JAEA-Technology
2021-029
DOI:10.11484/jaea-technology-2021-029

令和２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 2020 (Contract Research)

普天間 章　眞田 幸尚　石﨑 梓　川﨑 義晴
岩井 毅行　平賀 祥吾　佐藤 一彦　萩野谷 仁
松永 祐樹　菊池 陽　嶋田 和真　外間 智規
平岡 大和　卜部 嘉　外川 織彦　安藤 真樹
工藤 保

Akira FUTEMMA, Yukihisa SANADA, Azusa ISHIZAKI, Yoshiharu KAWASAKI
Takeyuki IWAI, Shogo HIRAGA, Kazuhiko SATO, Masashi HAGINOYA
Yuki MATSUNAGA, Hikaru KIKUCHI, Kazumasa SHIMADA, Tomonori HOKAMA
Hirokazu HIRAOKA, Yoshimi URABE, Orihiko TOGAWA, Masaki ANDOH
and Tamotsu KUDO

安全研究・防災支援部門
原子力緊急時支援・研修センター

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

February 2022
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　JAEA イノベーションハブ　研究成果利活用課
〒 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.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, 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, 2022

JAEA-Technology 2021-029

令和 2 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
原子力緊急時支援・研修センター
普天間　章、眞田　幸尚、石﨑　梓[+1]、川﨑　義晴[*1]、岩井　毅行[*1]、平賀　祥吾[*1]、
佐藤　一彦[*2]、萩野谷　仁[*3]、松永　祐樹[*3]、菊池　陽[*2]、嶋田　和真、外間　智規、
平岡　大和、卜部　嘉[*1]、外川　織彦、安藤　真樹、工藤　保

（2021 年 11 月 30 日受理）

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震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環境に飛散した。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。日本原子力研究開発機構では、有人ヘリコプターを使用した航空機モニタリングを福島第一原子力発電所周辺において継続的に実施してきた。本報告書では、令和 2 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について取りまとめると共に、過去のモニタリング結果から空間線量率等の変化量を評価し、変化量に寄与する要因について考察した。また、航空機モニタリングによる空間線量率の計算精度向上に資するために、航空機モニタリングデータを用いて地形の起伏を考慮に入れた解析を行った。地形の起伏を考慮に入れる前後での解析結果を比較し、本手法による精度向上効果を評価した。さらに、空気中のラドン子孫核種の弁別手法を測定結果に適用して、空気中のラドン子孫核種が航空機モニタリングに与える影響について評価した。

本調査研究は、日本原子力研究開発機構が原子力規制庁との委託契約により実施した「令和 2 年度原子力施設等防災対策等委託費およ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。
原子力緊急時支援・研修センター：〒311-1206 茨城県ひたちなか市西十三奉行 11601-13
＋1 安全研究センター
＊1 株式会社 NESI
＊2 原子力エンジニアリング株式会社
＊3 検査開発株式会社

JAEA-Technology 2021-029

Radiation Monitoring using Manned Helicopter around the Nuclear Power Station in the Fiscal Year 2020 (Contract Research)

Akira FUTEMMA, Yukihisa SANADA, Azusa ISHIZAKI[+1], Yoshiharu KAWASAKI[*1], Takeyuki IWAI[*1], Shogo HIRAGA[*1], Kazuhiko SATO[*2], Masashi HAGINOYA[*3], Yuki MATSUNAGA[*3], Hikaru KIKUCHI[*2], Kazumasa SHIMADA, Tomonori HOKAMA, Hirokazu HIRAOKA, Yoshimi URABE[*1], Orihiko TOGAWA, Masaki ANDOH and Tamotsu KUDO

Nuclear Emergency Assistance and Training Center
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness
Japan Atomic Energy Agency
Hitachinaka-shi, Ibaraki-ken

(Received November 30, 2021)

By the nuclear disaster of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS), Tokyo Electric Power Company (TEPCO), caused by the Great East Japan Earthquake and the following tsunami on March 11, 2011, a large amount of radioactive material was released from the FDNPS. After the nuclear disaster, airborne radiation monitoring using manned helicopter has been conducted around FDNPS. The results of the airborne radiation monitoring and the evaluation for temporal change of dose rate in the fiscal 2020 were summarized in this report. Analysis considering topographical effects was applied to the result of the airborne monitoring to improve the accuracy of conventional method. In addition, technique for discriminating gamma rays from the ground and those from the airborne Rn-progenies was also utilized to evaluate their effect on airborne radiation monitoring.

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

---

This report summarized results that Japan Atomic Energy Agency carried out as commissioned business on "the projects of the radiation monitoring using manned helicopter around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station" of the Nuclear Regulation Authority in the fiscal year 2020.

＋1 Nuclear Safety Research Center
＊1 NESI, Inc.
＊2 Nuclear Engineering Co., Ltd.
＊3 Inspection Development Co., Ltd.

目次

1. はじめに 1
2. 福島第一原子力発電所事故に係る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 12
3.1. 航空機モニタリングシステム 12
3.2. ヘリコプターの選定 14
3.3. 機体によるγ線遮蔽効果 17
3.4. RSI システムの保守 19
4. データ取得および解析方法 22
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 22
4.2. データ取得方法 26
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 28
4.4. 解析のフロー 36
4.5. 空間線量率への換算方法 37
4.5.1. バックグラウンド減算 (自己汚染および宇宙線) 37
4.5.2. 高度補正 39
4.5.3. 空間線量率への換算 41
4.5.4. 空間線量率への換算方法 52
4.6. 放射性 Cs の沈着量への換算方法 52
4.6.1. 天然核種の弁別と放射性 Cs 起源の計数率の算出 52
4.6.2. 空間線量率－放射能換算係数 54
4.7. 減衰補正 55
4.8. 検出下限値 56
4.8.1. 空間線量率の検出下限値 57
4.8.2. 放射性 Cs の沈着量の検出下限値 57
4.9. 不確かさ 58
4.10. マッピング 58
4.11. 地上における測定値との比較 60
4.12. 天然放射性核種由来の空間線量率マップの作成 62
5. モニタリング結果 67
5.1. 第 15 次モニタリング 67
5.2. 東日本第 11 次モニタリング 72
6. モニタリング結果の考察 85
6.1. 過去のモニタリング結果との比較 85
6.2. 環境半減期の算出 91
6.3. 土地利用による空間線量率の変化傾向の違い 93
7. 地形の起伏による影響と補正方法 101

7.1. 背景 101
7.2. 地形の起伏による測定への影響 101
7.3. 地形の起伏による影響の補正 104
8. ラドン弁別手法を適用した空間線量率マップの作成 108
8.1. ラドン子孫核種 108
8.2. ラドン弁別手法の理論 109
8.3. パラメータ (*GI* および *RI*) の決定 113
8.4. *GI* の高度補正方法 115
8.5. 80 km 圏外データへの適用 116
8.6. 従来手法の評価 122
9. 成果のまとめと今後の課題 126
10. まとめ 128
謝辞 128
参考文献 129

Contents

1. Introduction 1
2. History of airborne monitoring after FDNPS accident 3
3. Measurement system and helicopters 12
   3.1. System of airborne radiation monitoring 12
   3.2. Helicopters 14
   3.3. Test using radiation source 17
   3.4. Maintenance of RSI system 19
4. Data acquisition and analysis 22
   4.1. Basic concept of conversion to dose rate at 1 m above the ground 22
   4.2. Conditions of data acquisition 26
   4.3. Calibration flights 28
   4.4. Outline of analysis method 36
   4.5. Conversion procedure of dose rate at 1 m above the ground 37
      4.5.1. Background (self-contamination and cosmic ray) 37
      4.5.2. Height correction 39
      4.5.3. Conversion factor from count rate to dose rate 41
      4.5.4. Conversion flow to dose rate 52
   4.6. Conversion procedure of radiocesium deposition 52
      4.6.1. The discrimination of count rate by natural nuclide 52
      4.6.2. Conversion factor from dose rate to radiocesium deposition 54
   4.7. Decay correction 55
   4.8. Detection limit 56
      4.8.1. Detection limit of dose rate 57
      4.8.2. Detection limit of radiocesium deposition 57
   4.9. Uncertainty 58
   4.10. Mapping 58
   4.11. Comparison with ground measurement data 60
   4.12. Map of dose rate of natural nuclide 62
5. Monitoring results 67
   5.1. 15th monitoring at area of 80 km range from the FDNPS 67
   5.2. 11th monitoring in the East Japan 72
6. Discussion 85
   6.1. Comparison with the past monitoring results 85
   6.2. Evaluation of ecological half-life of dose rate 91
   6.3. Difference in tendency to change of dose rate by the land use 93
7. Topographical effect and correction method 101

7.1. Introduction 101
7.2. Topographical effect on measurement data 101
7.3. Results of topographical effect correction 104
8. Discrimination of Rn progenies 108
8.1. Rn progenies 108
8.2. Theory of discrimination of Rn progenies 109
8.3. Parameters (*GI* and *RI*) 113
8.4. Height correction of *GI* 115
8.5. Application for AMS data 116
8.6. Evaluation of the conventional technique 122
9. Future work 126
10. Summaries 128
Acknowledgements 128
References 129

Table list

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯 7
Table 2-2 航空機モニタリングに関わる技術開発の経緯 11
Table 3-1 使用したヘリコプターと RSI システムのリスト 15
Table 3-2 ポイントソースによる機体の遮蔽状況の比較 17
Table 4-1 キャリブレーションフライトの一覧 30
Table 4-2 機体とシステムの組み合わせと自己汚染による計数率および *CR-index* 39
Table 4-3 使用したパラメータ (空気減弱係数 *AF* 及び空間線量率換算係数 *CD*) のまとめ 40
Table 4-4 2020 年度に取得した空気減弱係数 *AF* データ一覧 41
Table 4-5 2020 年度に取得した *CD* データ一覧 (Bell 412) 50
Table 4-6 2020 年度に取得した *CD* データ一覧 (Bell 430) 51
Table 4-7 *BG-index* 一覧 54
Table 4-8 RSI システムの検出下限値 58
Table 4-9 使用した減弱係数 (m^{-1}) のまとめ 64
Table 6-1 二重指数関数近似から求めた環境半減期 92
Table 6-2 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版) に基づく) 99
Table 6-3 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版) に基づく) 99
Table 6-4 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版) に基づく) 100
Table 8-1 ラドン子孫核種の放出する γ 線 109
Table 9-1 RSI システムの保守・運用実績 127

Figure list

Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績 9
Fig. 3-1 RSI システムのブロック図 13
Fig. 3-2 RSI システムの外観 13
Fig. 3-3 機底に燃料タンクのない機体一覧 14
Fig. 3-4 線源試験イメージ 18
Fig. 3-5 RSI システムのエネルギー分解能および Gain の変動 (RSI 1) 20
Fig. 3-6 RSI システムのエネルギー分解能および Gain の変動 (RSI 2) 21
Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係 23
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 24
Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の線源位置ごとの計数の割合 24
Fig. 4-4 上空からの測定イメージ 25
Fig. 4-5 フライトイメージ 26
Fig. 4-6 予定したフライトの測線 27
Fig. 4-7 テストラインフライトのイメージ 31
Fig. 4-8 テストラインの場所 31
Fig. 4-9 テストポイントフライトのイメージ 33
Fig. 4-10 テストポイントの場所 34
Fig. 4-11 宇宙線フライトのイメージ 35
Fig. 4-12 Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージ 35
Fig. 4-13 天然核種フライトの測線とオーバーラップフライト場所 35
Fig. 4-14 解析のフロー 36
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 38
Fig. 4-16 海抜高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例 38
Fig. 4-17 対地高度と計数率の関係例 40
Fig. 4-18 地上測定データ (Test Point 1) 43
Fig. 4-19 地上測定データ (Test Point 3) 44
Fig. 4-20 地上測定データ (Test Point 4) 45
Fig. 4-21 地上測定データ (Test Point 5) 46
Fig. 4-22 地上測定データ (Test Point D) 47
Fig. 4-23 地上測定データ (Test Point E) 48
Fig. 4-24 ヘリコプターの機種とオーバーラップフライトにおける計数率の関係 49
Fig. 4-25 放射性 Cs の計数率の算出イメージ 53
Fig. 4-26 *BG-index* の算出例 54
Fig. 4-27 重量緩衝深度と空間線量率－放射能換算係数の関係 55
Fig. 4-28 IDW に入力するパラメータとマップの関係 59
Fig. 4-29 地上の測線上における空間線量率測定値との比較 61

Fig. 4-30 地上のランダムな位置における空間線量率測定結果との比較 61
Fig. 4-31 地上における可搬型 Ge 検出器による測定値との比較 62
Fig. 4-32 関数適合法を用いた Cs-134 と K-40 の弁別 64
Fig. 4-33 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (*CD*) の関係 (Bell 412)..... 65
Fig. 4-34 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (*CD*) の関係 (Bell 430)..... 65
Fig. 4-35 福島原子力発電所周辺の天然の空間線量率マップの作成例 66
Fig. 4-36 航空機モニタリングによる天然核種由来の空間線量率と可搬型 Ge 検出器で得られた天然核種由来の空間線量率の比較 66
Fig. 5-1 第 15 次モニタリングにおける空間線量率マップ 68
Fig. 5-2 第 15 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ 69
Fig. 5-3 第 15 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ 70
Fig. 5-4 第 15 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ 71
Fig. 5-5 東日本第 11 次モニタリングにおける空間線量率マップ 73
Fig. 5-6 東日本第 11 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ 74
Fig. 5-7 東日本第 11 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ 75
Fig. 5-8 東日本第 11 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ 76
Fig. 5-9 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける空間線量率マップ 77
Fig. 5-10 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ.... 78
Fig. 5-11 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ..... 79
Fig. 5-12 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ..... 80
Fig. 5-13 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける天然核種由来の空間線量率マップ 81
Fig. 5-14 各測定年度における天然放射性核種による空間線量率マップの比較 82
Fig. 6-1 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較 86
Fig. 6-2 福島原子力発電所から 80 km 圏内における第 4 次モニタリングおよび第 15 次モニタリングの空間線量率算出結果の比較 89
Fig. 6-3 旧避難指示区域における第 4 次モニタリングおよび第 15 次モニタリングの空間線量率 .. 90
Fig. 6-4 旧避難指示区域における第 4 次モニタリングおよび第 15 次モニタリングの Cs-137 沈着量算出結果の比較 90
Fig. 6-5 測定値の二重指数関数近似 92
Fig. 6-6 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版　国土地理院土地利用調査データより) 95
Fig. 6-7 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版　国土地理院土地利用調査データより) 96
Fig. 6-8 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版　国土地理院土地利用調査データより) 97
Fig. 6-9 森林部および市街地における地表面から 1 m の高さの空間線量率の算出結果の比較 98
Fig. 7-1 無作為に抽出した評価点の位置 103

Fig. 7-2 数値標高マップから三角ポリゴンへの変換例 104
Fig. 7-3 平坦な地形と起伏のある地形における対地高度 300 m での計数率比の頻度分布 104
Fig. 7-4 地形の起伏による影響を補正する場合に考慮すべき点 105
Fig. 7-5 第 15 次モニタリングの空間線量率マップの比較 106
Fig. 7-6 第 15 次モニタリング結果と地上測定値との比較 107
Fig. 8-1 ウラン系列およびトリウム系列 109
Fig. 8-2 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況 111
Fig. 8-3 空気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ 112
Fig. 8-4 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係 113
Fig. 8-5 海上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係 114
Fig. 8-6 計算体系のイメージ 116
Fig. 8-7 計算体系のベンチマーク 116
Fig. 8-8 シミュレーションによる測定高度と *GI* の関係 116
Fig. 8-9 ラドン影響弁別手法適用後の東日本第 11 次モニタリングの空間線量率マップ 118
Fig. 8-10 東日本第 11 次モニタリングの測定結果から計算した空気中のラドン子孫核種の NaI RSI システムで検出された計数率マップ 119
Fig. 8-11 ラドン影響弁別後の地上測定値との比較 (東日本第 11 次モニタリング) 120
Fig. 8-12 従来手法とラドン弁別手法の比較 124
Fig. 8-13 BG フライトから求めた NaI RSI システムのバックグラウンド計数率と同日における測定データにラドン弁別手法を適用して求めた計数率の平均値の比較 125

1. はじめに

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 年に発生したスリーマイル島原子力発電所事故や 1986 年に発生したチェルノブイリ原子力発電所事故を契機とし、環境中の地表に沈着した人工の放射性核種を迅速に検出するための手法として、ウラン探査の技術をベースに開発されてきた [1)]。現在、米国ではエネルギー省 (以下、DOE) を中心に多数の航空機モニタリングの機器を所有しており、核実験場等の計測等で培った経験を基に緊急時における運用方法が整備されている [2),3)]。また、欧州では、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、各国でチェルノブイリ原子力発電所事故後に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 (現国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 (以下、原子力機構)) を中心に開発が進められてきた。1980 年から 5 年間にわたって航空機 γ 線サーベイシステム (Aerial Radiological Survey and Assessment System: ARSAS) が開発され、基本的な航空機サーベイの方法が確立された [5),6)]。また、原子力災害時における空気中の放射性プルームの評価を目的とし、ガス状の放射性物質を航空機モニタリングで測定する際の換算係数がシミュレーション計算により求められた [7)]。その後、航空機モニタリングの技術は、 公益財団法人原子力安全技術センター (以下、NUSTEC) に引き継がれ、原子力防災における放射線分布を早期に計測するツールとして整備されてきた [8)]。しかしながら実態としては、東京電力福島第一原子力発電所 (以下、福島原子力発電所) 事故当時、我が国において、航空機モニタリングは環境放射線モニタリング指針 [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。

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震に起因して、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り、航空機モニタリングが実施されることとなった。福島原子力発電所から半径 80 km 圏内において航空機モニタリングが DOE と文部科学省 (以下、文科省) により 2011 年 4 月 6 日から開始され [10)-12)]、当該事業は 2013 年度に原子力規制庁 (以下、規制庁) に移管され、モニタリング結果は規制庁のホームページで随時公開されている [13)]。

航空機モニタリングの手法については、原子力機構をはじめとした航空機モニタリングの経験のある研究機関や企業などが集結し、DOE の手法をベースに事故の状況や急峻な地形が多いという日本独特の環境を加味して最適化を図ってきた。これら蓄積した測定および解析技術を基に、我が国初の大規模な原子力災害における日本全域の航空機モニタリングを 2011 年から 2012 年にかけて行った [12)]。当時作成した福島原子力発電所周辺における空間線量率マップや地表面における放射性セシウム (以下、放射性 Cs) の沈着量マップは、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 [14)]。また、事故直後に実施されていた福島原子力発電所周辺の海上における航空機モニタリングデータを再解析し、事故直後の海上における I-131 や放射性 Cs の降下量マップを再構築し、シミュレーションと比較した例も報告されている [15)]。いずれの例も、福島原子力発電所事故後における航空機モニタリングによるデータ取得の有効性および得られる情報量の多さを示している。

本報告書では、2020 年度に行われた、福島原子力発電所から 80 km 圏内外における航空機モニタリングの結果について報告する。また、通常のモニタリングの他に、空間線量率計算のさらなる高精度化を目的とし、地形の起伏を考慮した場合に空間線量率計算結果に及ぼす影響について、今年度の航空機モニタリングデータを用いて、地上測定値を指標として定量的評価を行った。また、大気中のラドン子孫核種からの γ 線と地上の放射性核種からの γ 線との弁別手法を用いて空間線量率マップを作成した。

2. 福島第一原子力発電所事故に係る航空機モニタリングの経緯

福島第一原子力発電所事故発生後に実施された航空機モニタリングの一連のスケジュールと実績について Table 2-1 および Fig. 2-1 に示す。航空機モニタリングは、2011 年 3 月 25 日に文科省によりプレス発表された「文部科学省航空機モニタリング行動計画 [16)]」に則り、2011 年 4 月 6 日から文科省が主体となり DOE の協力を得て (測定: NUSTEC)、「第 1 次モニタリング」として福島原子力発電所から 80 km 圏内モニタリングを開始した。また、2011 年 5 月 18 日から「第 2 次モニタリング」として福島原子力発電所から 80 km～100 km 圏をモニタリングした。その後、2011 年 5 月 31 日に開始された「第 3 次モニタリング」からは原子力機構が加わって、福島原子力発電所から 80 km 圏内のモニタリングを実施した。さらに、福島原子力発電所から 100 km 圏外にも放射性物質が拡散していることが予想されたため、2011 年 6 月 22 日から福島周辺県の宮城県、栃木県、茨城県を対象にモニタリングを実施した後、2011 年 8 月 2 日から、文科省委託事業である「広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査」として、原子力機構が主体となり東日本全域の航空機モニタリング「東日本第 1 次モニタリング」を実施した。その後、福島原子力発電所から 80 km 圏内のモニタリングを 2011 年 10 月 22 日から「第 4 次モニタリング」として実施した。また、文科省委託事業を拡大する形で、2012 年 1 月 30 日からは、北海道から沖縄までの上記以外の地域における航空機モニタリング「西日本・北海道モニタリング」を実施した。2012 年 2 月 6 日からは、「警戒区域および計画的避難区域における航空機モニタリング (第 4.5 次) 」として実施した。

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

2013 年度 (平成 25 年度) は、事業主体が規制庁に移管され、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2013 年 8 月 27 日および 2013 年 11 月 2 日から「第 7 次モニタリング」および「第 8 次モニタリング」をそれぞれ実施した。また、2013 年 9 月 3 日から空間線量率の比較的高い場所 (0.2μSv/h 以上) で福島原子力発電所から 80 km 圏内を除く地域を対象に「東日本第 4 次モニタリング」を実施した。2013 年度の結果については、眞田他 (2014) [17)]に詳しく報告されている。

2014 年度 (平成 26 年度) は、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2014 年 9 月 1 日から「第 9 次モニタリング」を実施した。また、2014 年 9 月 21 日より福島原子力発電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第 5 次モニタリング」を実施した。2014 年度の結果については、眞田他 (2015)[18)]に詳しく報告されている。

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

電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第 6 次モニタリング」を実施した。さらに、バックグラウンド空間線量率の把握を目的として、九州電力川内原子力発電所周辺の航空機モニタリングを実施した (別事業)。2015 年度の結果については、眞田他 (2016)[19] に詳しく報告されている。

2016 年度 (平成 28 年度) については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2016 年 9 月 14 日から「第 11 次モニタリング」を実施した。また、2016 年 10 月 15 日から福島原子力発電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第 7 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、関西電力大飯発電所並びに高浜発電所周辺および四国電力伊方発電所周辺の航空機モニタリングを実施した。2016 年度の結果については、眞田他 (2018)[20),21)]に詳しく報告されている。

2017 年度 (平成 29 年度) については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2017 年 9 月 9 日から「第 12 次モニタリング」を実施した。また、2017 年 9 月 29 日から福島原子力発電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第 8 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、北海道電力泊発電所、東京電力柏崎刈羽原子力発電所および九州電力玄海原子力発電所周辺の航空機モニタリングを実施した。2017 年度の結果については普天間他 (2019)[22),23)]に詳しく報告されている。

2018 年度 (平成 30 年度) については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2018 年 9 月 6 日から「第 13 次モニタリング」を実施した。また、2018 年 10 月 8 日から福島原子力発電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第 9 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、中国電力島根原子力発電所および中部電力浜岡原子力発電所周辺の航空機モニタリングを実施した。2018 年度の結果については普天間他 (2019)[24),25)]に詳しく報告されている。

2019 年度 (令和元年度) については、福島原子力発電所から 80 km 圏内について 2019 年 8 月 29 日から「第 14 次モニタリング」を実施した。また、2019 年 9 月 18 日から福島原子力発電所から 80 km 圏内を除く前年度と同地域を対象に「東日本第 10 次モニタリング」を実施した。さらに、別事業においてバックグラウンド空間線量率の把握を目的として、東北電力東通原子力発電所並びに日本原燃六ヶ所再処理工場および北陸電力志賀原子力発電所周辺の航空機モニタリングを実施した。2019 年度の結果については普天間他 (2021)[26),27)]に詳しく報告されている。

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

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

これらの継続的な航空機モニタリングと並行して、関連する技術開発を実施してきた。Table 2-2 に航空機モニタリングに関連する技術開発の経緯について示す。2011 年度は基本的な航空機モニタリングの手法を確立し、2012 年度はその手法をルーチン的に利用できる解析システムを開発した。特に、地表面から 1 m の高さの空間線量率や地表面における放射性 Cs の沈着量への換算パラメータについては、実際にデータを取得しつつ評価する必要があったため、得られた結果を基に考察し最適化を図った。また、バックグラウンドとなる天然の放射線との識別方法に関するパラメータの設定には試行錯誤を重ねた [28),29)]。さらに、航空機モニタリングの換算手法は地表面が平面で空間線量率が一様であると仮定しているため、山や谷などの地形が複雑な場所での精度が懸念されていたことから、地上の勾配を評価できるように 10 m メッシュの数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) データの抽出ツールを開発した。本ツールにより、測定場所の直下に降ろした直線から 45°の角度に降ろした直線と地表の交点内に含まれる DEM データを抽出することができ、測定場所の平均的な地表の高度を知ることができるようになり、測定場所の地表面の勾配について評価できるようになった。2013 年度には、福島原子力発電所から 80 km 圏内の谷や山地形等の特徴的な地形の上空から放射線の計測データを取得し、測定場所の地形と航空機モニタリングの精度について基礎データを取得した。さらに、高度な解析技術として、鳥居他 [30),31)]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 I-131 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。2014 年度にはγ線スペクトルデータに関数フィッティング法を適用することにより、NaI(Tl)シンチレーション式検出器で測定した Cs-134 起源の 1,365 keV と K-40 起源の 1,461 keV の γ 線を弁別する手法を開発した。本手法は、放出エネルギーの近い人工放射性核種と自然放射性核種が形成する複合ピークの弁別に資するものであり、原子力発電所事故直後における汚染分布評価に特に有用である。また、同一の場所において測定高度の異なるデータと地上測定値と比較することにより、データの信頼性を評価した。2015 年度には、課題となっていた空気中のラドン子孫核種の影響を減算するため、専用の空気中ラドン子孫核種減算用の $LaBr_3$(Ce) シンチレーション式検出器 (以下、$LaBr_3$ 検出器) を導入し、地表からの放射線と空気中からの放射線で測定されるレスポンスの差を利用し、弁別する基礎的な手法を開発した。開発した手法については、2016 年度に既存の航空機モニタリング解析システムに組み込むとともに、福島原子力発電所から 80 km 圏外のデータに適用した。また、2015 年度には、放射線計測とともにレーザー測量および写真測量データを積雪の前後で取得し、積雪による放射線の減衰係数を評価した [27)]。この手法により、事故直後に積雪があり放射線が遮蔽された場合においても一定の精度で航空機モニタリングが可能になった。2016 年には、近年、精度が向上している最新の全球測位衛星システム (以下、GNSS) を用いて航空機モニタリングデータと同時に位置データを取得し、既存の GNSS の性能を比較評価するとともに、位置情報の精度が地上の空間線量率への換算に与える影響について評価した。2017 年度には、Ishizaki et al. (2017)[33)]が開発した地形の勾配を詳細に補正する手法を広いエリアの航空機モニタリングに適用できるようにシステム化した。2018 年度は 2017 年度にシステム化した地形補正手法を過去の航空機モニタリング結果に適用し、地上測定値を指標として従来手法と比較することにより、空間線量率の計算精度向上について

定量的な評価を実施した。2019 年度は地形補正手法を既存の航空機モニタリング解析システムに組み込むとともに、福島原子力発電所から 80 km 圏内のデータに適用し、地上測定値を指標として従来法と比較することにより、空間線量率の計算精度向上についての定量的評価を実施した。

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

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯

(1/2)

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

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

Table 2-1 航空機モニタリングの経緯

(2/2)

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

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

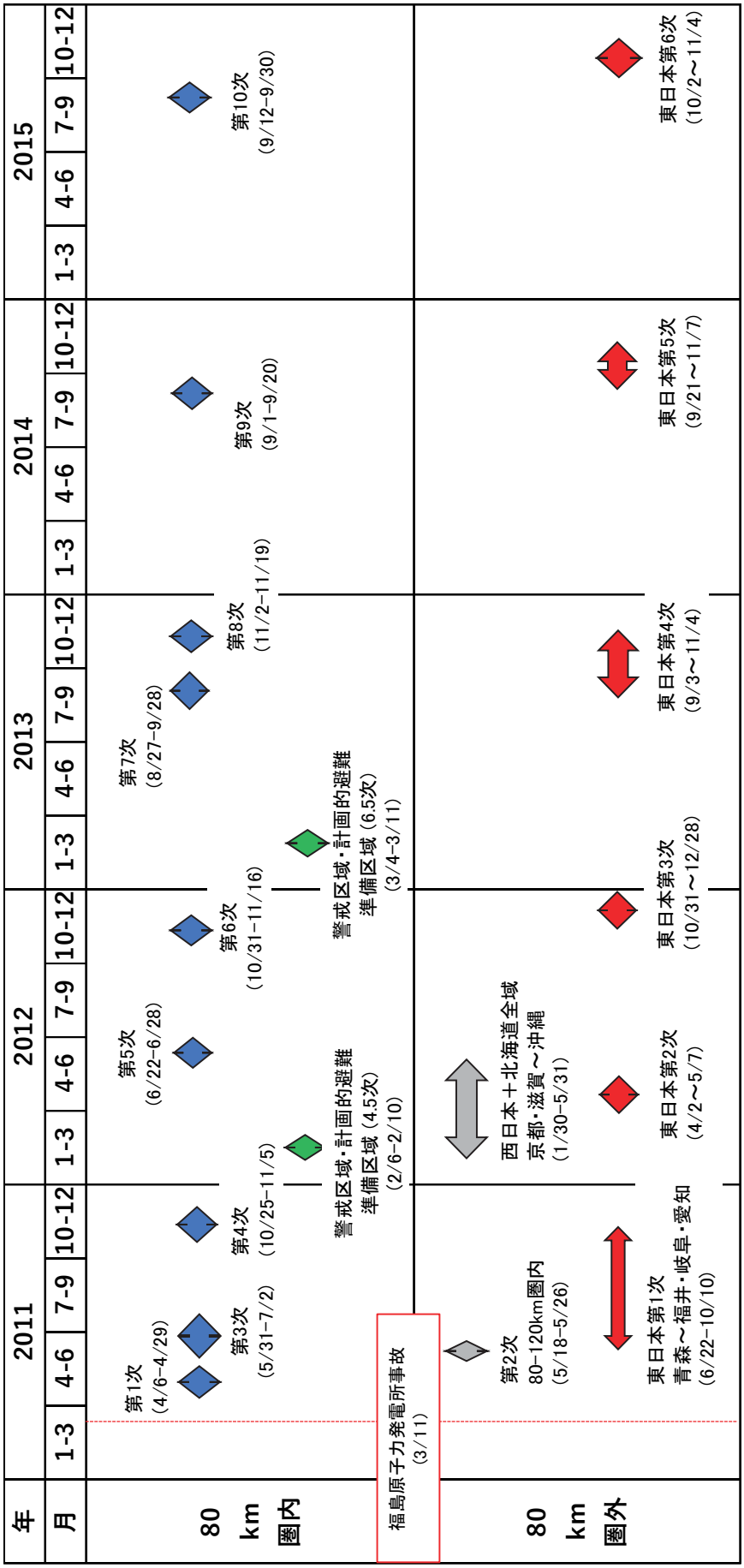


Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績

(1/2)

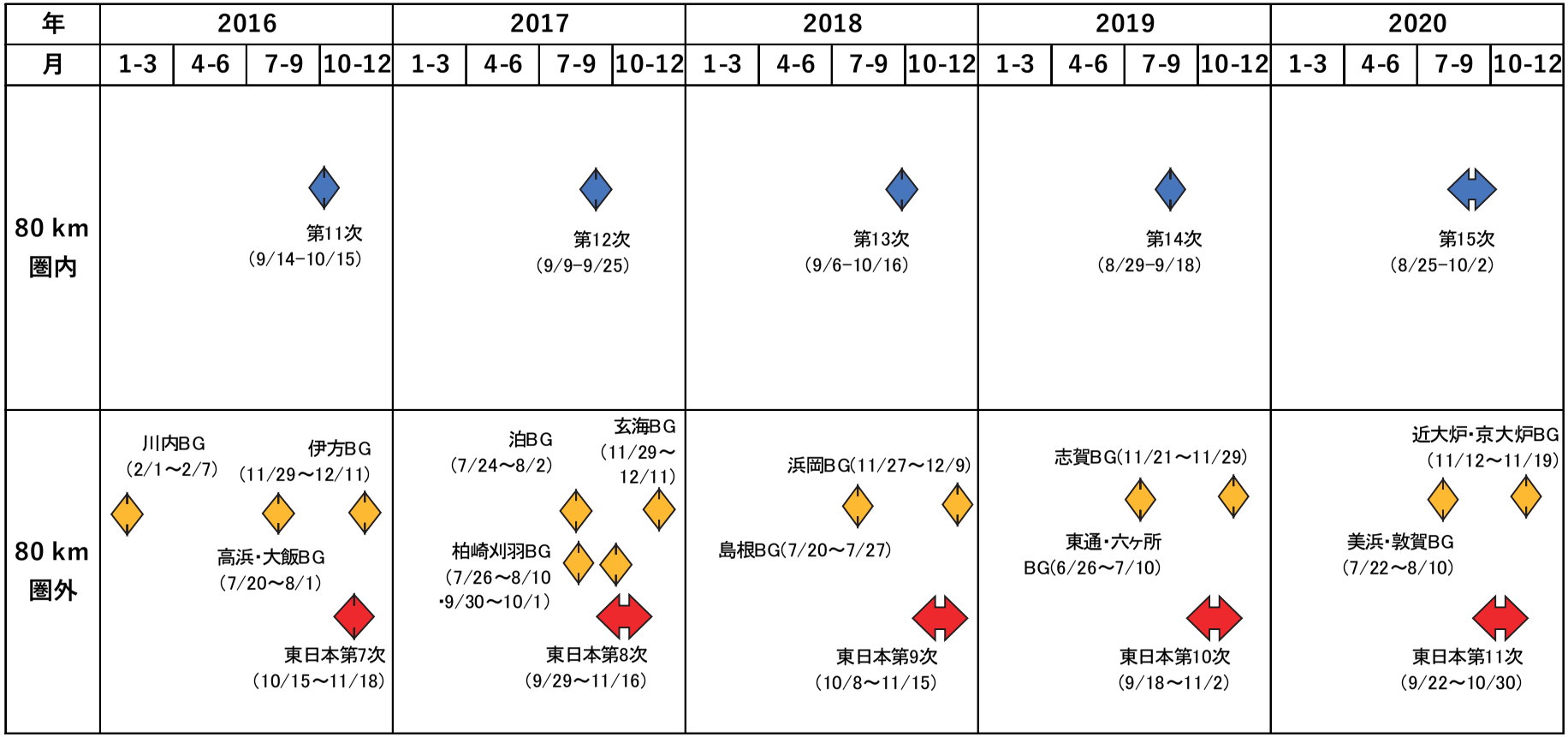


Fig. 2-1 航空機モニタリングの実績

(2/2)

Table 2-2 航空機モニタリングに関わる技術開発の経緯

年度 (和暦)	技術開発項目	開発成果
2011 (H23)	基本的な航空機モニタリング解析手法の確立	地上への換算パラメータの最適化等基本的な航空機モニタリングの解析手法を確立した。
2012 (H24)	航空機モニタリング解析システムの開発	2011年度に開発した手法をルーチン的に開発できるシステムを構築した。
	DEMデータ抽出ツールの開発	航空機による測定範囲の標高データを抽出できるツールを開発した。これにより、放射線の測定範囲内の地形の勾配が評価可能となった。
2013 (H25)	地形の影響調査	谷や山地形等の特徴的な地形の上空から放射線の計測データを取得し、DEMデータ抽出ツールを用いて測定結果に与える影響を評価した。
	I-131の地表面における沈着量の評価手法の開発	福島原子力発電所事故直後の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、I-131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。
2014 (H26)	地中の天然起源の放射性核種の弁別評価手法の確立	スペクトルピークの関数フィッティングにより、弁別できなかったCs-134起源の1,365 keVとK-40起源の1,461 keVを弁別する手法を開発した。地上の天然の放射性核種起源の空間線量率分布を評価可能となった。
	フライト高度による測定精度の評価	フライトの高度を変化させてデータを取得し、地上測定値と比較することにより、データの信頼性を評価した。
2015 (H27)	空気中ラドン子孫核種減算用検出器の導入	空気中ラドン子孫核種の影響を評価するための$LaBr_3$検出器を導入し、データを取得して基礎的な手法を確立した。
	積雪の影響評価手法の開発	放射線計測とともにレーザー測量および写真測量データを積雪の前後で取得し、積雪による放射線の減衰係数を評価した。
2016 (H28)	空気中ラドン子孫核種減算システムの航空機モニタリング解析システムへの組み込み	前年度導入した専用の検出器からのデータを利用した空気中ラドン子孫核種減算システムを構築し、既存の航空機モニタリング解析システムに組み込むとともに、福島原子力発電所から80 km圏外のデータに適用した。
	GPSの精度評価	近年、精度が向上している最新のGNSSを用いて航空機モニタリングデータと同時にデータを取得し、既存のGNSSの性能を比較評価するとともに、位置情報精度が地上の空間線量率への換算に与える影響について評価した。
2017 (H29)	地形補正手法の高度化	Ishizaki et al. (2017)[33] が開発した地形の勾配を詳細に補正する手法を広い範囲の航空機モニタリングに適用できるようにシステム化した。
2018 (H30)	地形補正手法による空間線量率計算精度の向上評価	2017年度にシステム化した地形補正手法を過去の航空機モニタリング結果に適用し、地上測定値を指標として従来手法と比較することにより、空間線量率の計算精度向上について定量的な評価を実施した。
2019(R1)	地形補正手法の航空機モニタリング解析システムへの組み込み	2018年度にシステム化した地形補正手法を既存の航空機モニタリング解析システムに組み込むとともに、福島原子力発電所から80 km圏内のデータに適用した。

3. 測定システムとヘリコプター

3.1. 航空機モニタリングシステム

一般的に、航空機モニタリングシステム (Aerial Radiation Monitoring System: ARMS) には、大型の NaI(Tl)シンチレーション式検出器 (以下、NaI(Tl)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を保存するシステムが用いられる。

今回のモニタリングで使用した Radiation Solutions Inc. (RSI, Canada) 製のシステム (以下、RSI システム) は、福島原子力発電所事故当時に DOE により行われた航空機モニタリングで用いられたシステムと同タイプであり、機内に搭載するタイプである。RSI システムのブロック図を Fig. 3-1 に示し、外観を Fig. 3-2 に示す。検出部 (Detector) には、2′′ × 4′′ × 16′′の NaI(Tl) 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 (検出部容量合計: 12.6 L)。なお、NaI(Tl)検出器の上部に設置してある $LaBr_3$ 検出器は大気中ラドンの子孫核種に起因する γ 線計数率の弁別 (8 章に詳述する) に使用する。検出器で計測した 1,024 ch (0 ch～1023 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、RS-701 と呼ばれる NaI(Tl)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。各検出器のデータは RS-501 という装置で統合される。RS-501 は PC と接続でき、PC にインストールされている専用のソフトウエア (RadAssist) を使用することによって GPS による位置情報や γ 線の計数率情報をリアルタイムに確認できる。また、全体は外付けのバッテリーで駆動し、完全充電で約 5 時間の稼働が可能である。福島およびその周辺県で使用した RSI システムは 2 セットあるため、以下それぞれ RSI 1 および RSI 2 と区別する。

また、RSI システムの GPS 受信機とは独立して高精度 GPS システムも機内に搭載している。当該システムでは高精度 GPS 受信機 (CORE 社製 QZNAV) が用いられており、RSI システムの GPS 受信機と比較して利用可能な信号が多い。具体的には、準天頂衛星システム (通称：みちびき) からの情報を利用できるほか、L1-SAIF と呼ばれる補強信号を受信することにより、精度の高い位置情報の測定を行うことができる。測定された γ 線計数率とその位置情報との紐付けは基本的に RSI システムの GPS で取得された緯度および経度を基に行うが、RSI システムの GPS が異常値を示す例が確認されている [22]。そのような事象が起きた際には、位置情報を高精度 GPS で取得された緯度および経度に置換する等の措置を行う。

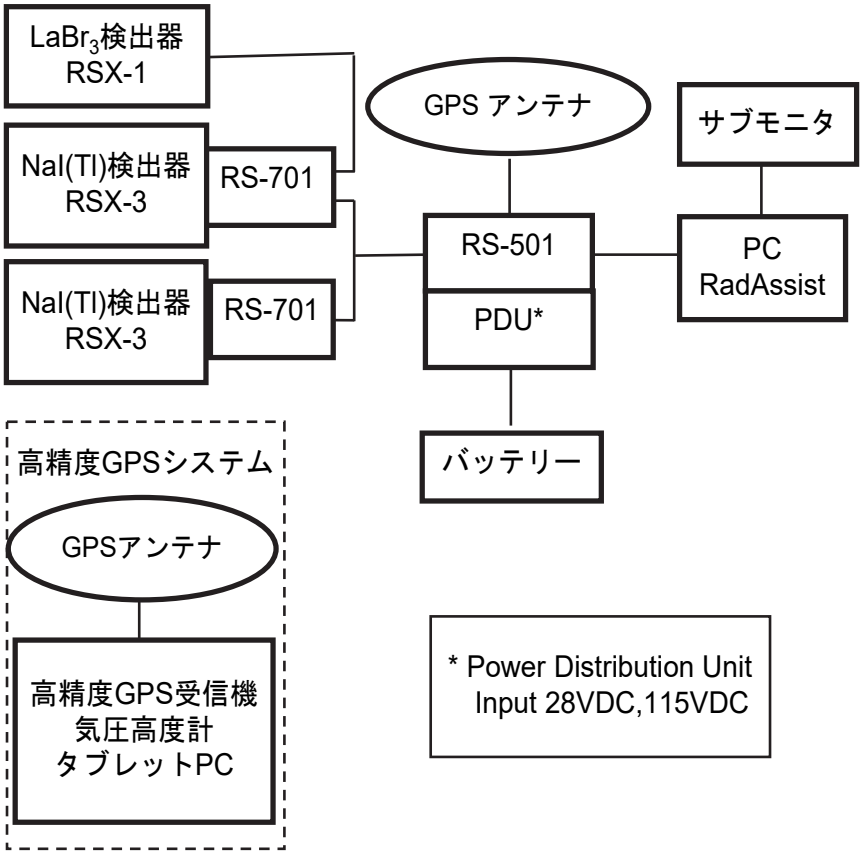


Fig. 3-1 RSI システムのブロック図

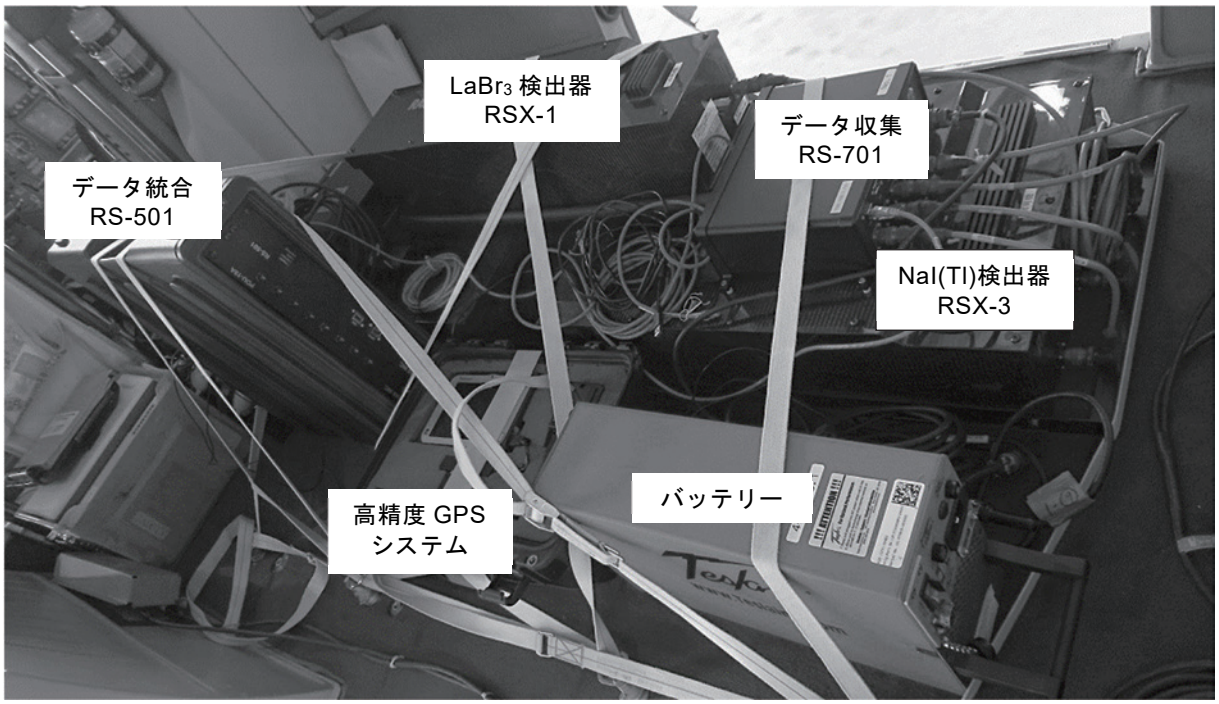


Fig. 3-2 RSI システムの外観

3.2. ヘリコプターの選定

RSI システムは機内に搭載するタイプであるため、ヘリコプターの機底に燃料タンクがある場合、燃料タンクの材料および燃料による放射線の遮蔽を無視できず評価が難しくなる。そこで、その評価に伴う誤差の混入を避けるため、RSI システムを使用できる機体は機底に燃料タンクのない機種に限定した。選定した機体について、Fig. 3-3 に示す。また、2012 年以降使用した機体と RSI システムの組み合わせを Table 3-1 に示す。2020 年度は、機体繰りの都合から、Bell 412 および Bell 430 を使用した。

Fig. 3-3 機底に燃料タンクのない機体一覧

Table 3-1 使用したヘリコプターと RSI システムのリスト

(1/2)

年度	モニタリング名	モニタリング期間	システム搭載ヘリコプター			
			RSI-1	RSI-2	RSI-3	RSI-4
2012	第5次航空機モニタリング	2012/6/22～6/28	Bell 430 (JA05TV) NNK	AS 332 (JA9660) NNK		
	第6次航空機モニタリング	2012/10/31～11/16	Bell 430 (JA6900) AAC			
	東日本第3次モニタリング	2012/10/31～12/28	Bell 412 (JA6767) NNK	Bell 430 (JA05TV) NNK		
	警戒区域及び避難指示区域における航空機モニタリング（第6.5次）	2013/3/4～3/11	Bell 412 (JA6767) NNK			
2013	第7次航空機モニタリング	2013/8/27～9/28	Bell 430 (JA6900) AAC	Bell 412 (JA6928) AAC		
			Bell 412 (JA6767) NNK	Bell 430 (JA05TV) NNK		
	東日本第4次モニタリング	2013/9/3～11/4	Bell 430 (JA6900) AAC	Bell 430 (JA05TV) NNK		
			Bell 412 (JA6767) NNK			
	第8次航空機モニタリング	2013/11/2～11/19	Bell 430 (JA6900) AAC	Bell 430 (JA05TV) NNK		
2014	第9次航空機モニタリング	2014/9/1 ～9/20	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA6928) AAC		
	東日本第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		
	東日本第6次モニタリング	2015/10/2 ～11/4	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA6767) NNK		
				Bell412 (JA6928) AAC		
	川内原子力発電所BGモニタリング	2016/2/1～2/7			Bell412 (JA6928) AAC	
2016	大飯・高浜発電所BGモニタリング	2016/7/20 ～ 8/1			Bell412 (JA9584) AAC	
	第11次航空機モニタリング	2016/9/14 ～10/15	Bell430 (JA05TV) NNK	S-76 (JA6901) AAC Bell412 (JA6767) NNK		
	東日本第7次モニタリング	2016/10/15 ～11/18	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA9616) AAC		
	伊方発電所BGモニタリング	2016/11/29～12/11			Bell430 (JA05TV) NNK	

（）内は機体登録番号

NNK: 中日本航空株式会社所有、AAC: 朝日航洋株式会社所有

Table 3-1 使用したヘリコプターと RSI システムのリスト

(2/2)

年度	モニタリング名	モニタリング期間	システム搭載ヘリコプター			
			RSI-1	RSI-2	RSI-3	RSI-4
2017	泊発電所BGモニタリング	2017/7/24 ～ 8/2			Bell412 (JA6767) NNK	
	柏崎刈羽原子力発電所BGモニタリング	2017/7/26 ～ 8/10 2017/9/30～10/1				Bell430 (JA05TV) NNK
	第12次航空機モニタリング	2017/9/9 ～9/25	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA9616) AAC		
	東日本第8次モニタリング	2017/9/29 ～11/16	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA6767) NNK Bell412 (JA9616) AAC Bell412 AAC		
	玄海原子力発電所BGモニタリング	2017/11/28～12/5			S76(JA6655) AAC	
2018	島根原子力発電所BGモニタリング	2018/7/20 ～ 7/27			Bell430 (JA6900) AAC	
	第13次航空機モニタリング	2018/9/6 ～10/16	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell 430 (JA6900) AAC		
	東日本第9次モニタリング	2018/10/8 ～11/15	Bell430 (JA05TV) NNK S-76 (JA6655) AAC	Bell412 (JA6767) NNK Bell430 (JA05TV) NNK		
	浜岡原子力発電所BGモニタリング	2018/11/27～12/9			Bell430 (JA05TV) NNK	
2019	東通・六ヶ所BGモニタリング	2019/6/26 ～ 7/10			Bell430 (JA6900) AAC	
	第14次航空機モニタリング	2019/8/29 ～9/18	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell 412 (JA9616) AAC		
	東日本第10次モニタリング	2019/9/18 ～11/2	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA9616) AAC Bell412 (JA6767) NNK		
	志賀原子力発電所BGモニタリング	2019/11/21～11/29			Bell430 (JA6900) AAC	
2020	美浜・敦賀BGモニタリング	2020/7/22～8/10			Bell412 (JA9616) AAC	
	第15次航空機モニタリング	2020/8/25～10/2	Bell430 NNK	Bell412 AAC		
	東日本第11次モニタリング	2020/9/22～10/30	Bell430 (JA05TV) NNK	Bell412 (JA6928) AAC Bell412 (JA6767) NNK		
	近大炉・京大炉BGモニタリング	2020/11/12～11/19			Bell412 (JA6928) AAC	

( ) 内は機体登録番号

NNK: 中日本航空株式会社所有、AAC: 朝日航洋株式会社所有

3.3. 機体によるγ線遮蔽効果

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 (Cs-137: 9.3 MBq) を用いて検出器で計数された計数率を比較した。比較結果を Table 3-2 に示す。線源は検出器からの距離を 50 cm に固定し、計数率の測定時間平均値および計数誤差 (計数率の平方根) を比較した。RSI システムと線源位置の関係について Fig. 3-4 に示す。なお、計数率の中には Cs-137 の他に自然放射性核種による寄与も含まれている。

Bell 430 (JA05TV, No.1) における計数率を基準とした場合、Bell 412 (JA6767, No.2) および Bell 412 (JA6928, No.3) では 3 %ほど高く、Bell 412 (JA6767, No.4) では 1 %ほど高かったが、Bell 412 および Bell 430 の機種間の機体底部の構造の違いに起因するγ線遮蔽効果の差異が要因の一つと考えられる。また、Bell 412 同士で比較すると、JA6767 (No.2) に対する JA6928 (No.3) の計数率は、異なる RSI システムを使用してはいるものの、ほとんど同値であった。一方で、同じ JA6767 (No.2 および No.4) 同士であっても、使用する RSI システムが異なれば、2 %ほどの計数率差が生じた。計数率に対する計数誤差の割合は 0.1 %程度であり、本試験で見られた RSI システム間の計数率差は有意な差を持つと思われる。以上のことから、RSI システム間でγ線の検出感度等が若干異なっており、またヘリコプターは同機種であっても機体間で機体底部の構造がある程度異なることが示唆される。さらに言えば、機内における RSI システムの配置によって遮蔽状況は若干変わると思われるため、今後も今回のような線源試験を実施し、使用する機種および機体間のγ線計数率差をなるべく小さくできるような配置を決定することが望ましい。なお、この遮蔽状況の違いは、地上における空間線量率等への換算パラメータを設定する際に機種ごとでキャリブレーションを実施するため、単独でパラメータとして扱う必要はないが、数値の解析の際の参考情報となる。

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

No.	System	ヘリコプター	運航会社	計数率(s^{-1})±計数誤差(s^{-1}) at 50 cm	No.1の計数率(s^{-1})を1.00に規格化
1	RSI 1	Bell 430 (JA05TV)	NNK	$(3.2622 \pm 0.0057) \times 10^5$	1.00
2	RSI 1	Bell 412 (JA6767)	NNK	$(3.3510 \pm 0.0058) \times 10^5$	1.03
3	RSI 2	Bell 412 (JA6928)	AAC	$(3.3673 \pm 0.0058) \times 10^5$	1.03
4	RSI 2	Bell 412 (JA6767)	NNK	$(3.2887 \pm 0.0057) \times 10^5$	1.01

NNK: 中日本航空株式会社
AAC: 朝日航洋株式会社
計数率は有効数字5桁目で四捨五入し、有効数字4桁で表記した。
※計数率はCs-137線源の他に自然放射性核種による寄与も含んでいる。

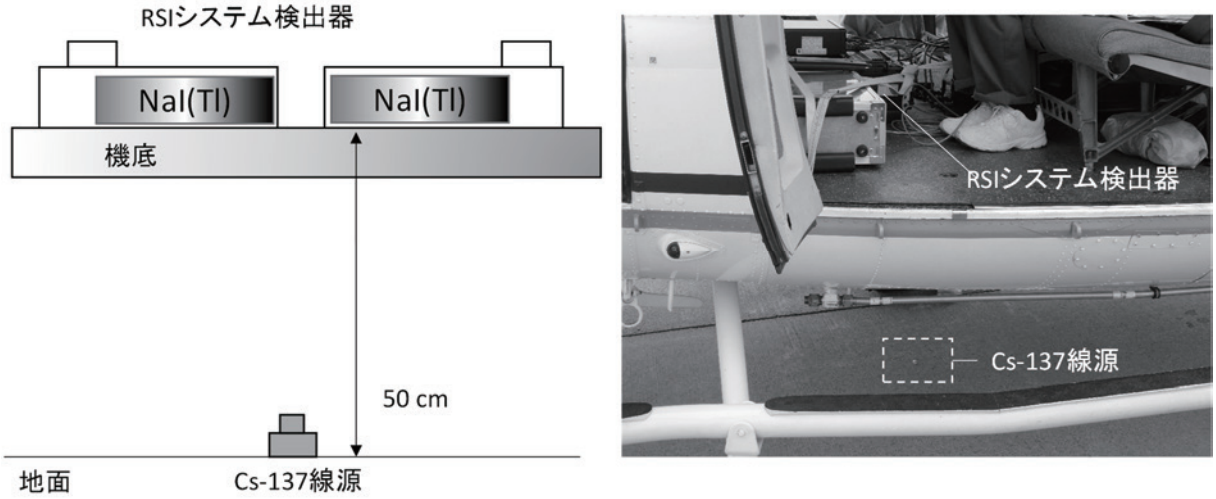


Fig. 3-4 線源試験イメージ

3.4. RSI システムの保守

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

・RSI システムの接続チェック: データ収集装置 (RS-701 および RS-501) に表示されるエラーランプチェック

・チェックプログラムによる検出器の特性確認 (環境中に存在する Tl-208 の 2,614 keV のピークに対するエネルギー分解能 (Energy Resolution) と信号増幅回路 (Amplifier : アンプ) の振幅利得 (Gain: ゲイン) をチェック)

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

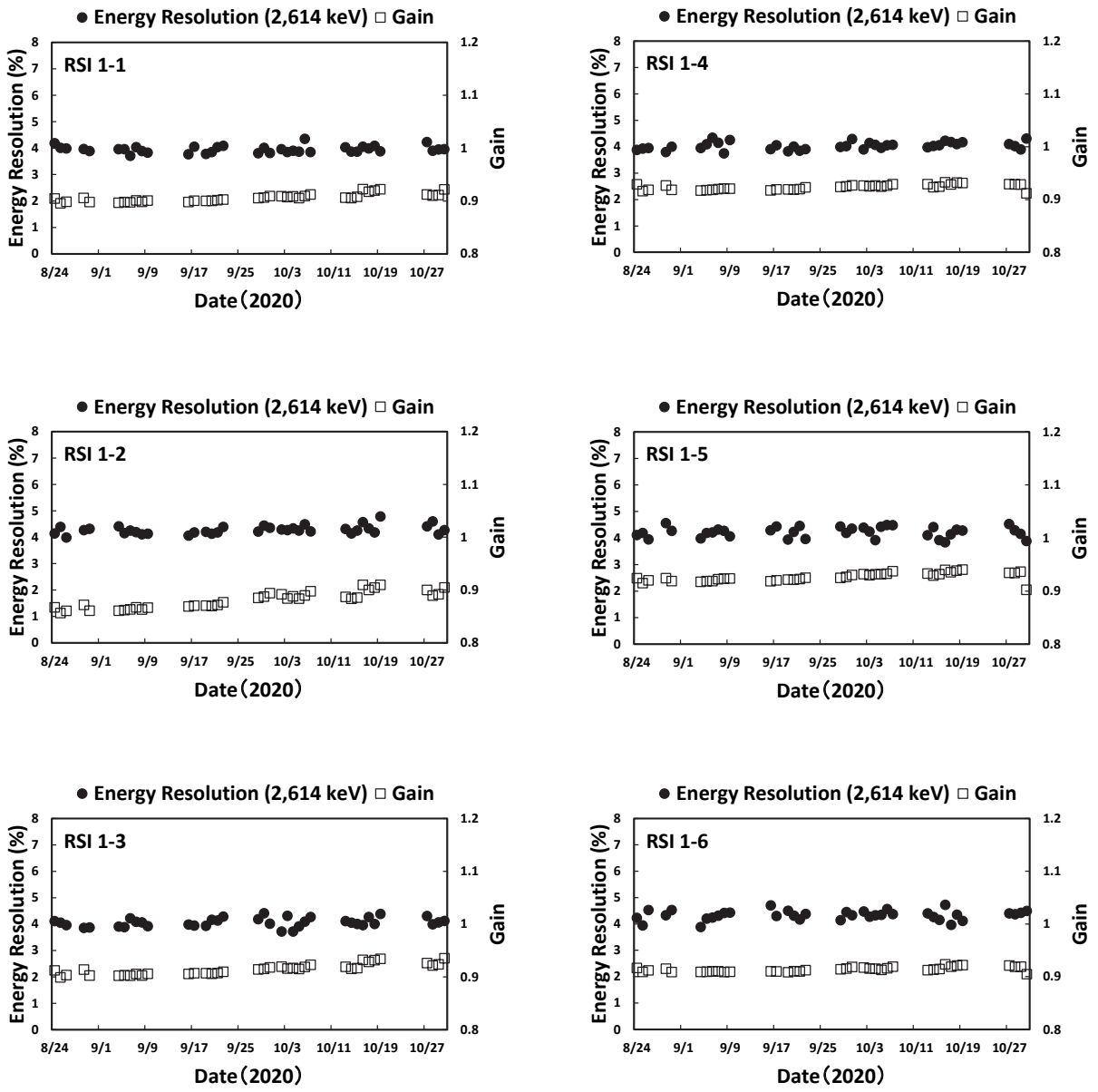


Fig. 3-5 RSI システムのエネルギー分解能および Gain の変動 (RSI 1)

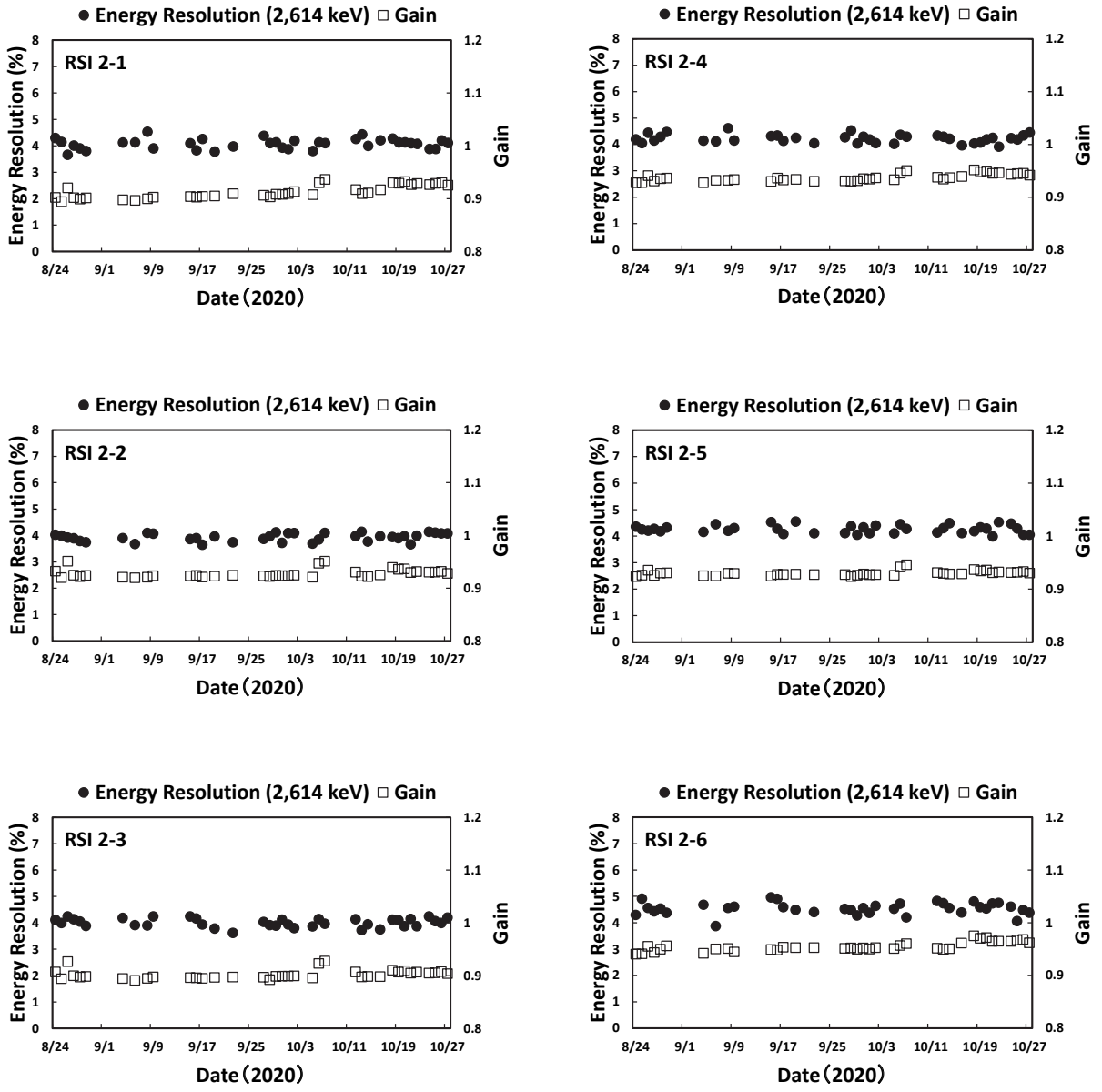


Fig. 3-6 RSI システムのエネルギー分解能および Gain の変動 (RSI 2)

4. データ取得および解析方法

4.1. 上空での測定値の地上への換算に関する基本的な考え方

上空から地上の放射線を測定する基本的な考え方は、以下のような仮定に基づいている。

・上空で測定されている計数値は、上空を頂点とし対地高度を高さとした円錐の底面部分に該当する地上の放射線量の平均値とする。

・測定対象となる地表は平坦かつ放射線の分布は一様とする。

このような条件において上空で測定されている計数値を考察するため、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が行われた [17)]。当該計算では、Cs-134 と Cs-137 が無限平板 (実際の計算では、無限相当とした半径 2,000 m × 高さ 1 mm) で均一に分布していると仮定し、対地高度と空間線量率の関係が求められた (Fig. 4-1)。このように、対地高度 50 m 以上では、空間線量率と対地高度は指数の相関関係にある一方で、対地高度 50 m 以下では指数の関係から外れることが明らかとなった。また、対地高度 50 m 以上では地表面からの放射線が検出器軸に対し平行入射に近いため、線源からの距離に対して指数関数的に γ 線が減衰するのに対し、対地高度 50 m 以下では線源からの距離が近くなるため、対地高度が低くなるにつれ影響を受ける線源の範囲が広がり、検出器軸に対し垂直に近い方向から入射する放射線が増えるため指数関数の関係から逸脱することが示唆された。

このように、上空から地上を測定する際には、対地高度が高くなると地上の測定範囲が広がる。上空における地上からの γ 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 [17)]を示す。光子・電子挙動シミュレーションには、カスケードモンテカルロ計算コード EGS5[34)] (Electron Gamma Shower Version 5) が使用され、RSI システムの検出器がモデル化 [28)]されるとともに、地上に無限平板状の半径 800 m × 高さ 1 mm の Cs-137 円柱線源が模擬された。当該シミュレーションでは、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 (50 m、100 m、300 m および 500 m) させ、検出器に入射する γ 線の計数率および同ジオメトリにおいて検出器に到達する γ 線の起源となる線源の位置が計算された。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た割合を Fig. 4-2 に示す。本図から、航空機モニタリングの基準高度である 300 m から計測した場合、線源の概ね 300 m の円内の放射線の計数が 80 %以上の割合を占めることが分かる。また、検出器の位置から同軸上の線源位置を中心として、100 m ごとのドーナツ状の面積で分割し、その部分の放射線が検出器で計数された割合を Fig. 4-3 に示す。線源からの距離は 100 m、300 m、500 m の場合で比較され、高度 300 m の場合を見ると、100 m～200 m の位置が 30 %で最も割合が大きく、0 m～100 m および 200 m～300 m は 20 %程度であった。この割合の違いは計数効率を考慮すると大きくなく、対地高度 300 m から測定されるのは、地上の半径 300m 円内における γ 線計数率の平均値と考えられる。一方、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 であり、この傾向は Fig. 4-1 で示された対地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、対地高度と比較して測定範囲が広くなることが示された。

以上の計算結果から、航空機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)。飛行する対地高度が変化すると地上の測定範囲が変化することになり、測定値の不確かさをなるべく低減するために、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、以上のような理論や測定の不確かさを考慮し、対地高度 300 m を基準として対地高度が 500 m までのデータを使用した。なお、この対地高度から逸脱した状態で測線フライトが 1 km 以上に及んだ場合には、再フライトによりデータを再取得した。

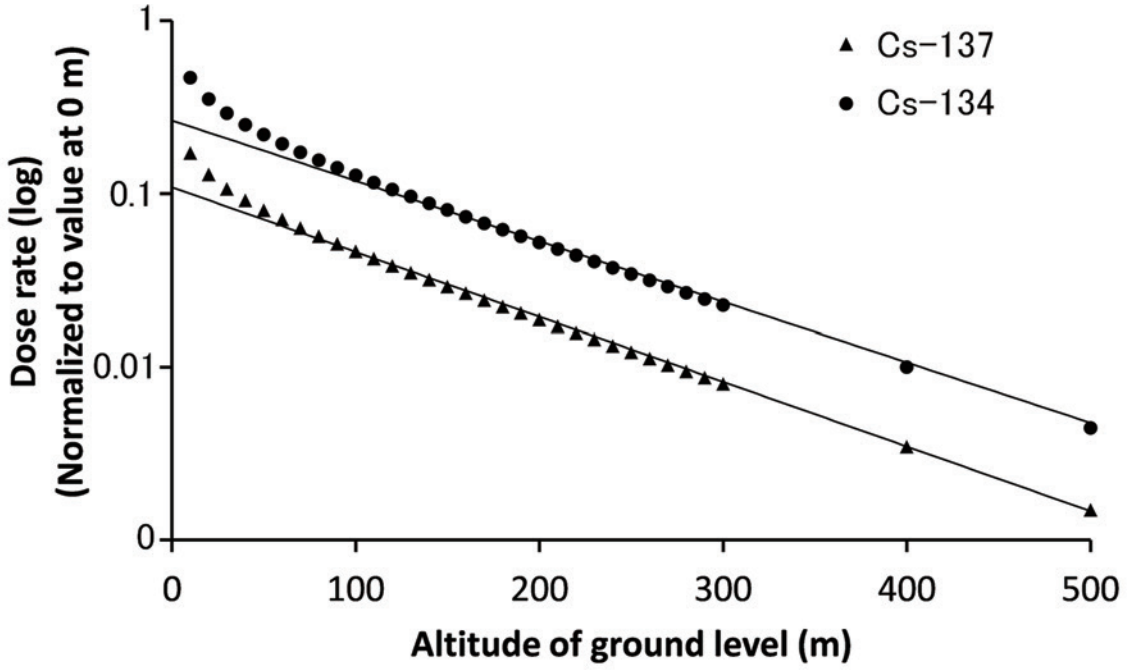


Fig. 4-1 対地高度と空間線量率の関係

(半径 2,000 m × 高さ 1 mm の円柱線源で計算 [17]。図中の実線は指数関数による近似曲線である。)

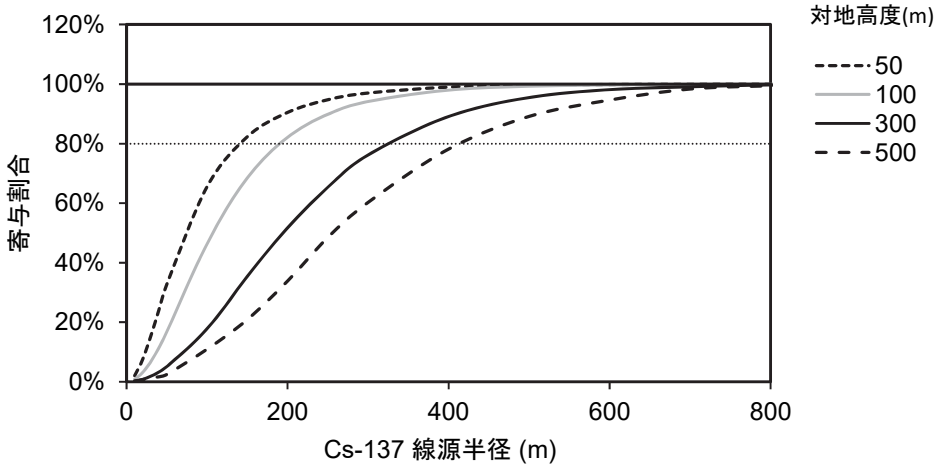


Fig. 4-2 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の積算計数に対する線源位置の関係
(上空での検出器の計数率を **100 %**に規格化し、線源半径由来の計数率の割合を積算**)**

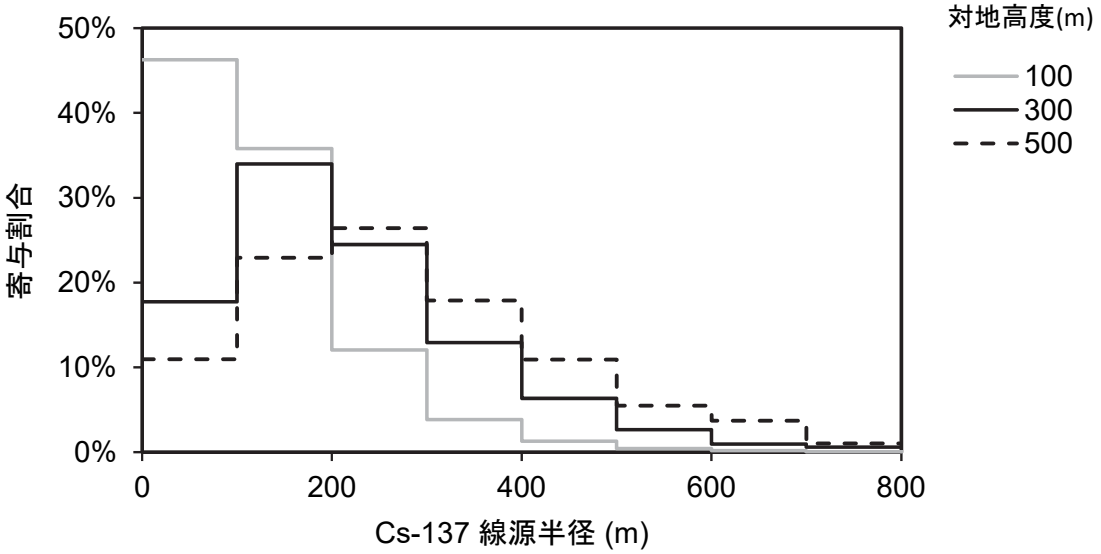


Fig. 4-3 均一無限平板線源を上空で測定した場合の検出器の線源位置ごとの計数の割合
(上空での検出器の計数率を **100 %**に規格化し、**100 m** ごとのドーナツ状部分由来の計数率の割合**)**

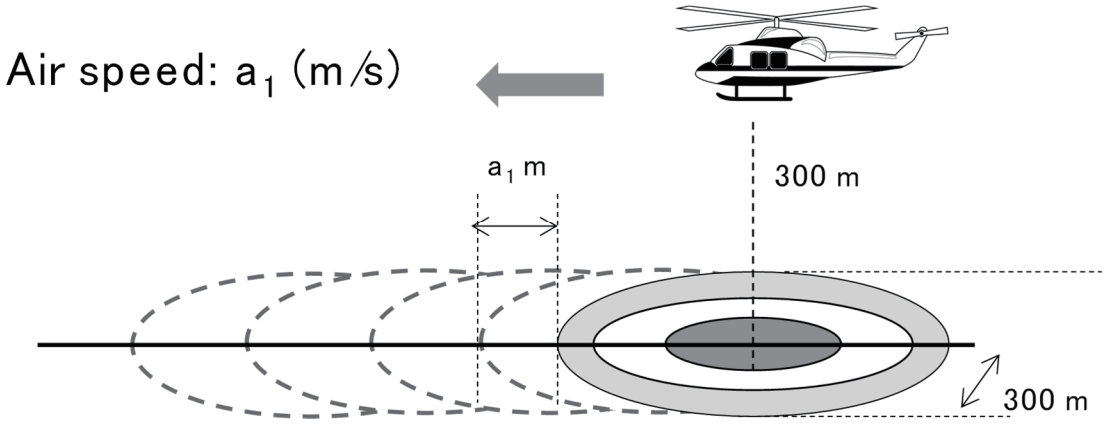


Fig. 4-4 上空からの測定イメージ

4.2. データ取得方法

データは、下記のようなフライト条件で取得した。なお、条件は、気象条件や地形の高度勾配によって若干変化する。フライトイメージを Fig. 4-5 に示す。また、測定データは、1 秒ごとに GPS の位置情報と検出器のγ線のスペクトルを記録し、下記の許容範囲から逸脱した測定データは不確かさが比較的大きく含まれるため、空間線量率等の算出には用いないこととした。予定したフライト測線について Fig. 4-6 に示す。

[フライト条件]

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

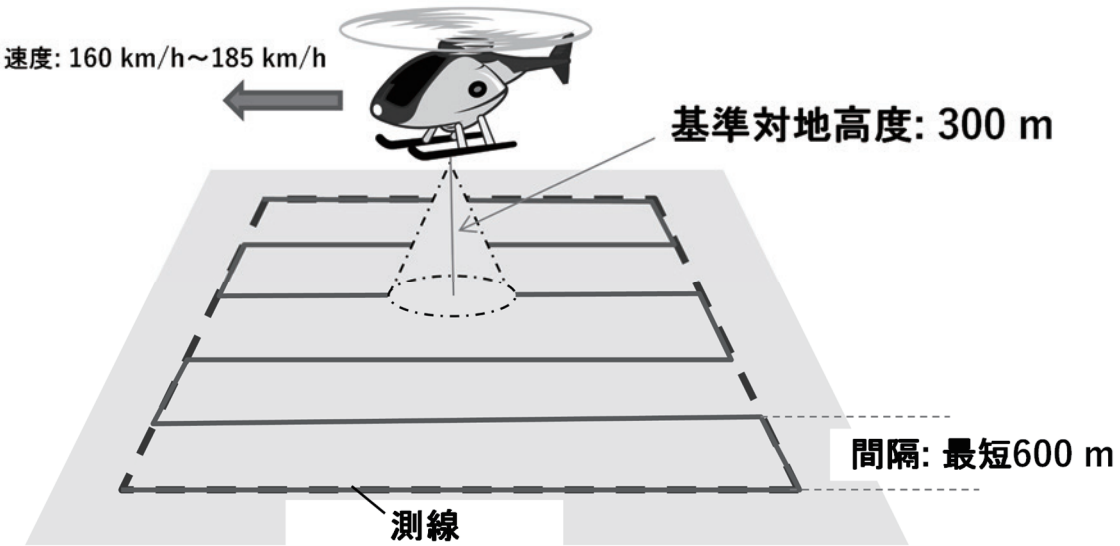


Fig. 4-5 フライトイメージ

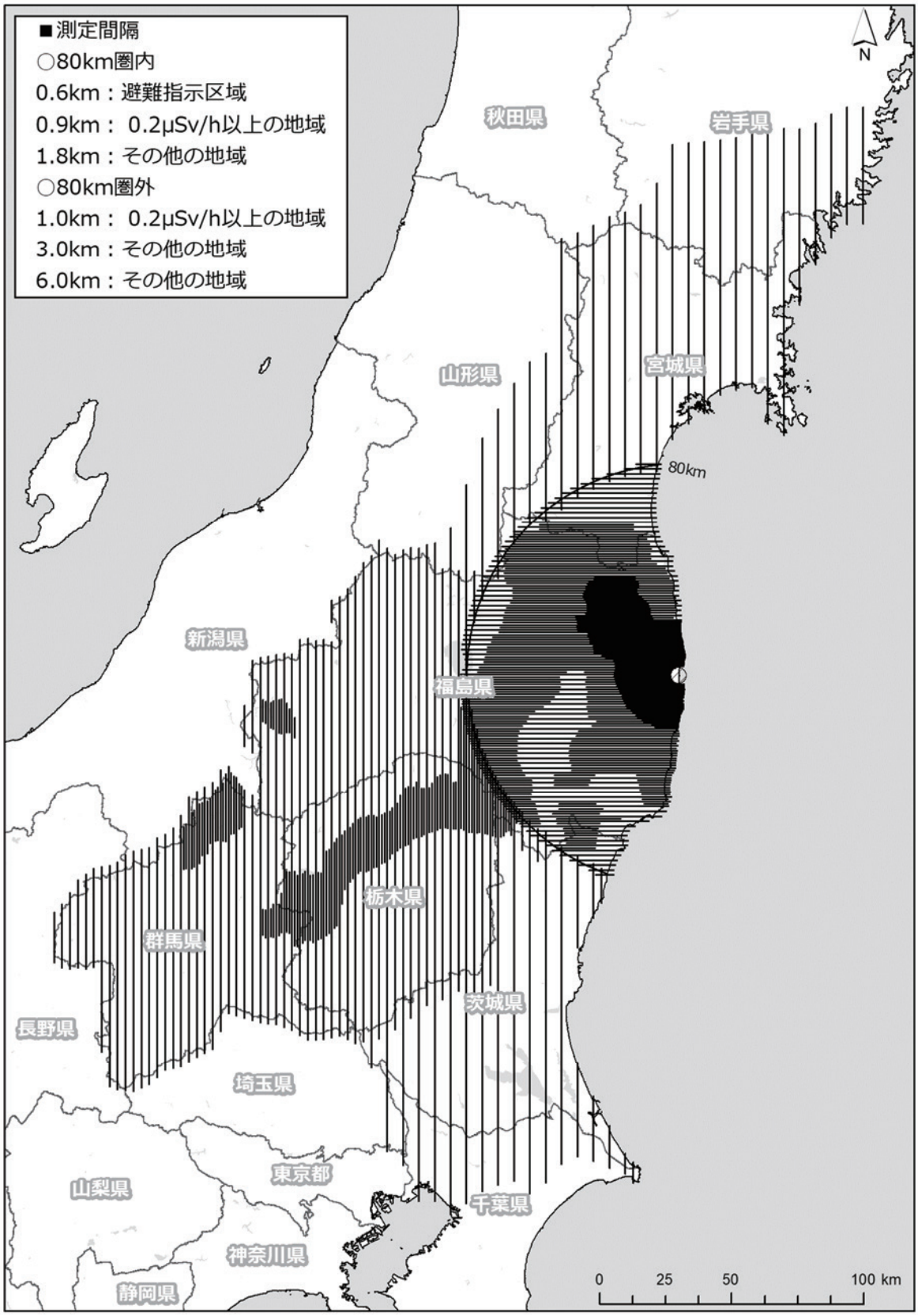


Fig. 4-6 予定したフライトの測線

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

4.3. 設定パラメータ妥当性確認のためのキャリブレーションフライト方法

上空で取得したデータを、地表面から 1 m の高さの放射線量や地表面の放射性 Cs の沈着量に換算するためのパラメータについては、2014 年度までのデータを基に数値を決定している。2020 年度は、決定したパラメータの妥当性を確認する目的で、キャリブレーションフライトを行った。キャリブレーションフライトの種類と目的について以下に示す (Table 4-1) 。

・テストラインフライト

高度を補正するための実効的な空気減弱係数 (Attenuation Factor: AF (m^{-1})) を求めるためのフライトである。本フライトは、線量や地形の変化が少ない地点において約 3 km のラインを設定し、その上空において高度を変化させながら (150 m、300 m、450 m、600 m、750 m、900 m および 1,500 m) フライトを実施する。得られたデータは高度ごとに平均化し、高度と計数率のグラフを作成し、指数近似の傾きによって、高度を補正する。テストラインフライトのイメージを Fig. 4-7 に示す。また、テストラインとして選定した場所について Fig. 4-8 に示す。また、テストライン付近において、NaI(Tl)検出器 (日立製作所製 TCS-172B) を用いて、25 地点目安に地表面から 1 m の高さの空間線量率の測定 (以下、地上測定) を行った。

・テストポイントフライト

空間線量率の勾配が小さい場所および地形の平坦な地点 (テストポイント) を選定し、そこから半径 1,000 m の範囲内における上空でホバリングすることで基準高度 (300 m) における地上の空間線量率換算係数 (Conversion factor of Dose-rate: CD ([s^{-1}]/[μSv/h])) を求めるためのフライトである。また、テストポイントでは半径 1,000 m の範囲内で 60 ポイントを目安に地上測定を行った。Fig. 4-9 にテストポイントフライトのイメージを示す。また、テストポイントとして選定した場所を Fig. 4-10 に示す。

・宇宙線フライト

宇宙線の影響を差し引くため、地上からのγ線の影響が極めて少ない海上を約 300 m～2,400 m まで上昇し、宇宙線に起因するγ線計数率データを取得するものである。宇宙線フライトのイメージを Fig. 4-11 に示す。フライト場所は、陸地から十分に離れた海上であれば場所は問わないので、天候等を見ながら太平洋上の適当な位置で実施する。ただし、天候等の問題で海上への移動が困難な状況下では、起伏の少ない陸地において当該フライトを実施する。なお、陸地で実施した場合でも対地高度約 300 m から 2,400 m まで上昇するが、地上からの放射線の影響がほとんどないと考えられる対地高度約 900 m 以上で取得されたγ線計数率データを原則として用いることになる。

・Rn 影響フライトおよび BG フライト

Rn 影響フライトは空気中に存在するラドン子孫核種の影響を考察するために、決められた場所の上空において対地高度約 450 m～900 m までを直線的に上昇しデータを取得するものである。また、BG フライトとは、地上からの放射線の影響がほとんどないと考えられる、対地高度約 900 m を約 2 分間直線飛行することにより、機体および検出器のバックグラウンドデータを取得するものである。両フライトは原則として、セットで 1 日 1 回実施する。Rn 影響フライトおよび BG フライトのイメージを Fig. 4-12 に示す。

・天然核種フライト

福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs による影響のないと考えられる場所において対地高度約 300 m をフライトすることによりデータを取得し、γ 線スペクトルから天然核種の影響を差し引き、地表面における放射性 Cs 沈着量を算出するためのスペクトルインデックスを算出するものである。天然核種による影響の減算方法については 4.6.1 に詳述する。本フライトは、過去に使用した実績のない機体を用いる場合にのみ、1 回実施することとしている。天然核種フライトの場所の例を Fig. 4-13 (左) に示す。

・オーバーラップフライト

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

Table 4-1 キャリブレーションフライトの一覧

名称	目的	方法	頻度
テストラインフライト	空気減弱係数を算出	指定のテストライン上で高度 (150 m、300 m、450 m、600 m、750 m、900 m および 1,500 m) を変化させてフライト	測線 5,000 km をフライトするごとに 1 回実施
テストポイントフライト	空間線量率換算係数を算出	指定の地点上で、対地高度 300 m で 3 分ホバリング	測線 5,000 km をフライトするごとに 1 回実施
宇宙線フライト	宇宙線の影響を調査	海上または陸上を 300 m～2,400 m まで上昇	1 週間 1 回を目安
Rn 影響フライト	ラドンの影響を調査	フライト前に拠点近くの測線上を対地高度 450 m～900 m まで直線的に上昇	毎日
BG フライト	機体のバックグラウンドを調査	対地高度 900 m を約 2 分間直線飛行(Rn 影響フライト後に実施)	毎日
天然核種フライト	天然核種の影響を減算し、放射性 Cs 沈着量を算出するためのスペクトルインデックスを算出	福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs による影響のないと考えられる場所でフライト	過去に機体の使用実績がなければ 1 回
オーバーラップフライト	機体間のレスポンス補正	特定の場所をフライト	機体と RSI システムの組み合わせごとに 1 回

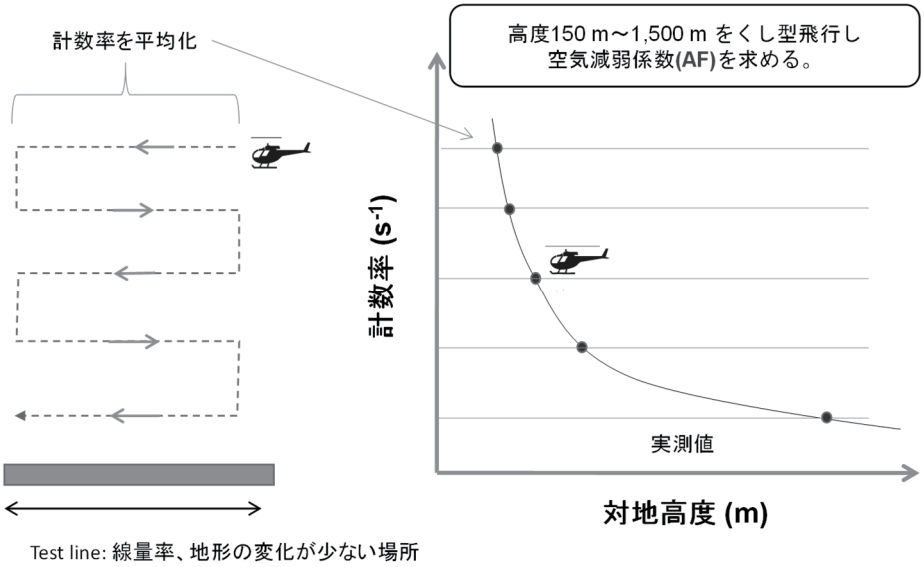
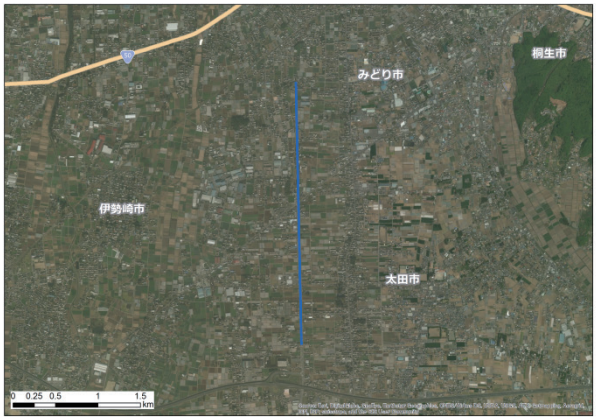


Fig. 4-7 テストラインフライトのイメージ

Test line 1 (岩手県奥州市)



Test line 3 (群馬県みどり市)

Test line 4 (茨城県那珂市)

Test line 5 (栃木県大田原市)

Fig. 4-8 テストラインの場所

(1/2)

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

Test line A (福島県須賀川市)

Fig. 4-8 テストラインの場所

(2/2)

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

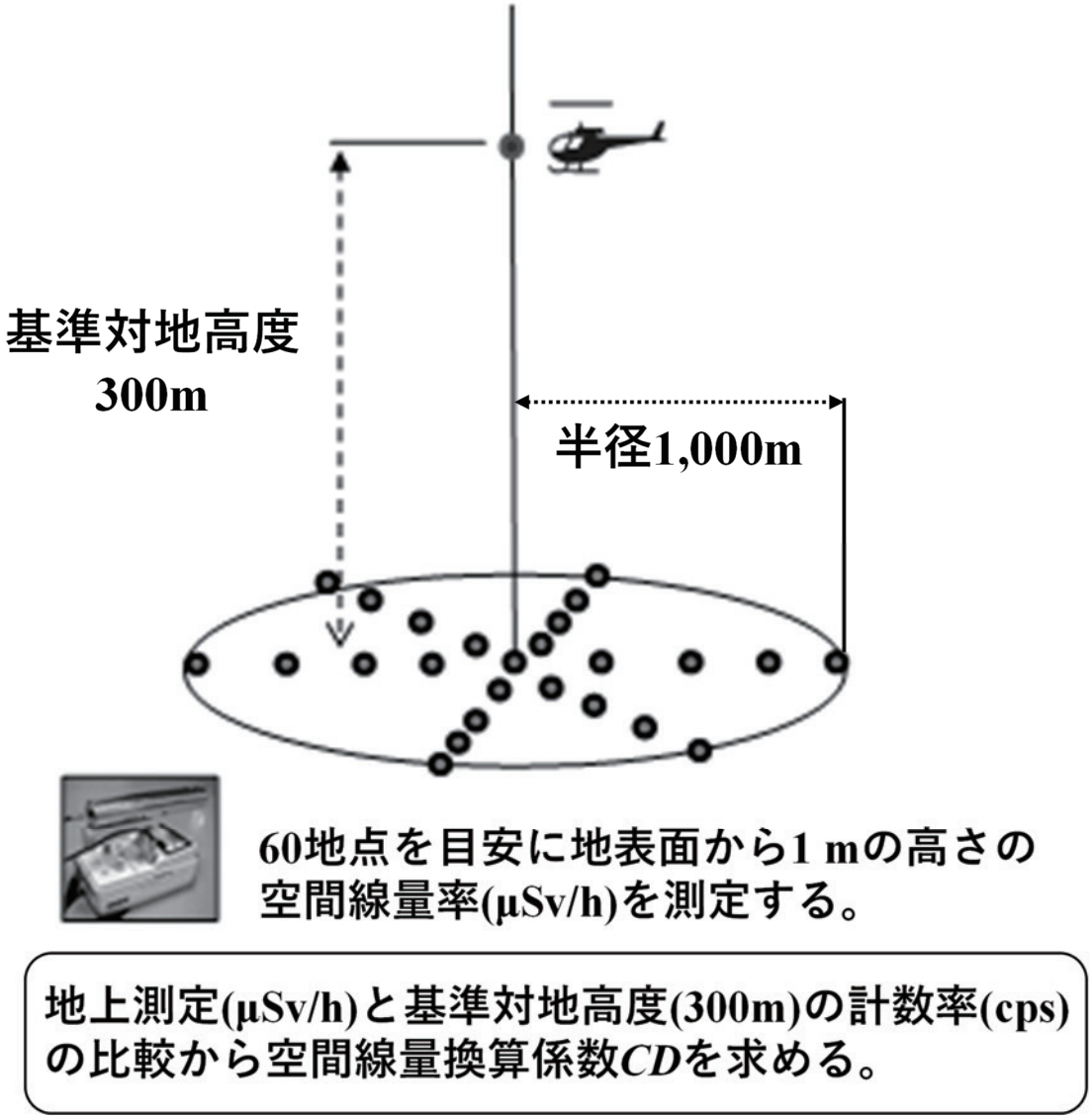
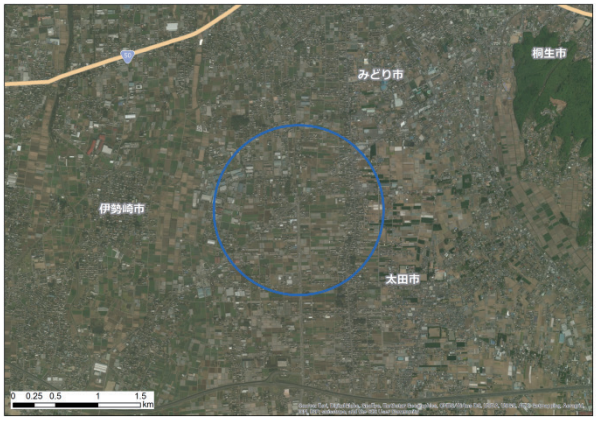


Fig. 4-9 テストポイントフライトのイメージ

Test point 1 (岩手県奥州市)



Test point 3 (群馬県みどり市)

Test point 4 (茨城県那珂市)

Test point 5 (栃木県大田原市)

Test point D (福島県郡山市)

Test point E (福島県浪江町)

Fig. 4-10 テストポイントの場所

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

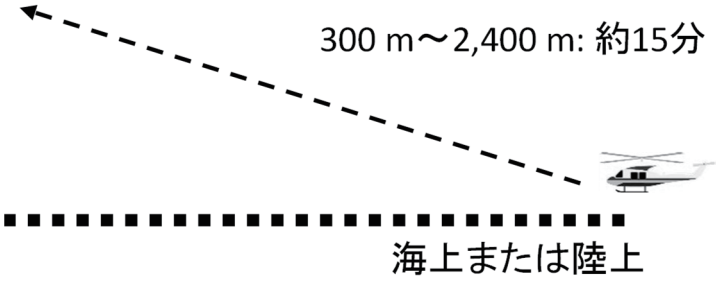


Fig. 4-11 宇宙線フライトのイメージ

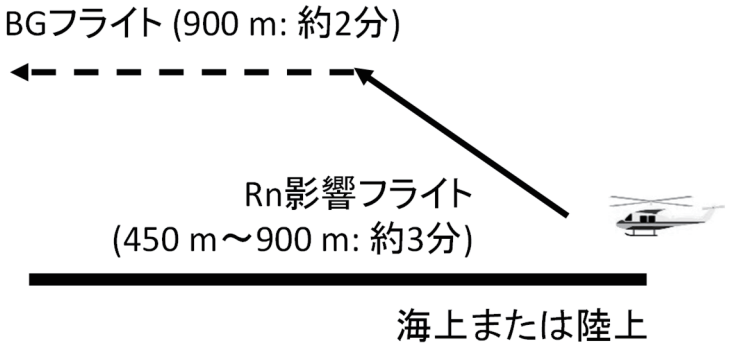
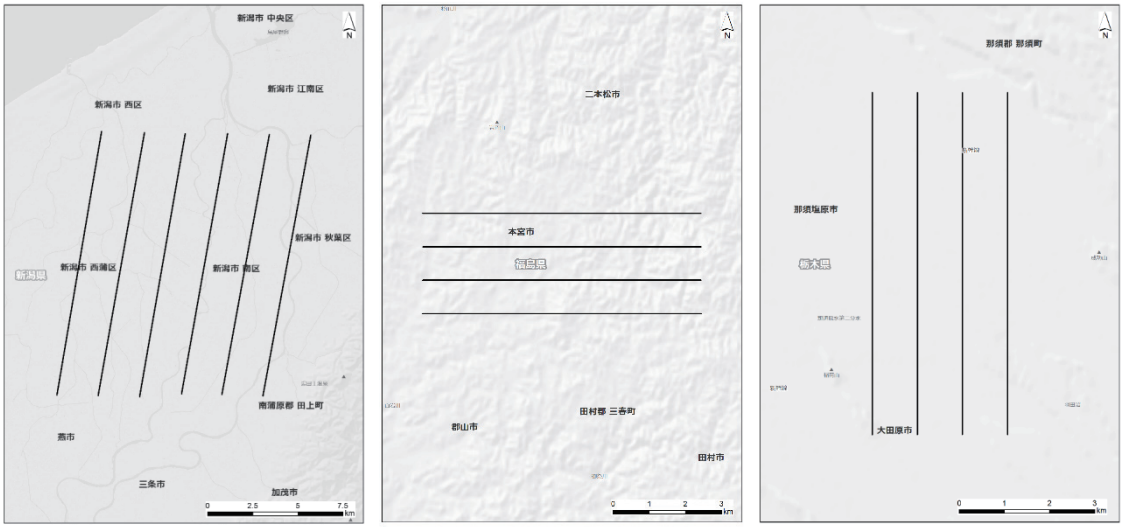


Fig. 4-12 Rn 影響フライトおよび **BG** フライトのイメージ



天然核種フライト測線

オーバーラップフライト測線 (80 km 圏内)

オーバーラップフライト測線 (80 km 圏外)

Fig. 4-13 天然核種フライトの測線とオーバーラップフライト場所

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

4.4. 解析のフロー

本測定法により上空で計数される放射線は、主に以下の 4 種類に分けられる。

① 放射性 Cs からの γ 線
② 天然の放射性核種からの γ 線
③ 宇宙線
④ その他 (空気中ラドン子孫核種、自己汚染等を含む。)

航空機モニタリングでは、放射性 Cs 由来の γ 線を測定することが主目的であるため、全計数率から②～④起源の計数率はバックグラウンドとして減算する必要がある。これらを考慮した解析のフローを Fig. 4-14 に示す。なお、本節以降の空間線量率とは、周辺線量当量率 (1 cm 線量当量率) を意味する。

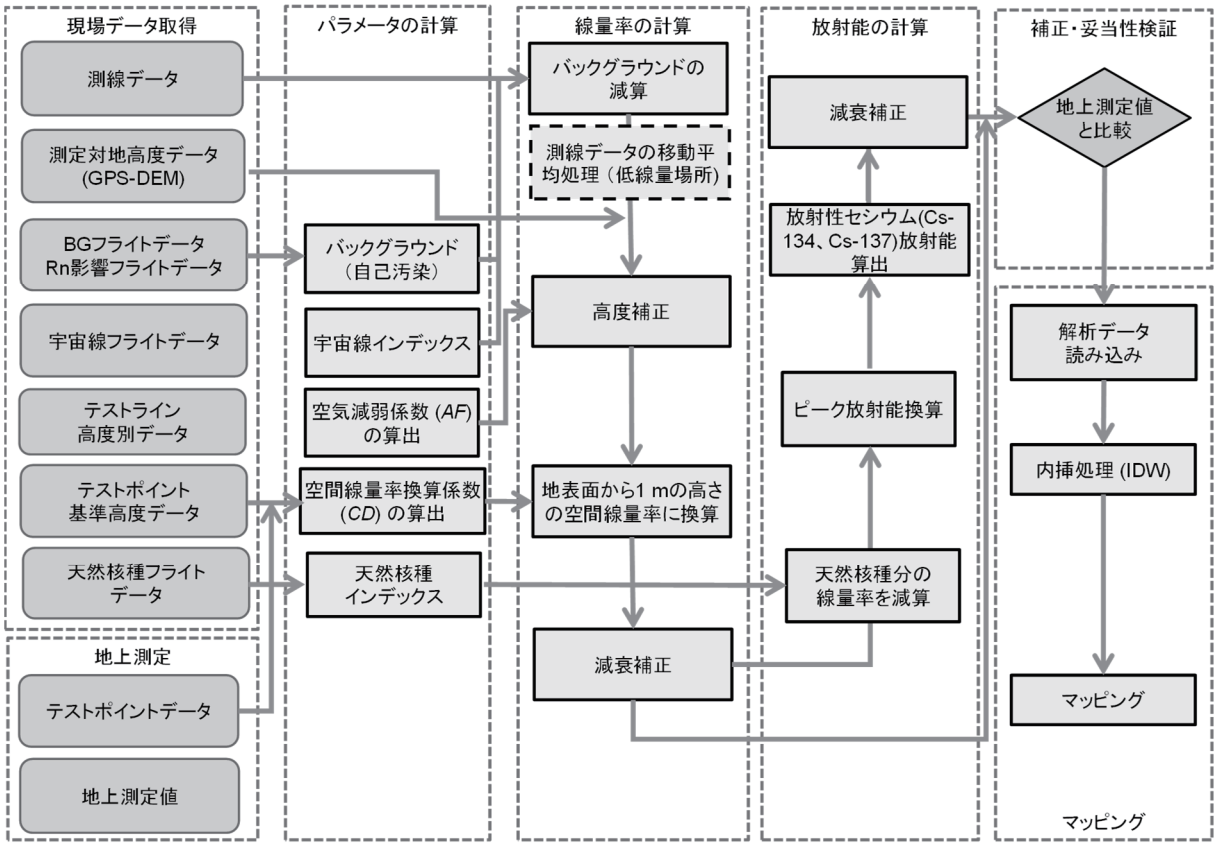


Fig. 4-14 解析のフロー

4.5. 空間線量率への換算方法

上空での計数率から地上への空間線量率へ換算する手順は、大まかに以下の通りである。

① バックグラウンド減算：全計数率から、前項で挙げたバックグラウンドの内、天然核種からの γ 線、宇宙線およびその他 (空気中ラドン子孫核種、自己汚染等を含む。) に起因する計数率を減算する。

② 高度補正：実際のフライト高度と基準高度とのずれにより生じる、γ 線計数率の多寡を高度補正係数により補正する。

③ 空間線量率への換算：①、②を経て得られた計数率を空間線量率換算係数 (*CD*) により地上空間線量率に換算する。

以下、上記項目の詳細について述べる。

4.5.1. バックグラウンド減算 (自己汚染および宇宙線)

航空機モニタリングにおいて、天然核種からの γ 線、宇宙線およびその他 (空気中ラドン子孫核種、自己汚染等を含む。) に起因する γ 線計数率はバックグラウンドとなる。本項では、自己汚染および宇宙線に起因する γ 線計数率の減算方法について示し、天然核種の減算方法は 4.6.1. に詳述する。自己汚染の減算については、BG フライトとして実施した地上からの放射線が届かないと考えられる対地高度約 900 m のフライト (もしくは海上でフライトした際のデータ) を用いる。地上および海上で取得したスペクトルの例を Fig. 4-15 に示す。また、平均的な自己汚染の計数率を Table 4-2 に示す。なお、BG フライトには大気中ラドン子孫核種に起因する計数率も含まれており、大気中のラドン濃度は日単位や季節単位で変動することが知られている。よって BG フライトによる自己汚染の減算には、ある程度の不確かさが伴うことが推察される。標準的な解析手法では、自己汚染にラドン子孫核種による影響を含んでバックグラウンドとして取り扱う。なお、ラドン子孫核種による影響を除去して自己汚染を評価し、バックグラウンドを減算する手法 (ラドン弁別手法) については 8 章に詳述する。

これまでの経験から、海抜高度が上昇すると宇宙線起因の計数率が上昇することが分かっている。宇宙線起因の放射線は、RSI システムが測定している全エネルギー範囲 (30 keV～3,000 keV) で計数されるが、Tl-208 が放出する 2,614 keV の γ 線およびその散乱線の影響により、2,614 keV 以下の計数において、宇宙線による計数を弁別することは難しい。そこで、宇宙線だけを計数していると考えられる 2,800 keV 以上の計数に着目した。Fig. 4-16 に海抜高度と宇宙線の計数率の関係例を示す。この例は、沖縄と北海道での海上において、50 m～2,000 m の海抜高度で取得したデータのうち、2,800 keV 以上の γ 線の計数率をプロットしたものである。なお、RSI システムにおいて、3,000 keV 以上の計数は最終チャンネル (1,023 ch) に積算される。このように、海抜高度と 2,800 keV 以上の γ 線の計数率は正の相関にあり、計測する場所に影響されない。また、2,800 keV を超える γ 線の計数率 ($C_{>2,800\ \mathrm{keV}}$) と 2,800 keV 以下の計数率 ($C_{\leqq 2,800}$) の比 (*CR-index*) は高度に依存せず一定の数値を示すことから、*CR-index* を機体と検出器の組み合わせごとに設定した。その後、実際に測定したスペクトルの 2,800 keV を

超えるγ線の計数率から *CR-index* を用いて全エネルギーにおける宇宙線起因のγ線の計数率を算出し、全計数率から差し引いた。実測したデータを基に算出した *CR-index* について Table 4-2 に示す。これらのパラメータを実際の解析に使用しバックグラウンドの減算を行った。

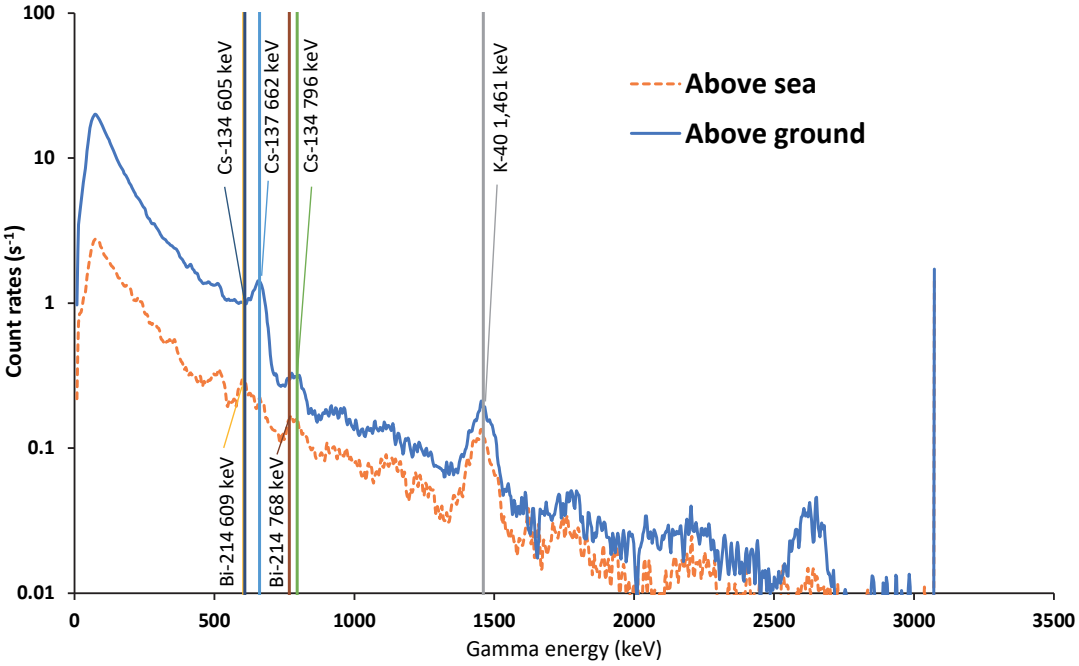


Fig. 4-15 RSI システムにおける地上で取得したγ線スペクトルと海上でのスペクトル例

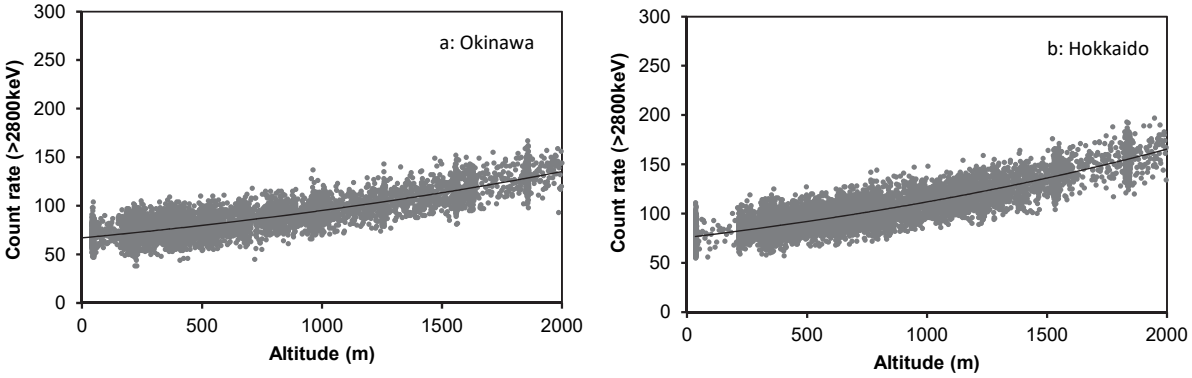


Fig. 4-16 海抜高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係の例

(a: 沖縄海域、 b: 北海道海域)

(図中の曲線は、測定データの指数関数による近似曲線である。)

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

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

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

4.5.2. 高度補正

測定点における対地高度の補正を行うために、テストラインであらかじめ取得したデータを基に、実効的な空気減弱係数 *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。

$$\boldsymbol{HF} = \mathbf{exp}\left(\boldsymbol{AF} \times (\boldsymbol{H_{sd}} - \boldsymbol{H_a})\right) \qquad [1]$$

ここで、

HF: 高度補正係数 (Height correction Factor, (m^{-1}))

AF: 空気減弱係数 (Attenuation Factor, (m^{-1}))

H_{sd}: 基準高度 (300 m)

H_a: 対地高度 (GPS 高度－DEM－ジオイド高度)

対地高度の算出には、GPS で記録した楕円対地高度から、公開されている 10 m メッシュの数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM)[35]およびジオイド高度 [35]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、2020年度においても、数値の妥当性およびRSIシステムの健全性を確認するために、キャリブレーションデータを取得した。取得したデータについて、Table 4-4 に示す。今回評価した *AF* の数値の平均値と採用した数値との差は、Table 4-3 で示した標準誤差の範囲内であり、採用した数値の妥当性を示していると考えられる。

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

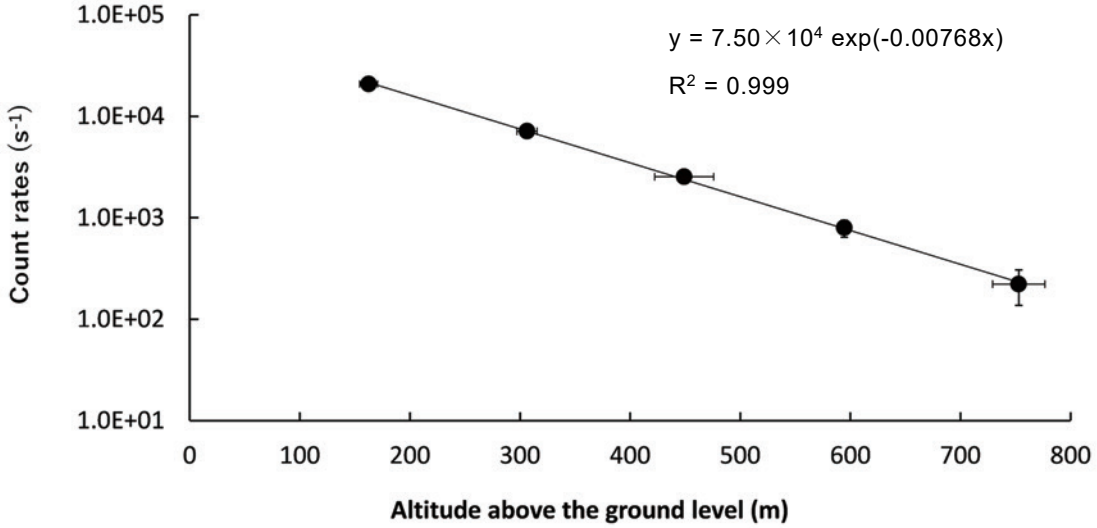


Fig. 4-17 対地高度と計数率の関係例
(Bell 430 JA6900、2013 年 11 月 5 日実施、Test line A)

Table 4-3 使用したパラメータ (空気減弱係数 *AF* および空間線量率換算係数 *CD*) のまとめ
(表中の SD は各パラメータの標準偏差 (1σ) である。)

	Bell412			Bell430		
	Value	SD(1σ)	Number of Data	Value	SD(1σ)	Number of Data
AF (m^{-1})	−0.00720	± 0.00042	21	−0.00720	± 0.00040	35
CD ([s^{-1}]/[μSv/h])	11000	± 2100	42	13000	± 2800	65

※SD：標準偏差

Table 4-4 2020 年度に取得した空気減弱係数 *AF* データ一覧

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

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

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

4.5.3. 空間線量率への換算

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

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

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

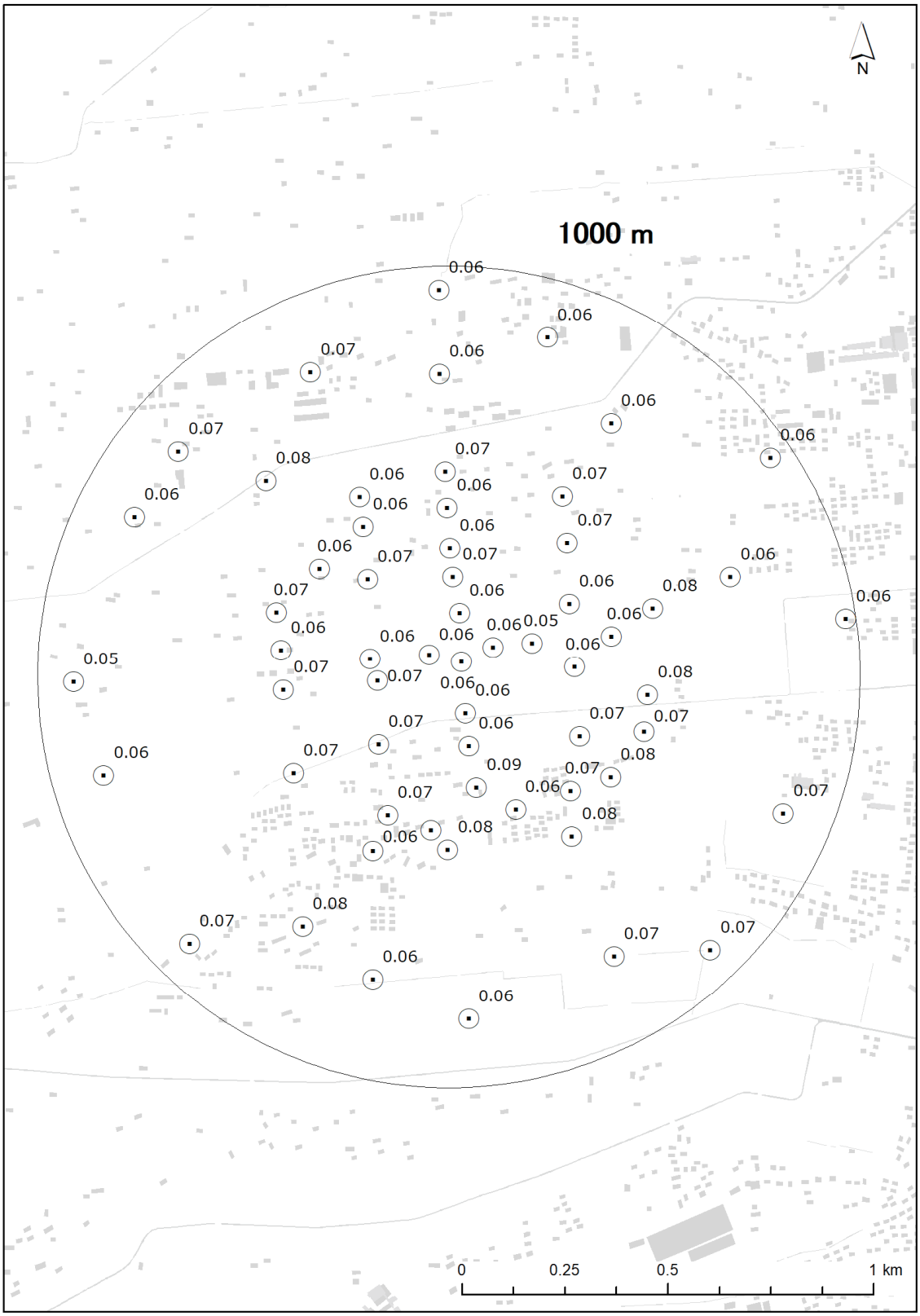


Fig. 4-18 地上測定データ (Test Point 1)

(空間線量率 (μSv/h)、 天然核種による寄与を含む。)

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

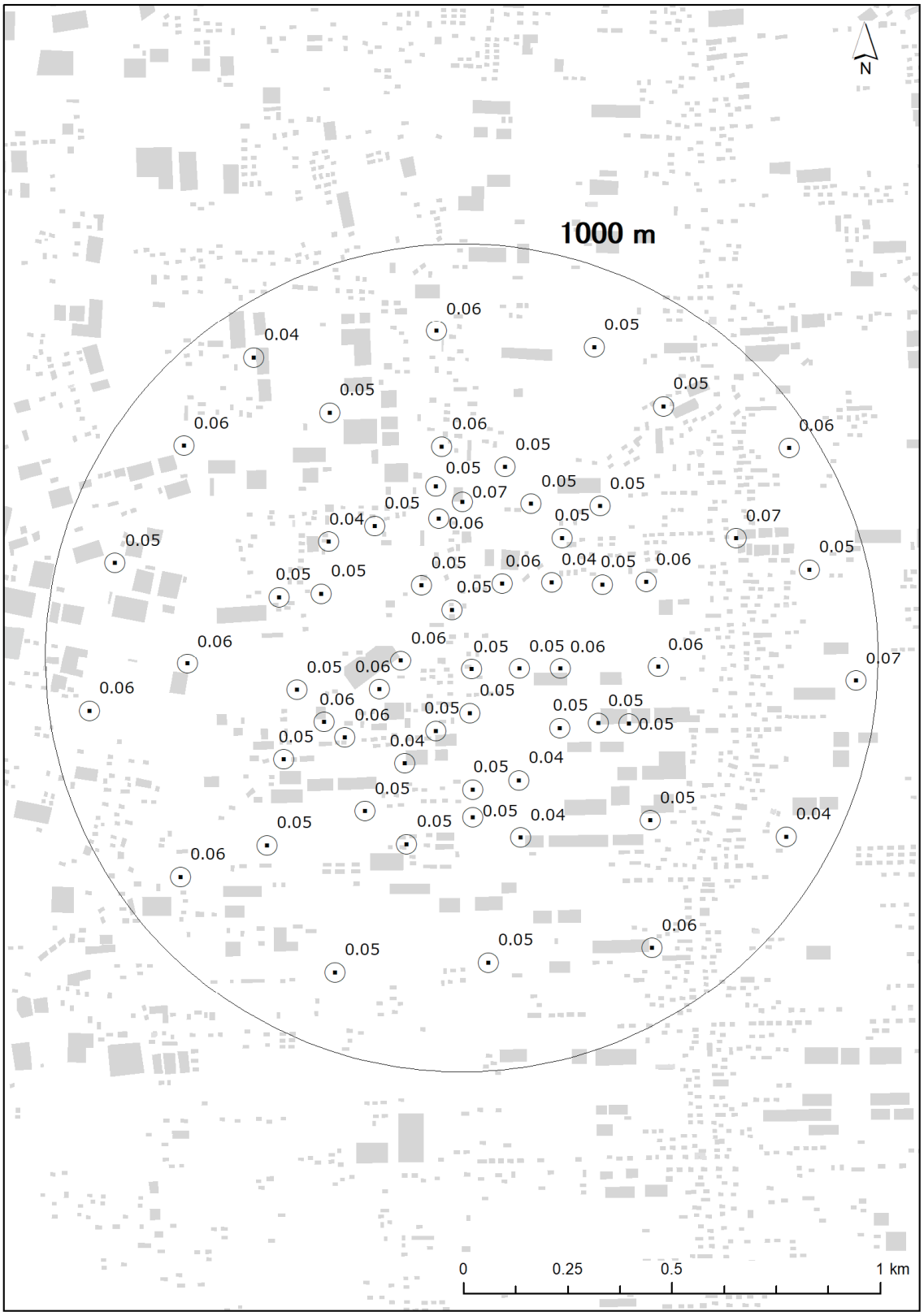


Fig. 4-19 地上測定データ (Test Point 3)

(空間線量率 (μSv/h)、 天然核種による寄与を含む。)

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

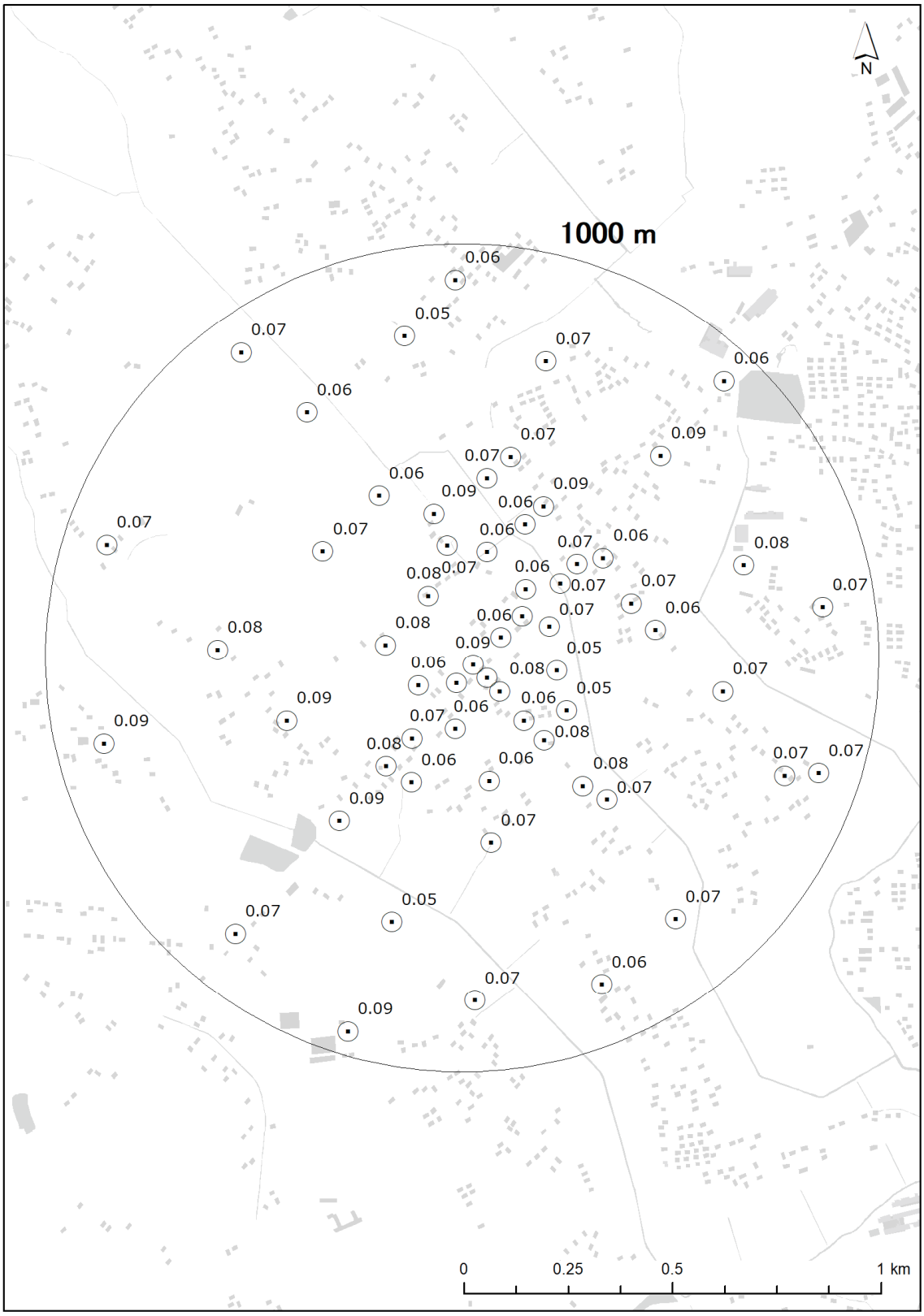


Fig. 4-20 地上測定データ (Test Point 4)

(空間線量率 (μSv/h)、 天然核種による寄与を含む。)

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

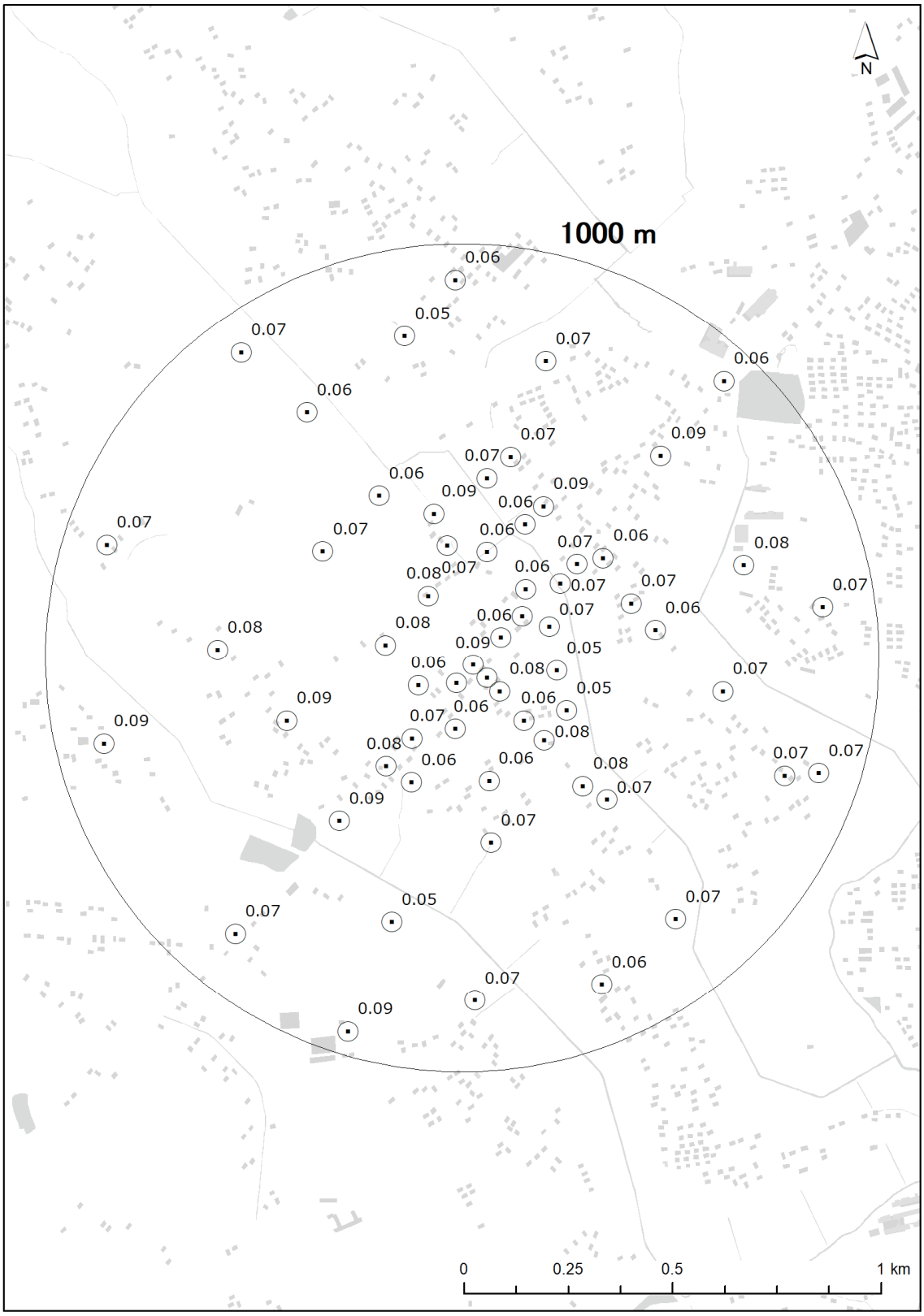


Fig. 4-21 地上測定データ (Test Point 5)

(空間線量率 (μSv/h)、 天然核種による寄与を含む。)

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

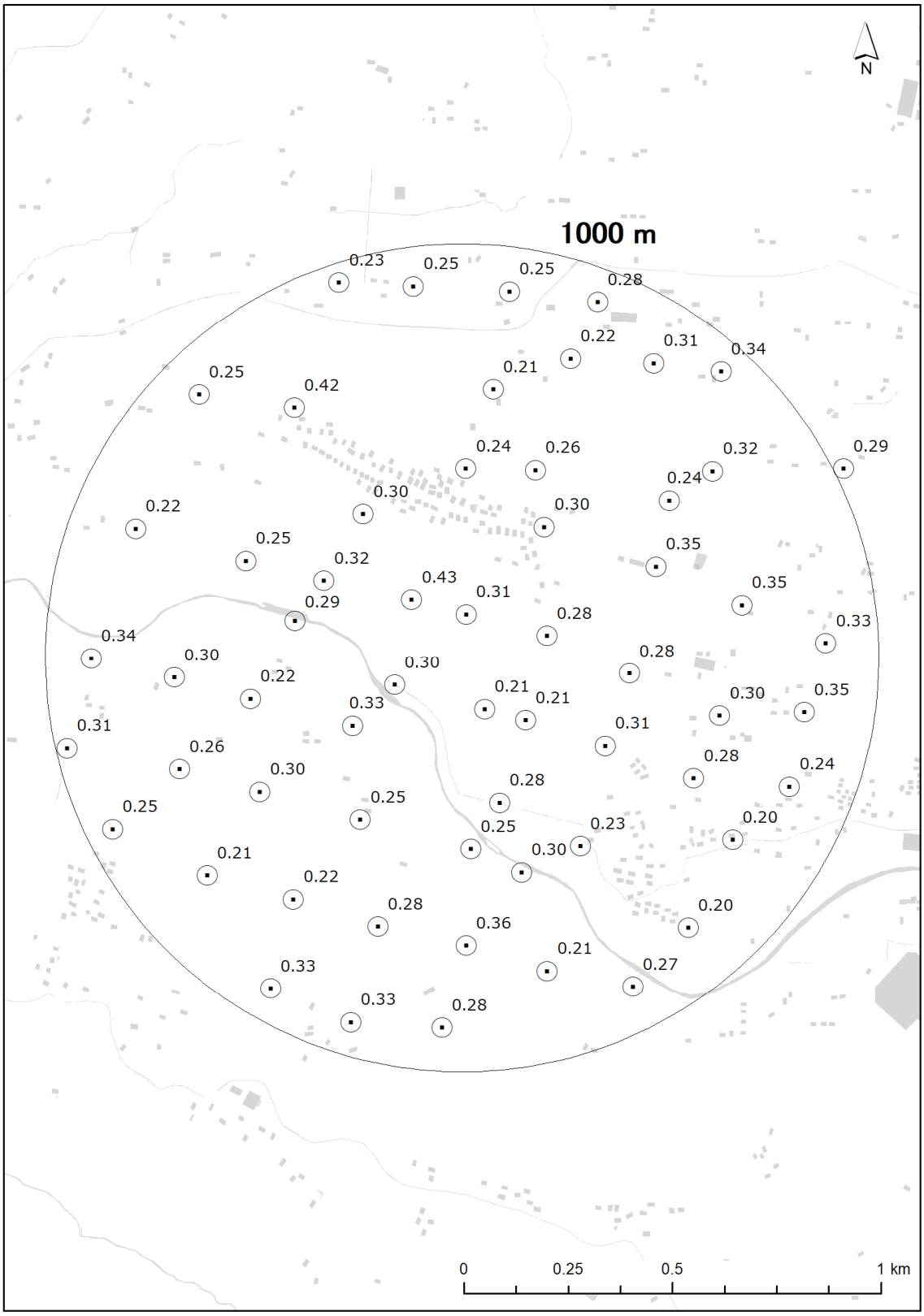


Fig. 4-22 地上測定データ (Test Point D)

(空間線量率 (μSv/h)、 天然核種による寄与を含む。)

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

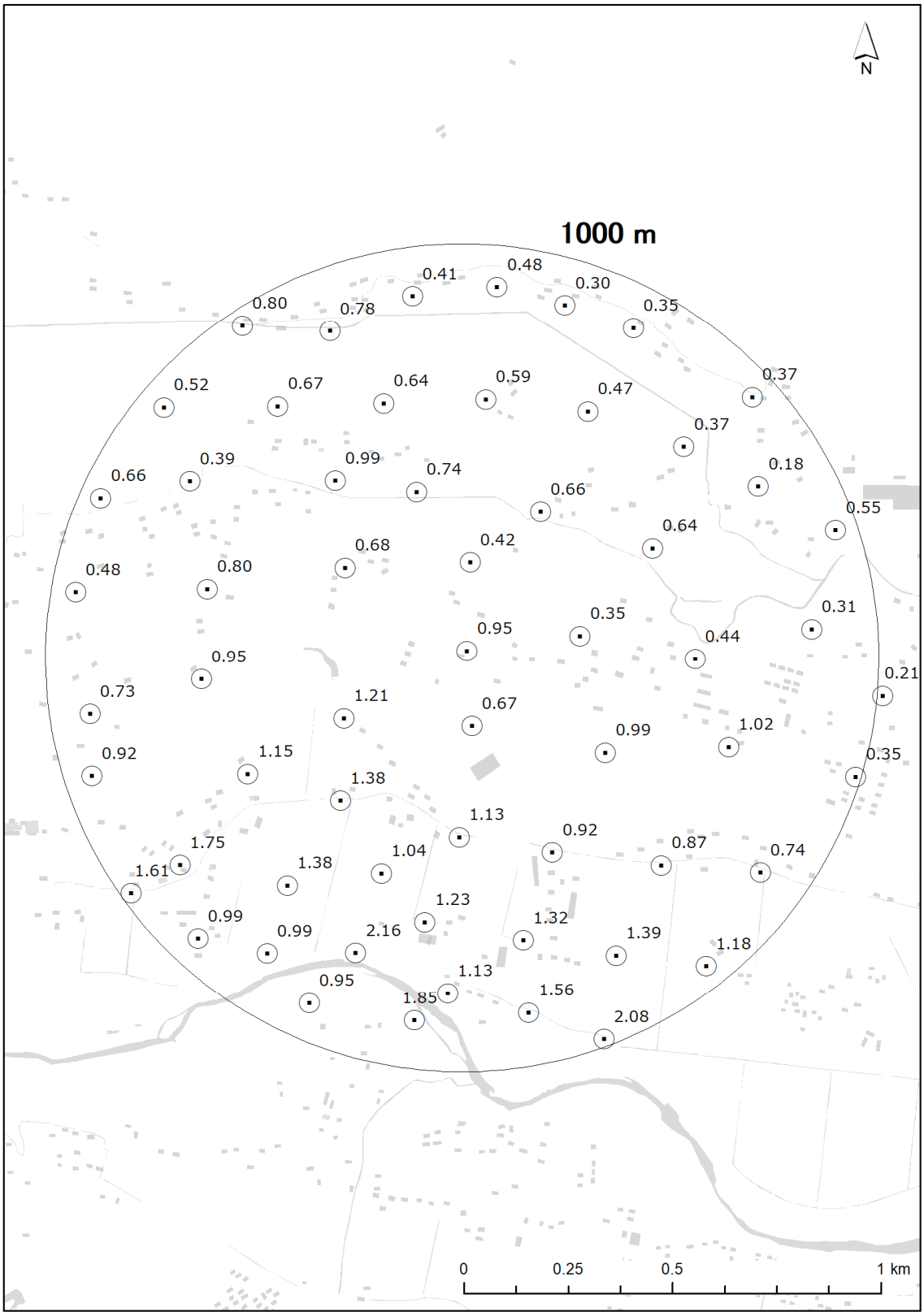


Fig. 4-23 地上測定データ (Test Point E)

(空間線量率 (μSv/h)、 天然核種による寄与を含む。)

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

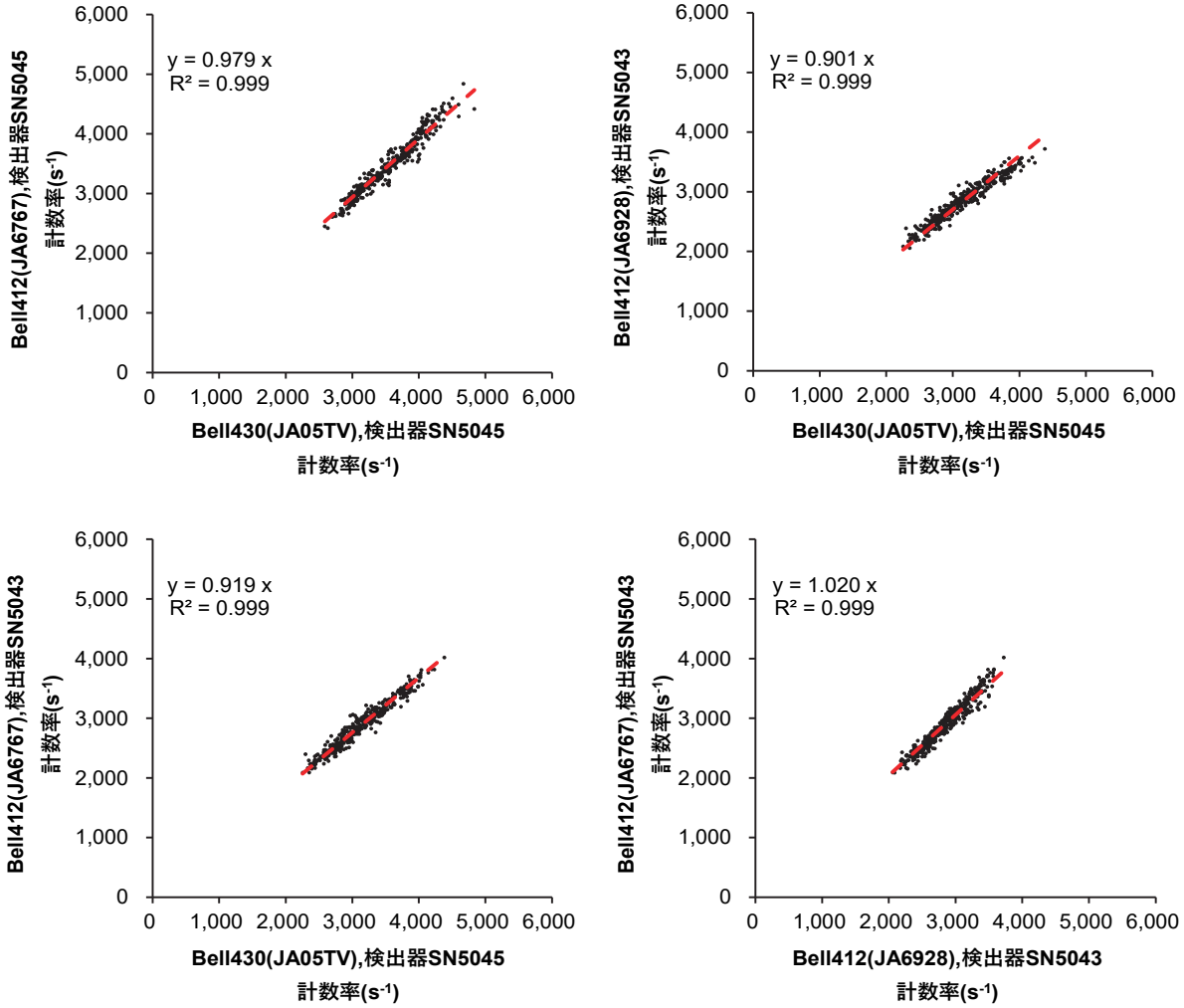


Fig. 4-24 ヘリコプターの機種とオーバーラップフライトにおける計数率の関係

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

Helicopter	Monitoring No.	Body No.	Operation Company	Date	System (Device Serial)	Detector	Location	Ground data (NaI survey) Survey (uSv/h)	SD (2σ)	RSD (%)	AMS data Count rates (s^{-1})	SD (2σ)	RSD (%)	AGL (m) AGL_GEOID (m)	SD (2σ)	RSD (%)	*CD* ([s^{-1}]/[μSv/h])
Bell 412	Fukushima 15th	JA6928	AAC	2020/08/26	SN:5043	DPU1 SN:7183 SN:2536, SN:2539, SN:2559; DPU2 SN:7180 SN:1303, SN:1305, SN:1311	TestPointD	0.28	0.10	37	4185	468	11	282	10	3	10100
					SN:5043	DPU1 SN:7183 SN:2536, SN:2539, SN:2559; DPU2 SN:7180 SN:1303, SN:1305, SN:1311	TestPointE	0.87	0.63	72	12280	2038	17	301	4	1	12900
				2020/09/08	SN:5043	DPU1 SN:7183 SN:2536, SN:2539, SN:2559; DPU2 SN:7180 SN:1303, SN:1305, SN:1311	TestPointD	0.29	0.11	36	3865	530	14	300	7	2	10400
					SN:5043	DPU1 SN:7183 SN:2536, SN:2539, SN:2559; DPU2 SN:7180 SN:1303, SN:1305, SN:1311	TestPointE	0.70	0.52	74	9721	3339	34	270	44	16	10000
	EastJapan 11th	JA6928	AAC	2020/09/22	SN:5043	DPU1 SN:7183 SN:2536, SN:2539, SN:2559; DPU2 SN:7180 SN:1303, SN:1305, SN:1311	TestPoint4	0.07	0.02	33	1168	103	9	335	23	7	9300
				2020/09/28	SN:5043	DPU1 SN:7183 SN:2536, SN:2539, SN:2559; DPU2 SN:7180 SN:1303, SN:1305, SN:1311	TestPoint3	0.05	0.02	32	1069	87	8	308	14	5	10600
		JA6767	NNK	2020/10/26	SN:5043	DPU1 SN:7183 SN:2536, SN:2539, SN:2559; DPU2 SN:7180 SN:1303, SN:1305, SN:1311	TestPoint3	0.05	0.02	31	1212	79	7	321	4	1	10800

Average(2020)　10600
Average(to 2019)　11600

※NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社、SD: 標準偏差、RSD: 相対標準偏差

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

Helicopter	Monitoring No.	Body No.	Operation Company	Date	System (Device Serial)	Detector	Location	Ground data (NaI survey)			AMS data			AGL (m)			*CD* ([s^{-1}]/[μSv/h])
								Survey (uSv/h)	SD (2σ)	RSD (%)	Count rates (s^{-1})	SD (2σ)	RSD (%)	AGL_GEOID (m)	SD (2σ)	RSD (%)	
Bell 430	Fukushima 15th	JA05TV	NNK	2020/09/06	SN:5045	DPU1 SN:7179 SN:2806 SN:2807 SN:2808 DPU2 SN:7184 SN:3029 SN:3031 SN:3032	TestPointD	0.29	0.11	36	3801	637	17	328	17	5	12900
					SN:5045	DPU1 SN:7179 SN:2806 SN:2807 SN:2808 DPU2 SN:7184 SN:3029 SN:3031 SN:3032	TestPointE	0.77	0.54	71	9192	1294	14	314	17	5	11900
				2020/09/21	SN:5045	DPU1 SN:7179 SN:2806 SN:2807 SN:2808 DPU2 SN:7184 SN:3029 SN:3031 SN:3032	TestPointD	0.29	0.11	39	4310	579	13	307	20	7	12000
					SN:5045	DPU1 SN:7179 SN:2806 SN:2807 SN:2808 DPU2 SN:7184 SN:3029 SN:3031 SN:3032	TestPointE	0.86	0.61	71	13629	1250	9	303	14	5	14600
	EastJapan 11th	JA05TV	NNK	2020/10/05	SN:5045	DPU1 SN:7179 SN:2806 SN:2807 SN:2808 DPU2 SN:7184 SN:3029 SN:3031 SN:3032	TestPoint5	0.11	0.02	22	2360	236	10	286	5	2	8200
				2020/10/06	SN:5045	DPU1 SN:7179 SN:2806 SN:2807 SN:2808 DPU2 SN:7184 SN:3029 SN:3031 SN:3032	TestPointD	0.30	0.13	42	3324	468	14	360	5	2	12200
				2020/10/15	SN:5045	DPU1 SN:7179 SN:2806 SN:2807 SN:2808 DPU2 SN:7184 SN:3029 SN:3031 SN:3032	TestPoint1	0.07	0.01	20	1334	107	8	311	12	4	10700
				2020/10/27	SN:5045	DPU1 SN:7179 SN:2806 SN:2807 SN:2808 DPU2 SN:7184 SN:3029 SN:3031 SN:3032	TestPoint4	0.07	0.02	34	1258	153	12	297	22	7	7200
				2020/10/28	SN:5045	DPU1 SN:7179 SN:2806 SN:2807 SN:2808 DPU2 SN:7184 SN:3029 SN:3031 SN:3032	TestPoint5	0.11	0.04	32	2128	305	14	302	22	7	12600
				2020/10/30	SN:5045	DPU1 SN:7179 SN:2806 SN:2807 SN:2808 DPU2 SN:7305 SN:3264 SN:3288 SN:3298	TestPoint5	0.10	0.02	20	2077	234	11	300	22	7	11400

Average(2020) **11400**

Average(to 2019) **12100**

※NNK: 中日本航空株式会社、SD: 標準偏差、RSD: 相対標準偏差

4.5.4. 空間線量率への換算方法

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

① 測定で得られたγ線スペクトルから以下の領域の計数率を計算する。

(1) 全計数率 (C_{all})

(2) 2,800 keV 以上の計数率 (C_{cos})

② 式 [2] で用いられる C_{net} を算出するために、C_{cos} に *CR-index* (I_{cos}) をかけて全エネルギーの宇宙線のバックグラウンド計数率 (BG_{cos}) を計算する。

③ BG フライトで取得したデータを自己汚染による計数率 (BG_{self}) とする。

④ C_{all} から BG_{cos} と BG_{self} を差し引いた計数率を C_{net} とし、*CD* および *HF* を用いて地表面から 1 m の高さの空間線量率 *D* を算出する。

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

ここで、

HF: 高度補正係数

CD: 空間線量率換算係数 ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$)

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

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

である。

4.6. 放射性 Cs の沈着量への換算方法

4.6.1. 天然核種の弁別と放射性 Cs 起源の計数率の算出

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

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

① 測定で得られたγ線スペクトルから 1,400 keV～2,800 keV の計数率 (C_{BG}) を計算する。

② C_{BG} に *BG-index* (I_{BG}) を乗じて天然核種起源の計数率 (BG_{nat}) を算出する。

③ C_{net} (= C_{all}-BG_{cos}-BG_{self}) から BG_{nat} を差し引き、放射性 Cs のみの計数率 (C_{Cs}) を求める。

④ C_{Cs} に *HF* を乗じ、*CD* で除することで放射性 Cs のみの空間線量率 (D_{Cs}) を算出する。

⑤ 式 [3] より、空間線量率を空間線量率－放射能換算係数 (*CF* ([μSv/h]/[kBq/m^2]); 4.6.2. にて詳述する。) で除して放射性 Cs の沈着量 *Rd* (kBq/m^2) を求める。

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

ここで、

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

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

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

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

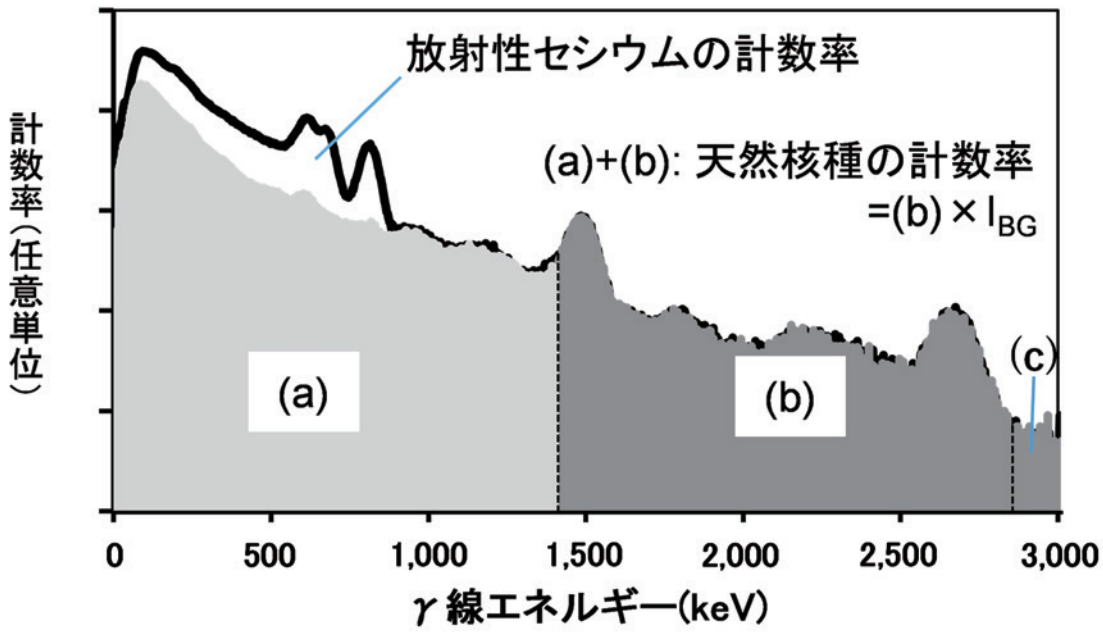


Fig. 4-25 放射性 Cs の計数率の算出イメージ

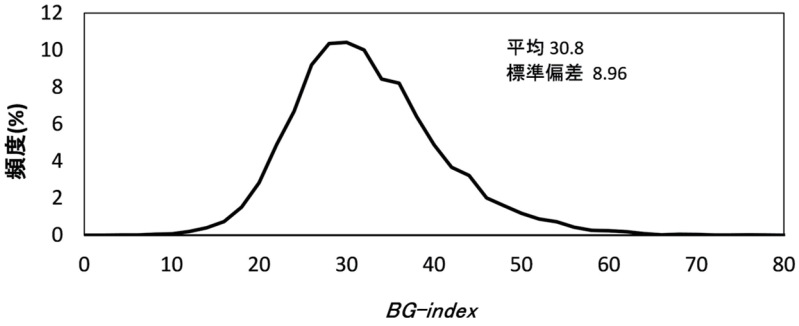


Fig. 4-26 *BG-index* の算出例
(関西地方において 1 秒ごとに測定した γ 線スペクトルから求めた *BG-index* と頻度の関係、全 16,000 データ: Bell 430)

Table 4-7 *BG-index* 一覧

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

NNK: 中日本航空株式会社、AAC: 朝日航洋株式会社

4.6.2. 空間線量率－放射能換算係数

航空機モニタリングでは、地上の放射性 Cs の沈着量に換算する場合に、文献 [36),37)]に示される空間線量率－放射能換算係数 (Conversion Factor: *CF* ([μGy/h]/[kBq/m^2])) を使用する。*CF* は、土壌への放射性 Cs の浸透度を示す重量緩衝深度 (β) によって異なった値が設定されている [36)]。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 β = 1.0 (g/cm^2) のときの *CF* を継続的に使用している。一方、規制庁と原子力機構が行っている放射性物質分布状況等調査の結果 [38), 39)] から、福島原子力発電所から 80 km 圏内の土壌において、重量緩衝深度 (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 Cs の動態観測が目的であるため、人間活動の影響の少ない土壌を対象としている。一方、航空機モニタリングの対象は森林のような人間活動が希少な場所から住宅地や農地のような人間活動がある程度活発な場所まで多様な土地を含んでいる。さらに、その土地の利用の方法や程度は年々変わってゆく。このような多面的な因子を考えると、β を固定することは合理的ではないが、従来との比較のためにあえて 1.0 とした場合について解析するとともに、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。

Fig. 4-27 に文献 [36),37)]に示されている重量緩衝深度と *CF* の関係について示す。本図では、対数による近似曲線を記載したように、重量緩衝深度と *CF* は対数関係にある。例えば、β = 1.0 (g/cm^2) と β = 2.0 (g/cm^2) にした際の放射性 Cs の沈着量と地表面から 1 m の高さの空間線量率の換算係数 ([μGy/h]/[kBq/m^2]) には、Cs-134、Cs-137 ともに 16 %程度の差がある。このよう

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

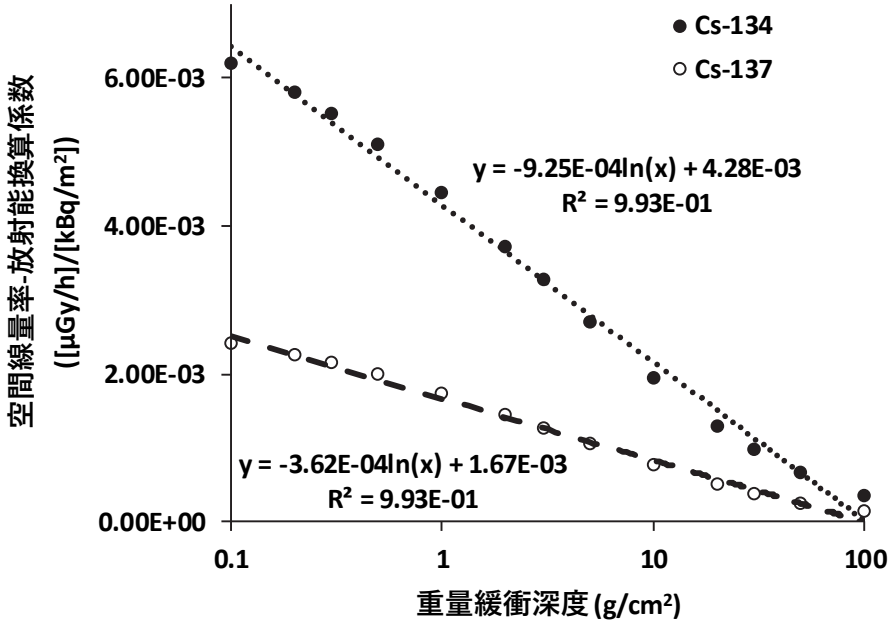


Fig. 4-27 重量緩衝深度と空間線量率－放射能換算係数の関係
(文献 [36),37)] のデータを基に対数による近似曲線を表示)

4.7. 減衰補正

福島原子力発電所の放射性核種が放出されてから時間が経過し、半減期の短い核種はほぼ検出されないレベルにまで減衰しており、2011 年 8 月 13 日以降では、Cs-134 と Cs-137 が評価対象核種である。ここでは、空間線量率から放射能への Cs-137 換算係数、Cs-134 / Cs-137 濃度比および測定時点の空間線量率を評価時点の空間線量率に補正する方法について記述する。空間線量率から放射能への換算は、重量緩衝深度 β = 1.0 (g/cm^2) の場合の *CF* を適用し、あらかじめ求めておいた Cs-134 / Cs-137 比を用いて、地表面から 1 m の高さの空間線量率から地表面における Cs-134、Cs-137 の放射性物質濃度に換算した。Cs-134 / Cs-137 比は 2011 年 8 月に福島県で 50 ポイント以上の可搬型ゲルマニウム半導体検出器 (以下、可搬型 Ge 検出器) による測定データを取得し、2011 年 8 月 13 日時点での Cs-134 / Cs-137 = 0.917 (B_0) を基本とした。その基準日から航空機モニタリングのデータ取得完了日に減衰計算して換算した。評価時における Cs-137 および Cs-134 の濃度 $C_{Cs\text{-}137}$、$C_{Cs\text{-}134}$ は航空機サーベイデータから求める全空間線量率から天然核種によるバックグラウンドの空間線量率を引いた空間線量率 $E_{Cs\text{-}137+Cs\text{-}134}$ (μSv/h) および評価時における Cs-134 / Cs-137 比 *B* を用い、下記の式 [4]、[5] から算出する。

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

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

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

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

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

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

① 換算した放射性 Cs 放射能を航空機モニタリングの取得完了日に合わせて減衰補正する。

② ①で得られた値を CF で除して、放射性 Cs 由来の空間線量率に換算する。

③ ②で得られた値にバックグラウンド空間線量率を加算し、全空間線量率とする。

4.8. 検出下限値

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

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

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

ここで、

D: 全空間線量率 ($\mu Sv/h$)

C_{all}: 全計数率 (s^{-1})

BG_{self}: 機体の汚染 (s^{-1})

CD: 空間線量率換算係数 ($[s^{-1}]/[\mu Sv/h]$)

AF: 空気減弱係数 (m^{-1})

H_{sd}: 基準高度 ($300\ m$)

H_m: 測定高度 (m)

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

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

BG_{cos}: 宇宙線起源の計数率(s^{-1}) $C_{cos} \times I_{cos}$ $\left(Ccos: > 2800\ keV\text{の計数率};\ Icos: CR\text{-}index\right)$
CF: 空間線量率 − 放射能換算係数 ([μGy/h]/[Bq/m^2]) [28),29)]
R: 放射性 CS に対する $Cs - 134$ $(Cs - 137)$ の割合
DC: 減衰補正係数 (= exp[−λτ]) (∗ τ: 経過時間)

4.8.1. 空間線量率の検出下限値

航空機モニタリングにより算出される空間線量率は BG_{self} と BG_{cos} に影響を受ける。これまでの測定結果 [17),18),19),20),22),24),26)]を見ると、BG_{cos} は概ね 200 s^{-1}～500 s^{-1} の範囲に入ることが分かっている。また、BG_{self} は海上の測定データから宇宙線成分を減算することにより算出した結果、約 400 s^{-1} であったことから、バックグラウンド計数率 (N_B) を $N_B = BG_{self} + BG_{cos} = 900$ s^{-1} として検出下限値の評価を行った。

一般的に、検出下限値を求める際には、バックグラウンド計数率 (N_B) の標準偏差 (σ) を式 [9] に示した Currie の式 [40)]に当てはめ、検出下限値 (N_D) を算出する。

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

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

4.8.2. 放射性 Cs の沈着量の検出下限値

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

Table 4-8 RSI システムの検出下限値

System	Limit of detection	
	Dose rate at 1m above the ground (μSv/h)	Radioactivity of deposition radiocesium (kBq/m^2)*
RSI	0.011	26

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

Evaluated value at 2, Oct. 2020

4.9. 不確かさ

本手法において、航空機モニタリングにより算出される空間線量率における不確かさの要因としては、式 [7] から、以下の事項が挙げられる。

- 検出器の計数誤差：一般的に、計数率に対して統計的な誤差が生じる。
- *CD* の選択：Table 4-3 に示したように、キャリブレーションのためのデータ取得には、測定条件により 20 %程度の誤差が生じる。本測定の経験を重ねてきた現在では、その不確かさは小さくなってきている。
- 高度補正係数の選択：*CD* と同様に、キャリブレーションのためのデータ取得の状況により係数の選択時の不確かさが生じる。
- 測定高度の誤差：現在使用している GPS には衛星の位置等の状況により、高度情報において最大 30 m 程度の誤差が生じる。海抜高度の測定は GPS で実施しており、その誤差による不確かさが存在する。
- ラドン子孫核種の影響：日本においては、特に冬場に大陸由来のラドンの影響が知られている。これまでの測定の中でもラドンの影響を示唆するデータが取得されており、その詳細については 8 章に述べる。

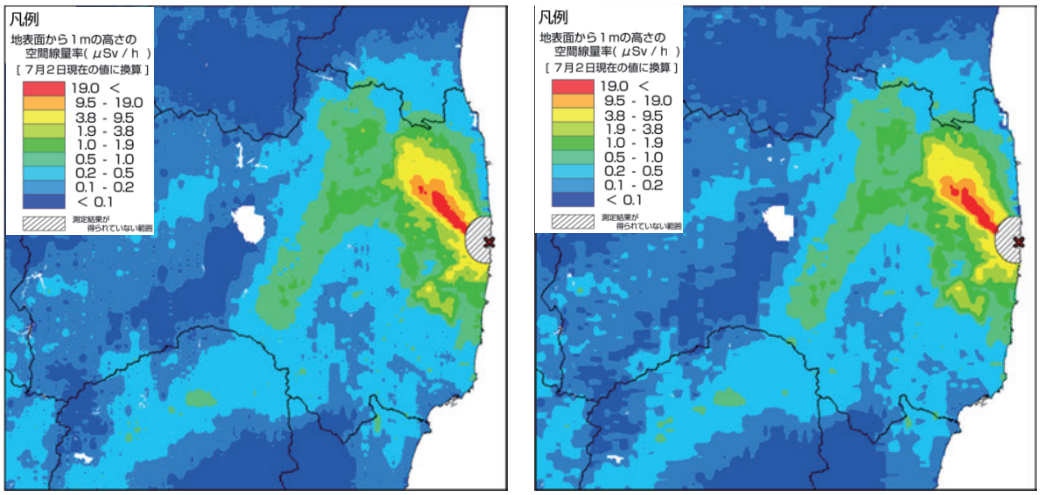
4.10. マッピング

空間線量率や放射性物質のマッピングは、国際原子力機関 (IAEA) から標準的な方法が示されている [41)]。補間方法には、IDW (Inverse Distance Weighted：逆距離加重法)、クリギング (Kriging)、スプライン (Spline)、Natural Neighbor 等の多くの方法が存在する。本報告では、2011 年 4 月 6 日～29 日にかけて実施された第 1 次航空機モニタリングの解析を担当した DOE が用いた IDW を踏襲し、それ以後の解析を行った。IDW とはある補間地点の近傍にある複数のサンプル点の測定値を補間地点からサンプル点までの水平距離の逆数のべき乗関数により重み付け平均することで、ある補間地点における値を推定する方法である。IDW による、ある補間点における推定値は以下の式 [10] で表される [42)]。

$$\widehat{z_0} = \frac{\sum_{i=1}^{s} d_{NT}(p_0, p_i)^{-\lambda} z_i}{\sum_{i=1}^{s} d_{NT}(p_0, p_i)^{-\lambda}} \qquad [10]$$

本報告においては、$\widehat{z_0}$を補間地点における空間線量率の推定値、$d_{NT}(p_0, p_i)$ (i = 1, 2, …, s) を補間地点p_0からサンプル点p_iまでの水平距離、z_iを各サンプル点が持つ実測値、補間地点から近傍 s 点をサンプル点とした。IDW による補間の条件として「補間地点とサンプル点間の距離が大きくなるにつれて、その補間地点においてサンプル点が推定値に与える影響が減衰していく」ことが前提になる。そのため、推定する (重み付け平均) 値は補間地点から近傍 s 点の最高値より大きくならず、最低値より小さくなることはない。また、IDW には複雑なパラメータ設定が不要である。必要となるのは、補間地点とサンプル点間の距離に応じて影響度を制御する乗数 λ と内挿処理の対象となるサンプル点数 s の 2 つである。IDW では λ と s の設定によって結果が異なってくるが、最良の値を決定するための基準が存在していない。λ が大きいほど、補間地点近傍データの影響力が相対的に大きくなり、一般的に 2 がよく用いられるが、必ずしも 2 が最良であるとは限らない。本報告では、今まで積み上げてきた経験から、λ として 2.3、s として 180 を採用した。ちなみに、第 3 次航空機モニタリングの空間線量率の RMSE (Root Mean Squared Error: 二乗平均平方根誤差) は 0.208 であった。Fig. 4-28 にパラメータ設定の異なる場合の空間線量率マップを示す。Fig. 4-28 の a) と b) を比べると、両者とも概ねの分布傾向は一緒であるが、線量のレンジの境界をみると a) の方がなめらかになっていることが分かる。

航空機モニタリングにおいては Fig. 4-4 に示した通り、対地高度約 300 m から測定を実施するが、ヘリコプター直下の地上を中心とする半径 300 m 円内における放射線量の平均値が測定される。空間線量率等のマッピングにおいては、地域基準メッシュ (1 km) をベースとしつつ、上記の測定範囲を考慮して 250 m にメッシュサイズを決定した。



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. 4-28 IDW に入力するパラメータとマップの関係

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

4.11. 地上における測定値との比較

航空機モニタリングの妥当性を検証するために、測定対象区域から地形的に平坦な場所でかつ航空機モニタリング測線下の地点を選定し、地上測定を行った。なお、航空機モニタリング測線と地上測定地点間の水平距離は概ね 50 m 以内である。Fig. 4-29 に、航空機モニタリングによる換算値と地上測定値との比較を示す。比較は散布図 (左) および地上測定値に対する航空機の換算結果と地上測定値の差の比 (相対誤差 : (航空機の換算結果 – 地上測定値) / 地上測定値) のヒストグラム (右) で行った。散布図を見ると、測定結果の 97 % (全 350 点中、338 点) がファクター 2 の間に入り、地上の測定値と非常に良く整合した。相対誤差のヒストグラムは 0 以上 (航空機モニタリングの結果の方が高い) の領域に分布の偏りが見られるものの、ピークは 0 付近に位置しており、その中央値は 0 に近い値を示した。以上のことから両者はよく一致していると考えられる。

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

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

① 測定の範囲の違い：空中からの測定値は、上空を頂点とし対地高度を高さとした円錐の底面部分に該当する地上の放射線の平均値となる。実際には、測定される範囲は地上の半径 300 m 円内における放射線量の平均値となる。一方、地上測定による測定範囲は半径 30 m 程度の円の放射線量の平均値となる。よって、地上の放射線分布が一様の場所では整合しやすいが、地上の空間線量率の分布が均一でない場所では、測定結果が整合しにくいと考

えられる。

② 周辺からの影響：地上の測定場所の近傍に大きな建物や森林等がある場合には、建物や樹木に沈着している放射性物質が地上測定に影響する可能性がある。また、上空で測定する場合においては、建物や森林等が地表面からの放射線を遮蔽するため、単純に比較できない場所がある。なお、本章において、比較用に取得した地上測定値は比較的地形が平坦な場所が多く、条件がよい場所を選定している。

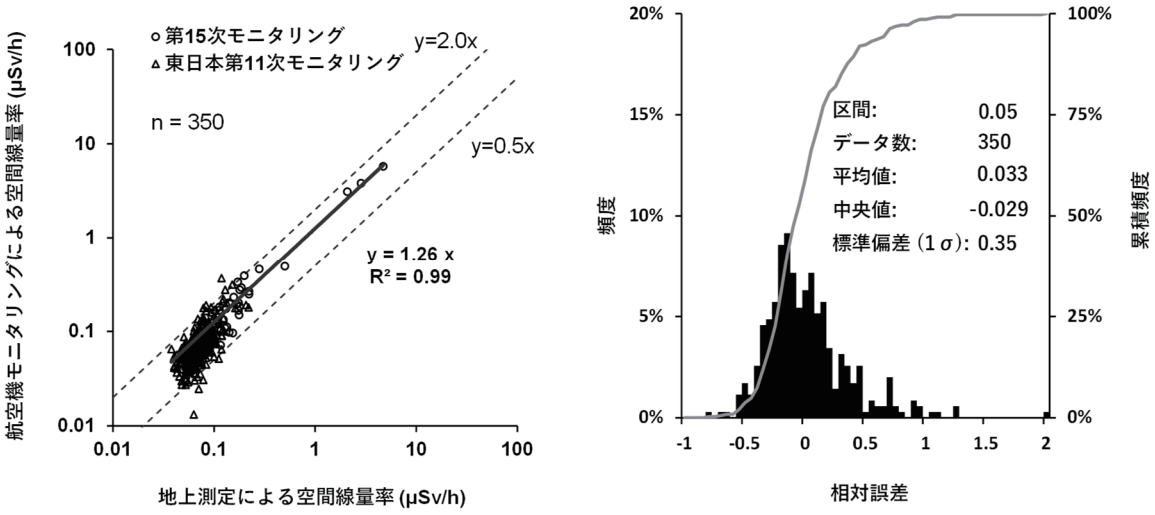


Fig. 4-29 地上の測線上における空間線量率測定値との比較
(左: 散布図、 右: 相対誤差のヒストグラム)

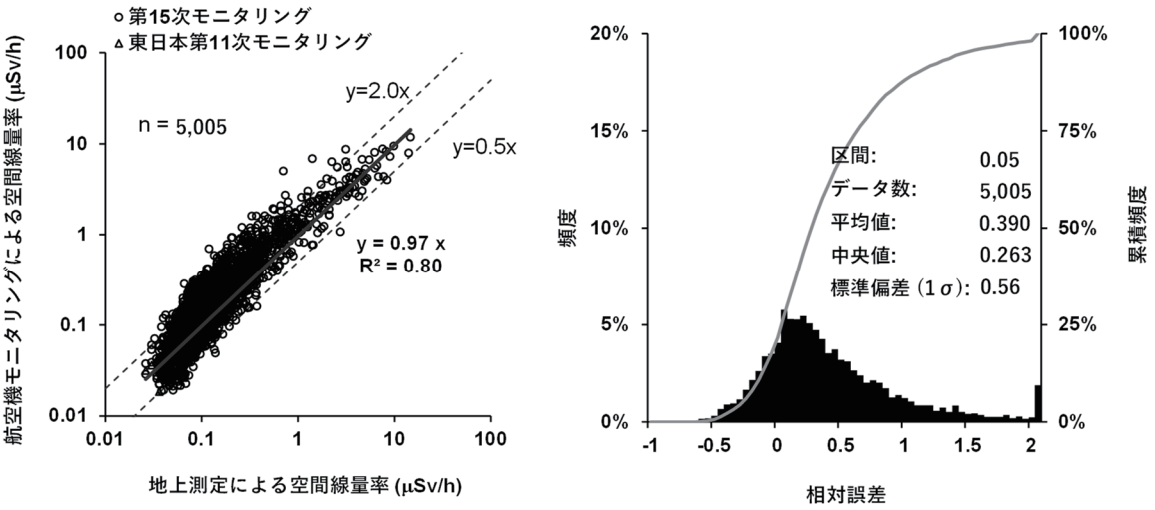


Fig. 4-30 地上のランダムな位置における空間線量率測定結果との比較
(地上値：原子力規制庁事業 [39] 左: 散布図、 右: 相対誤差のヒストグラム)

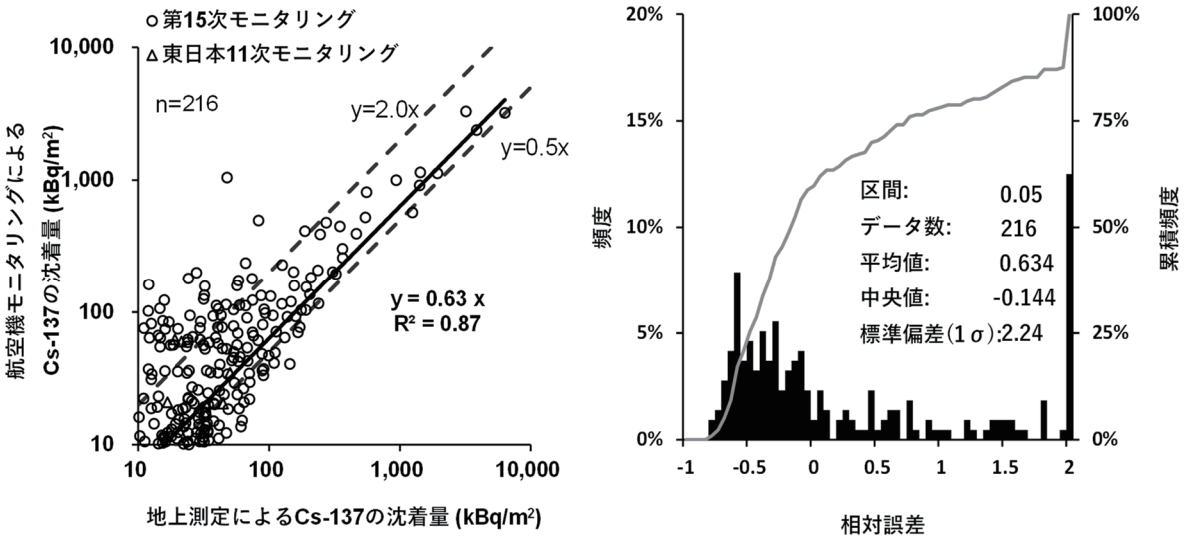


Fig. 4-31 地上における可搬型 Ge 検出器による測定値との比較
(地上値：原子力規制庁事業 [39] 左: 散布図、 右: 相対誤差のヒストグラム)

4.12. 天然放射性核種由来の空間線量率マップの作成

天然放射性核種由来の空間線量率マップの作成手法は 2014 年度に開発した [18),43)]。航空機モニタリングで使用している RSI システムはγ線のエネルギーを計測しているため、天然の放射線由来の空間線量率を放射性 Cs による空間線量率と弁別して計測が可能である。しかしながら、これまで、放射性 Cs の影響の大きな地域においては、K-40 の放出する 1,461 keV のエネルギーピークの領域に、Cs-134 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 [36)]を適用することによって、天然の放射線由来の空間線量率マップを作成した。

航空機モニタリングで使用している NaI(Tl)検出器では前述のように一定以上の放射性 Cs の影響のある地域では K-40 のエネルギーを弁別することは難しい。Fig. 4-32 に典型的なγ線スペクトルの例を示す。このような、干渉したスペクトルを弁別する手法として関数適合法 [44)] が考えられる。本手法は、ピークを関数でフィッティングし、干渉している部分の推定を行う手法である。実際には Fig. 4-32 のようにエネルギーピークを 2 つの Gauss 分布が干渉していると仮定した式 [11] を使用した。

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

ここで、S (i,j) は計数率、E はγ線エネルギー (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 Cs-134 が 1,400 keV 以上のエネルギーへ与える寄与割合から、Cs-134 由来の 1,400 keV～2,800 keV に与える積算計数率 (Cs_{1400}) を算出した。

次に、地表面から 1 m の高さの空間線量率 (D_{nr}) への換算に使用した評価式を式 [12] に示す。従来の航空機モニタリング手法で使用している換算式に、Cs_{1400} を除外するために必要な計数を追加した。

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

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

4.3 節に記載した通り、*CD* の算出には地上測定値として NaI(Tl)検出器により計測された地表面から 1 m の高さの空間線量率 (μSv/h) を用いている。空間放射線量の測定単位に Sv を用いている NaI(Tl)検出器は通常、1 cm 線量当量 (周辺線量当量) で校正されているため、航空機モニタリングで算出される空間線量率は必然的に 1 cm 線量当量率 (周辺線量当量率) を意味することになる。しかしながら、本項で作成する空間線量率マップは環境放射線に起因する空間放射線量を表現したものであり、このようなマップでは通常、放射線量率の単位として空気吸収線量率 (μGy/h) が用いられるため、単位換算が必要となる。空気吸収線量 (または自由空気中空気カーマ) から 1 cm 線量当量 (周辺線量当量) への換算手法についてはモンテカルロ法を用いた計算による評価例 [45]や自然放射線の実測から算出した例 [46]がある。自然環境中における γ 線の実効的エネルギーが 0.5 MeV 付近であると仮定した場合、いずれの例においても空気吸収線量 (Gy) : 1 cm 線量当量 (Sv) は概ね 1 : 1.2 と評価されている。以上のことから、式 [12] で求めた地表面から 1 m の高さの空間線量率D_{nr} (μSv/h) を 1.2 で除することにより、航空機モニタ

リングによる空間線量率 (μSv/h) を空気吸収線量率 (μGy/h) に変換して、天然核種由来の空間線量率マップを作成した。

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

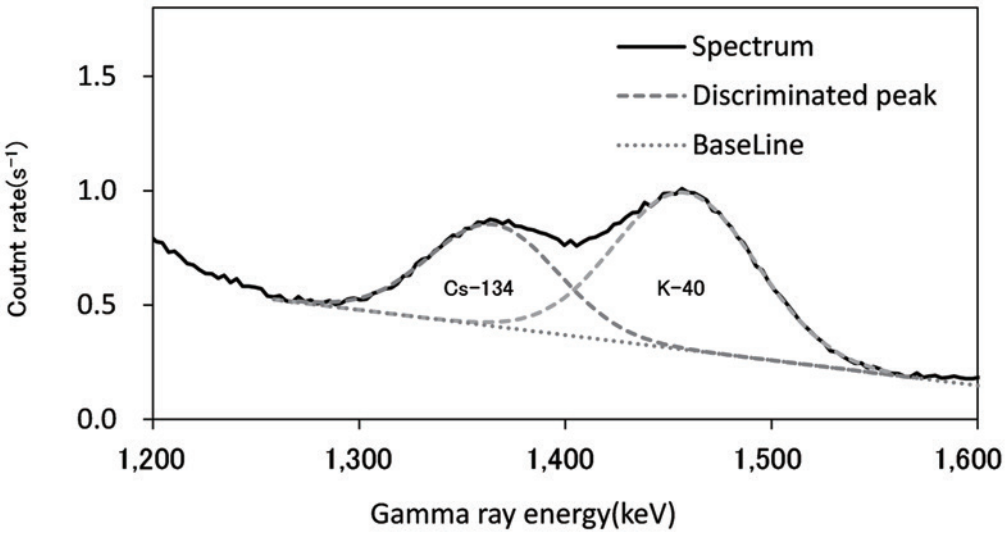


Fig. 4-32 関数適合法を用いた Cs-134 と K-40 の弁別

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

Energy range	Bell412 Value ± SD(1σ)	Number	Bell430 Value ± SD(1σ)	Number
1,400keV – 2,800keV	−0.00580 ± 0.00080	11	−0.00600 ± 0.00102	8
30keV – 2,800keV	−0.00720 ± 0.00042	21	−0.00720 ± 0.00040	35

※SD: 標準偏差

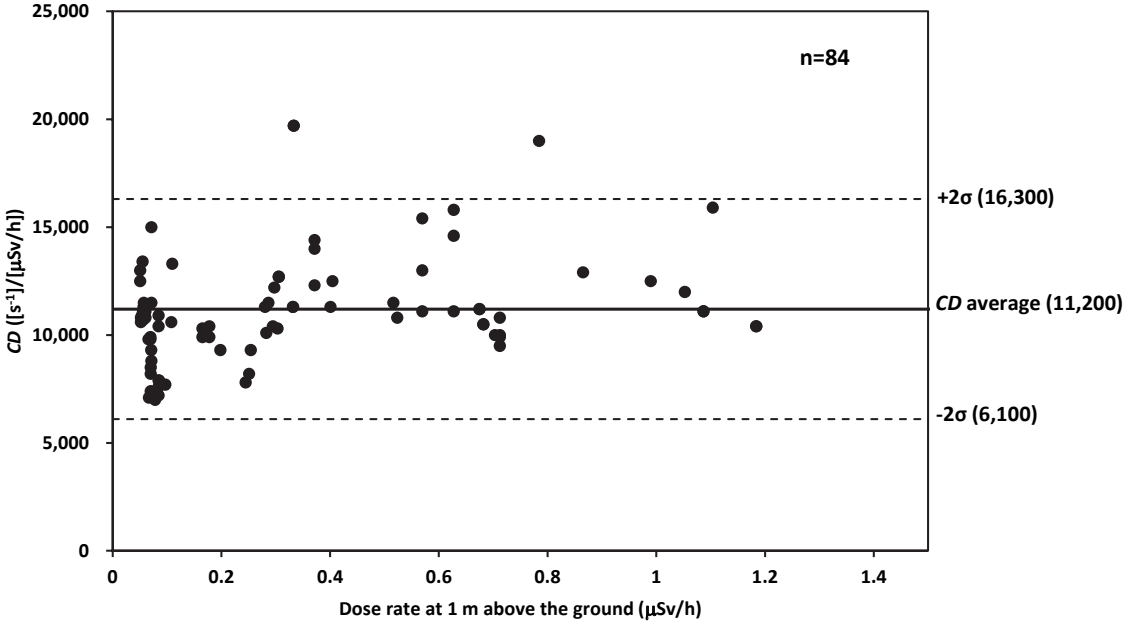


Fig. 4-33 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (*CD*) の関係 (Bell 412)

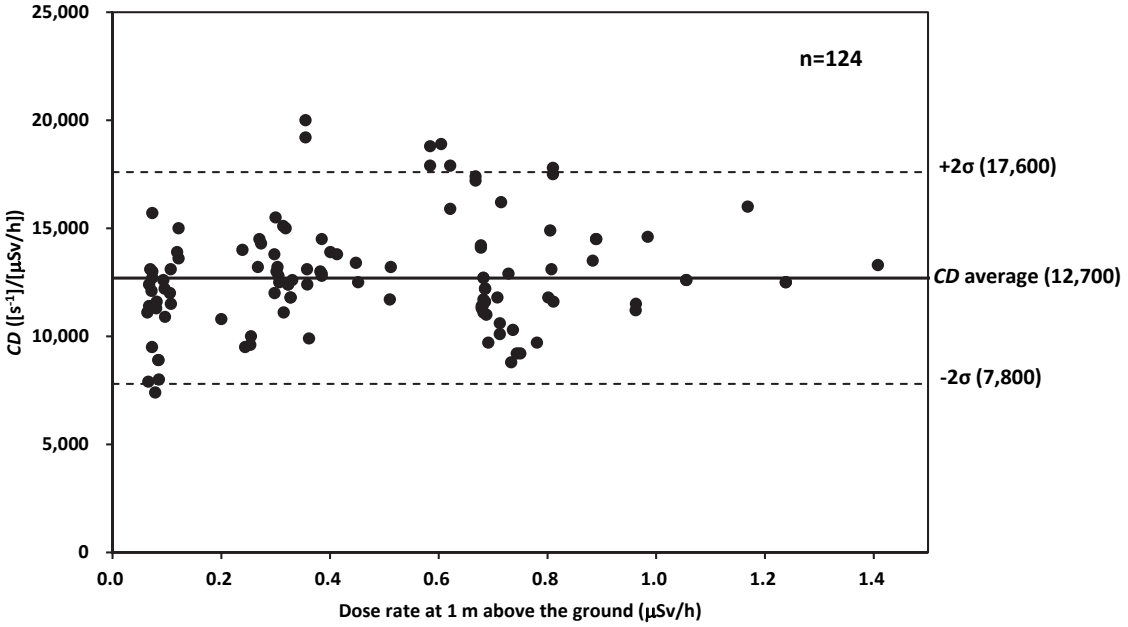
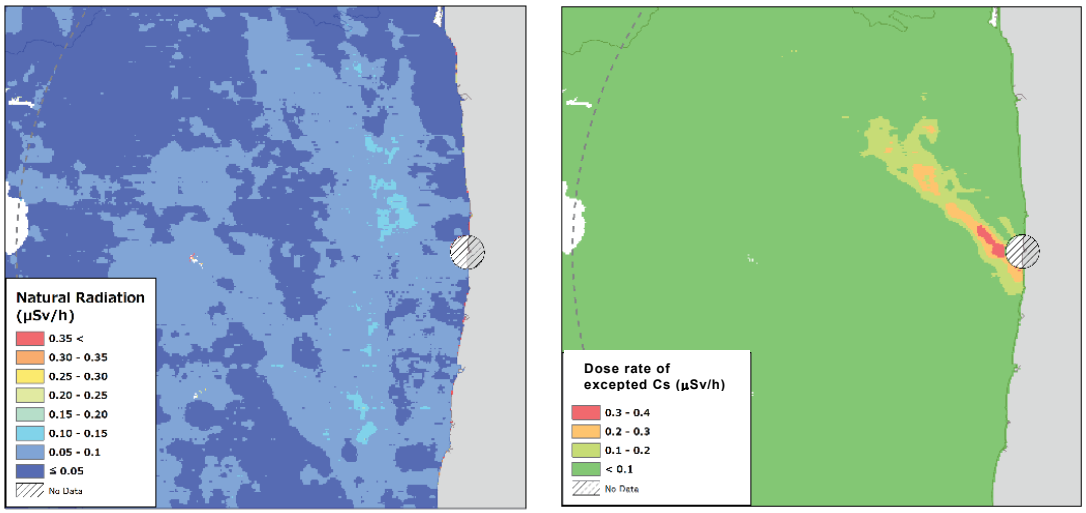


Fig. 4-34 テストポイントにおける地上測定値と空間線量率換算係数 (*CD*) の関係 (Bell 430)



天然由来の空間線量率マップ　　放射性 Cs 由来の空間線量率マップ

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

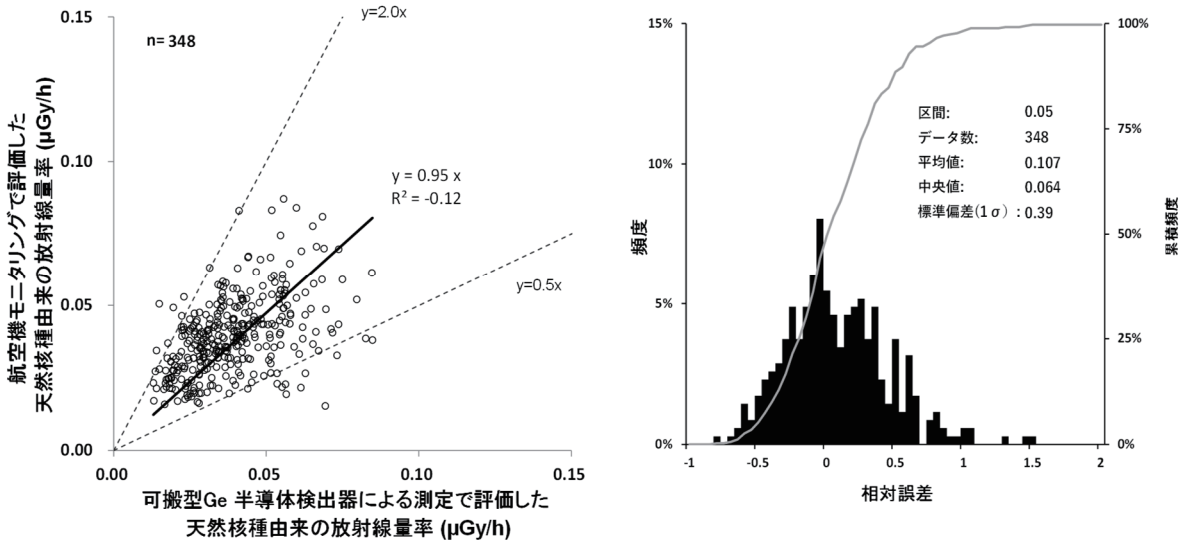


Fig. 4-36 航空機モニタリングによる天然核種由来の空間線量率と可搬型 Ge 検出器で得られた天然核種由来の空間線量率の比較

5. モニタリング結果

5.1. 第 15 次モニタリング

航空機モニタリングの測定結果を基に、地表面から 1 m の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 Cs の沈着量 (Cs-137 および Cs-134 の合計量) の状況を示した「放射性 Cs 沈着量マップ」を Fig. 5-2 に示す。Cs-137 および Cs-134 の沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-3 および Fig. 5-4 に示す。放射性 Cs の沈着量マップについては前述したように、$\beta = 1$ (g/cm^2) としたときの換算係数を使用したため、誤差を多分に含む可能性があることに留意する必要がある。なお、マップの作成にあたっては、第 15 次の航空機モニタリングを実施した最終日である 2020 年 10 月 2 日現在の値に減衰補正した。なお、空間線量率マップの色合いについては、以下の考え方で分けている。なお、これらのマップ中で白色の箇所は評価対象範囲外である。

① 天然核種を含む空間線量率

環境省が示した追加被ばく線量の考え方 [47)]を参考に、除染基準である空間線量率 0.23 μSv/h が 1.0 mSv/年に相当するとし、以下のように空間線量率マップの色合いの区分けを行った。

・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

② 放射性 Cs の沈着量

玄米中の放射性 Cs 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 Cs 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面積 10,000 cm^2、深さ 15 cm まで採取し、撹拌した場合の濃度を計算すると、約 1,000 kBq/m^2 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 L/m^2 × 1.3 kg/L × 5,000 Bq/kg = 975,000 Bq/m^2 ≒ 1,000 kBq/m^2)。

・3,000 kBq/m^2　= 1,000 kBq/m^2 の 3 倍
・1,000 kBq/m^2　= 基準
・600 kBq/m^2　= 300 kBq/m^2～1000 kBq/m^2 の中間値
・300 kBq/m^2　= 1,000 kBq/m^2 の約半桁下 ($10^{-0.5}$)
・100 kBq/m^2　= 1,000 kBq/m^2 × 1/10
・60 kBq/m^2　= 600 kBq/m^2 × 1/10
・30 kBq/m^2　= 300 kBq/m^2 × 1/10
・10 kBq/m^2　= 100 kBq/m^2 × 1/10

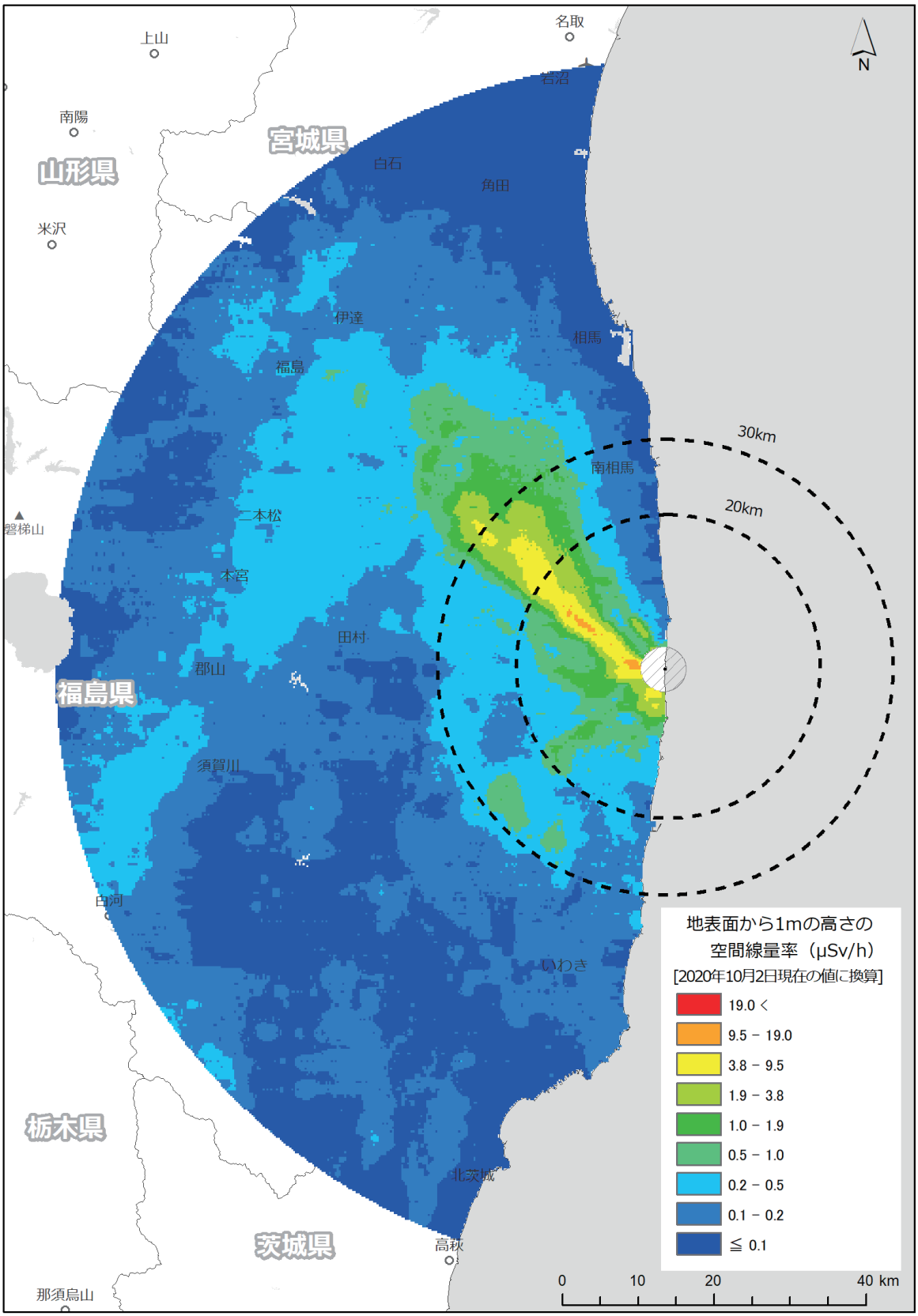


Fig. 5-1 第 15 次モニタリングにおける空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

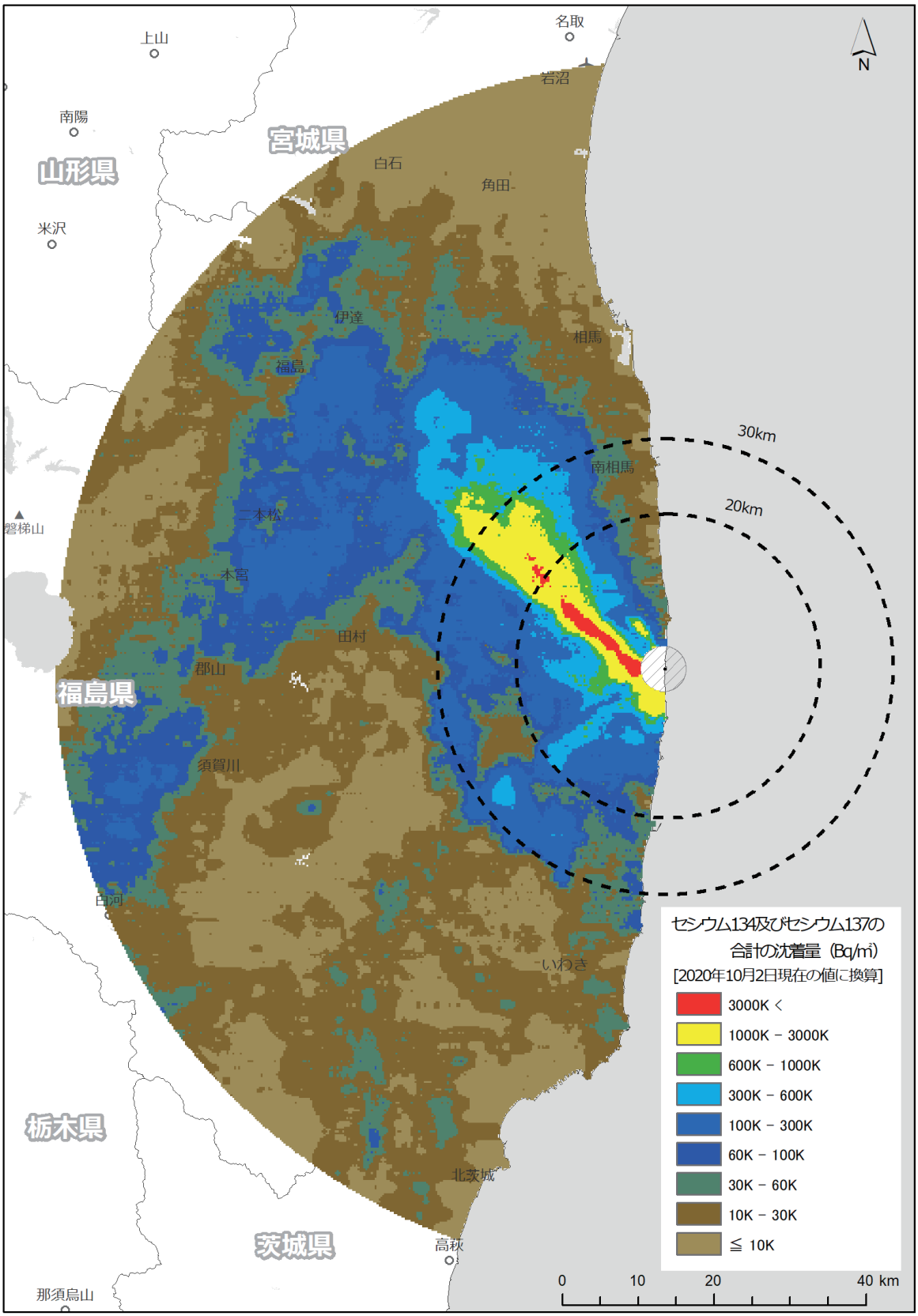


Fig. 5-2 第 15 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

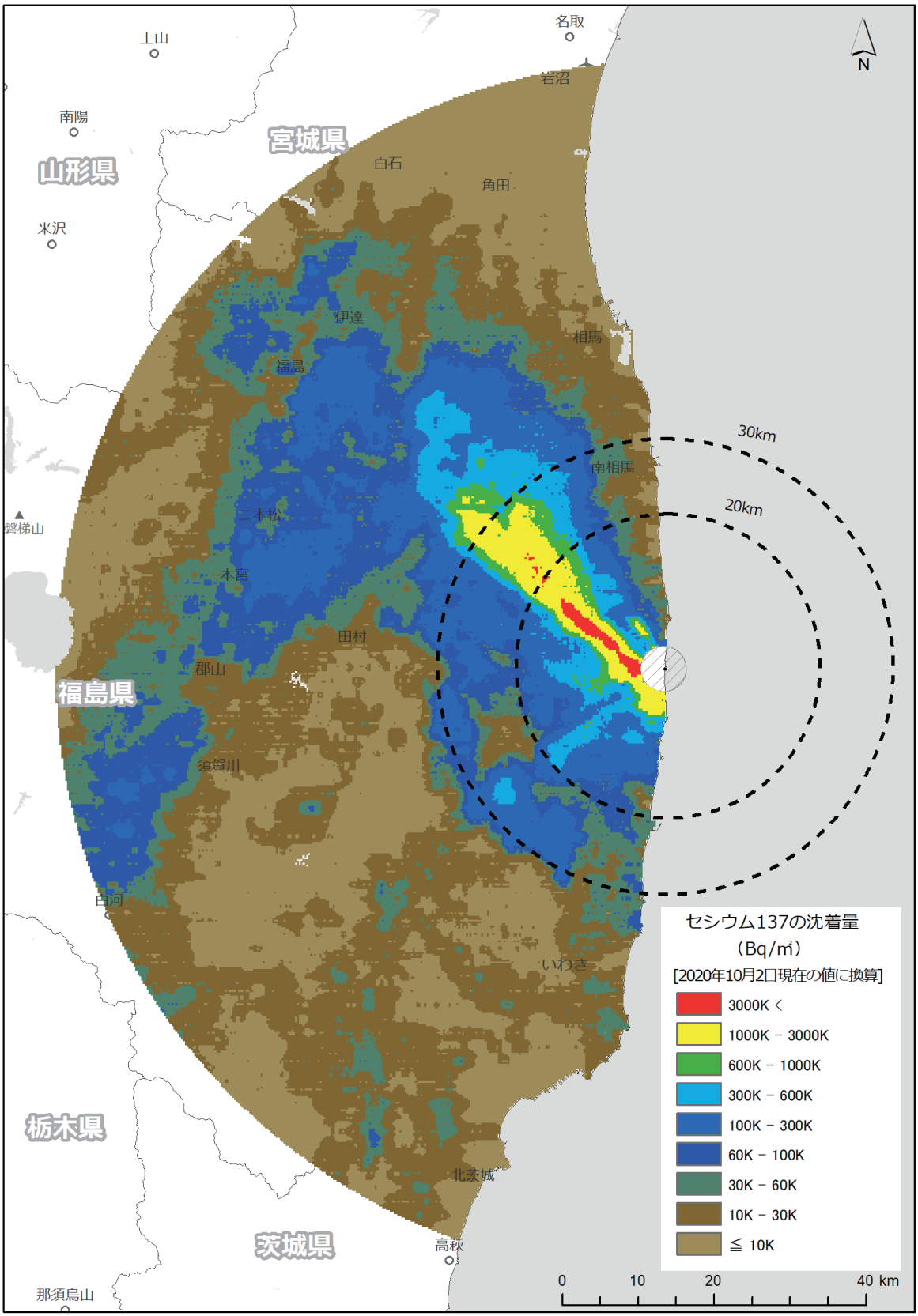


Fig. 5-3 第 15 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

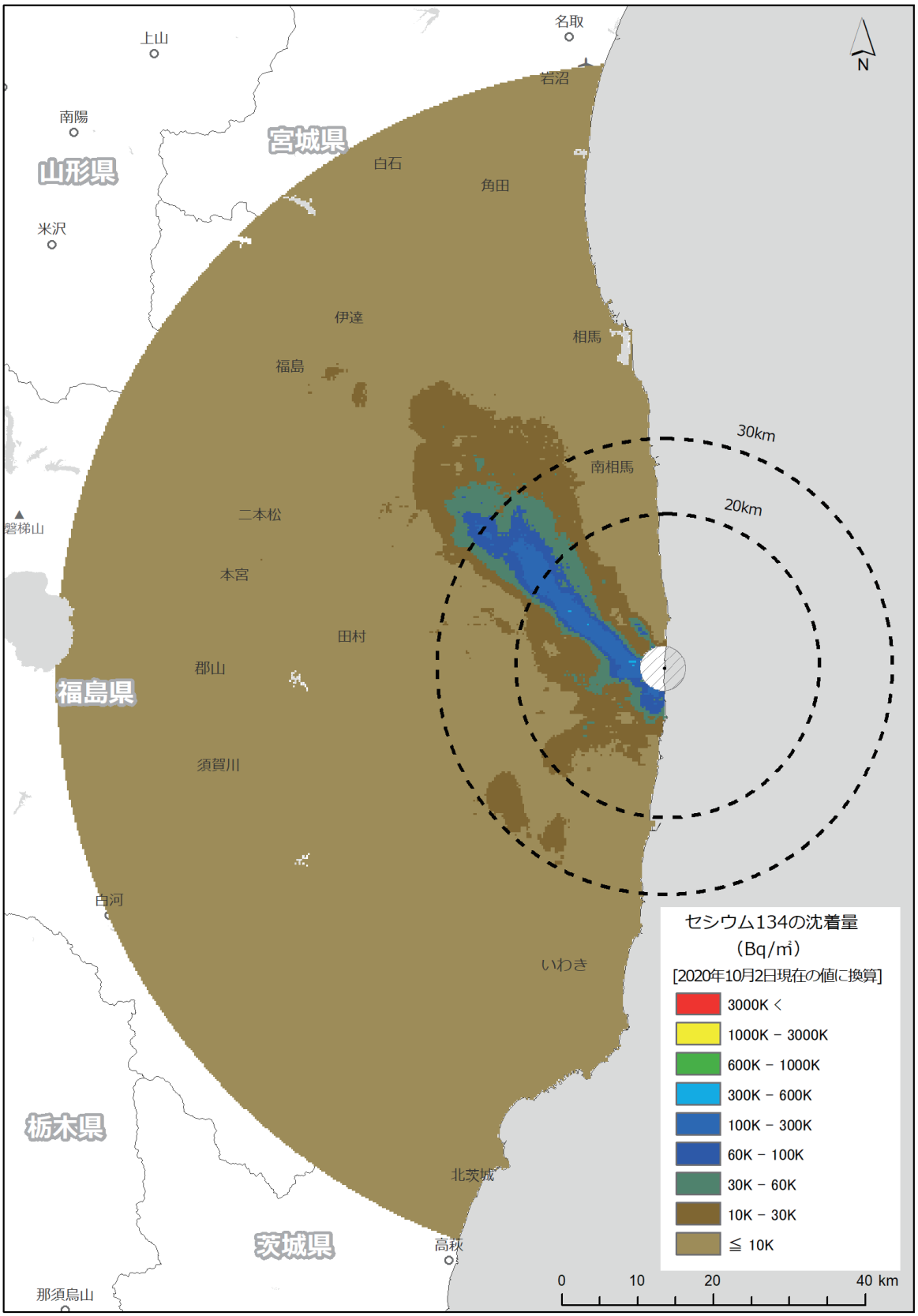


Fig. 5-4 第 15 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

5.2. 東日本第 11 次モニタリング

航空機モニタリングの測定結果を基に、地表面から 1 m の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 Cs の沈着量 (Cs-137 および Cs-134 の合計量) の状況を示した「放射性 Cs 沈着量マップ」を Fig. 5-6 に示す。Cs-137 および Cs-134 の沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-7 および Fig. 5-8 に示す。なお、東日本第 11 次の航空機モニタリングを実施した最終日は 2020 年 10 月 30 日であるが、当該日のフライトは空間線量率マップ等の作成とは無関係なデータを取得するためのものであるため、マップの作成にあたっては、その前日の 2020 年 10 月 29 日現在の値に減衰補正した。

また、第 15 次モニタリングとの整合性を確認するために、第 15 次モニタリングおよび東日本第 11 次モニタリングで取得した全データを統合し、2020 年 10 月 29 日現在の値に減衰補正し内挿・マッピングした。第 15 次モニタリングおよび東日本第 11 次モニタリングを統合した「空間線量率マップ」および「放射性 Cs 沈着量マップ」をそれぞれ、Fig. 5-9 および Fig. 5-10 に示す。Cs-137 および Cs-134 の沈着量マップをそれぞれ Fig. 5-11 および Fig. 5-12 に示す。境界部分のマップの整合性も違和感がなく、よく一致していることが分かる。

天然核種由来の空間線量率マップを Fig. 5-13 に示す。空間線量率の分布をみると新潟県と福島県の県境に天然の放射線量が高い場所が存在する。ここは、帝釈山地という花崗岩地帯として知られた場所であり、過去に日本全国の空間線量率を計測した結果と比較しても矛盾しない[43)]。天然核種由来の空間線量率は、地すべり等の大きな地形の変化がなければ測定年度ごとに変化しないと考えられ、過去のデータと比較して同様な結果が得られていることを確認することは解析結果の妥当性を表すものと考えられる。そこで、天然放射性核種起源の空間線量率解析手法が確立した 2014 年度以降のデータから、作成した天然核種由来の空間線量率マップ比較を Fig. 5-14 に示す。

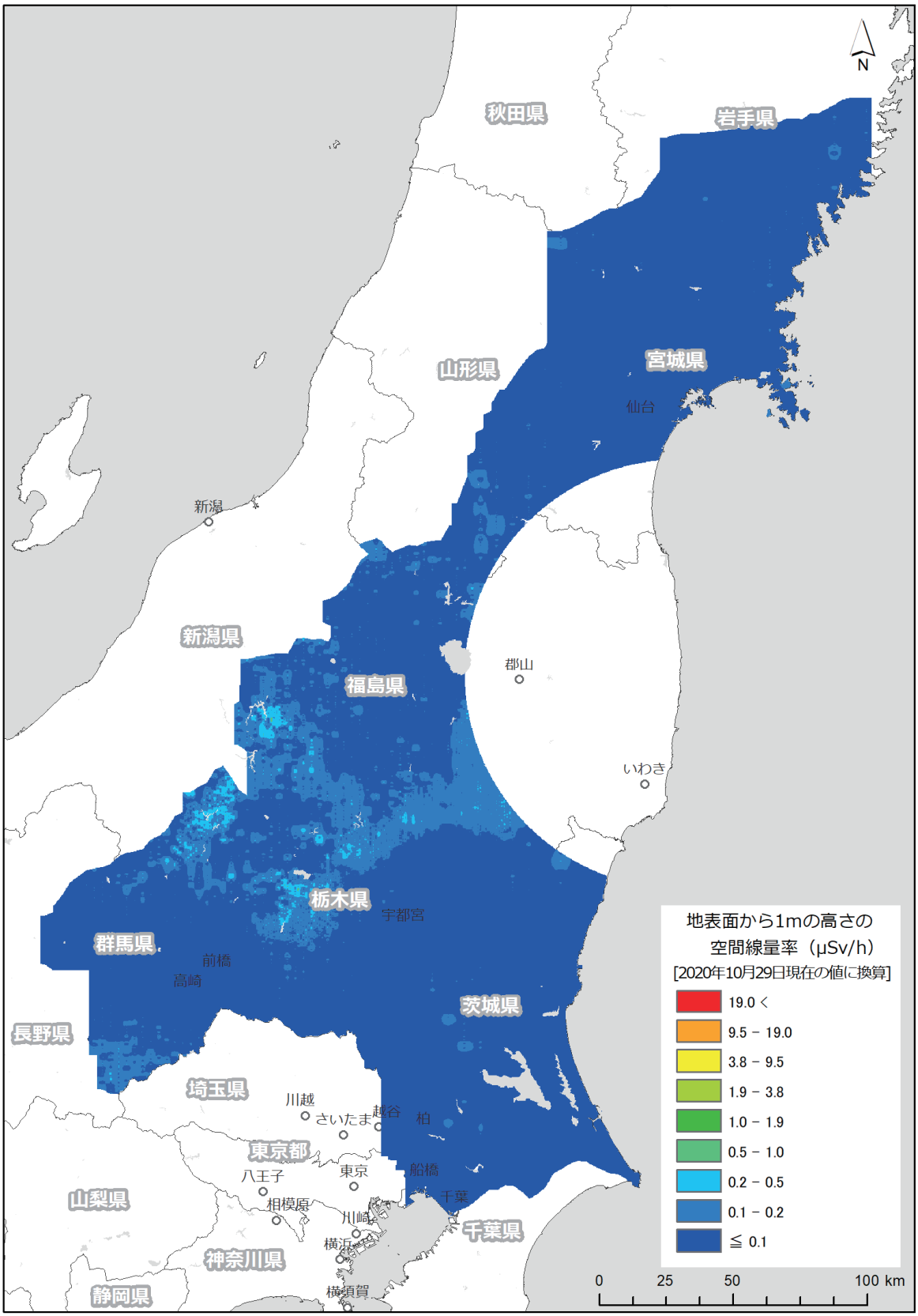


Fig. 5-5 東日本第 11 次モニタリングにおける空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

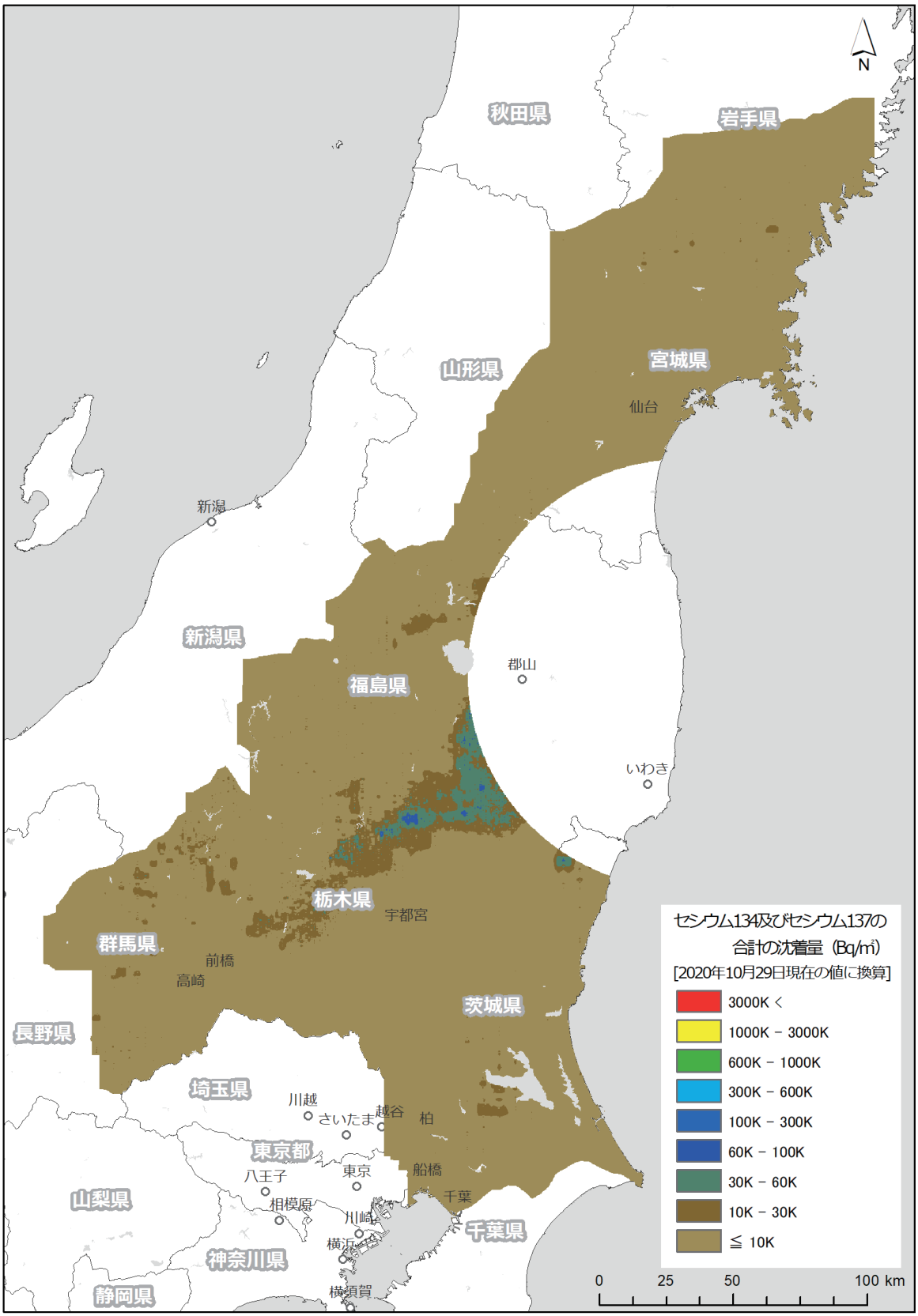


Fig. 5-6 東日本第 11 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

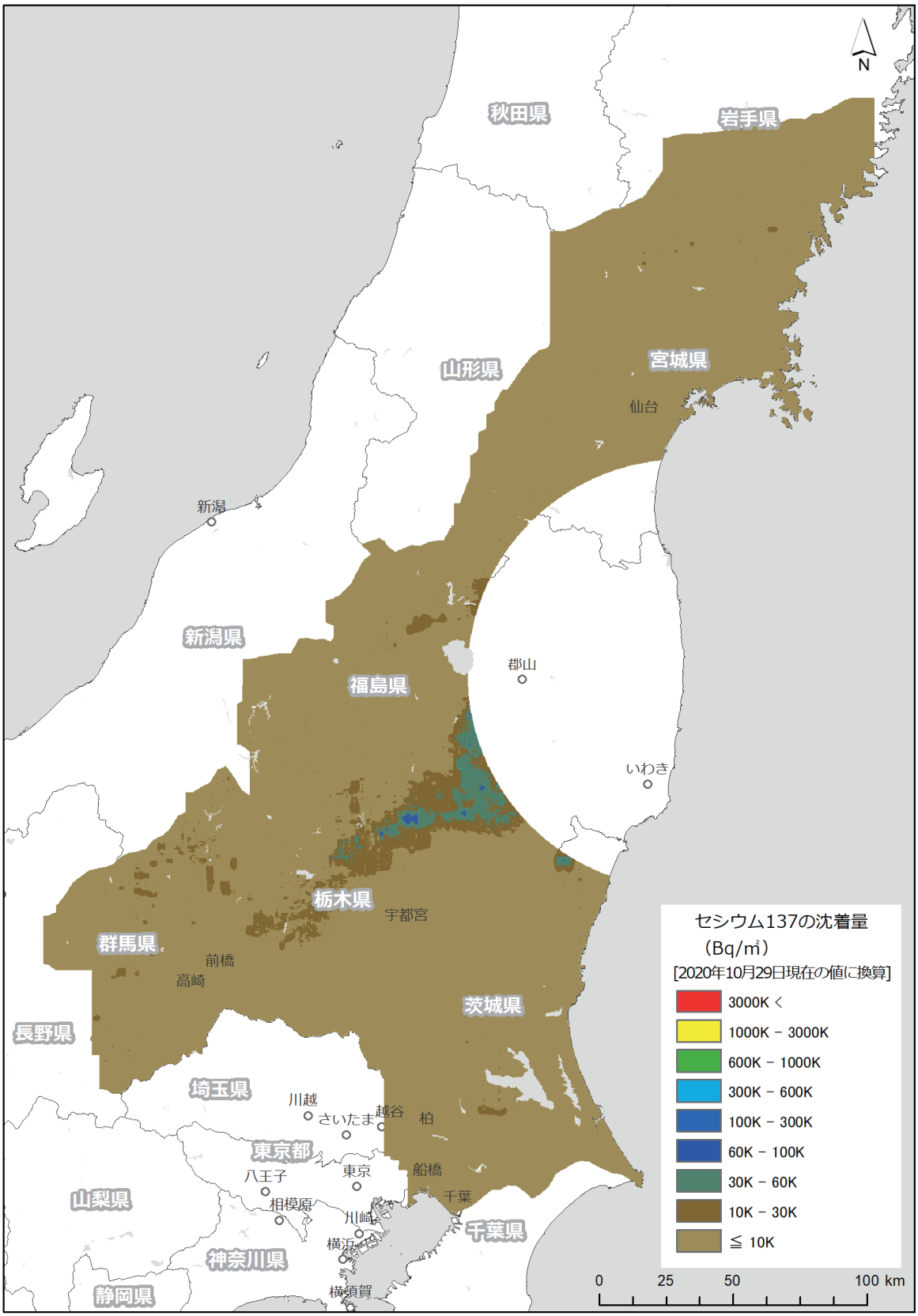


Fig. 5-7 東日本第 11 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

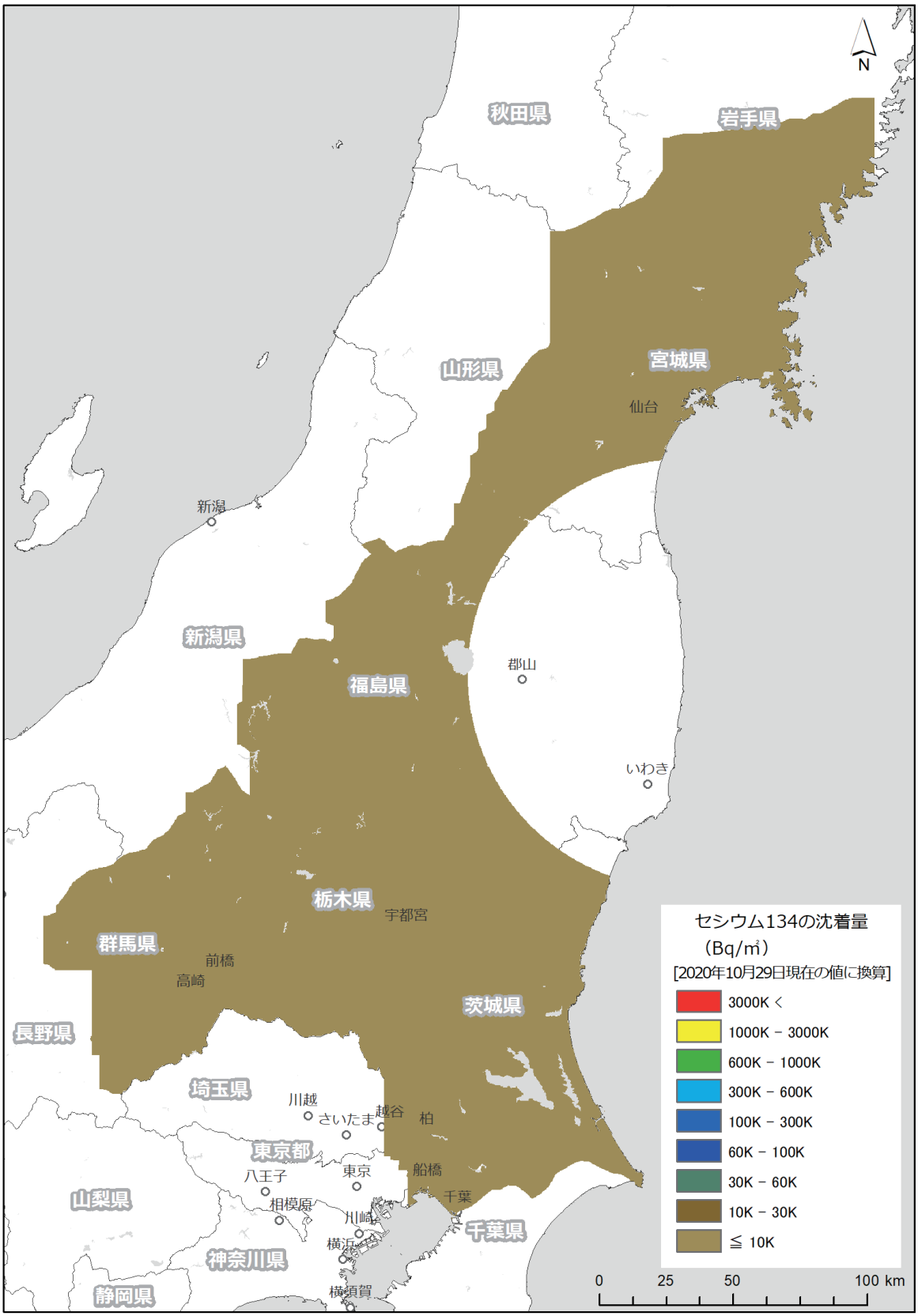


Fig. 5-8 東日本第 11 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

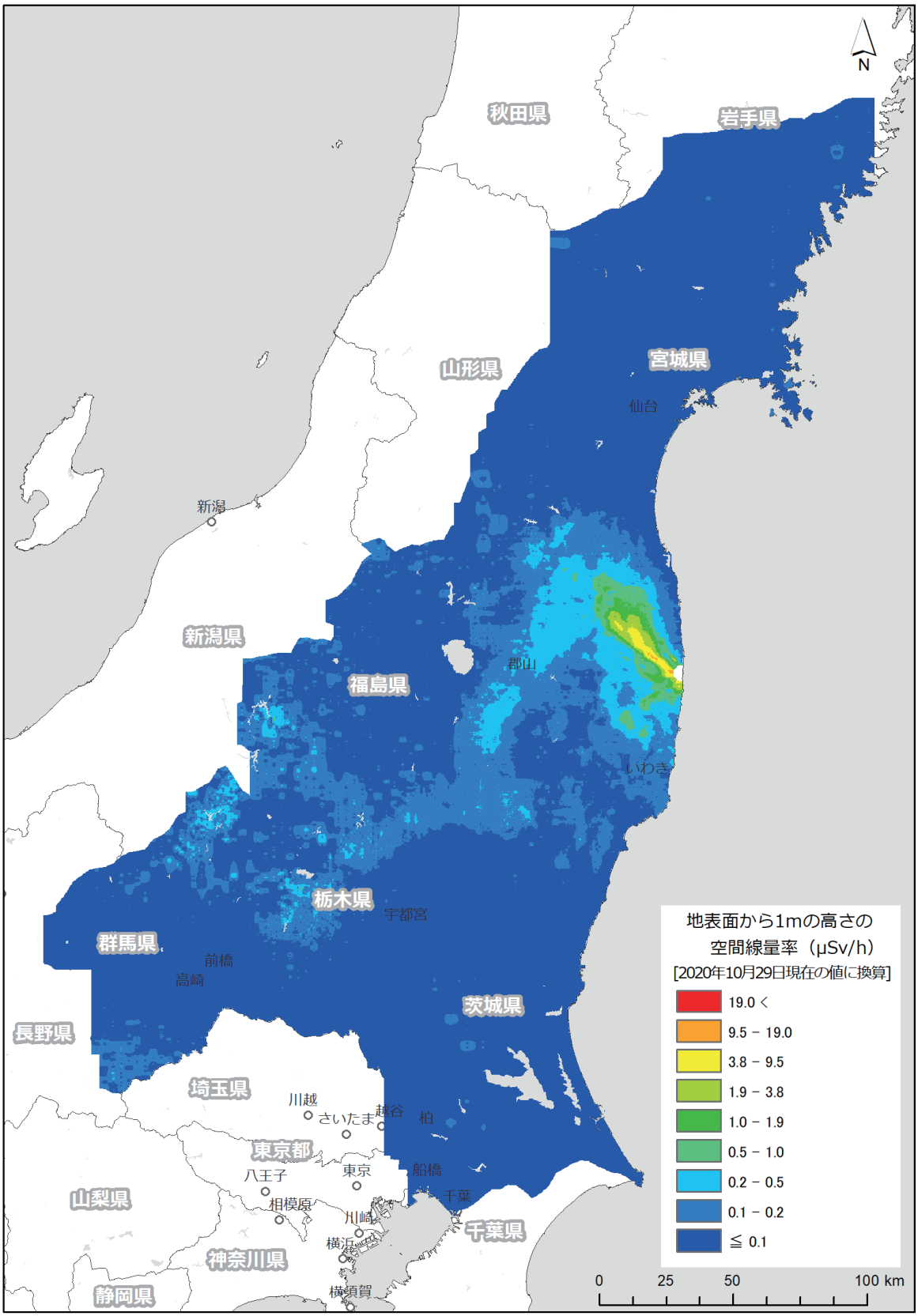


Fig. 5-9 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

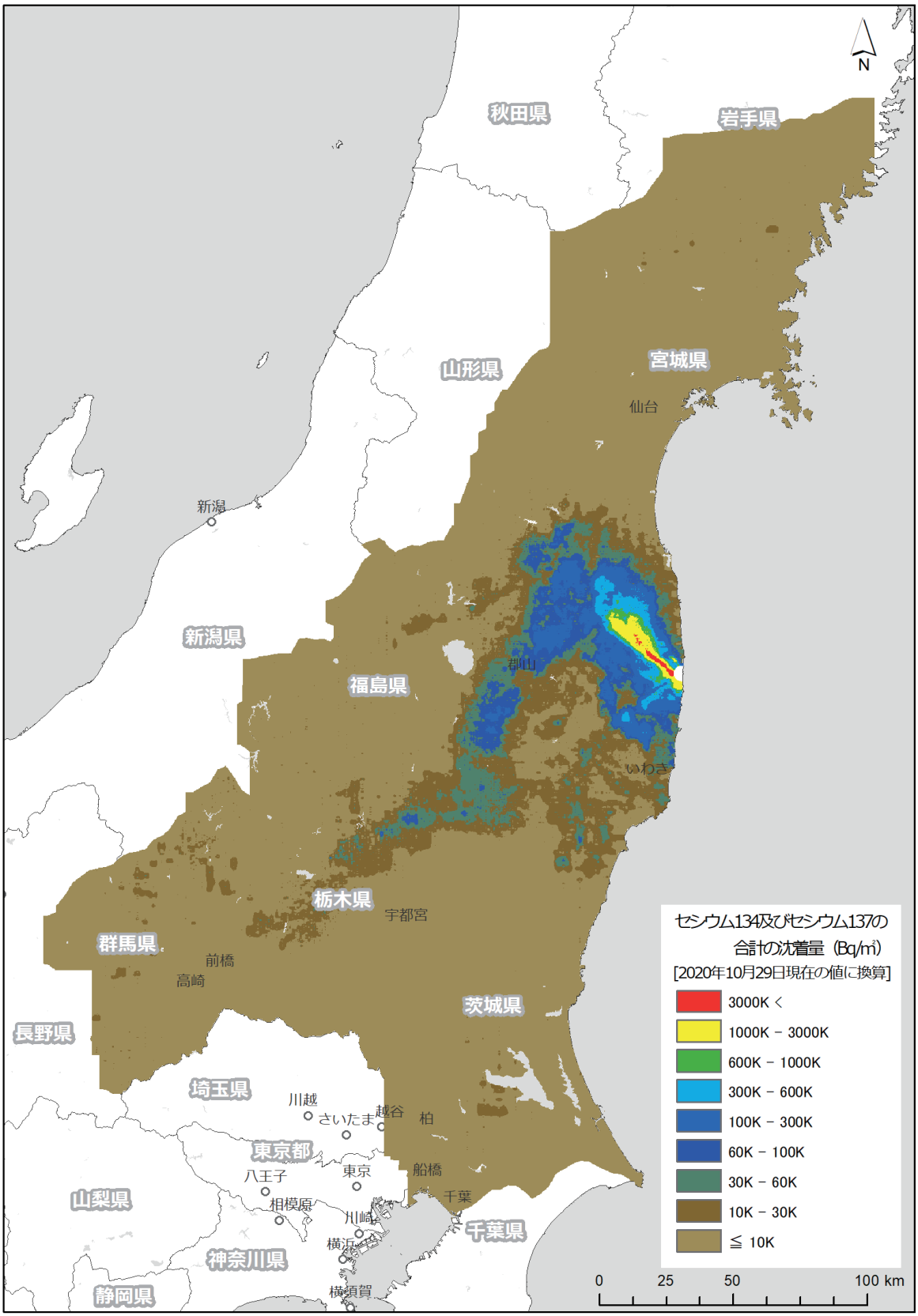


Fig. 5-10 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける放射性 Cs 沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

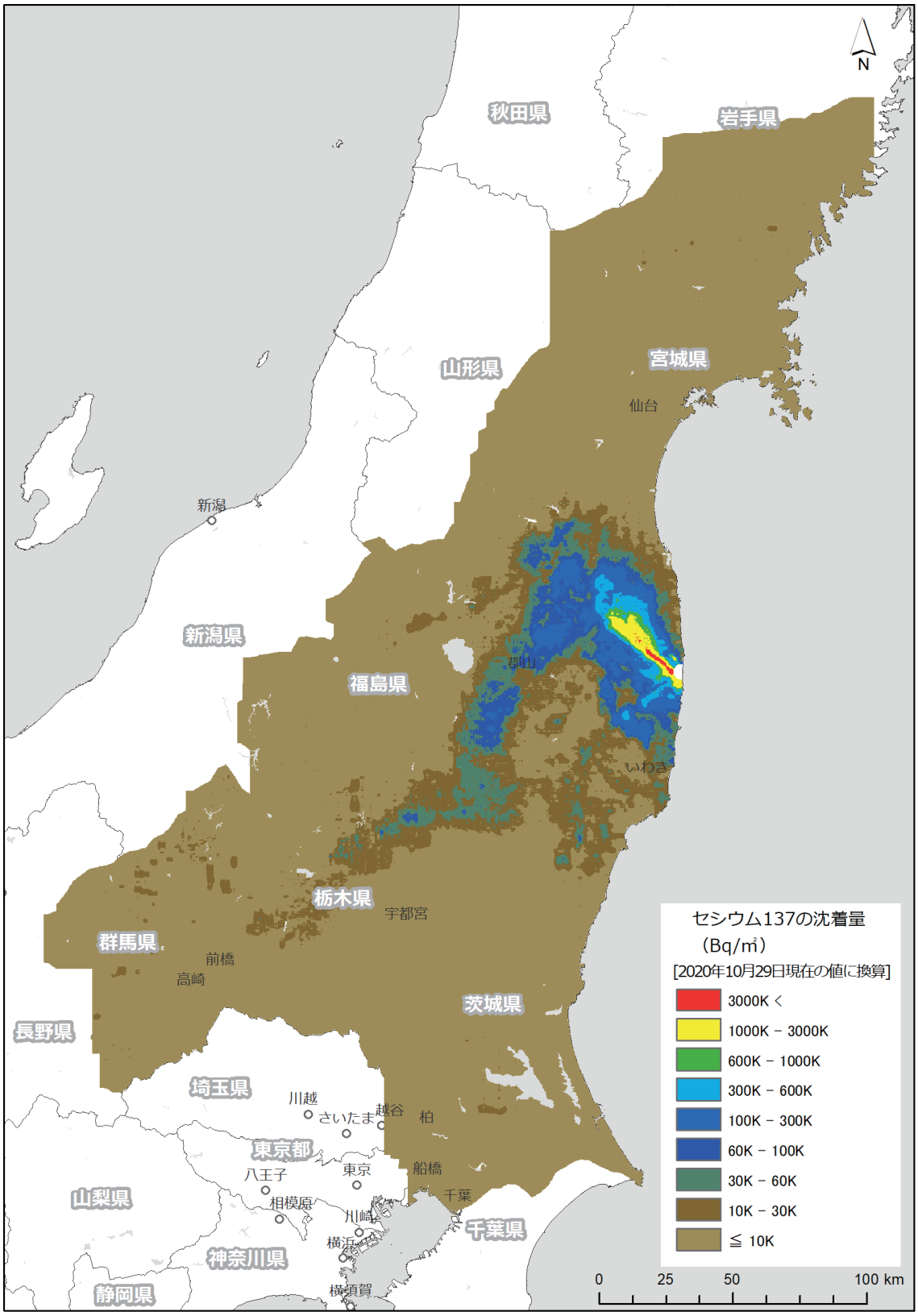


Fig. 5-11 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける Cs-137 沈着量マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

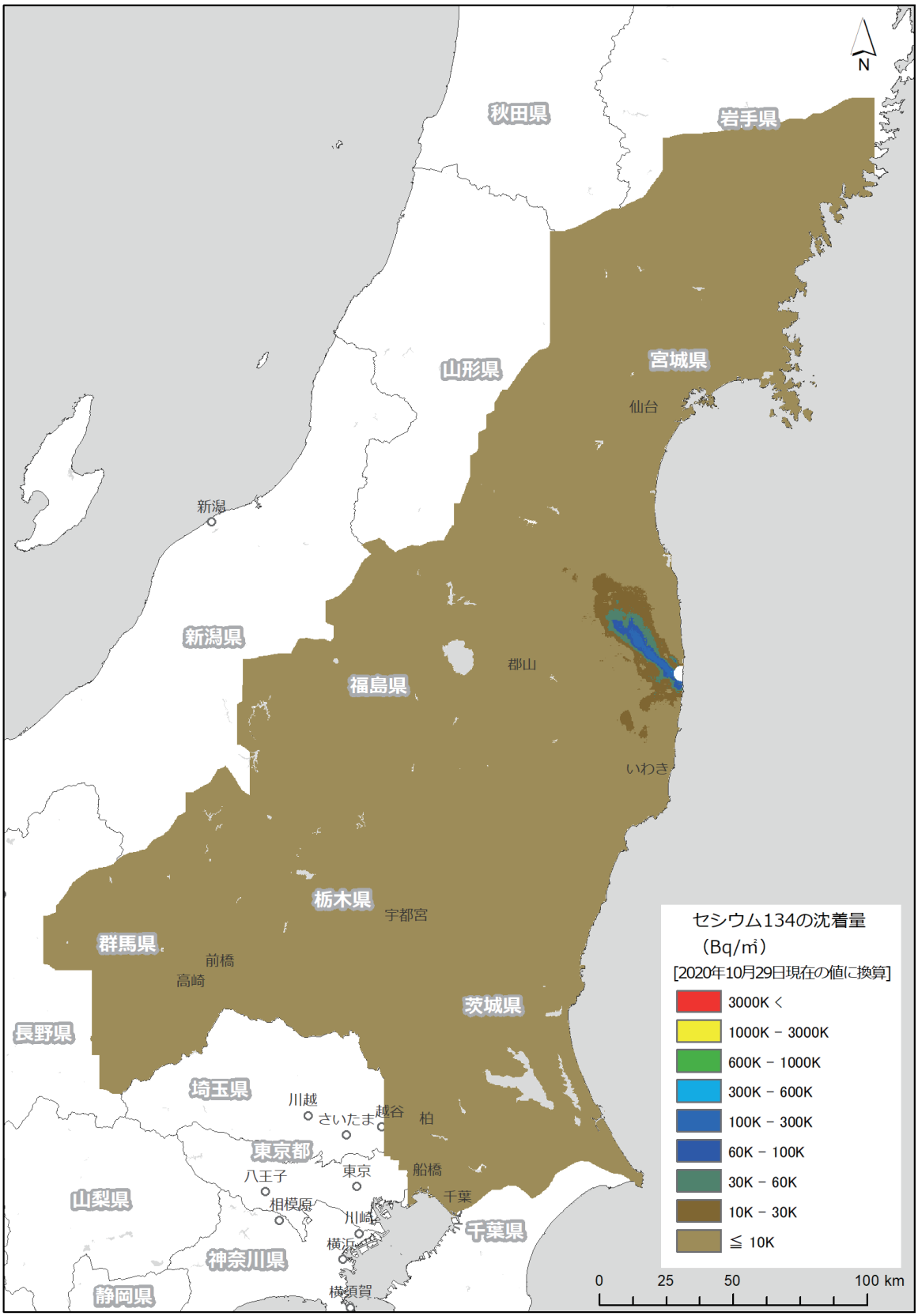


Fig. 5-12 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける Cs-134 沈着量マップ (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。

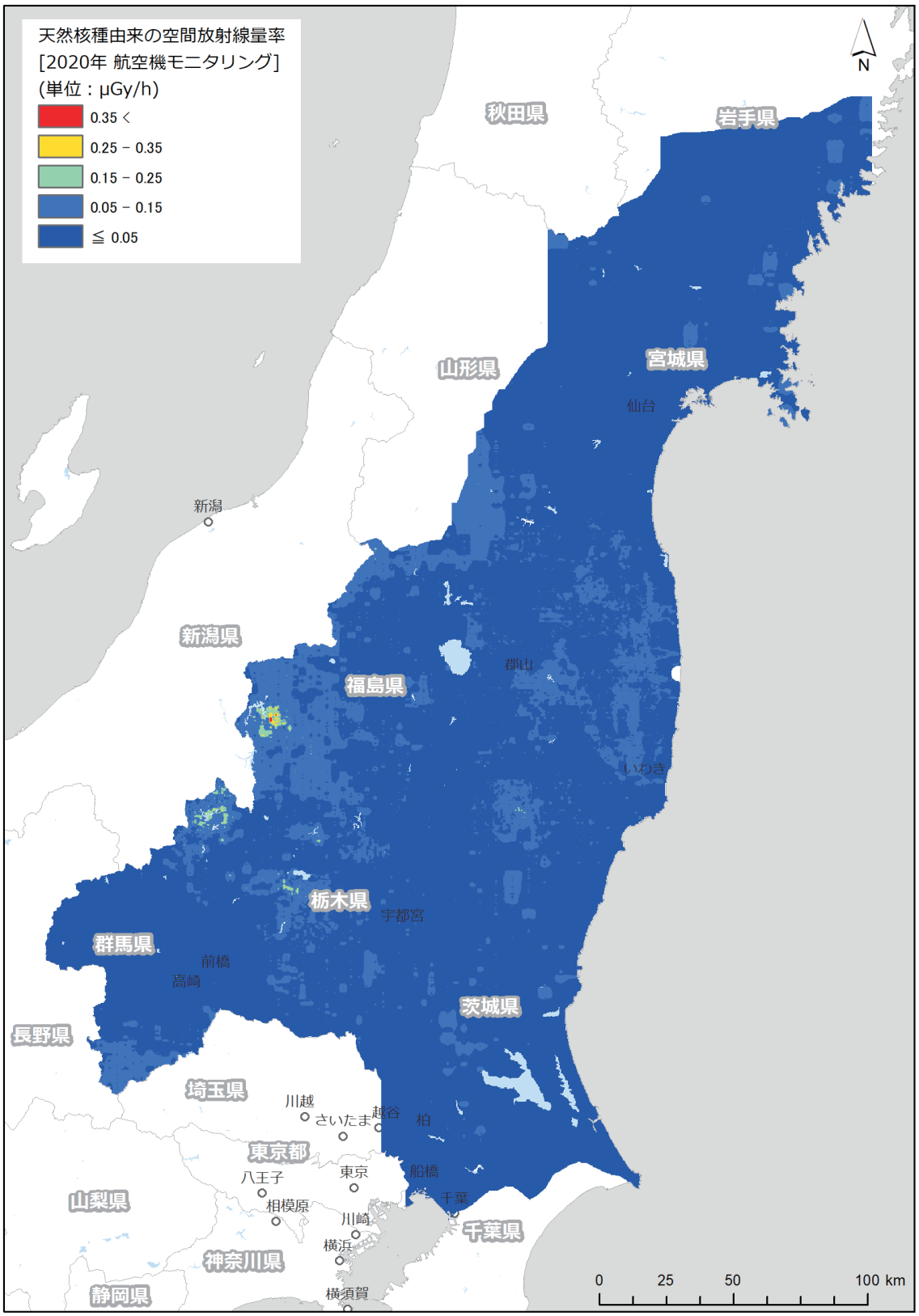
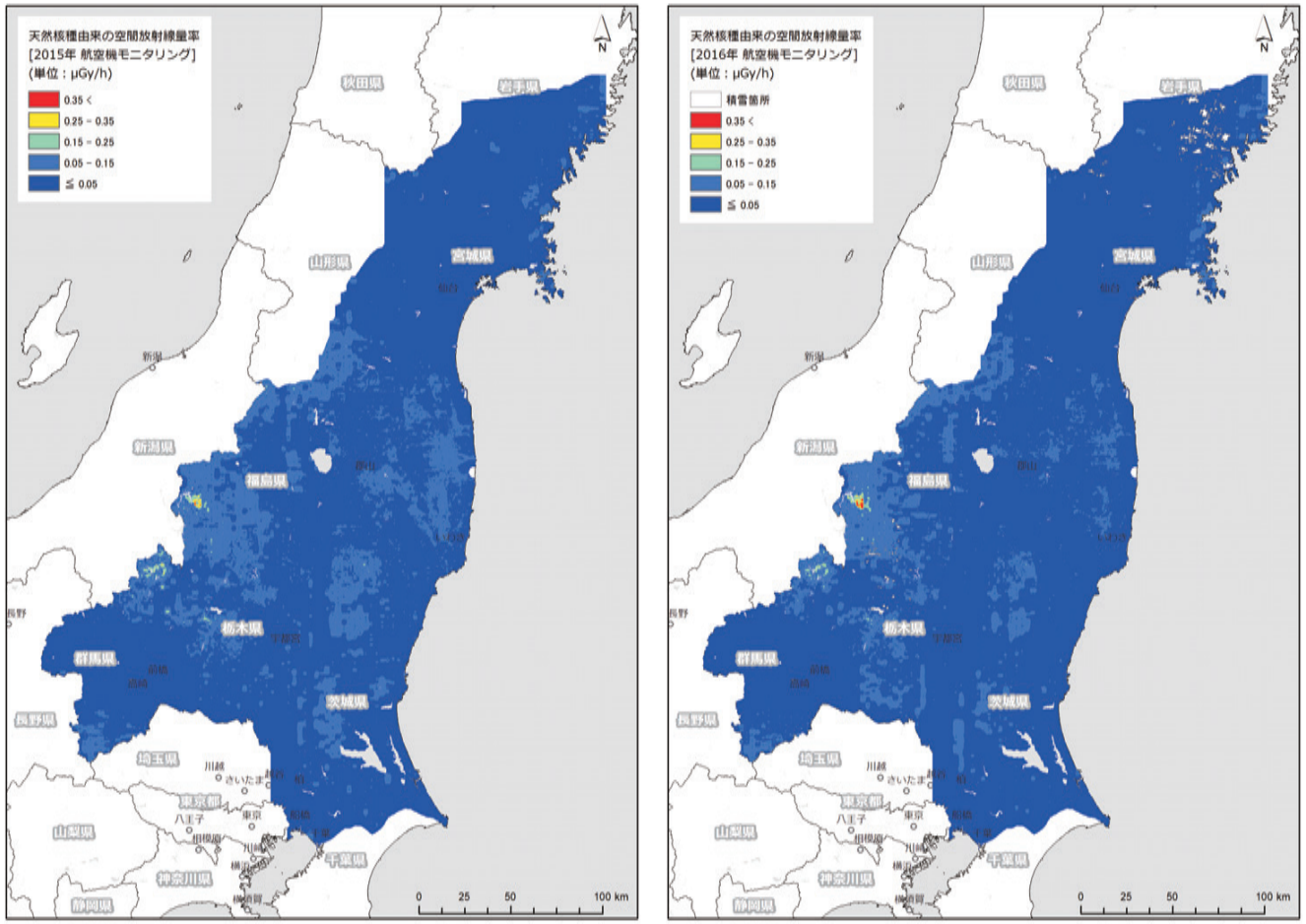


Fig. 5-13 第 15 次モニタリングと東日本第 11 次モニタリングにおける天然核種由来の空間線量率マップ

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

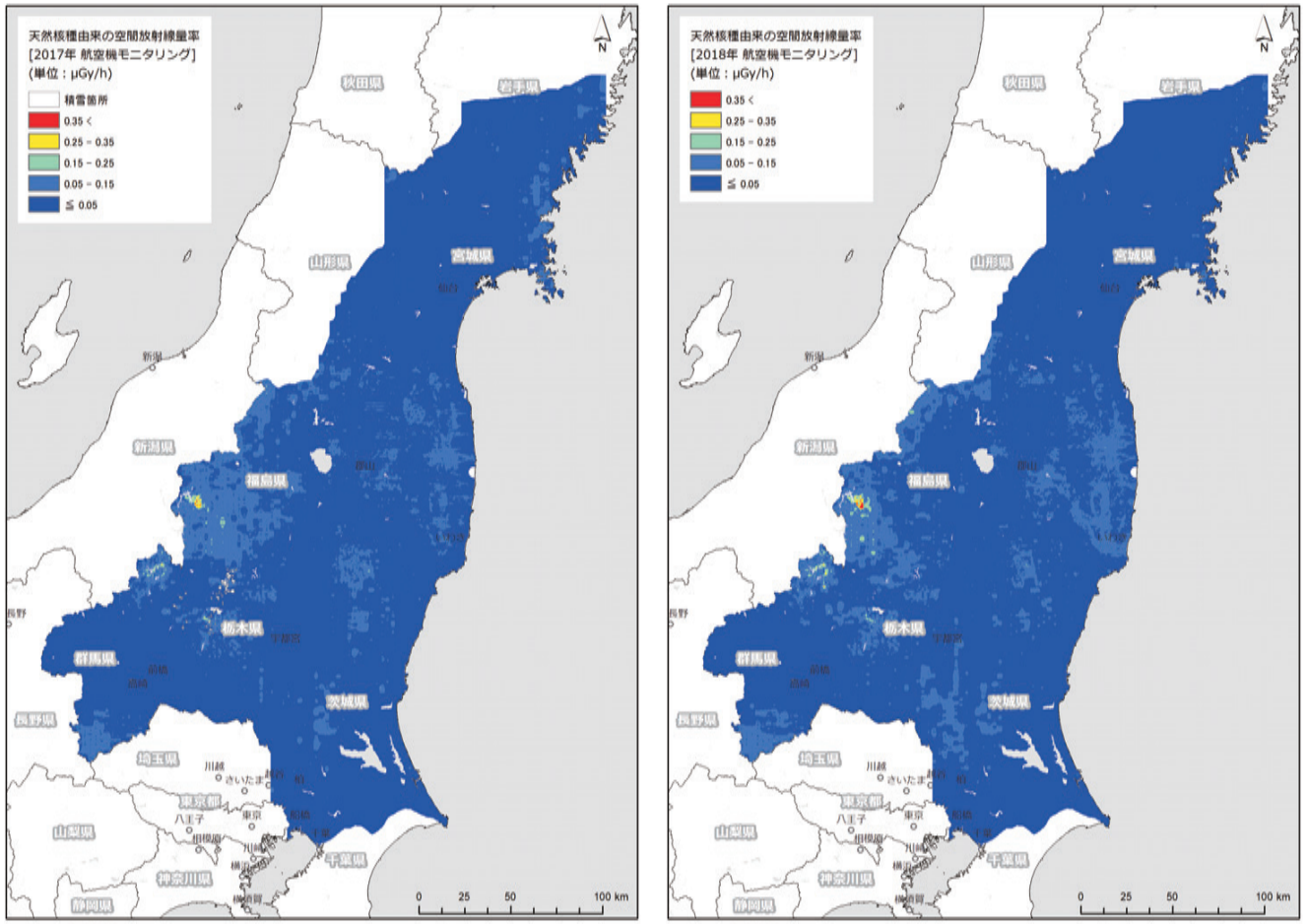


2015 年のデータを解析　　2016 年のデータを解析

Fig. 5-14 各測定年度における天然放射性核種による空間線量率マップの比較

(1/3)

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

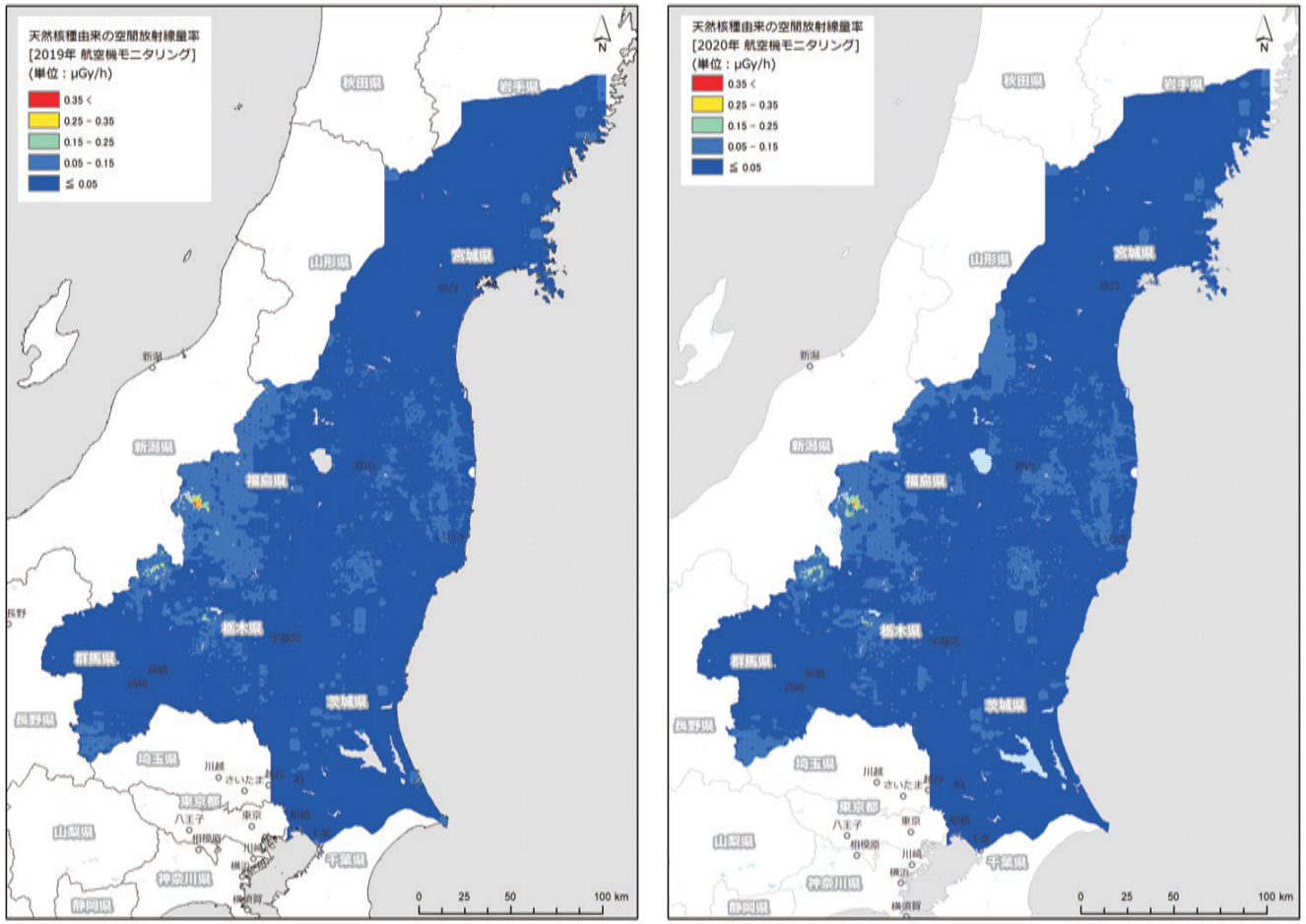


2017 年のデータを解析　　2018 年のデータを解析

Fig. 5-14 各測定年度における天然放射性核種による空間線量率マップの比較

(2/3)

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



2019 年のデータを解析　　2020 年のデータを解析

Fig. 5-14 各測定年度における天然放射性核種による空間線量率マップの比較

(3/3)

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

6. モニタリング結果の考察

6.1. 過去のモニタリング結果との比較

これまでの旧避難指示区域における航空機モニタリングの結果について Fig. 6-1 に示す。このように、空間線量率の高い地域を表す暖色系の面積が小さくなっていることが分かる。このような空間線量率の減少傾向を定量的に把握するための比較方法を検討した。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比較を行った。現状と同じ手法で解析を実施した最も古いデータである第 4 次モニタリングと今回の第 15 次モニタリングの全領域における比較結果を散布図として Fig. 6-2 に示す。なお、第 4 次モニタリング以前については自衛隊のヘリを使用し、簡易的なパラメータを適用していたため、比較対象として用いるのは望ましくない。そこで過去の結果との定量比較対象として、使用パラメータの算出方法やデータ解析手法が初めて定型化した第 4 次を選択した。Fig. 6-2 に示したように、回帰直線の傾きを全体の空間線量率の平均的な減少傾向としてみることができる。図中に、重量緩衝深度 (β) を 1 (g/cm^2) とし、放射性 Cs の半減期から算出した理論的な減衰を表す破線を示す。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 圏内には地表面から 1 m の高さの空間線量率が 0.1 μSv/h 以下の、天然放射性核種による影響が相対的に大きい場所が多い。放射性 Cs から放出される γ 線に起因する空間線量率の減少傾向を見るには、天然放射性核種による影響を無視できるような空間線量率が比較的高い場所を選定するのがよい。また、最小二乗法による近似は、数値の大きな結果に影響を受けやすいため、より平均的な減少率を評価できる方法として空間線量率の比をヒストグラムとして表示することを検討した。

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率 (相対減少率：(第 15 次モニタリングの結果 - 第 4 次モニタリングの結果) / (第 4 次モニタリングの結果)) を算出し、ヒストグラムとして示した。第 15 次モニタリングと第 4 次モニタリングの空間線量率の比較を Fig. 6-3 に、第 15 次モニタリングと第 4 次モニタリングの Cs-137 の沈着量の比較を Fig. 6-4 に示す。空間線量率のヒストグラムと比較して、Cs-137 の沈着量のヒストグラムはばらつきが大きい。これは、空間線量率が宇宙線と自己汚染を差し引いて換算しているのに対し、Cs-137 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大きくなることに起因する。しかしながら、両者のヒストグラムとも平均値と中央値がほとんど同値であり、正規分布に近いといえる。各地点における相対減少率の平均値を指標とすると、第 4 次モニタリングが行われた 2011 年 11 月から空間線量率については減少率が約 80 %と算出された。一方、放射性 Cs 沈着量については減少率が約 50 %と算出されたが、航空機モニタリングにおいては、福島原子力発電所事故からの経過日数に伴う β の変化と土地利用区分による β の違いを考慮せずに 1.0 (g/cm^2) として一律に固定しているため、本項で示した相対減少率には、ある程度の不確かさが伴うことに留意する必要がある。

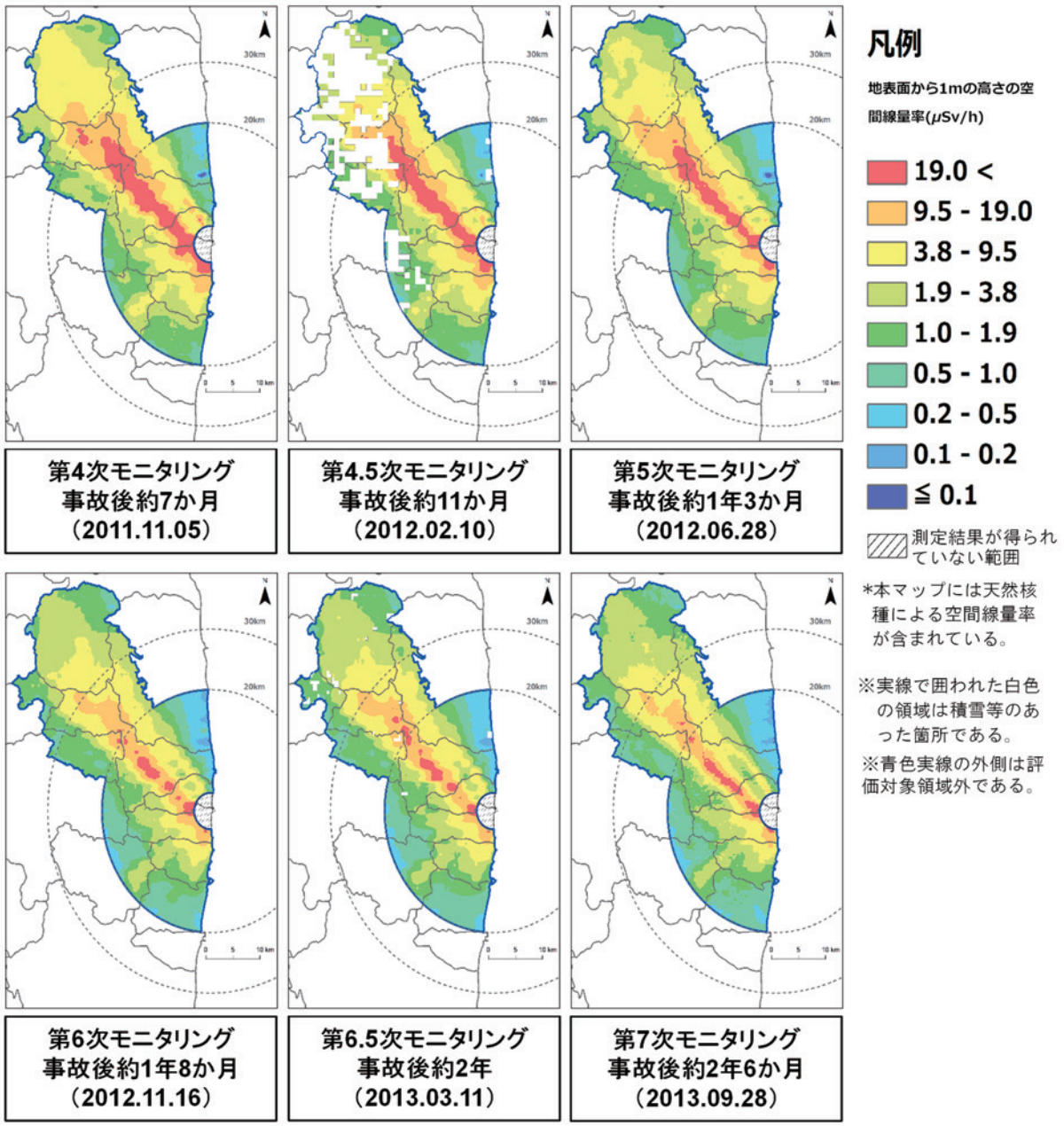


Fig. 6-1 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(1/3)

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

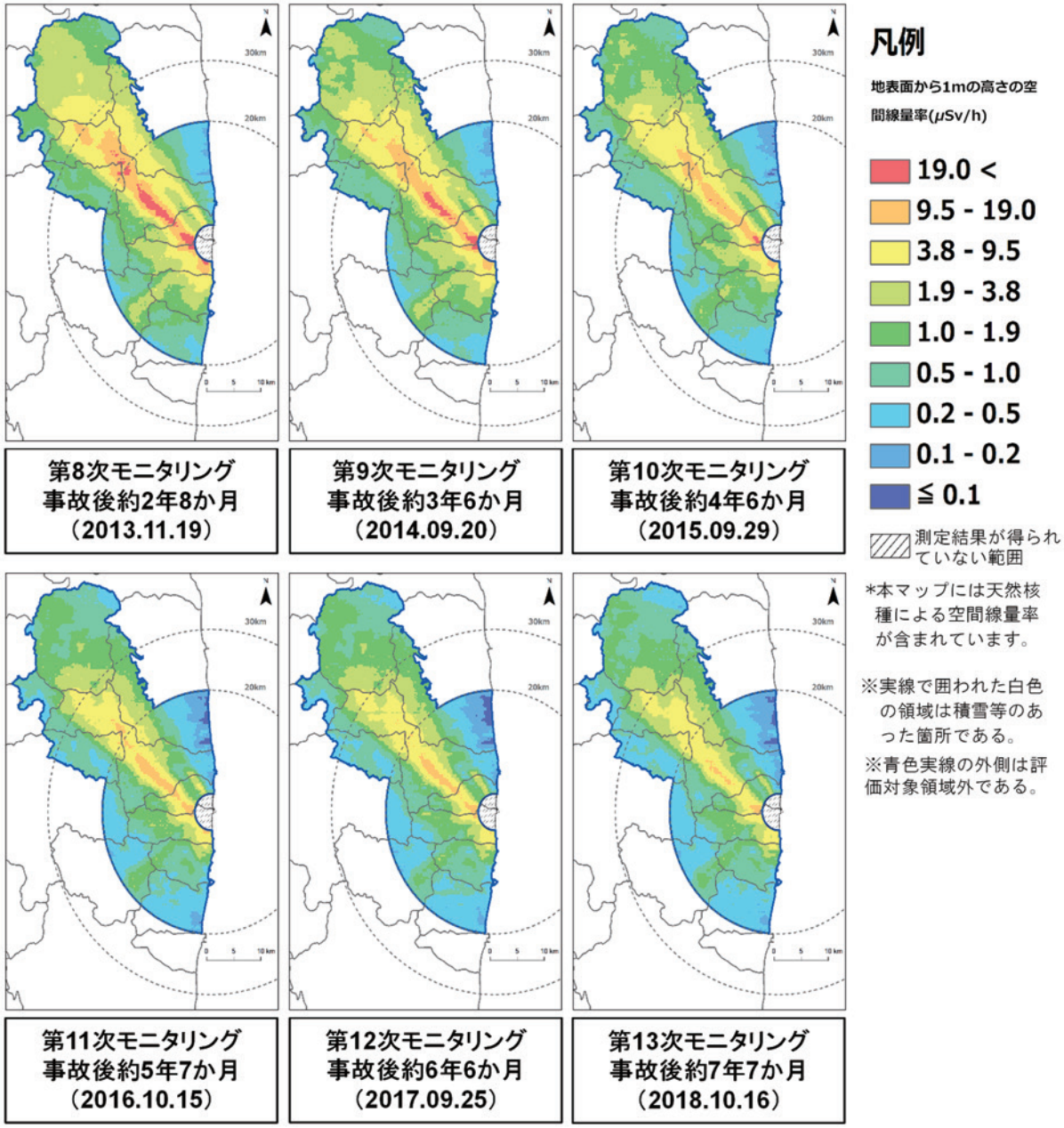


Fig.6-1 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(2/3)

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

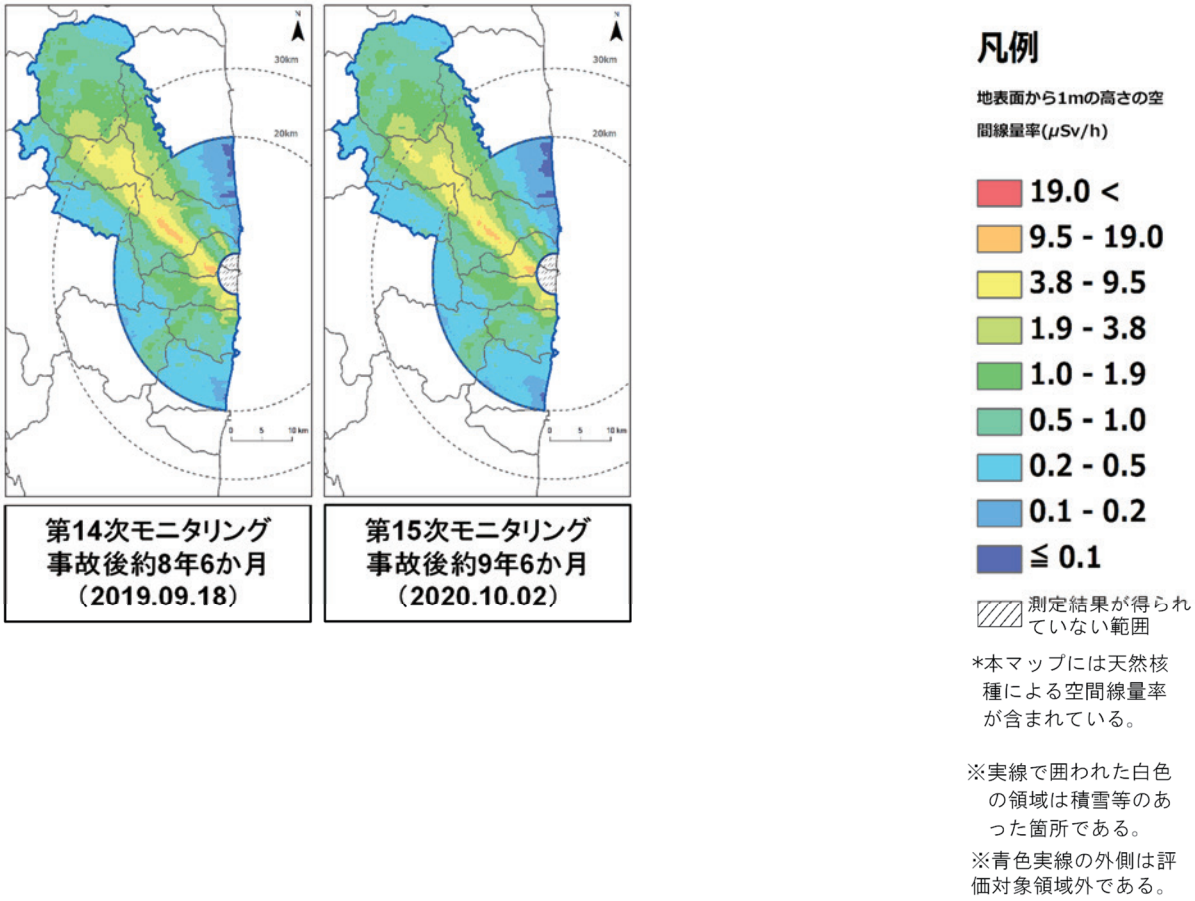


Fig.6-1 旧避難指示区域における過去の空間線量率マップの比較

(3/3)

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

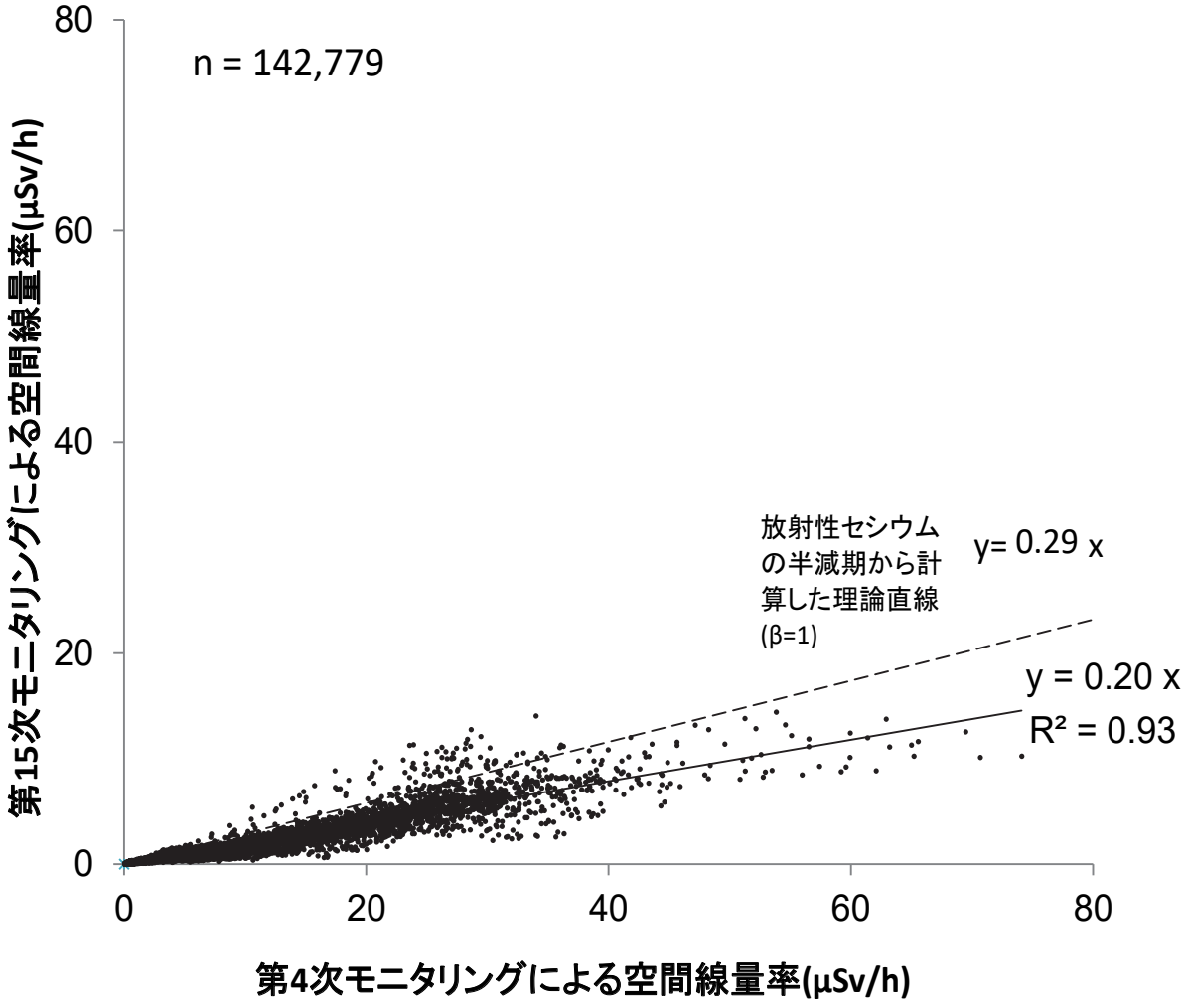


Fig. 6-2 福島原子力発電所から **80 km** 圏内における第 **4** 次モニタリングおよび第 **15** 次モニタリングの空間線量率算出結果の比較

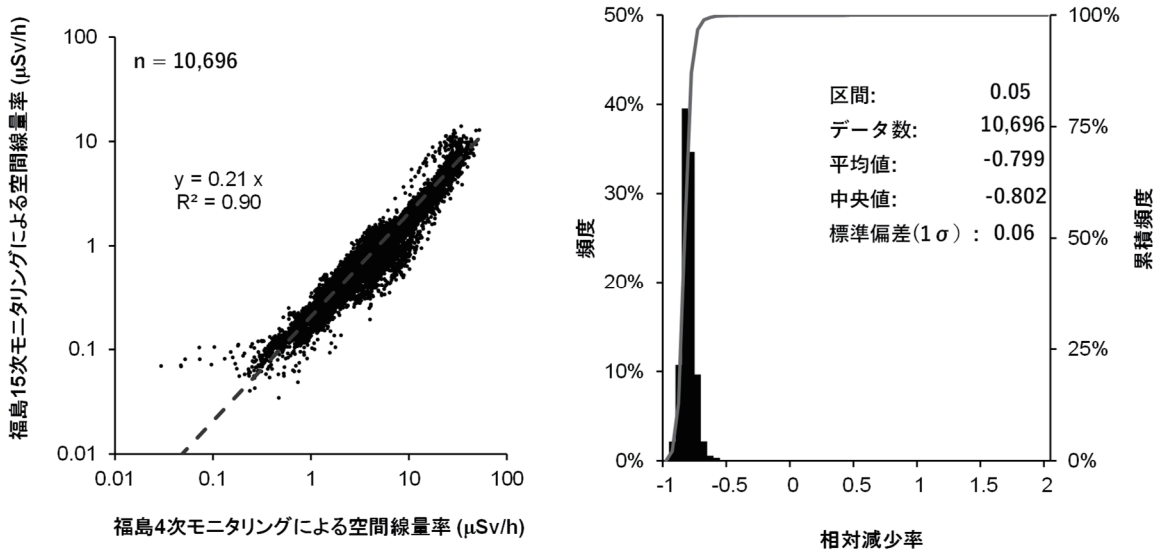


Fig. 6-3 旧避難指示区域における第 **4** 次モニタリングおよび第 **15** 次モニタリングの空間線量率算出結果の比較

(左**:** 散布図、右**:** 相対減少率のヒストグラム**)**

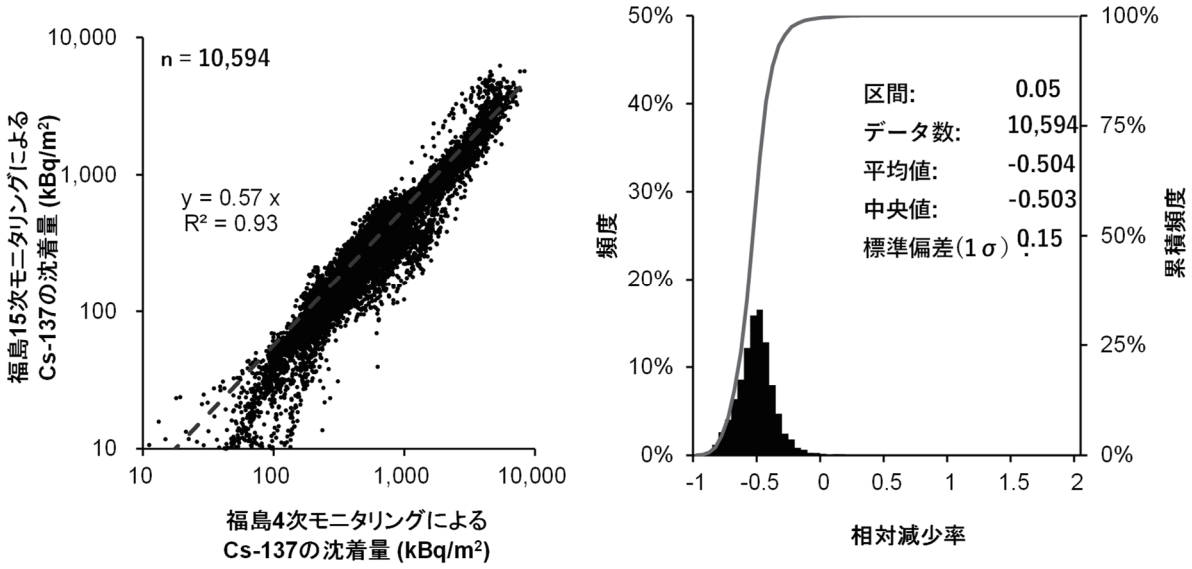


Fig. 6-4 旧避難指示区域における第 **4** 次モニタリングおよび第 **15** 次モニタリングの **Cs-137** 沈着量算出結果の比較

(左**:** 散布図、右**:** 相対減少率のヒストグラム**)**

6.2. 環境半減期の算出

福島原子力発電所事故から約 10 年経過し、事故直後から実施してきた本事業の測定データは蓄積されてきている。環境中における放射性物質量の変化は、核実験場での継続的なモニタリングやチェルノブイリ原子力発電所事故のモニタリング結果から、多重の指数関数で近似できることが知られている。Sanada et al., (2018)[48]は有人ヘリおよび無人ヘリで取得したデータを利用して、空間線量率の環境半減期の算出を行っている。ここでは、これまでの測定データの変化傾向を定量的に把握するため、測定データの指数関数近似について検討した。その結果として求められる環境半減期は、測定データの信頼性の推定や将来の空間線量率の推定に重要なパラメータとなる。

2011 年から得られている航空機モニタリングの測定データを政府の定めた統計に用いる基準地域メッシュ (1 km × 1 km) 毎に平均化した。対象メッシュ数は、福島原子力発電所を中心とした半径約 80 km の地域 10,174 メッシュとなる。

空間線量率は天然放射性核種によるバックグラウンド空間線量率に比較的近い数値を示す場所が多くなってきている。変化傾向を正確に定量化する場合、天然放射性核種による空間線量率を減算する必要がある。安藤他 (2017)[49]は、当該事業における KURAMA-II による走行サーベイ結果をもとに、東日本の市町村別のバックグラウンド空間線量率を推定している。ここでは、当該研究成果におけるバックグラウンド空間線量率データを採用し、市町村ごとに放射性 Cs 由来の空間線量率を算出した。

指数関数近似に用いたデータは、それぞれの測定手法毎に、調査期間すべてにおいてデータがそろっているメッシュのみ抽出した。本解析は 80 km 全域のデータおよび除染等の人為的な影響や高空間線量率エリアでの影響を考察するため、旧避難指示区域のデータを対象とした。抽出したデータについて、走行サーベイについては、式 [13] に示した二重の指数関数近似を行い、空間線量率の環境半減期を算出した。

$$\boldsymbol{D = a\,exp\left(-\frac{0.693}{t_{short}} \times t\right) + b\,exp\left(-\frac{0.693}{t_{long}} \times t\right)} \qquad [13]$$

ここで、D は空間線量率 (μSv/h)、t_{short} は環境半減期の減衰が速い成分、t_{long} は環境半減期の減衰が遅い成分、t は事故からの経過時間 (年) を表す。なお、ここで切片である a+b は事故直後の空間線量率となる。近似曲線については最小二乗法により 95 %の信頼区間を計算するとともに、環境半減期についても 95 %の信頼区間を計算した。

Fig. 6-5 a) および b) に今までで得られた航空機モニタリング結果に二重指数関数近似を適用した結果を示す。本図におけるプロットは、航空機モニタリングにより算出された空間線量率の算術平均値であり、それらのプロットに対して縦軸方向に各メッシュにおける空間線量率値を表した。80 km 圏内および旧避難指示区域と、事故から 2 年目までは減衰の速い成分による影響が顕著であり、2 年目以降は減衰の遅い成分が支配的であることが分かる。これらの指数関数の傾きが環境半減期を意味し、各成分について Table 6-1 にまとめる。減衰の速い成分に

ついては、80 km 圏内は 0.74 年 (95 %信頼区間 0.60 年～0.89 年) および旧避難指示区域は 0.53 年 (95 %信頼区間 0.36 年～0.70 年) となった。80 km 圏内における空間線量率の減少傾向について調査した例 [48]を見ると、土地利用区分によって空間線量率の減少速度が異なることが示唆されている。旧避難指示区域の環境半減期が 80 km 圏内のものと比べて小さい (減衰速度が速い) ことは、次節に記載するような、それぞれの区域の土地利用区分の違いが反映されているものと考えられる。減衰の遅い成分については、80 km 圏内は 5.3 年 (95 %信頼区間 3.6 年～6.5 年) および旧避難指示区域は 4.3 年 (95 %信頼区間 3.6 年～5.0 年) となった。旧避難指示区域の方が減衰速度は若干速いものの、信頼区間を考えると同等と考えてよい。今後とも、本手法を用いて空間線量率の環境半減期を評価していくことが望ましい。

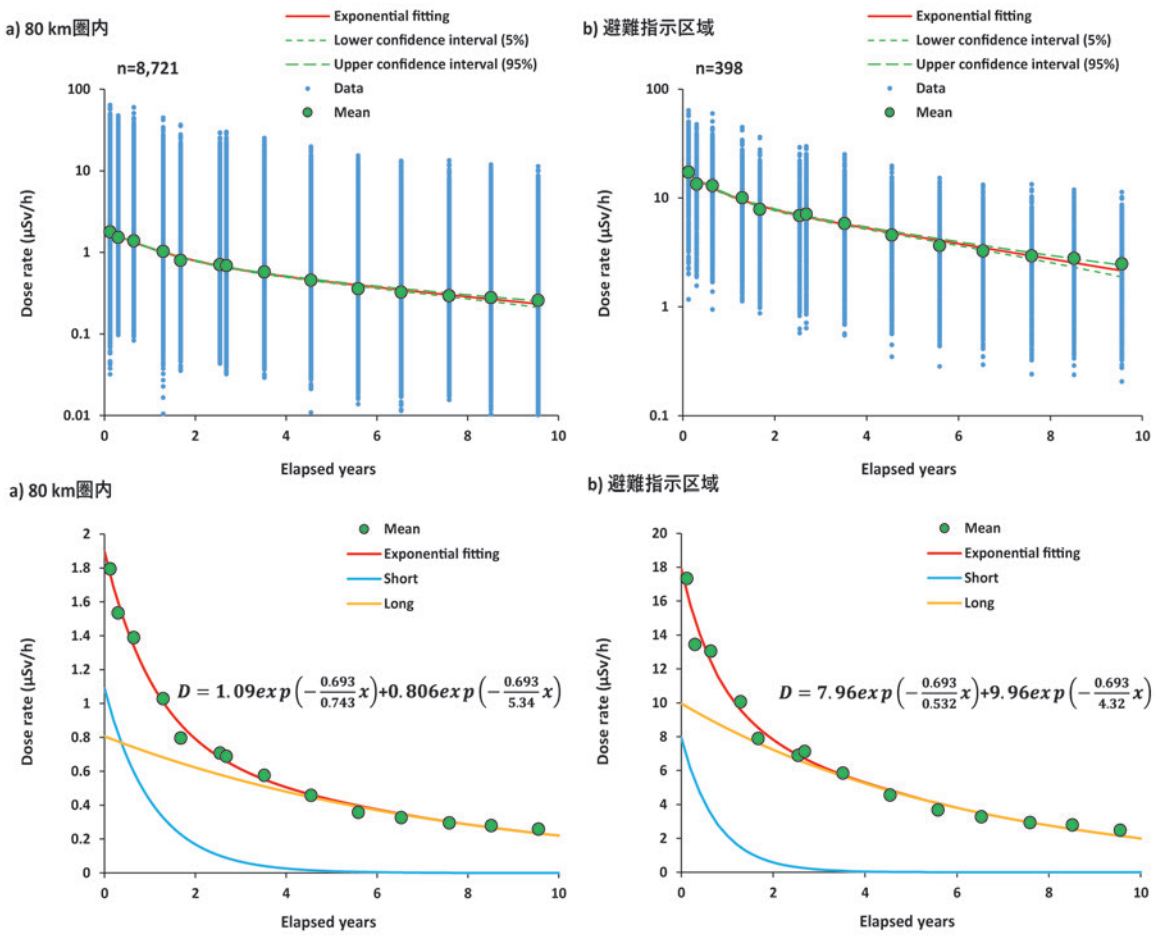


Fig. 6-5 測定値の二重指数関数近似

Table 6-1 二重指数関数近似から求めた環境半減期

	速い成分				遅い成分			
	半減期(年)	95 %信頼区間(年)			半減期(年)	95 %信頼区間(年)		
80 km圏内	0.74	0.60	～	0.89	5.3	3.6	～	6.5
旧避難指示区域	0.53	0.36	～	0.70	4.3	3.6	～	5.0

6.3. 土地利用による空間線量率の変化傾向の違い

福島原子力発電所周辺における土地利用形態による空間線量率の減少率の違いを考察するため、国土地理院が提供している「国土数値情報土地利用細分メッシュデータ」[50] (以下、土地利用メッシュデータ) を利用した。なお、適用する土地利用メッシュデータは、第 4 次モニタリング (2011 年) から第 8 次モニタリング (2013 年) に対しては平成 21 年度公開版、第 9 次モニタリング (2014 年) から 第 10 次モニタリング (2015 年) に対しては平成 26 年度公開版、第 11 次モニタリング (2016 年) 以降に対しては平成 28 年度公開版 (2021 年 3 月現在の最新版) とした。福島原子力発電所から 80 km 圏内の土地利用メッシュデータについて、Fig. 6-6 (平成 21 年度公開版)、Fig. 6-7 (平成 26 年度公開版) および Fig. 6-8 (平成 28 年度公開版) に示す。これらの土地利用区分の内、人為的活動等により空間線量率に最も違いが現れると考えられる市街地部および福島原子力発電所周辺において大部分を占める森林部について、過去の 80 km 圏内のモニタリングを比較し、空間線量率の減少率を比較した。市街地部および森林部の定義は以下の通りである。

・森林部: 多年生植物の密生している地域とする。Fig. 6-6～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. 6-6～Fig. 6-8 の凡例中、建物用地、道路、鉄道、その他用地を指す。

空間線量率の比較は、6.1 項に示したように、測定範囲を 250 m × 250 m メッシュに区切り、同一メッシュ上における第 4 次モニタリングを基準とした空間線量率の相対減少率 ((第 15 次モニタリングの結果 - 第 4 次モニタリングの結果) / (第 4 次モニタリングの結果)) を算出し、平均値と標準偏差を求めた。なお、第 4 次モニタリングに適用した土地利用メッシュデータ (平成 21 年度公開版) とは異なる土地利用メッシュデータを適用した第 8 次モニタリング以降を比較対象とする場合には、土地利用区分が平成 21 年度から不変のデータのみを抽出し、空間線量率比およびその平均値と標準偏差の計算に用いた。比較の例として、第 4 次モニタリングと第 15 次モニタリングにおける森林部および市街地のメッシュごとの相対減少率の比較結果を Fig. 6-9 に示す。また第 4 次モニタリングを基準とした、第 5 次モニタリング以降それぞれの各土地利用区分における空間線量率比を Table 6-2、Table 6-3 および Table 6-4 に示す。なお、誤差として示したのは、空間線量率比の標準偏差 (1σ) である。第 4 次モニタリングに対する第 15 次モニタリングの空間線量率比を見ると、平均値で市街地部が約 24 %、森林部が約 26 %であることが分かった。すなわち、平均値で 2 %程度、市街地部の方が森林部より減少率が大きい。これは、市街地において行われている除染やウェザリング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、森林部よりも市街地の方が空間線量率の減少幅が大きい傾向にあることが示唆される。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、福島原子力発電所から 80 km 圏内の土地利用区分の 65 %が森林であることに起因すると考えられる。規制庁による発電所近傍の車両モニタリングや人手による空間線量率測定結果から解析した結果 [39]をみると、森林部においてはそれ以外と比較して減衰傾向

が小さく、放射性 Cs のほぼ物理的半減期に従って減衰していることが示されており、本データも矛盾しない。ただし、地上の測定結果と比較して航空機モニタリングの方が減衰率の差が小さいのは、航空機モニタリングによる空間線量率の位置分解能と地上測定の位置分解能の差に起因すると考えられる。

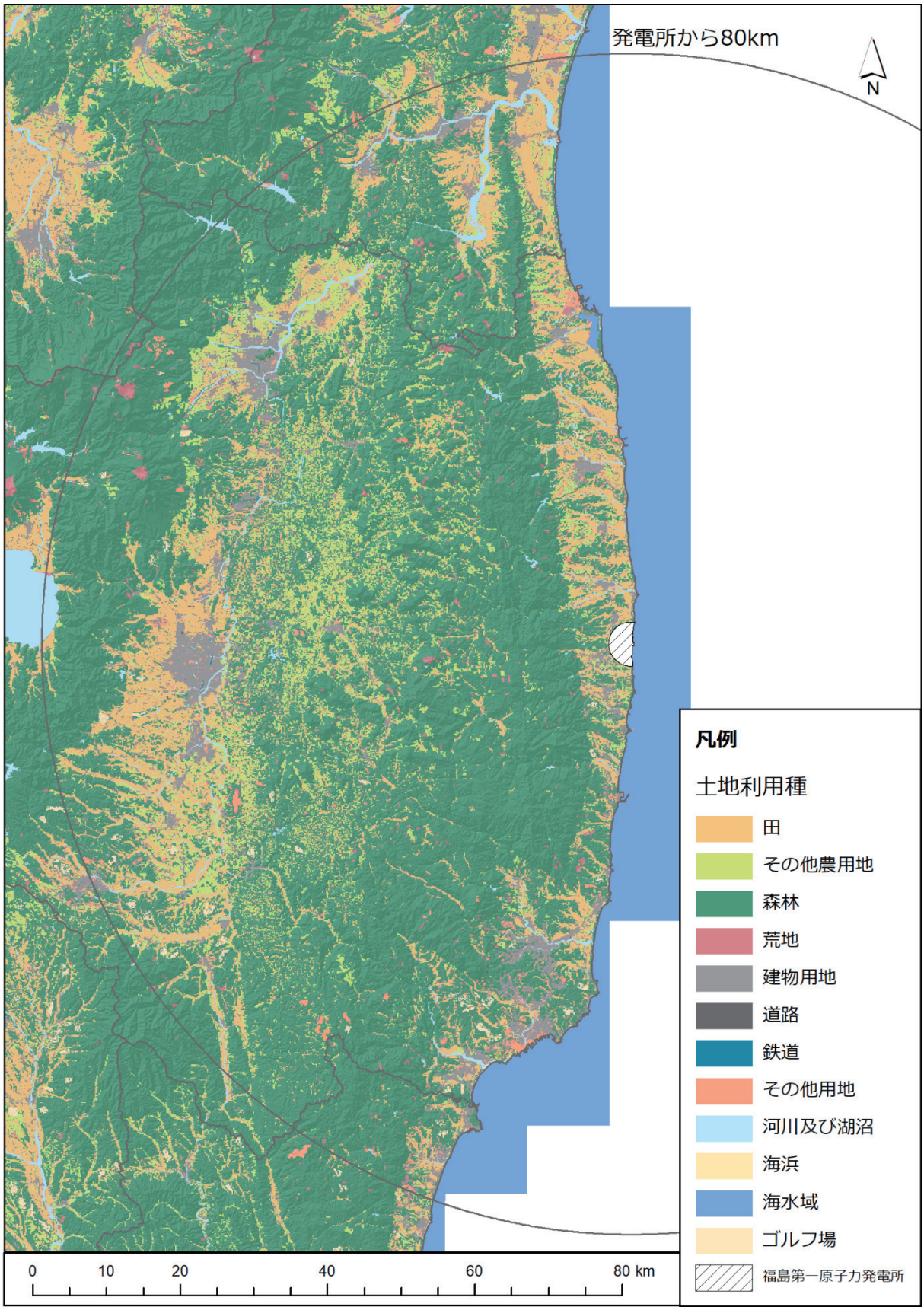


Fig. 6-6 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版　国土地理院土地利用調査データ [50]より)

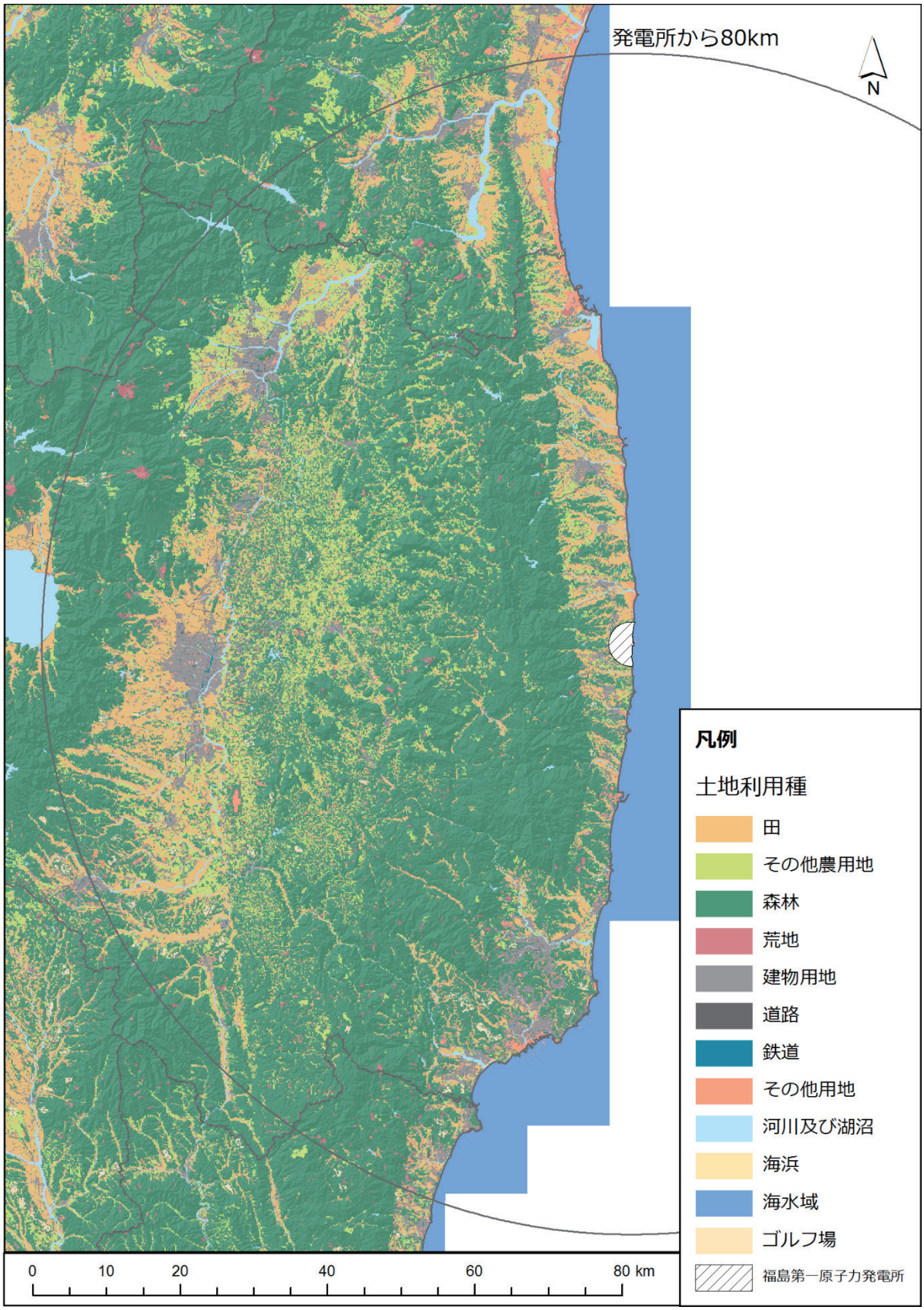


Fig. 6-7 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版　国土地理院土地利用調査データ [50] より)

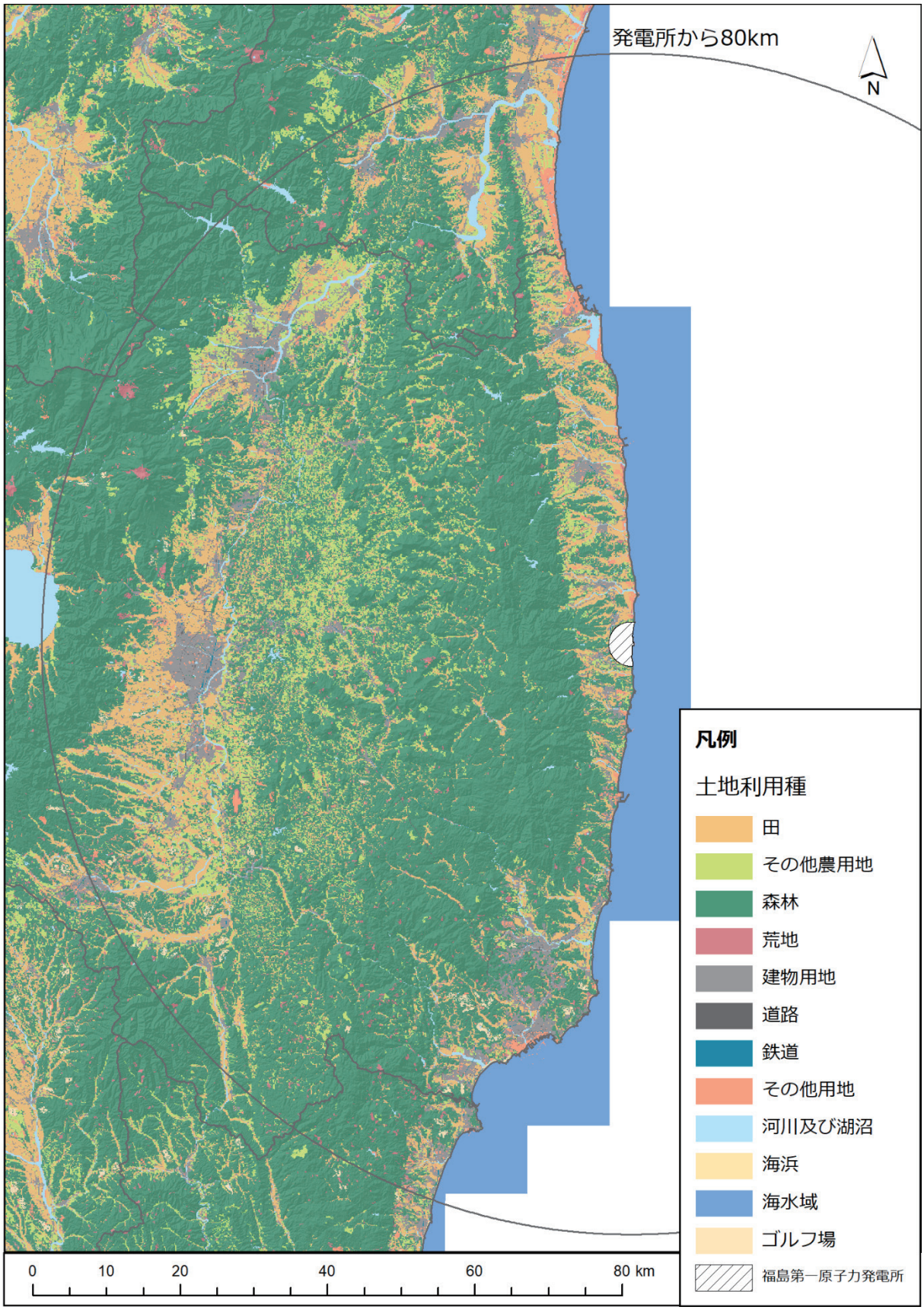


Fig. 6-8 福島原子力発電所から 80 km 圏内における国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版　国土地理院土地利用調査データ [50]より)

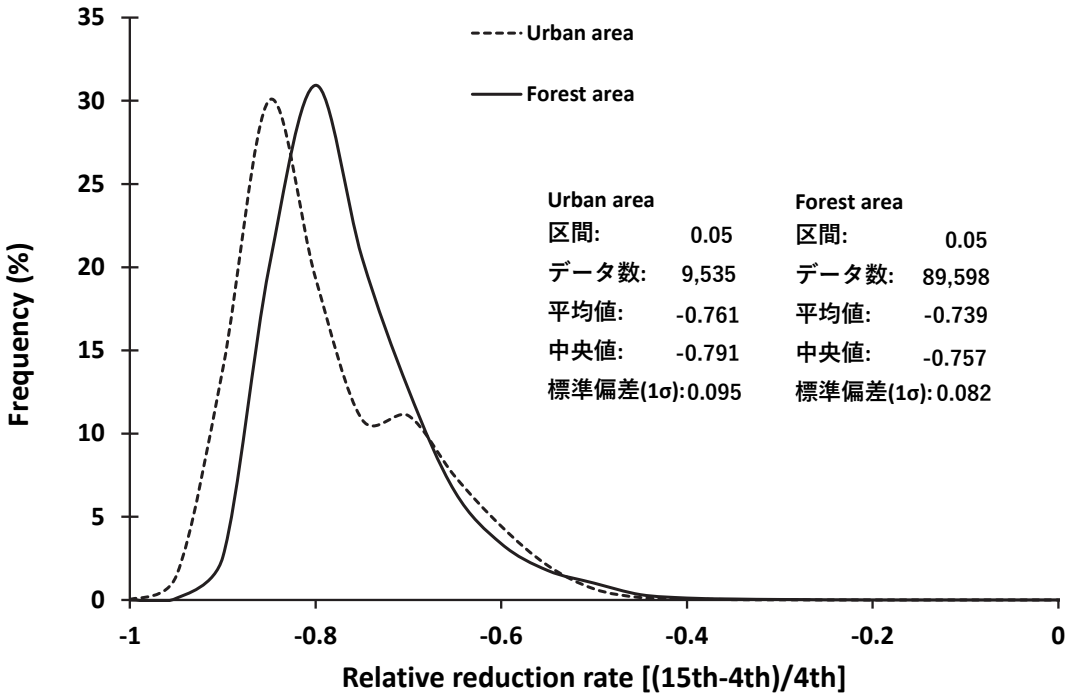


Fig. 6-9 森林部および市街地における地表面から **1 m** の高さの空間線量率の算出結果の比較
(第 **4** 次モニタリングに対する第 **15** 次モニタリングの相対減少率**)**

Table 6-2 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 21 年度公開版)[50] に基づく)

Area	Gross area (km^2)	Ratio of dose rate (%)											
		5th/4th			6th/4th			7th/4th			8th/4th		
		Ave. (%)		SD(1σ)	Ave. (%)		SD(1σ)	Ave. (%)		SD(1σ)	Ave. (%)		SD(1σ)
Urban area	732	68.9	±	11.0	53.4	±	8.7	49.6	±	8.4	43.9	±	9.7
Forest area	5,852	72.2	±	10.5	55.3	±	8.4	53.6	±	9.0	49.0	±	9.2
All areas	8,923	71.3	±	10.6	54.9	±	8.5	52.6	±	9.0	47.6	±	9.5

※Ave. : 平均値、SD: 標準偏差

Table 6-3 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 26 年度公開版)[50] に基づく)

Area	Gross area (km^2)	Ratio of dose rate (%)					
		9th/4th			10th/4th		
		Ave. (%)		SD(1σ)	Ave. (%)		SD(1σ)
Urban area	791	40.6	±	8.9	34.1	±	8.7
Forest area	5,771	44.3	±	8.6	37.8	±	8.1
All areas	8,923	43.5	±	8.7	36.9	±	8.2

※Ave. : 平均値、SD: 標準偏差

Table 6-4 森林部および市街地部における空間線量率比の比較 (国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (平成 28 年度公開版)[50] に基づく)

Area	Gross area (km^2)	Ratio of dose rate (%)														
		11th/4th			12th/4th			13th/4th			14th/4th			15th/4th		
		Ave. (%)		SD(1σ)	Ave. (%)		SD(1σ)	Ave. (%)		SD(1σ)	Ave. (%)		SD(1σ)	Ave. (%)		SD(1σ)
Urban area	836	27.1	±	6.7	27.0	±	8.2	26.3	±	10.1	24.4	±	8.3	23.9	±	9.5
Forest area	5,843	30.2	±	6.4	28.7	±	7.4	27.6	±	7.7	26.4	±	8.2	26.1	±	8.2
All areas	8,923	29.5	±	6.5	28.3	±	7.5	27.2	±	8.0	26.0	±	7.8	25.5	±	8.5

※Ave. : 平均値、SD: 標準偏差

7. 地形の起伏による影響と補正方法

7.1. 背景

日本の国土に対して、山地および丘陵地は約 7 割を占めている。我が国における原子力発電所の立地周辺地域にも、このような山地および丘陵地が多く存在する。航空機モニタリングにおいては、測定される γ 線計数率に対して高度補正係数や空間線量率換算係数による補正を施して、地表面から 1 m の高さの空間線量率の計算を行っている。これは測定対象となる地表面が平坦であると仮定した単純な補正方法であり、このような仮定に基づいて計算を行った場合、実際に地上で測定される空間線量率と航空機モニタリングにより算出される空間線量率とに乖離が生じる可能性がある。実際にどの程度の差異が生じるのかについて定量的な評価を行うために、モンテカルロシミュレーションによって地形の起伏まで考慮した解析を行った。その解析結果を基に、起伏のある地形上で測定された計数率をより正確に空間線量率に換算する方法を検討し、過去の航空機モニタリング測定データに適用した。その結果と地上測定結果を比較し、新しい手法による空間線量率計算値の精度向上効果を評価した。

7.2. 地形の起伏による測定への影響

航空機モニタリングにおいて測定された γ 線計数率は式 [2] で示したとおり、空間線量率換算係数 (CD) で除することによって空間線量率へ変換される。CD は平坦な地形上における地表面から 1 m の高さの空間線量率 D_{FLT} とその上空 300 m において測定された γ 線計数率 C_{FLT} との比で定義されている。平坦な地形上では、この比は一定とみなせるが、起伏のある地形の場合、この比率が地形の起伏度に応じて変化する。平坦な地形上における空間線量率換算係数 CD は、以下のように示される。

$$\boldsymbol{CD = D_{FLT}/C_{FLT}} \qquad [14]$$

一方、起伏のある地形上の空間線量率換算係数 CD_t は、以下のように示される。

$$\boldsymbol{CD_t = D_t/C_t} \qquad [15]$$

ここで、D_t と C_t はそれぞれ、起伏のある地形上における、地表面から 1 m の高さの空間線量率とその上空 300 m において測定される γ 線計数率である。表面汚染密度が均一な場合、D_{FLT} と D_t は同程度とみなせるため、式 [14] および式 [15] から、地形の起伏の有無による CD の変化は以下のように計数率の比として示すことができる。

$$\boldsymbol{\frac{CD_t}{CD} = \frac{C_{FLT}}{C_t}} \qquad [16]$$

そこで、地形の起伏により、式 [16] に示した比がどの程度変化するかを評価するため、福島

原子力発電所を中心とする半径 80 km 圏内において、Fig. 7-1 に示すように、無作為に 480 点の評価点を設定し、各評価点における C_t を計算した。評価点の高度は、航空機モニタリングにおける基準高度である対地高度 300 m とした。計算には粒子輸送コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)[51)]を用いた。PHITS による計算において、設定する線源形状は Fig. 7-2 のように設定した。まず、数値標高モデル (DEM)[35)]マップから、評価点直下から半径 800 m の領域を選択し、標高を三角ポリゴンモデルに変換する。三角ポリゴンそれぞれを個々の平面線源とみなし、各三角形線源の強度は三角形面積を重みとした加重平均値とした。Cs-137 について、以上に示した計算から得られた計数率比の頻度分布を Fig. 7-3 に示す。Fig. 7-3 の結果から、計数率比が 1 以下のものが多数を占めていることがわかる。つまり、地形を平坦とみなした場合、空間線量率が高く評価される傾向にあることが示唆される。なお、計数率比は最小で 0.41、最大で 2.08 であった。

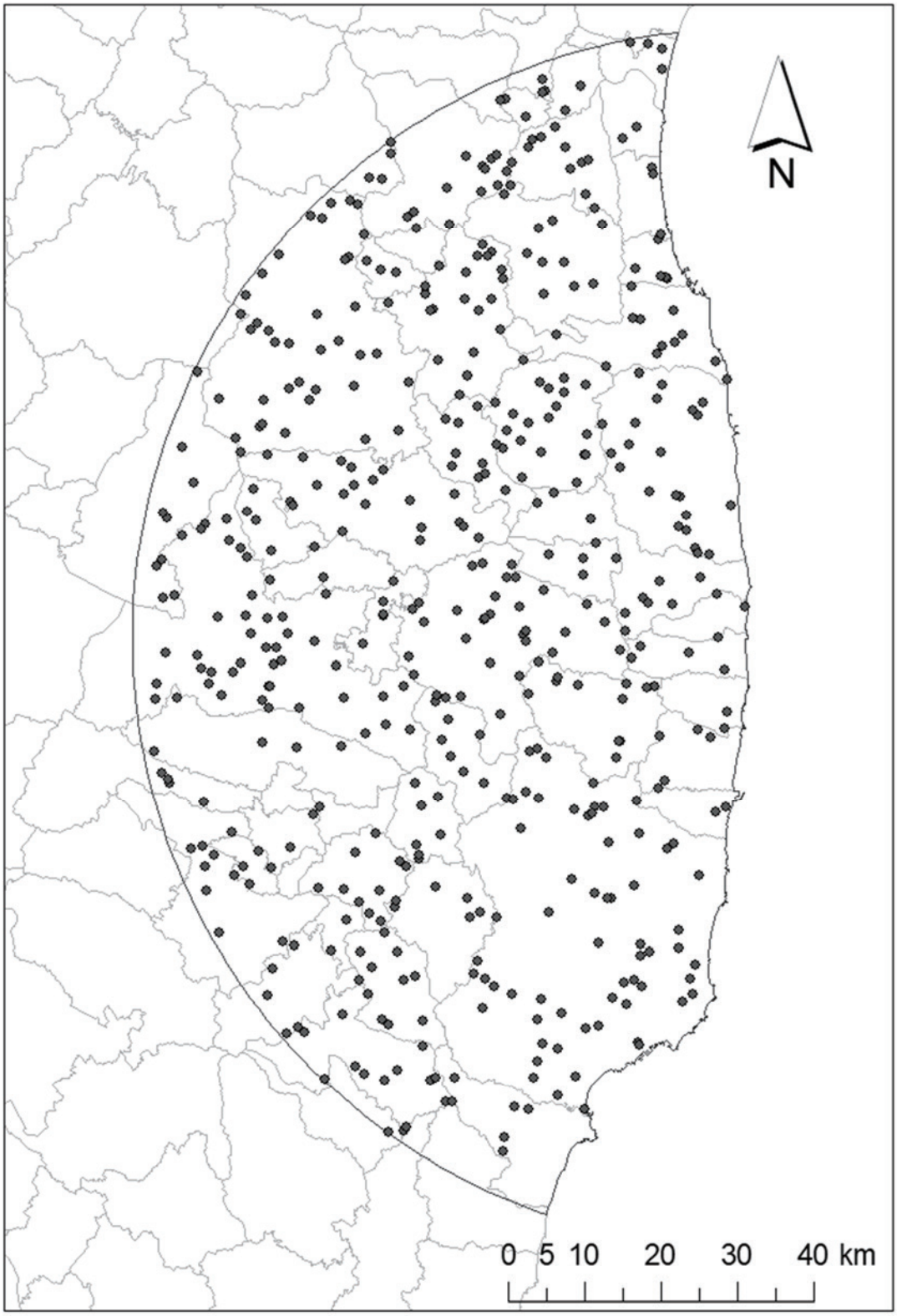


Fig. 7-1 無作為に抽出した評価点の位置
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

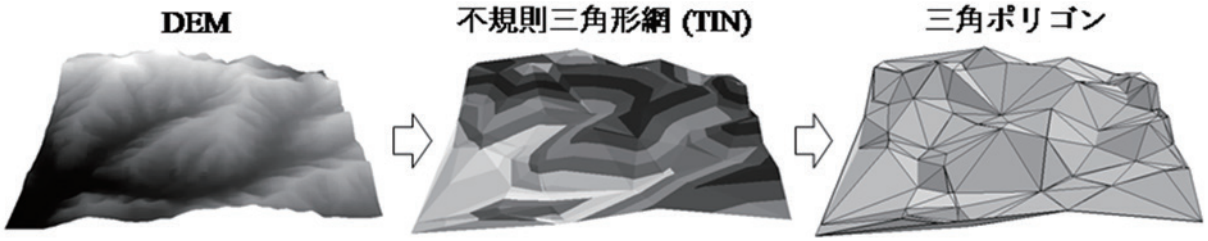


Fig. 7-2 数値標高マップから三角ポリゴンへの変換例

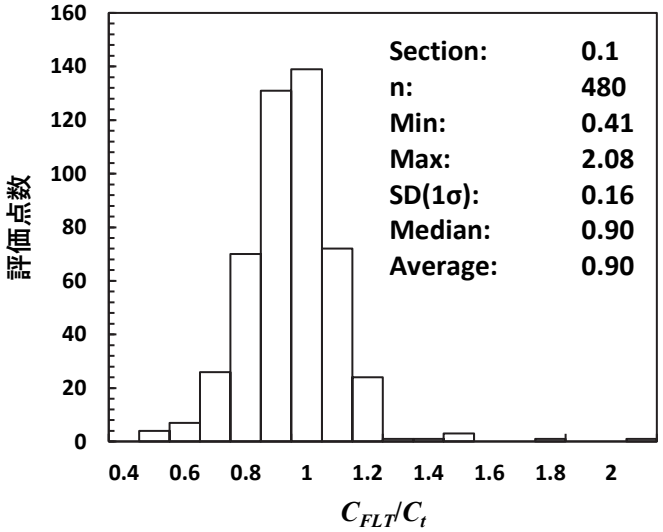


Fig. 7-3 平坦な地形と起伏のある地形における対地高度 300 m での計数率比の頻度分布

7.3. 地形の起伏による影響の補正

平坦な地形に対して、基準高度 H_{std} (300 m) で飛行しながら測定した場合、4.1 項で触れたとおり、測定点直下の概ね半径 300 m の範囲内における γ 線計数率を測定していることになる。つまり、RSI システムから直線距離で約 425 m の範囲内で見込める領域 (S_{FLT}) から飛来する γ 線が測定できていることになる。

一方、地形の起伏がある場合、基準高度 H_{std} (300 m) において測定している場合でも、Fig. 7-4 に示すように、周囲の標高の違いにより、測定範囲内の平均標高 (E_{mean}) は変化する。例えば、平均標高が測定点直下標高 (E) よりも高い場合、線源と RSI システムの平均距離はより近くなる。さらに、RSI システムから直線距離 425 m で見込める面積 (S) が大きくなるとともに、起伏によって線源表面積が増加し、γ 線計数率 (C) も大きくなる。以上のことから以下の式 [17] を用いて平坦な地形における CD に対して、地形の起伏を考慮に入れた補正を適用して、空間線量率 D の計算値に及ぼす影響を解析することを検討した。

$$D = C \Big/ \left\{ CD \cdot \frac{exp(-AF \cdot H_m{}')}{exp(-AF \cdot H_{std})} \cdot \frac{S_{FLT}}{S} \right\} \qquad [17]$$

ここで、H_m'は測定時の対地高度 H_m から以下のように求められる。

$$\boldsymbol{H_m{}' = H_m - (E_{mean} - E)} \qquad [18]$$

以上の手法を用いて、第 15 次モニタリングの解析を行い、規制庁と原子力機構が行っている、福島県内における NaI(Tl)検出器 (日立製作所製 TCS-172B) を用いた地上測定値 [39]との比較を行った。なお、本比較には福島原子力発電所から半径 80 km 圏内に位置する地上測定値のみ (4,841 点) を用いた。本手法を適用する前後の第 15 次モニタリングの空間線量率マップ比較結果を Fig. 7-5 に示す。従来の解析方法を用いた場合と比較して、全体的に空間線量率が低くなる傾向が見られた。地上測定値との比較評価には、地上測定により得られた空間線量率 (D_{GND}) に対する D_{GND} と航空機モニタリングにより得られた空間線量率 (D_{ARM}) の差の比 (相対誤差: (D_{ARM} - D_{GND}) / D_{GND}) の頻度分布を用いた。本手法を適用する前後の第 15 次モニタリングにおける相対誤差の頻度分布を Fig. 7-6 に示す。相対誤差の標準偏差を比較すると、従来手法では 0.57、地形の起伏を考慮した場合は 0.54 とほぼ同値であったが、平均値は 0.40 から 0.27 に、中央値は 0.28 から 0.15 となり、より地上測定値に近づいたと言える。今後、本解析手法の更なる改良を目指し、式[17]で示した CD の補正方法について、特に S および S_{FLT} のより適切な設定方法に着目した検討を加える予定である。

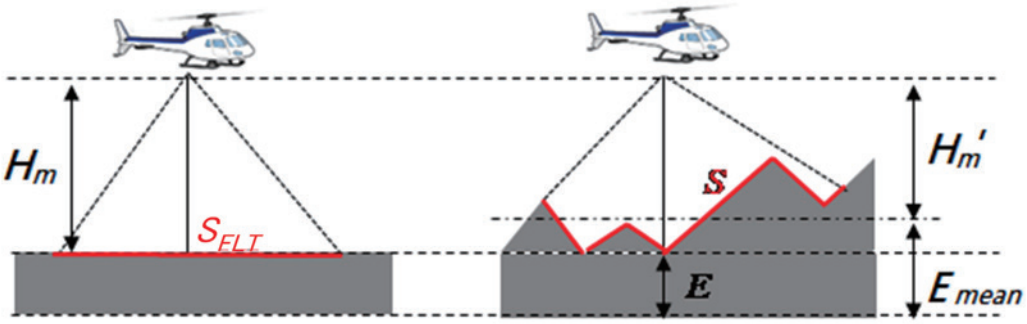


Fig. 7-4 地形の起伏による影響を補正する場合に考慮すべき点

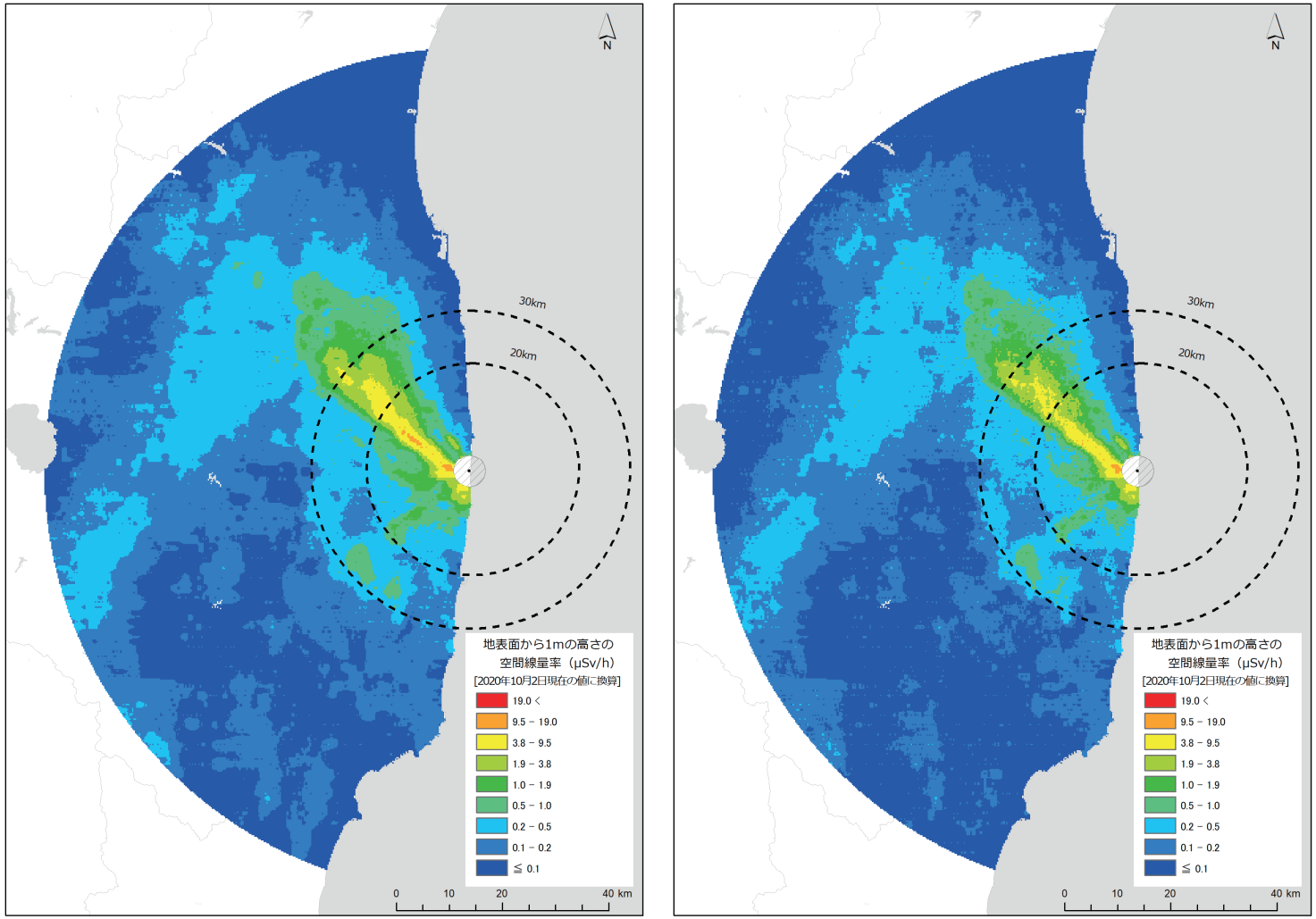


Fig. 7-5 第 15 次モニタリングの空間線量率マップの比較

(左：従来の解析手法を用いた場合、右：地形補正手法を用いた場合)

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

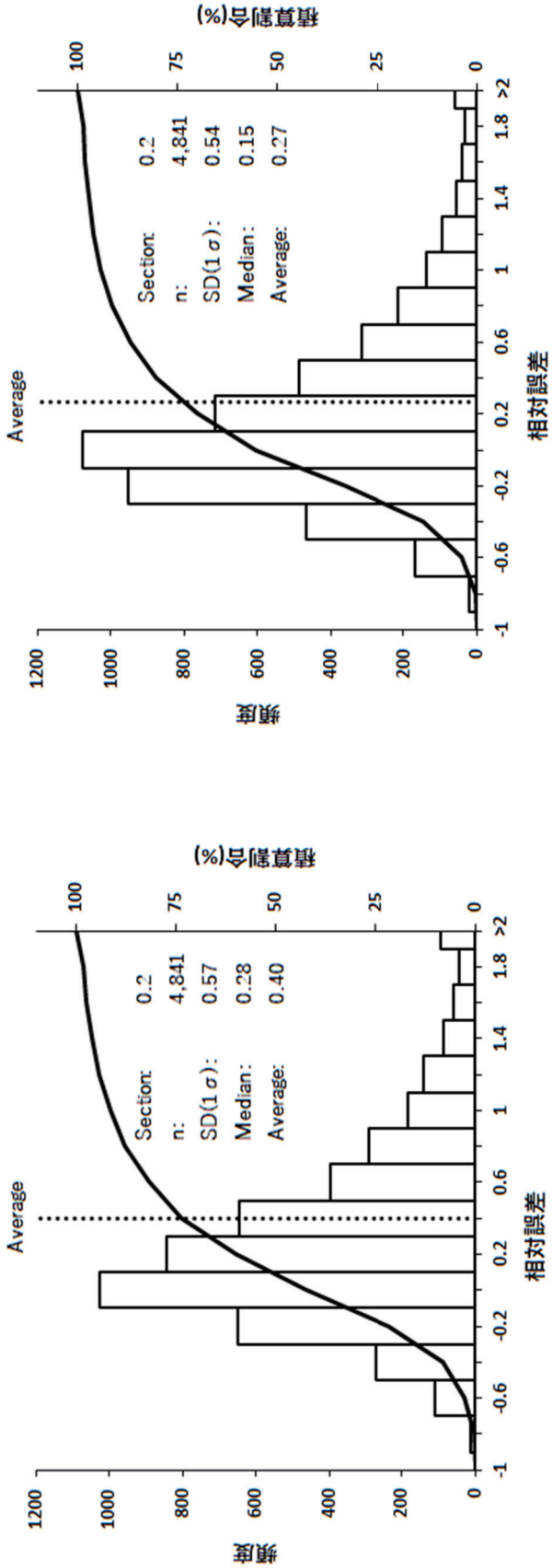


Fig. 7-6 第 15 次モニタリング結果と地上測定値との比較
(左：従来の解析手法を用いた場合、右：地形補正手法を用いた場合)

8. ラドン弁別手法を適用した空間線量率マップの作成

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壊変系列には、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壊変系列であるウラン系列とトリウム系列について示す。大気中に散逸したラドンは、Po、Pb および Bi などのラドン子孫核種に壊変し、大気中の微粒子に吸着して大気中を浮遊する。航空機モニタリングによる測定高度である対地 300 m 付近において、ラドン子孫核種濃度が測定された例がほとんどないものの、地上におけるラドン濃度は広く測定されており、日本の屋外における濃度レベルは 6 Bq/m^3 程度となっている [52]。これらのラドンの濃度レベルは比較的低いものの、航空機モニタリングでは、地上における測定状況と比べた場合に、測定対象となる地表面と検出器との距離が遠くなるために、全計数率中に含まれるラドン子孫核種の計数率は相対的に大きくなると考えられる。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の測定データに及ぼす影響も常に一定とは限らないと推察される [53]。

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困難である。また、放射性 Cs の放出するエネルギーに似ているため、現在用いている航空機モニタリングシステムのNaI(Tl)検出器では、福島原子力発電所事故の影響を受けた地域近傍において、なおさら弁別が困難となる。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空間線量率への換算を高精度化する検討を 2015 年度に実施した [19]。2016 年度は、開発した手法を大量のデータに適用できるように既存の航空機モニタリング解析システムに組み込んだ [20]。2017年度は本手法を測定結果に適用し、その妥当性を検証した [22]。本手法の更なる高精度化に資するために、8.2 節にて詳述するパラメータ等のデータ蓄積を行う必要があると考え、本年度もラドン子孫核種による影響を除去した空間線量率マップの作成を行い、その妥当性を検証した。以下、大気中のラドン子孫核種の影響の除去手法を「ラドン弁別手法」と表記する。

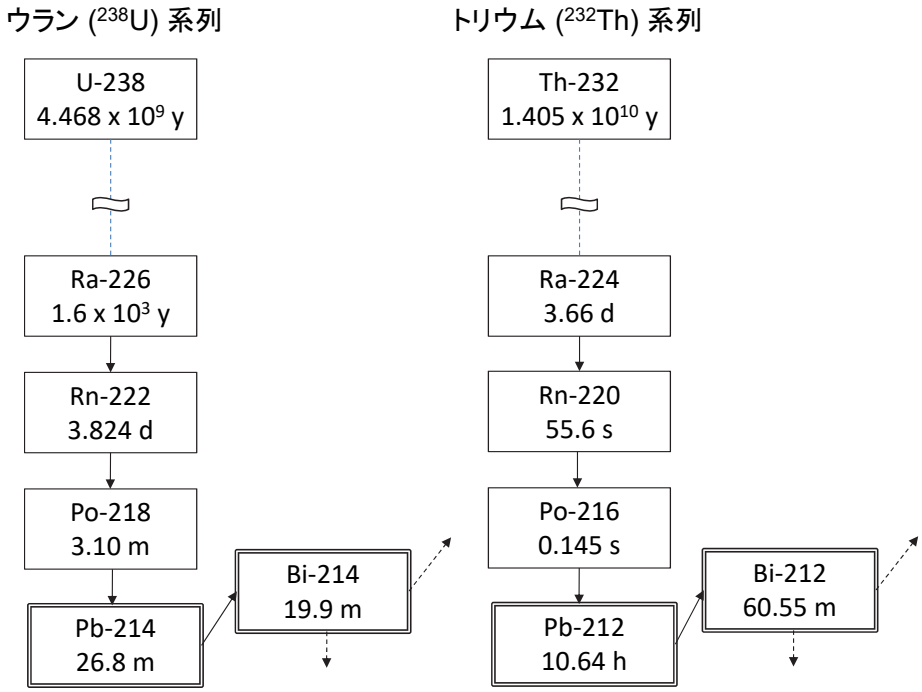


Fig. 8-1 ウラン系列およびトリウム系列

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. ラドン弁別手法の理論

前述したように、ラドン子孫核種は大気中だけでなく、地表面および地殻にも存在することから、γ 線のエネルギーによって大気中のラドン子孫核種の影響と地上のラドン子孫核種の影響を弁別することは難しい。また、Cs-134 と Bi-214 は放出する γ 線エネルギーが似通っているため、航空機モニタリングで用いている NaI(Tl)検出器では、福島原子力発電所事故の影響を受けた地域において弁別はさらに困難となる。航空機モニタリングにおけるラドン子孫核種の影響を弁別す

る方法として、航空機モニタリング用の検出器以外にラドン子孫核種測定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弁別する方法が知られている[41)]。

今回、ラドン子孫核種の影響を弁別する手法を検討するため、RSI 社製 $LaBr_3$ シンチレータ (3′′ × 3′′) を用いた航空機モニタリング機器 (以下、LaBr RSI システム) を採用し、フライトデータの取得および換算パラメータの算出を行った。LaBr RSI システムをヘリコプター内に搭載した状況について Fig. 8-2 に示す。写真のように、地上からの放射線を遮蔽することを目的とし、通常用いている NaI シンチレーション検出器 (以下、NaI RSI システム) の上方に配置した。

手法としては、空気中のラドン子孫核種からの放射線と地表面からの放射線の距離の差に着目する。Fig. 8-3 にヘリコプター内の検出器と線源の位置関係のイメージについて示す。このように、大気中のラドン子孫核種と検出器の距離は地上の放射性核種からの γ 線と比べて近いため、空気中ラドン子孫核種由来の γ 線はヘリコプター内の検出器で検出されやすいと考えられる。また、空気中ラドン子孫核種由来の γ 線は検出器に等方向より放射されることから、LaBr RSI システムの下方に置いた NaI RSI システムの遮蔽としての影響は比較的小さい。一方、地上から LaBr RSI システムに到達する γ 線は、下方からの照射となるため NaI RSI システムに比較的遮蔽されやすいと考えられる。すなわち、大気中のラドン子孫核種を計測した NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比 (LaBr RSI システム / NaI RSI システム) は地上の放射性核種起源の計数率に対する比よりも大きくなると考えられる。

実際には、地上からの γ 線による影響のないと考えられる海上で取得したデータにおける NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比をラドンインデックス (*RI*) と定義する。一方、ラドン子孫核種の影響が無視できるほど、地上における放射性核種からの γ 線による影響が大きなエリアで取得したデータにおける NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比をグラウンドインデックス (*GI*) と定義する。これら 2 つの定数を利用してラドン子孫核種の影響を弁別する。本手法は NaI RSI システムにおける全計数率および LaBr RSI システムにおける全計数率が式 [19] および式 [20] で表すことができるという仮定に基づいている。また、先述した *GI* および *RI* は式 [21] および式 [22] で表される。式 [19]～[22] を NaI RSI システムにおける地上の放射性核種由来の計数率 ($C_{NaI,g}$) について解くと、式 [23] が導かれる。

$$\boldsymbol{C_{NaI,all} = C_{NaI,g} + C_{NaI,a}} \qquad [19]$$

$$\boldsymbol{C_{LaBr,all} = C_{LaBr,g} + C_{LaBr,a}} \qquad [20]$$

$$\boldsymbol{GI = \frac{C_{NaI,g}}{C_{LaBr,g}}} \qquad [21]$$

$$\boldsymbol{RI = \frac{C_{NaI,a}}{C_{LaBr,a}}} \qquad [22]$$

$$C_{NaI,g} = \frac{GI(C_{NaI,all} - RI \cdot C_{LaBr,all})}{GI - RI} \quad [23]$$

ここで、

$C_{NaI,all}$: NaI RSI システムの 30 keV~2800 keV における全計数率

$C_{NaI,g}$: NaI RSI システムの 30 keV~2800 keV における地上の放射性核種由来の計数率

$C_{NaI,a}$: NaI RSI システムの 30 keV~2800 keV における空中の放射性核種由来の計数率

$C_{LaBr,all}$: LaBr RSI システムの 50 keV~700 keV における全計数率

$C_{LaBr,g}$: LaBr RSI システムの 50 keV~700 keV における地上の放射性核種由来の計数率

$C_{LaBr,a}$: LaBr RSI システムの 50 keV~700 keV における空中の放射性核種由来の計数率

GI (グラウンドインデックス): 地上で取得したデータにおける NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比

RI (ラドンインデックス): 海上で取得したデータにおける NaI RSI システムの計数率に対する LaBr RSI システムの計数率の比

である。

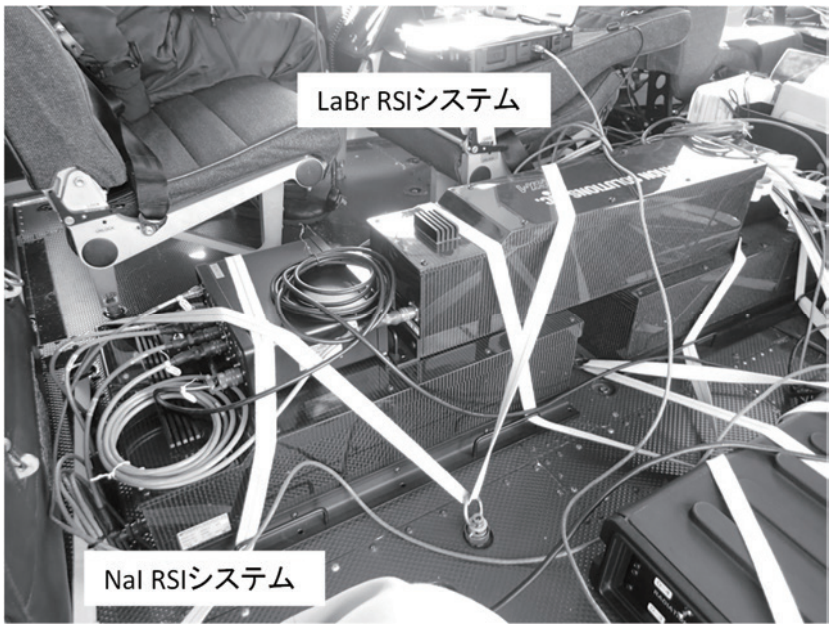


Fig. 8-2 ラドン用航空機モニタリング機器とヘリコプターへの搭載状況

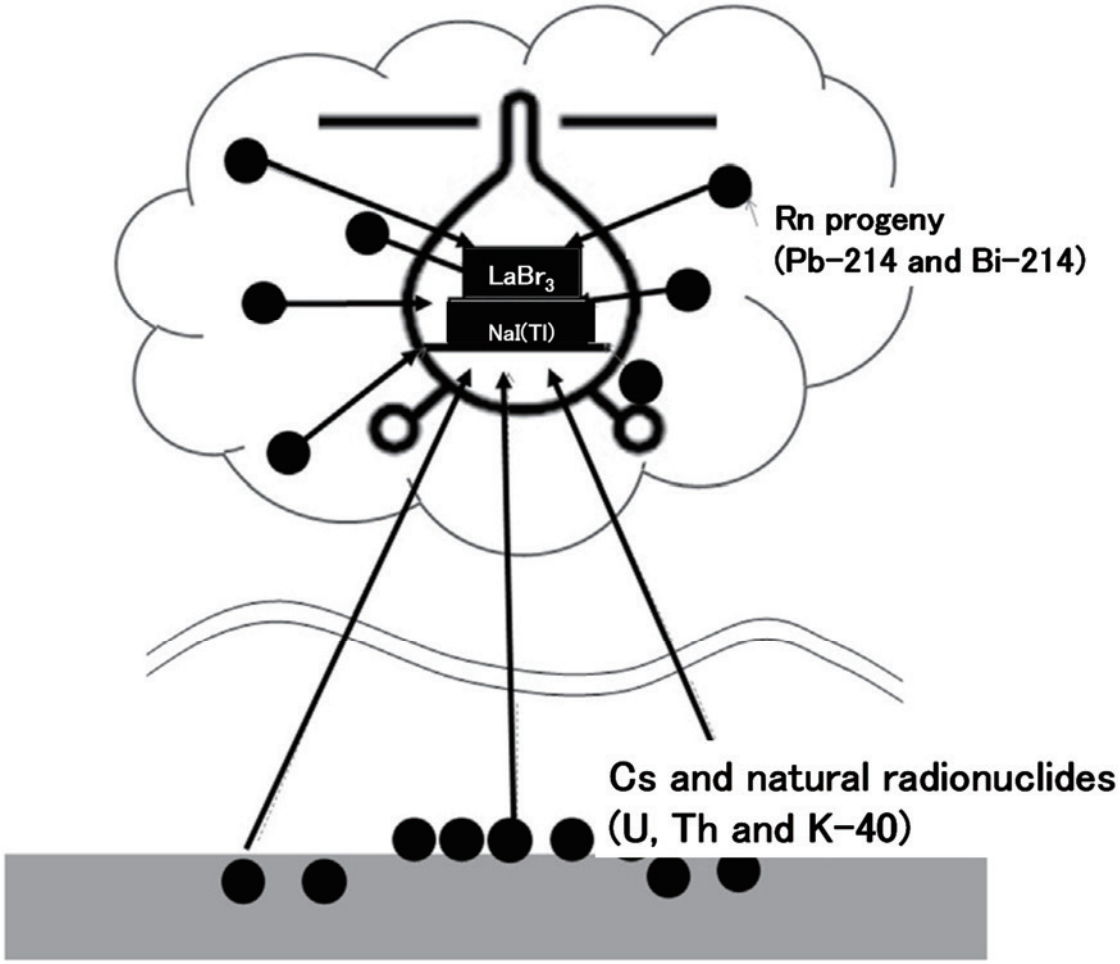


Fig. 8-3 空気中のラドン子孫核種と地上からの放射線のイメージ

8.3. パラメータ (*GI* および *RI*) の決定

式 [23] に記載したように、ラドン弁別法の信頼性は *GI* と *RI* の設定精度に依存する。*GI* と *RI* については、ヘリコプターの遮蔽によって変化するため、東日本第 11 次モニタリングで使用したヘリコプター機種ごとに実測データから数値を決定した。測定データは 40 秒ごとに取得した計数率を積算した。積算したデータから宇宙線および自己汚染の寄与分を差し引き、*GI* の算出に使用した。また、GPS データ (緯度、経度および飛行高度) については 40 秒間で取得したデータの平均値を使用した。東日本第 11 次モニタリングで取得した地上高さ 300 m 位置 (実際のフライトの対地高度が 290 m～320 m のデータ) における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係を Fig. 8-4 に示す。なお、東日本第 11 次モニタリングでは、Bell 412 (JA6928 および JA6767) および Bell 430 (JA05TV) を使用した。これらのデータにはラドン子孫核種の影響が含まれているが、完全にラドン子孫核種の影響のない環境でのデータ取得は困難であることから、*GI* の数値は不確かさが比較的大きいと推察される。一方、*RI* については、海上の 300 m 位置 (実際のフライトの対地高度が 150 m～450 m のデータ) で取得したデータを抽出し、*GI* と同様にバックグラウンドの減算を行った。ヘリコプターにおける NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係を Fig. 8-5 に示す。本散布図の回帰直線の傾きを *RI* とする。

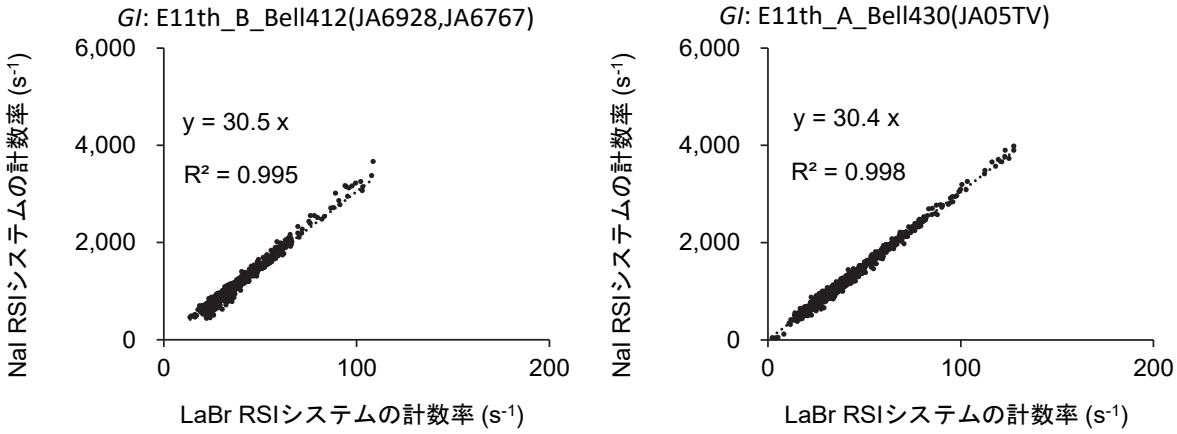


Fig. 8-4 陸上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係 (1 次回帰直線の傾きを *GI* と定義)

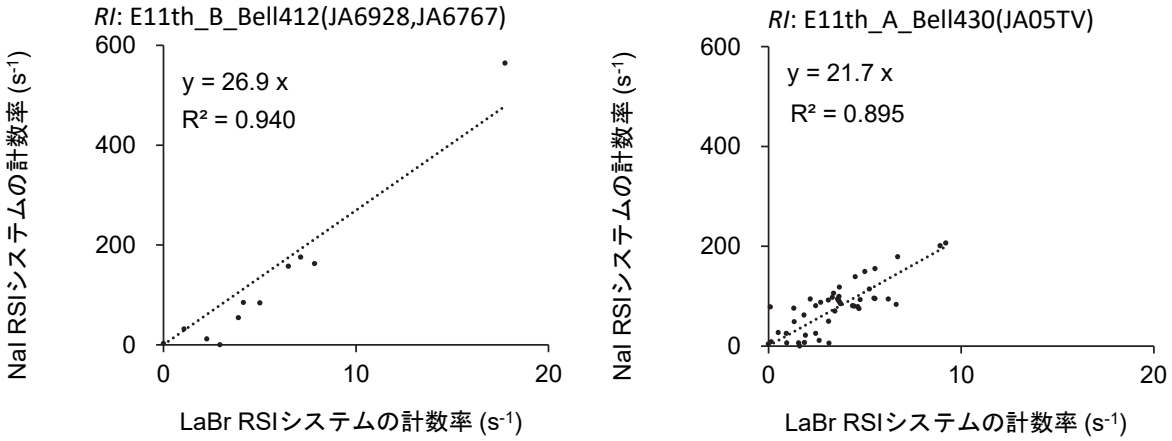


Fig. 8-5 海上における NaI RSI システムの計数率と LaBr RSI システムの計数率の関係
(1 次回帰直線の傾きを *RI* と定義)

8.4. *GI* の高度補正方法

GI については、2015 年度に実施した予備的な調査により、対地高度に依存して数値が変化することが分かっている。しかしながら、実測のデータではラドン子孫核種の寄与がないデータを取得することは不可能であるため、計算シミュレーションにより実際の測定体系を模擬し、*GI* の高度補正手法について検討した。

シミュレーションに用いた計算コードは、モンテカルロ計算コードの一種である電磁カスケードモンテカルロコード EGS5[34]とし、ヘリコプター内の検出器の体系を簡易的に Fig. 8-6 のように模擬した。計算体系の妥当性については、正面および横の周辺からの点線源を模擬した場合の検出器のレスポンスを計算した結果と、実際に有人のヘリコプターに検出器 (NaI RSI システム) を搭載した状態で、点線源 (Cs-137) を照射することによって求めた検出器のレスポンスの結果を比較してベンチマークとした。Fig. 8-7 に示すように、検出器レスポンスの方向特性についての計算結果と実測結果の比は概ね一致している。一部値が外れている部分は、計算体系に考慮されていないヘリコプターの構造物等が影響していると考えられるが、全体として構築した体系は、検出器のレスポンスを再現するのに十分な精度を有する。本体系に対し、地上の無限平板線源を模擬し、距離を変化させることにより *GI* の測定高度との関係を計算した。なお、実際の計算では NaI RSI システムと LaBr RSI システムを別で実施した。LaBr RSI システムの計算時には、下部の NaI RSI システムを体系に加えた。線源の模擬体系は、以下の条件を設定した。土壌中の天然放射性核種濃度は、全国的な地上における測定結果から平均値を採用した [54]。

・空気 (1 km × 1 km × 1.3 km) と土壌 (深さ 1 m、 密度 ρ: 1.6 g cm^{-3})
・山等の地面の凹凸を再現せずに地面は平坦とする。
・地面中の自然放射性核種 (U 系列、Th 系列、K-40) は水平方向および深さ方向に一様分布する。
・地面中の人工放射性核種 (Cs-134 と Cs-137) は表層から深さ方向に指数関数的な分布 (緩衝深度 β = 3 g/cm^2) をする。
・土壌中の放射性核種濃度はそれぞれ、K-40: 500 Bq/kg、U 系列: 20 Bq/kg、Th 系列: 10 Bq/kg、Cs-134: 50 kBq/m^2、Cs-137: 200 kBq/m^2 とする。

検出器と線源の距離 (測定高度) と *GI* の計算結果を Fig. 8-8 に示す。このように測定高度と *GI* は正の相関関係にある。この結果における回帰直線の傾きを採用し、式 [24] に基づいて各測定高度で取得したデータに対して高度補正を施した *GI* を用いた。

$$\boldsymbol{GI_{corr} = 0.0333 \times (H_a - H_{sd}) + GI} \qquad [24]$$

ここで、GI_{corr} は高度補正後の *GI*、H_a は測定時における対地高度 (m)、H_{sd} は基準高度 (300 m)、*GI* は高度補正前の *GI* である。

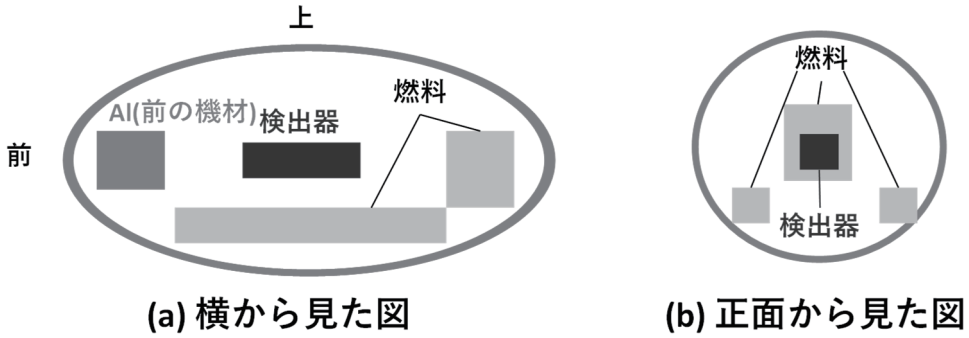


Fig. 8-6 計算体系のイメージ

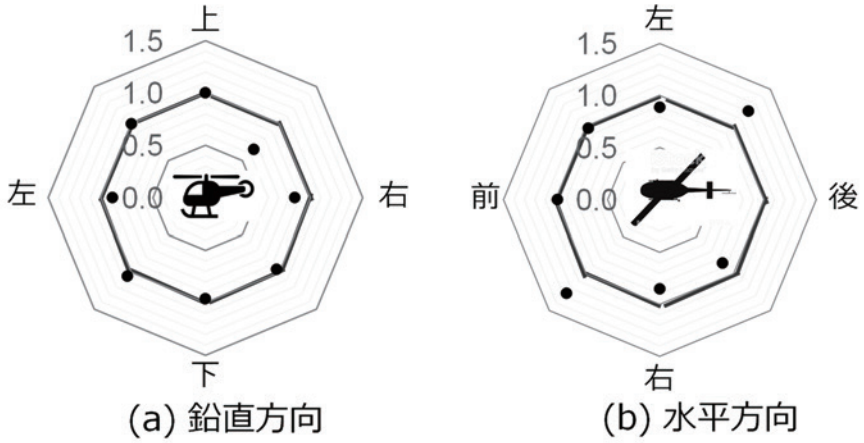


Fig. 8-7 計算体系のベンチマーク
(計算結果と実測結果の比)

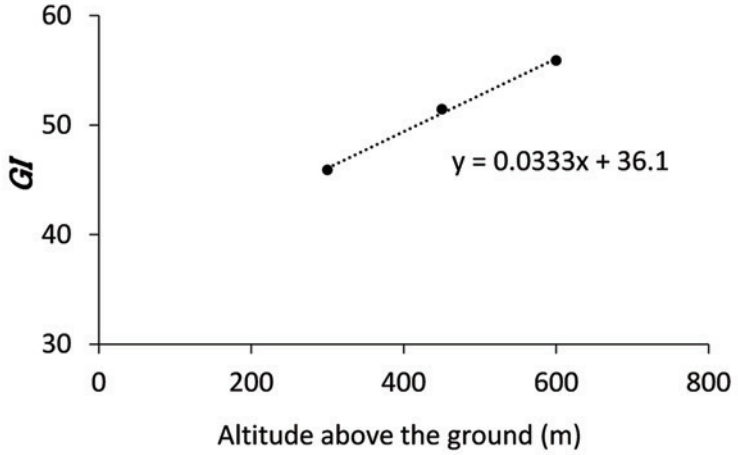


Fig. 8-8 シミュレーションによる測定高度と ***GI*** の関係

8.5. 80 km 圏外データへの適用

ラドン弁別手法を今年度の測定結果に適用した。本手法は、大気中のラドン子孫核種の計数率と地上からの計数率が拮抗している場所に効果的であり、放射性 Cs の影響が大きな地域では大

気中のラドン子孫核種の影響は無視できる。本手法の適用および評価は福島原子力発電所から 80 km 以遠のデータ (東日本第 11 次モニタリング) のみを対象とした。本手法は *GI* の数値に依存すると考えられるため、Fig. 8-4 に示したヘリコプターごとの高度補正を行う前の *GI* の数値 (*GI* = ±0 と表記) を 1 および 2 減算した場合についても解析した (それぞれ *GI* = -1 および *GI* = -2 と表記)。解析の結果は、地上測定値 300 点と比較し、その妥当性を検証した。なお、4 章で示した従来の空間線量率換算手法においては、これまでの経験から Table 4-1 で示すように、測定日ごとに BG フライトとして対地高度約 900 m に機体を保ち約 2 分のフライトを継続し、得られたデータをバックグラウンドとして差し引いている。当該フライトで得られる計数率にはラドン子孫核種由来の計数率も含まれていると考えられ、ある程度ラドン子孫核種の影響が差し引かれていると思われる。本手法の検証には、BG フライトで取得したバックグラウンドを減算せずにラドン弁別手法を適用する。よって、Fig. 8-9 および Fig. 8-10 に示す「ラドン弁別なし」の空間線量率マップは Fig. 5-5 で示したマップとは異なる。BG フライトから求めたバックグラウンド減算によるラドン子孫核種の弁別効果については 8.6 節で評価する。

Fig. 8-9 にラドン弁別手法を適用した東日本第 11 次モニタリングの空間線量率マップを示す。比較としてラドン弁別手法を適用しない解析結果についても示している。傾向としては、*GI* の数値が大きいほど空間線量率は低くなる傾向があることが分かる。さらに、ラドン子孫核種の影響の高い地域について考察するために、ラドン弁別手法で減算した NaI RSI システムの計数率を抽出し、計数率マップを作成した。また、本マップは測定の時間が場所により異なるので、瞬間的に検出した空気中のラドン子孫核種の影響が時間的につぎはぎ状でマップとして表現されている。Fig. 8-10 に東日本第 11 次モニタリングの測定結果から計算した空気中のラドン子孫核種由来の計数率のマップを示す。このように、ラドン子孫核種の検出されたエリアは、越後山脈から関東山地に向けての比較的標高の高いエリアであることが分かる。一方、標高の低い関東平野ではほとんど検出されていない。ラドン子孫核種の起源としては中国大陸からの大気輸送と測定地近傍における地殻からの放出が考えられ、前者の影響は特に日本海側の冬季に大きくなる傾向にある [55]。一方、福島原子力発電所周辺の航空機モニタリング測定時期は 8 月下旬～11 月上旬であることから、大陸からの大気輸送による影響は小さいと考えられ、また後者由来のものは濃度の時間変化は小さいと考えられる。ラドン子孫核種が検出された標高の高いエリアは花崗岩が分布しているエリアと概ね重なるため [54]、この結果は矛盾しない。

結果の妥当性を評価するために、地上測定値との比較を行った。比較結果を Fig. 8-11 に示す。ラドン弁別手法適用前後の結果を比較すると、散布図においては適用後の方が回帰直線の傾きは 1.00 に近づくものの、決定係数は 1.00 から遠ざかる傾向にあることが分かる。一方で、ファクター2 の範囲に収まっているプロットの数に着目すると、ラドン弁別前では 99 % (全 300 点中 298 点) であったのに対し、弁別後では *GI* = ±0 で 91 % (全 300 点中 273 点)、*GI* = -1 で 92 % (全 300 点中 276 点)、*GI* = -2 で 93 % (全 300 点中 279 点) と、収まりが比較的悪くなっている。ラドン弁別後の結果において、*GI* を小さく設定すると回帰直線の傾きは大きくなり、決定係数の値は 1.00 に近づいていくことが分かる。相対誤差のヒストグラムに注目すると、*GI* = -2 のときが平均値および中央値が 0 (航空機モニタリングと地上測定値が等価) に最も近くなった。しかしながら、他の結果と比較して有意な差があるとは言い難い。本手法には、高度補正の手法や *GI* の数値決定方

法に若干の不正確さが残っているため、今後もこのような解析経験を積み上げ、最適化を行っていく必要がある。

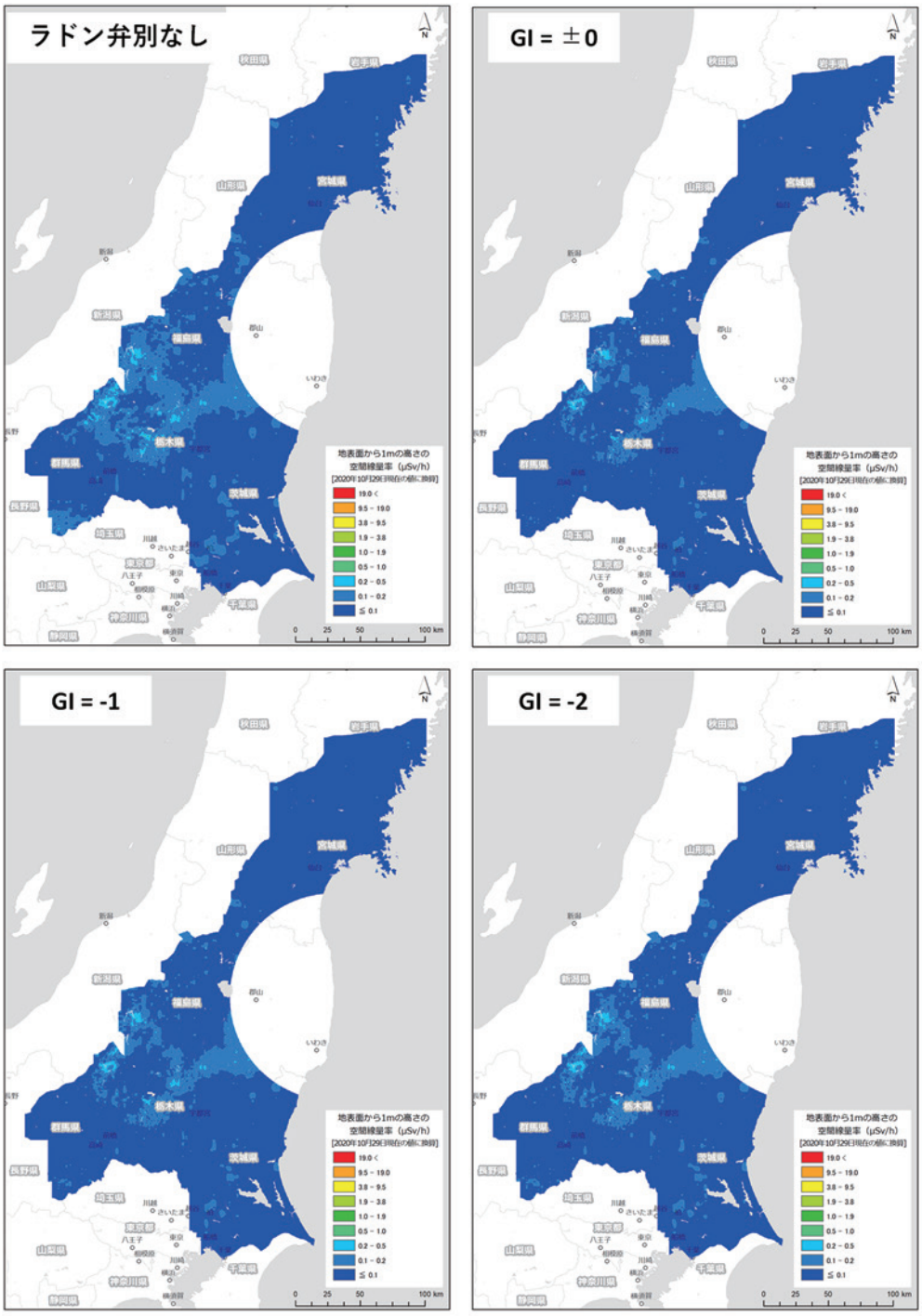


Fig. 8-9 ラドン影響弁別手法適用後の東日本第 11 次モニタリングの空間線量率マップ
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

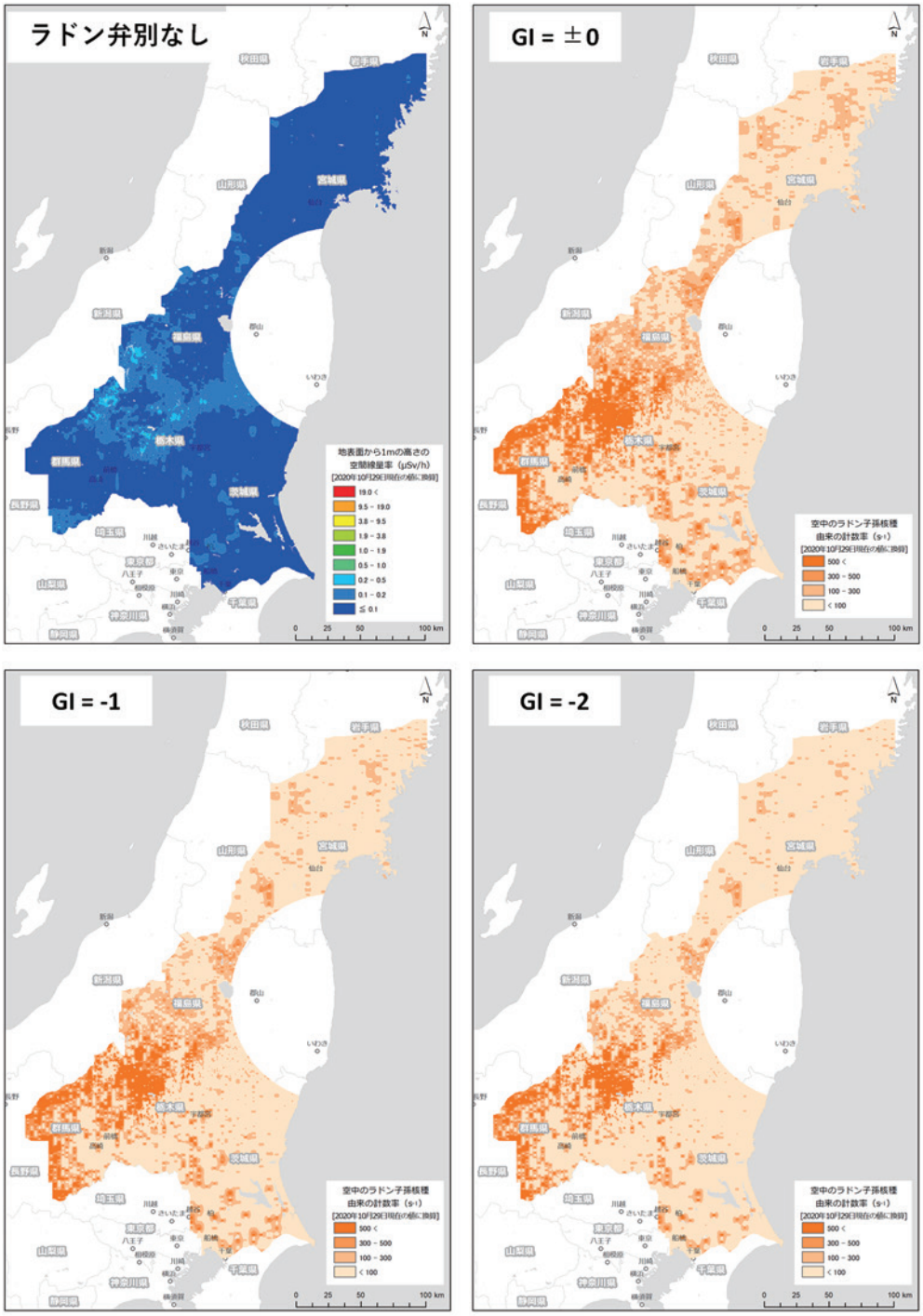


Fig. 8-10 東日本第 11 次モニタリングの測定結果から計算した空気中のラドン子孫核種の **NaI RSI** システムで検出された計数率マップ

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

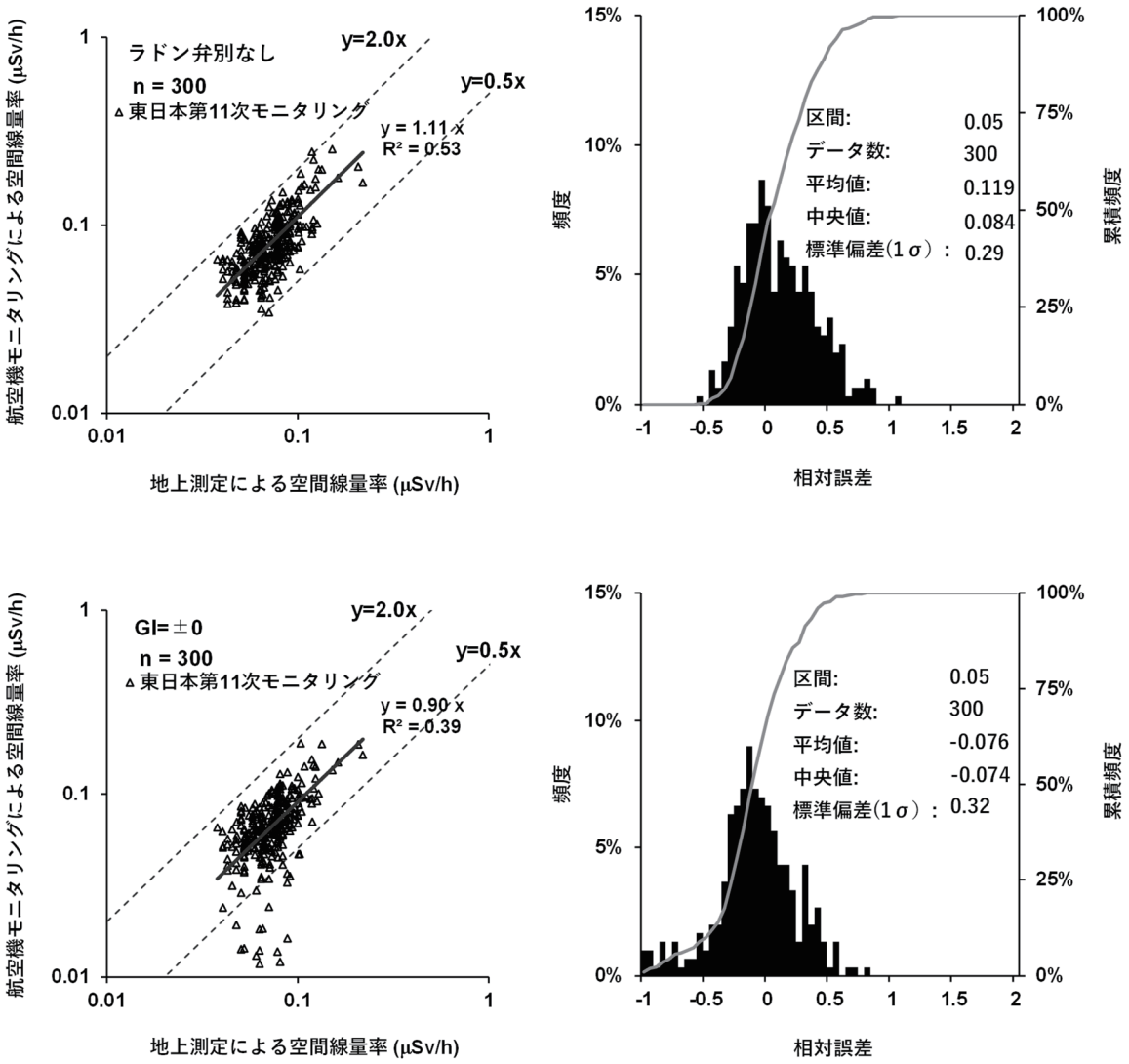


Fig. 8-11 ラドン影響弁別後の地上測定値との比較 (東日本第 11 次モニタリング)
(1/2)

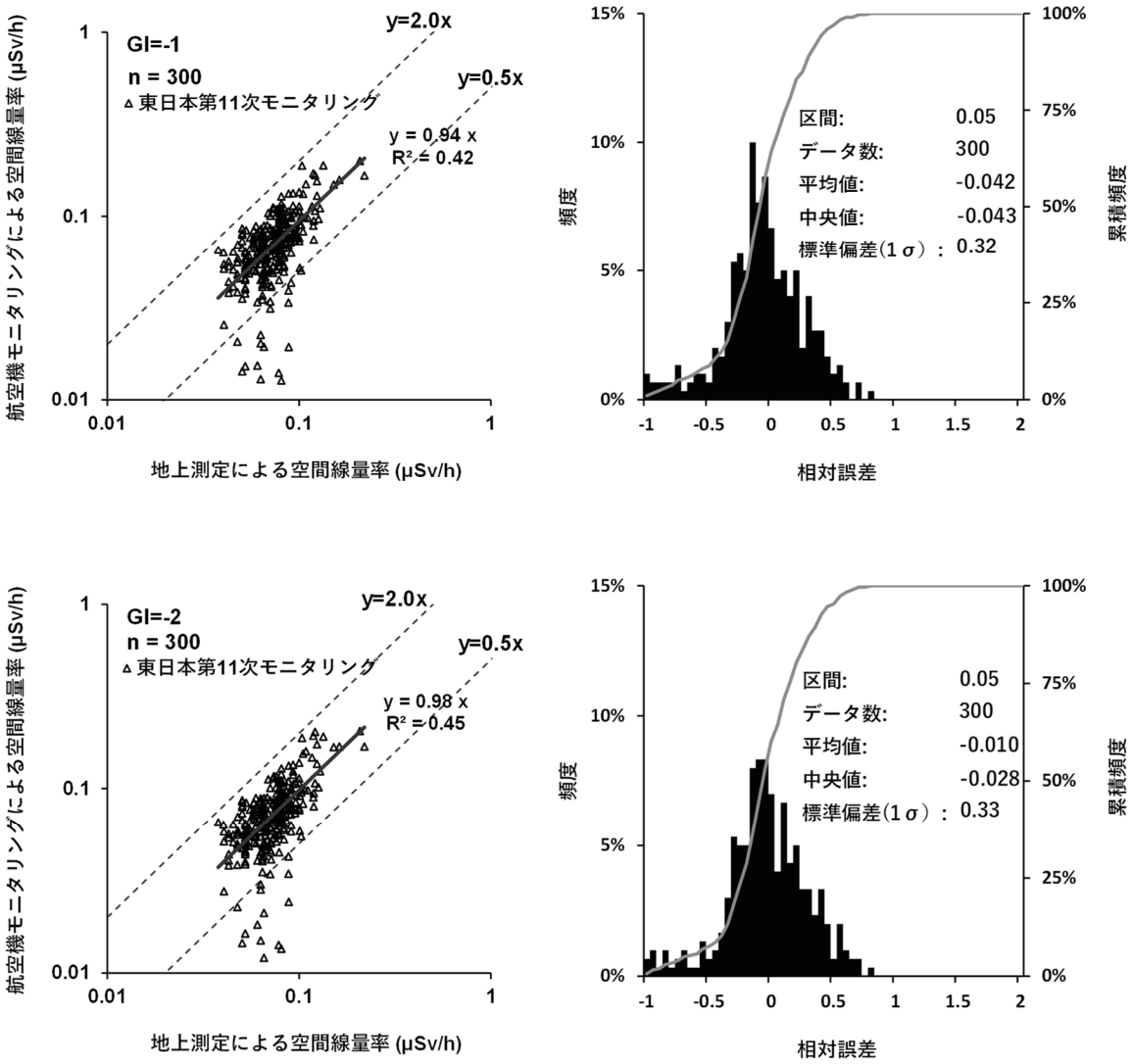


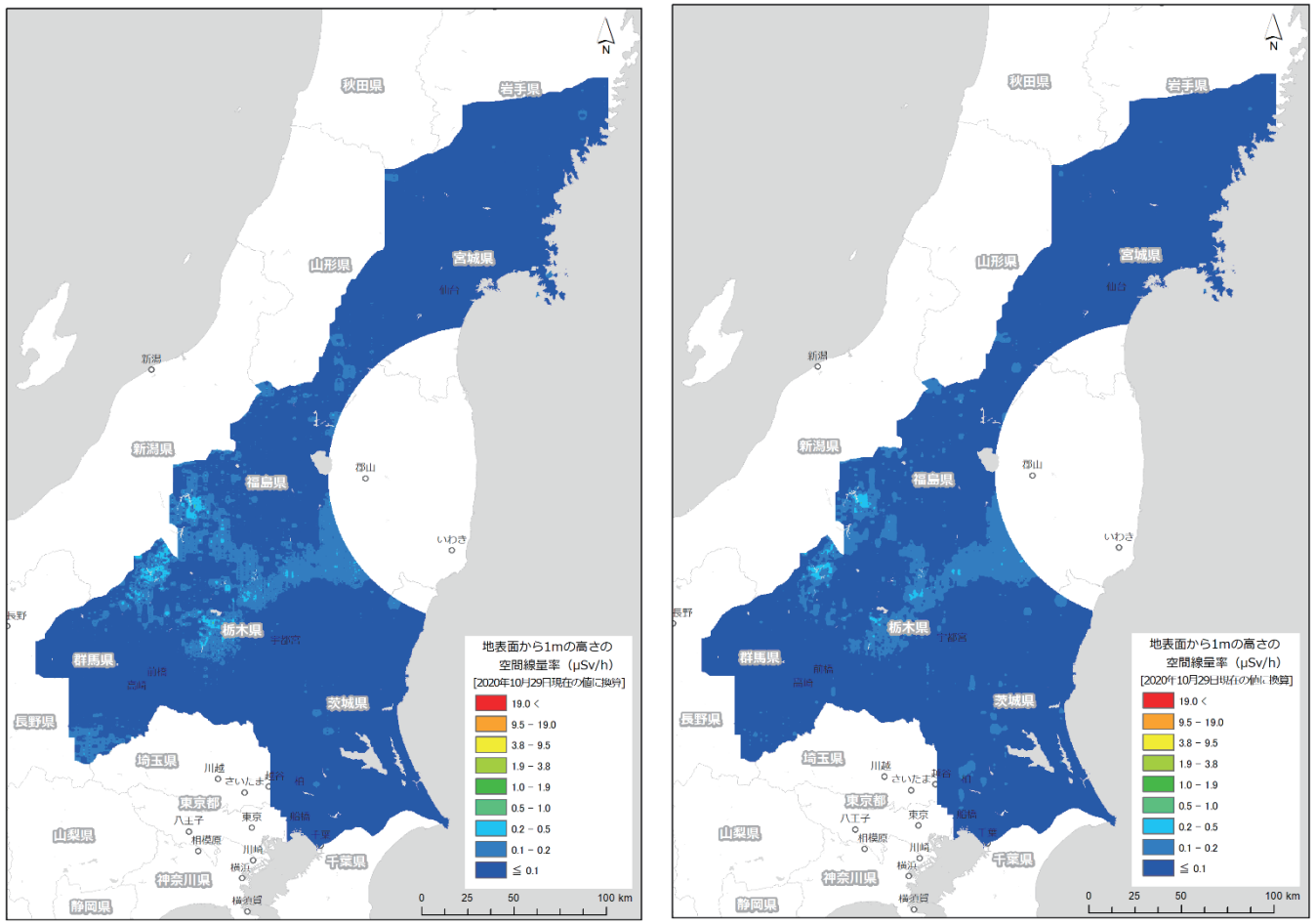
Fig. 8-11 ラドン影響弁別後の地上測定値との比較 (東日本第 11 次モニタリング)
(2/2)

8.6. 従来手法の評価

前節で言及したように、Fig. 4-14 のフロー図に則った従来の手法においては測定日ごとに BG フライトとして対地高度約 900 m に機体を保ち約 2 分のフライトを継続し、得られたデータをバックグラウンドとして差し引いているため、ある程度ラドン子孫核種の影響を差し引くことができていると思われる。従来手法によるラドン子孫核種弁別の効果と上記の新たなラドン弁別手法の有効性を評価するために、Fig. 5-5 で示した従来手法の空間線量率マップと Fig. 8-4 に示した *GI* を用いてラドン弁別手法を適用して作成した空間線量率マップ (*GI* = ±0 と表記) を Fig. 8-12 に示す。このように全体的な傾向は概ね一致しており、従来の手法であってもラドン子孫核種の影響はある程度除去できていることが推察される。一方、詳細に見ると、会津地方 (福島県西部)、栃木県北部、群馬県北部等においては、従来手法の結果において空間線量率が比較的高い場所が散見され、茨城県の中央部から南西部ではラドン弁別手法を適用した場合に、空間線量率が局所的に高く算出される場所があることが分かる。

これらの違いを理解するために、従来法で求めた測定日ごとのバックグラウンド計数率と同日における測定データにラドン弁別手法を適用して求めた計数率の平均値の比較を Fig. 8-13 に示す。図には比較のため、福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs が存在しないと考えられる、美浜発電所並びに敦賀発電所 (美浜・敦賀 BG) および近畿大学原子力研究所並びに京都大学原子力複合科学研究所における試験研究用原子炉 (近大炉・京大炉 BG) のバックグラウンド計数率とラドン弁別手法を適用して求めた計数率の平均値もプロットした。東日本第 11 次モニタリングの A 班 (E11th_A_Bell430) については y = x の直線近辺にプロットが集中しているが、B 班 (E11th_B_Bell412)は y = x の直線よりも上側に位置する傾向が見られた。A 班と B 班における *GI* (Fig. 8-4) および *RI* (Fig. 8-5) に注目してみると、*GI* は互いにほとんど同値だが、*RI* に差異が認められる。式[23]から *RI* が大きくなると、NaI RSI システムにおける地上の放射性核種由来の計数率 ($C_{NaI,g}$) は小さくなる。つまり、A 班と比べて B 班の$C_{NaI,g}$が小さく評価された結果、バックグラウンドとして減算する計数率が大きくなったと考えられる。B 班は主に栃木県や群馬県といった内陸部を測定したため、*RI* を算出するのに必要な条件を満たす海上をフライトしたデータ数が少なくなったことから、適切な *RI* を設定できているとは言い難く、本結果の妥当性には疑問が残る。また、美浜・敦賀 BG および近大炉・京大炉 BG のプロットは Fig. 8-13 に破線で示した y = x の直線よりも概ね上側に位置しており、ラドン弁別手法で求めたバックグラウンド計数率は従来法のものよりも大きい傾向にあることが分かる。当該モニタリングにおいては、2019 年度までの福島第一原子力発電所周辺および全国の原子力施設周辺における航空機モニタリングで得られた *RI* より顕著に高くなっており、東日本第 11 次モニタリングの B 班のケースと同様に、バックグラウンドとして減算する計数率が大きくなったと考えられる。以上のことは、Fig. 8-11 で示したように、ラドン弁別手法適用後の空間線量率がラドン弁別手法適用前のものよりも全体的に小さく評価される傾向にあったことと整合する。東日本第 11 次モニタリングと美浜・敦賀 BG および近大炉・京大炉 BG を比較したが、上記の通り、*RI* の設定値がラドン弁別手法におけるバックグランド計数率の推定に及ぼす影響が強く、本データからは福島原子力発電所事故由来の放射性 Cs の有無が及ぼす影響については、明確な知見は得られなかった。

従来手法では BG フライトにより得られた計数率を、その日の測定エリア全体におけるバックグラウンド計数率の代表値として扱うことから、特に、測定エリア近傍における地殻から放出されるラドン子孫核種由来の計数率を適切に除去できない可能性が高い。一方、ラドン弁別手法では、各測定点における全計数率から、ヘリコプター周辺に存在するラドン子孫核種 (遠方からの輸送および近傍の地殻から放出されたものを含む) に起因する計数率を切り出して除去できる点に強みがあり、放射性 Cs に起因する空間線量率マップの精度向上に資するものである。以上のことから、ラドン弁別手法の更なる精度向上に係る検討を重ねていく必要がある。とりわけ、*RI* の算出に使用する条件を満たすデータが極端に少ない場合における *RI* の算出方法については改良の余地がある。



(a) 従来手法　　(b) ラドン弁別手法適用($GI = \pm 0$)

Fig. 8-12 従来手法とラドン弁別手法の比較

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

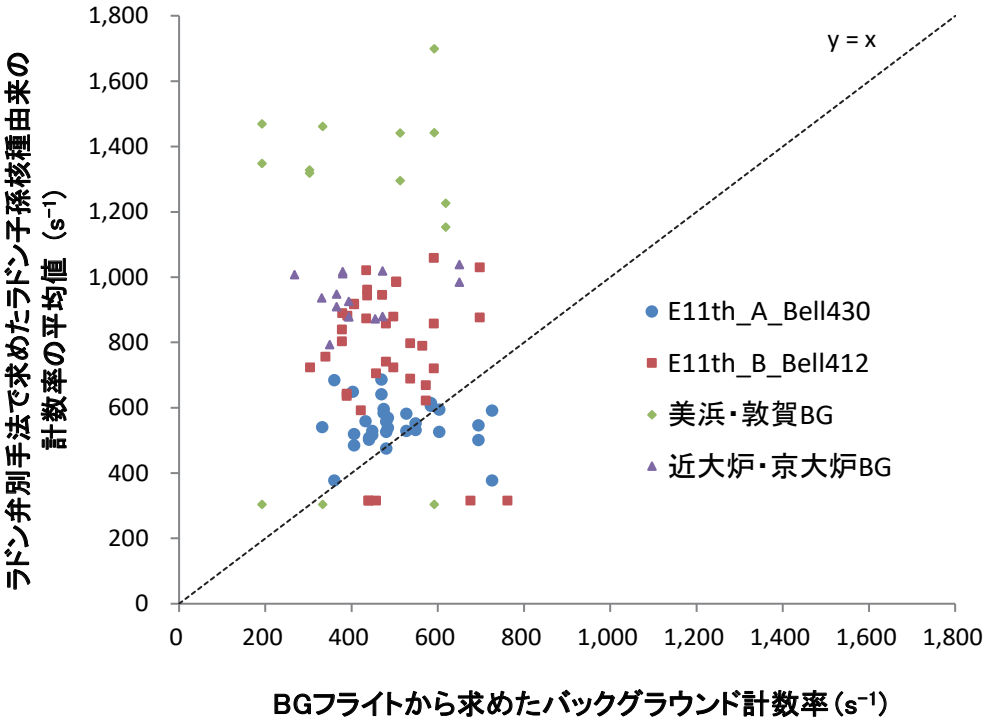


Fig. 8-13 BG フライトから求めた NaI RSI システムのバックグラウンド計数率と同日における測定データにラドン弁別手法を適用して求めた計数率の平均値の比較

9. 成果のまとめと今後の課題

2020 年度に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 システムを導入してから 10 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。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、メーカーを含めた保守体制作りが必要と考える。また、使用している検出器の結晶である NaI は吸湿性を有し、空気中で潮解することが知られている。潮解による検出効率の低下時期については空気との接触状況にもよるので一概に言えないが、検出器は購入から 10 年が経過したものもあり、現在は運用を停止しているものの、このような古い検出器の特性の変化を注視したうえで更新のタイミングを計画していく必要がある。また NaI シンチレータを被覆している金属性のケース内側に塗布されている酸化マグネシウム等の反射体に、機械的な振動等が原因で局部的な片寄りが生じる場合があり、波高値および分解能が変化する可能性もある。また、現在用いているデータ収集装置 (RS-701) の後継品 (RS-705) が RSI から発売されており、将来的に RS-701 に対するサポートが終了する懸念があることから、後継品の導入の検討が必要である。今後も航空機モニタリングを継続していく上で、RSI の最新情報を入手するよう努めるとともに、トラブルの予防保全のために計画的に航空機モニタリングシステムを更新することが望ましい。参考として、RSI システムの運用を開始した 2011 年度から 2020 年度までの RSI システムの保守・運用実績を Table 9-1 に示す。

・空間線量率マップについて

様々なヘリコプターと RSI システムの組み合わせにより解析パラメ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、各解析パラメータにあらかじめ定めた 1 つの数値を用いた。結果として地上測定の結果ともよく整合し、今後も同様な方法で問題ないと考える。しかしながら、キャリブレーションフライトは、確認・参考データの位置付けとしつつ、今後とも実施してデータを蓄積し、現行の解析パラメータを過信することなく、再設定を行うべきかを適宜検討することが望ましい。

・地形の起伏を考慮した空間線量率の補正手法について

航空機モニタリング解析システムに組み込んだ、地形の起伏を考慮する解析手法を 2020 年度の航空機モニタリング結果に適用し、地上測定値を指標として、地形を平坦と仮定している従来手法と比較を行うことで、空間線量率の計算精度向上効果について定量的評価を行った。地形の起伏を考慮した場合、空間線量率は従来手法に比べ全体的に低く評価される傾向にあることが明らかとなった。空間線量率の計算結果について地上測定値との相対誤差ヒストグラムに着目した場合、従来手法に比べて本手法では平均値および中央値が 0 に近づく等、理想的な頻度分布に近づくことが分かった。今後は空間線量率が特に小さく評価される傾向にある地形の特徴を抽出する等、さらに詳細な分析を進めていきたい。

・ラドン子孫核種の弁別手法について

80 km 圏外の航空機モニタリングデータ (第 11 次東日本モニタリング) にラドン弁別手法を適用した。地上の測定値と比較した結果から、当該手法が一定の精度を有することが示された。一方

で、測定日ごとに BG フライトを行って減算する従来手法についても精度的に劣るものでないことが分かった。しかしながら、本手法により場所ごとに大気中のラドン子孫核種の影響が除去できることから、本手法の高度化を継続していくメリットは大きい。今後も本手法について従来手法と比較しつつ、データを蓄積し *GI* 等のパラメータを最適化するための方法について検討していくことが望ましい。

Table 9-1 RSI システムの保守・運用実績

システム	構成機器	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度
RSI 1	NaI検出器 RSX-3(1)	購入 運用開始							更新	運用開始		
	NaI検出器 RSX-3(2)	購入 運用開始								更新	運用開始	
	$LaBr_3$検出器 RSX-1					購入 運用開始						
	RS-501	購入 運用開始										
	RS-701	購入 運用開始										
	PDU	購入 運用開始										
	バッテリー	購入 運用開始					修理 2台				修理 1台	
	PC	購入 運用開始										
	サブモニタ	購入 運用開始										
RSI 2	NaI検出器 RSX-3(1)	購入 運用開始						更新	運用開始			
	NaI検出器 RSX-3(2)	購入 運用開始									更新	運用開始 予定
	$LaBr_3$検出器 RSX-1					購入 運用開始						
	RS-501	購入 運用開始										
	RS-701	購入 運用開始										
	PDU	購入 運用開始										
	バッテリー	購入 運用開始					修理 2台				修理 1台	
	PC	購入 運用開始										
	サブモニタ	購入 運用開始										

10. まとめ

2020 年度に予定された 80 km 圏内の航空機モニタリング 1 回および 80 km 圏外の航空機モニタリング 1 回を確実に実施した。福島原子力発電所事故から航空機モニタリングが日本で実施されて 10 年目となった。事故当時、定まっていなかった測定・評価手法についてもある程度確立し、RSI システムの定期的な保守および軽微なトラブルへの対応経験並びに測定データ解析手法のノウハウが蓄積されてきている。今回のモニタリング結果を過去の結果と比較し、福島原子力発電所事故の影響があったエリアの空間線量率および放射性 Cs の地表面沈着量の全体的な減少傾向を把握することができた。

また、従来の測定データ解析手法で算出される空間線量率の高精度化に資するため、従来手法をベースとした応用的データ解析手法の開発を行ってきている。それら応用的手法の有効性を評価するため、応用的手法を適用して得られた空間線量率マップと従来手法によるものとの比較を実施した。地形の起伏を考慮に入れた計算手法を、本年度における福島原子力発電所から 80 km 圏内の航空機モニタリング結果に適用し、空間線量率マップの作成を行った。地形を平坦と仮定する従来手法によるものと比較したところ、地形の起伏を考慮に入れた場合、全体的に空間線量率が低く算出されることが明らかとなった。地上測定値を指標として、それぞれの手法の計算精度について評価したところ、地形の起伏を考慮に入れた計算手法の方がより地上測定値に近づいたことから、当該手法が空間線量率の計算精度向上をもたらすことが示された。また、本年度における福島原子力発電所から 80 km 圏外の測定データにラドン弁別手法を適用して空間線量率マップを作成した。本手法により算出した地表面から 1 m の高さの空間線量率と地上測定値とを比較したところ、従来手法により算出した空間線量率と地上測定値を比較した場合よりも、僅かながらではあるが相関関係の改善が見られたことから、本手法が従来手法と同等以上の精度を有することが示された。今後、現在までに開発してきた応用的データ解析手法の一元化を実施するとともに、解析手順や注意すべき点、プログラムで自動化が困難であり解析者判断が求められる事項とその判断基準等をマニュアルとして取りまとめていくことが望ましい。

謝辞

本調査研究は、「令和 2 年度原子力施設等防災対策等委託費および放射性物質測定調査委託費 (80km 圏内外における航空機モニタリング) 事業」による知見をとりまとめたものである。原子力機構、応用地質株式会社、モニー物探株式会社、エイ・ティ・エス株式会社、株式会社 MSK、株式会社水戸警備保障の 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。航空機の運航は中日本航空株式会社、朝日航洋株式会社が行った。ここに本モニタリングに参加された皆様に謹んで謝意を表します。

参考文献

1) 飯田義正, 伊藤洋昭, 笹尾英嗣, 鶴田忠彦, 永島礼二, 三谷稔, 小林孝男, 海外ウラン資源探査 -探査技術取りまとめ-, JNC TN7410 2001-007, 2001, 330p.
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, 39p.
3) Hendricks, T. J. and Riedhauser, S. R., An aerial radiological survey of the Nevada test site., DOE/NV/11718-324, 1999, 67p.
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 (4), 1990, pp.391-398.
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, 無人ヘリコプター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, 2009, pp.8-14.
9) 原子力安全委員会, 環境放射線モニタリング指針, 2008.
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(ATOMOΣ), 54(3), 2012, pp.160-165.
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), 2012, pp.137-140.
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, 2012, pp.7-11.
13) 原子力規制庁, 航空機モニタリング結果, https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/191/list-1.html (2022 年 1 月 7 日閲覧).
14) IAEA, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -(Second Report), 2011.
15) 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(9), 2014, pp.1059-1063.
16) 原子力規制庁, 文部科学省航空機モニタリング行動計画, 2011, https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5274/view.html (2022 年 1 月 7 日閲覧).
17) 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, 髙村善英, 西原克哉, 伊村光生, 土田清文, 石橋聖, 前島正道, 結城洋一, 鳥居建男, 平成 25 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2014-012, 2014, 110p.
18) 眞田幸尚, 森愛理, 石﨑梓, 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, 髙村善英, 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 年度福島原子力第一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.
19) 眞田幸尚, 宗像雅広, 森愛理, 石﨑梓, 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, 髙村善英, 西原克哉, 伊村光生, 宮本賢治, 岩井毅行, 松永祐樹, 豊田政幸, 飛田晋一朗, 工藤保, 中山真一, 平成 27 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2016-016, 2016, 131p.
20) 眞田幸尚, 森愛理, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一朗, 平賀祥吾, 佐藤義治, 卜部嘉, 石﨑梓, 嶋田和真, 廣内淳, 工藤保, 平成 28 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2017-034, 2018, 117p.
21) 眞田幸尚, 森愛理, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一朗, 平賀祥吾, 佐藤義治, 卜部嘉, 石﨑梓, 嶋田和真, 廣内淳, 工藤保, 平成 28 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2017-035, 2018, 69p.
22) 普天間章, 眞田幸尚, 石﨑梓, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一朗, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 工藤保, 平成 29 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2018-015, 2019, 120p.
23) 普天間章, 眞田幸尚, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 豊田政幸, 飛田晋一朗, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 石﨑梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 工藤保, 平成 29 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2018-016, 2019, 98p.
24) 普天間章, 眞田幸尚, 石﨑梓, 古宮友和, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 萩野谷仁, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成 30 年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-016, 2019, 116p.
25) 普天間章, 眞田幸尚, 古宮友和, 岩井毅行, 瀬口栄作, 松永祐樹, 河端智樹, 萩野谷仁, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 佐藤義治, 卜部嘉, 石﨑梓, 嶋田和真, 森愛理, 廣内淳, 平岡大和, 工藤保, 平成 30 年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2019-017, 2019, 95p.
26) 普天間章, 眞田幸尚, 石﨑梓, 川﨑義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 廣内淳, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和元年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-018, 2021, 121p.
27) 普天間章, 眞田幸尚, 川﨑義晴, 岩井毅行, 平賀祥吾, 佐藤一彦, 萩野谷仁, 松永祐樹, 菊池陽, 石﨑梓, 廣内淳, 平岡大和, 卜部嘉, 工藤保, 令和元年度緊急時対応技術適用のためのバックグラウンド航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2020-019, 2021, 128p.
28) 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.
29) 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.
30) 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 (ATOMOΣ), 55(12), 2013, pp.702-706.

31) 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(2), 2013, pp.192-200.
32) Ishizaki, A., Sanada, Y., Mori, A., Imura, M., Ishida, M. and Munakata, M., Investigation of snow cover effects and attenuation correction of gamma ray in aerial radiation monitoring, Remote Sens., 8(11), 2016, p.892.
33) Ishizaki, A., Sanada, Y., Ishida, M. and Munakata, M., Application of topographical source model for air dose rates conversions in aerial radiation monitoring., J. Environ. Radioact., 180, 2017, pp.82-89.
34) Hirayama, H., Namito, Y., Bielajew, A. F., Wilderman, S. J., Nelson, W. R., The EGS5 Code System, SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8, 2005, 441p.
35) 国土地理院, 国土地理院基盤地図情報ダウンロードサービス, https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php (2022 年 1 月 7 日閲覧).
36) 原子力規制委員会, 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, 2017.
37) ICRU, Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU report 53, 1994, 84p.
38) 原子力規制委員会, 平成 31 年度放射性物質測定調査委託費(東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約)事業, 成果報告書, 2020, https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/579/list-1.html (2022 年 1 月 7 日閲覧).
39) 私信.
40) G. F. KNOLL, 神野郁夫, 木村逸郎, 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, 70p.
41) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, 2003, 173p.
42) 塩出志乃, 逆距離加重法によるネットワーク空間上での点補間に関する研究, Theory and Applications of GIS, 13(1), 2004, pp.33-41.
43) 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, 2014, pp.62-71.
44) 原子力規制委員会, 緊急時におけるゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトル解析法, 放射能測定法シリーズ 29, 2017.
45) ICRP, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, 1996, 179p.
46) 森内茂, 堤正博, 斎藤公明, 自然放射線における空気吸収線量から実効線量当量への換算係数の評価, 保健物理, 25(2), 1990, pp.121-128.
47) 環境省, 追加被ばく線量年間 1 ミリシーベルトの考え方, http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=18437&hou_id=14327 (2021 年 3 月 1 日閲覧).
48) Sanada, Y., Urabe, Y., Sasaki, M., Ochi, K., Torii, T., Evaluation of ecological half-life of dose rate based on airborne radiation monitoring following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, J. Environ. Radioact., 192, 2018, pp.417-425.
49) 安藤真樹, 松田規宏, 斎藤公明, KURAMA-II を用いた走行サーベイ測定による東日本での天然放射性核種の空間線量率評価, 日本原子力学会和文論文誌, 16(2), 2017, pp.63-80.

50) 国土地理院, 国土数値情報土地利用細分メッシュデータ,
https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html (2022 年 1 月 7 日閲覧).
51) Iwamoto,Y., Sato, T., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Matsuda, N., Hosoyamada, R. and Niita, K., Benchmark study of the recent version of the PHITS code, J. Nucl. Sci. Technol., 54(5), 2017, pp.617-635.
52) Oikawa, S., Nakano, N., 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(2), 2003, pp.203-213.
53) 西川嗣雄, ラドン族(2) –自然放射線環境, 福井大学地域環境研究教育センター研究紀要「日本海地域の自然と環境」, 5, 1998, pp.83-94.
54) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 海と陸の地球化学図,
https://gbank.gsj.jp/geochemmap/ (2021 年 3 月 1 日閲覧).
55) 永井英志, 山澤弘実, 森泉純, 平尾茂一, 冬季日本海側における高空間線量率事象の解析, Jpn. J. Health Phys., 53(4), 2018, pp.219-229.