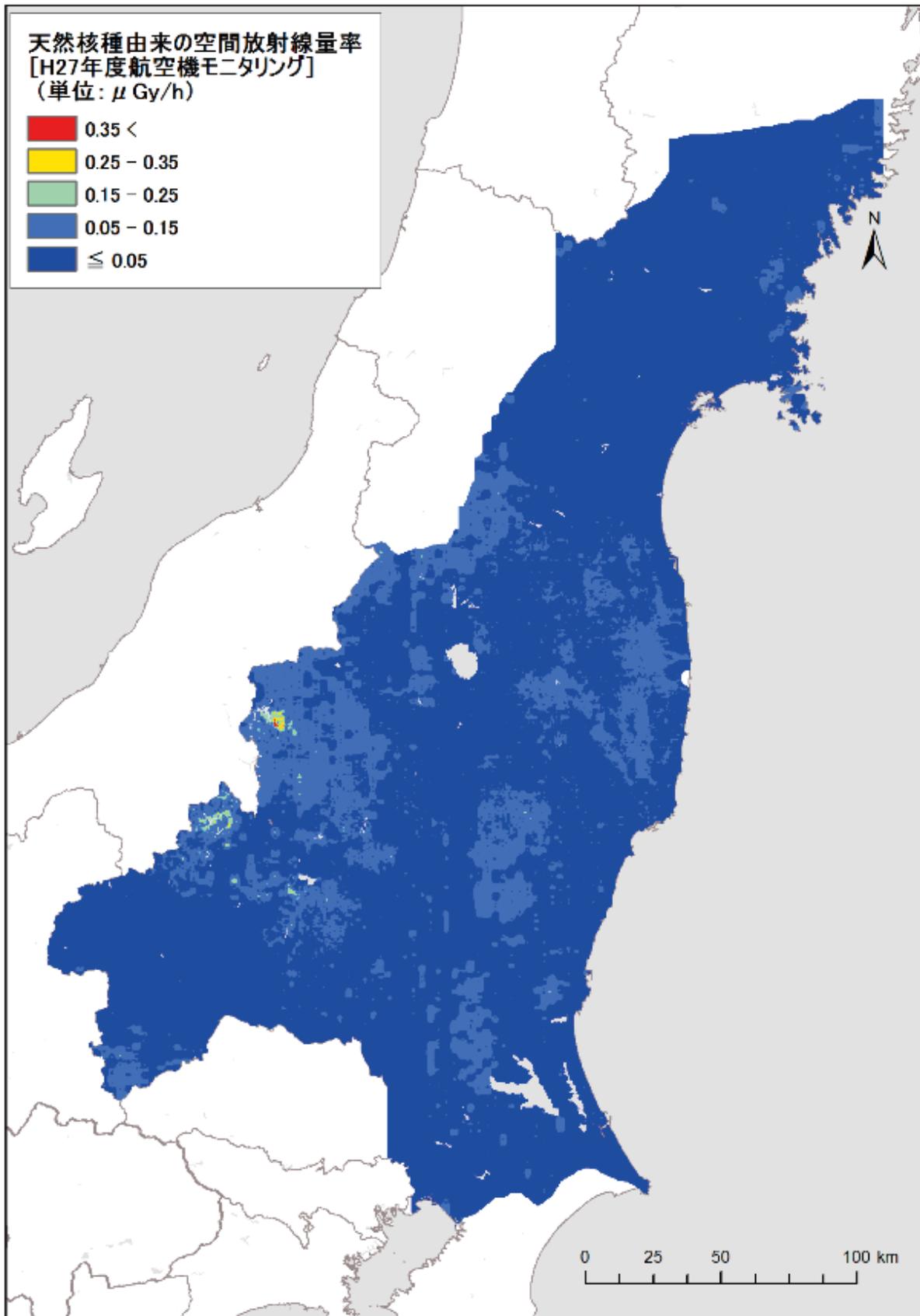
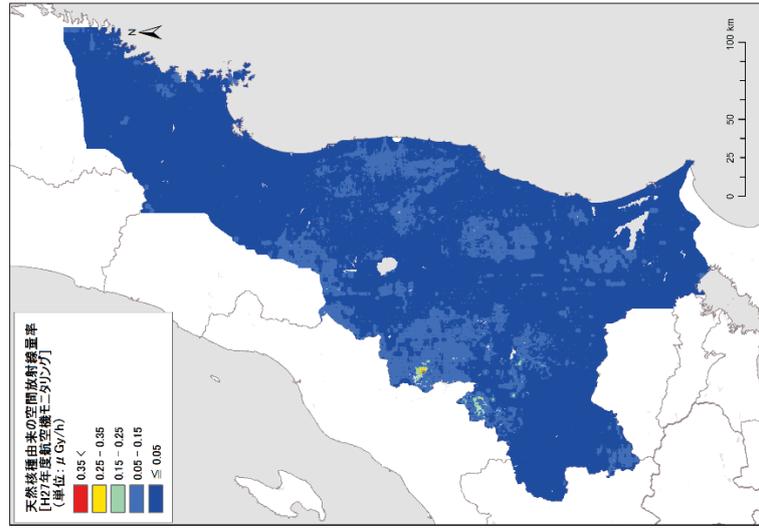
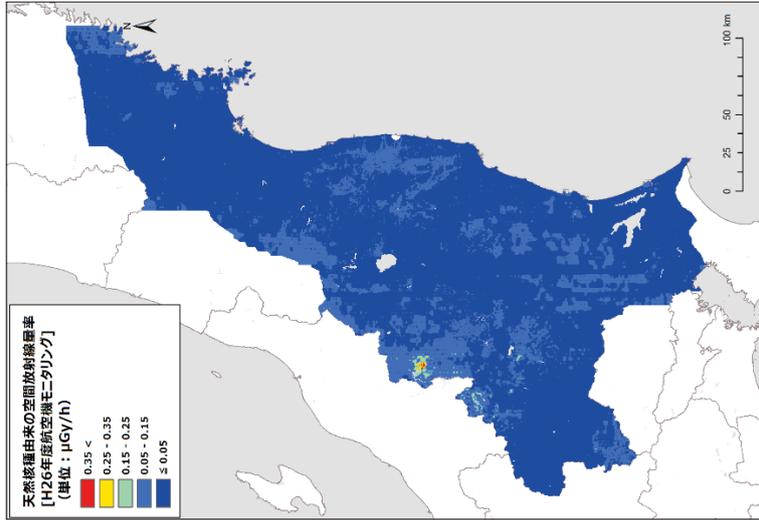


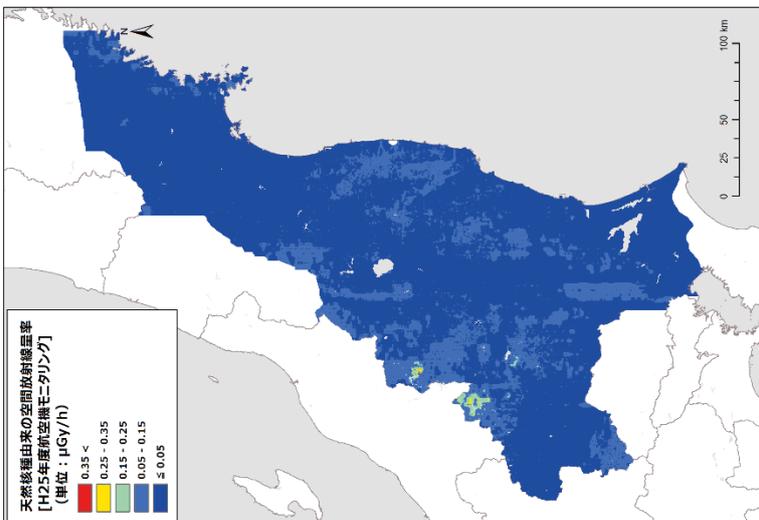
Fig. 5-13 東日本第 6 次モニタリングと第 10 次モニタリングにおける天然核種由来の線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



2015年のデータを解析



2014年のデータを解析



2013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バック (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、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、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。Fig. 6-2 に、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 10 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ていたことから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線量率の平均的な減少傾向としてみることができる。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ま見るには、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 10 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. 6-3 に示す。また、第 10 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。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、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。Fig. 6-5 に、第 4 次のモニタリングを基準とし、旧避難指示区域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. 6-6 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^{24,25)}。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^{25,26,30}。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 27 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²⁴⁾」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. 4-22 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。

This is a blank page.

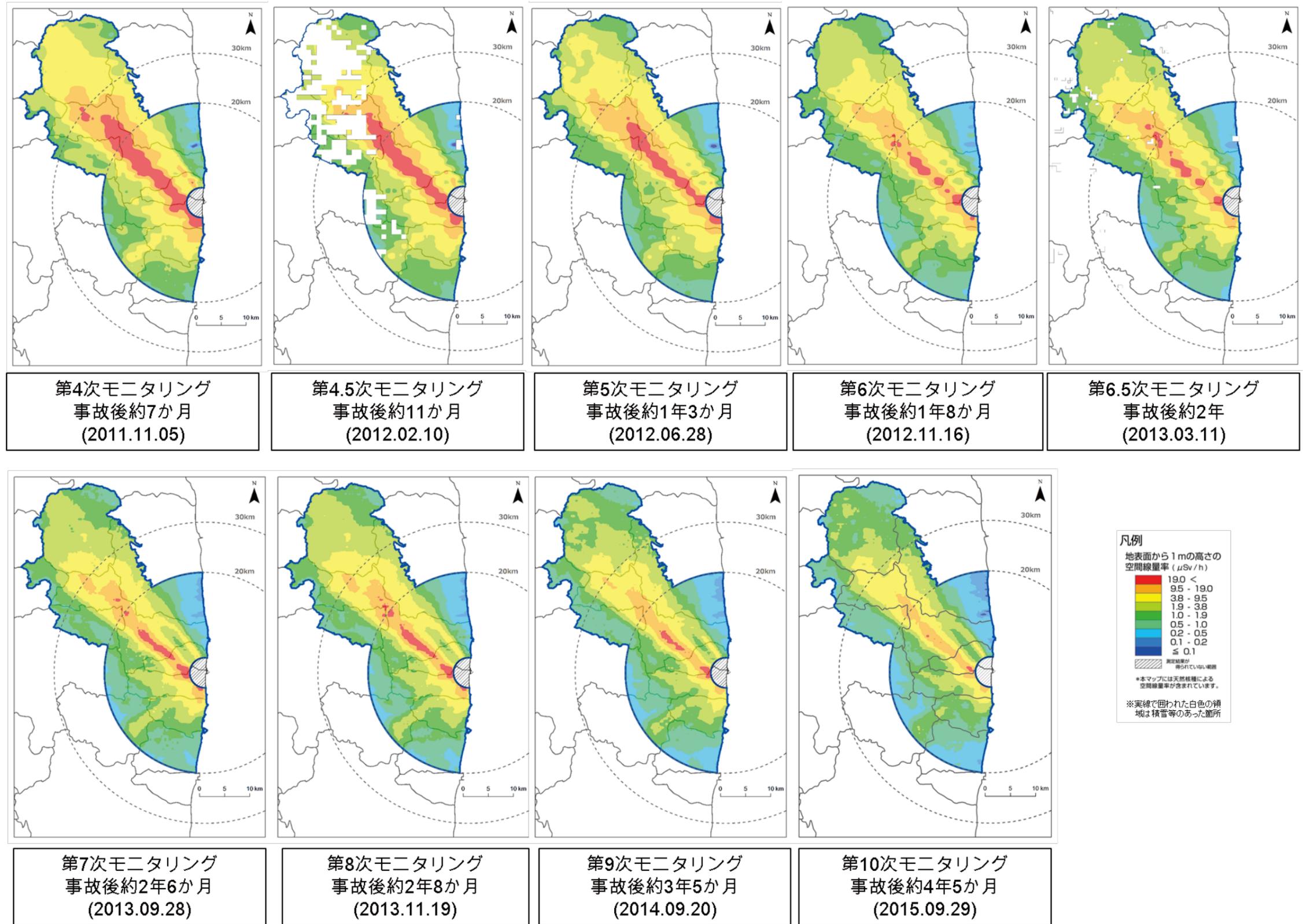


Fig. 6-1 旧避難指示区域における過去の線量率マップの比較
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

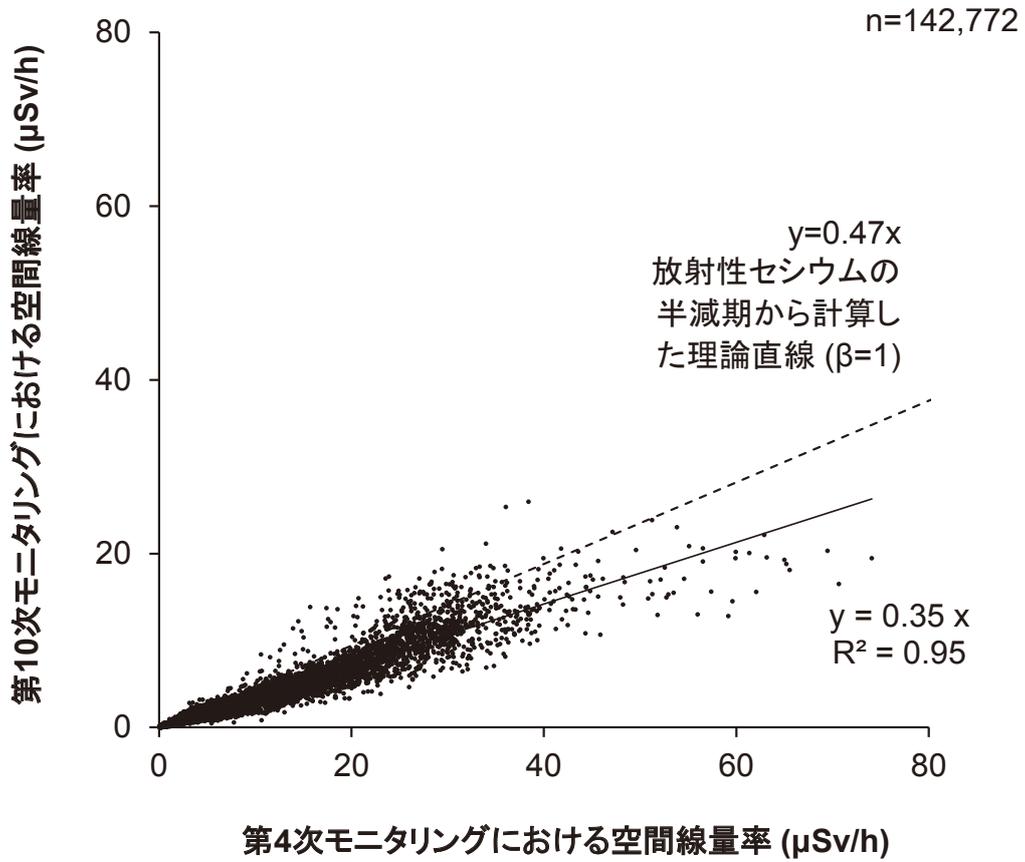


Fig. 6-2 発電所から 80 km 圏内における第 4 次モニタリング及び第 10 次モニタリングの線量率測定結果の比較

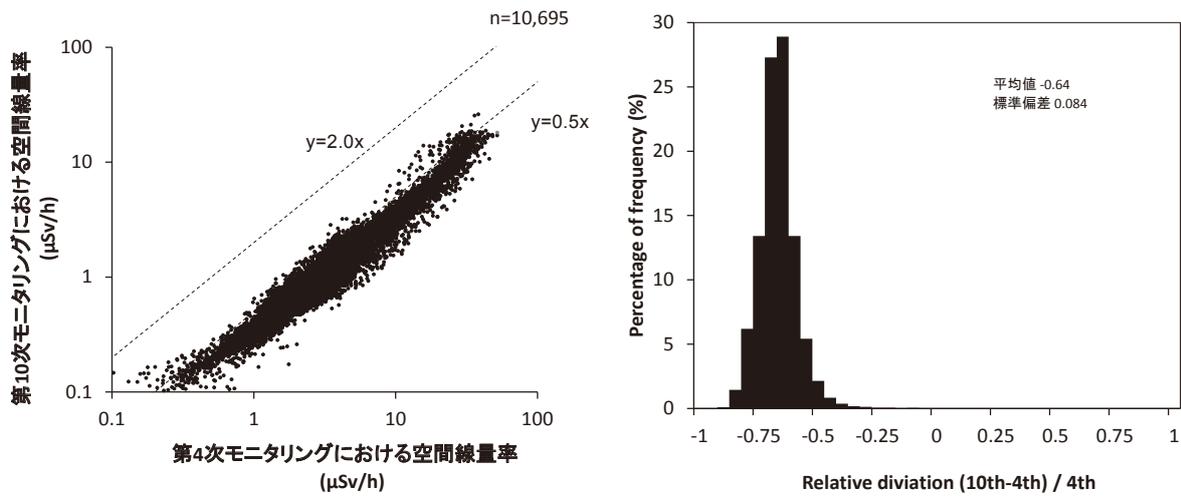


Fig. 6-3 旧避難指示区域における第 4 次モニタリング及び第 10 次モニタリングの線量率測定結果の比較

(左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム)

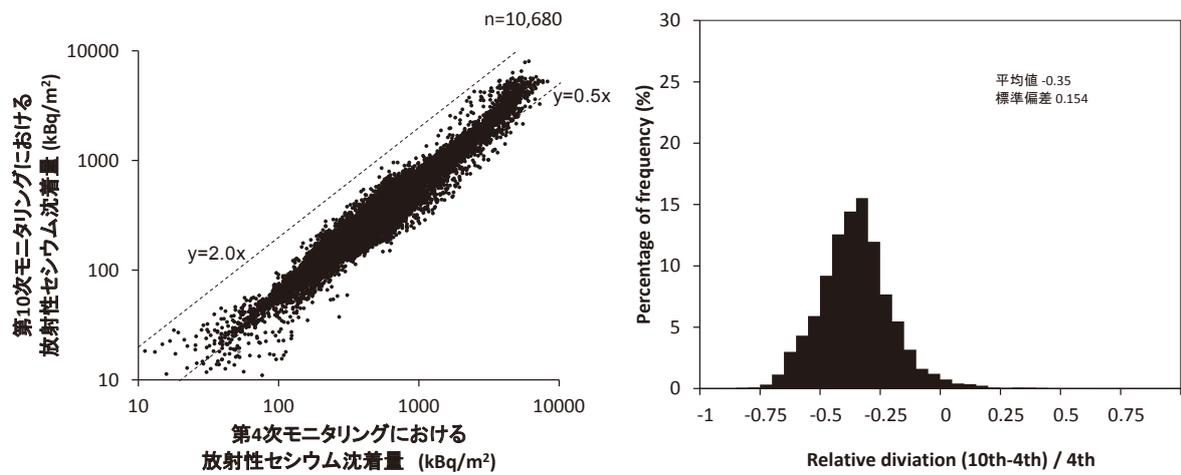


Fig. 6-4 旧避難指示区域における第 4 次モニタリング及び第 10 次モニタリングの放射性セシウム沈着量測定結果の比較

(左: 散布図, 右: 相対偏差のヒストグラム)

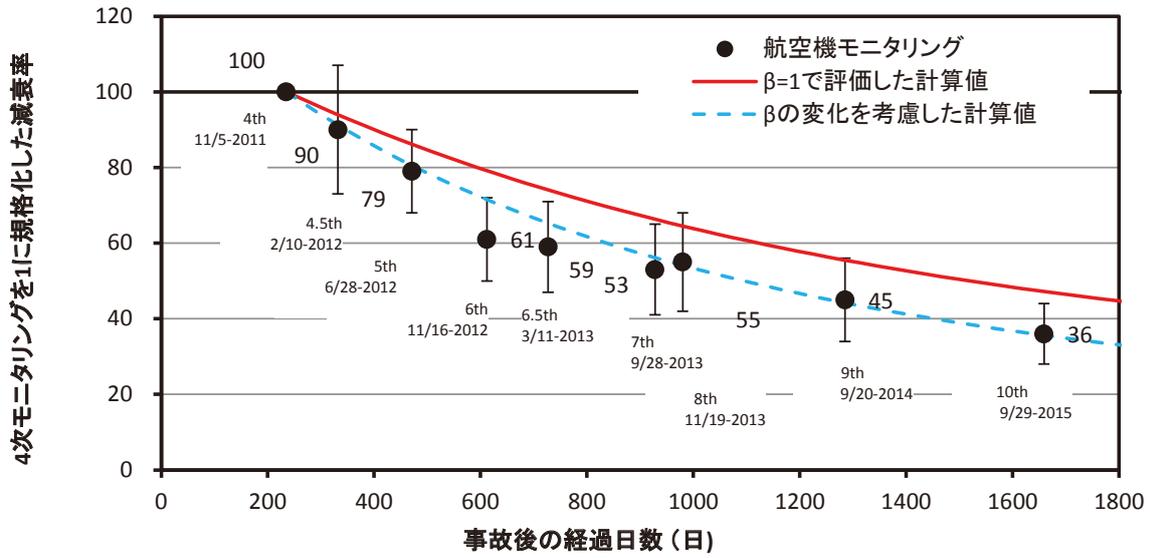


Fig. 6-5 航空機モニタリングによる旧避難指示区域内の線量率の変化傾向

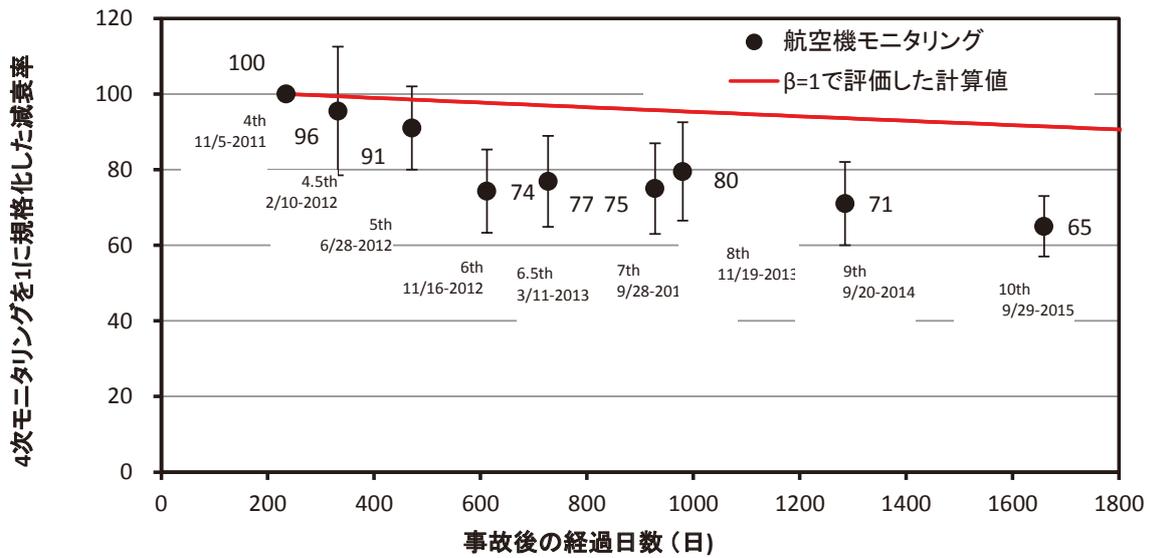


Fig. 6-6 航空機モニタリングによる旧避難指示区域内の¹³⁷Cs 沈着量の変化傾向

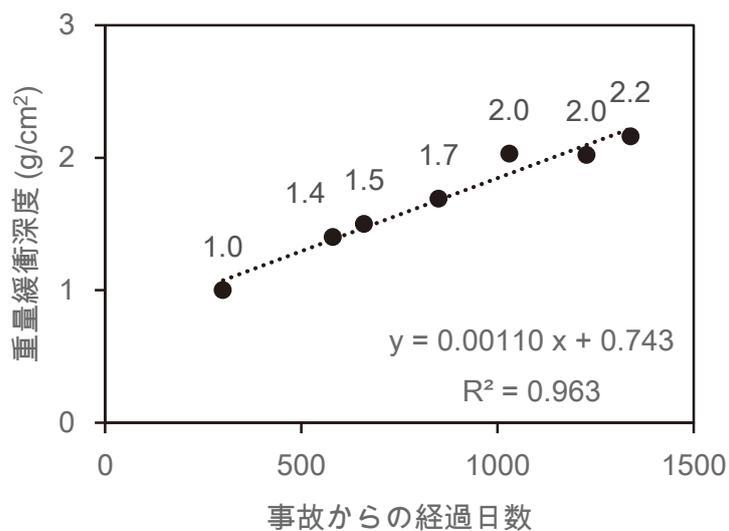


Fig. 6-7 事故からの経過日数と重量緩衝深度の関係

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^{25, 26, 30)}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³⁴⁾」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. 6-8 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。

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 10 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. 6-9 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 10 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 34 %、森林部が 37 %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。この結果から、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。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線量率測定結果から解析した報告書³⁰⁾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。

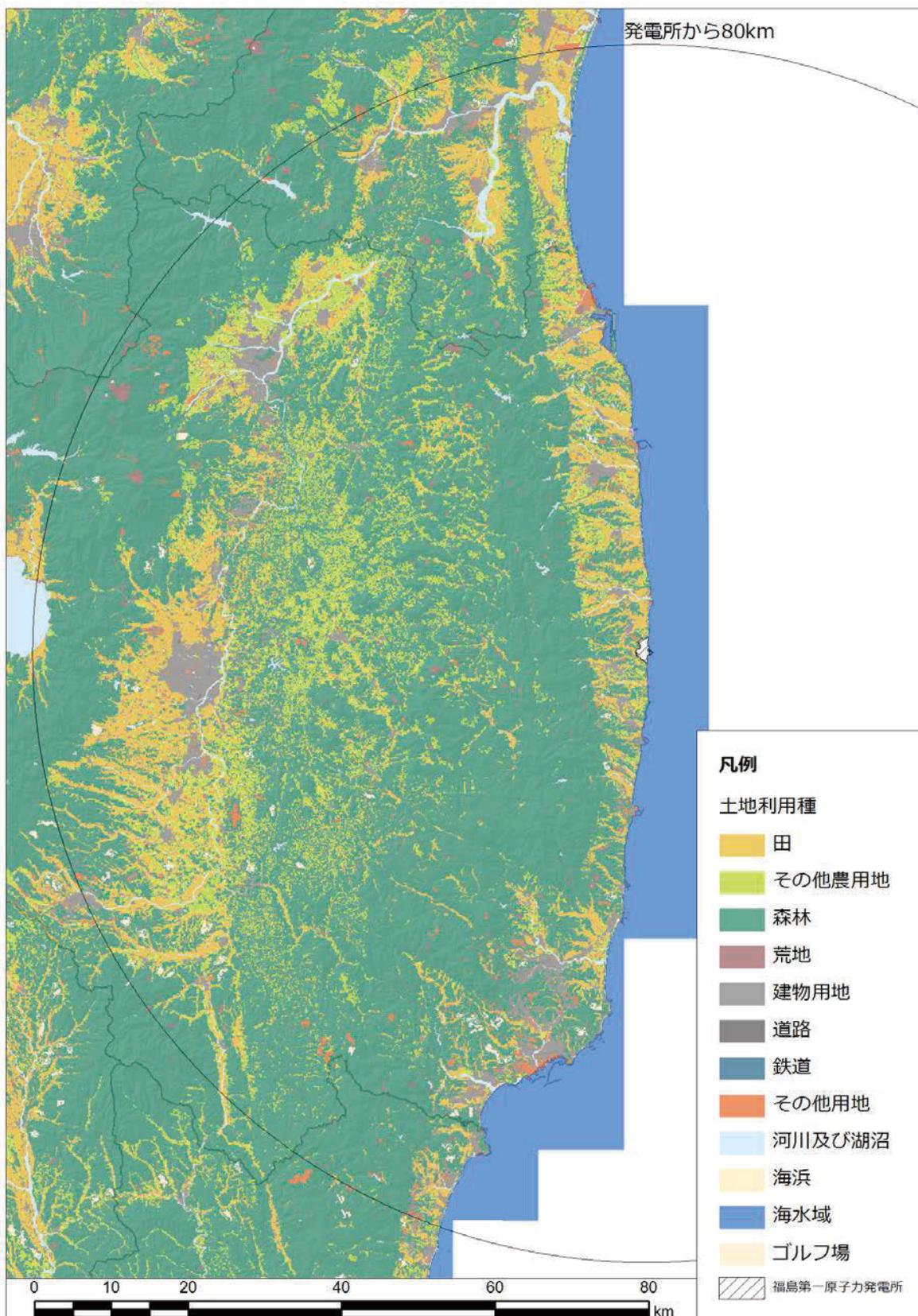


Fig. 6-8 発電所から 80 km 圏内における土地利用図
(平成 21 年度 国土地理院土地利用調査データより)

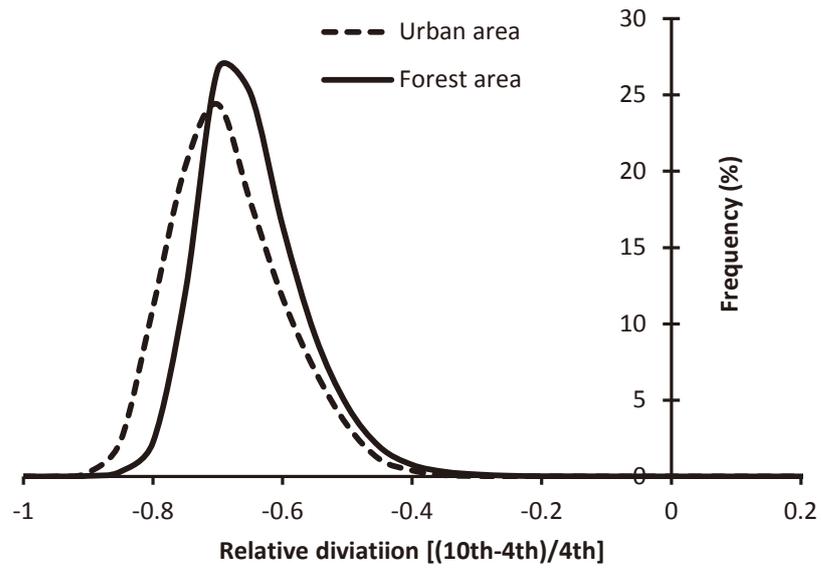


Fig. 6-9 森林部及び市街地における減衰率の比較
(第4次モニタリングと第10次モニタリングの比較)

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. (%)	10th/4th Ave. (%)
Urban area	732	70 ± 11	55 ± 8.8	50 ± 8.4	44 ± 9.7	41 ± 8.8	34 ± 8.7
Forest area	5,841	77 ± 10	57 ± 8.5	54 ± 9.0	49 ± 9.2	44 ± 9.2	37 ± 8.1
All area	8,923	72 ± 11	56 ± 9.0	53 ± 9.0	48 ± 10	43 ± 10	37 ± 8

6.3. 測定時間と線量率マップ

現在、航空機モニタリングでは、上空で取得した1秒ごとのデータを線量率に換算し、換算後のデータについて内挿補間処理を行い、コンターマップとして示している。今後、線量率が減少するに伴い、より精度のよい測定を行う単純な方法として測定時間を長くすることが考えられる。一方で、測定時間を積算することにより、位置分解能は悪くなり、内挿後のコンターマップの傾向も変化する。今回、線量率の変動の大きい場所で取得した航空機モニタリングのデータについて、1秒毎、5秒毎、10秒毎及び20秒毎に積算したデータを再解析し、作成されるコンターマップを比較した。

解析には、2014年に取得したデータを用いた。本データは、発電所から南西に10kmほどの場所に設定した10km×10kmのエリアを500mメッシュで対地高度300mでフライトし取得したものである。ここでは、1秒ごとに得られた生の測定データを一定時間で積算し、高度補正及び地上の線量率への換算方法については典型的な航空機モニタリングの手法を適用した。

解析結果をFig. 6-10に示す。図の黒点は測定場所を示している。測定時間が長くなるにつれ、黒点の間隔が大きくなっていることが分かる。線量率マップは、測定時間が長くなるにつれ平滑化されることから、見た目の傾向に大きな変化はないものの、測定点毎の数値が強調されるように見える。この違いは、内挿で用いているIDW法は近傍の測定点を参照することから、測定時間が短い場合は航空機の直進方向の点を隣の測線の点よりも多く参照し、測定時間を長くすると周辺の測定点を均一に参照することによると考えられる。すなわち、測定時間が短くすると内挿後のマップは、測線方向に楕円形の傾向を示しやすく、測定時間を長くすると周辺の測定点を均一に参照するので円形の分布傾向を示しやすい。実際には、理論的な検出下限値や地上値との測定を確認するとともに、測定場所の線量率分布に応じて、最適化することが必要である。

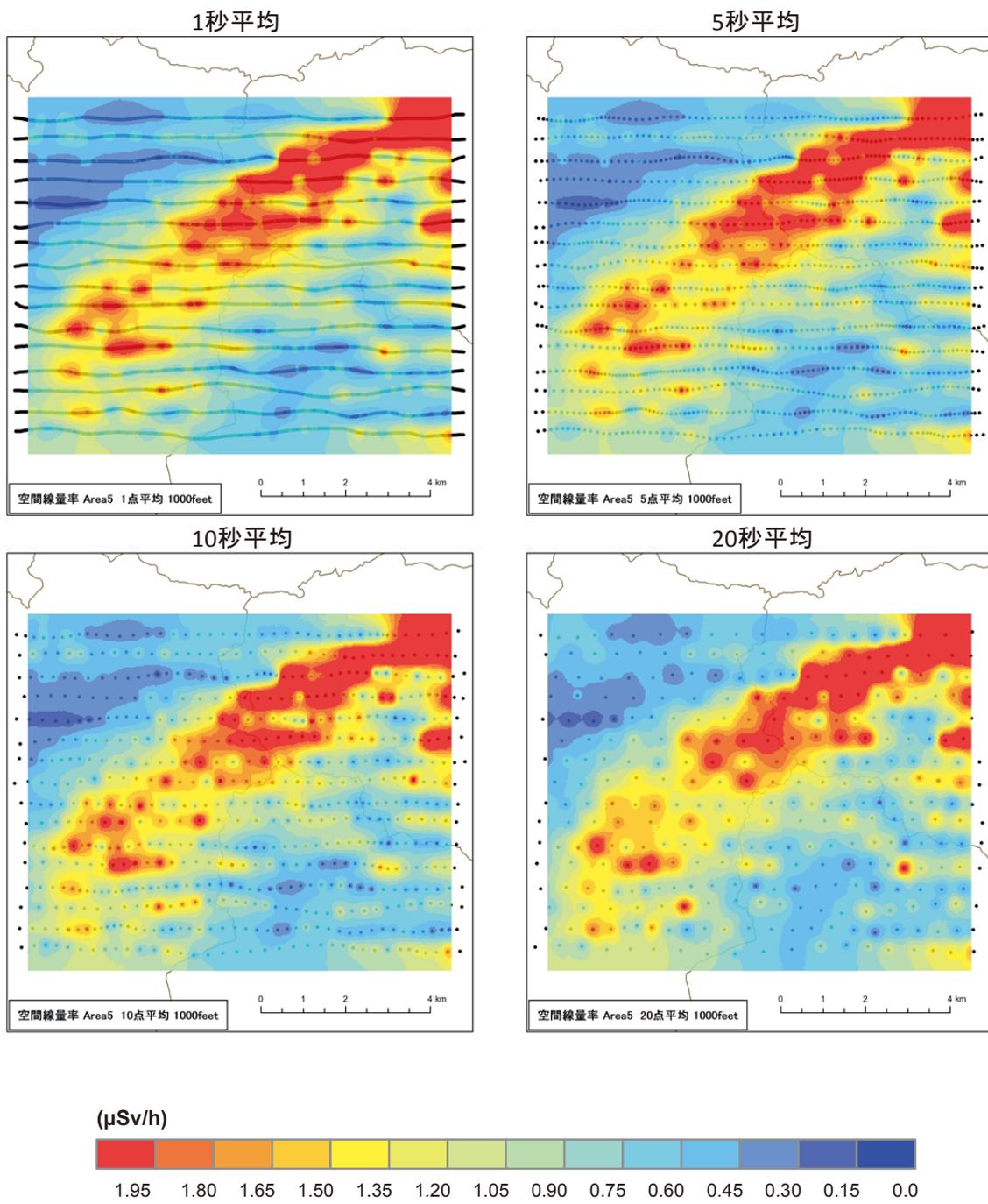


Fig. 6-10 測定時間の違いとコンターマップ

7. 航空機モニタリングにおける積雪の影響

7.1. 背景と目的

福島原子力発電所事故は冬期(3月)に発生し、周辺の一部地域では放射性物質の沈着後に積雪に見舞われた地域があった。また、事故後に定期的な航空機モニタリングを行う上で、測定の時期によっては、積雪の影響があったことから一部の地域で測定値の地上値への換算ができない状況が発生した。今後の定期モニタリングにおいて積雪があった場合を想定し、積雪による遮蔽効果の影響を検討しておくことは測定精度の向上につながる。また、将来の原子力発電所の事故が起きた場合を考えると、放射性物質が沈着した土壤上に積雪がある場合にも一定の精度で、航空機モニタリングのデータから地上の放射線分布を測定できる手法を検討しておく必要がある。

放射性物質が沈着した土壤上に積雪があった場合、放射線は遮蔽されることが考えられ、積雪の深度や密度により遮蔽状況が変わると考えられる。過去の研究事例を見ると、古くは、積雪量を求めるという目的から、天然の放射線が使われた事例がある³⁵⁾。その後、我が国においても長岡ら(1988, 1992)^{36,37)}は航空機モニタリングによる積雪前後の放射線の測定結果から放射線の減衰率を算出し、積雪量との関係を実測している。この例では、計算コードによる積雪のシミュレーションも行っており、実測結果を再現できることを示唆している。ただし、福島原子力発電所事故前に実施されていることから、天然の放射性核種から放出される γ 線が対象である。放射性セシウム¹³⁷の放出する γ 線の減衰量と積雪深の関係については、世界的に見ても測定例は少ない。一方、地形測量としては、レーザ測量が現在主流であるが、ヘリコプターに搭載するシステムが大きいので、放射線検出器と同時使用は難しい。

そこで、ここでは、放射線検出器と同時に測定が可能である写真測量を用いて、発電所近傍における積雪前後の測量及び放射線測定を実施し、その妥当性と問題点について検討を行った。なお、写真測量機器は現時点では航空法の規定上、放射線検出器と同時に搭載はできないため、写真測量とレーザ測量が同時に実施できるヘリコプターを利用した。また、同時に取得したレーザ測量のデータは写真測量の比較用に使用した。

7.2. 写真測量の理論

写真測量の原理イメージについて、Fig. 7-1に示す。写真測量の原理については、国土地理院のホームページに詳しく記載されている³⁸⁾。以下、概要を示す。航空測量に限らず、デジタルカメラなど異なった位置O1、O2から対象を撮影し、画像上の対応点p1、p2を計測する。計測したデータをもとに、三角測量の原理により、対象の3次元座標pを求める。図には、カメラの傾きのない平行撮影という理想的な場合を示したが、実際には基準点を何点か一緒に写し込んで、撮影した時のカメラの位置や傾きを求める標定作業を行う。標定では、通常、座標のわかっている基準点を3点以上写しこんで、基準点と画像との対応点を計測して算出する。標定後、対象物の輪郭などの形状を3Dでトレースする図化を行う。計測した点と点をポリラインで連続的に結線する。その後、ステレオマッチングで画像の対応点を抽出し、DSMデータとして、対象物の表面形

状を高密度データ（点群）として得ることができる。これらの点群データから 3D モデルを形成するには、TIN モデルなどの面的なデータに変換する。実際の作業は市販のソフトウェアを用いて実施する。

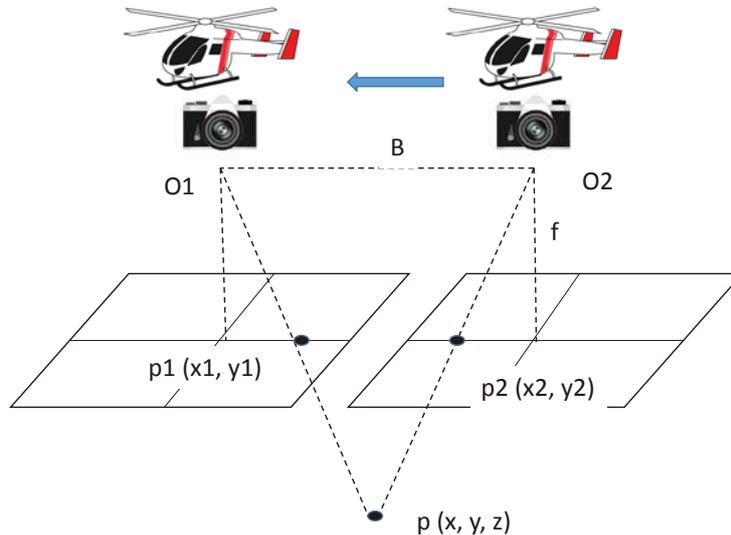


Fig. 7-1 写真測量の原理イメージ

7.3. データ取得

7.3.1. 対象エリア

対象としたエリアを Fig. 7-2 に示す。本エリアは、飯館村、浪江町、葛尾村から成る約 540 km² である。エリアの東西で、積雪の傾向は大きく変化し、西側は例年積雪の多い場所であり、東側の浪江町のエリアは積雪が少ない。ここでは、積雪のないエリアについても対象データを取得することとした。また、本エリアは本事業によって、積雪前に 600 m メッシュの放射線測定が行われている。

7.3.2. 放射線計測

Fig. 7-2 には放射線測定の測線を示す。本測線を積雪前として 2015 年 9 月 12 日より 2015 年 9 月 30 日までに放射線測定データを取得した。また、積雪後として 2016 年 2 月 8 日より 2016 年 2 月 12 日までに測定を実施した。放射線測定は、前述した器材及び解析手法を適用し、地上高さ 1 m の空間線量率に換算した。

7.3.3. 航空地形測量

航空測量データは、中日本航空株式会社の写真測量器材及びレーザ測量器材（SAKURA）を使用して取得した³⁹⁾。SAKURA は、比較的小型のヘリコプターである AS 350B に搭載し Fig. 7-2

に示す測線をフライトすることによりデータ取得した。機材の写真を Fig. 7-3 に示す。本測線を積雪前として2015年11月18日より2015年12月7日までに写真データとレーザ測量データを取得した。また、積雪後として2016年2月8日より2016年2月16日までに測定を実施した。レーザ測量のデータは写真測量の妥当性を検証することを目的としている。写真測量及びレーザ測量のデータ取得条件について Table 7-1 に示す。積雪後の航空測量データは、できる限り放射線計測と同時期 (±1 日) に実施した。

7.3.4. 地上データ取得

航空測量データの妥当性及び積雪後の放射線測定値の妥当性を確認するために、測定対象エリア内に51点の地上測定点を設定し、積雪深、密度及び空間線量率の測定を行った。設定した地上測定点を Fig. 7-2 に示す。積雪深は長尺を用いて測定し、スノーサンプラを用いて採取したサンプルの重量を測定することにより密度を算出した。空間線量率は NaI シンチレーション式サーベイメータ (日立 ALOKA 社製 TCS-171B) を使用した。スノーサンプラについて Fig. 7-4 に示す。測定は、積雪量及び空間線量率ともに、測定点周辺 10 m 以内で5点測定し測定結果を平均化した。測定の時期は、上空での航空測量データと同時期 (±1 日) に実施した。

Table 7-1 データ取得条件

項目	条件
フライト高度	450 m (対地高度)
フライト速度	28 m/s
写真シャッター間隔	3 秒
レーザ発射回数	積雪前 : 200kHz 積雪後 : 100kHz
スキャン周波数	75Hz
スキャン角度	±30°
レーザ波長	1550nm



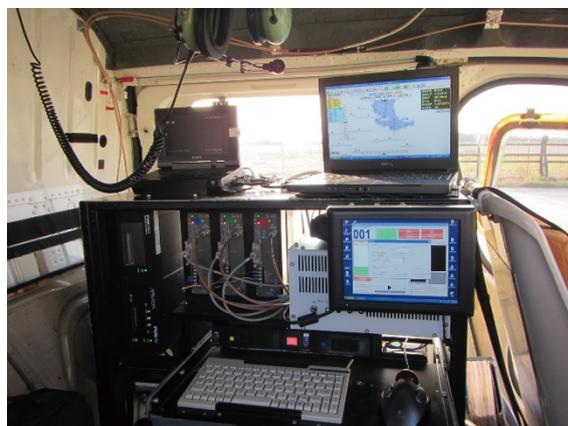
測定に使用した機体 (AS350B)



レーザ照射器材とカメラ



レーザ照射器材とカメラ (フライト後扉が開く)



データ収集装置

Fig. 7-3 測量器材の写真

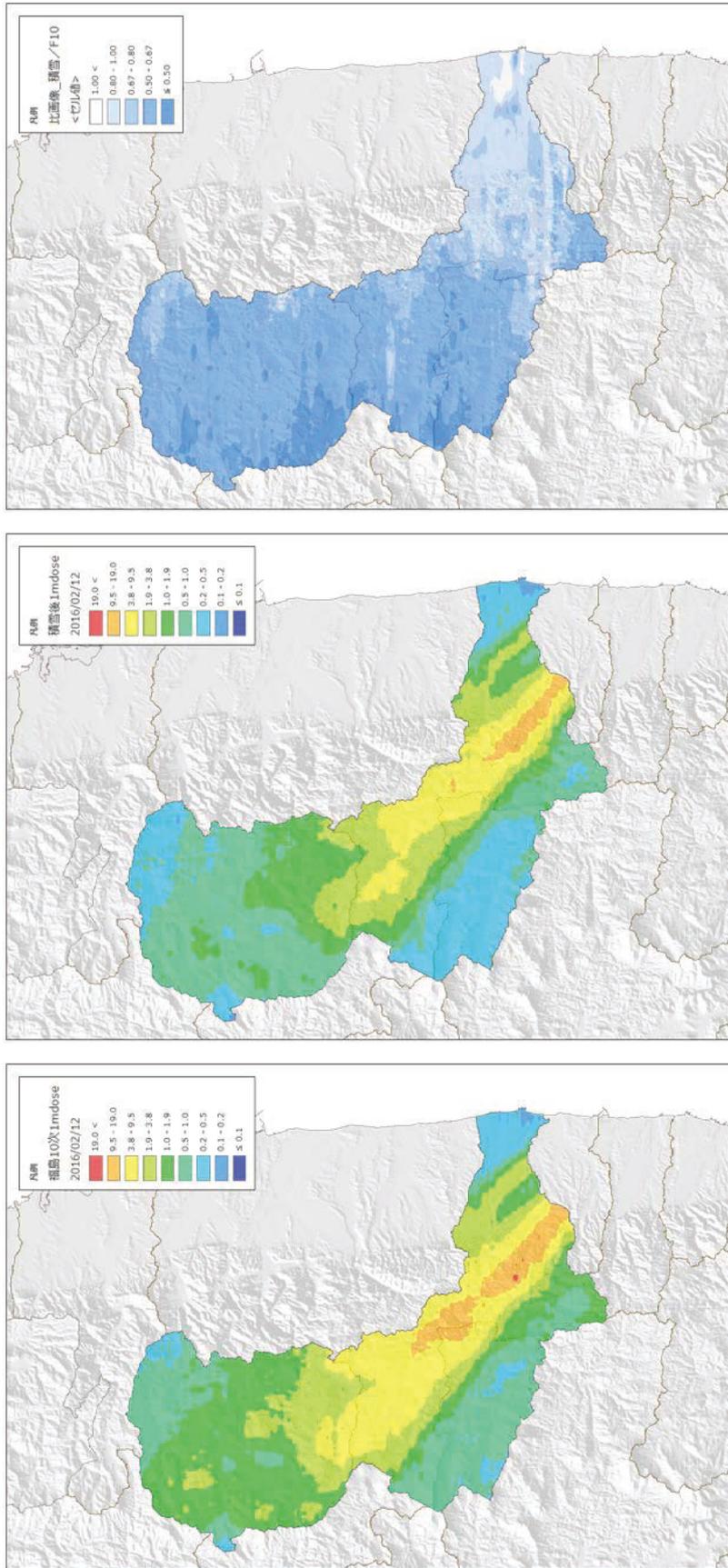


Fig. 7-4 スノーサンプリ

7.4. 結果

Fig. 7-5 に積雪前後における航空機モニタリングによる空間線量率の測定結果について示す。積雪前後の空間線量率マップを見ると、積雪が見られた測定対象エリアの西側（飯舘村、葛尾村）については、空間線量率が減少している。この傾向を明らかにするために、Fig. 7-5 (c) に示した積雪前後の空間線量率の比画像をみるとその傾向は明らかである。

Fig. 7-6 に積雪前後の地上における空間線量率の測定結果の比と積雪量の関係について示す。積雪量は、1 地点について 5 サンプル採取した平均の密度（平均積雪面密度 g/cm^2 ）として示している。平均積雪面密度と線量率の比は負の相関がみられる。同地点における航空機モニタリングによる空間線量率の測定結果の比と平均積雪面密度の関係を Fig. 7-7 に示す。しかしながら、地上測定値と航空機モニタリングの線量率比の全体の傾向は、概ね一致しているように見える。一方、航空機モニタリングの測定結果と平均積雪面密度は、明確な負の相関がみられなかった。この理由は、航空機モニタリングの測定範囲が地上の測定範囲に比べて広いため、点での測定である地上測定の結果が整合しなかったことが考えられる。



(a) 積雪前 (2016年2月12日に減衰補正) (b) 積雪後 (2016年2月12日に減衰補正) (c) 比較画像 (b)/(a)

Fig. 7-5 積雪前後における空間線量率の減衰

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンプ (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

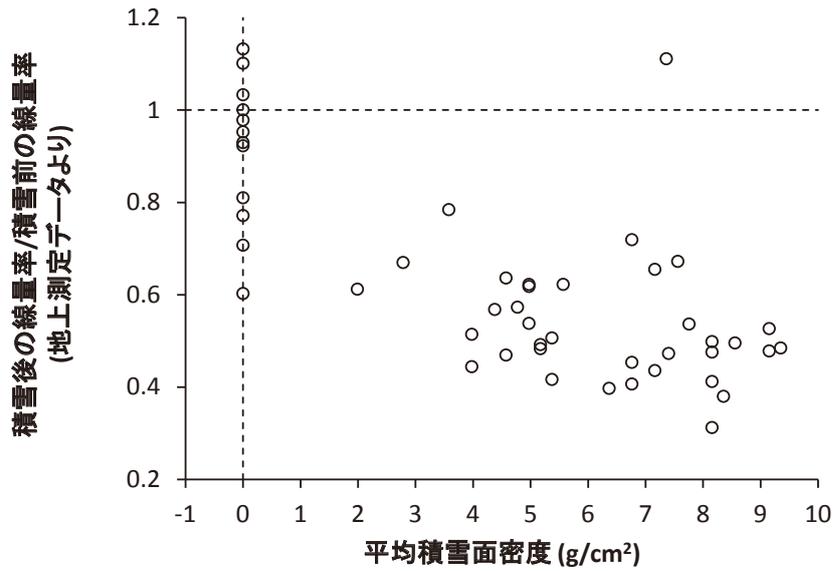


Fig. 7-6 平均積雪面密度と地上測定データによる線量率測定結果の積雪前後の比

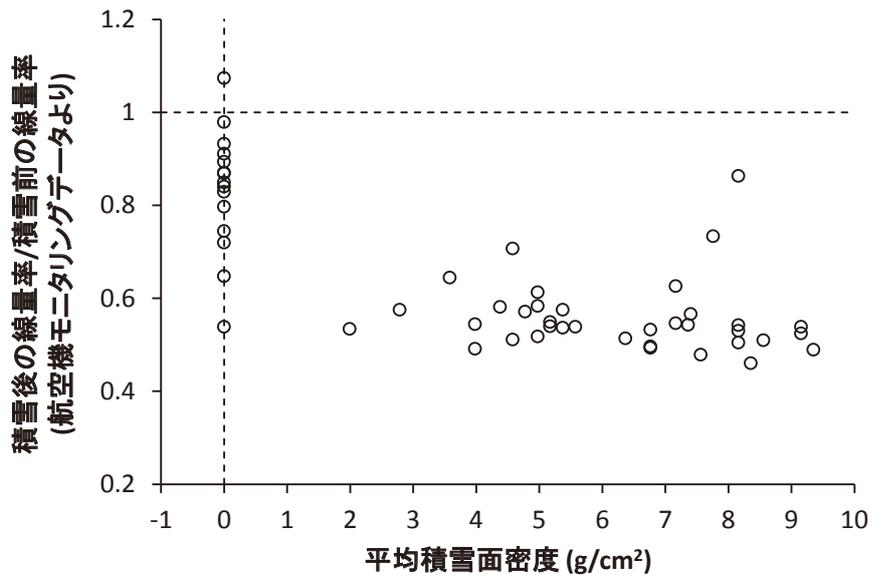


Fig. 7-7 平均積雪面密度と航空機モニタリングデータによる線量率測定結果の積雪前後の比

7.5. 放射線の減衰量と積雪深さの関係

Fig. 7-8 に写真測量データによる 3D マップの作成例について示す。このように、写真測量のデータから 1 m メッシュの点群データを作成し、積雪前後のデータの差から積雪深さを算出した。なお、写真測量の場合は、いわゆる表面モデル (以下、Ortho-DSM) であり、地上にある構造物を含めた高度の測定となる。また、レーザ測量の場合は、レーザの反射データを加工した地上の高度 (LP-DEM) である。Ortho-DSM 及びレーザ測量による積雪深のマップを Fig. 7-9 に示す。マップは、1 m メッシュの点群データを 25 m メッシュの平均値として再構成しマップ化している。マップを見ると、Ortho-DSM のデータは測定範囲全体にばらつきが生じており、特に積雪のなかった東側でも積雪がある結果となっている。一方、LP-DEM の結果は、東側で少なく西側で積雪深が深くなっており、Fig. 7-5 で示した線量率の減衰データとよく一致していることが分かる。この積雪深の測定結果の妥当性を検証するために、地上測定結果と比較した。比較結果について Fig. 7-10 に示す。Fig. 7-10 (右) に示した LP-DEM の結果はばらつきはあるものの、地上測定結果と良い整合を示した。一方、Fig. 7-10 (左) に示した Ortho-DSM の結果は地上測定の結果と整合せず、積雪後の結果が積雪前の結果より低くなり積雪深が負の値になるなどばらつきが大きい結果となった。以下、LP-DEM の結果を基に、航空機モニタリングで得られた放射線の減衰量と積雪深さの関係について考察する。

LP-DEM による積雪深と航空機モニタリングによる線量率の減衰の関係について Fig. 7-11 に示す。比較は、25 m メッシュの平均値とした航空機モニタリングのデータと積雪深データの同地点における数値を抽出し、積雪深 2.5 cm ごとの航空機モニタリングのデータの積雪前後の比の最大値、最小値及び標準偏差値を箱ひげグラフとして示した。積雪深データは、マイナスとなるデータがあるなどばらつきがあったものの、0 cm～30 cm 付近のデータは指数関数の関係がみられた。Fig. 7-12 に、0 cm～30 cm までのデータを拡大して示す。一方で、積雪深 0 cm において、線量率比は 1 付近になるはずであるが 0.7 程度となっていること、30 cm 以深のデータに指数関数の関係がみられず線量率比が一定になっていることなど、考察できないデータも見られた。

今回の結果から、積雪深さと放射線の減衰率に関係性があることは示唆されたが、当初想定していた積雪深の測定データを取得することにより、放射線の測定データを補正するための信頼性の高いデータの解析までは至らなかった。

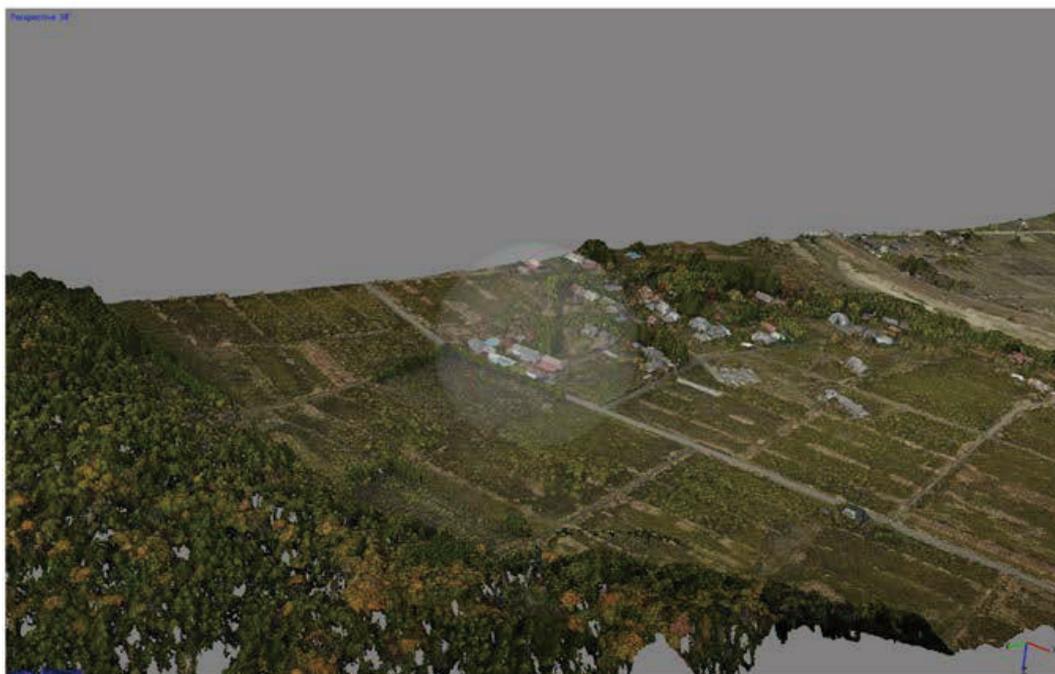


Fig. 7-8 オルソ 3D マップ例

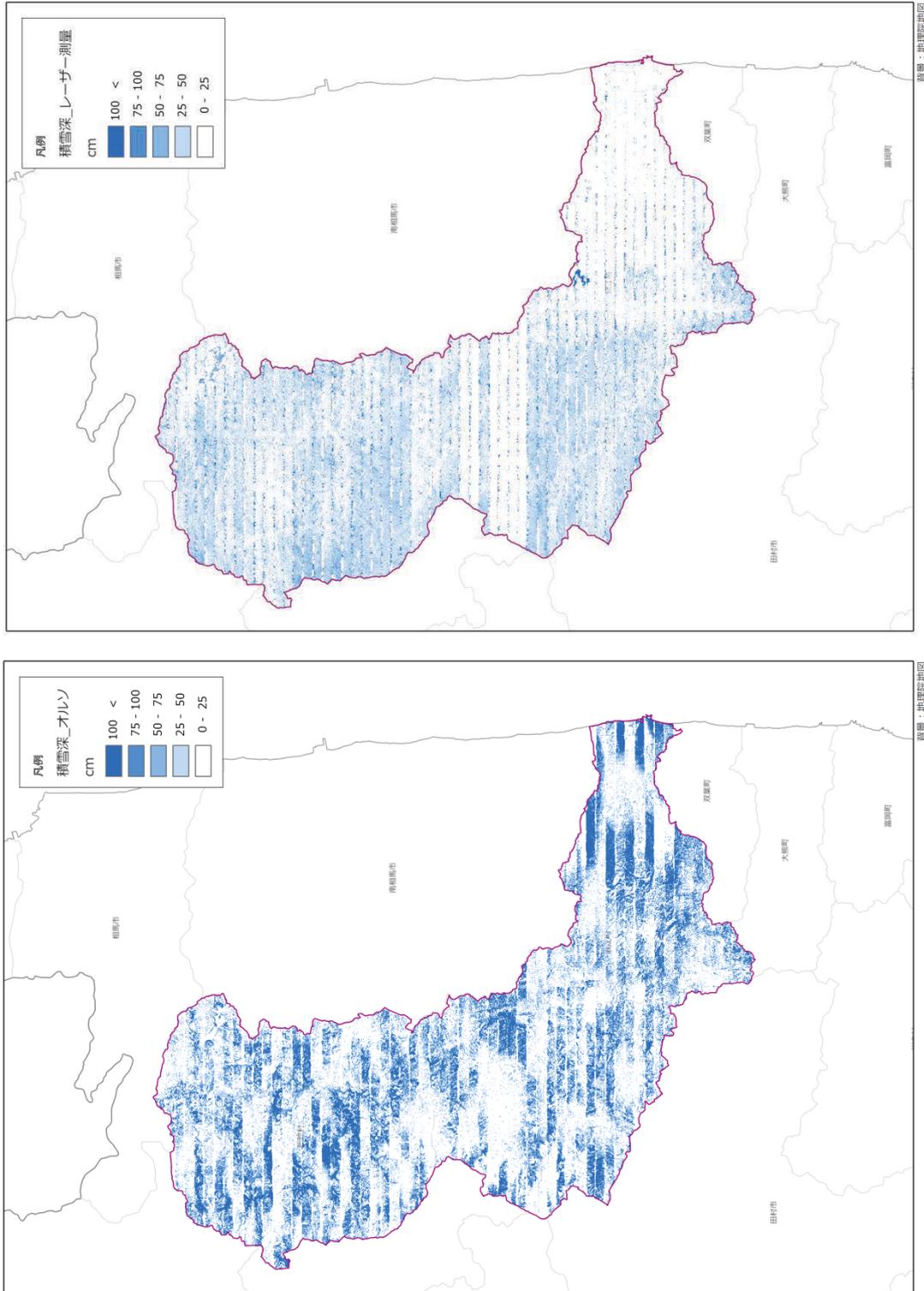


Fig. 7-9 写真測量及びLP-DEMによる積雪深マップ
(左) Ortho-DSMによる積雪深マップ、(右) LP-DEMによる積雪深マップ

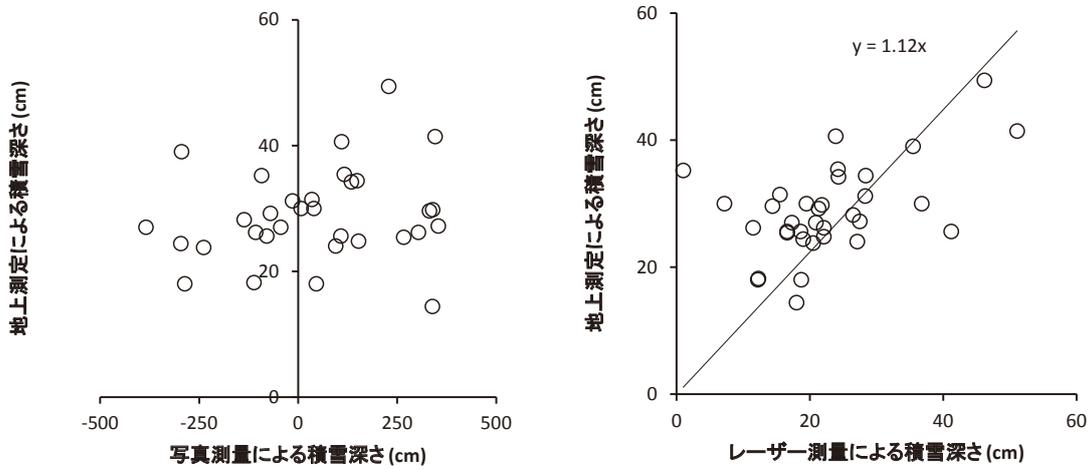


Fig. 7-10 地上測定及び航空測量における積雪深の測定結果の比較

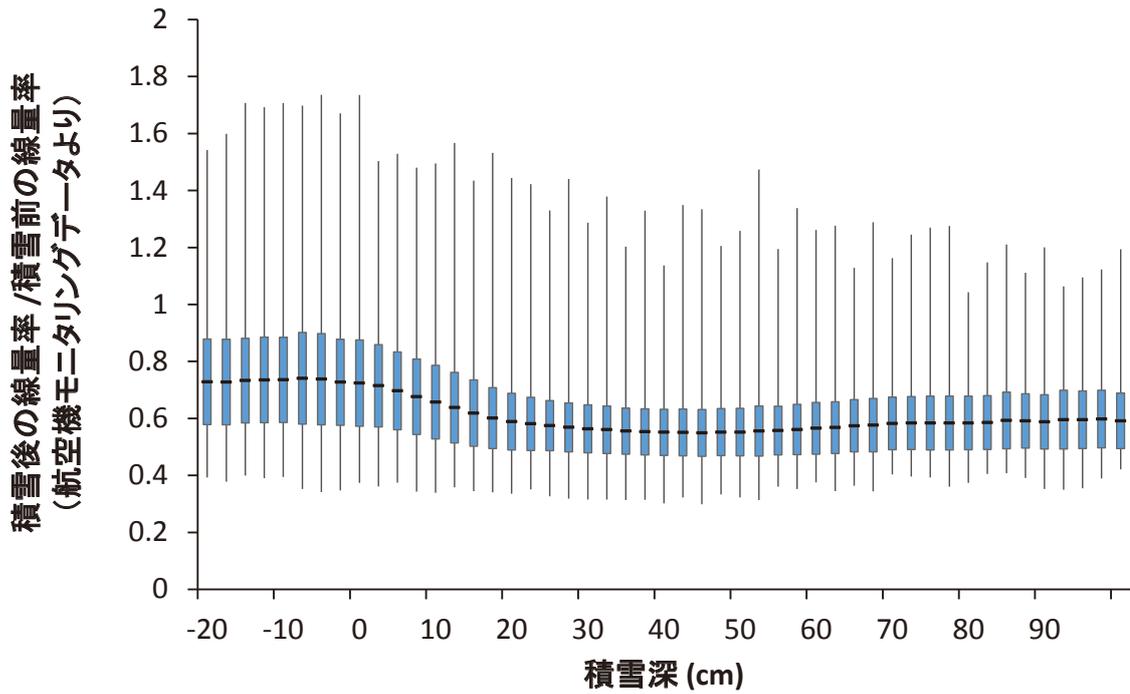


Fig. 7-11 LP-DEM による積雪深と航空機モニタリングにおける線量率比の関係

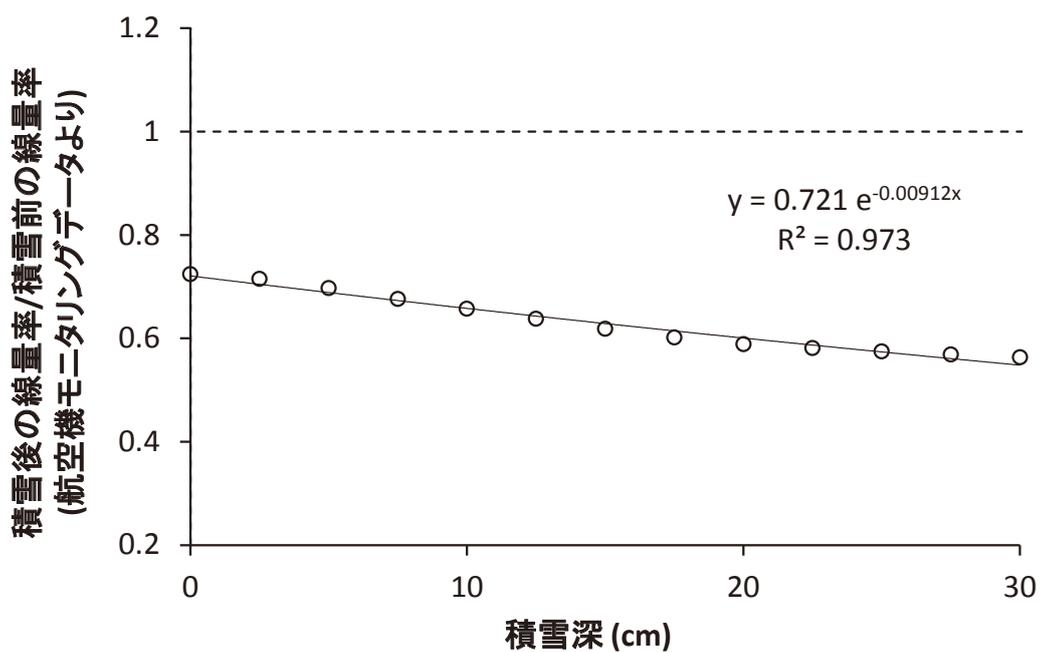


Fig. 7-12 LP-DEM による積雪深と航空機モニタリングにおける線量率比の関係
(0~30 cm 部分を拡大)

7.6. 写真測量データの精度向上のための検討

上記のように、Ortho-DSM において積雪深の測定結果は誤差が大きいことが分かった。写真測量には、地上における基準点 (Ground Control Point : GCP) を基に補正することが一般的であり、積雪後のデータの補正が不十分である可能性がある。ここでは、GCP を用いた Ortho-DSM の精度向上を検討するとともに、積雪深を計測するための問題点について考察した。

GCP には、写真測量とともに取得したレーザ測量データを利用した。代表的な 2 測線のデータについて、レーザ測量によるデータから 1 測線毎に均等な位置に 6 点 GCP を設置し、Ortho-DSM を再構築した。これらの 2 測線について、積雪前後で再構成したデータと GCP を設定しなかった場合のデータを Fig. 7-13 に示す。このように、積雪前後で大きな違いは見られない。そこで、積雪の前後のデータの差から求めた積雪深の比較について Fig. 7-13 に示す。このように、GCP 設定前の積雪深は-10 m から 10 m までばらついていたが、GCP 補正後は 0 m から 2.5 m 付近に集中していることが分かる。積雪後の測定における積雪深最大で 1 m 程度であったことから、GCP 設定後のデータは精度が向上していると考えられる。

GCP 補正後のデータと航空機モニタリングによる放射線の減衰量データを比較した。Fig. 7-14 に減衰率と積雪深さの関係を示す。このように、積雪深と減衰率に明確な関係は見られなかった。この原因を考察するために、森林や建物など地上の構造物の高度で測定データを弁別し、線量の減衰率との比較を行った。森林や建物など地上の構造物の高度は、レーザ測量で取得したデータから作成した DSM (以下、LP-DSM) と LP-DEM の差から求めることができる。高度は、0~1.0 m、1.0~5.0 m、5.0~10 m 及び 10~25 m のエリアに分けて、1m メッシュの Ortho-DSM のデータと航空機モニタリングによる減衰率を比較した。比較結果を Fig. 7-15 に示す。0~1.0 m のエリアすなわち平坦なエリアについては、減衰率 0.5 から 1 について負の相関関係がみられたが、減衰率 1 以上については平均 100 cm 程度となり不自然なデータとなっている。その他の構造物の高度のエリアについては、明確な相関関係は見られなかった。これは、森林や建物等の構造物がある場所で、積雪深を弁別するレベルでの精度が得られないことを示している。対象として、LP-DEM による測定した全領域を上記の構造物の高さ毎のエリアに分けて放射線の減衰率と比較した結果を Fig. 7-16 に示す。このように、積雪深と減衰率はどの高度エリアにおいても、負の相関関係が確認出来る。DEM は地上の森林や構造物をキャンセルし、地表面の高さをモデル化しており、この結果からは地上の森林や構造物を除いて地表面での差を見ることによって、積雪深を正確に求めることができること示している。

写真測量による積雪深の測定を検討するために、発電所近傍で積雪前後写真測量のデータ及びレーザ測量のデータを取得した。同時に実施した航空機モニタリングによる積雪前後の放射線測定データの減衰率と比較した結果、LP-DEM については減衰率と積雪深に明確な関係性が確認できた。この結果から、積雪深と放射線を同時に測定することにより、積雪後においても一定の精度で航空機モニタリングデータを補正することが可能である。一方、写真測量で製作した Ortho-DSM では、精度のよい積雪深の測定ができなかった。特に、森林や構造物があると積雪の影響よりも森林の林冠の変化やそもそも林冠には積雪しにくいことにより誤差要因が大きくなってしまふことが示唆された。

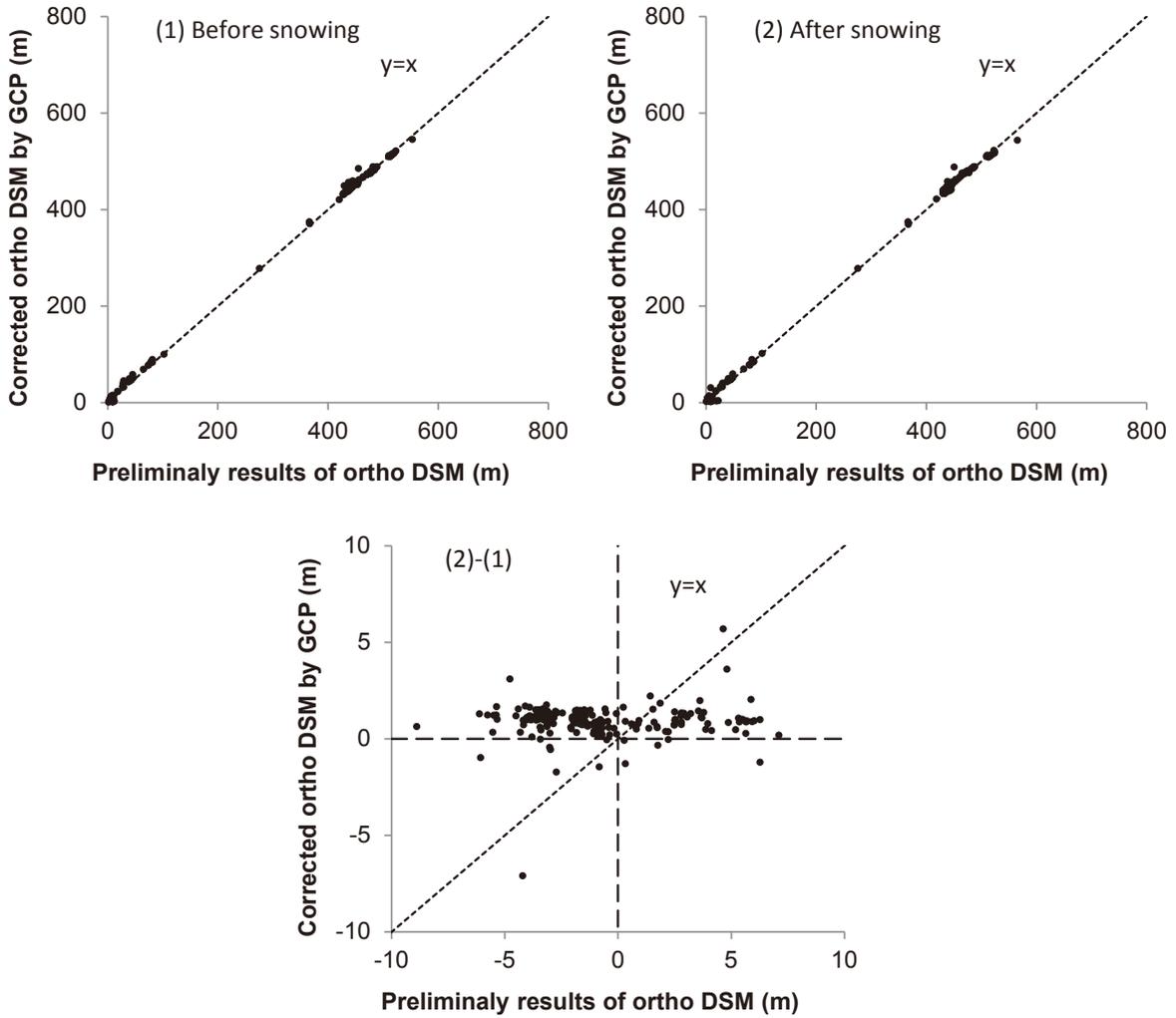


Fig. 7-13 GCP 補正前後の Ortho-DSM の比較

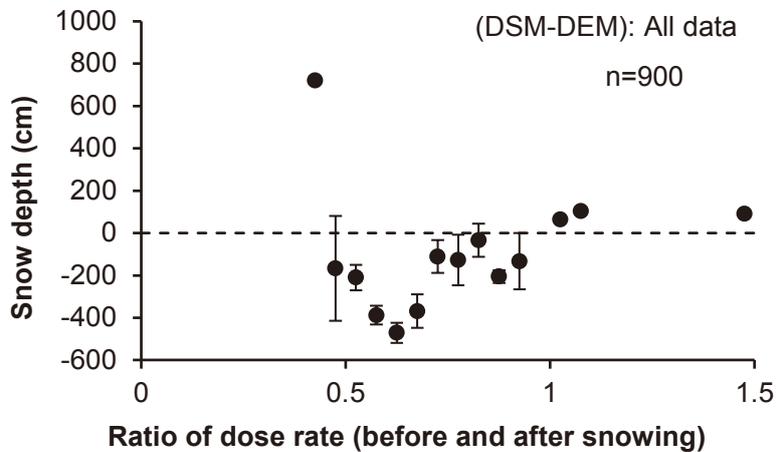


Fig. 7-14 GCP 補正後の Ortho-DSM から求めた積雪深と放射線の減衰量の関係

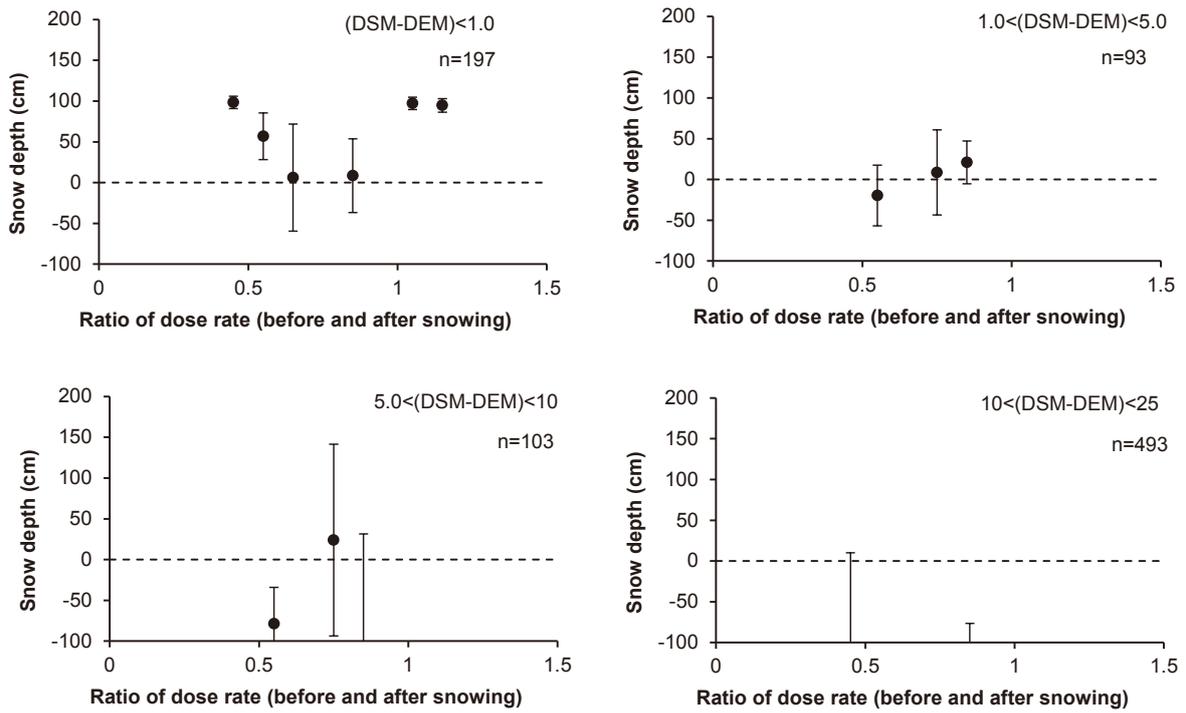


Fig. 7-15 構造物の高さ別のエリアにおける Ortho-DSM による積雪深と減衰率の関係

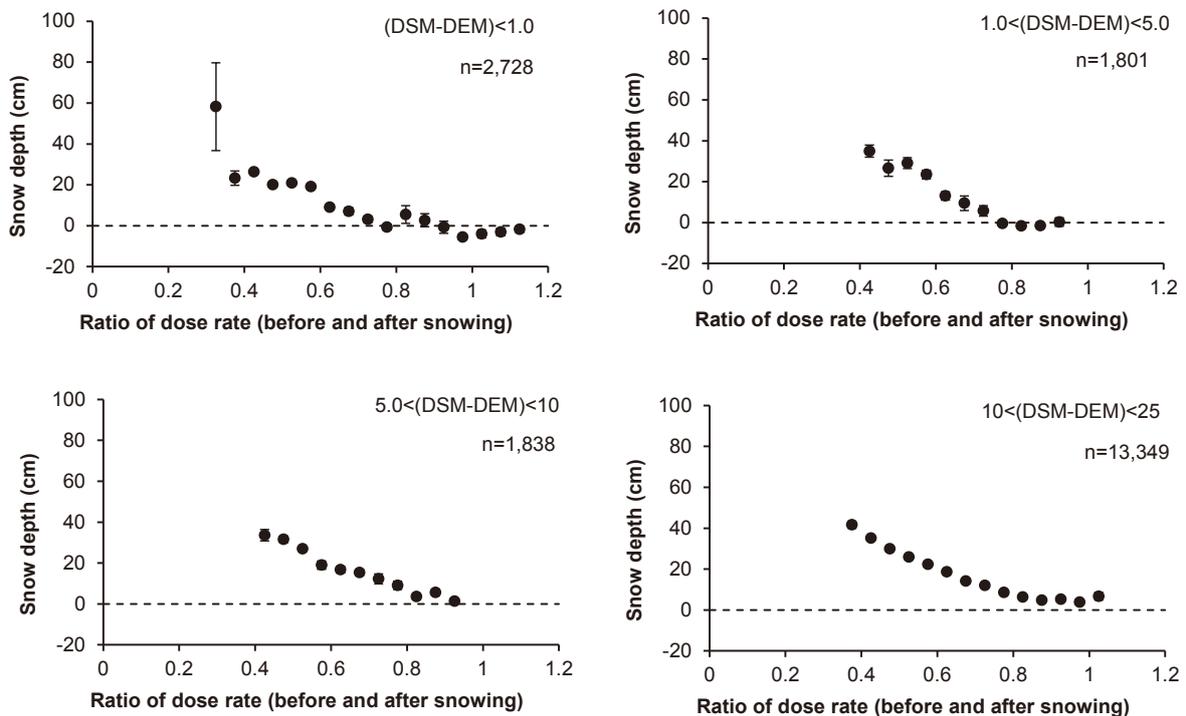


Fig. 7-16 構造物の高さ別のエリアにおける LP-DEM による積雪深と減衰率の関係

8. 空気中のラドン子孫核種の影響調査

8.1. ラドン子孫核種

地殻中に存在するウランやトリウムの変遷系列には、気体であるラドンが存在し、ラドンの一部は大気中に散逸する。Fig. 8-1 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 Rn は、Po、Pb 及び Bi などの核種（ラドン子孫核種）に変換し、大気中の微粒子に吸着して大気中を浮遊する。航空機モニタリングによる測定高度である対地 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 程度である⁴⁰⁾。これらのラドンは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⁾。これまでの航空機モニタリングの経験においても、ラドン子孫核種の影響により、航空機モニタリングの地上換算時に過大評価となる例が報告されている²²⁾。

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 8-1 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地表面の線量率換算を高精度化する検討を行った。

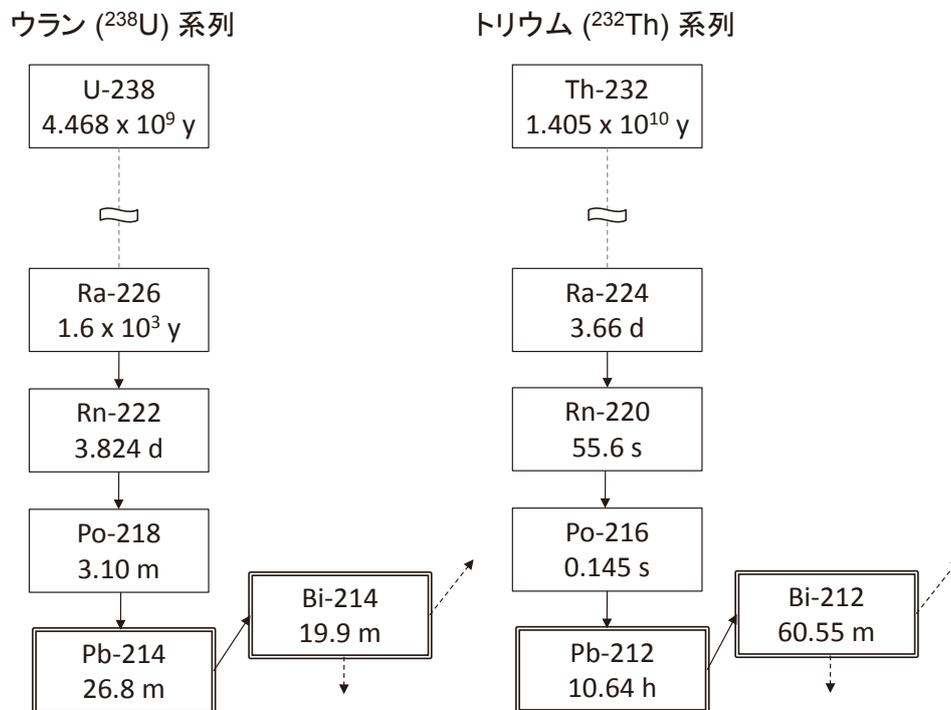


Fig. 8-1 ウラン系列及びトリウム系列

Table 8-1 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	

8.2. 地上線量率が既知の場所におけるラドン子孫核種の検出

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 子孫核種が検出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。ここでは、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ので、式 [14] 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。

$$C_{Rn} = C_{all} - BG_{self} - BG_{cos} - \left(\frac{D \times CD}{\exp(-AF \times (H_{std} - H_m))} \right) \quad [14]$$

ここで、 C_{all} : 全計数率、 BG_{self} : 自己汚染計数率、 BG_{cos} : 宇宙線による計数率、 D : 地上線量率 (μ Sv/h)、 CD : 線量率換算係数 (cps/ μ Sv/h)、 AF : 高度補正係数 (m^{-1})、 H_{std} : 基準対地高度、 H_m : フライト高度(m) である。

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について、Fig. 8-2 に示す。本鉛直分布は、式 (14) 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21日に取得したデータを見ると 300 m 付近に有意な計数率の上昇が確認できる。このような、測定日毎の最大値を抽出し、観測日とともに Fig. 8-3 に示す。なお、フライトは2機体制で行ったため、ここでは便宜上 A group 及び B group と分けてプロットした。計数率の最大値は、9月21日に観測された 336 cps であり、多くのデータは 100 cps 以下となった。ここでの最大値 336 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、

0.03 $\mu\text{Sv/h}$ 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、ラドン子孫核種は、最大で 0.03 $\mu\text{Sv/h}$ の妨害となることが示唆される。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。

このようなラドン子孫核種の影響を除去する手法を検討するため、ラドン子孫核種用検出器を用いた減算手法の検討を行った。詳細を次項に示す。

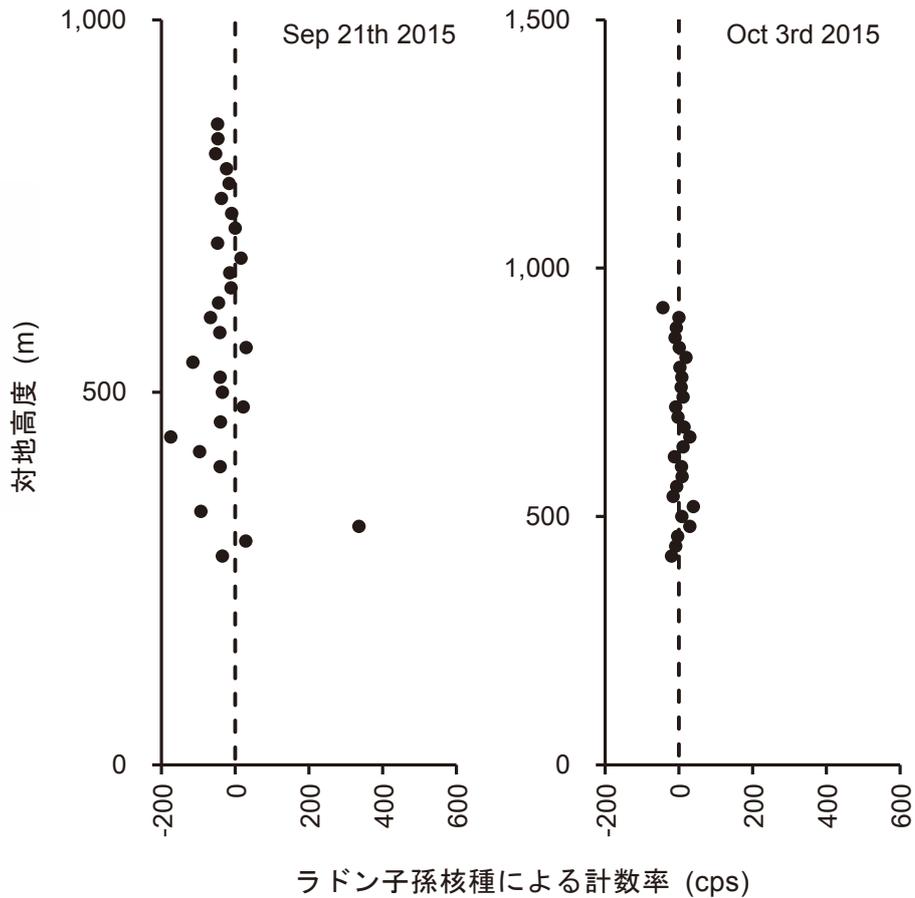


Fig. 8-2 ラドンの鉛直分布

(左) ラドン子孫核種の検出例, (右) ラドン子孫核種の不検出例

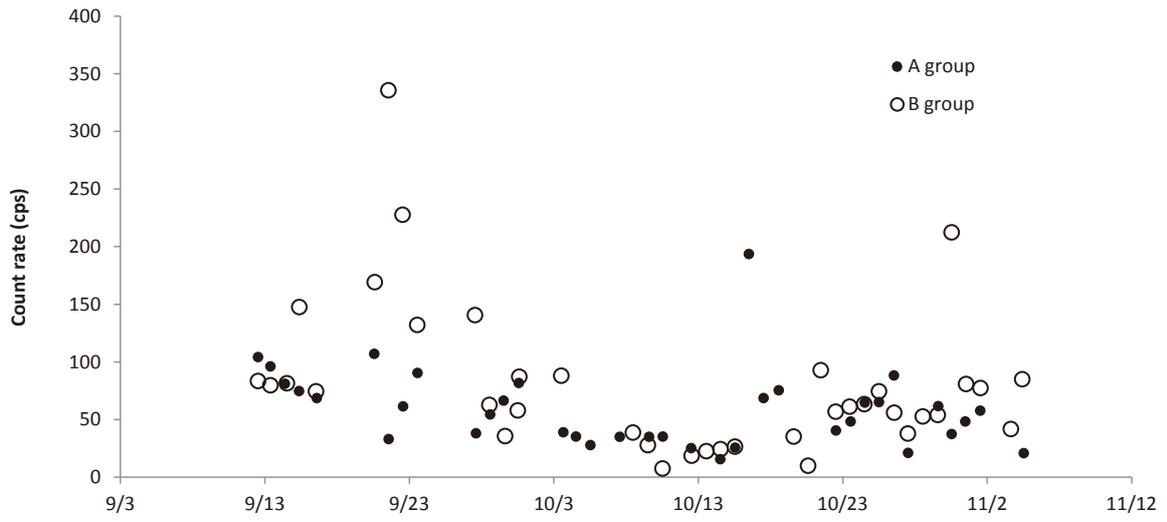


Fig. 8-3 ラドン子孫核種の日変化

8.3. ラドン子孫核種用検出器を用いた減算手法

前述したように、ラドン子孫核種は地表面にも存在することから、ガンマ線のエネルギーによって空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、 ^{134}Cs と ^{214}Bi は放出するガンマ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除去する方法として、航空機モニタリング用の検出器以外にラドン子孫核種用の検出器を搭載し、その比較からラドン子孫核種の影響を除去する方法が知られている²⁸⁾。

今回、Rn 子孫核種の影響を除去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、実際に取得したフライトデータの考察を行った。採用した LaBr RSI システムを航空機に搭載した状況について Fig. 8-4 に示す。写真のように、地上からの放射線を遮蔽することを目的とし、通常用いている NaI シンチレーション検出器 (NaI RSI システム) の上方に配置した。

フライトは、原子力発電所周辺の陸上に約 50 km の測線を 3 本設定し、300 m、450 m 及び 600 m の対地高度で 10 分ずつの測定データを取得した。また、対象データとして、海上において海拔高度 300 m で 15 分及び 300-2500 m まで直線的に上昇し 15 分のデータを取得した。設定した測線を Fig. 8-5 に示す。また、フライトの方法について Fig. 8-6 に示す。

フライト高度と放射線の計数率について、Table 8-2 に示したフライト No. 17 と No. 23 を典型的な例として Fig. 8-7 に示す。陸上のデータは、航空機に設置されている気圧高度計を目安とし、地形に合わせてフライト高度を変えて取得した。NaI RSI システムの計数率は対地高度が高くなるにつれ低くなっていることが分かる。また、海上のデータを見ると、高度が上昇するにつれ計数率が宇宙線の影響により上昇している。このデータにおけるγ線の平均スペクトルデータを Fig. 8-8 に示す。地上における NaI RSI システムのγ線スペクトルには、350 keV、600 keV、750 keV 付近にピークが確認出来る。これらは、地上の放射性セシウム及び天然の放射性核種の影響を受けていると考えられる。一方、地上の影響のない海上のデータにも同様なピークが確認出来る。これは、検出器の自己汚染及びラドン子孫核種の影響によるものと考えられる。LaBr RSI システムにおいては、LaBr の結晶に含まれる La-138 やアクチニウム系列のα線やβ線を確認出来るが、その他のピークは確認されなかった。また、低エネルギー側に地上と海上での若干の計数率の違いが確認出来る。

これらの測定データからラドンの影響を減算する手法を検討した。まず、地上の影響のない海上で取得したデータに着目した。海拔高度 300 m で取得したデータを積算し、計数率の最小値 (No. 30 データ) を機体や検出器のバックグラウンド計数率とみなし、LaBr RSI システム及び NaI RSI システムについて過剰分の計数率を Fig. 8-9 のように散布図で比較した。LaBr RSI システム及び NaI RSI システムはよい相関関係にあることが分かる。地上からの影響のない海上のデータであることから、ラドン子孫核種の影響を捉えていると考えられる。念のため、若干のフライト高度の差により、宇宙線が影響していないことを確認するために、NaI RSI システムで得られたデータの 2.8 MeV 以上の計数率と全計数率の関係を Fig. 8-10 に示す。このよう

に、データに関連性がみられないことから、Fig. 8-9 で見られた計数率の関係性はラドン子孫核種の影響を受けていると考えられる。

海上のデータと同様に、地上のデータについても解析を行った。対地高度ごとに計数率データを積算し、地上からの影響をキャンセルするために海上データと同様に計数率の最小値をそれぞれのデータから差し引くことにより算出した過剰分の LaBr RSI システム及び NaI RSI システムの計数率を Fig. 8-11 にプロットした。どの高度においても、LaBr RSI システム及び NaI RSI システムはよい相関関係にある。特に、地上からの影響がほとんどないと考えられる対地高度 600 m のデータでも相関がみられ、近似直線の傾きは海上で取得したデータと概ね一致した。一方、300 m 及び 450 m のデータに相関関係は見られたものの、近似直線の傾きは海上のデータと比較して大きくなった (NaI の方が大きい)。これは、地上からの放射線に対する LaBr RSI システム及び NaI RSI システムの計数率の比と大気中のラドン子孫核種に対する LaBr RSI システム及び NaI RSI システムの計数率の比の違いが反映されていると考えられる。すなわち、LaBr RSI システム及び NaI RSI システムの計数率の比から、ラドン子孫核種の影響が全計数率から差し引けることになる。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除去した 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(=33.0= N_g/L_g): Fig. 8-11 に示した対地高度 300 m における 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(=26.6= N_r/L_r): Fig. 8-9 に示した海上における海拔高度 300 m における 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

とした。

今回実際に取得したデータに式 [17] を用いて実際に減算を試みた。減算には、地上における測線 (Land_3) において、対地高度 450 m でフライトし取得したデータを用いた。なお、式 [14] に当てはめ N_g が負の数値になった場合には 0 として処理した。減算前後の NaI RSI システムの全計数率について Fig. 8-12 に示す。減算前の 19 フライトにおけるデータの平均値は、 $1,914 \pm 206$ cps であったが、減算後 $1,822$ cps \pm 163 cps となった。なお、これらのフライトデータはできる限り、同じ測線、同じ高度でフライトを実施したが、天候条件により若干の誤差が

生じており、フライトデータにも影響が出ていると考えられる。また、今回約 10 分程度の測定データの積算から減算方法を検討したが、実際の航空機モニタリングのデータ取得条件は 1 秒毎であること及びデータの量も大量であることから、適用には更なる検討とシステム化が必要であると考えられる。

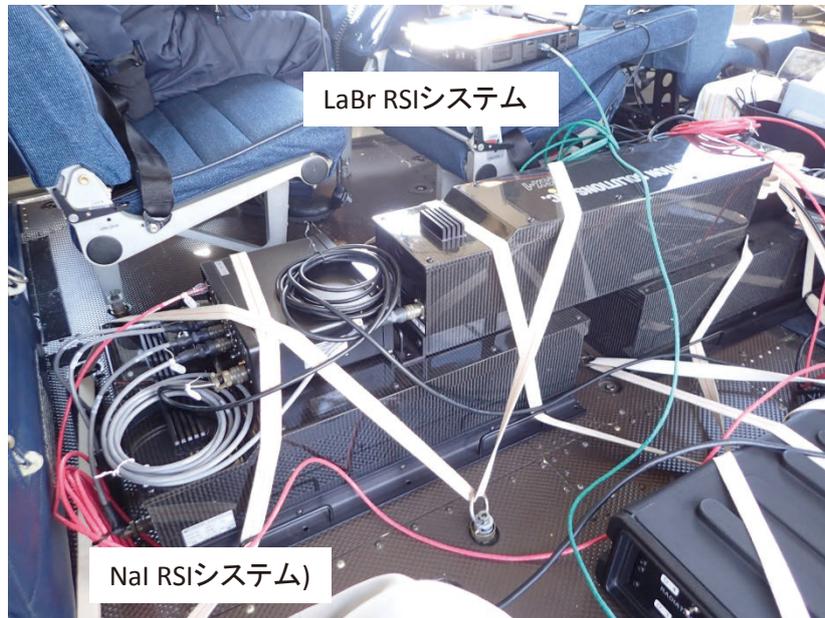


Fig. 8-4 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況

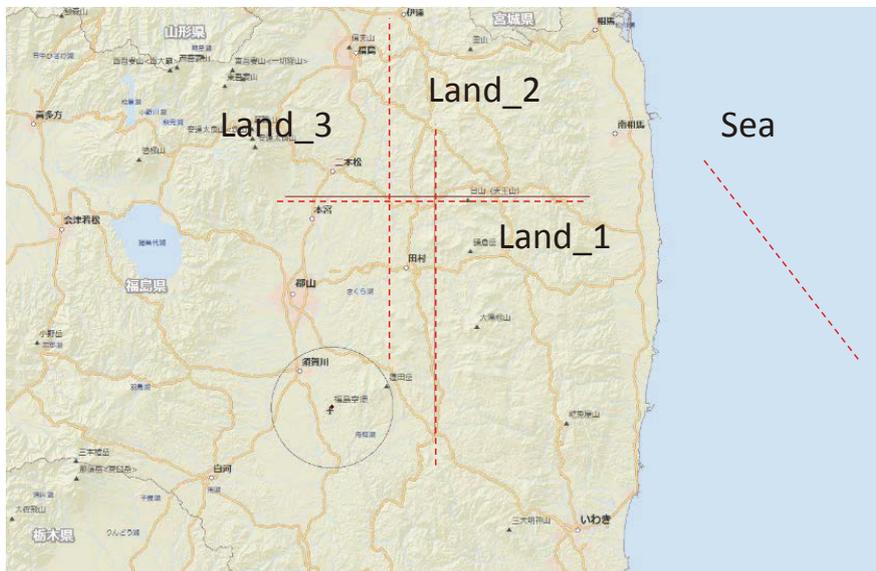


Fig. 8-5 測線マップ

(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)

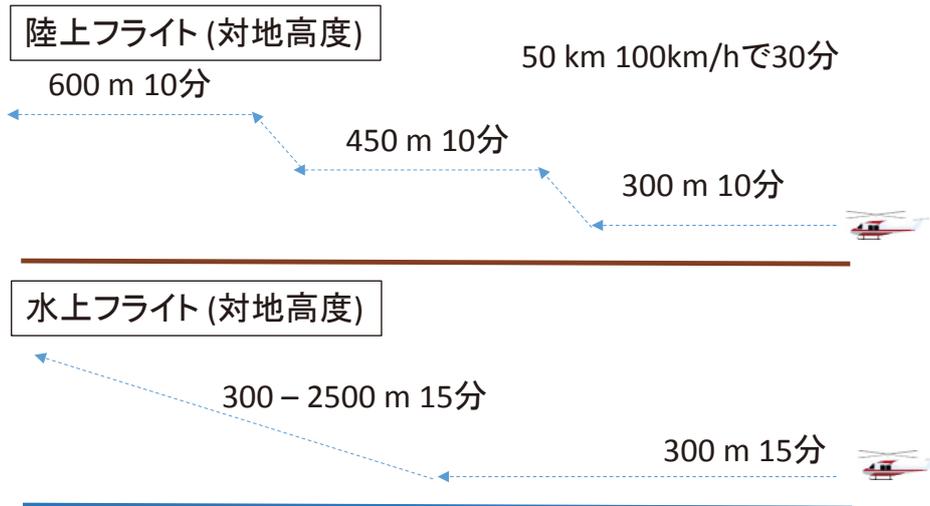


Fig. 8-6 フライト方法

Table 8-2 フライト一覧

No	Area	Data	Start time	Stop time
1	Land_1	20160126	10:16	10:44
2	Sea	20160126	10:47	11:05
3	Land_2	20160126	14:12	14:49
4	Land_2	20160127	9:59	10:31
5	Land_1	20160127	14:06	14:38
6	Land_2	20160128	9:59	10:31
7	Land_2	20160128	12:08	12:40
8	Land_3	20160210	11:33	12:06
9	Land_3	20160211	10:16	10:48
10	Sea	20160211	10:59	11:30
11	Land_3	20160211	14:47	15:19
12	Land_3	20160212	10:18	10:49
13	Land_3	20160212	13:55	14:26
14	Land_3	20160213	10:01	10:32
15	Land_3	20160213	13:49	10:21
16	Land_3	20160216	9:58	10:29
17	Sea	20160216	10:41	11:14
18	Land_3	20160216	14:43	15:14
19	Land_3	20160217	14:00	14:34
20	Sea	20160217	14:42	15:14
21	Land_3	20160218	9:56	10:28
22	Land_3	20160218	12:09	12:41
23	Land_3	20160218	14:21	14:53
24	Land_3	20160219	9:51	10:22
25	Land_3	20160219	12:30	13:01
26	Land_3	20160219	14:42	15:13
27	Land_3	20160220	9:40	10:12
28	Land_3	20160220	11:49	12:21
29	Land_3	20160221	10:07	10:39
30	Sea	20160221	10:50	11:20

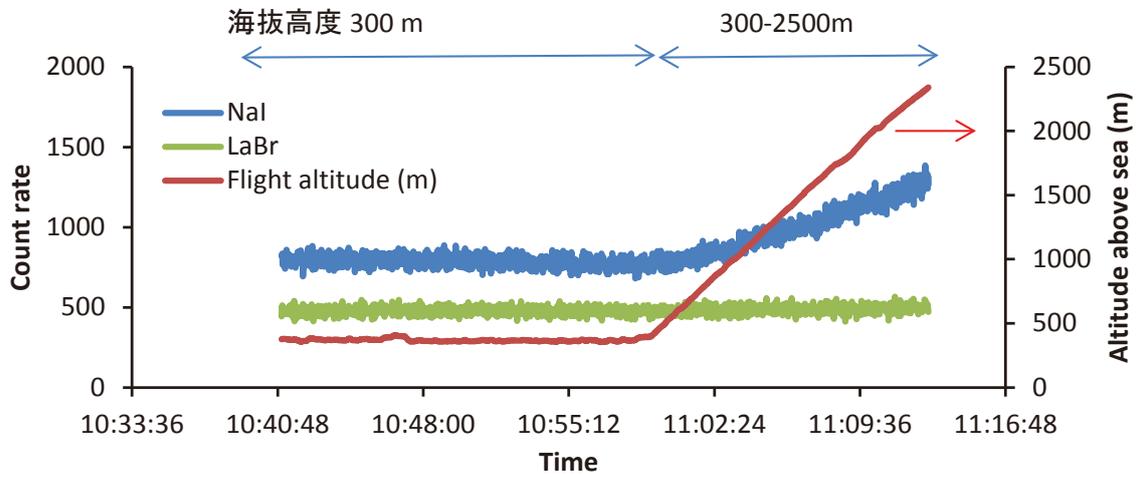
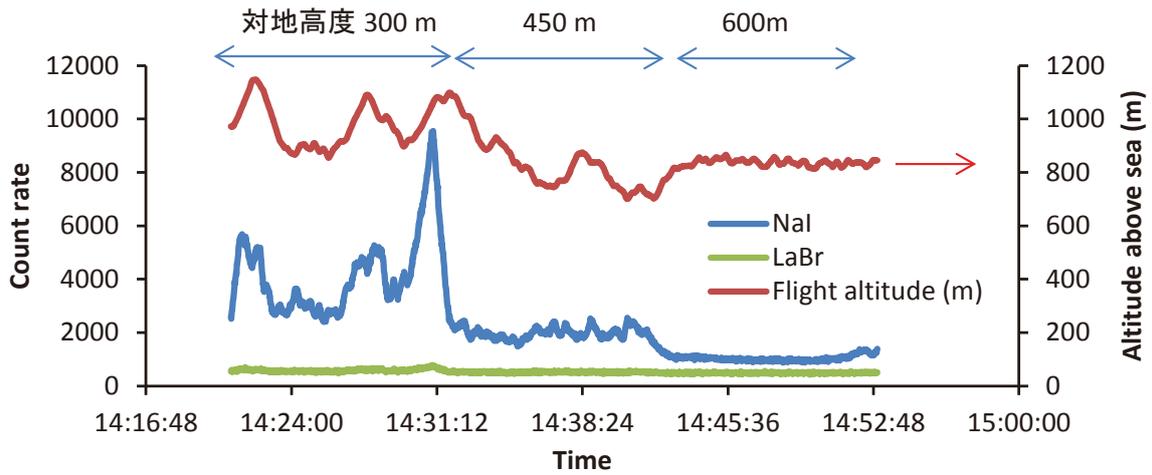


Fig. 8-7 フライトと高度の関係
 (上) 陸上データ No.23、(下) 海上データ No.17

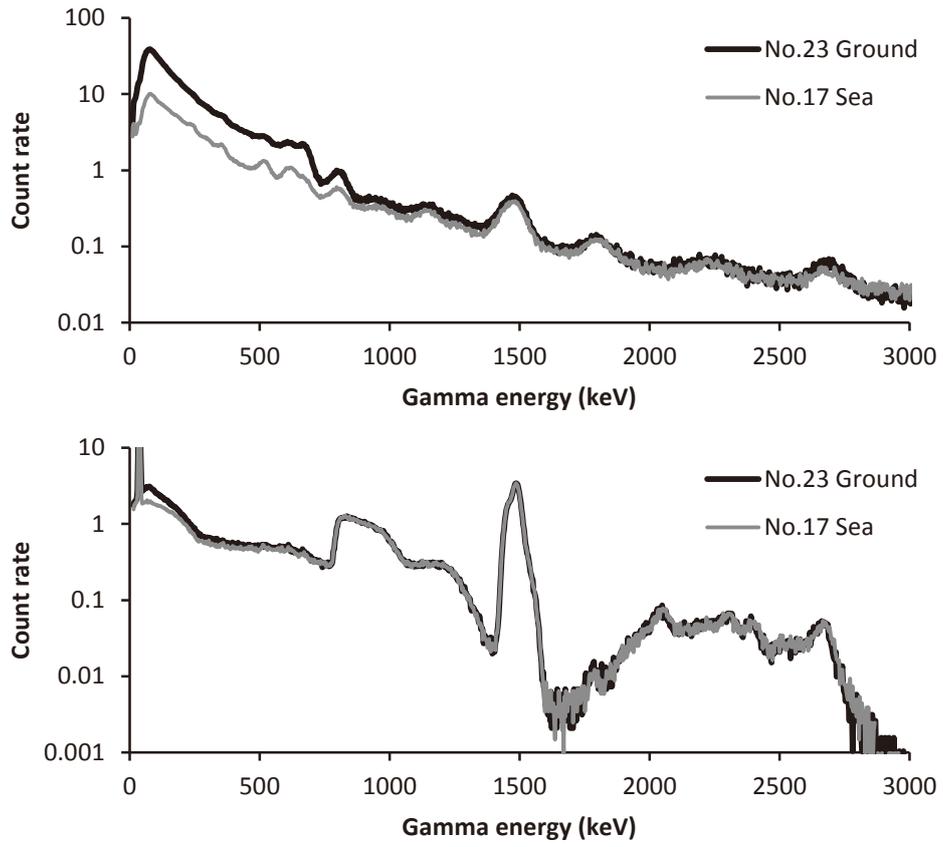


Fig. 8-8 取得したスペクトル例(測線上の30分データの平均値)
 (上) NaI RSI システム、(下) LaBr RSI システム

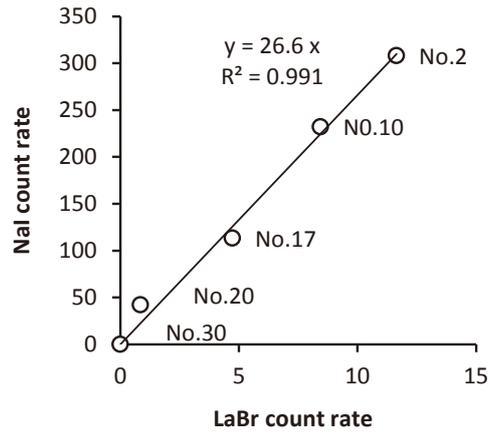


Fig. 8-9 海上で取得したデータ (海拔高度 300 m) における NaI RSI システムと LaBr RSI システムの全計数率の関係

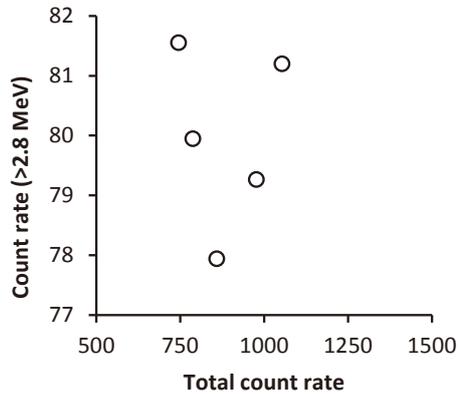


Fig. 8-10 海上で取得した NaI RSI システムのデータ (海拔高度 300 m) における全計数率と 2.8 MeV 以上の計数率の関係

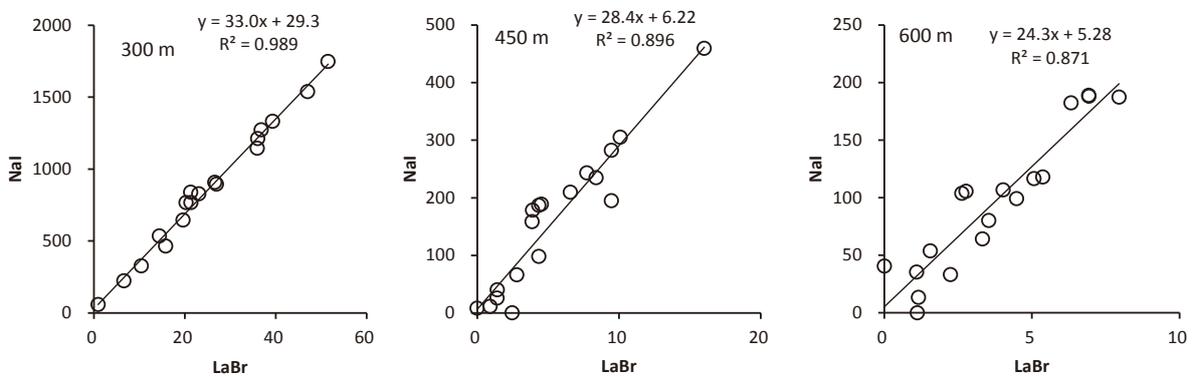


Fig. 8-11 陸上で取得した NaI RSI システムと LaBr RSI システムの全計数率の関係

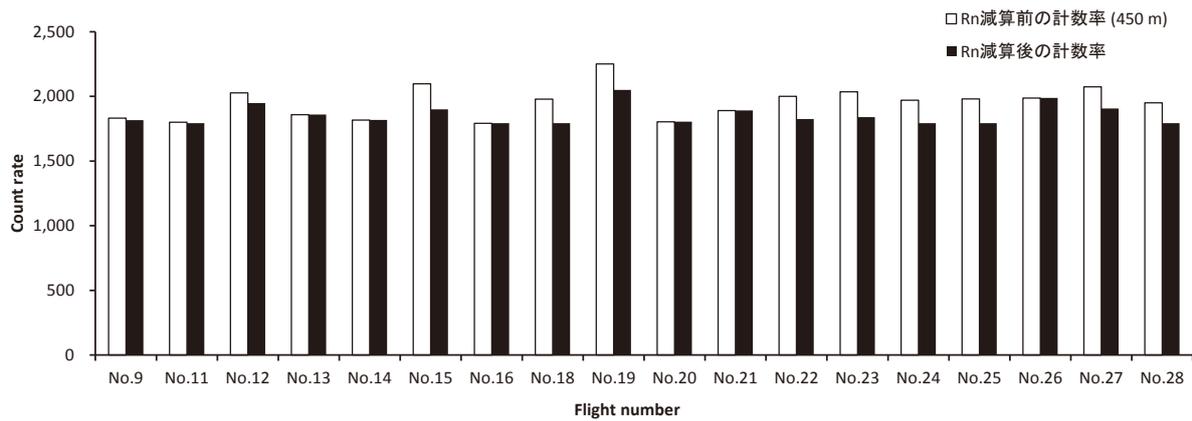


Fig. 8-12 Rn 減算前後の計数率

9. 九州電力川内原子力発電所におけるバックグラウンドモニタリング

9.1. はじめに

原子力機構では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に起因した東京電力福島第一原子力発電所事故の周辺環境における放射性物質の分布調査を行うために、有人のヘリコプターを用いた航空機モニタリング技術の開発を行っている。事故から5年経過し、継続的な航空機モニタリングを実施しつつ、手法の改善及び体制の整備を行ってきた¹⁰⁻¹⁴⁾。

今回の福島原子力発電所事故における教訓を踏まえ、原子力防災のツールとして航空機モニタリングを生かすために、事故時の対応における位置づけ、機器の恒久的な管理体制の維持及び技術の継承等の課題があると考えられる。事故後整備された原子力災害マニュアルには、航空機モニタリングに関し下記のように定められている⁴²⁾。

第2 関係省庁における対応要領

第1 編事態毎の組織・応急対策業務

第4 章全面緊急事態

(1) 緊急時モニタリングの実施業務

② 緊急時モニタリングの実施・支援

「ERC チーム放射線班は、原子力事業所周辺以外の広範囲にわたって事故の影響が懸念される場合には、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と連携して航空機モニタリングを実施するとともに、必要に応じてモニタリングカーによる測定や環境放射能水準調査の結果等を活用して、汚染の状況を把握する。自衛隊等の関係機関は、航空機モニタリングに対して ERC チーム放射線班からの調整があった場合には、必要に応じて、対応可能な範囲内で、航空機によるモニタリング支援を行う。」

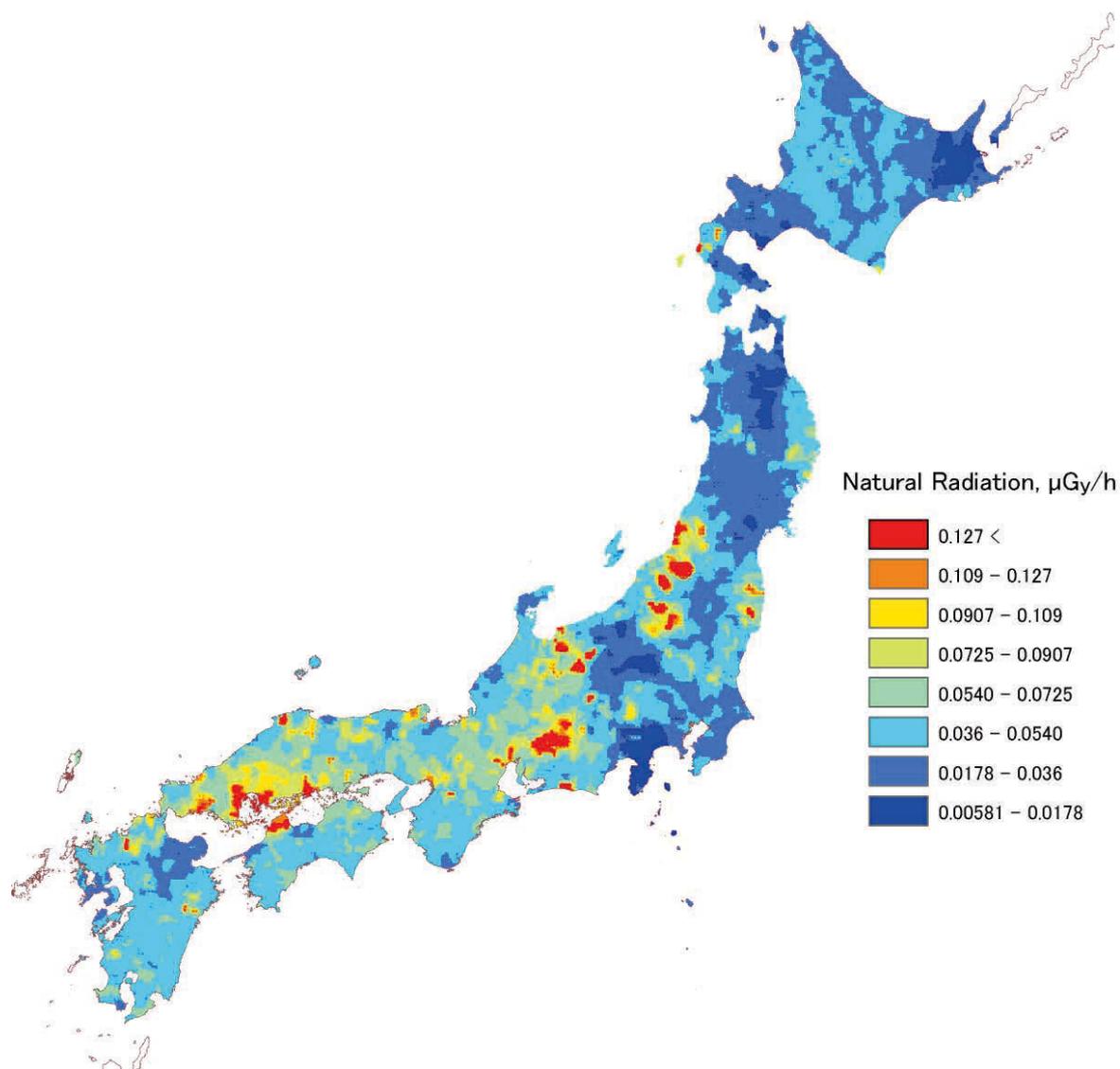
一方、実際の原子力災害を想定した場合に、フライトするタイミングやフライトする体制等事故前に決定しておく必要がある。特にフライトするタイミングについては、原子力災害対策指針⁴³⁾に定められている防護措置の実施の判断基準 (OIL: Operational Intervention Level) を踏まえて位置づけられることが望ましい。Table 9-1 に原子力災害対策指針における OIL について示す。また、機能的・効率的にフライトするには、事前に想定される地域を訓練として実際にフライトし、地域的な特性（飛行場から原子力発電所までの距離及び事故発生、フライト開始までの最短時間評価及び地形等フライト時の懸念事項）を抽出しておくことが望ましい。さらに、航空機モニタリングのデータを解析して情報を公表するまでの時間についてもシミュレーションしておく必要がある。

現在、東京電力福島第一原子力発電所事故の周辺環境で行っているモニタリングは、周辺環境に沈着した放射性セシウムから放出されるγ線の測定を目的としている。放射性セシウムの影響が天然放射性核種からの影響に比べて比較的高い場所を測定する場合には、天然放射性核種は無視できるが、東京電力福島第一原子力発電所事故よりも比較的小さな事故を想定した場合は天然放射性核種の影響を考慮しなければならない。事故以前に測定・推定された天然の放射性核種由来の線量率分布をみると、西日本で高い傾向にあり、最大 0.13 μGy/h 程度の場所もあるとされている⁴⁴⁾。地質学会の HP に掲載されている地殻中に存在する元素の濃度分布か

ら空間線量率を計算で求めた結果について Fig. 9-1 に示す⁴⁵⁾。例えば、このようなバックグラウンドは、Table 9-1 に示した OIL 6 を実施するための基準となる 0.5 μ Sv/h を測定する場合には、無視できない大きさである。バックグラウンドは、 γ 線エネルギースペクトルから除去する手法が考えられるが、スペクトル弁別には計数を一定程度蓄積する必要があり、一般的に時間がかかる。一方、事前にバックグラウンドを調査しておくこと、実際の事故時に迅速かつ正確にバックグラウンドを減算することができる。また、事前にフライトしておくことによって、地域特有の航空管制の情報、空港の使用方法及び山間部等のフライト上の危険個所の抽出等メリットが多い。今年度、鹿児島県にある九州電力川内原子力発電所周辺におけるバックグラウンドモニタリングを実施したので報告する。

Table 9-1 原子力災害対策指針における OIL

	基準の種類	基準の概要	初期設定値		
緊急防護措置	OIL1	住民等を数時間以内に避難や屋内退避等させるための基準	空間線量率 500 μ Sv/h (地表面から1m高さ)		
	OIL4	除染を講じるための基準	(β) 40,000 cpm 皮膚から数cm, 入射窓20 cm ² (β) 13,000 cpm 1月後の数値		
早期防護措置	OIL2	住民等を1週間程度内に一時移転させるための基準・地域生産物の摂取を制限	空間線量率 20 μ Sv/h (地表面から1m高さ)		
飲食物摂取制限	OIL3 (飲食物に係るスクリーニング基準)	飲食物中の放射性核種濃度測定を実施すべき地域を特定する際の基準	空間線量率 0.5 μ Sv/h (地表面から1m高さ)		
	OIL6	飲食物の摂取を制限する際の基準	核種	飲料水等 (Bq/kg)	食物等 (Bq/kg)
			放射性ヨウ素	300	2,000
			放射性セシウム	200	500
			ウラン	20	100
		プルトニウム	1	10	



**Fig. 9-1 地殻中に存在する元素の濃度分布から空間線量率を計算で求めた結果
(地質学会ホームページより⁴⁵⁾)**

産業技術総合研究所地質調査総合センター,

<https://gbank.gsj.jp/geochemmap/setumei/radiation/setumei-radiation.htm>,

クリエイティブ・コモンズ・ライセンス表示 2.1 (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.1/jp/>)

9.2. モニタリングの方法

9.2.1. 測線の設定

データは、下記のようなフライト条件で取得した。このフライト条件は、気象条件や地形の高度勾配によって若干変化する。測定データは、1秒ごとにGPSの位置情報と検出器の γ 線のスペクトルを記録した。Fig. 9-2にフライトの予定測線について示す。基本的なフライト条件は福島でのモニタリングと同一とし、測線の間隔は5 kmとした。

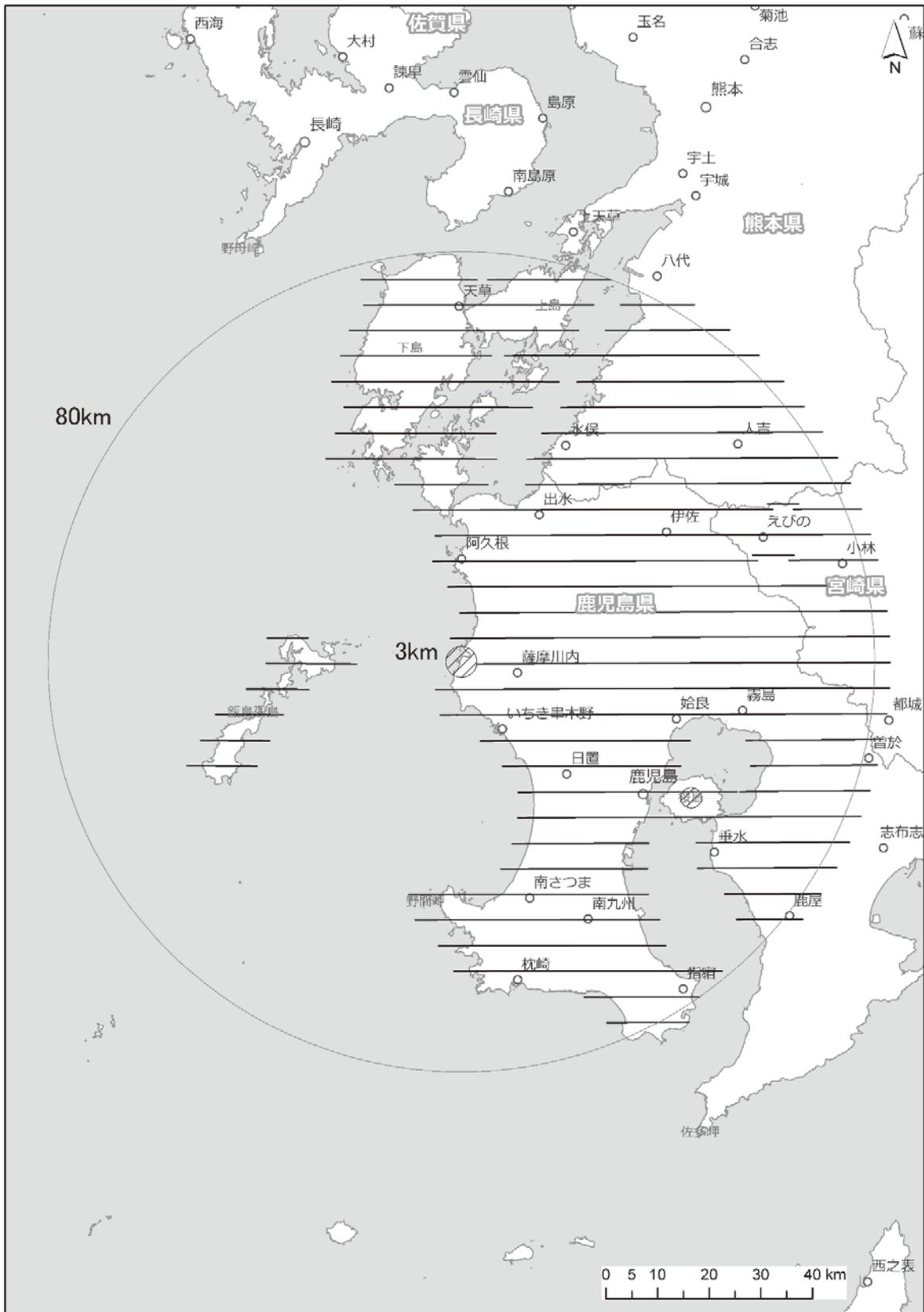


Fig. 9-2 予定したフライトの測線

(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)

9.2.2. 解析手法

解析の手法は基本的には、福島でのモニタリングと同一であるが、天然の放射性核種に特有の部分について記述する。

福島におけるモニタリングとバックグラウンドのモニタリングで大きく異なるのは放射性セシウムがないことである。Fig. 9-3 に地上及び海上の γ 線スペクトル例を示す。

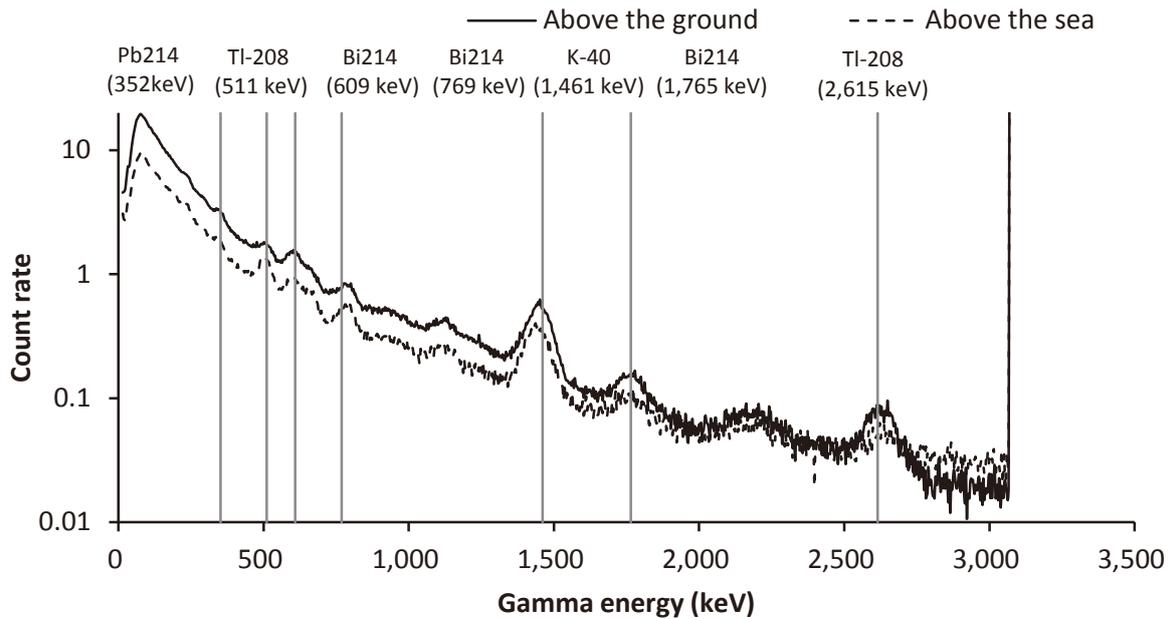


Fig. 9-3 RSI システムにおける地上で取得した γ 線スペクトルと海上でのスペクトル例

9.2.3. 解析パラメータ

バックグラウンドの測定においては、放射性セシウムの影響がないので平均的な γ 線のエネルギーが異なることにより、地上値への換算パラメータも数値に差が出る。測定にあたって、測定エリア内にテストライン及びテストポイントを設定し、キャリブレーションを実施した。キャリブレーションの場所について、Fig. 9-4 に示す。4.3.節に示した高度補正のためのキャリブレーションフライトを実施した結果例について Fig. 9-5 に示す。このようなフライトを2回実施し、Fig. 9-5 に示した高度と計数率の関係に対し近似した指数関数の傾きの平均値を AF とした。数値について、Table 9-2 に示す。

また、CD については、福島でのモニタリングと同様に地上で測定した線量率と対地高度 300 m におけるホバリングで得られた RSI-3 の計数率との比から求めた。地上測定の結果を Fig. 9-6 に、計算した CD を Table 9-2 に示す。

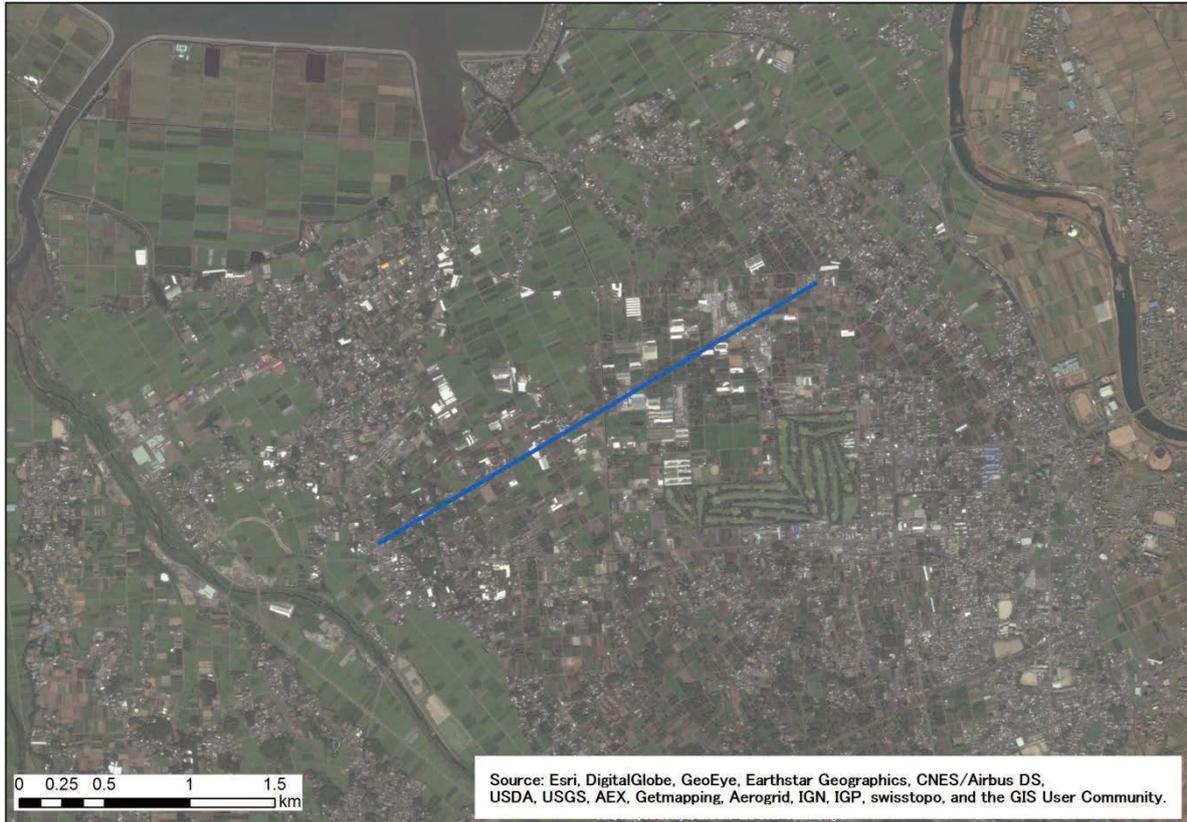


Fig. 9-4 テストライン及びテストポイントの場所
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

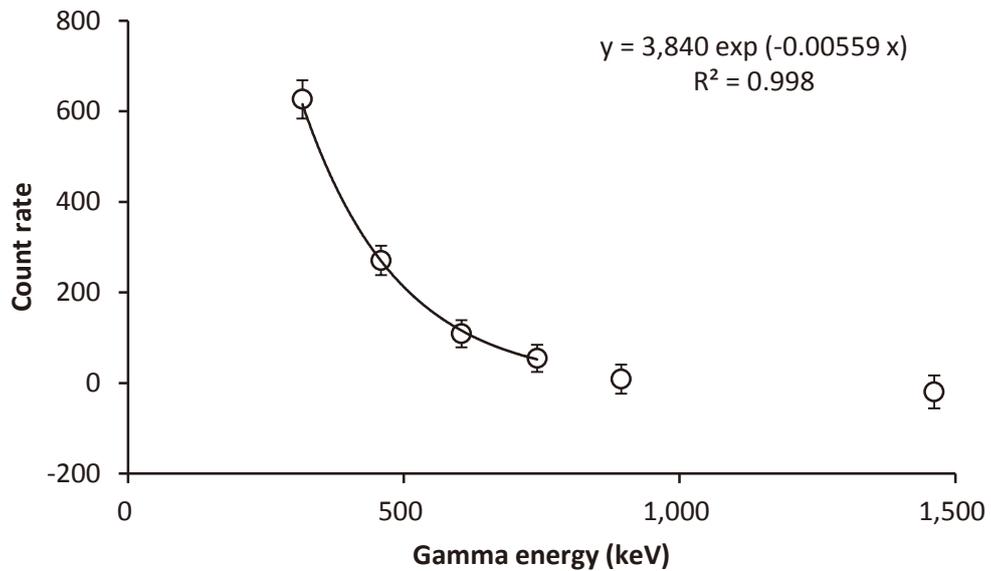


Fig. 9-5 対地高度と計数率の関係例
 (誤差は1秒ごとのデータの標準偏差, Bell 412 JA6928, 2016/2/2 実施, Test line)

Table 9-2 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	
Sendai	AF (m-1)	-0.0065		2			
	CD (cps/ μ Sv/h)	10600		2			
Fukushima	AF (m-1)	-0.0072 \pm	0.00047	21	-0.00723 \pm	0.000402	35
	CD (cps/ μ Sv/h)	10900 \pm	2100	42	12800 \pm	2800	65

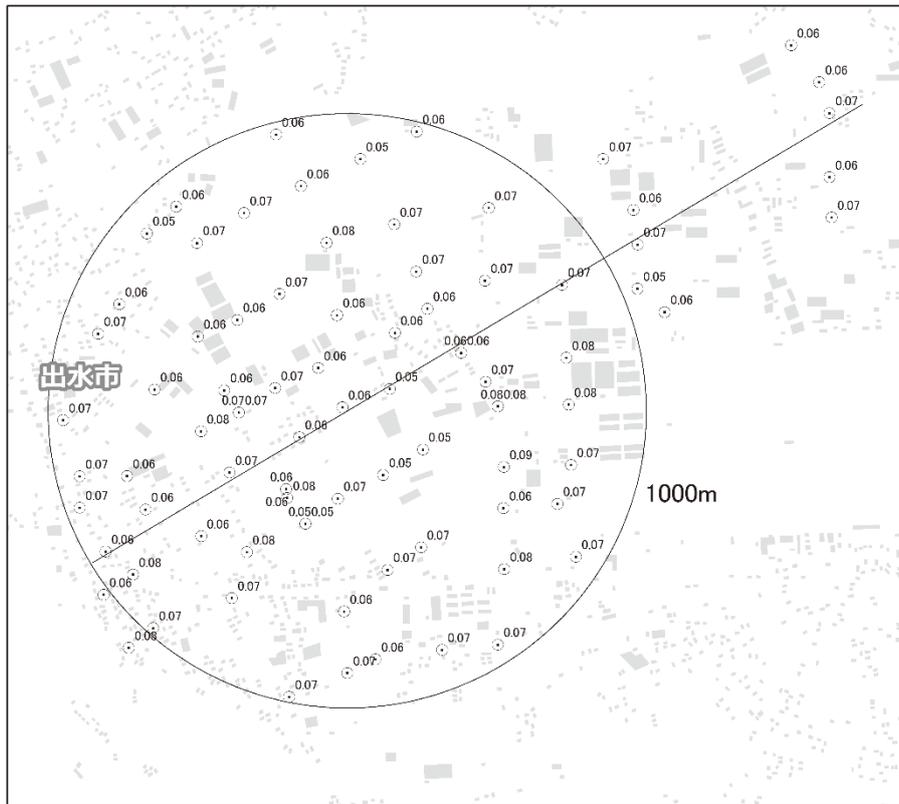


Fig. 9-6 地上測定データ

9.2.4. 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。測定した地上の測定点について Fig. 9-7 に示す。

航空機モニタリングによる換算値と同地点における地上測定値を散布図とし Fig. 9-8 に示す。また、航空機モニタリング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を Fig. 9-9 に示す。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。



Fig. 9-7 地上における測定点

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

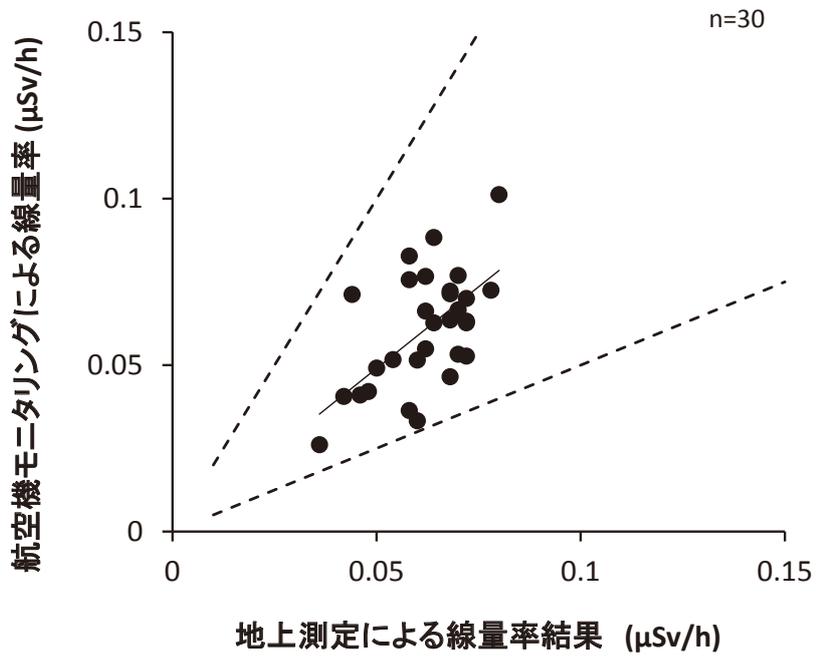


Fig. 9-8 地上における線量率測定結果との比較 (散布図)

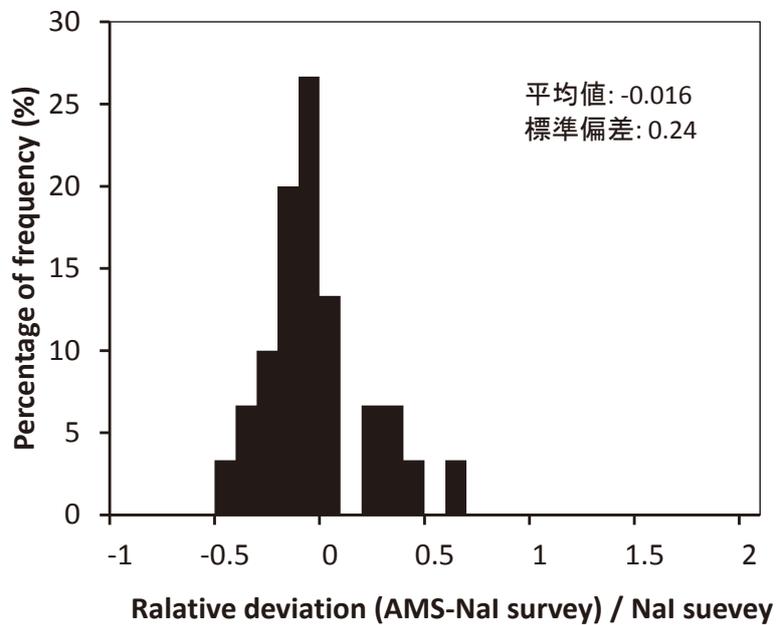


Fig. 9-9 地上における線量率測定結果との比較 (相対偏差)

9.3. モニタリング結果

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. 9-10 に示す。なお、線量率マップの色合いについては、 $0.02 \mu\text{Sv/h}$ ごとに分けて表示した。線量率の分布は、最大 $0.16 \mu\text{Sv/h}$ であった。Fig. 9-11 に、前述した天然の線量率マップと比較を示す^{44,45)}。全体の線量率の分布傾向はよく似通っていることが分かる。特徴的に比較的線量の高い出水市の高線量エリアは、出水山地にある紫尾花崗岩体と呼ばれる花崗岩ドームの影響を受けていると考えられる⁴⁶⁾。また、霧島市の高線量エリアは、霧島火山群である⁴⁶⁾。一方、熊本県南部の高線量率エリアについては、Fig. 9-11 (右)に示した線量率マップに確認されなかった。この理由として、参照した線量率マップの解像度が挙げられる。すなわち、本線量率マップは、大地のウランとトリウムとカリウムの濃度から計算によって求める方法で作成されており、大地のウランとトリウムとカリウムの濃度実測結果がない場所については、内挿補間で色付けされている。該当の地域は、九州山地であり、それらの濃度の実測結果が少なく実際の線量率を再現できていない可能性がある。

今回、航空機モニタリングで測定した結果は、Fig. 9-8 で示した地上測定結果や過去に実施された元素の濃度実測結果から求められた線量率分布とよく一致したことから、地上の線量率分布をよく再現できていると考えられる。

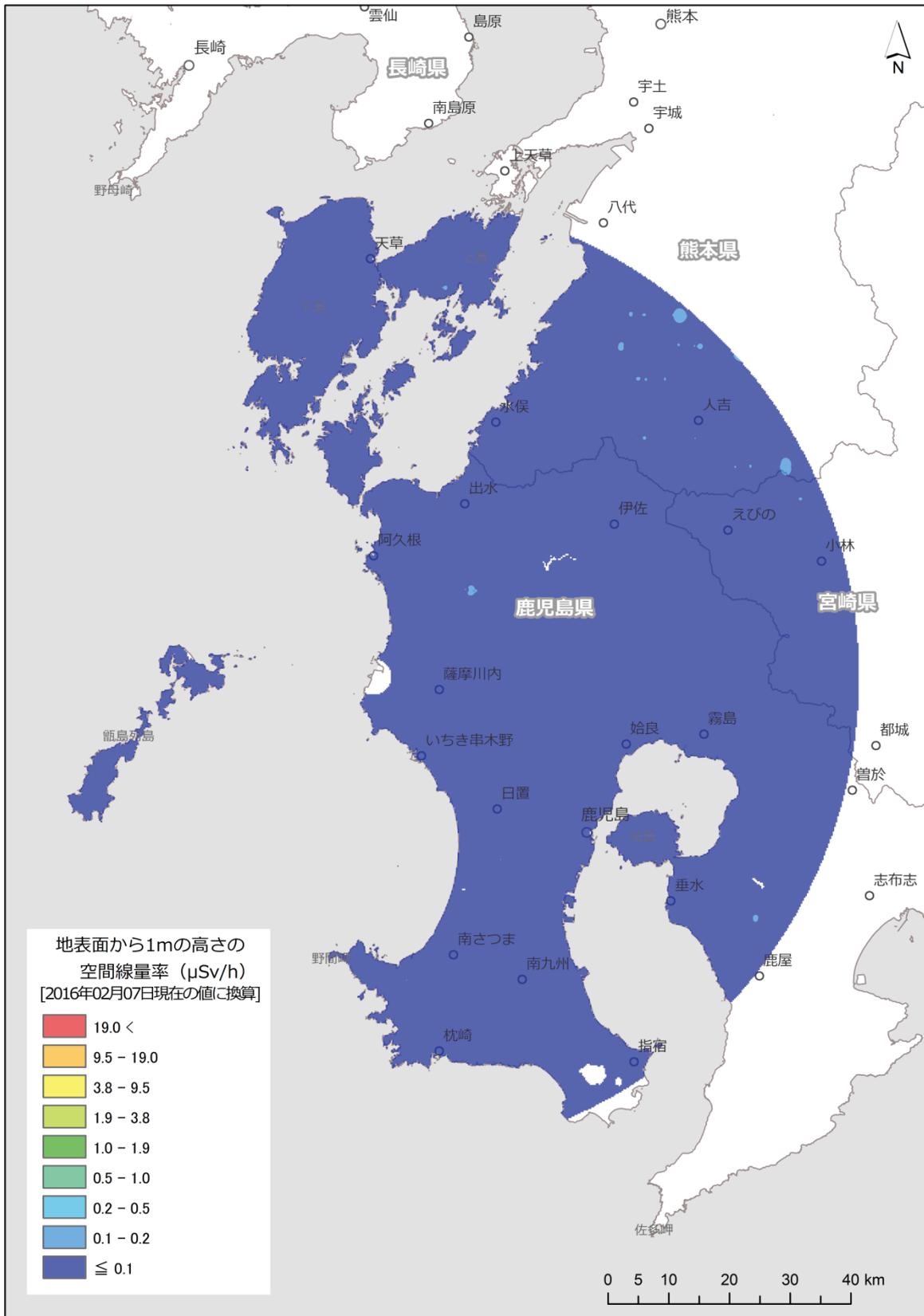


Fig. 9-10 川内原子力発電所周辺の線量率マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

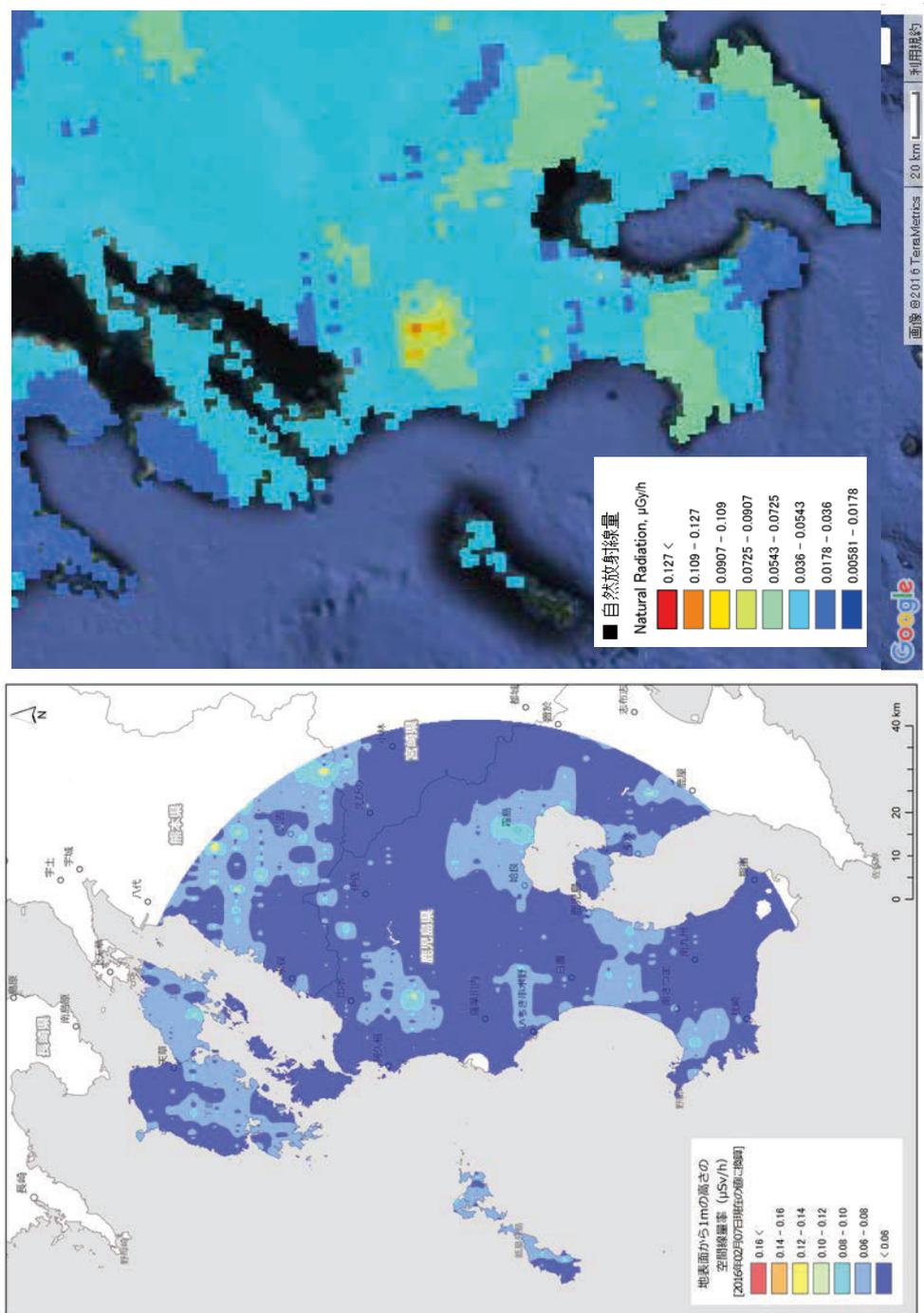


Fig. 9-11 川内原子力発電所周辺の線量率マップと地質から求めた線量率マップの比較

左: 背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンプ (ESRI, Co. Ltd.) を使用

右: 産業技術総合研究所地質調査総合センター, <https://gbank.gsj.jp/geochemmap/setumei/radiation/setumei-radiation.htm>,

クリエイティブ・コモンズ・ライセンス表示 2.1 (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.1/jp/>)

9.4. 天然の放射性核種濃度への換算方法の検討

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

一般的に γ 線スペクトルを利用し、天然の放射性核種を核種毎に定量することが一般的である。航空機モニタリングにおいても、 γ 線スペクトルが利用できる。Fig. 9-12 に対地高度 300 m で取得できる典型的な γ 線スペクトル例を示す。このように、散乱線の影響の少ない高エネルギー側のエネルギーである K-40 (1,461 keV)、U 系列 (U-series: Bi-214: 1,765 keV, 2,204 keV) 及び Th 系列 (Th-series: Tl-208: 2,615 keV) が利用できる。一方、高エネルギー側は低エネルギー側と比較して効率が悪いため、スペクトルが識別できるまで測定時間をかける必要がある。航空機モニタリングは 1 秒ごとにデータを取得しているが、計数率の誤差を考慮し、ここでは 20 秒のデータを積算したスペクトルを使用し、Fig. 9-12 のようにスペクトルピークの計数率を求めた。

地上の濃度に換算するために、パラメータの設定を行った。前述のように、航空機モニタリングでは、換算係数と高度補正係数が必要となる。まず、換算係数 (CC: Conversion factor for natural nuclide concentration) は、Fig. 9-4 で示したキャリブレーションポイントにおいて、In-situ Ge 検出器による 30 分間の測定を 5 地点において、K-40、U-series 及び Th-series の濃度を測定したデータの平均値と、上空でホバリングした際の検出器の計数率を比較することで求めた。また、高度補正係数 (AF) については、EGS5 シミュレーションの結果を利用した。計算には、無限平板を模擬した半径 2,000 m の線源を仮定し、その上空 50 m, 100 m, 150m, 200 m, 300 m, 400 m 及び 500 m の計数率を計算した。計算した高度と計数率の関係について、上空 50 m で得られた結果を 1 に規格化し、Fig. 9-13 に示す。このように指数関数の関係となり、その指数近似の傾きをそれぞれの AF とした。実際の CC と AF の数値について Table 9-3 に示す。

上記のパラメータを利用し、地上値に換算し内挿してマップ化した結果を K-40、U-series 及び Th-series についてそれぞれ Fig. 9-14, 9-15 及び 9-16 に示す。各最大濃度を見ると K-40、U-series 及び Th-series は、500 Bq/kg、45 Bq/kg 及び 25 Bq/kg となった。一般的に、日本におけるそれぞれの核種の濃度は、K-40、U-series 及び Th-series について 100~700 Bq/kg、10~50 Bq/kg 及び 7~50 Bq/kg と言われており⁴⁷⁾、濃度のレベルは概ね整合する。

それぞれの分布マップの妥当性を検証するために、産業技術総合研究所地質調査総合センターホームページに公開されている海と陸の地球化学図⁴⁸⁾を利用した。Fig. 9-17 にそれぞれの元素濃度と天然放射性核種マップを比較する。なお、元素濃度は土壌の分析を基に内挿して作成されており、山間部等のデータは少ないので注意が必要である。この地球化学図は元素の濃度であり、単純な比較は難しいが傾向はよく一致しているように見える。ただし、K-40 における薩摩半島の先端等、元素の濃度のデータはあっても線量率のデータと一致しない場所がみられた。現時点で原因の特定は難しいが、今後もデータを蓄積し、検証することが望ましい。全体的には、本手法で一定の信頼性のある天然の放射性核種濃度のマップ作成が可能であると考えられる。

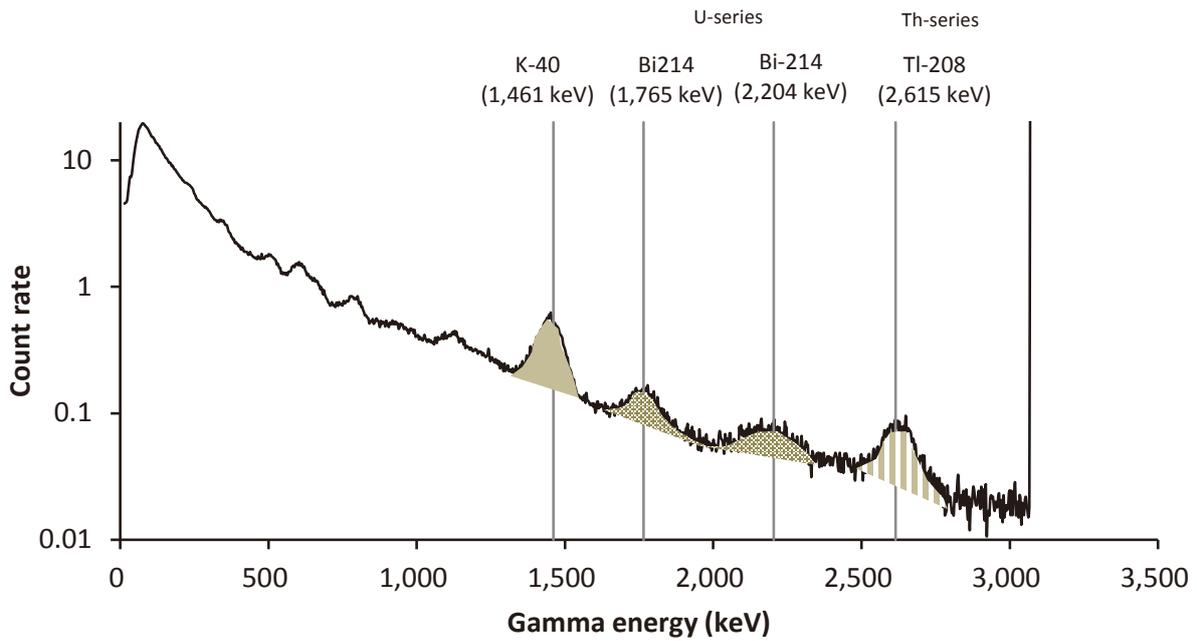


Fig. 9-12 天然の放射性核種によるピーク解析例

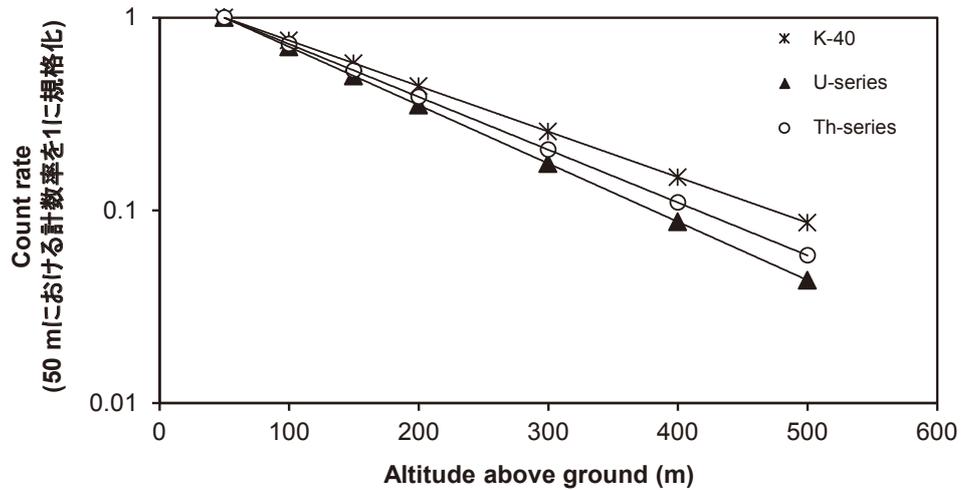


Fig. 9-13 天然の放射性核種別の高度と計数率の関係
(EGS5 によるシミュレーション)

Table 9-3 天然の放射性核種濃度に換算するためのパラメーター一覧

	K-40	U-series	Th-series
CC (cps/Bq/kg)	0.043	0.23	0.27
AF (m ⁻¹)*	-0.0054	-0.0070	-0.0063

* EGS5 によるシミュレーション結果より

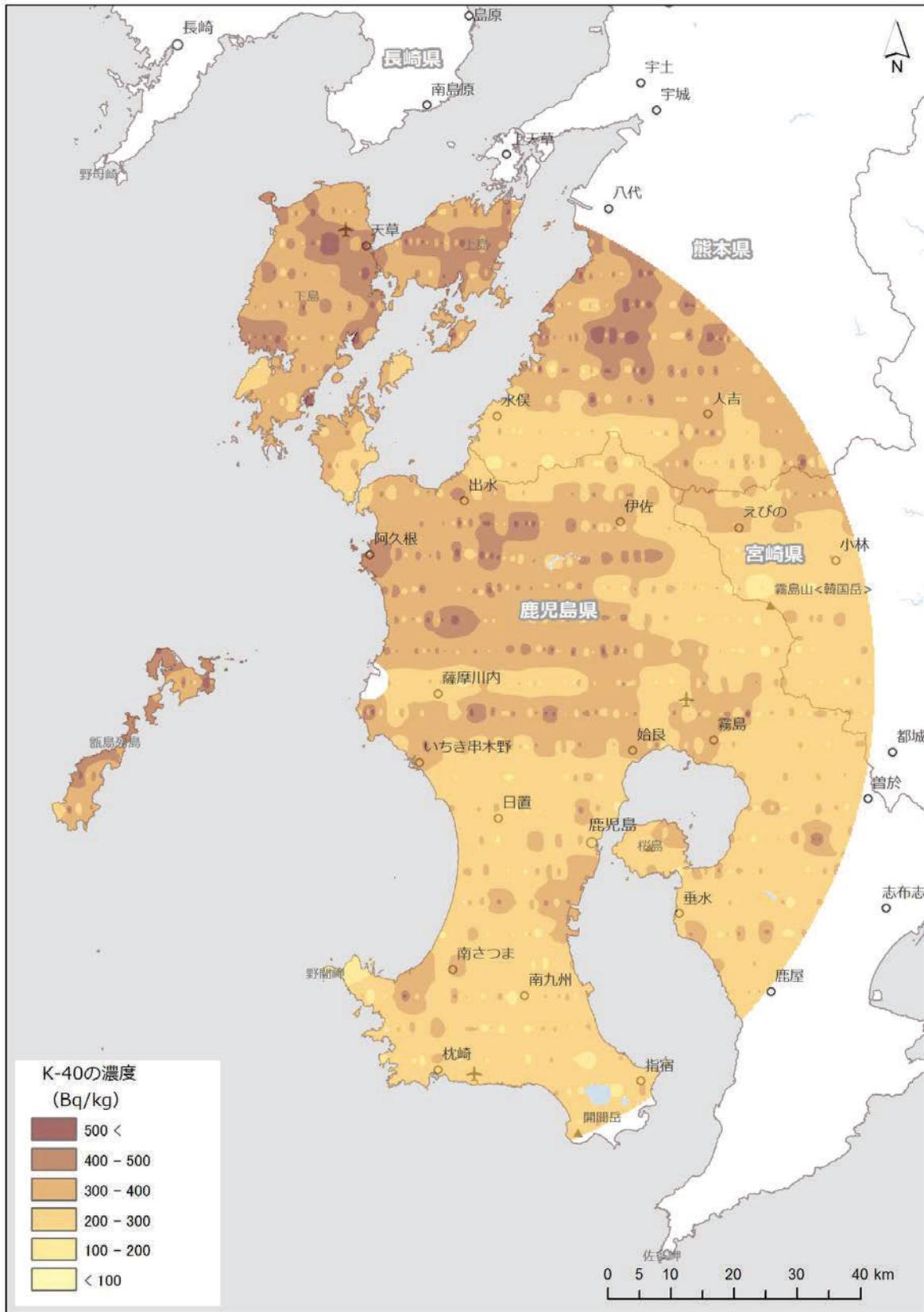


Fig. 9-14 川内原子力発電所周辺の K-40 濃度マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

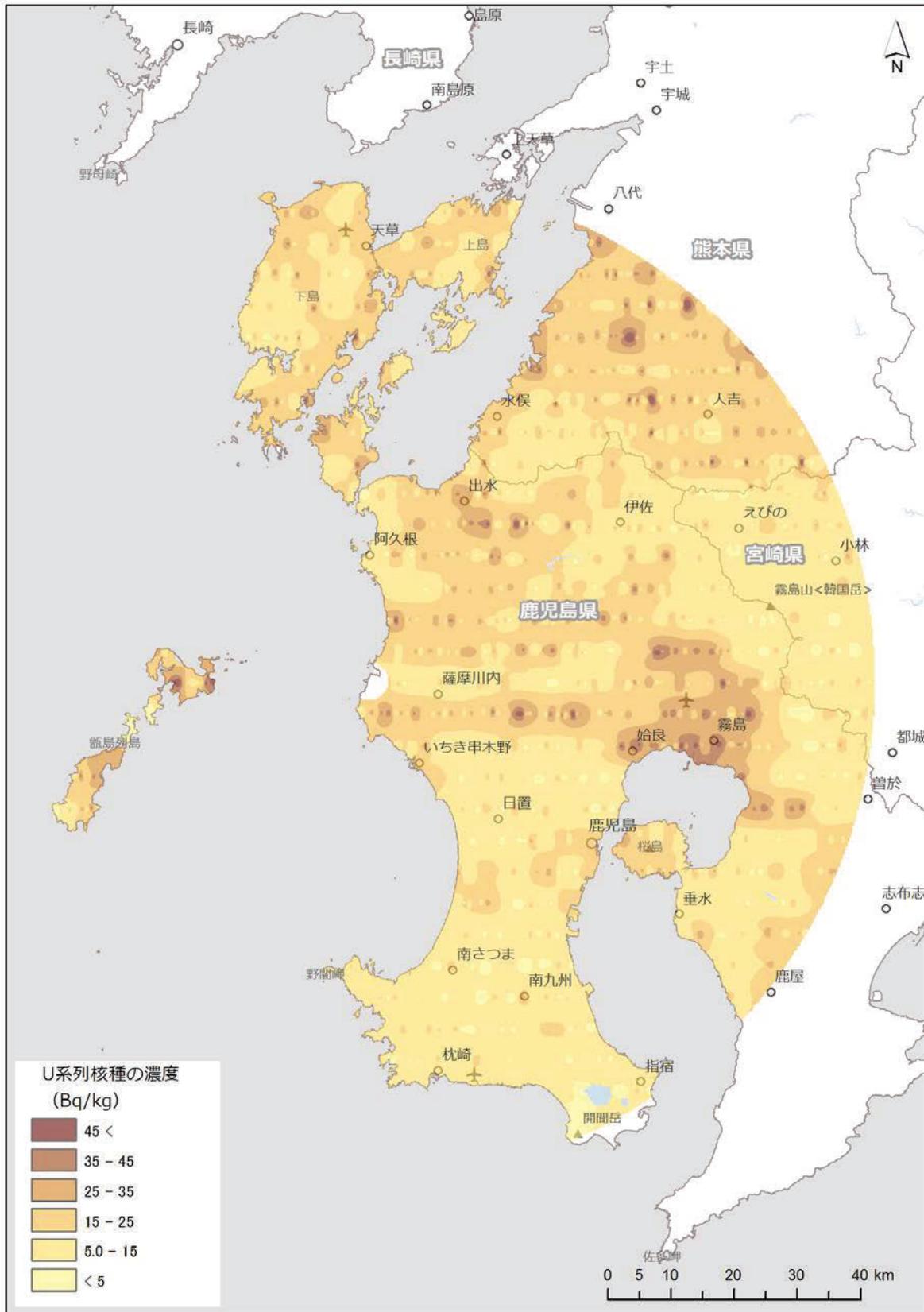


Fig. 9-15 川内原子力発電所周辺の U 系列濃度マップ
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

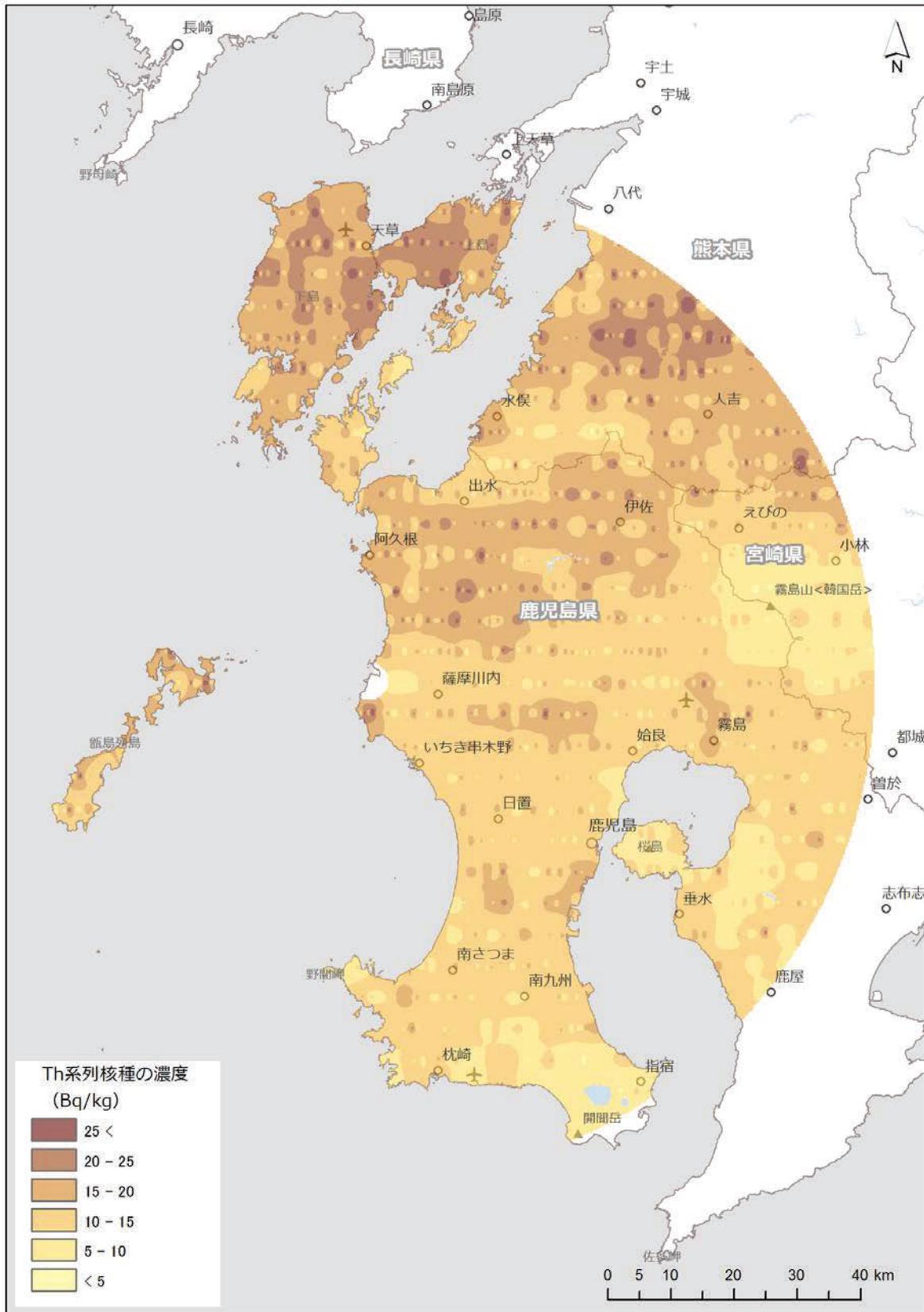


Fig. 9-16 川内原子力発電所周辺の Th 系列濃度マップ
(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

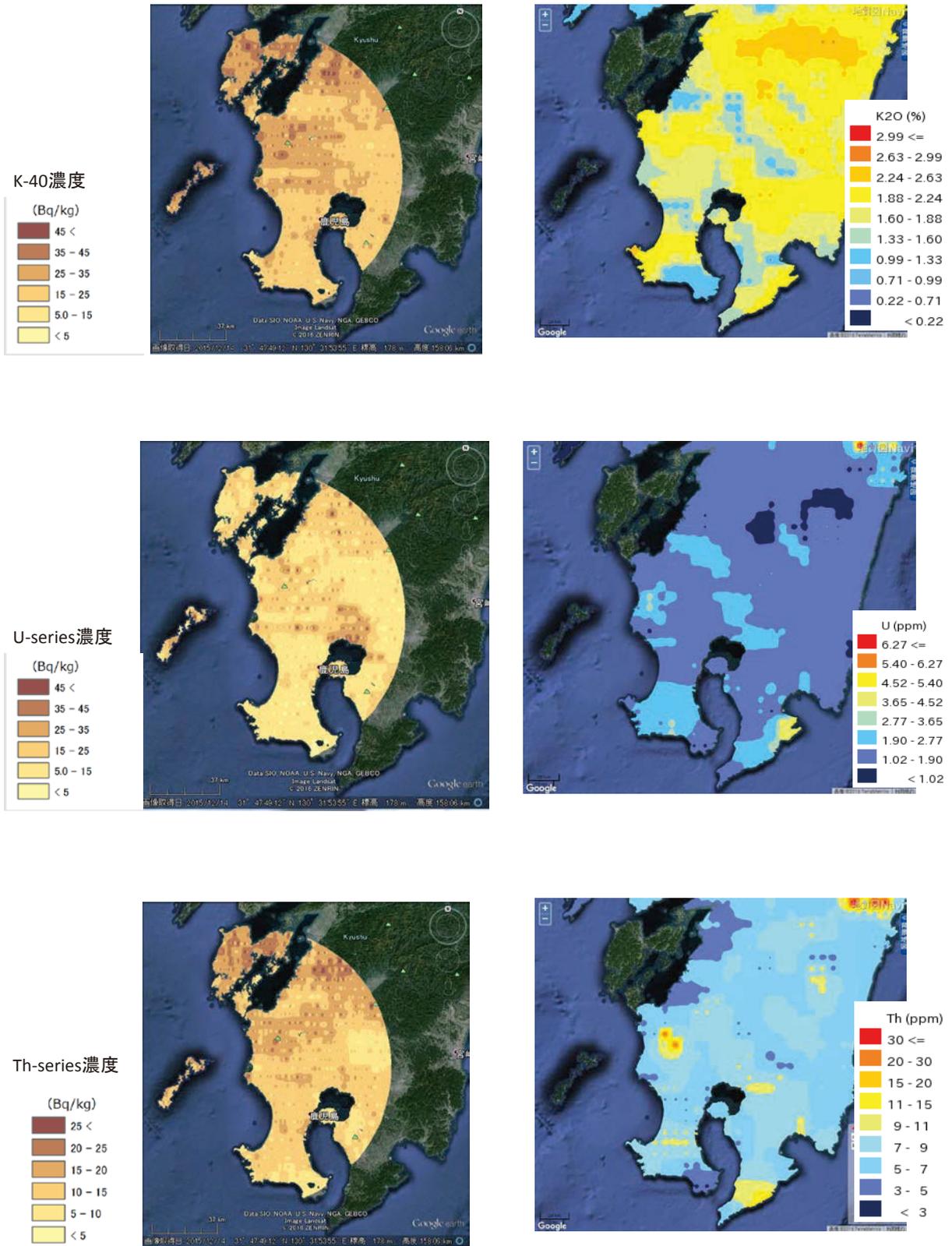


Fig. 9-17 川内原子力発電所周辺の放射性核種濃度測定結果と地球化学図比較

地球化学図：産業技術総合研究所地質調査総合センター，

<https://gbank.gsj.jp/geochemmap/>，

クリエイティブ・コモンズ・ライセンス表示 2.1 (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.1/jp/>)

9.5. 緊急時モニタリングに資する知見の整理

今年度得られた成果を以下にまとめる。

- ・測定結果について

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

- ・測定の日程について

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

- ・手法について

天然の線量率及び核種別濃度の換算手法について確立した。本手法に用いているパラメータについては、今後もデータを蓄積し、最適化する必要がある。

- ・RSI システムの保守方法について

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

- ・測定エリアの特徴について

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

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5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、5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を考える。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。

- ・積雪における写真測量データの適用可能性について

今回、同地域の積雪前後における放射線測定及び測量データを取得し、積雪による放射線の実効的な遮蔽係数の算出を試みた。LP-DEMで求めた積雪深と放射線の減衰率には関係性がみられ、有効な手法であることが確認できた。一方、当初、本命視していた写真測量については、積雪前後における高度情報のGCP補正により一定の精度でDSMが作成できることが分かったが、積雪深と放射線の減衰率には関係性を確認できるほどの精度はないことが分かった。写真測量のメリットは、装置が簡便であり放射線測定と同時に実施できる可能性があることである。一方、LP-DEMは正確であるが、機器が大きいので放射線測定と同時に実施することは難しい。今後、写真測量の補正手法について更なる検討や技術開発が望まれる。

- ・ラドン子孫核種の減算手法について

今回、ラドン測定用にLaBr RSIシステムを導入し、空気中のラドン子孫核種の影響を一定程度除去できる手法の開発を行った。実証試験の結果からも効果が出ているが、今後、実際の適用にあたっては、更なるパラメータ等の検討とシステム化が必要であると考えられる。

- ・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。写真測量による積雪深測量は精度に問題があったものの、DSMの精度は地形補正には十分に使用できることが分かった。今後、写真測量データを基に地形の補正を行うことも検討すべきである。

11. まとめ

平成 27 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、福島原子力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。また、測量データと組み合わせて積雪時における放射線の減衰における基礎データの取得及び懸案となっていた Rn 子孫核種の減算手法の開発及び積雪時の影響について評価を行った。さらに、九州電力川内原子力発電所のバックグラウンドモニタリングを実施し、天然の放射線分布を明らかにするとともに、モニタリング時の懸案事項を抽出した。

事故以来、航空機モニタリングが日本で実施されて、5 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。

謝辞

本調査研究は、「平成 27 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 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。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海野幸広環境放射能対策官、村越幸史様、土田幹隆様、大平智章様、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(ATOMO Σ), 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(ATOMO Σ), 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 ^{131}I 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> (2016 年 3 月 1 日参照).
- 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> (2016 年 3 月 1 日参照).
- 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-Research2014-012, 2014, 110p.

- 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, 81p.
- 23) 国土地理院ホームページ, <http://www.gsi.go.jp/kibanchizu/kibanchizu60004.html> (2016 年 3 月 1 日参照).
- 24) 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.
- 25) ICRU, Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU report 53, 1994.
- 26) 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> (2016 年 3 月 1 日参照).
- 27) 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> (2016 年 3 月 1 日参照).
- 28) 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.
- 29) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003.
- 30) 原子力機構, 平成 27 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, 2016. <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry08.html> (2016 年 3 月 1 日参照).
- 31) 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.
- 32) 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.
- 33) 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.
- 34) 国土地理院 HP, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>, (2016 年 3 月 1 日参照).
- 35) Endrestol, G. O., Principle and method for measurement of snow water equivalent by detection of natural gamma radiation., Hydro. Sci., 25, pp. 77-83, 1980.
- 36) 長岡鋭, 坂本隆一, 斎藤公明, 堤正博, 森内茂, 積雪による地殻 γ 線線量率の減衰, 保健物理, 23, pp. 309-315, 1988.
- 37) 長岡鋭, 坂本隆一, 斎藤公明, 堤正博, 森内茂, 積雪による地殻 γ 線線量率の減衰 (II), 保健物理, 27, pp. 113-121, 1992.
- 38) 国土地理院ホームページ, <http://www.gsi.go.jp/gazochosa/gazochosa40002.html#makeortho> (2016 年 3 月 1 日参照).

- 39) 中日本航空ホームページ,
<http://www.nnk.co.jp/research/technology/SAKURA.html#prettyPhoto> (2016年3月1日参照).
- 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, 福祉大学地域環境研究教育センター研究紀要「日本館地域の自然と環境」, 5, pp. 83-94, 1998.
- 42) 原子力防災会議幹事会, 原子力災害対策マニュアル, 平成27年6月19日一部改訂.
- 43) 原子力規制委員会, 原子力災害対策指針, 平成27年8月26日全部改正.
- 44) 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.
- 45) 地質学会ホームページ, 日本の自然放射線量
<http://www.geosociety.jp/uploads/fckeditor/hazard/2011/daishinsai/20110412imai/Radiation-m2.gif>
(2016年3月1日参照).
- 46) 町田洋, 太田洋子, 河名俊男, 森脇広, 長岡信治, 日本の地形7九州・南西諸島(第2版), 東京大学出版会, 2007.
- 47) 分析センターホームページ, 環境放射線データベース,
<http://search.kankyo-hoshano.go.jp/servlet/search.top?pageSID=19119433> (2016年3月1日参照).
- 48) 産業技術総合研究所地質調査総合センターホームページ, 海と陸の地球化学図,
<https://gbank.gsj.jp/geochemmap/> (2016年3月1日参照).

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 ^(e)	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 ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射線当量, 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
酸素活性化	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
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加減	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	J/m ³	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単位との数値的關係は、 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
エルグ	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「△」は対応關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

