

## 原子力発電所事故後の 無人ヘリコプターを用いた放射線測定

Radiation Monitoring Using the Unmanned Helicopter  
after the Accident of the Nuclear Power Plant

眞田 幸尚 西澤 幸康 山田 勉 池田 和隆  
松井 雅士 土田 清文 佐藤 義治 平山 弘克  
高村 善英 西原 克哉 伊村 光生 石田 睦司  
ト部 嘉 志風 義明 杉田 武志 近藤 敦哉  
鳥居 建男

Yukihisa SANADA, Yukiyasu NISHIZAWA, Tsutomu YAMADA, Kazutaka IKEDA  
Masashi MATSUI, Kiyofumi TSUCHIDA, Yoshiharu SATO, Hirokatsu HIRAYAMA  
Yoshihide TAKAMURA, Katsuya NISHIHARA, Mitsuo IMURA, Mutsushi ISHIDA  
Yoshimi URABE, Yoshiaki SHIKAZE, Takeshi SUGITA, Atsuya KONDO  
and Tatsuo TORII

福島技術本部  
福島環境安全センター

Fukushima Environmental Safety Center  
Headquarters of Fukushima Partnership Operations

March 2014

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

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata Shirane, 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, 2014

## 原子力発電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定

日本原子力研究開発機構

福島技術本部 福島環境安全センター

眞田 幸尚、西澤 幸康<sup>※1</sup>、山田 勉<sup>※2</sup>、池田 和隆<sup>\*1</sup>、松井 雅士<sup>\*1</sup>、土田 清文<sup>※3</sup>、  
佐藤 義治、平山 弘克<sup>※4</sup>、高村 善英<sup>※4</sup>、西原 克哉<sup>※4</sup>、伊村 光生<sup>※5</sup>、石田 睦司<sup>※6</sup>、  
卜部 嘉<sup>※6</sup>、志風 義明、杉田 武志<sup>\*2</sup>、近藤 敦哉<sup>\*3</sup>、鳥居 建男

(2013年12月27日 受理)

2011年3月11日に発生した東日本大震災による津波に起因した東京電力福島第一原子力発電所の事故によって、大量の放射性物質が周辺に飛散した。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考えられる。

近年、無人ヘリコプターの開発が進んでおり、プログラミングによる自律飛行が可能な機種もある。原子力機構では、事故直後から、無人ヘリコプターによる放射線測定システムの開発に着手し、広範囲のモニタリングを実施している。無人ヘリコプターは、ヘリコプター（検出器）と操作する作業員に距離がとれるため、被ばくを抑制できること、プログラミングにより同じ場所を何度でも測定できることから、除染前後などの変化の観測が可能であることなどの特徴がある。モニタリングは、2011年12月から本格的に開始し、これまで、原子力発電所周辺のモニタリング、河川敷のモニタリング、発電所敷地内上空のモニタリング及び除染前後のモニタリングを行ってきた。ここでは、システムの詳細及びモニタリングの方法、結果についてまとめる。

---

本調査研究は、内閣府からの受託事業「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務」、及び文部科学省からの受託研究「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」の成果の一部を使用している。

東京事務所：〒100-8577 東京都千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル 19 階

※1 技術開発協力員（株式会社 ヴィジブルインフォメーションセンター）

※2 技術開発協力員（日本放射線エンジニアリング株式会社）

※3 技術開発協力員（応用地質株式会社）

※4 技術開発協力員（検査開発株式会社）

※5 技術開発協力員（静岡スカイテック株式会社）

※6 技術開発協力員（株式会社 NESI）

\*1 応用地質株式会社

\*2 有限会社 科学システム研究所

\*3 株式会社 NESI

**Radiation Monitoring Using the Unmanned Helicopter  
after the Accident of the Nuclear Power Plant**

Yukihisa SANADA, Yukiyasu NISHIZAWA<sup>※1</sup>, Tsutomu YAMADA<sup>※2</sup>, Kazutaka IKEDA<sup>\*1</sup>,  
Masashi MATSUI<sup>\*1</sup>, Kiyofumi TSUCHIDA<sup>※3</sup>, Yoshiharu SATO, Hirokatsu HIRAYAMA<sup>※4</sup>,  
Yoshihide TAKAMURA<sup>※4</sup>, Katsuya NISHIHARA<sup>※4</sup>, Mitsuo IMURA<sup>※5</sup>,  
Mutsushi ISHIDA<sup>※6</sup>, Yoshimi URABE<sup>※6</sup>, Yoshiaki SHIKAZE, Takeshi SUGITA<sup>\*2</sup>,  
Atsuya KONDO<sup>\*3</sup> and Tatsuo TORII

Fukushima Environmental Safety Center, Headquarters of Fukushima Partnership Operations,  
Japan Atomic Energy Agency,  
Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo

(Received December 27, 2013)

By the nuclear disaster of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (NPP), Tokyo Electric Power Company (TEPCO), caused by the East Japan earthquake and the following tsunami occurred on March 11, 2011, a large amount of radioactive materials was released from the NPP. In recent years, technologies for autonomous unmanned helicopters (AUHs) have been developed and applied to natural disasters. In expectation of the application of the AUHs to aerial radiation monitoring, we had developed a remote radiation monitoring system. Then, we measured the radiation level by using unmanned helicopter in soil contaminated areas by radioactive cesium emitted from the NPP to evaluate ambient dose-rate distribution around the areas and to investigate the decontamination effect by the measurements before and after decontamination treatment. Here, we reports on the measurement technique and the result.

Keywords: Aerial Radiation Monitoring, Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Radiocesium, Map, Natural Nuclide

---

This report was summarized for results that JAEA carried out as commissioned business by " the Decontamination model projects of Fukushima Daiichi nuclear power plant" of the Cabinet Office and "Establishment of the base for taking measures for environmental impact of radioactive substances—Study of the distribution of radioactive substances" of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

- ※1 Collaborating Engineer (VIC CO.Ltd.)
- ※2 Collaborating Engineer (JREC CO.Ltd.)
- ※3 Collaborating Engineer (OYO CO.Ltd.)
- ※4 Collaborating Engineer (IDC CO.Ltd.)
- ※5 Collaborating Engineer (Shizuoka skytech CO.Ltd.)
- ※6 Collaborating Engineer (NESI CO.Ltd.)
- \* 1 OYO CO.Ltd.
- \* 2 Science and system laboratory, Inc.
- \* 3 NESI CO.Ltd.

## 目次

1.	はじめに	1
2.	無人ヘリモニタリングの経緯	2
3.	無人ヘリ放射線モニタリングシステム	4
3.1.	無人ヘリコプター	4
3.2.	検出器	4
3.2.1.	LaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器（中高線量率用）	4
3.2.2.	プラスチックシンチレーション検出器（低線量率用）	6
3.3.	線源による試験	7
4.	データ取得及び解析方法	9
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	9
4.2.	データ取得方法	9
4.3.	キャリブレーションフライトによるパラメータ取得	10
4.4.	バックグラウンド（自己汚染と宇宙線）	11
4.5.	解析のフロー	11
4.6.	線量率への換算方法	12
4.6.1.	高度補正係数	12
4.6.2.	線量換算係数	13
4.7.	放射性セシウムの沈着量への換算	19
4.7.1.	天然核種の弁別	19
4.7.2.	線量-放射能換算係数	20
4.8.	検出下限値	20
4.9.	不確かさ	21
4.10.	不感時間の補正	21
4.11.	マッピング	22
4.12.	検出器の比較	22
4.13.	フライトパターンによる影響	23
4.13.1.	測定方向	23
4.13.2.	測定速度	24
4.13.3.	測定高度	24
4.14.	地上における測定値との比較	29
4.15.	コベル法の適用検討	30
4.15.1.	コベル法	31
4.15.2.	EGS5 による検出器のレスポンス計算	32
4.15.3.	グロスカウント法との比較	33
5.	モニタリング結果	37
5.1.	原子力発電所周辺のモニタリング	37
5.1.1.	調査目的	37

5.1.2. 調査内容.....	37
5.1.3. 結果と考察.....	37
5.2. 河川敷のモニタリング.....	42
5.2.1. 調査目的.....	42
5.2.2. 調査内容.....	42
5.2.3. 結果と考察.....	44
5.3. 発電所敷地内上空のモニタリング.....	86
5.3.1. 調査目的.....	86
5.3.2. 調査期間.....	86
5.3.3. データ取得方法.....	86
5.3.4. 上空 1,500 m における線量率の推定方法.....	87
5.3.5. 調査結果.....	88
5.4. 除染前後のモニタリング.....	92
5.4.1. 調査目的.....	92
5.4.2. 調査場所と測定期間.....	92
5.4.3. 調査方法.....	93
5.4.4. 調査結果.....	93
5.5. 発電所敷地内からの直達線・散乱線の測定.....	103
5.5.1. 調査目的.....	103
5.5.2. フライト条件.....	103
5.5.3. 調査内容.....	103
5.5.4. 結果・考察.....	104
6. まとめ.....	108
謝辞.....	109
参考文献.....	109
Appendix 1 LaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器の全テストフライトデータ.....	111
Appendix 2 PS 検出器の全テストフライトデータ.....	118

**Contents**

1.	Introduction.....	1
2.	Progress of AUH monitoring.....	2
3.	AUH radiation monitoring system .....	4
3.1.	AUH.....	4
3.2.	Detectors .....	4
3.2.1.	LaBr3:Ce detector (for high-middle dose rate).....	4
3.2.2.	Plastic scintillator detector (for low dose rate).....	6
3.3.	Response of system by the point source .....	7
4.	Data acquisition and analysis method .....	9
4.1.	Basic approach of the analysis .....	9
4.2.	Data acquisition .....	9
4.3.	Acquisition of analytical parameters with calibration flight.....	10
4.4.	Background radiation (Self contamination and cosmic ray).....	11
4.5.	Analysis method.....	11
4.6.	Conversion to dose rate .....	12
4.6.1.	Attenuation factor (AF).....	12
4.6.2.	Conversion factor of dose rate (CD).....	13
4.7.	Conversion from dose rate to radiocesium deposition.....	19
4.7.1.	Discrimination of natural radionuclide.....	19
4.7.2.	Conversion factor from dose rate to radiocesium deposition.....	20
4.8.	Detection limit .....	20
4.9.	Uncertainty of dose rate conversion .....	21
4.10.	Correction of dead time.....	21
4.11.	Mapping .....	22
4.12.	Comparison of detector .....	22
4.13.	Influence by flight condition.....	23
4.13.1.	Flight direction.....	23
4.13.2.	Flight speed .....	24
4.13.3.	Flight altitude .....	24
4.14.	Comparison with ground survey .....	29
4.15.	Application of the Covell method .....	30
4.15.1.	The method of Covell.....	31
4.15.2.	Response calculation of detector with EGS5.....	32
4.15.3.	Comparison with the gross count method.....	33
5.	Results of AUH monitoring .....	37
5.1.	Monitoring around the NPP .....	37
5.1.1.	Objective .....	37

5.1.2. Monitoring methods .....	37
5.1.3. Result and consideration .....	37
5.2. Monitoring of river bed .....	42
5.2.1. Objective .....	42
5.2.2. Monitoring methods .....	42
5.2.3. Result and consideration .....	44
5.3. Monitoring of the on-site of NPP .....	86
5.3.1. Objective .....	86
5.3.2. Monitoring methods .....	86
5.3.3. Data acquisition.....	86
5.3.4. Dose estimation at 1,500 m .....	87
5.3.5. Result and discussion .....	88
5.4. Monitoring at before and after decontamination .....	92
5.4.1. Objective .....	92
5.4.2. Monitoring period .....	92
5.4.3. Monitoring methods .....	93
5.4.4. Result and discussion .....	93
5.5. Measurement of direct gamma-rays and scattered gamma-rays from NPP .....	103
5.5.1. Objective .....	103
5.5.2. Flight condition .....	103
5.5.3. Monitoring methods .....	103
5.5.4. Result and discussion .....	104
6. Summary.....	108
Acknowledgement .....	109
References .....	109
Appendix 1 All test flight data of the LaBr <sub>3</sub> :Ce detector .....	111
Appendix 2 All test flight data of the plastic scintillation detector .....	118

**Table List**

Table 2-1	無人ヘリ運行スケジュール .....	3
Table 3-1	点線源によるレスポンス比較 .....	7
Table 4-1	AF および CD の一覧 [LaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器] .....	14
Table 4-2	AF および CD の一覧 [PS 検出器].....	16
Table 4-3	それぞれの検出器のパラメータ .....	19
Table 4-4	フライトパターン一覧 .....	23
Table 5-1	対象河川、測定日及び換算日 .....	42
Table 5-2	測定場所と測定期間 .....	92

Figure List

Fig. 3-1	無人ヘリ放射線モニタリングシステム .....	4
Fig. 3-2	検出器の配置 .....	5
Fig. 3-3	システムのブロック図 .....	5
Fig. 3-4	LaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器シンチレータの自己汚染による $\gamma$ 線スペクトル .....	6
Fig. 3-5	PS 検出器の外観 .....	6
Fig. 3-6	LaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器のエネルギー特性（コベル法によりピーク面積を抽出） .....	8
Fig. 4-1	測定場所の対地高度と線量率の減衰の関係（QAD による計算結果） .....	9
Fig. 4-2	データ取得のためのフライト条件イメージ .....	10
Fig. 4-3	キャリブレーションフライトのイメージ .....	10
Fig. 4-4	海上と地上における LaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器による $\gamma$ 線スペクトルの比較 （測定時間 1,800 秒） .....	11
Fig. 4-5	無人ヘリ解析方法のフロー .....	12
Fig. 4-6	In-situ Ge 検出器による天然放射性核種起源の線量率測定結果 .....	19
Fig. 4-7	HF と対地高度の関係 .....	21
Fig. 4-8	数え落としの割合と対地高度 50 m で測定した場合の地上の線量率の関係 .....	22
Fig. 4-9	LaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器と PS 検出器の比較（上空からの測定結果） .....	23
Fig. 4-10	フライト方向の違いによる放射線量マップの比較 .....	25
Fig. 4-11	フライト方向の違いによる放射線量の比較（散布図） .....	25
Fig. 4-12	速度による放射線量マップの比較 .....	26
Fig. 4-13	高度による放射線量マップの比較 .....	27
Fig. 4-14	高度による測定値の比較 .....	28
Fig. 4-15	NaI サーベイメータと無人ヘリ（LaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器）による測定結果の比較 .....	29
Fig. 4-16	NaI サーベイメータと無人ヘリ（PS 検出器）による測定結果の比較 .....	30
Fig. 4-17	In-situ Ge 検出器と無人ヘリ（LaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器）による測定結果の比較 （左： <sup>137</sup> Cs、右： <sup>134</sup> Cs） .....	30
Fig. 4-18	コベル法によるエネルギーピークの評価方法の概念図 .....	31
Fig. 4-19	<sup>137</sup> Cs のエネルギーピークの測定高度による関係の例（地上 0.3 $\mu$ Sv/h） .....	32
Fig. 4-20	<sup>137</sup> Cs および <sup>134</sup> Cs のエネルギーピークの空気減弱係数 .....	32
Fig. 4-21	LaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器（左：写真、右：シミュレーション） .....	33
Fig. 4-22	実験値と計算値のスペクトル（左： <sup>137</sup> Cs、右： <sup>134</sup> Cs） .....	33
Fig. 4-23	距離による実験値と計算値の比較（左： <sup>137</sup> Cs、右： <sup>134</sup> Cs） .....	33
Fig. 4-24	福島第一原子力発電所周辺の <sup>137</sup> Cs 沈着量 （左：コベル法、右：グロスカウンタ法） .....	34
Fig. 4-25	グロス法とコベル法の 10 m メッシュ内の数値の比較 （左： <sup>137</sup> Cs、右： <sup>134</sup> Cs） .....	35
Fig. 4-26	<sup>137</sup> Cs 沈着量の比画像（コベル法/グロスカウンタ法） .....	36

Fig. 4-27	ピークコンプトン比 (270 keV 以下の計数率 / 530-700 keV の計数率) の分布 (発電所の北にスカイシャインの影響が見られる) .....	36
Fig. 5-1	発電所から 3 km 圏内の放射線量(左)及び放射性セシウムの沈着量マップ (2013 年 3 月 20 日時点に減衰補正) .....	39
Fig. 5-2	発電所から 5 km 圏内の放射線量(左)及び放射性セシウムの沈着量マップ (2013 年 3 月 20 日現在に減衰補正) .....	40
Fig. 5-3	発電所から 3 km 圏内の比画像 (送電線部分は削除) 及び散布図.....	41
Fig. 5-4	対象河川 (背景図は第 6 次航空機モニタリングの結果) .....	43
Fig. 5-5	請戸・高瀬川線量率マップ (1 回目) .....	47
Fig. 5-6	請戸・高瀬川線量率マップ (2 回目) .....	49
Fig. 5-7	請戸・高瀬川線量率マップ (3 回目) .....	51
Fig. 5-8	請戸・高瀬川 Cs 沈着量マップ (2 回目) .....	53
Fig. 5-9	請戸・高瀬川 Cs 沈着量マップ (3 回目) .....	55
Fig. 5-10	小高川線量率マップ (1 回目) .....	57
Fig. 5-11	小高川線量率マップ (2 回目) .....	57
Fig. 5-12	小高川 Cs 沈着量マップ (2 回目) .....	58
Fig. 5-13	前田川線量率マップ .....	59
Fig. 5-14	前田川 Cs 沈着量マップ .....	61
Fig. 5-15	宇多川線量率マップ .....	63
Fig. 5-16	宇多川 Cs 沈着量マップ .....	65
Fig. 5-17	真野川線量率マップ .....	67
Fig. 5-18	真野川 Cs 沈着量マップ .....	67
Fig. 5-19	新田川線量率マップ .....	69
Fig. 5-20	新田川 Cs 沈着量マップ .....	71
Fig. 5-21	太田川線量率マップ .....	73
Fig. 5-22	太田川 Cs 沈着量マップ .....	73
Fig. 5-23	阿武隈川線量率マップ .....	74
Fig. 5-24	阿武隈川 Cs 沈着量マップ .....	79
Fig. 5-25	阿武隈川河川敷の空間線量率マップ (左: 無人ヘリコプターによる測定結果、右: 第 6 次航空機モニタリング結果) .....	85
Fig. 5-26	3 km 圏内における飛行軌跡 .....	86
Fig. 5-27	放射線の線源と距離による減衰率の関係 (QAD-CGGP2R 計算結果).....	87
Fig. 5-28	線源半径 1,000 m の計算結果と実測値.....	87
Fig. 5-29	発電所 3 km 圏内における測定点と上空 200 m における線量率.....	89
Fig. 5-30	発電所 3 km 圏内における上空 200 m における線量率マップ .....	90
Fig. 5-31	高線量率箇所の推定方法 .....	91

Fig. 5-32	浪江町矢沢町地区 (左：除染前、中：除染後、右：フォローモニタリング) .....	94
Fig. 5-33	浪江町松木山地区 (左：除染前、中：除染後[積雪有り]、右：フォローモニタリング) .....	95
Fig. 5-34	田村市地見城地区 (左：除染前、中：除染後、右：フォローモニタリング) .....	96
Fig. 5-35	川内村貝ノ坂地区 1 (左：除染前、中：除染後[積雪有り]、右：フォローモニタリング) .....	97
Fig. 5-36	川内村貝ノ坂地区 2 (左：除染前、中：除染後[積雪有り]、右：フォローモニタリング) .....	98
Fig. 5-37	富岡町夜ノ森公園 (左上：除染前、右上：除染後、左下、右下：フォローモニタリング 1,2)	99
Fig. 5-38	富岡町第二中学校 (左上：除染前、右上：除染後、左下、右下：フォローモニタリング 1,2) .....	100
Fig. 5-39	大熊町役場 (左：除染後、右：フォローモニタリング) .....	101
Fig. 5-40	大熊町大野病院 (左：除染前、右：除染後) .....	102
Fig. 5-41	海上からの福島第一原子力発電所起因の直達線や 散乱線の $\gamma$ 線量 (計数率) の測定における飛行軌跡 (青色) .....	103
Fig. 5-42	高度 150 m (左) 及び 250 m (右) における線量率測定結果.....	104
Fig. 5-43	ポイント A (高度 250 m) 及びポイント B (海上 (バックグラウンド)) における $\gamma$ 線スペクトル (LaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器 1 本分).....	105
Fig. 5-44	原子力発電所からの水平距離と LaBr <sub>3</sub> :Ce 検出器の計数率の関係 (高度 150 m におけるデータ) .....	105
Fig. 5-45	ポイント A における高度と計数率の関係 (y 軸の誤差は、1 秒間の測定データ 60 個の $3\sigma$ ) .....	106

## 1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）は、東日本大震災により発生した東京電力(株)福島第一原子力発電所（以下、原子力発電所）事故により環境中に拡散した放射性物質の影響範囲を調査するため、航空機（有人ヘリコプター）を用いて放射線の分布を“面”で測定する遠隔放射線モニタリングの技術を開発・整備し、これまで様々なフィールドに適用してきた<sup>1)3)</sup>。上空からの遠隔放射線モニタリングは、山林や田畑などの人が容易に入れない場所の測定が可能であること、広い範囲の空間線量率や地表面に沈着した放射性セシウムの分布を視覚的に把握できることから極めて有用な技術である。

航空機の運航は、航空法による規制を受けるため、低高度 (<150 m) でのフライトは難しい。一方、ラジコンで操縦する産業用無人ヘリコプターが農薬散布等で広く使用されており、この無人ヘリコプターをベースにコンピュータで自動操縦が可能な自律機能を持った機種が開発され、火山観測や植生調査等に利用されている<sup>4)</sup>。過去の各国の文献を見ると、放射線測定器を搭載した自律航行型無人ヘリコプターによる放射線分布のモニタリング（以下、無人ヘリモニタリング）は、緊急時用として研究されてきた<sup>5)6)</sup>。また、原子力機構においても、1999年に発生したJCO事故を契機に原子力防災のツールとして、自律型無人ヘリによる放射線モニタリングシステム（以下、無人ヘリ放射線モニタリングシステム）を開発してきた<sup>7)</sup>。

無人ヘリモニタリングは、地上におけるサーベイメータを用いた測定と比較すると迅速に広範囲を測定することができる上、プログラム飛行が可能のため、同一ルートでの飛行により除染効果の確認、経年変化による変動追跡等に向いている。また、人が容易に立ち入れない田畑の中や、森林、山の斜面等でも測定可能であることから、汚染の高い区域を中心として測定のニーズが高く、早急に測定からデータ評価までの手順を整える必要がある。

今回、無人ヘリ放射線モニタリングシステムを用いて、2011年12月から2012年3月まで、警戒区域を中心に約200 km<sup>2</sup>の測定を行った。測定の着眼点について以下に示す。

- 原子力発電所周辺のモニタリング
- 河川敷のモニタリング
- 発電所敷地内上空のモニタリング
- 除染前後のモニタリング
- 発電所敷地内からの直達線・散乱線の測定

ここでは、これらデータの取得方法とモニタリング結果について報告する。

## 2. 無人ヘリモニタリングの経緯

無人ヘリモニタリングは、事故後の2011年4月から検討に入り、2011年10月から運用を開始した。Table2-1に無人ヘリモニタリングの経緯を示す。

事故以来、段階的にフライト試験を実施し、2011年10月より、内閣府による委託事業「警戒区域及び計画的避難区域等における除染モデル実証事業」において、モデル実証事業の除染前後のモニタリング及び詳細モニタリングの一環として5 mSv/年の境界モニタリングを実施した。その後、2012年10月から文科省による委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」において、飛行禁止区域に指定されていたため航空機モニタリングが実施されていなかった原子力発電所周辺(3 km 圏内)におけるモニタリングを2回及び河川を介した放射性物質の移行に関する知見を得るため、阿武隈川と宇多川河川敷のモニタリングを実施した。また、河川敷については、さらに、6つの河川を選定し、河口域から10 km 程度のモニタリングを実施した。その後、国交省からの依頼により、原子力発電所から3 km 圏内の飛行制限を緩和するために、原子力発電所上空のモニタリングを実施した。

Table 2-1 無人へり運行スケジュール

	2011				2012													
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4					
フライト試験	4/22 Test_Ibaraki		7/23-27 Test_Kawauchi, Hirono	◆	9/23 Test_Date, Minamisouma	◆	10/19-20 Test_Tamura, Hirono	◆	1/24 Test_Tomioka	◆	8/30-9/1 Okuma, Futaba	◆	10/5,7 Name	◆	11/29-30 Tamura	◆	1/16 Tamura	
警戒区域内の詳細 モニタリング (5 mSv/年境界)																		
除染前後の モニタリング																		
原子力発電所 周辺の モニタリング																		
河川敷の モニタリング																		
発電所敷地内 上空の モニタリング																		

### 3. 無人ヘリ放射線モニタリングシステム

#### 3.1. 無人ヘリコプター

無人ヘリコプターには、ヤマハ発動機社製無人ヘリコプターRMAX G1の自律型及びマニュアル型を用いた。自律型は、離発着以外は、パソコン制御システムを搭載した地上局（車両）から無線で遠隔操作することができ、操作員はGPSにより得られる機体の位置情報を元に、飛行プログラムを作成し、速度や高度を調整しながら飛行させることができる。また、マニュアル型ヘリコプターは、農薬散布等に使われているタイプと同型のものである。本ヘリコプターは重量94 kg、最大積載量10 kgであり、最高速度72 km/hまで出すことができる。無人ヘリコプターの外観についてFig.3-1に示す。ヘリコプターは、自律型を基本的に使用し、マニュアル型は、プログラミングの難しい、高度差のある谷間や山裾などで使用した。



Fig. 3-1 無人ヘリ放射線モニタリングシステム

#### 3.2. 検出器

##### 3.2.1. LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器（中高線量率用）

中高線量率用の検出器として、LaBr<sub>3</sub>:Ce シンチレータを用いたシステムを開発した。検出器の配置とシステムのブロック図をそれぞれ、Fig. 3-2、Fig. 3-3 に示す。LaBr<sub>3</sub>:Ce シンチレータの結晶は、1.5"φ×1.5"を3本使用し（合計 0.13 L）、それぞれのスペクトルデータと計数率を保存した。

LaBr<sub>3</sub>:Ce シンチレータは、<sup>137</sup>Cs の放出するγ線のエネルギーピークに対し、半値幅が1.8 keV～2.0 keVとエネルギー分解能に優れている。しかしながら、自己汚染があることが知られ、<sup>227</sup>Acの子孫核種、Laの放射性同位元素である<sup>138</sup>Laが主な成分となる。<sup>227</sup>Acの子孫核種は、<sup>211</sup>Pbおよび<sup>207</sup>Tlのβ壊変によりさらに~1400 keVまでのβ線を放出する。また、<sup>227</sup>Th、<sup>223</sup>Ra、<sup>219</sup>Rn、

$^{215}\text{Po}$  及び  $^{211}\text{Bi}$  からの  $\alpha$  線が放出される<sup>8)</sup>。 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  検出器のバックグラウンドスペクトル Fig. 3-4 に示す。

検出器の信号と Differential GPS の位置情報を 1 秒毎にリストデータとして検出器内部のメモリに保存した。出力される CSV フォーマットデータは、GPS 位置情報データと 3 本ある  $\text{LaBr}$  検出器毎に 1024 チャンネルの計数率データが 1 秒間隔で時系列に沿って記録されたもので、4 ファイルが 1 セットとなっている。全計数率のデータと Differential GPS の位置情報はリアルタイムに基地局のパソコンに無線 LAN を用いて伝送した (1.2 GHz, 0.01 W)。伝送の最大到達距離は、2 km 程度である。

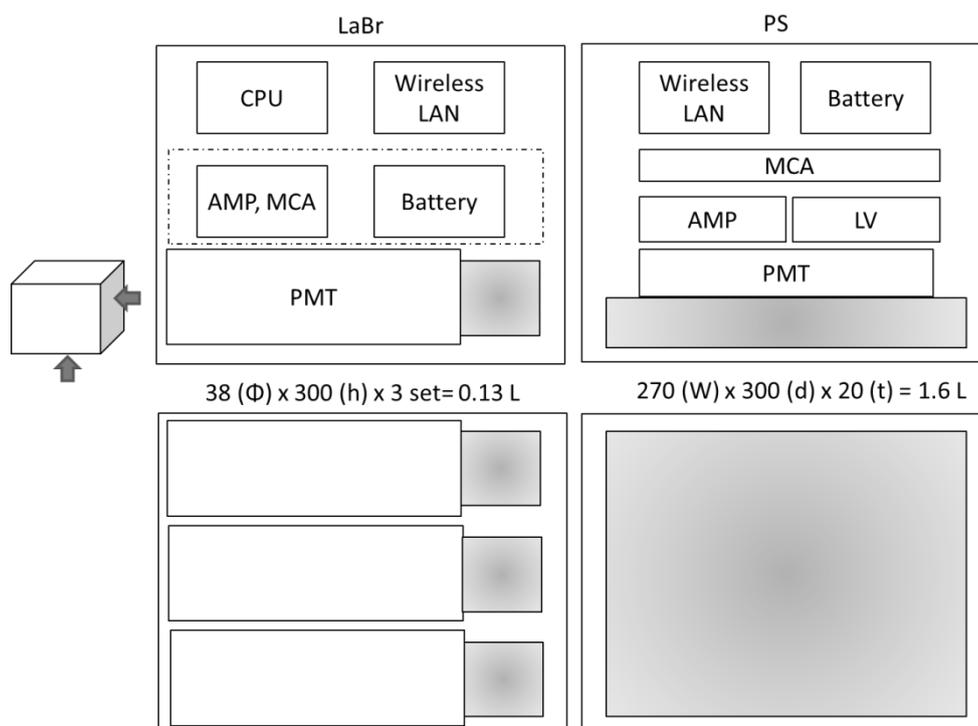


Fig. 3-2 検出器の配置

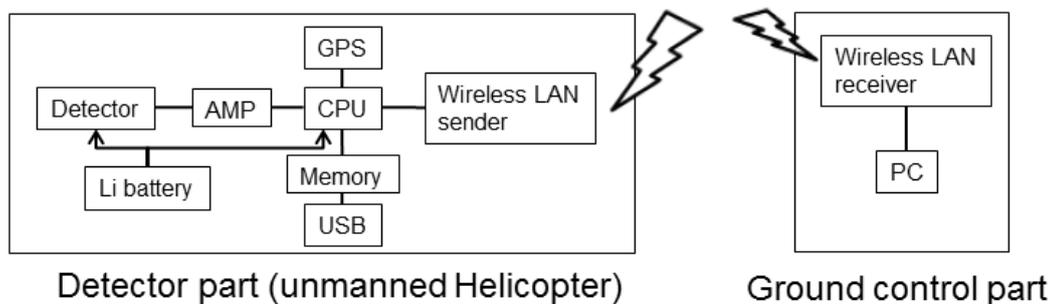


Fig. 3-3 システムのブロック図

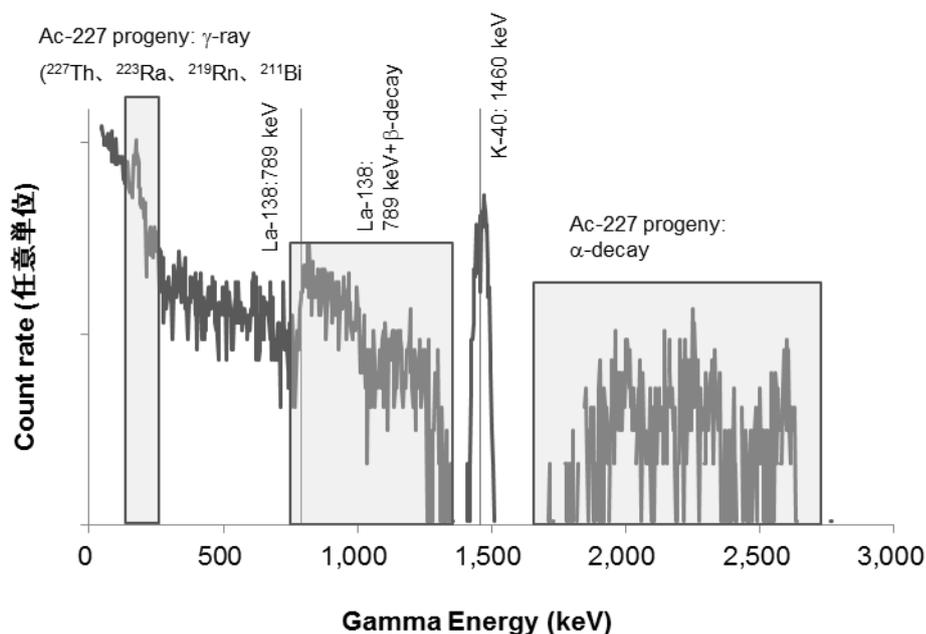


Fig. 3-4 LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器の自己汚染による  $\gamma$  線スペクトル  
(海上の高度 100 m で取得したデータより)

### 3.2.2. プラスチックシンチレーション検出器（低線量率用）

大型プラスチックシンチレーション検出器 (270 x 300 x 20 mm; 合計 1.6 L) (以下、PS 検出器) を搭載し、1 秒毎に計数率データと GPS データを取得した。検出器の配置とシステムのブロック図をそれぞれ、Fig. 3-2、Fig. 3-3 に示す。本検出器は、搭載するヘリコプターに応じて、自律型用及びマニュアル型用の 2 種類作成した。ダウンリンクの方法は、検出器内に無線 LAN を搭載し、地上のパソコンに計数率情報と位置情報を保存できるようにした。これらのデータは、パソコン上で、リアルタイムに表示できる。また、検出器内のメモリーにも同情報が保存される。両検出器の外観を Fig. 3-5 に示す。本検出器は、 $\gamma$  線のスペクトル測定はできないが、検出器が大きいため、比較的  $\gamma$  線の感度が高い。次章以降、両検出器の比較について示す。



Fig. 3-5 PS 検出器の外観

### 3.3. 線源による試験

点線源を各々の検出器に照射し、レスポンス (cps/Bq) を求め、比較を行った。点線源は、検出器の実効中心から、30 cm の場所に置き、1800 秒間測定を行った。各々の検出器の全係数率からバックグラウンドを差し引き、得られた計数率から点線源の放射能で割り算し、レスポンスとした。結果を、Table 3-1 にまとめる。LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器は PS 検出器と比較すると、500 keV 以上の  $\gamma$  線エネルギーである線源 (<sup>137</sup>Cs, <sup>22</sup>Na, <sup>60</sup>Co) に対して、1/3 程度であった。この差は、検出器の大きさに起因している。一方、500 keV 以下の  $\gamma$  線エネルギーである線源 (<sup>133</sup>Ba, <sup>152</sup>Eu) については PS のレスポンスを上回った。これは、PS のディスクリレベルが高いこと (150 keV 以下相当) が影響していると考えられる。なお、LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器のディスクリレベルは、30 keV 以下で設定している。

LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器は  $\gamma$  線エネルギーの測定が可能であるため、コベル法<sup>9)</sup>により、ピーク面積を計算しレスポンスを算出し、Fig. 3-6 にエネルギー毎にプロットした。図に示すように、エネルギーとレスポンスの関係は、逆相関関係にあることが分かる。実際の福島県を中心とする現場においては、<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Cs が存在し、500 keV 以下の散乱線成分が大きいと考えられるため、単純に点線源で得られた比較結果と整合しないと考えられる。そこで、2 種の検出器で同じ評価が可能であることを現場において、同フライト条件で同じ場所をフライトすることによって、比較した。次章より結果を示す。

Table 3-1 点線源によるレスポンス比較

Nuclide	Half-life	Ini. Radi. (kBq) <sup>*1</sup>	Energy (keV)	Branching ratio (%)	Ave. Energy	Response (cps/Bq) <sup>*2</sup>	
						LaBr <sub>3</sub> : Ce	PS
Cs-137	30.04	8360	661.7	85.1	662	0.0028	0.0098
Na-22	2.609	9930	1274.5	99.94	1275	0.0100	0.0322
Co-60	5.271	10230	1173.2	99.9	1253	0.0047	0.0186
			1332.5	100			
Ba-133	10.52	10330	81	34.1	274	0.0162	0.0113
			276.4	7.164			
			302.9	18.33			
			356	62.05			
			383.8	8.94			
Eu-152	13.537	9970	121.8	28.58	758	0.0222	0.0154
			244.7	7.58			
			867.4	4.245			
			964.1	14.6			
			1121.1	13.64			
			1408	21			
*1: Reference date: 28/5/2012							
*2: Distance from det. to source is 30 cm, Mea. Time: 1800 s							

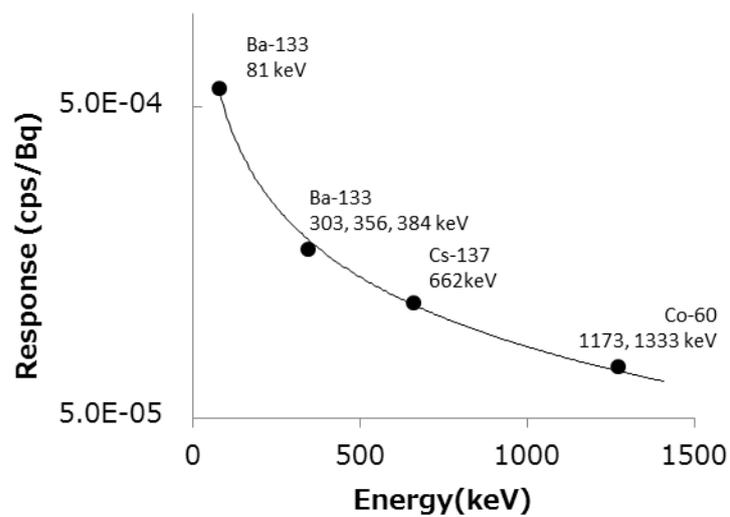


Fig. 3-6 LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器のエネルギー特性 (コベル法によりピーク面積を抽出)

#### 4. データ取得及び解析方法

##### 4.1. 上空での測定値の地上への換算に関する基本的な考え方

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

- 測定の範囲は、上空を頂点とし対地高度を高さとした直角三角錐の底面部分に該当する地上の放射線の平均値。
- 測定対象となる地表は、平坦かつ放射線の分布も一様とし、換算係数を設定する。

このような条件における放射線状況を確認するため、 $\gamma$ 線の遮蔽計算に広く用いられている点減衰核積分コード QAD-CGGP2R を用いて、 $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  が無限平板条件 (半径 1000 m $\times$ 1 mm の円柱線源) で同量の放射エネルギーで分布していると仮定し、対地高度と線量率の関係について計算した。計算結果について Fig. 4-1 に示す。このように、対地高度 50 m 以上では、線量率と対地高度は指数関数の関係にあることがわかる。一方、50 m 以下では、指数の関係から外れることがわかる。これは、50 m 以上では地表面からの放射線が検出器に対し、平行入射に近いが、50 m 以下では周辺から入射される放射線の影響を受けることが示唆される。本結果より、無人ヘリコプターのフライトの条件として、50 m 以上の対地高度を条件とした。また、高度補正では、指数関数による近似式を用いることとする。

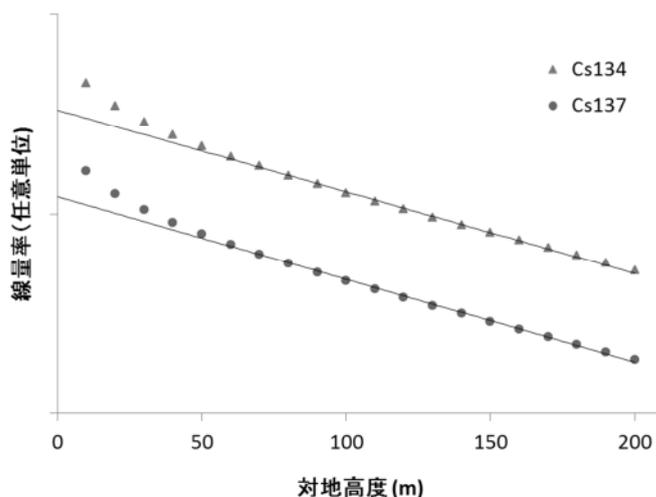


Fig. 4-1 測定場所の対地高度と線量率の減衰の関係 (QAD による計算結果)

##### 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変えている。Fig. 4-2 にデータ取得のイメージを示す。また、測定データは、LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器及び PS 検出器ともに 1 秒ごとに GPS の位置情報と検出器の全計数率を記録した。また、LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器については  $\gamma$ 線のスペクトルについても記録した。

- 速度 : 4 - 8 m/s (=14.4 - 28.8 km/h)
- メッシュ : 80 m
- 対地高度 : 80 m

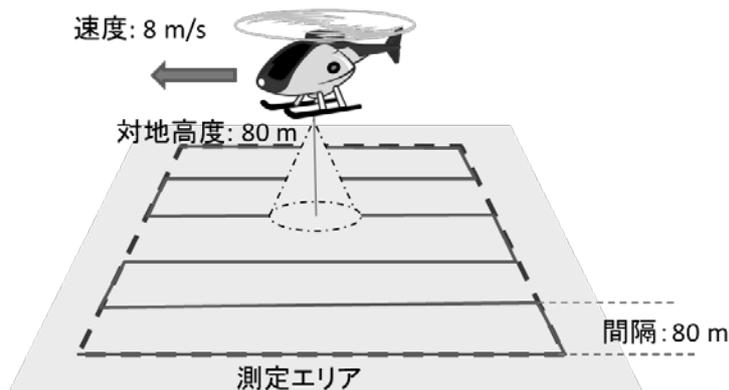


Fig. 4-2 データ取得のためのフライト条件イメージ

4.3. キャリブレーションフライトによるパラメータ取得

上空からのデータを、地上から高さ 1 m における放射線量や地表面の放射性セシウムの沈着量に換算するため、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実施地点（以下、キャリブレーションポイント）は、半径 100 m の範囲内で線量率の勾配が小さい場所及び地形の平坦な地点を選定した。地上の線量率は、人手により、NaI シンチレーション式サーベイメータ（日立 Aloka 社製 TCS-171B）と電離箱式サーベイメータ（日立 Aloka 社製 ICS-323C）を用いて半径 100 m の範囲内で 25 ポイントを目安に 1 m 高さの空間線量率の測定を行った。

キャリブレーションフライトは、10 m～120 m まで高度を変化させ、データを取得した。取得したデータを、高度と計数率をプロットし、近似した指数関数の傾きを、高度による実効的な減弱係数 (AF:  $m^{-1}$ ) とした。また、基準高度 (80 m) においてホバリングしたデータと地上で測定した線量率の平均値を比較し、線量換算係数 (CD:  $cps/[\mu Sv/h]$ ) を求めた。Fig. 4-3 にキャリブレーションフライトのイメージについて示す。

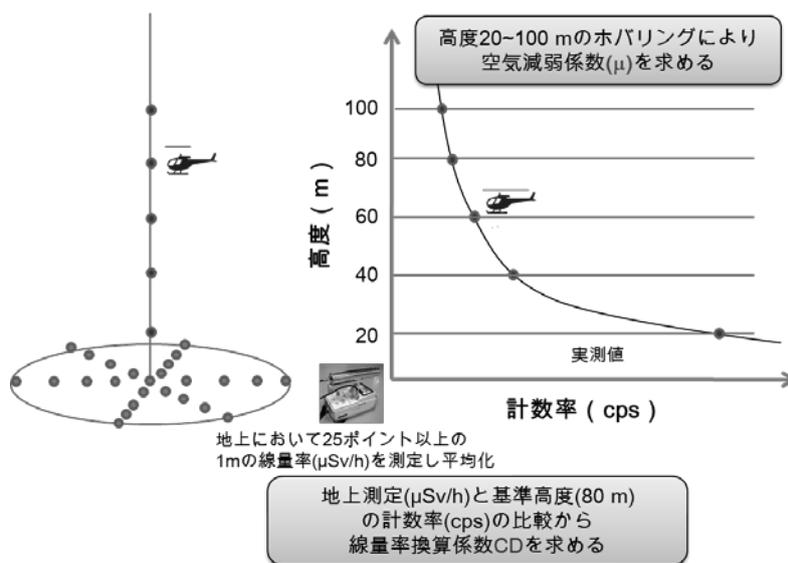


Fig. 4-3 キャリブレーションフライトのイメージ

#### 4.4. バックグラウンド（自己汚染と宇宙線）

本測定法において、計数される放射線は主に以下の4種類に分けられる。

- ① 放射性セシウムからの $\gamma$ 線
- ② 天然の放射性核種からの $\gamma$ 線
- ③ 自己汚染
- ④ 宇宙線

本方法において①と②の弁別については、次章以降に述べる。③及び④については、海上において基準高度 80 m 上空のデータを取得することによって、減算した。LaBr<sub>3</sub>:Ce の海上で取得したスペクトルと地上で取得したスペクトルの比較を、Fig. 4-4 に示す。本データの測定時間は 1,800 秒とした。

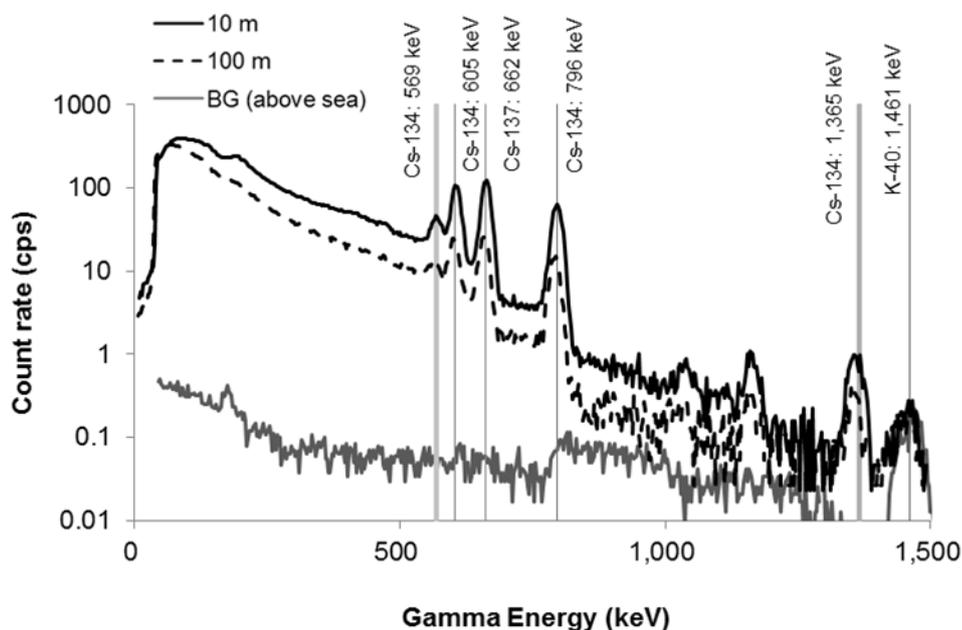


Fig. 4-4 海上と地上における LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器による $\gamma$ 線スペクトルの比較（測定時間 1,800 秒）

#### 4.5. 解析のフロー

解析は、一般的にわかりやすいように、

- ① 地上から 1 m 地点における空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ; 地上でのサーベイメータと比較可能)、
- ② 放射性セシウムの地表沈着量 ( $\text{Bq/m}^2$ ;  $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ )

とした。

解析手法のフローについて、Fig. 4-5 に示す。取得したデータは、キャリブレーションフライトで取得したパラメータを用いて、地上高さ 1 m の空間線量率に換算した。その後、減衰補正を行い、放射性セシウムの沈着量に換算した。換算後、地上で取得した線量率のデータと比較し、妥当性を確認した後、内挿法の一つであるクリギングによりコンター図を作成した。次章より、詳細を示す。

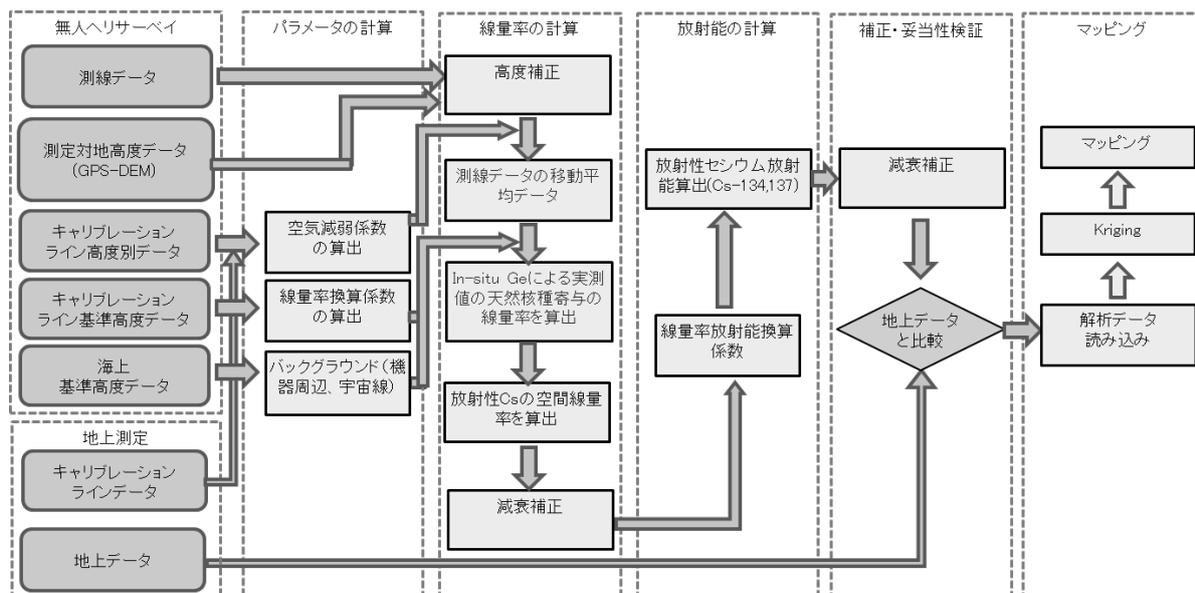


Fig. 4-5 無人ヘリ解析方法のフロー

#### 4.6. 線量率への換算方法

##### 4.6.1. 高度補正係数

4.3 節に示したように、測定点における対地高度の補正を行うために、キャリブレーションフライトで取得したデータを基に、実効的な空気減弱係数(以下、AF)を求めた。高度補正には、計算式[1]を用いて、空気減弱係数から高度補正係数 HF を算出した。

$$HF = \exp(AF \times (H_{sd} - H_a)) \quad [1]$$

ここで、

HF: 高度補正係数

H<sub>sd</sub>: 基準高度(80 m)

H<sub>a</sub>: 対地高度(GPS 高度-DEM-ジオイド高度-設定残差)

対地高度の算出には、GPS で記録した楕円対地高度から公開されている 10 m メッシュの数値標高モデル(DEM: Digital Elevation Model)<sup>10)</sup>、ジオイド高度及び設定残差を差し引いて求めた。設定残差は GPS の誤差を考慮し、無人ヘリが離陸前と離陸後において対地高度が 0 m になるようにした設定値である。

キャリブレーションポイントにおいて 49 個の高度補正用データを測定し、そのうち 32 個の平均値を最終的な高度補正係数とした。選定基準は、全計数率の低高度データが理論上の高度補正関数から外れるものは測定場所が均一な無限平面である仮定が成り立たないとして除外し、さらに除外したデータを母集団とする標準偏差の 2σ の範囲を超えるデータを除外した。すべての高度補正用データを Appendix 1 に示す。LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器と PS 検出器の AF について Table 4-1 及び Table 4-2 に示す。

#### 4.6.2. 線量換算係数

4.3 節に示したように、キャリブレーションポイントの地上における測定点の平均値とその上空 80 m をフライトした計数率の平均値の比を取って、線量換算係数（以下、CD）を算出した。無人ヘリに搭載した  $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$  検出器及び PS 検出器がヘリの外側に設置しているため、CD は無人ヘリの種類に依存しない（無人ヘリが検出器のレスポンスに寄与しない）。解析に使用した CD は、キャリブレーションラインの CD の平均値とした。ただし、4.5.1 項の高度補正係数と同様に、キャリブレーションポイントが均一な無限平面が成り立たず、標準偏差の  $2\sigma$  を超えるデータについては除外した。 $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$  検出器と PS 検出器の CD について Table 4-1 及び Table 4-2 に示す。また、Table 4-1 及び Table 4-2 で示したデータの平均値と標準偏差及び地上高さ 1m の線量率に換算した場合の検出下限値を Table 4-3 に示す。なお、ここでいう、線量率には、サーベイメータの読み値を比較対象にしているため、天然核種による放射線量率が含まれる。

Table 4-1 AF および CD の一覧(1/2) [LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器]

Category	Date	Latitude(°)	Longitude(°)	Attenuation Factor(m <sup>-1</sup> )	Conversion Factor (cps/(μSv/h))
試験飛行のモニタリング	2012年08月30日	37.42871	141.00989	-6.29E-03	2.36E+03
試験飛行のモニタリング	2012年08月30日	37.42788	141.00889	-4.13E-03	2.94E+03
試験飛行のモニタリング	2012年08月30日	37.42961	141.00453	-3.68E-03	3.47E+03
試験飛行のモニタリング	2012年08月31日	37.45423	141.03375	-4.98E-03	2.91E+03
原子力発電所周辺のモニタリング1回目	2012年10月02日	37.43124	141.04087	-7.74E-03	2.30E+03
原子力発電所周辺のモニタリング1回目	2012年10月06日	37.44523	141.03569	-4.17E-03	3.63E+03
河川敷のモニタリング	2012年10月06日	37.46022	141.03032	-9.62E-03	1.73E+03
フライトパターンによる影響	2012年10月07日	37.46114	141.02994	-4.01E-03	3.79E+03
原子力発電所周辺のモニタリング1回目	2012年10月08日	37.49161	140.98629	-5.12E-03	3.10E+03
原子力発電所周辺のモニタリング1回目	2012年10月08日	37.43452	141.00981	-5.56E-03	3.97E+03
除染前後のモニタリング	2012年10月09日	37.44044	140.99487	-4.06E-03	6.99E+03
原子力発電所周辺のモニタリング1回目	2012年10月10日	37.40367	140.98341	-6.46E-03	2.70E+03
原子力発電所周辺のモニタリング1回目	2012年10月11日	37.38448	141.03228	-5.56E-03	1.95E+03
原子力発電所周辺のモニタリング1回目	2012年10月11日	37.41389	140.99985	-5.58E-03	1.95E+03
原子力発電所周辺のモニタリング1回目	2012年10月12日	37.45503	141.03422	-4.44E-03	2.92E+03
原子力発電所周辺のモニタリング1回目	2012年10月12日	37.45425	141.03336	-5.64E-03	3.13E+03
河川敷のモニタリング	2012年10月17日	37.49138	141.02802	-5.69E-03	2.43E+03
除染前後のモニタリング	2012年10月18日	37.49132	141.02798	-6.14E-03	2.47E+03
河川敷のモニタリング	2012年10月19日	37.49129	141.02798	-6.22E-03	2.32E+03
河川敷のモニタリング	2012年10月20日	37.49133	141.02799	-5.97E-03	2.44E+03
河川敷のモニタリング	2012年10月21日	37.49147	141.02802	-5.56E-03	2.52E+03
河川敷のモニタリング	2012年10月22日	37.45357	141.02916	-6.25E-03	2.44E+03
河川敷のモニタリング	2012年10月24日	37.45360	141.02945	-6.34E-03	2.43E+03
河川敷のモニタリング	2012年10月25日	37.45358	141.02919	-6.12E-03	2.44E+03
除染前後のモニタリング	2012年10月26日	37.45355	141.02918	-6.15E-03	2.46E+03
河川敷のモニタリング	2012年10月31日	37.80094	140.95332	-6.20E-03	3.12E+03
河川敷のモニタリング	2012年11月01日	37.80090	140.95332	-6.24E-03	2.94E+03
河川敷のモニタリング	2012年11月07日	37.68416	140.99467	-5.67E-03	2.53E+03
河川敷のモニタリング	2012年11月08日	37.68411	140.99469	-5.65E-03	2.50E+03
河川敷のモニタリング	2012年11月14日	37.63682	141.01947	-5.31E-03	3.23E+03

※塗りつぶしは除外したデータ

Table 4-1 AF および CD の一覧(2/2) [LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器]

Category	Date	Latitude(°)	Longitude(°)	Attenuation Factor(m <sup>-1</sup> )	Conversion Factor (cps/(μSv/h))
河川敷のモニタリング	2012年11月16日	37.58915	141.01108	-6.32E-03	2.46E+03
河川敷のモニタリング	2012年11月19日	37.56920	141.01367	-6.51E-03	2.31E+03
除染前後のモニタリング	2012年11月21日	37.36461	140.99524	-7.39E-03	1.84E+03
除染前後のモニタリング	2012年11月21日	37.35917	140.99546	9.10E-04	1.07E+04
除染前後のモニタリング	2012年11月22日	37.33083	140.88449	-3.97E-03	3.62E+03
除染前後のモニタリング	2012年11月23日	37.32844	140.88494	-5.86E-03	3.83E+03
除染前後のモニタリング	2012年11月28日	37.56074	140.76361	-2.44E-03	5.33E+03
積雪影響評価のモニタリング	2012年11月29日	37.43677	140.79662	-6.29E-03	2.69E+03
積雪影響評価のモニタリング	2012年11月29日	37.43079	140.79578	-5.58E-03	3.02E+03
積雪影響評価のモニタリング	2012年11月29日	37.43360	140.80702	-5.30E-03	2.84E+03
河川敷のモニタリング	2012年12月01日	37.49134	141.02800	-5.73E-03	2.64E+03
除染前後のモニタリング	2012年12月02日	37.41689	140.82300	-5.52E-03	3.49E+03
河川敷のモニタリング	2012年12月03日	37.49131	141.02800	-5.82E-03	2.57E+03
河川敷のモニタリング	2012年12月11日	37.49134	141.02800	-5.74E-03	2.59E+03
河川敷のモニタリング	2013年01月08日	38.05464	140.91207	-8.21E-03	2.03E+03
河川敷のモニタリング	2013年01月09日	38.05464	140.91213	-7.98E-03	2.09E+03
積雪影響評価のモニタリング	2013年01月16日	37.43076	140.79547	-5.31E-03	3.87E+03
原子力発電所周辺のモニタリング2回目	2013年01月27日	37.45356	141.02914	-6.16E-03	2.72E+03
原子力発電所周辺のモニタリング2回目	2013年02月09日	37.45356	141.02926	-6.39E-03	2.78E+03
平均 (n = 32)				-6.06E-03	2.57E+03
標準偏差 (2σ)				1.34E-03	6.92E+02

※塗りつぶしは除外したデータ

Table 4-2 AF および CD の一覧(1/3)[PS 検出器]

Category	Date	Latitude(°)	Longitude(°)	Attenuation Factor(m <sup>-1</sup> )	Conversion Factor (cps/(μSv/h))
除染前後のモニタリング	2011年12月02日	37.50432	140.76293	-9.15E-03	1.08E+03
除染前後のモニタリング	2011年12月05日	37.49001	140.98603	-1.27E-02	9.64E+02
除染前後のモニタリング	2011年12月05日	37.56077	140.76348	-8.72E-03	1.35E+03
除染前後のモニタリング	2011年12月06日	37.33168	140.88541	-1.02E-02	1.24E+03
除染前後のモニタリング	2011年12月06日	37.32883	140.88502	-1.34E-02	7.41E+02
除染前後のモニタリング	2011年12月06日	37.58482	140.70130	-1.07E-02	7.98E+02
除染前後のモニタリング	2011年12月12日	37.69338	140.74970	-1.34E-02	8.56E+02
除染前後のモニタリング	2011年12月12日	37.55419	140.96135	-1.24E-02	7.23E+02
除染前後のモニタリング	2011年12月14日	37.35876	140.99523	-7.29E-03	2.32E+03
除染前後のモニタリング	2011年12月14日	37.36455	140.99504	-1.42E-02	7.76E+02
除染前後のモニタリング	2011年12月15日	37.41031	141.02096	-4.70E-03	9.44E+02
除染前後のモニタリング	2011年12月15日	37.21429	140.99165	-9.60E-03	1.27E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月06日	37.45721	140.81147	-9.26E-03	3.00E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月06日	37.44650	140.80601	-1.03E-02	3.10E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月06日	37.44309	140.80415	-1.02E-02	3.40E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月06日	37.43970	140.82156	-5.61E-03	5.31E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月07日	37.42336	140.81881	-9.37E-03	3.49E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月07日	37.41754	140.82346	-1.04E-02	3.49E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月08日	37.41382	140.82110	-7.91E-03	3.55E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月08日	37.38870	140.83505	-8.05E-03	4.31E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月09日	37.40163	140.81692	-9.80E-03	2.83E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月09日	37.39693	140.87252	-8.05E-03	3.51E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月09日	37.38222	140.86910	-6.90E-03	3.82E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月10日	37.39357	140.80754	-3.23E-03	4.23E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月10日	37.36588	140.88240	-1.14E-02	3.13E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月10日	37.33886	140.89834	-9.01E-03	3.38E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月10日	37.37153	140.87366	-8.28E-03	5.25E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月10日	37.35258	140.89483	-7.35E-03	4.96E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月12日	37.34178	140.84838	-7.85E-03	4.23E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月12日	37.33593	140.84722	-9.64E-03	3.23E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月13日	37.51323	140.77659	-9.25E-03	3.32E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月14日	37.56333	140.67840	-7.06E-03	5.33E+03

※塗りつぶしは除外したデータ

Table 4-2 AF および CD の一覧(2/3)[PS 検出器]

Category	Date	Latitude(°)	Longitude(°)	Attenuation Factor(m <sup>-1</sup> )	Conversion Factor (cps/(μSv/h))
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月15日	37.69861	140.66802	-1.02E-02	3.42E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月15日	37.68862	140.65269	-9.50E-03	3.64E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月15日	37.69133	140.67578	-9.91E-03	3.76E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月25日	37.27542	140.97729	-1.01E-02	3.21E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月25日	37.27233	140.98855	-9.33E-03	3.58E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月25日	37.27499	140.95598	-8.24E-03	3.39E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月26日	37.27780	140.99958	-1.03E-02	3.36E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月26日	37.26690	141.00041	-1.11E-02	3.34E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月27日	37.27112	141.00272	-7.55E-03	4.79E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月27日	37.27881	141.00892	-8.90E-03	3.68E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月27日	37.26218	140.98591	-8.70E-03	3.69E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月27日	37.25181	141.00056	-7.45E-03	4.88E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月28日	37.27793	141.01199	-8.54E-03	3.94E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月29日	37.27088	141.01557	-1.11E-02	3.15E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月29日	37.25866	141.00673	-1.19E-02	3.24E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年01月31日	37.45710	141.00100	-8.41E-03	5.81E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月01日	37.46819	141.00562	-6.53E-03	5.11E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月01日	37.45262	141.02874	-8.61E-03	3.56E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月03日	37.46566	141.02458	-8.18E-03	4.40E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月03日	37.45706	141.02241	-1.36E-02	3.00E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月03日	37.46237	141.03104	-7.83E-03	4.33E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月04日	37.48675	141.00106	-5.29E-03	5.32E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月05日	37.48343	140.99209	-1.04E-02	4.35E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月05日	37.49469	141.01886	-8.08E-03	4.56E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月05日	37.46346	141.01820	-8.91E-03	3.37E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月06日	37.51056	140.99746	-6.97E-03	4.80E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月06日	37.50338	141.01464	-7.90E-03	4.17E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月06日	37.50688	141.02426	-9.13E-03	3.88E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月08日	37.51241	141.00009	-8.86E-03	4.53E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月08日	37.51079	141.02121	-8.64E-03	4.12E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月09日	37.53947	140.99579	-8.15E-03	3.95E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月09日	37.49181	140.98563	-1.10E-02	2.68E+03

※塗りつぶしは除外したデータ

Table 4-2 AF および CD の一覧(3/3)[PS 検出器]

Category	Date	Latitude(°)	Longitude(°)	Attenuation Factor(m <sup>-1</sup> )	Conversion Factor (cps/(μSv/h))
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月10日	37.50252	140.99073	-8.77E-03	5.11E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月10日	37.49994	140.99753	-8.37E-03	4.19E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月21日	37.51771	140.99488	-7.76E-03	4.52E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月26日	37.56044	140.97600	-1.00E-02	3.55E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年02月27日	37.55329	140.96896	-9.38E-03	4.19E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年03月03日	37.56551	140.97352	-9.15E-03	4.05E+03
警戒区域内の詳細モニタリング	2012年03月03日	37.57383	140.95806	-9.06E-03	4.15E+03
除染前後のモニタリング	2012年02月21日	37.31127	140.97512	-1.10E-02	2.50E+03
除染前後のモニタリング	2012年02月21日	37.24624	140.98973	-6.34E-03	5.24E+03
除染前後のモニタリング	2012年02月22日	37.21433	140.99131	-4.27E-03	5.92E+03
除染前後のモニタリング	2012年02月22日	37.41081	141.02056	-6.57E-03	3.14E+03
除染前後のモニタリング	2012年02月24日	37.36420	140.99447	-1.19E-02	2.07E+03
除染前後のモニタリング	2012年02月24日	37.48971	140.98587	-1.10E-02	2.78E+03
除染前後のモニタリング	2012年02月26日	37.41699	140.82327	-7.70E-03	4.20E+03
除染前後のモニタリング	2012年02月26日	37.41745	140.82300	-9.05E-03	3.75E+03
除染前後のモニタリング	2012年02月26日	37.55400	140.96142	-5.66E-03	5.57E+03
除染前後のモニタリング	2012年02月27日	37.69294	140.74899	-7.22E-03	1.11E+04
除染前後のモニタリング	2012年02月28日	37.40364	140.98443	-2.75E-03	1.45E+04
除染前後のモニタリング	2012年02月28日	37.69575	140.74980	-8.15E-03	3.32E+03
除染前後のモニタリング	2012年03月01日	37.50436	140.76287	-5.45E-03	6.61E+03
除染前後のモニタリング	2012年03月01日	37.32883	140.88558	-6.72E-03	5.59E+03
除染前後のモニタリング	2012年03月01日	37.33187	140.88539	-6.78E-03	4.75E+03
除染前後のモニタリング	2012年03月01日	37.58501	140.70149	-5.57E-03	7.03E+03
除染前後のモニタリング	2012年03月02日	37.48372	141.02907	-7.31E-03	4.87E+03
除染前後のモニタリング	2012年03月04日	37.50294	140.97182	-9.57E-03	3.73E+03
除染前後のモニタリング	2012年03月13日	37.54548	140.93717	-1.10E-02	2.99E+03
除染前後のモニタリング	2012年03月14日	37.55081	140.97013	-1.00E-02	3.26E+03
除染前後のモニタリング	2012年03月14日	37.56809	141.01988	-1.20E-02	1.60E+03
除染前後のモニタリング	2012年03月14日	37.56192	140.97669	-1.01E-02	3.42E+03
除染前後のモニタリング	2012年03月15日	37.56421	141.01026	-9.81E-03	3.46E+03
平均 (n = 63)				-8.96E-03	3.89E+03
標準偏差 (2σ)				2.89E-03	1.56E+03

※塗りつぶしは除外したデータ

Table 4-3 それぞれの検出器のパラメータ

Detector	Size (mm)	CD <sub>1m</sub> (cps/μSv/h at 1 m on the ground) #	AF (m <sup>-1</sup> ) #	Number of measurements (n)	MDA* (μSv/h)
LaBr <sub>3</sub> :Ce	38 φ x 38 (3 set); 0.13 L	2.57x10 <sup>3</sup> ± 1.3x10 <sup>2</sup>	- 0.00606 ± 0.0031	32	0.039
PS	270 x 300 x 20; 1.6 L	3.89x10 <sup>3</sup> ± 1.6x10 <sup>2</sup>	- 0.00896 ± 0.0029	63	0.010

# Error: 2 sigma

\* Measurement at the AGL of 80 m above the ground

#### 4.7. 放射性セシウムの沈着量への換算

##### 4.7.1. 天然核種の弁別

γ線スペクトルを測定できる検出器は、スペクトル情報から天然の放射性核種の影響を減算し、放射性セシウムのみを抽出することが可能である<sup>11)</sup>。しかしながら、今回用いたPSはエネルギー情報を得ることができないし、LaBr<sub>3</sub>:Ce検出器はFig. 3-4で示したように、自己汚染の影響により、天然核種の影響を正確に減算することが難しい。そこで、In-situ Ge検出器(Canberra社製Falcon 5000)を用いて、天然の放射性核種による線量率の測定を、発電所周辺において104カ所実施し、その平均値を差し引くこととした。Fig. 4-6に測定箇所と測定結果について示す。平均値は、31.3 nSv/hであった。なお、実測結果から、天然核種を減算する方法についても検討している。詳細は、4.13節にて検討結果をまとめる。

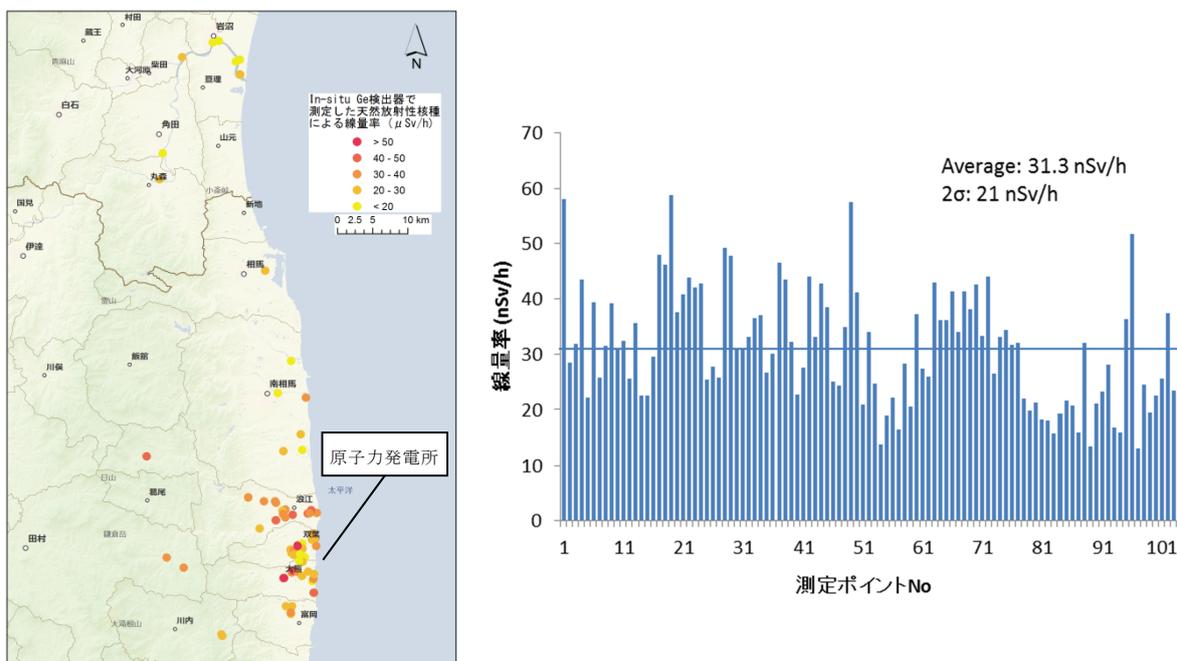


Fig.4-6 In-situ Ge 検出器による天然放射性核種起源の線量率測定結果

#### 4.7.2. 線量-放射能換算係数

線量率から放射能への換算は、文献<sup>12)</sup>に記載のある $\beta=1$ の場合の換算係数を適用し ( $^{134}\text{Cs}$ :  $4.44 \times 10^3$  ( $\mu\text{Gy/h}$ )/( $\text{kBq/m}^2$ ),  $^{137}\text{Cs}$ :  $1.73 \times 10^3$  ( $\mu\text{Gy/h}$ )/( $\text{kBq/m}^2$ )), あらかじめ求めておいた  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  比を用いて、地上 1m 地点における線量率から地表における  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  の放射性物質濃度に換算した。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  比は、2011 年 8 月 13 日に福島県で 50 ポイント以上の In-situ Ge による測定データを取得し、2011 年 8 月 13 日時点での  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs} = 0.917$  を基本とした<sup>13)</sup>。その基準日から、データ取得日に減衰計算して換算した。なお、ここで、 $1 \text{ Sv} = 1.2 \text{ Gy}$  として換算した。

#### 4.8. 検出下限値

検出下限値を評価するに当たり、全線量率への換算方法及び放射性セシウムの沈着量の換算式を式[2] および式[3] に示す。これらの式をもとに、検出下限値について検討を行った。

$$D = \frac{1}{CD} \times (C_{all} - BG_{self}) \times \exp(-AF \times (H_{std} - H_m)) \quad [2]$$

$$Rd_{134} = \frac{1}{CD} \times (C_{all} - BG_{self} - BG_{nat}) \times \exp(-AF \times (H_{std} - H_m)) \times \frac{1}{CF} \times R_{\frac{134}{134+137}} \times DC_{134} \quad [3]$$

ここで、

D: 全線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )

$C_{all}$ : 全計数率 (cps)

$BG_{self}$ : 機体の汚染及び検出器の自己放射能 (cps)

CD: 線量率換算係数 (cps/( $\mu\text{Sv/h}$ ))

AF: 空気減弱係数 ( $\text{m}^{-1}$ )

$H_{std}$ : 基準高度 (m)

$H_m$ : 測定高度 (m)

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

$BG_{nat}$ : 天然起源の計数率 (cps)

CF: 線量率-放射能換算係数 (( $\mu\text{Sv/h}$ )/( $\text{Bq/m}^2$ ))

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

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

線量率の検出下限値は、機器周辺及び検出器の自己放射能 ( $BG_{self}$ ) のバックグラウンドに依存する。なお、空気中のラドン子孫核種も妨害核種として考えられるが、発電所の周辺の線量率が  $1 \mu\text{Sv/h}$  以上の場所を中心にフライトするため無視できると考える。なお、有人のヘリコプターを用いた航空機モニタリングにおいては、線量率の低い場所を測定する際に空気中のラドン子孫核種の影響が無視できないことが知られており<sup>3)</sup>、今後、線量率の低い場所の測定を実施する際には、考慮が必要と考える。 $BG_{self}$  は 2012 年 8 月 20 日に海上でホバリングし、測定した計数率 117 cps を用いた。Kaiser の  $3\sigma$  法<sup>14, 15)</sup> を用いて検出下限の計数率を求めると 154 cps となり、基準高度 80 m における全線量率の検出下限値は  $0.07 \mu\text{Sv/h}$  となった。

放射性セシウムの沈着量の検出下限値は、上記のバックグラウンドに加えて、天然核種起源

の放射能に依存する。天然核種の線量率は 4.7.1 項に記載した通り、福島第一原子力発電所の周辺で In-Situ Ge により測定した 31.3 nSv/h を用いた。これらの値を用いて 3 $\sigma$  法により放射性セシウムの沈着量の検出下限値を求めると 4 kBq/m<sup>2</sup> になった。

#### 4.9. 不確かさ

地上 1 m における線量率を算出する不確かさを論ずる上で、CD と AF は重要なファクタとなる。Table 4-1 に示したように、LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器では、CD 及び AF は計 49 回測定のうち有効なデータが 32 回で、CD 及び AF は両者ともおよそ 11 % の変動係数となった。この約 35% の不採用の理由として、キャリブレーションポイントよりも周辺の高線量地域の影響等により、理論上の均一な放射能の無限平面での測定条件でなかったことがあげられる。また、AF の違いによる高度補正係数 (HF) への影響を評価するために、例として、Table 4-1 に示した LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器により評価した AF の最大値及び最小値である -0.00498 m<sup>-1</sup> と -0.00798 m<sup>-1</sup> における HF の比 Fig. 4-7 に示す。本計算では、50 m を基準高度として示した。これは、AF の設定値の選択により、対地高度で 20 - 100 m の範囲内で、 $\pm 15\%$  程度の換算値の不確かさを引き起こすことを示している。本方法におけるパラメータの設定には、4.6.1 項や 4.6.2 項に示したように、多くのキャリブレーションフライトを実施し、真の値に近い数字を求めることが必要である。

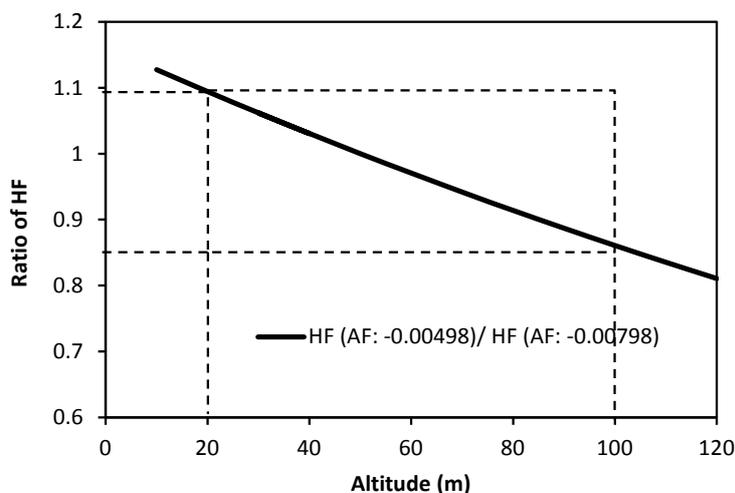


Fig. 4-7 HF と対地高度の関係

#### 4.10. 不感時間の補正

無人ヘリコプターを用いた放射線測定システムの不感時間について、<sup>137</sup>Cs 照射装置を用いて評価したところ LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器には 1.9  $\mu$ s、PS 検出器には 0.5  $\mu$ s の不感時間があることが分かった。不感時間による数え落としと Table 4-3 に示した換算係数により地上値に換算した線量率の関係を Fig. 4-8 に示す。これらの数え落としについては、式 [4] により、補正した。

$$N = \frac{m}{1 - m\tau} \quad [4]$$

n: 真の計数率

m: 測定された計数率

$\tau$ : システムの不感時間

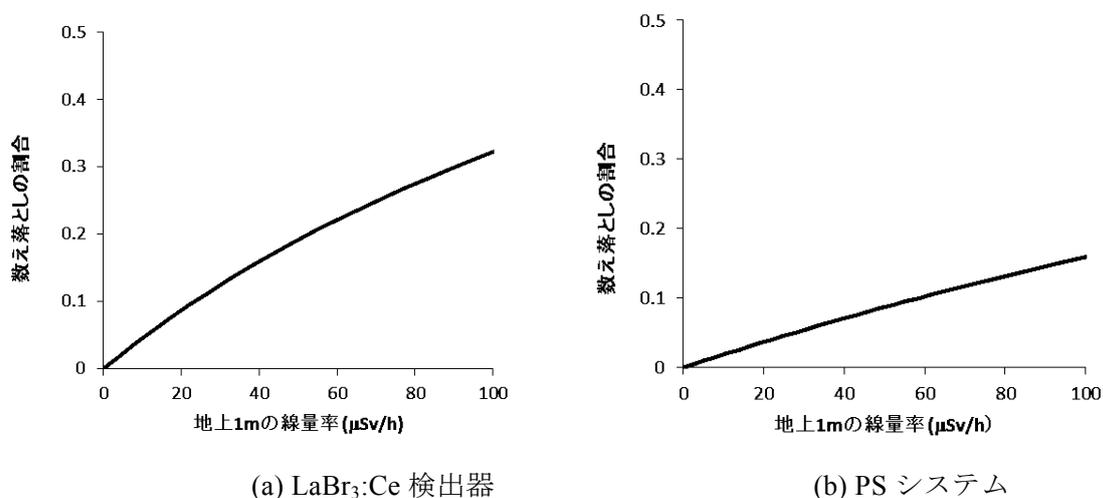


Fig. 4-8 数え落としの割合と対地高度 50 m で測定した場合の地上の線量率の関係

#### 4.11. マッピング

ArcGIS (ESRI, Co. Ltd.) を用いて、クリギングにより 1m 線量率分布図、放射性セシウム沈着量分布図を作成した。今回のマッピングでは検索範囲のポイント数を 36 にして行った。なお、測定時期などの違いで同じ測線のデータに差が出た場合は、ラスターデータのモザイク処理によって平均値とした。背景地図には、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用した。

#### 4.12. 検出器の比較

検出器の違いによる評価値の違いを考察するため、同じ場所において、同じフライト条件で、それぞれの検出器でデータを取得し、そのデータから、地上 1 m の線量率に換算した。換算の方法は 4 章に述べる方法を用いている。福島県浪江町の浪江駅前周辺において、同じフライト条件(対地高度: 50 m, 速度: 5 m/s) でデータを取得し、同じ地点における測定結果をプロットした結果を Fig. 4-9 に示す。このように、両検出器で評価した結果はよく一致している。本結果を基に、両検出器は、地上 1m の線量率の評価値に大きな違いはないと考えてよい。

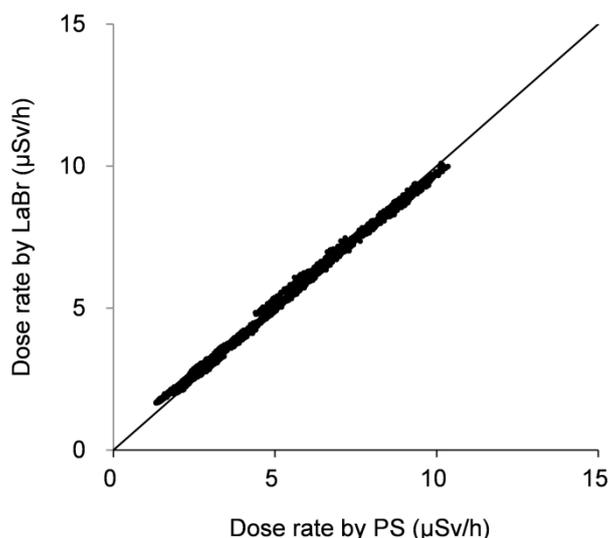


Fig. 4-9 LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器と PS 検出器の比較（上空からの測定結果）

4.13. フライトパターンによる影響

フライトパターンによる放射線分布マップへの影響を評価するため、前述した福島県浪江町の浪江駅前周辺において、測定方向、測定速度、測定高度を変えた試験を行った。2012 年 10 月 5 日にデータ 1 の北側一部を、ほかのデータはすべて 7 日に測定した。測定の条件を Table 4-4 に示す。本試験場所を選定した理由は、除染モデル実証事業において、除染作業が実施された場所であり、線量の勾配が大きいこと（2 km×4 km 程度の範囲で、1 - 10 μSv/h）及び地形が平坦（標高は、約 11 - 18 m）であることが挙げられる。なお、無人ヘリの測定方向は、1 測線の測定終了後、反対方向で隣の測線の測定を開始するいわゆる双方向フライト（楕形飛行）で行った。

Table 4-4 フライトパターン一覧

データ番号	測定年月日	測定方向	測定速度 (m/s)	測定高度 (m)	対地高度(m)		
					最大	最小	平均
1	2012/10/5,7	EW双方向	2	50	51.7	43.7	48.4
2	2012/10/7	EW双方向	5	50	50.0	42.9	48.1
3	2012/10/7	NS双方向	5	50	50.1	42.5	48.0
4	2012/10/7	EW双方向	8	50	52.0	44.1	49.6
5	2012/10/7	EW双方向	12	50	51.4	41.1	47.1
6	2012/10/7	EW双方向	8	20	19.7	16.0	17.9
7	2012/10/7	EW双方向	8	80	80.5	76.5	78.5

4.13.1 測定方向

東西と南北方向の 2 種類の測線を設定し、速度 5 m/s、高度 50 m で測定を行った (Table 4-4: データ番号 2 及び 3)。Fig. 4-10 に 1 m 線量率分布図、Fig. 4-11 に同一地点の線量率評価値を散布図にして示す。このように、測定方向による放射線量マップの差は少ない。本試験の狙いは、地上の線量の変化に対し、測定の方で変化に追従しない部分が出てくることを想定した。し

かしながら、速度や高度の条件が一定であれば、1 秒毎にデータを取得しているため、測定方向は大きく影響しないことを示唆している。

#### 4.13.2. 測定速度

速度による放射線量マップの差を考察するために、東西方向、高度 50 m で速度を 2 m/s、5 m/s、8 m/s、12 m/s の 4 段階に変えて測定を行った (Table 4-4; データ番号 1, 2, 4, 5)。Fig. 4-12 にそれぞれの条件の 1 m 線量率分布図を示す。このように、速度による差は顕著には見られない。最高の速度である 12 m/s であっても測定時間単位である 1 秒間には、移動距離は 12 m 程度であり、50 m 上空からの測定範囲が半径 50 m の円であることを考えると、この程度の速度の差は測定値に大きな影響を与えないことを示唆している。

#### 4.13.3. 測定高度

高度による放射線量マップの差を考察するために、東西方向、速度 8m/s で高度を 20 m、50 m、80 m の 3 段階に変えて測定を行った (Table 4-4; データ番号 2, 6, 7)。Fig. 4-13 に 1 m 線量率分布図を示す。また、Fig. 4-14 に高度 50 m の線量換算値を X 軸にとり、Y 軸に 20 m 及び 80 m の線量換算値をプロットした。このように、高度を低くするほど、線量率は高く評価されることが分かる。これは、低高度になるほど、測定範囲が小さくなり、地上の線量をより正確にトレースできることと低高度になるほど、直下の測定場所よりも周辺の線量率の影響を受けてしまうことを示している。すなわち、低高度では、単純な高度補正が難しくなることを示している。本結果から、対地高度は概ね 80 m になるようにフライトすることとした。

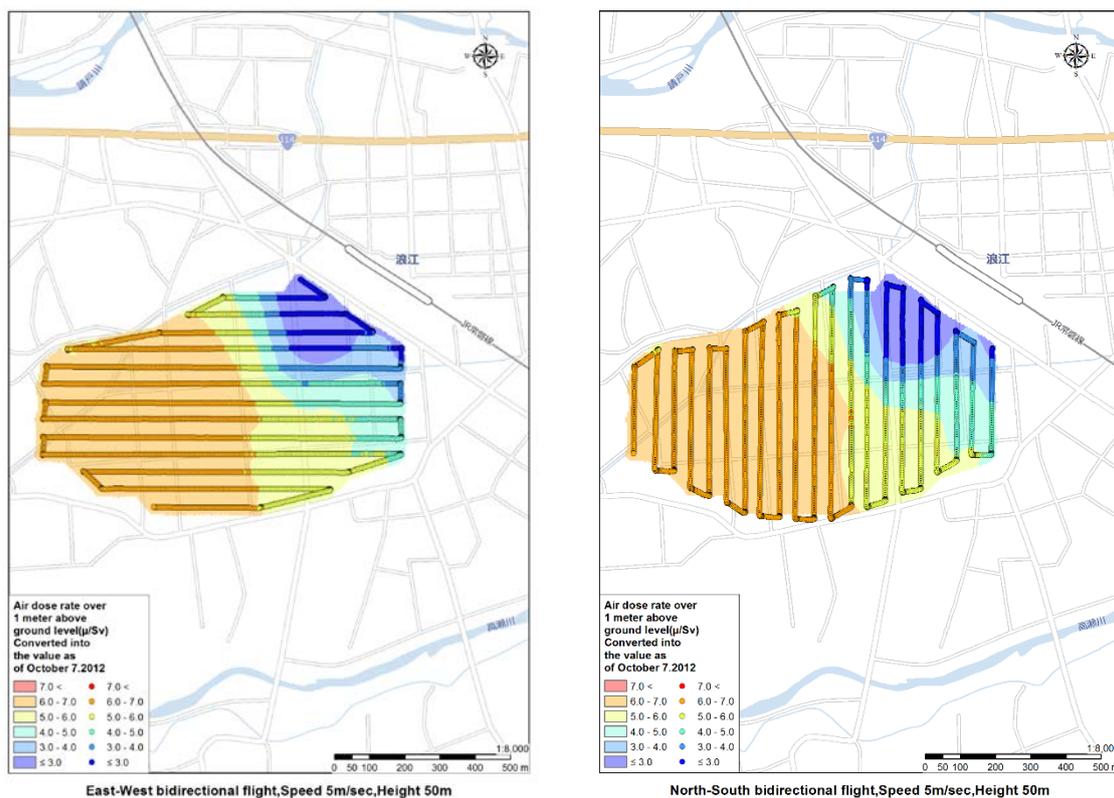


Fig. 4-10 フライト方向の違いによる放射線量マップの比較

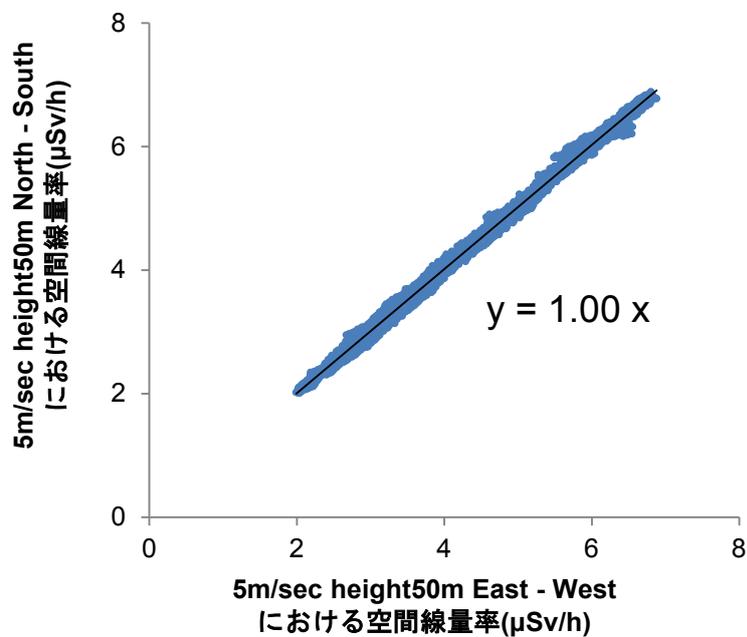


Fig. 4-11 フライト方向の違いによる放射線量の比較 (散布図)

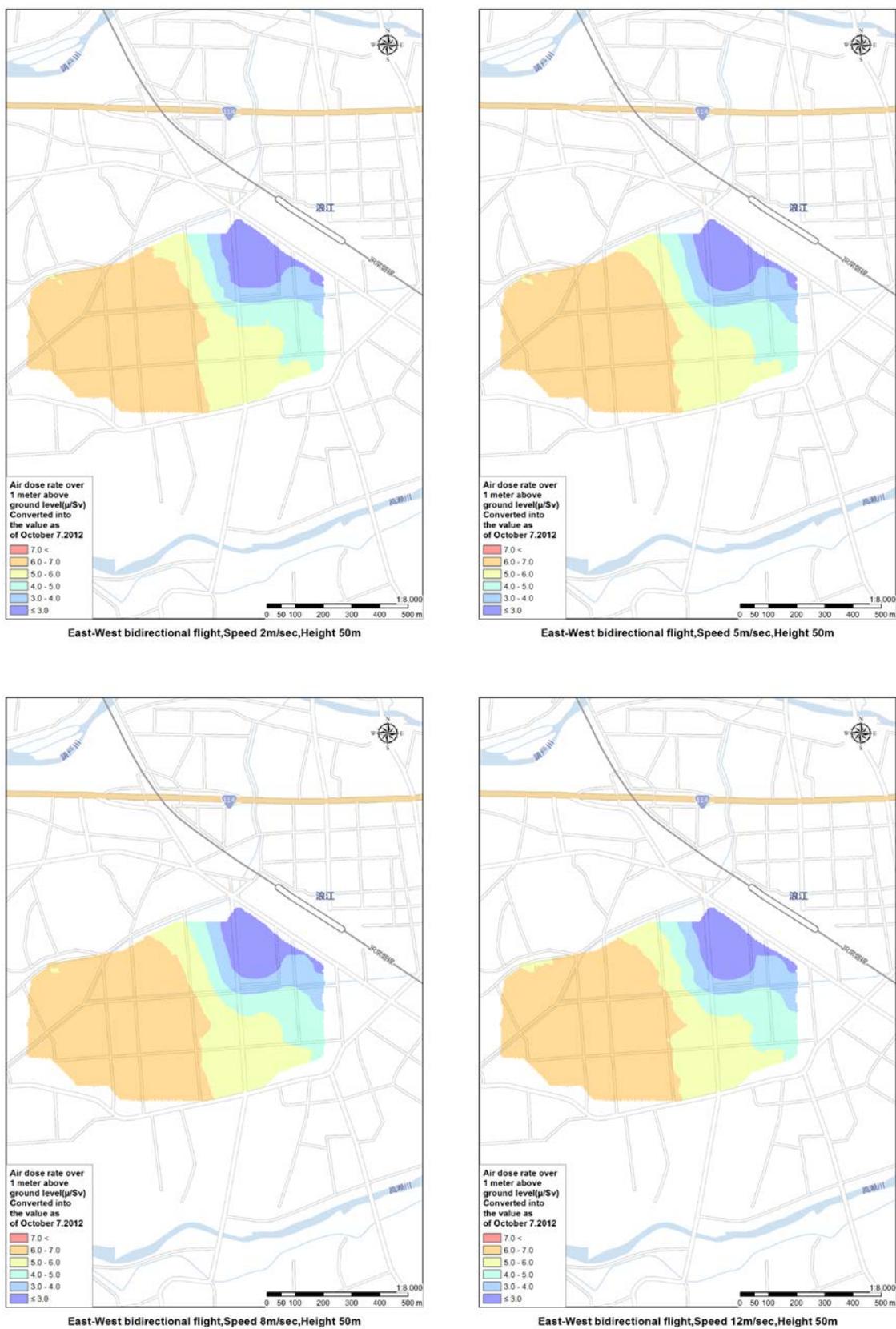


Fig. 4-12 速度による放射線量マップの比較

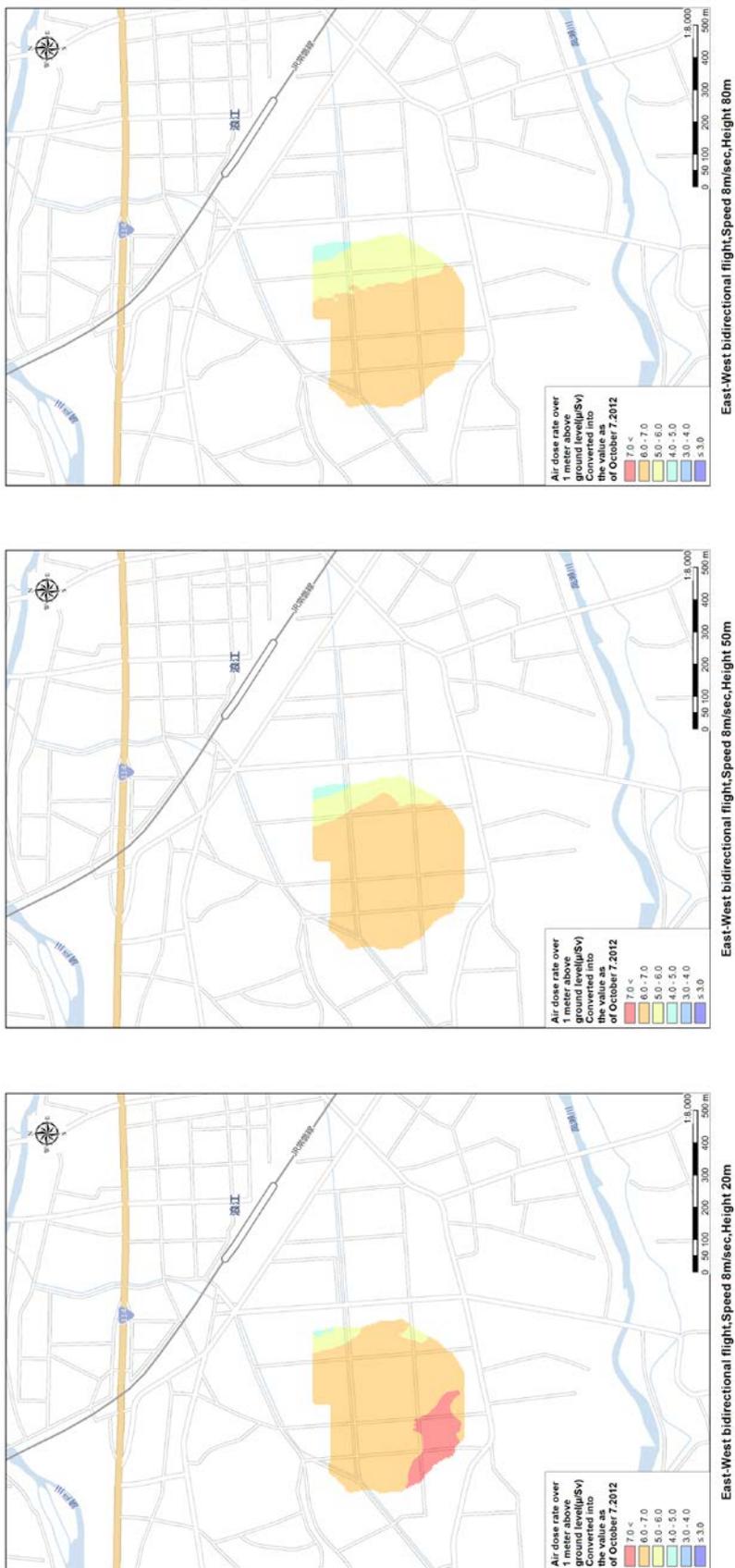


Fig. 4-13 高度による放射線量マップの比較

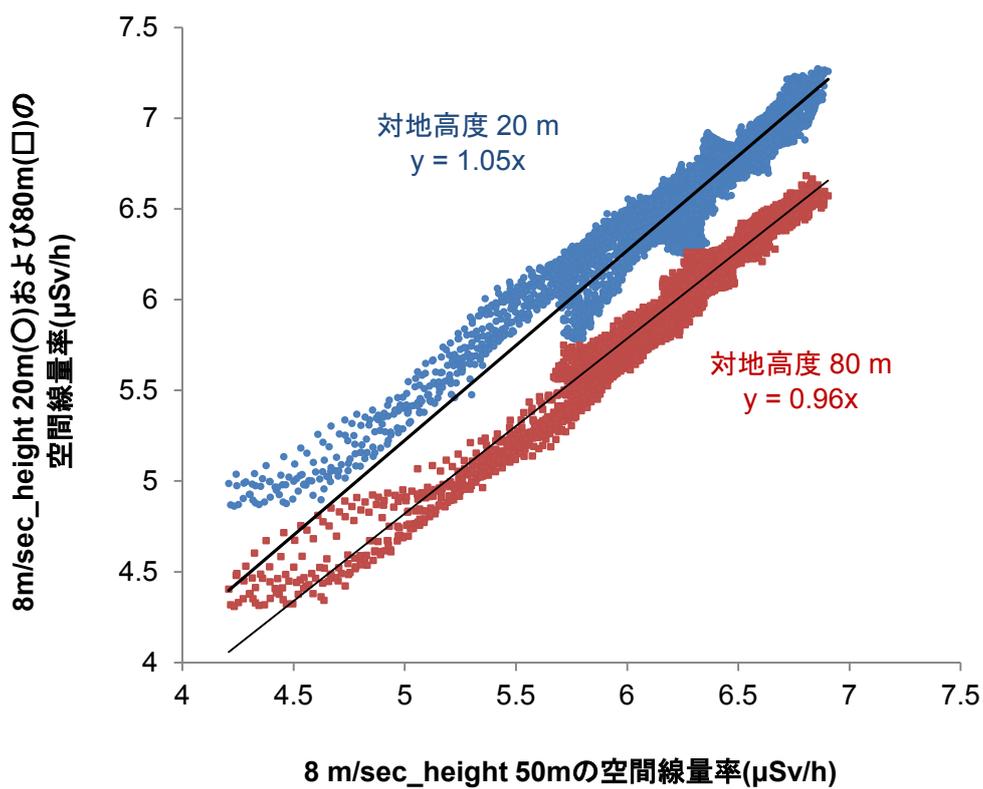


Fig. 4-14 高度による測定値の比較

4.14. 地上における測定値との比較

測定対象区域から、代表的な点を選定し、地上において、1m 高さの線量率を NaI サーベイメータ（日立 ALOKA 社製 TCS-172B）を用いて線量率の測定を行った。また、放射性セシウムの沈着量を in-situ Ge 検出器（Canberra 社製 Falcon 5000）を用いて測定を実施した。これらの結果と、無人ヘリコプターによる測定結果と比較した。なお、in-situ Ge 検出器の解析条件は緩衝深度 ( $\beta$ ) を  $1 \text{ g/cm}^2$  とした。Fig. 4-15 に、地上 1 m における  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  検出器と地上測定値との比較を示す。また、Fig. 4-16 に、地上 1 m における PS 検出器と地上測定値との比較を示す。両検出器とも、概ね、地上の測定値と正の相関関係にあることが分かった。また、無人ヘリコプターの放射性セシウムの沈着量に換算した値と地上における in-situ Ge 検出器による測定値との比較を Fig. 4-17 に示す。放射性セシウムの沈着量についても、正の相関関係にあることが分かった。この結果から、無人ヘリモニタリングは、概ね地上での測定値を再現できると言ってもよい。

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：4.1 節に記載したように、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直角三角錐の底面部分に該当する地上の放射線の平均値となる。地上における測定は、地表面から 1 m の高さにおける測定でも測定範囲は半径 3m 程度の円の平均値となる。よって、特に、地上の線量率の分布は均一でない場所では、測定結果が合わない可能性がある。
- ② 周辺からの影響：測定場所の近傍に、大きな建物や森林等がある場合には、建物や木自身に沈着している放射線が地上測定に影響したり、上空で測定する場合には、地表面に沈着している放射線を遮蔽するため、単純に比較できない場所がある。

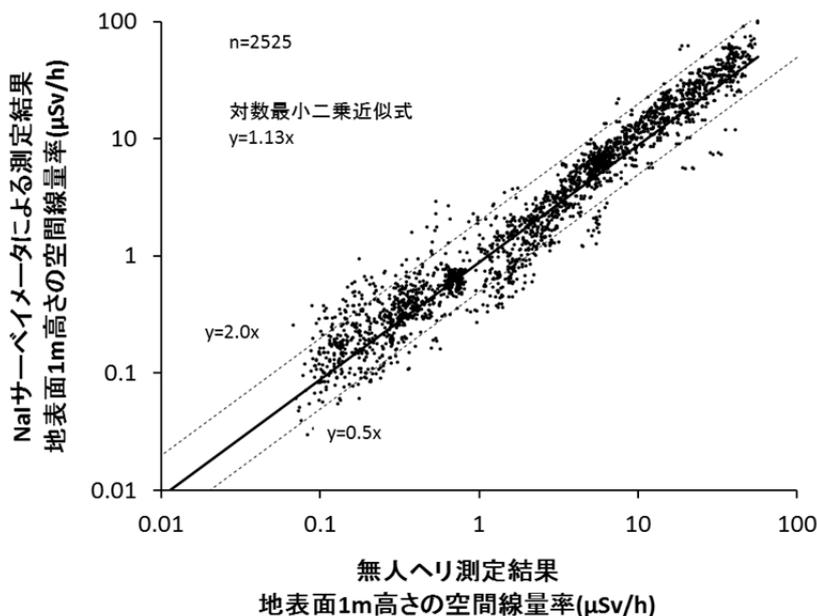


Fig. 4-15 NaI サーベイメータと無人ヘリ ( $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  検出器) による測定結果の比較

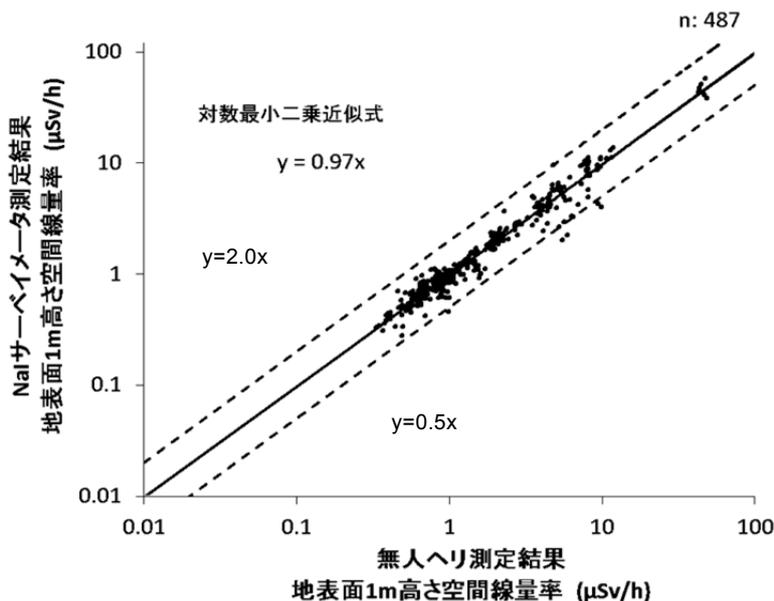


Fig. 4-16 NaI サーベイメータと無人ヘリ（PS 検出器）による測定結果の比較

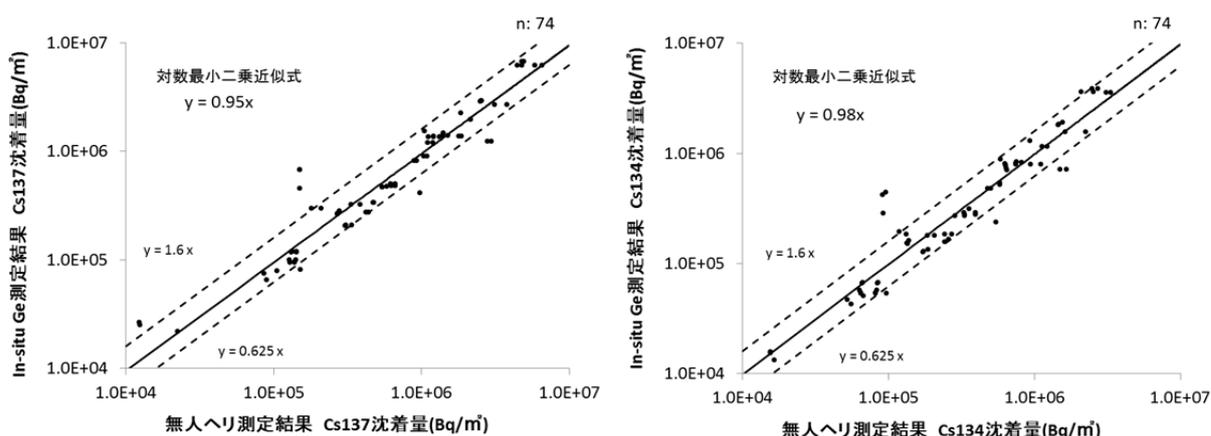


Fig. 4-17 In-situ Ge 検出器と無人ヘリ（LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器）による測定結果の比較  
(左：<sup>137</sup>Cs、右：<sup>134</sup>Cs)

#### 4.15. コベル法の適用検討

今回の適用した方法は、4.5 節に記載したように放射性セシウムの沈着量は、全線量率から天然核種起源の放射能を減算し、CF を乗算して求めている（以下、グロスカウント法）。この際に減算する天然核種起源の放射能は、天然核種起源のピークエネルギーが見られる 1400 keV 以上が LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器の自己汚染により弁別できないこと、PS 検出器は $\gamma$ 線のエネルギー測定ができないこと、また、1 秒毎に測定しているため取得できる計数が小さいことから、in-situ Ge 半導体検出器の測定値を使用して天然核種の放射線量を推定し、減算している。

一般的に、 $\gamma$ 線スペクトルを測定できる検出器は、全吸収ピークの面積をコベル法により評価することにより、核種別の測定が可能である<sup>9)</sup>。本節ではコベル法を利用した放射性セシウムの沈着量の評価方法について検討する。

4.15.1. コベル法

エネルギーピークの計数率はコベル法 (概念図 Fig. 4-18) を用いて算出した。対象としたエネルギーピークは  $^{137}\text{Cs}$  が 662 keV、 $^{134}\text{Cs}$  が 796 keV 及び 802 keV である。空気減弱係数はキャリブレーションポイントで実施した高度補正のデータにコベル法で求めたエネルギーピークの計数率から、エネルギーピーク毎の  $AF_{\text{Cs134}}$  ( $AF_{\text{Cs137}}$ ) を求め評価した。 $CD_{\text{Cs134}}$  ( $CD_{\text{Cs137}}$ ) はモンテカルロ計算コード EGS5 を用いたシミュレーションにより評価した<sup>16)</sup>。シミュレーション内容の詳細は次節に記す。また、放射性セシウムエネルギーピークは計数率が低くばらつきが大きい (例: Fig. 4-19)、最終的な空気減弱係数は高度補正関数との決定係数が高いデータを選び、その平均値とした (Fig. 4-20)。式 [5] に放射性セシウム沈着量を算出する計算式を示す。計算した測定値は、ばらつきを考慮し、前後 5 測定点 (全 11 測定点) で移動平均による平滑化を行った。

$$D_{\text{Cs134}} = \frac{1}{CD_{\text{Cs134}}} \times (C_{\text{Cs134}} - BG_{\text{Cs134}}) \times \exp(-AF_{\text{Cs134}} \times (H_{\text{std}} - H_m)) \quad [5]$$

ここで、

$D_{\text{Cs134}}$ : 全線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )

$C_{\text{Cs134}}$ :  $^{134}\text{Cs}$  の 796keV+802keV のエネルギーピークの計数率 (cps)

$BG_{\text{Cs134}}$ :  $^{134}\text{Cs}$  の 796keV+802keV のエネルギーピークのバックグラウンド (cps)

$AF_{\text{Cs134}}$ : 空気減弱係数 ( $\text{m}^{-1}$ )

$H_{\text{std}}$ : 基準高度 (m)

$H_m$ : 測定高度 (m)

$CD_{\text{Cs134}}$ : 放射性セシウム換算係数 ( $\text{cps/Bq/m}^2$ )

なお、 $^{137}\text{Cs}$  の場合は 134 を 137 に読み替える。

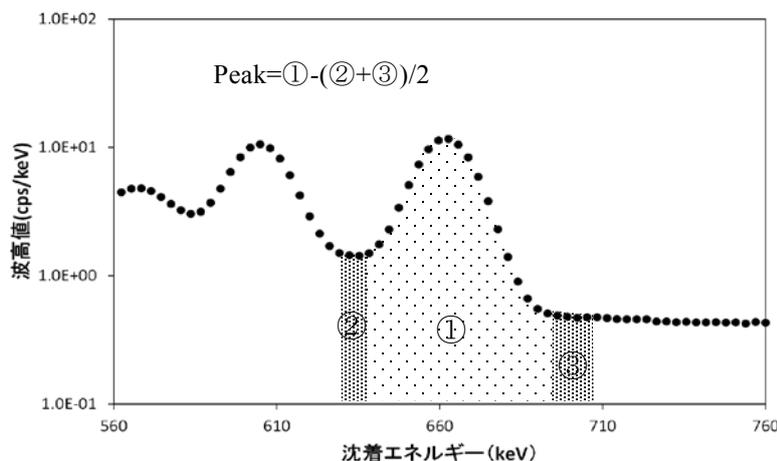


Fig. 4-18 コベル法によるエネルギーピークの評価方法の概念図

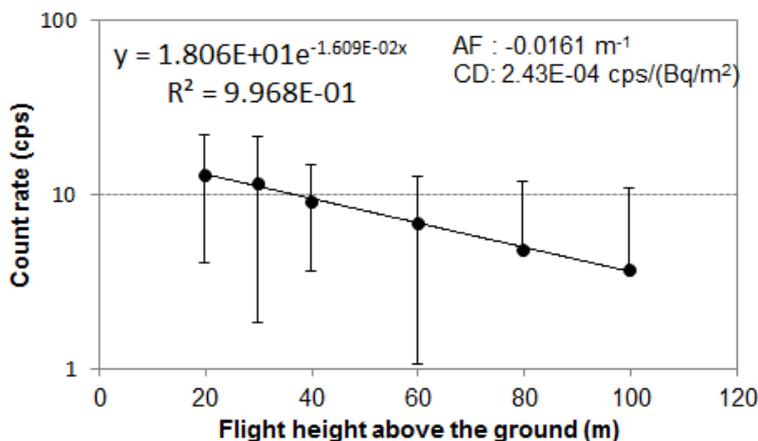


Fig. 4-19  $^{137}\text{Cs}$  のエネルギーピークの測定高度による関係の例 (地上  $0.3 \mu\text{Sv/h}$ )

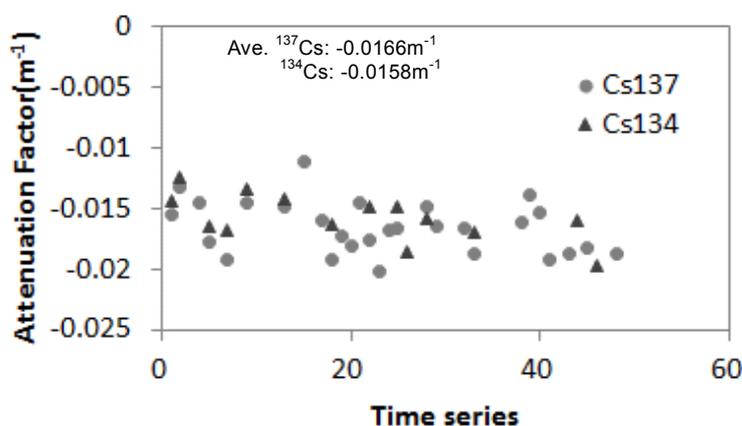


Fig. 4-20  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{134}\text{Cs}$  のエネルギーピークの空気減弱係数

#### 4.15.2 EGS5 による検出器のレスポンス計算

計算コードを用いて、検出器のレスポンスを明らかにするために、光子・電子挙動シミュレーションで実績のあるカスケードモンテカルロ計算コード EGS5 を用いて、 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  検出器の体系化を行った。作成した検出器の体系を Fig. 4-21 に示す。作成した体系が正しいことを確認するために、検出器からの距離を変えて  $^{137}\text{Cs}$  及び  $^{134}\text{Cs}$  の点線源を  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  検出器に照射した場合のスペクトルを計算し、実測値と比較した。実験値と計算値の比較結果を Fig. 4-22 及び Fig. 4-23 に示す。実験値と計算値はエネルギーピークの形状、計数率ともによく一致した (検出器から 100 cm で 10%)。

次に、放射性セシウムが緩衝深度 ( $\beta$ ) を  $1 \text{ g/cm}^2$  とし、地表面に一様に沈着した状況における基準高度の Cs 沈着量換算係数を求めた。計算方法は上記条件で照射した基準高度における放射性セシウムのエネルギーピークのフルエンスと検出器に並行ビームを照射した際に検出した計数率を乗算した。Cs 沈着量換算係数は  $^{137}\text{Cs}$  が  $1.31 \times 10^{-4} \text{ (cps/(Bq/m}^2))$  で、 $^{134}\text{Cs}$  が  $1.20 \times 10^{-4} \text{ (cps/(Bq/m}^2))$  となった。

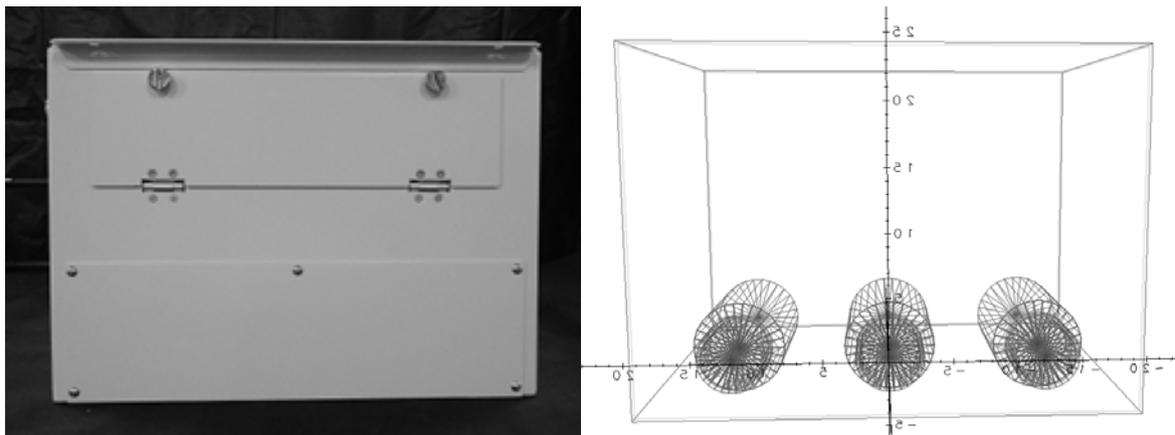


Fig. 4-21 LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器 (左 : 写真、右 : シミュレーション)

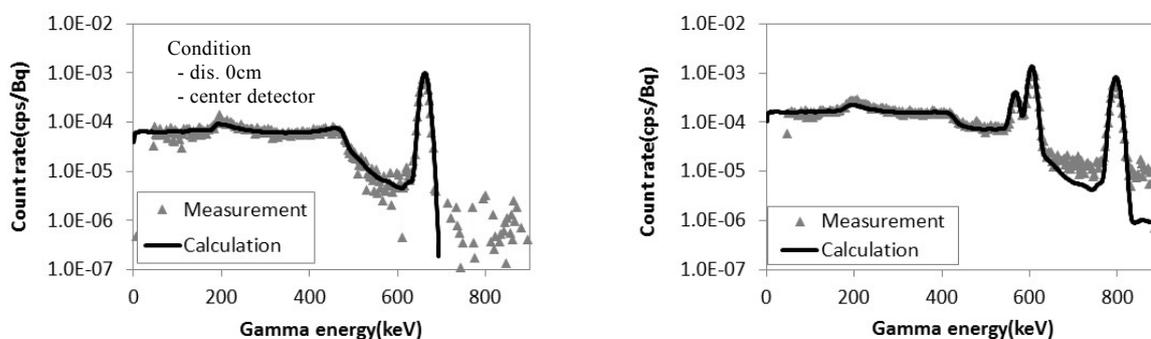


Fig. 4-22 実験値と計算値のスペクトル (左 : <sup>137</sup>Cs、右 : <sup>134</sup>Cs)

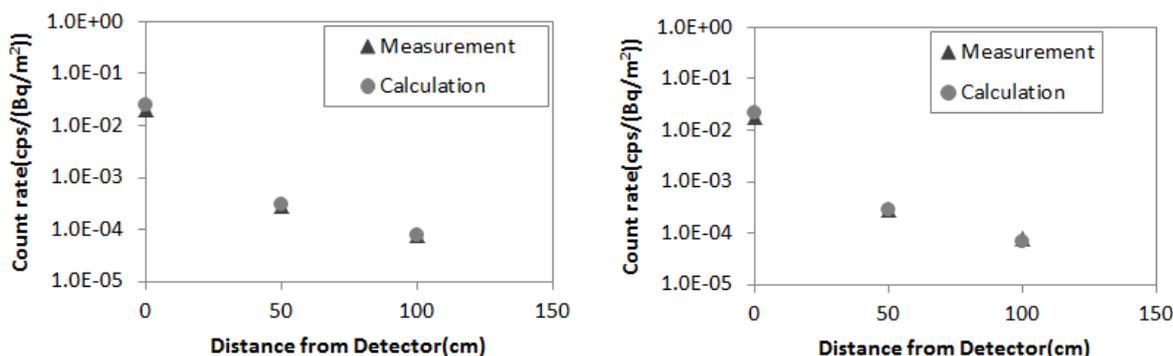


Fig. 4-23 距離による実験値と計算値の比較 (左 : <sup>137</sup>Cs、右 : <sup>134</sup>Cs)

#### 4.15.3. グロスカウント法との比較

コベル法とグロスカウント法で評価した結果を比較し、コベル法の特長について検討した。対象データは、広域で線量率の広範囲である原子力発電所周辺の 1 回目モニタリングとした (モニタリングの結果については 5 章以降に示す)。

コベル法及びグロスカウント法で評価した <sup>137</sup>Cs の沈着量マップを Fig. 4-24 に示す。全体的

な傾向は一致したが、グロスカウント法に比べコベル法はばらつきが大きくなる特徴や、一部で沈着量に差異（例：北北西方向に延びる 3,000 kBq/m<sup>2</sup>以上の地域）が見られた。また、両者の放射性セシウム沈着量の 10 m メッシュ値を比較すると、Fig. 4-25 の様に <sup>137</sup>Cs 及び <sup>134</sup>Cs で良い相関が得られた。次に、Fig.4-26 に示すコベル法とグロスカウント法の <sup>137</sup>Cs の比画像をみると、北北西方向に 2 倍以上の差がある地域が見られた。この地域の近くには福島第一原子力発電所の瓦礫の集積場があり、その高線量地域由来の散乱線によりグロスカウント法の放射性セシウム沈着量が過大評価されたためと考えられる。散乱線の影響を確認するために、散乱線の影響が顕著にみられる低エネルギー（270 keV 以下）と放射性セシウムのピークエネルギー（530-700 keV）の比であるピークコンプトン比を見ると、Fig. 4-27 に示すように同じ地域（発電所から北北西方向）で低い比率が示された。なお、4.8 節に記載した方法により、コベル法の検出下限値を計算すると、40 kBq/m<sup>2</sup>（グロスカウント法は 4.0 kBq/m<sup>2</sup>）となった。

この結果より、コベル法とグロスカウント法で評価した放射性セシウム沈着量を比較すると、全体的な傾向はよく一致するが、コベル法はばらつき大きく検出下限値が高いことが分かった。しかしながら、不均一な高線量地域付近でみられる散乱線を適切に取り除けることも分かった。このことから、高線量地域付近ではコベル法で、それ以外の地域ではグロスカウント法による評価が適していると考えられる。5 章以降の結果は、グロスカウント法による結果を基に議論する。

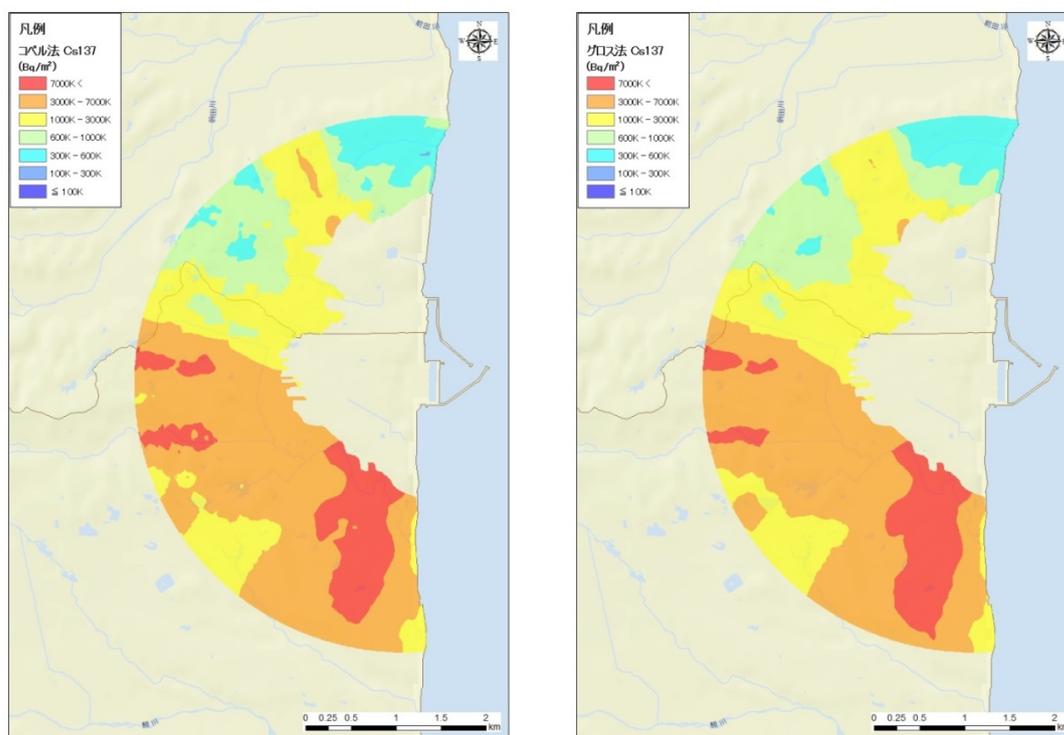


Fig. 4-24 福島第一原子力発電所周辺の <sup>137</sup>Cs 沈着量(左：コベル法、右：グロスカウント法)

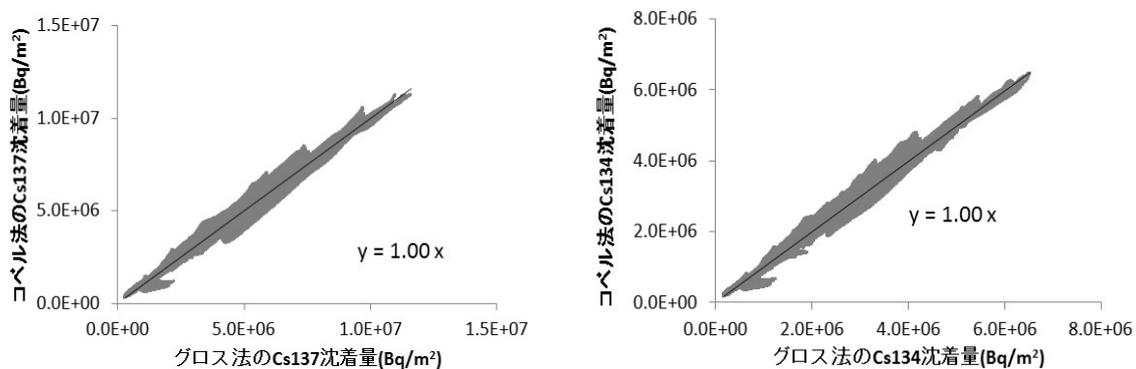


Fig. 4-25 グロス法とコベル法の 10 m メッシュ内の数値の比較 (左 :  $^{137}\text{Cs}$ 、右 :  $^{134}\text{Cs}$ )

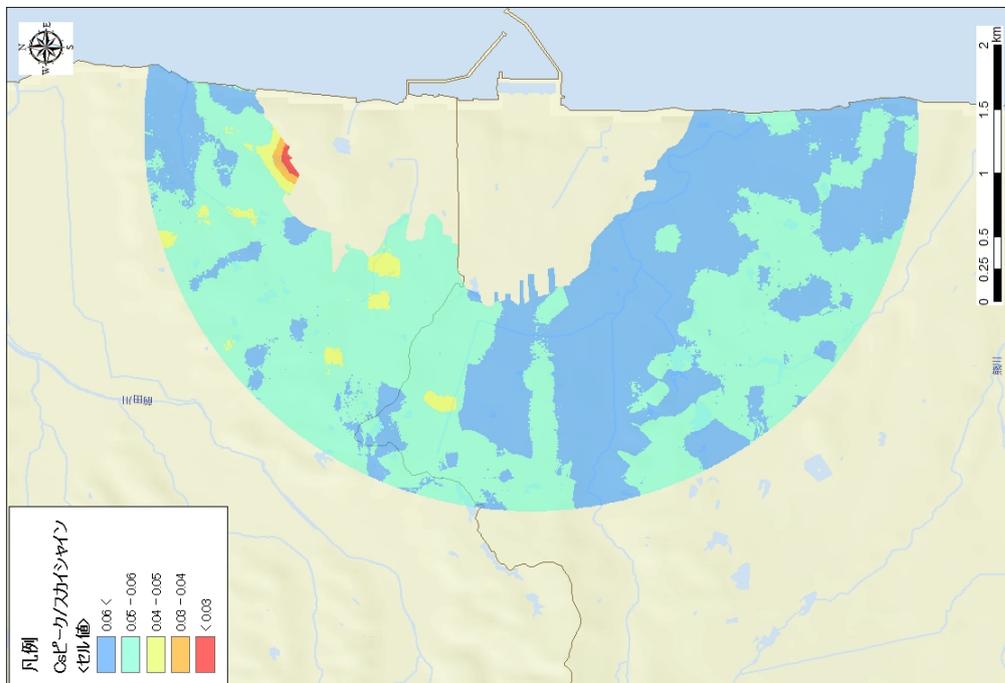


Fig. 4-27 ピークコンプトン比 (270 keV 以下の計数率/530-700 keV の計数率) の分布(発電所の北にスカイラインの影響が見られる)

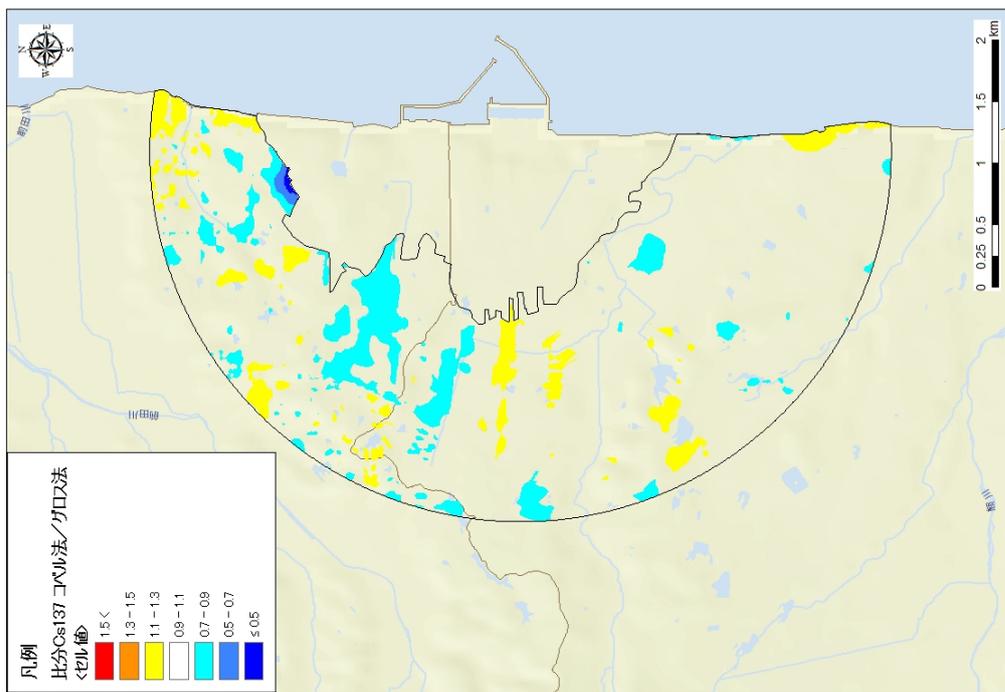


Fig. 4-26 <sup>137</sup>Cs 沈着量の比画像 (コバルト法/グロスカウンタ法)

## 5. モニタリング結果

### 5.1. 原子力発電所周辺のモニタリング

#### 5.1.1. 調査目的

原子力発電所から 3 km 圏内については、事故後、航空法による飛行禁止エリアに設定され、航空機モニタリングによる面的な測定は実施されていない。汚染源に作業員が近づかずに測定が可能であるという無人ヘリコプターの特性を生かし、原子力発電所周辺について、2 回に分け、無人ヘリモニタリングを実施した。

#### 5.1.2. 調査内容

##### 1) 調査期間・調査場所

- 1 回目: 平成 24 年 8 月 30 日から 10 月 20 日 (発電所から約 3 km 圏内)
- 2 回目: 平成 25 年 1 月 28 日から 3 月 20 日 (発電所から約 5 km 圏内)

##### 2) 調査機器

測定にあたっては、自律型無人ヘリを使用した。放射線検出器は LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器を用いた。

##### 3) 無人ヘリによる測定でのデータの取得方法

無人ヘリの飛行高度は対地高度で 50~80 m 程度とし、軌跡幅 (測線間隔) は、50 m または 80 m とした。無人ヘリコプターの飛行速度は、8 m/s (= 28.8 km/h) 程度である。取得データは、放射線検出器で測定される 1 秒毎の  $\gamma$  線のデータ (計数率) とエネルギースペクトル及びそれに対応する GPS による位置情報を記録した。

##### 4) 空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の測定結果の一定時点への換算 (減衰補正)

各地点の測定結果は測定日が異なるため、各測定地点における地上 1 m 高さの空間線量率及び地表面の放射性セシウムの沈着量の値は、放射性セシウムの物理的減衰を考慮し、2 回目の測定最終日 (2013 年 3 月 20 日) の値に換算した。

#### 5.1.3. 結果と考察

1 回目の線量率マップ及び放射性セシウム沈着量マップについて Fig. 5-1 に示す。測定の結果、原子力発電所から南側と西側に 20  $\mu$ Sv/h 以上の地域が見られた。西側の高線量地域は、2 つの場所に分かれているように見える。また、その 2 つの地域は、発電所敷地から 1 km ほど離れた場所が極大値となっている。さらに、原子力発電所から北西方面に向かって帯状に幅 500 m 程度の 10  $\mu$ Sv/h 以上の線量率の地域が広がっていることが分かった。

2 回目の線量率マップ及び放射性セシウム沈着量マップについてそれぞれ Fig. 5-2 に示す。1 回目の結果と 3 km 圏内は概ね似た傾向にある。また、原子力発電所から約 5 km まで測定範囲を広げたことから、マップの傾向がつかみやすい。すなわち、西側の 20  $\mu$ Sv/h 以上の地域は楕円状に広がっており、南側の 20  $\mu$ Sv/h 以上の地域は原子力発電所に近い方が線量が高い傾向にあることが分かる。

2 回の測定結果を比較するために、Fig. 5-3 に比画像を示す (2 回目/1 回目)。このように、

概ね比は 0.8～1.25 となり、顕著な増減が見られる場所はなかった。Fig. 5-3 に同一地点の線量率の散布図を示す。近似直線の傾きを見ると 0.963 であり、全体的な傾向として、若干減少傾向にあることが分かった。

原子力発電所近傍において、上空から放射線を計測する場合、発電所敷地内から、周辺より極端に強い放射線の影響を受け、直下の評価値が過剰に見積もられる可能性がある。現在の敷地内の線量率測定結果みると<sup>17)</sup>、原子炉建屋周辺では、依然として線量率が高いものの、敷地境界周辺では比較的低くなっている (<100  $\mu\text{Sv/h}$ )。原子炉建屋は、敷地境界から 1 km 以上離れており、今回の測定範囲には影響しない。よって、発電所敷地外を上空から測定する上で、敷地内の線量率の影響は無視できると考えられる。しかしながら、Fig. 4-27 のように、北側の部分で周辺より極端に線量率の高い場所の影響を受けている場所が確認された。本場所については、直下の線量率よりも過大評価されている可能性がある。

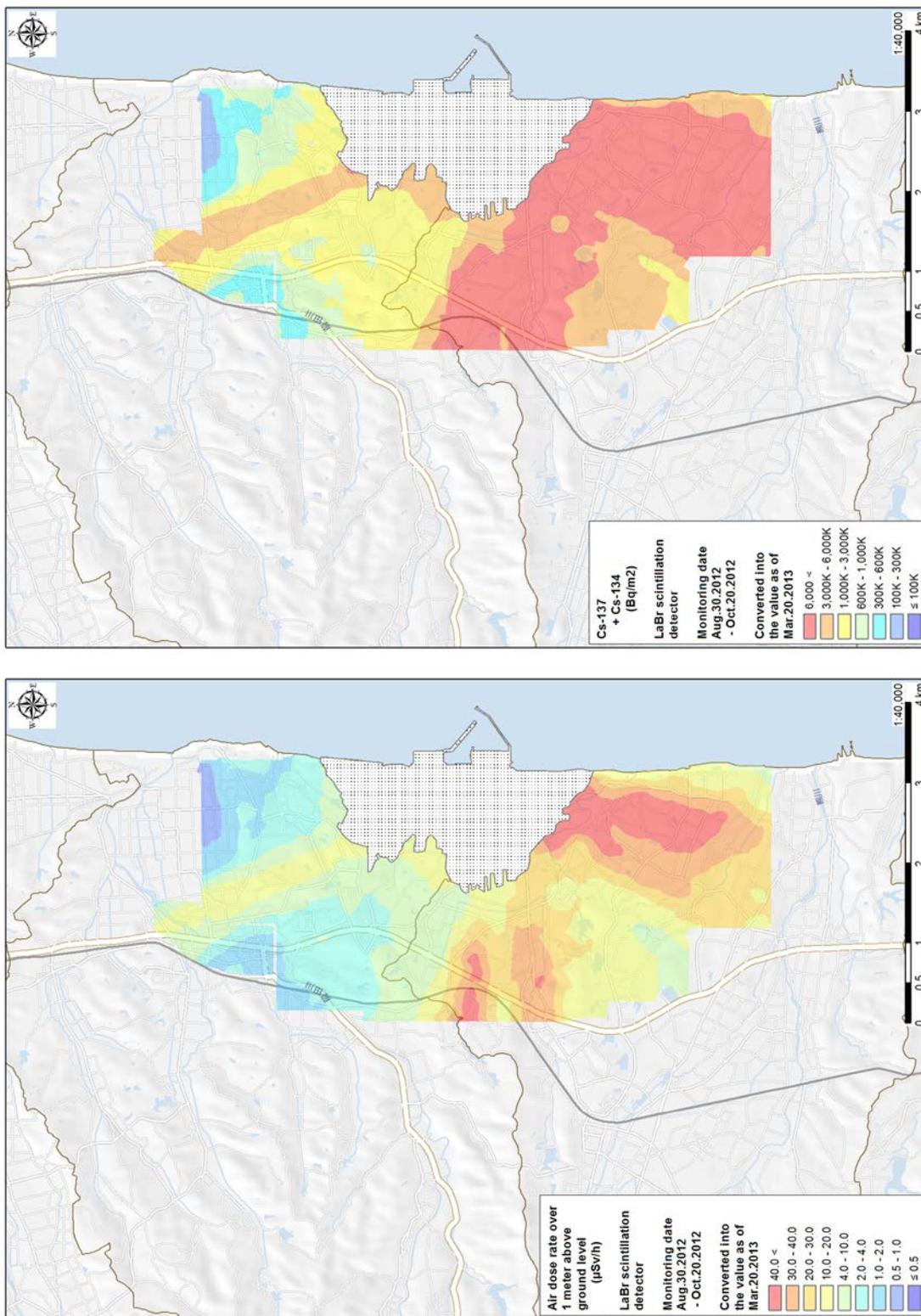


Fig. 5-1 発電所から 3 km 圏内の放射線量(左)及び放射性セシウムの沈着量マップ(2013年3月20日時点に減衰補正)

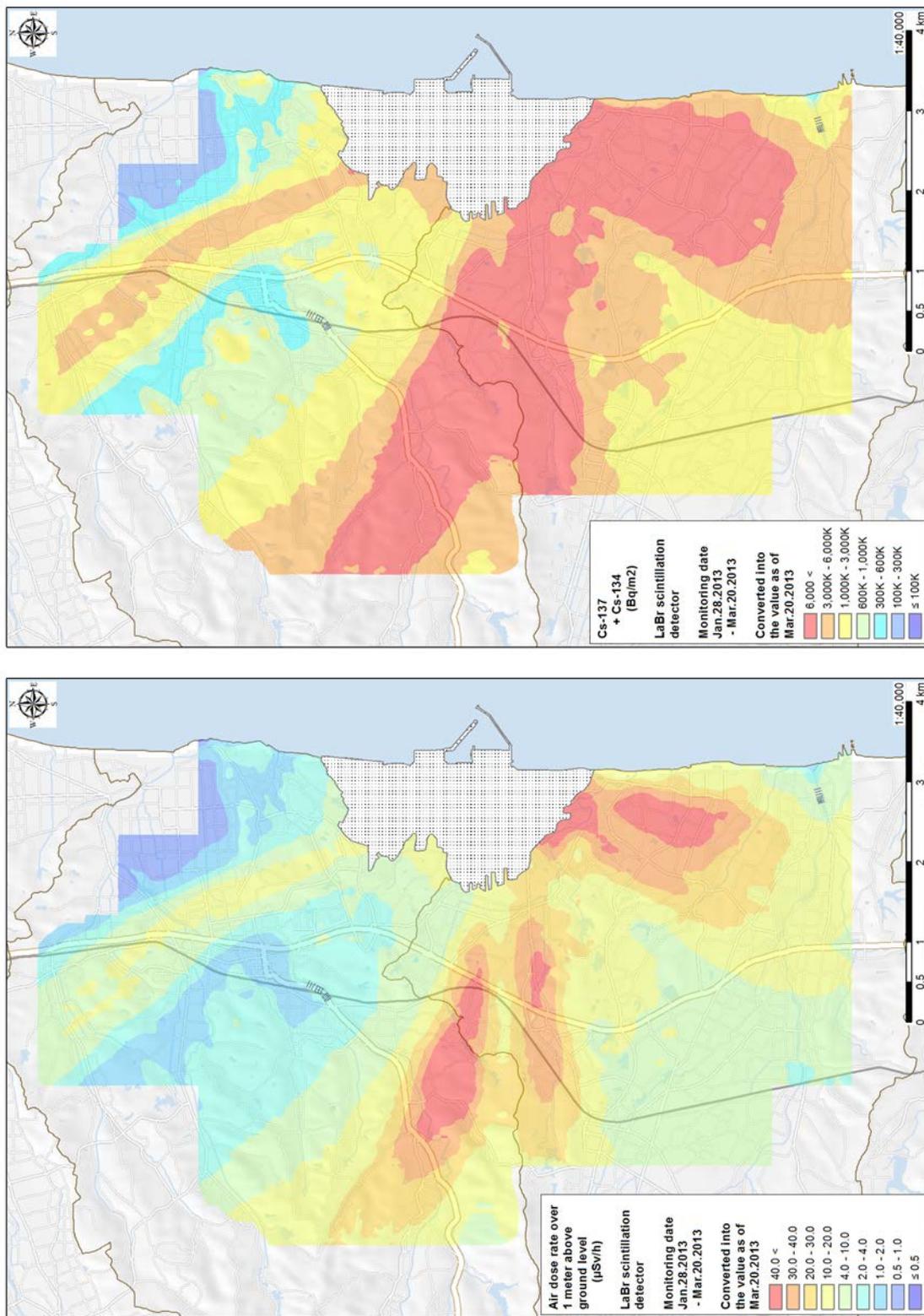


Fig. 5-2 発電所から5 km 圏内の放射線量(左)及び放射性セシウムの沈着量マップ (2013年3月20日現在に減衰補正)

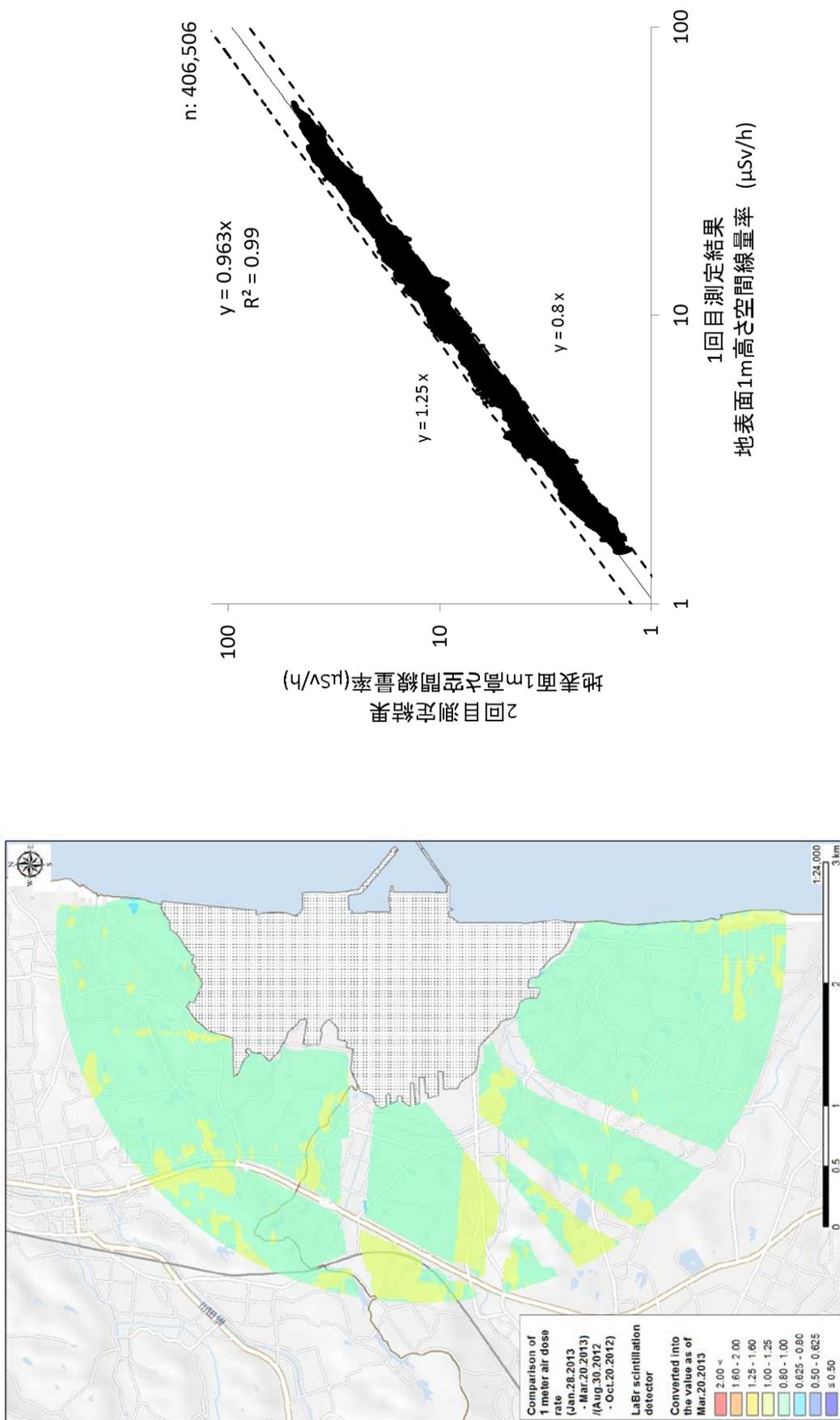


Fig. 5-3 発電所から 3 km 圏内の比画像 (送電線部分は削除) 及び散布図

## 5.2. 河川敷のモニタリング

### 5.2.1. 調査目的

河岸周辺においては、降雨等の増水の影響により土砂が流出又は蓄積することにより、比較的狭い範囲で空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の分布状況が変化することが推察されている。現在、原子力発電所周辺で実施されている航空機モニタリングは、地上の直径 600 m 程度の円形の範囲からの平均的な  $\gamma$  線計数率を測定しているため、河岸周辺の詳細な空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の分布状況の詳細は確認できていなかった。チェルノブイリ事故においても、河川を介した放射性物質の移行経路の重要性は指摘されており<sup>18)</sup>、福島原子力発電所の周辺においても、早期の傾向把握が必要であると考えられる。

本調査では、空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の変化傾向の詳細把握に向け、航空機モニタリングによる面的な測定データを精緻化することを目的に、無人ヘリコプターを活用して、河岸に沿ってモニタリングを実施し、河岸周辺における地上 1 m 高さの空間線量率及び放射性セシウムの詳細な分布状況を記したマップを作成した。

### 5.2.2. 調査内容

#### 1) 調査箇所と調査期間

対象とした河川は、上流の地域の放射線量が高い河川を選定した。測定日時とマップの換算日を Table 5-1 に示す。また、Fig. 5-4 に対象河川の地図を示す。

Table 5-1 対象河川、測定日及び換算日

対象河川	使用検出器	測定開始日	測定終了日	換算日
請戸・高瀬川 (1 回目)	PS	2012/3/2	2012/3/4	2012/12/11
請戸・高瀬川 (2 回目)	LaBr <sub>3</sub> :Ce	2012/10/19	2012/10/25	2012/12/11
請戸・高瀬川 (3 回目)	LaBr <sub>3</sub> :Ce	2012/12/1	2012/12/11	2012/12/11
小高川 (1 回目)	PS	2012/3/13	2012/3/15	2012/11/20
小高川 (2 回目)	LaBr <sub>3</sub> :Ce	2012/11/19	2012/11/20	2012/11/20
前田川	LaBr <sub>3</sub> :Ce	2012/10/6	2012/10/20	2012/10/20
宇多川	LaBr <sub>3</sub> :Ce	2012/10/31	2012/11/7	2012/11/7
真野川	LaBr <sub>3</sub> :Ce	2012/11/4	2012/11/8	2012/11/8
新田川	LaBr <sub>3</sub> :Ce	2012/11/14	2012/11/14	2012/11/14
太田川	LaBr <sub>3</sub> :Ce	2012/11/16	2012/11/19	2012/11/19
阿武隈川流域	LaBr <sub>3</sub> :Ce	2013/1/8	2013/1/31	2013/1/31

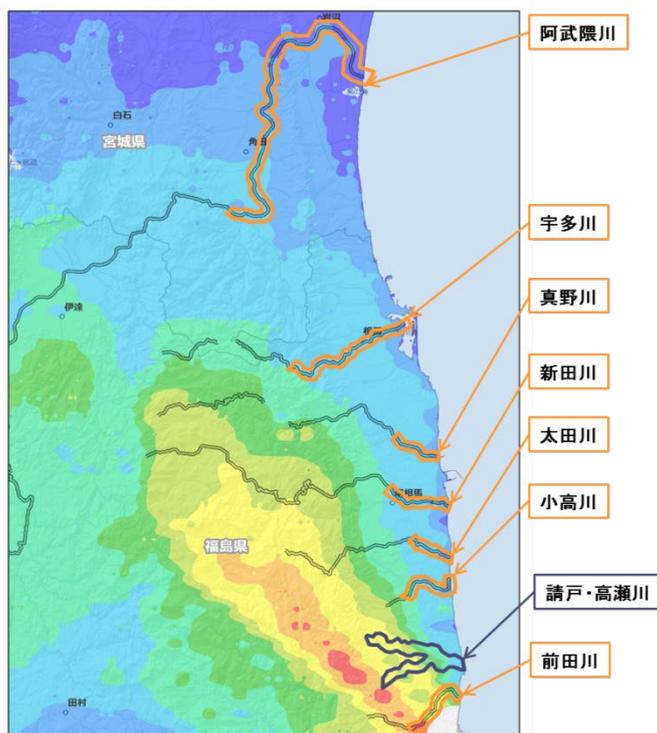


Fig. 5-4 対象河川（背景図は第6次航空機モニタリングの結果）

## 2) 調査機器

測定にあたっては、自律飛行型無人ヘリを基本とし、山間部などは一部マニュアル型を用いた。飛行高度は50～80 m程度、測線間隔は80 m（一部50 mで実施）程度で飛行しながら、地上からの $\gamma$ 線及び直達線や散乱線による $\gamma$ 線（計数率）とエネルギースペクトルを1秒間に1回連続測定した。また、放射線検出器はPS検出器及びLaBr<sub>3</sub>:Ceシンチレーション検出器(1.5"Φ×1.5"×3本)を用いた。PS検出器は、請戸・高瀬川（1回目）、小高川（1回目）について使用した。なお、両者の比較については、Fig. 4-8に示している。

## 3) 無人ヘリコプターによる測定でのデータの取得方法

無人ヘリコプターの飛行高度は対地高度で50～80 m程度とし、無人ヘリの軌跡幅（測線間隔）は、50 mまたは80 mとした。無人ヘリコプターの飛行速度は、8 m/s (= 28.8 km/h)程度である。取得データは、放射線検出器で測定される1秒毎の $\gamma$ 線のデータ（計数率）とエネルギースペクトル及びそれに対応するGPSによる位置情報を記録した。

## 4) 空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の測定結果の一定時点への換算（減衰補正）

各地点の測定結果は測定日が異なるため、各測定地点における地上1 m高さの空間線量率及び地表面の放射性セシウムの沈着量の値は、放射性セシウムの物理的減衰を考慮し、2回目の測定最終日の値に換算した。各河川の結果における換算日について、Table 5-1に示す。

### 5.2.3. 結果と考察

#### 1) 請戸・高瀬川

請戸・高瀬川については、時期をずらして、3回の測定を実施している。Fig. 5-5に1回目の線量率マップを示す。上流側(河口から4-8 km程度)の河川敷の線量率は、6-8  $\mu\text{Sv/h}$ 程度であり、下流側(河口から0-4 km程度)の河川敷の線量率は、3  $\mu\text{Sv/h}$ 以下である。これは、Fig. 5-2に示した線量率マップの発電所から北西に細長く伸びる10  $\mu\text{Sv/h}$ 程度のエリアを反映している。下流側のマップを見ると、河川を中心に周辺より線量率の高い場所があることが分かる。これは、上流側から、増水等のイベントで流され、水が引くことにより、河川敷に取り残された河底土が、原因と考えられる。それが原因であるとすると、線量率マップは、増水等のイベント毎に変化すると考えられる。

Fig. 5-6に1回目の測定から約7ヵ月後に実施した2回目の線量率マップを示す。2回目の線量率マップを見ると下流側の請戸川と高瀬川の合流地点及び河口付近において明らかな線量率の上昇が確認できる。これは、測定間隔期間である約7ヵ月間に、増水等で運ばれた河底土の位置が変化したことが原因と考えられる。

また、Fig. 5-7に2回目の測定から約2ヵ月後に実施した3回目の線量率マップを示す。これを見ると、2回目の結果とほとんど変化がない。この結果からも、定常的に線量率が上昇している訳ではないことが推定できる。Fig. 5-8、Fig. 5-9にそれぞれ示した2回目と3回目のCs沈着量マップでも同様な傾向である。なお、放射性セシウムの沈着量は、最大でも、6,000  $\text{kBq/m}^2$ 程度と評価された。

今後、定期的な調査が必要であるとともに、河底土のサンプリングとの比較など、地上の測定結果と比較し、考察することが必要である。また、無人ヘリコプターからの測定では、水がある場合には線量率が低く見積られるため、注意が必要である。今後、上空から画像を撮って水面の状況を確認することが必要と考える。

#### 2) 小高川

小高川については、2回測定を実施している。1回目の線量率マップの結果を、Fig. 5-10に、2回目の線量率マップの結果を、Fig. 5-11に示す。線量率は、全体的に、1.0  $\mu\text{Sv/h}$ 以下であり、河口域から上流に向けて、線量率が上昇する傾向にあることが分かる。1回目と2回目を比較すると、河口からおよそ5 kmに位置する上流域では、線量率は減少傾向にあるが、河口から4 km付近に位置する支流との合流地点では、線量率が上昇している。そこから、下流側は、線量率の上昇しているポイントが散見される。特に、河口から南に1 kmほど下った湾曲部を中心に線量率が上昇している。上流側から下流側への放射性物質の移行状況を反映していると考えられる。なお、1)で考察したように、川幅の変化が本結果には反映されている可能性がある。Fig. 5-12に放射性セシウムの沈着量マップを示す。放射性セシウムの沈着量は、最大でも、600  $\text{kBq/m}^2$ 程度と評価された。

#### 3) 前田川

前田川における線量率マップをFig. 5-13に示す。本河川は、調査河川の中で最も原子

力発電所に近い河川である。本河川についても、下流側から上流側に行くにつれて、線量率は上昇傾向にある。河口近くの線量率が、0.5～2.0  $\mu\text{Sv/h}$  程度であるのに対し、河口から 5 km 付近の上流側は、約 50  $\mu\text{Sv/h}$  程度になっている。マップの傾向を見ると、河口からの 1.5 km 付近で周辺よりも河川に沿って、線量率の高い場所が見られたが、1) の請戸・高瀬川ほど顕著ではなかった。Fig. 5-14 に放射性セシウムの沈着量マップを示す。放射性セシウムの沈着量は、最大でも 15,000  $\text{kBq/m}^2$  程度と評価された。

#### 4) 宇多川

宇多川における空間線量率マップを Fig. 5-15 に示す。全体の空間線量率は概ね 0.8  $\mu\text{Sv/h}$  以下であった。下流側 (A) においては、河川に沿って 0.4  $\mu\text{Sv/h}$  程度となる部分が散見される。また、(A) では、国道 6 号線周辺でやや空間線量率が高い場所が見られた。上流側 (B 及び C) は、傾向として、上流側に行くにつれて空間線量率が高い傾向にある。Fig. 5-16 に放射性セシウムの沈着量マップを示す。放射性セシウムの沈着量は、最大でも 300  $\text{kBq/m}^2$  程度と評価された。

#### 5) 真野川

真野川における空間線量率マップを Fig. 5-17 に示す。全体の空間線量率は概ね 0.8  $\mu\text{Sv/h}$  以下であった。本河川では、河川に沿って、線量率が高くなる傾向は見られなかった。なお、上流側に行くにつれて空間線量率が高くなる傾向にある。Fig. 5-18 に放射性セシウムの沈着量マップを示す。放射性セシウムの沈着量は、最大でも 300  $\text{kBq/m}^2$  程度と評価された。

#### 6) 新田川

新田川における空間線量率マップを Fig. 5-19 に示す。全体の空間線量率は概ね 1.0  $\mu\text{Sv/h}$  以下であった。河川に沿って、何点か線量率が高くなる場所があった。特に、(B) で示した支流との合流点では、線量率が 1.0  $\mu\text{Sv/h}$  近くになっている。また、下流側にも河口から 1 km 付近に線量率に 0.6  $\mu\text{Sv/h}$  以上になる場所が見られた。Fig. 5-20 に放射性セシウムの沈着量マップを示す。放射性セシウムの沈着量は、最大でも 300  $\text{kBq/m}^2$  程度と評価された。

#### 7) 太田川

太田川における空間線量率マップを Fig. 5-21 に示す。全体の空間線量率は概ね 0.8  $\mu\text{Sv/h}$  以下であった。本河川では、河川に沿って、線量率が高くなる傾向は見られなかった。なお、上流側に行くにつれて空間線量率が高くなる傾向にある。Fig. 5-22 に放射性セシウムの沈着量マップを示す。放射性セシウムの沈着量は、最大でも 300  $\text{kBq/m}^2$  程度と評価された。

## 8) 阿武隈川

阿武隈川における空間線量率マップを Fig. 5-23 に示す。全体の空間線量率は概ね 1.0  $\mu\text{Sv/h}$  以下であった。下流側 (A), (B) に見られるように、河川の彎曲部において、比較的空間線量率が高い部分 (0.5  $\mu\text{Sv/h}$  程度) が局材化していることが明確に示された。上流側 (F), (G), (H) は、傾向として、下流側よりも空間線量率が高い傾向にある。(H) においては、河川の彎曲部を中心に最大 0.8  $\mu\text{Sv/h}$  となる個所があった。Fig. 5-24 に放射性セシウムの沈着量マップを示す。放射性セシウムの沈着量は、最大でも 300  $\text{kBq/m}^2$  程度と評価された。

本結果を、第 6 次航空機モニタリングの結果と比較した<sup>18)</sup>。Fig. 5-25 に比較結果を示す。航空機モニタリングでは、河川の上流で比較的高く、下流に行くに従い低くなっていることが大まかにわかる程度であったが、無人ヘリでの測定では河岸付近の細かい空間線量率分布を把握できていることがわかる。また、空間線量率の値は、概ね一致することが分かった。

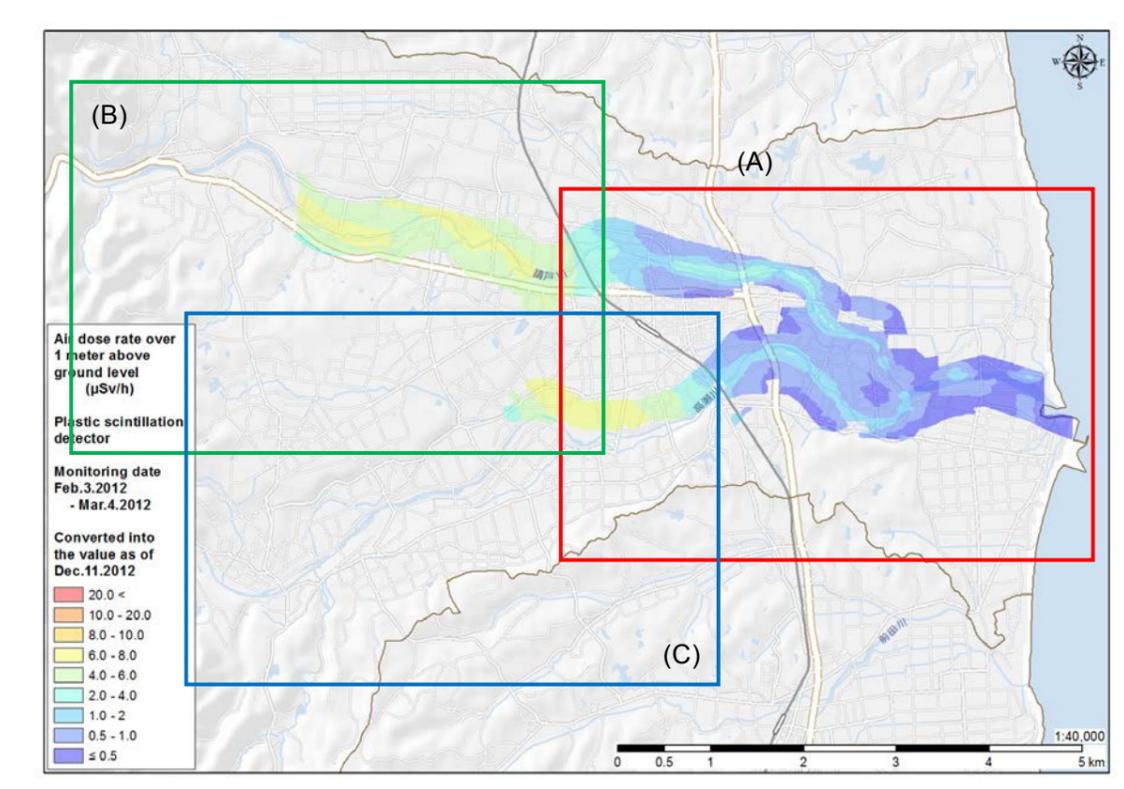
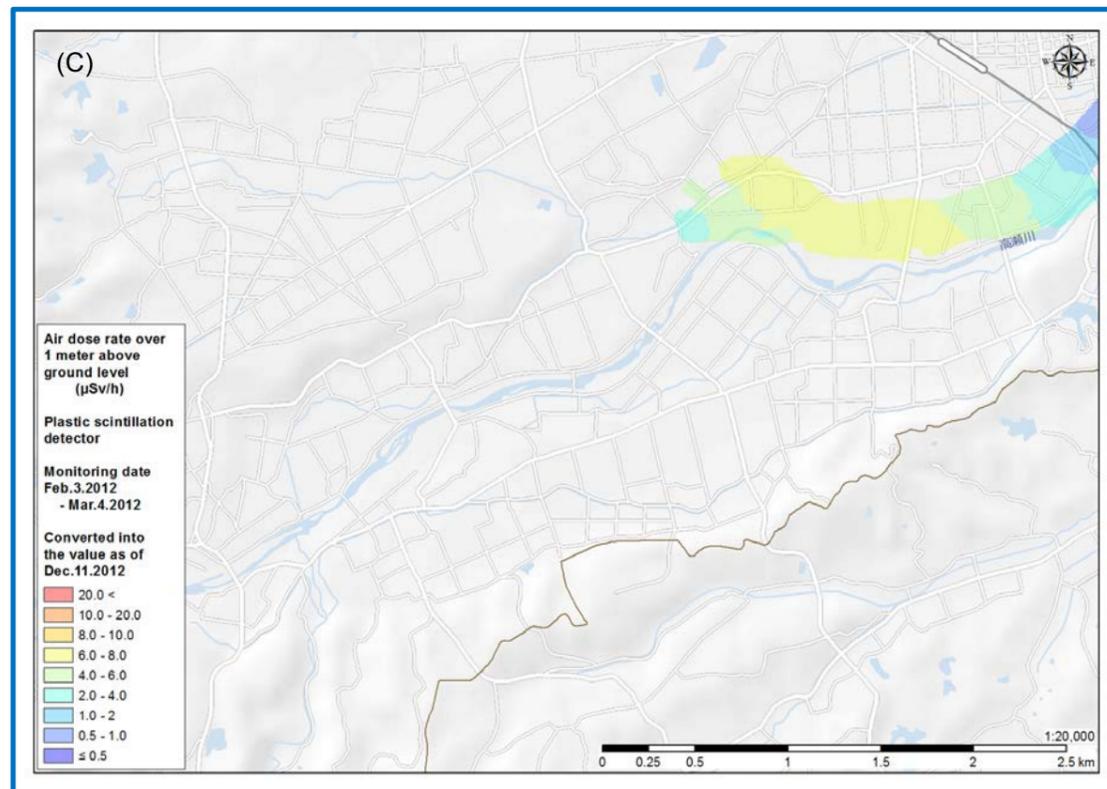
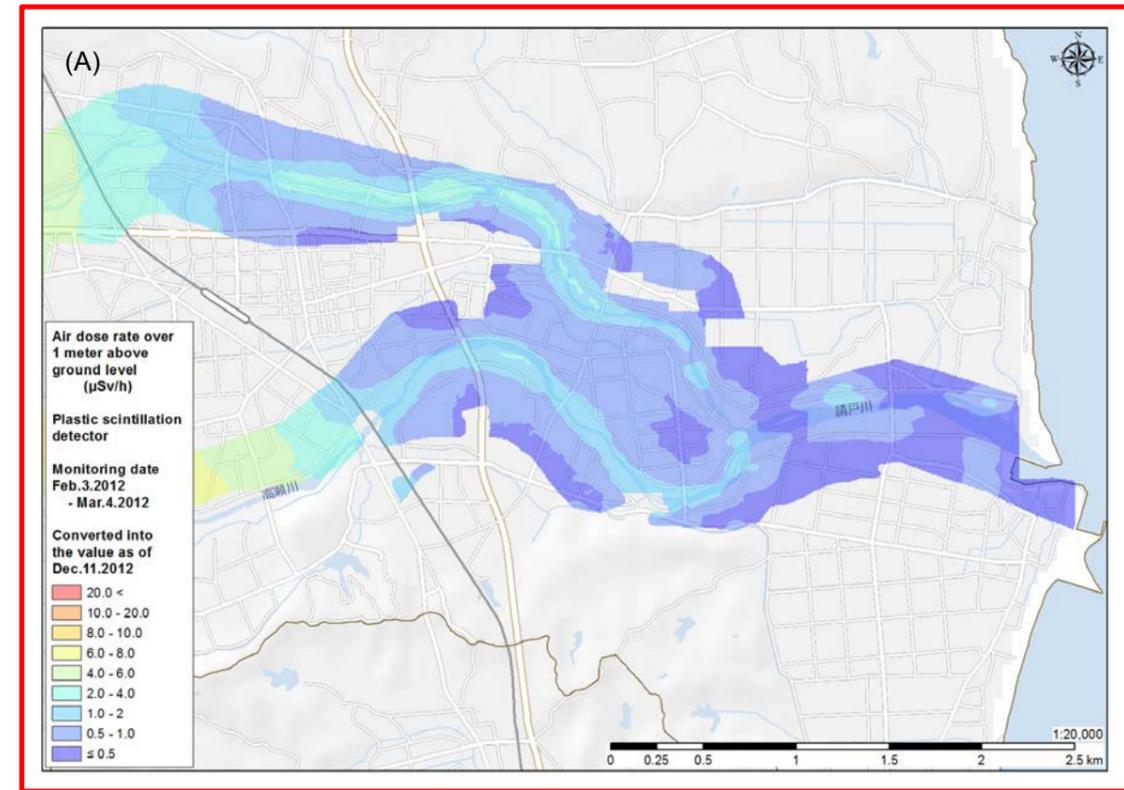
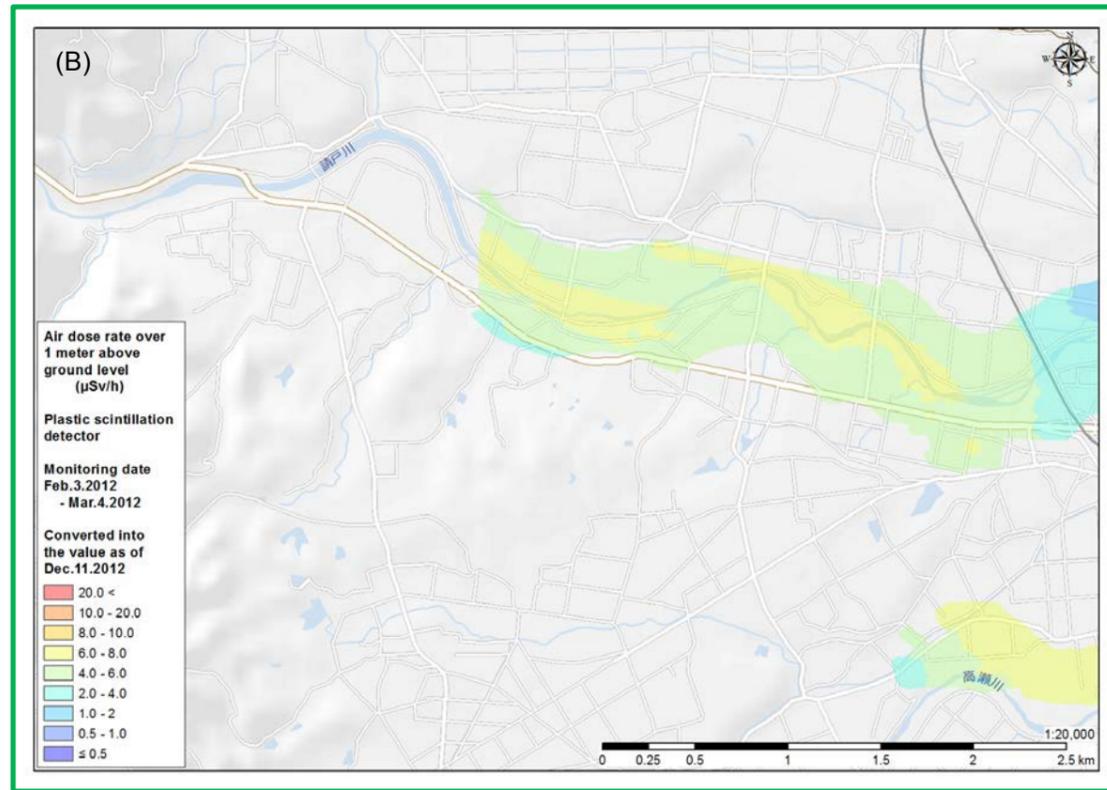


Fig. 5-5 請戸・高瀬川線量率マップ (1回目)

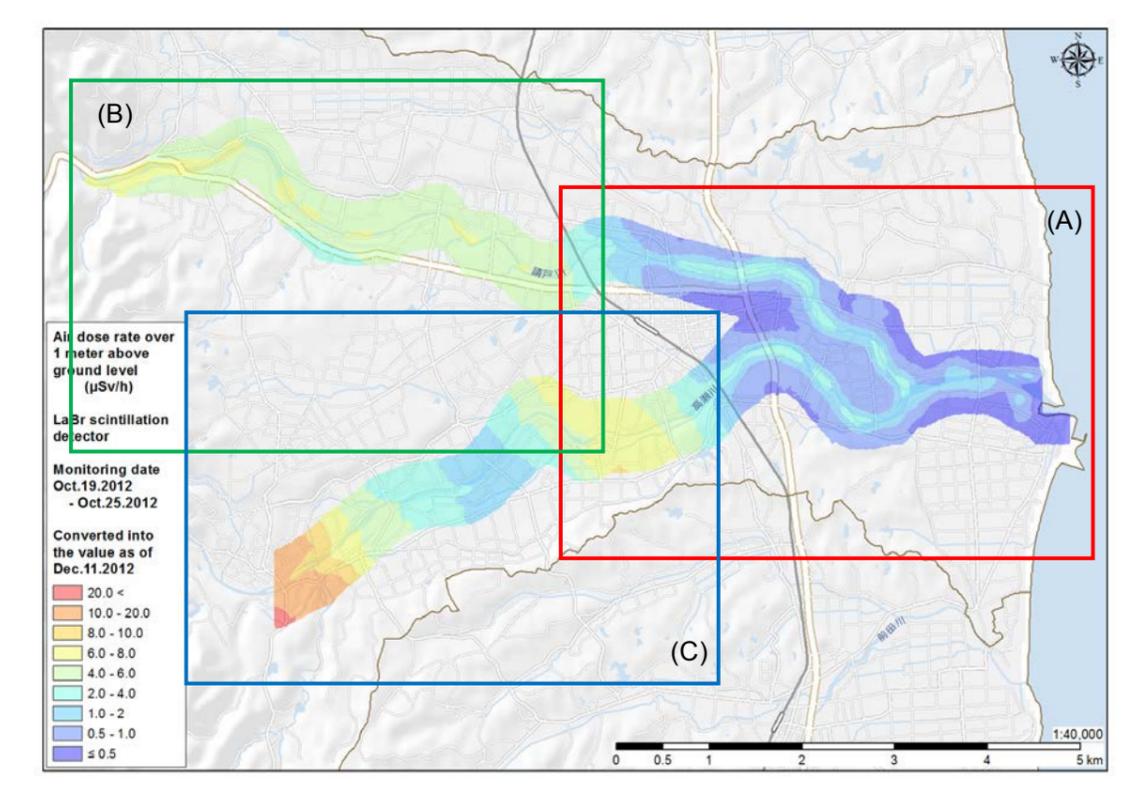
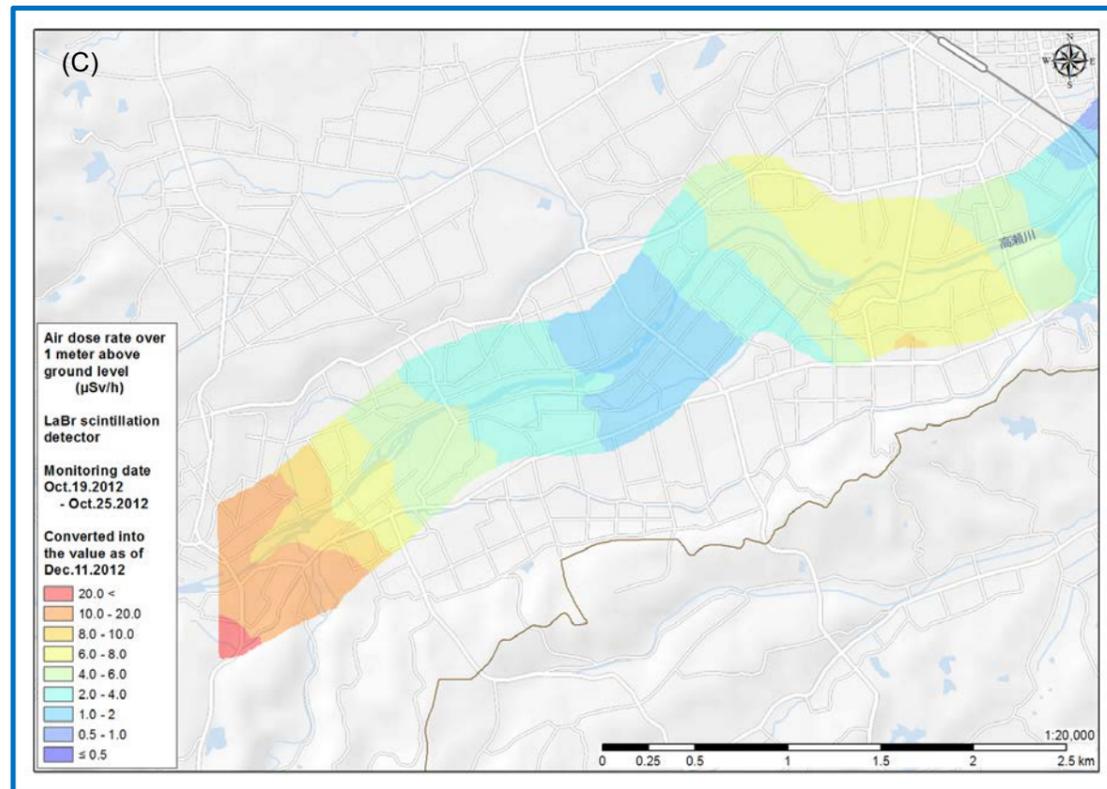
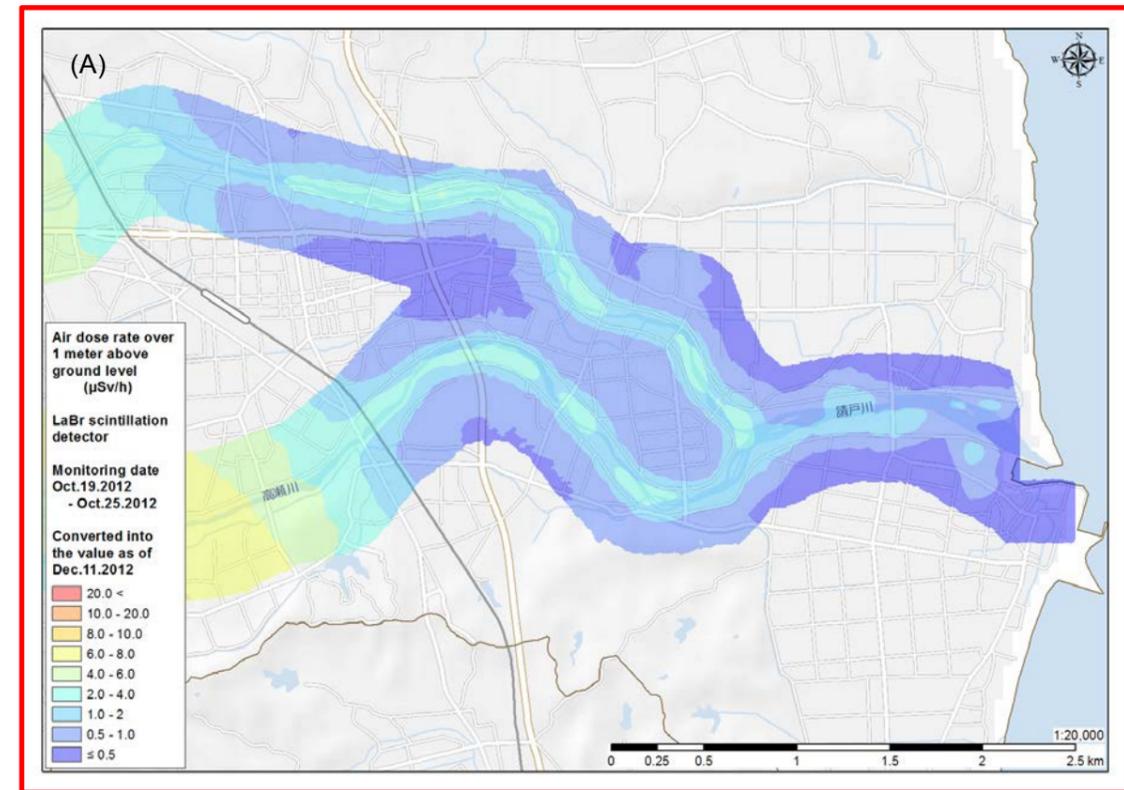
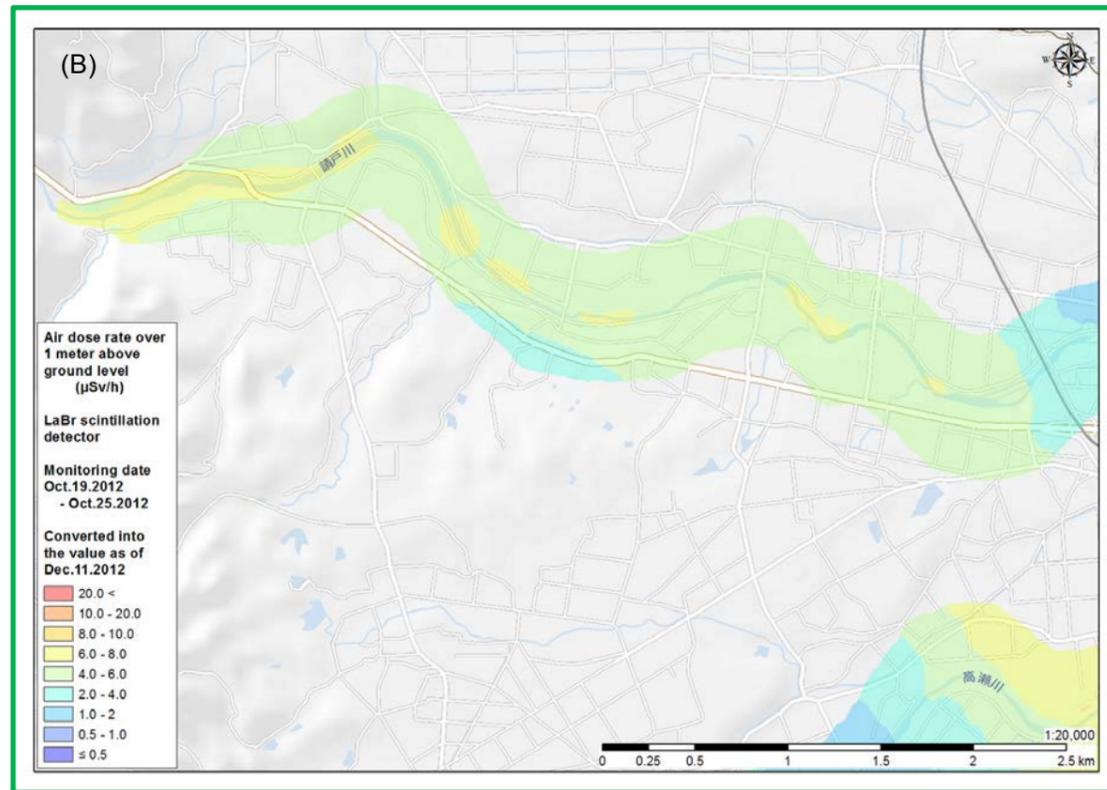


Fig. 5-6 請戸・高瀬川線量率マップ (2回目)

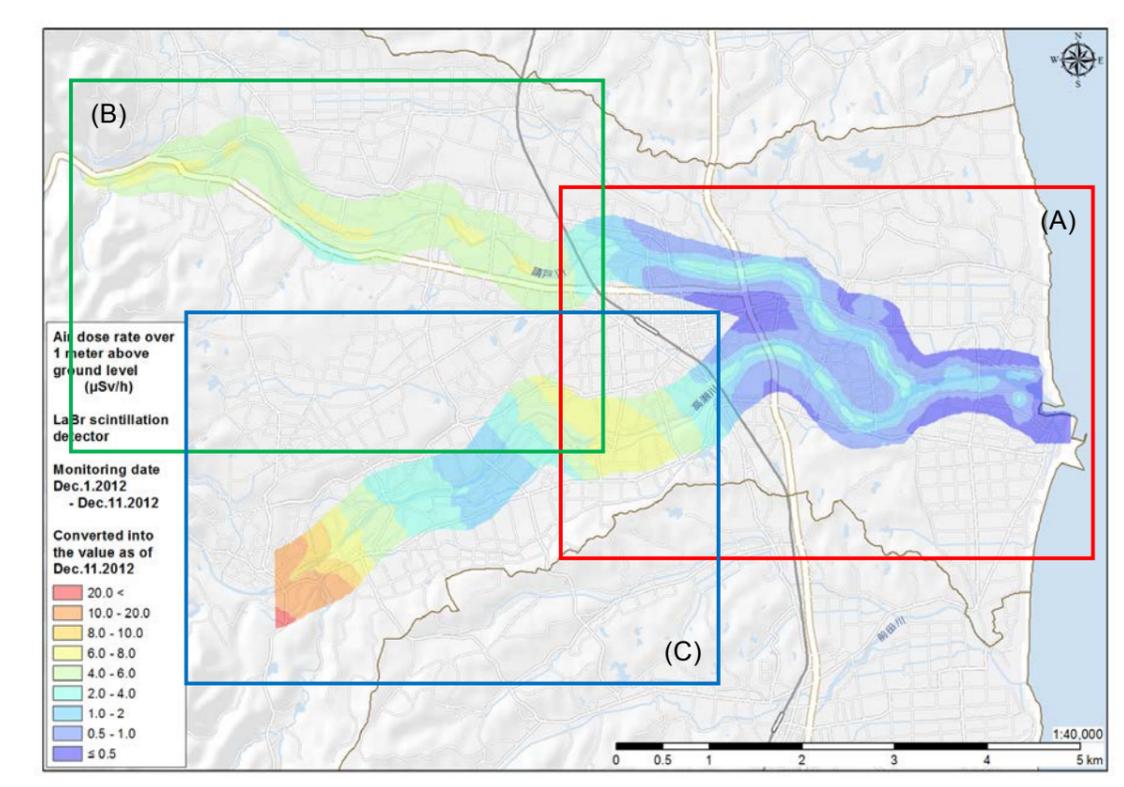
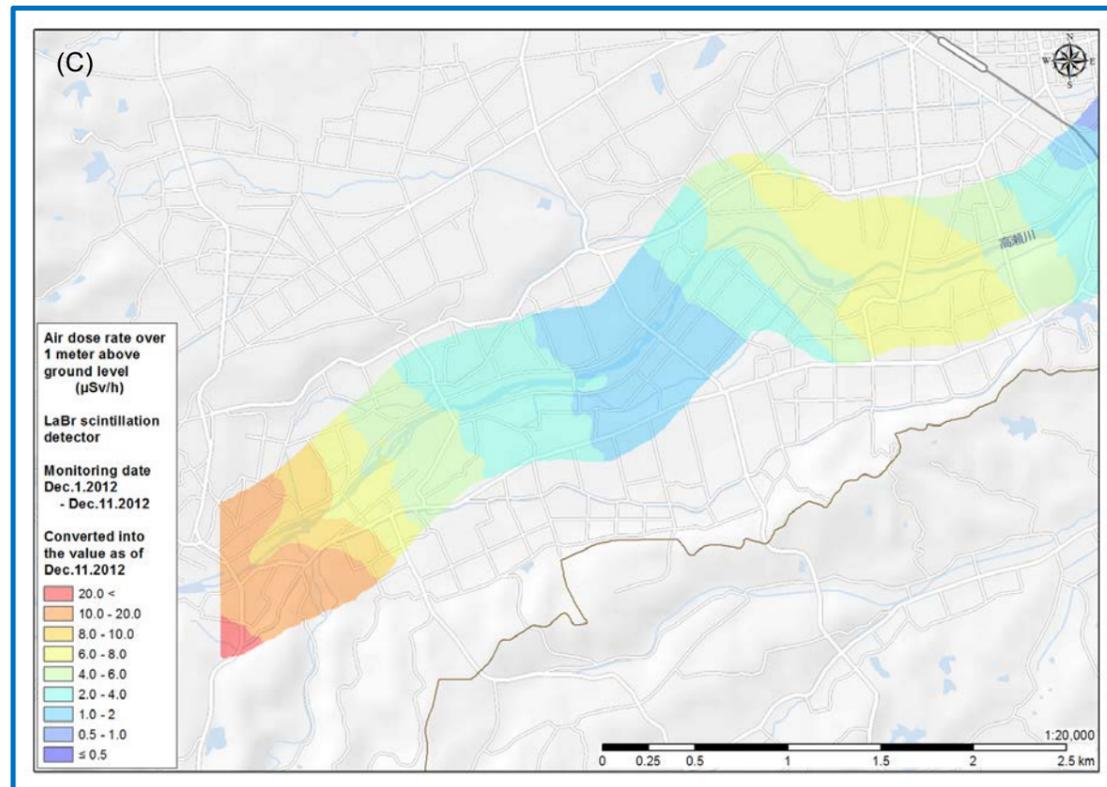
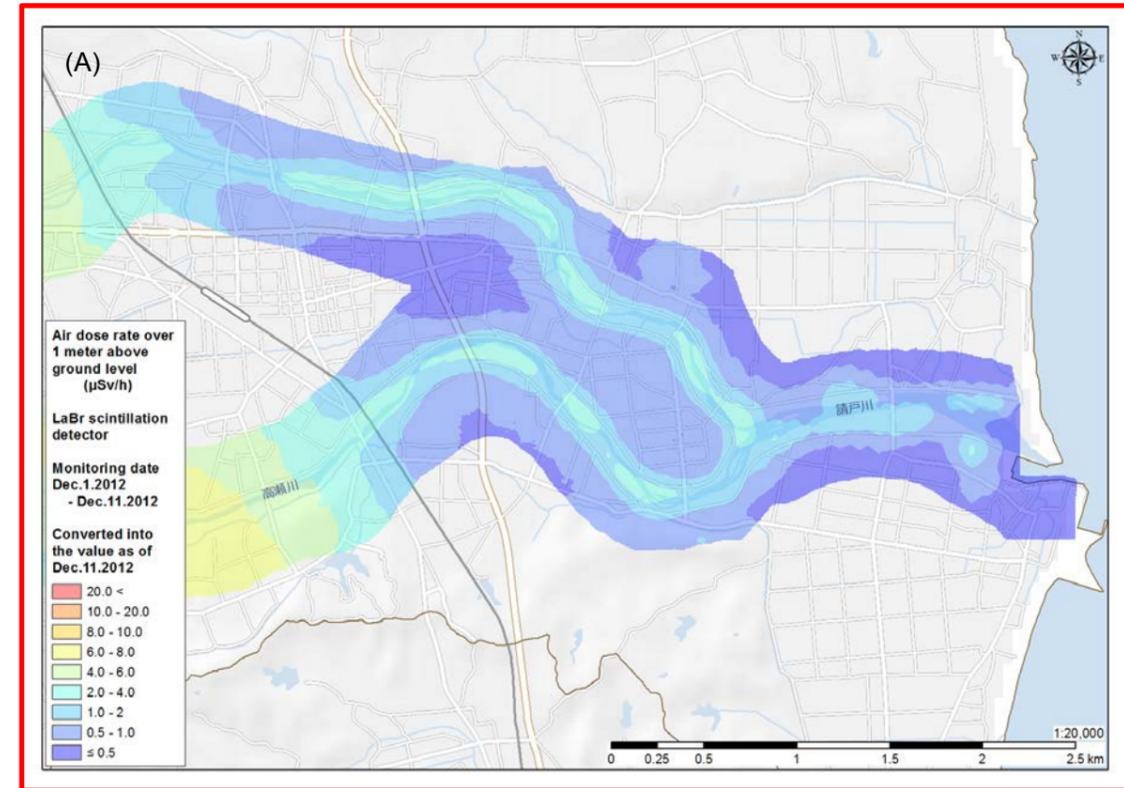
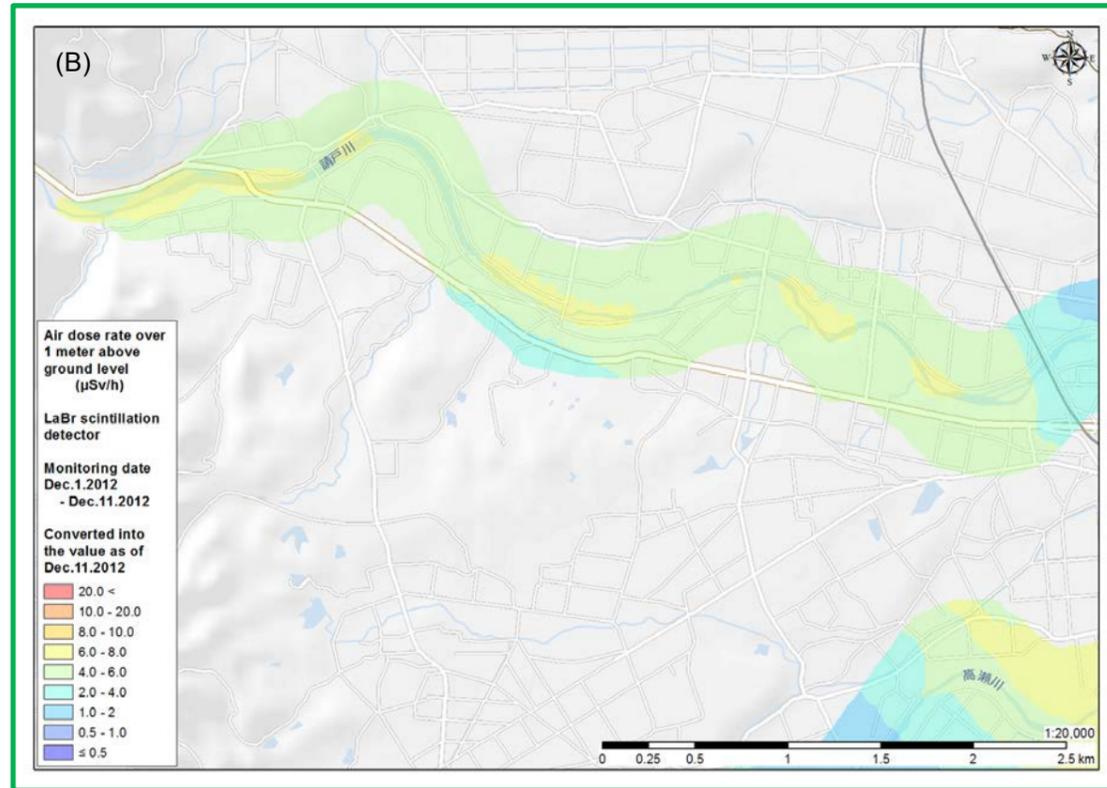


Fig. 5-7 請戸・高瀬川線量率マップ (3回目)

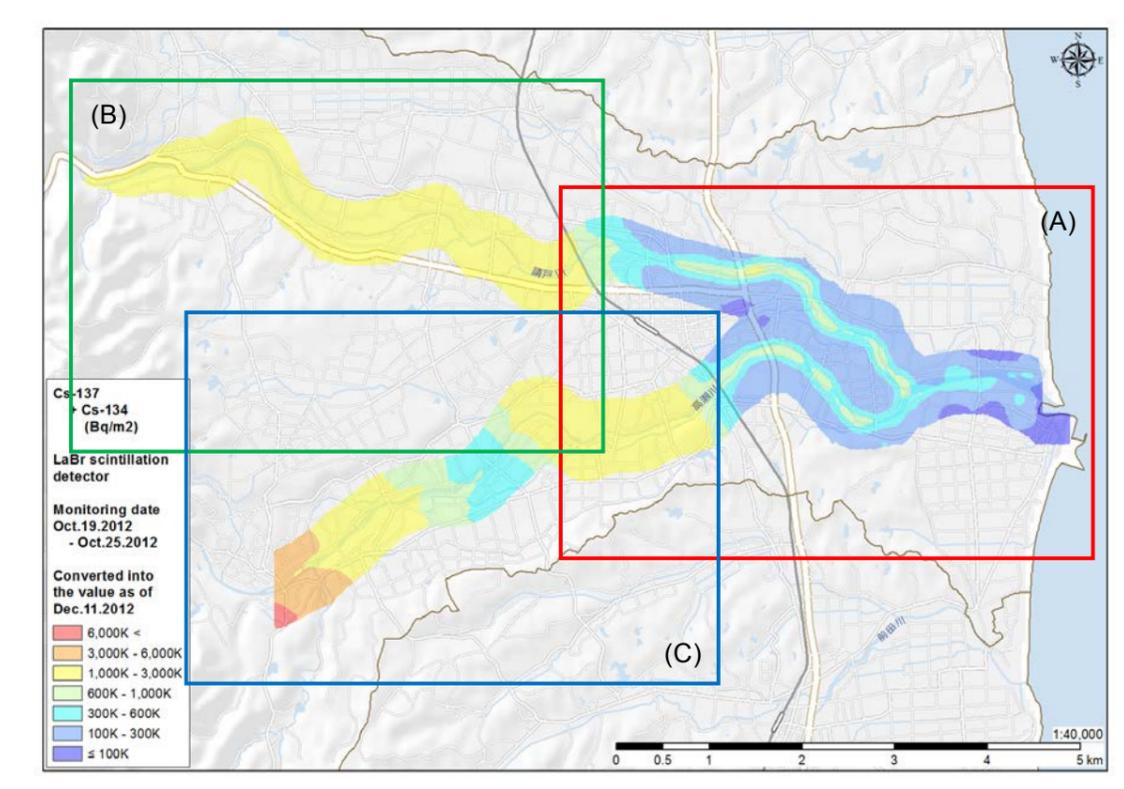
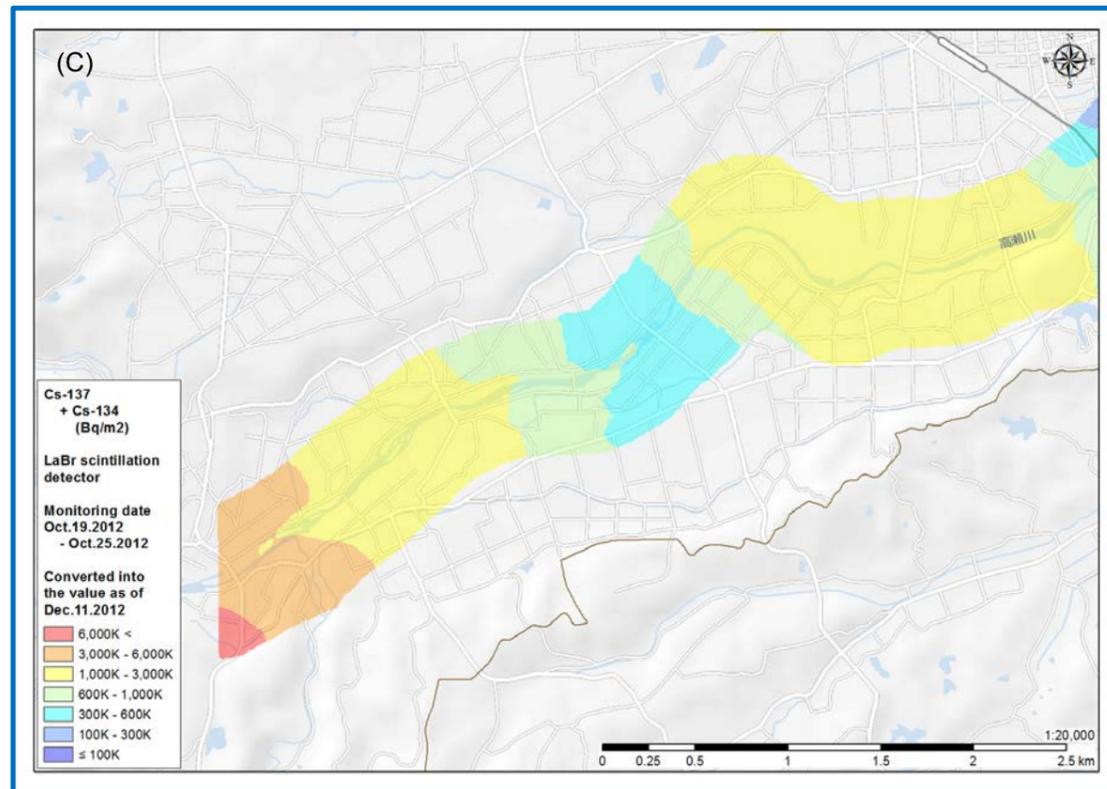
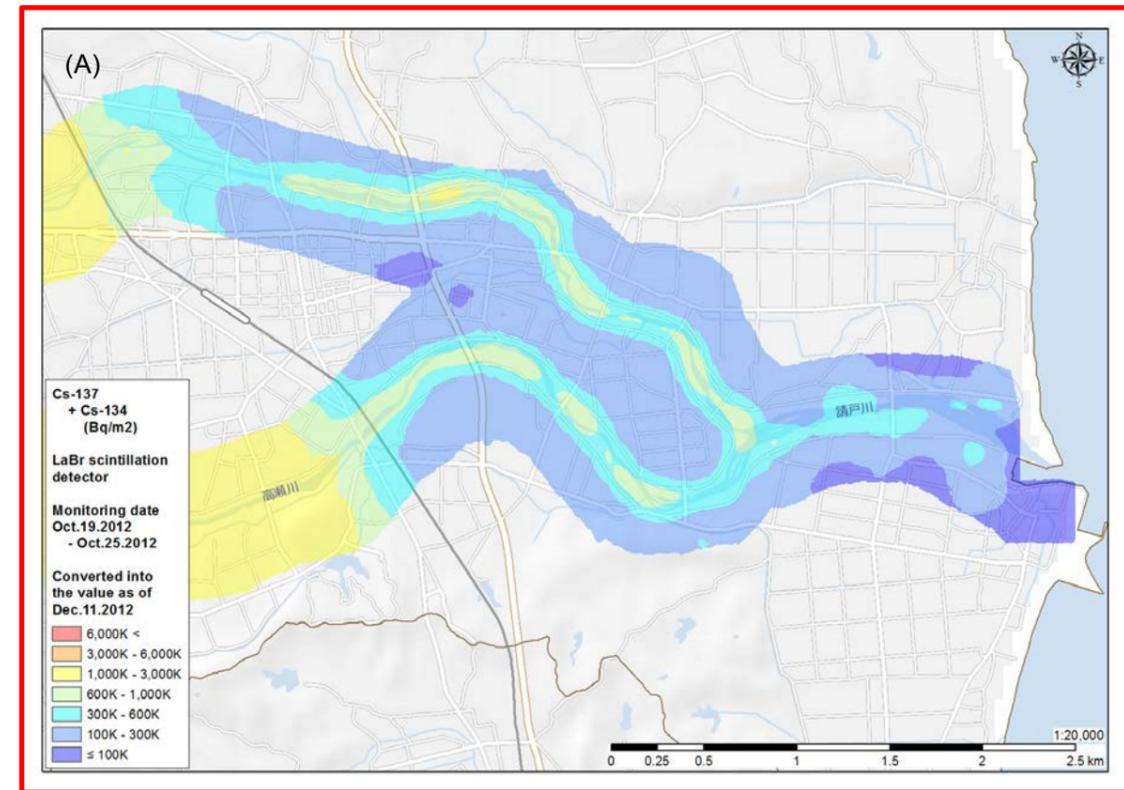
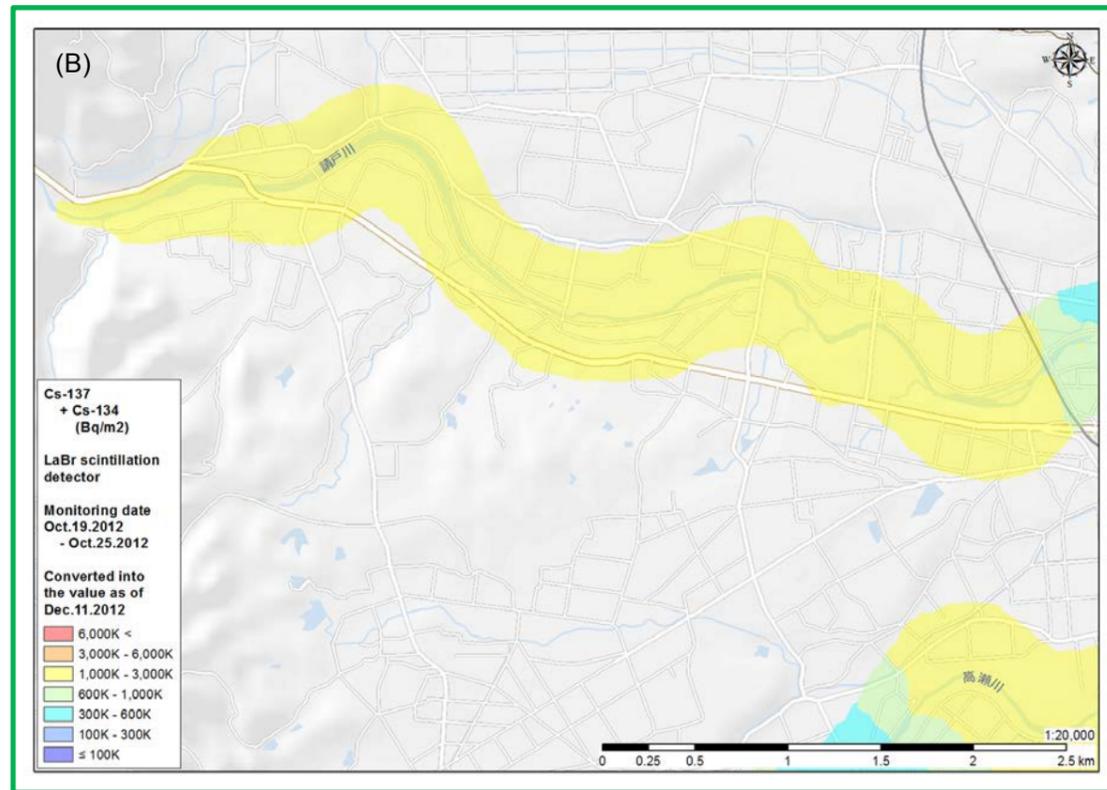


Fig. 5-8 請戸・高瀬川 Cs 沈着量マップ (2 回目)

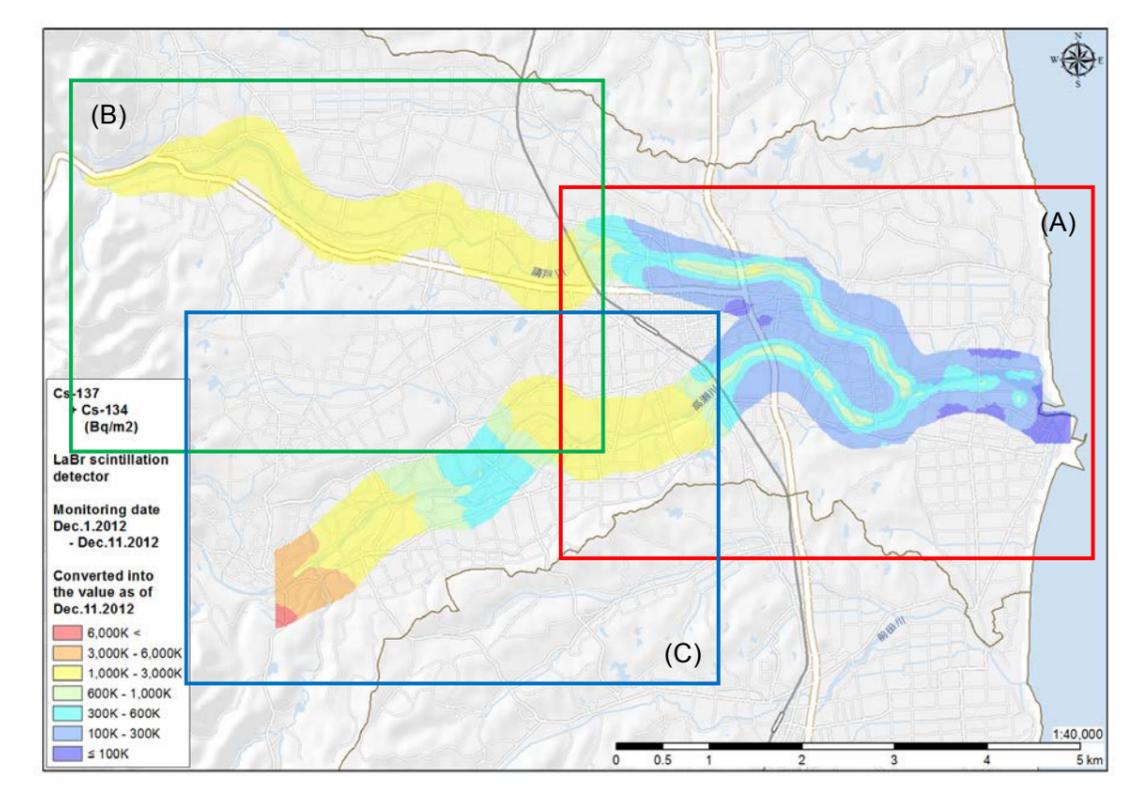
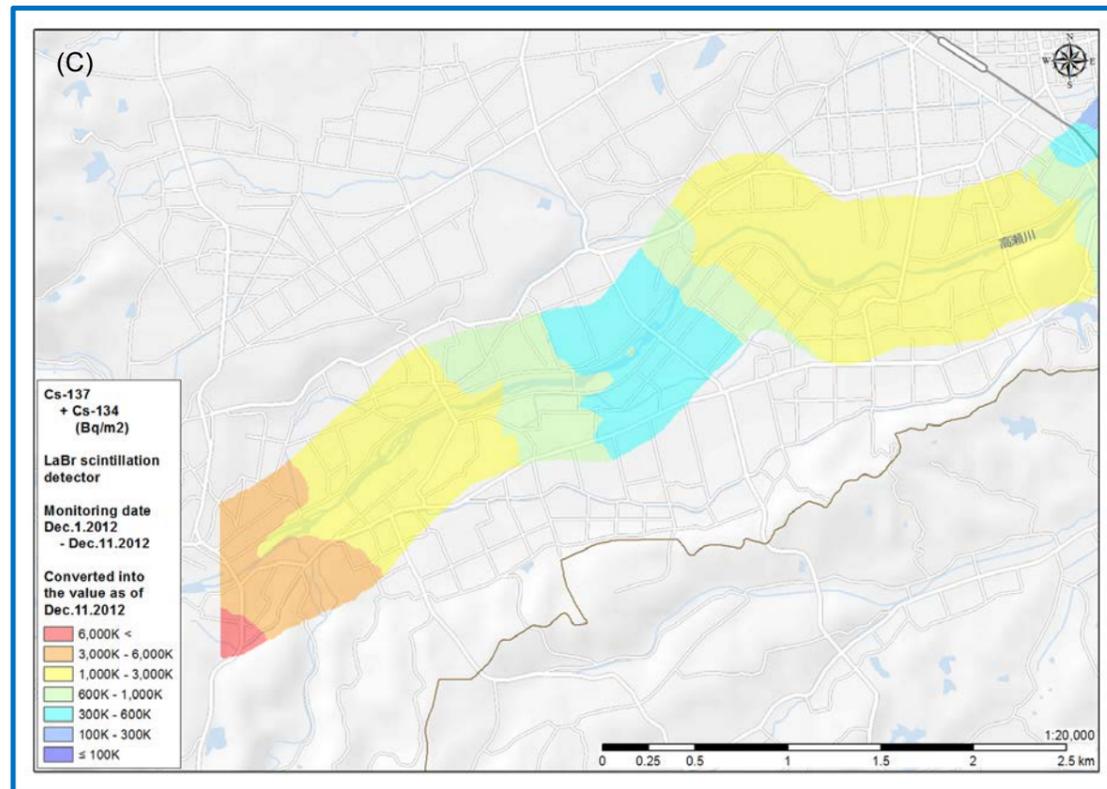
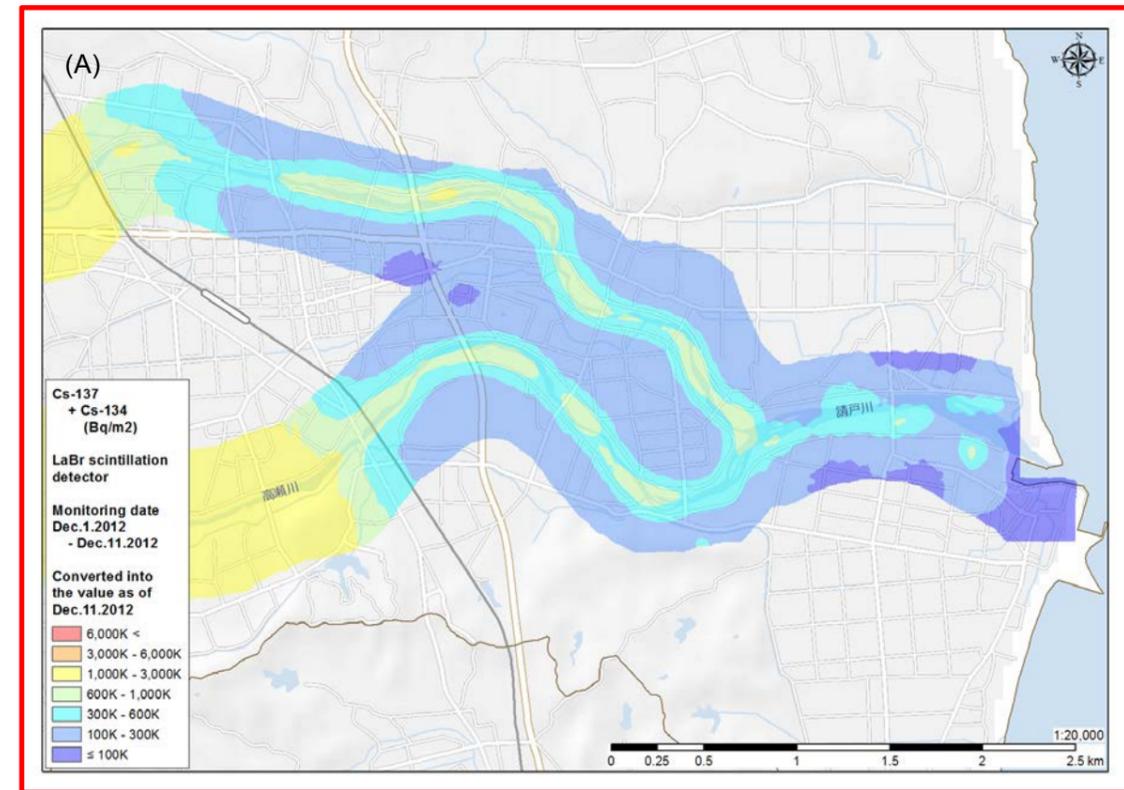
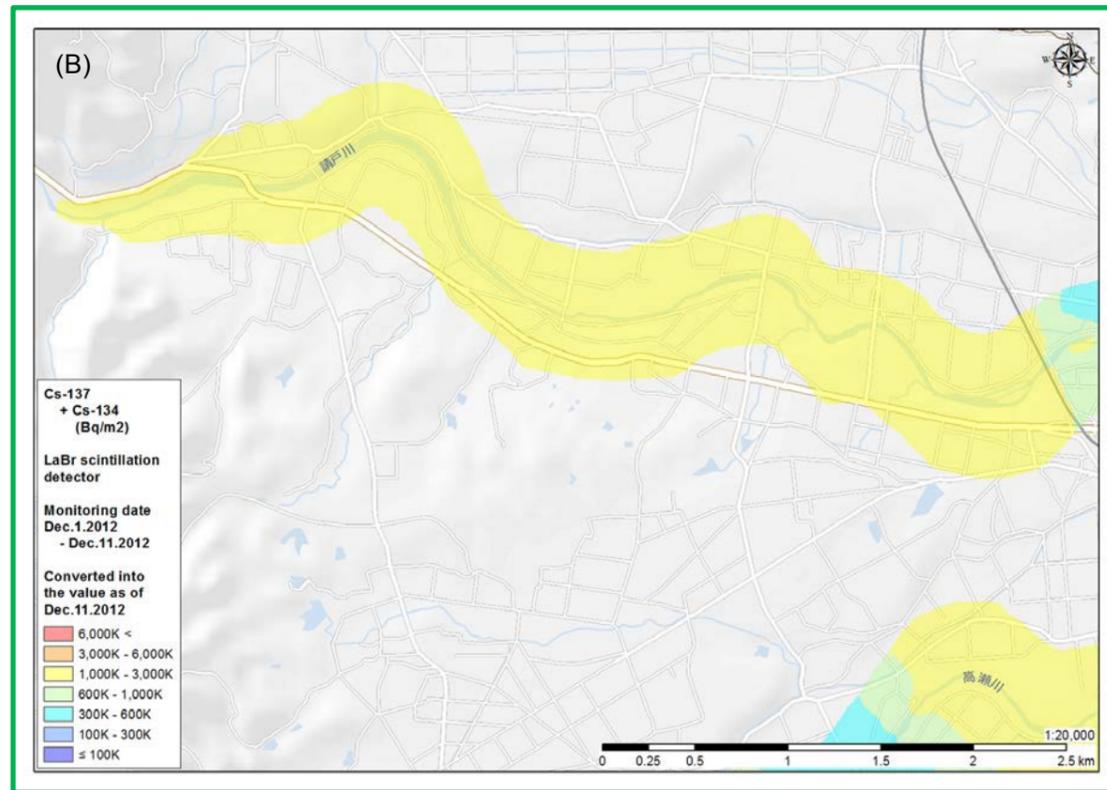


Fig. 5-9 請戸・高瀬川 Cs 沈着量マップ (3 回目)

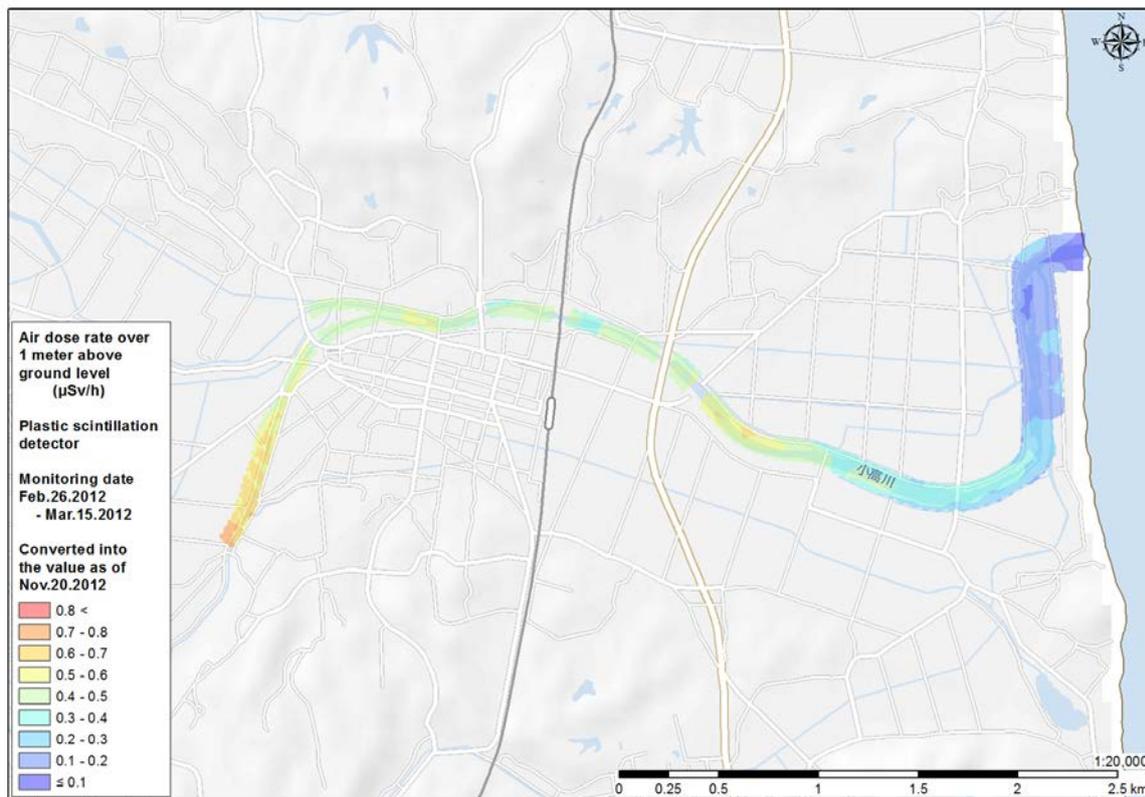


Fig. 5-10 小高川線量率マップ (1回目)

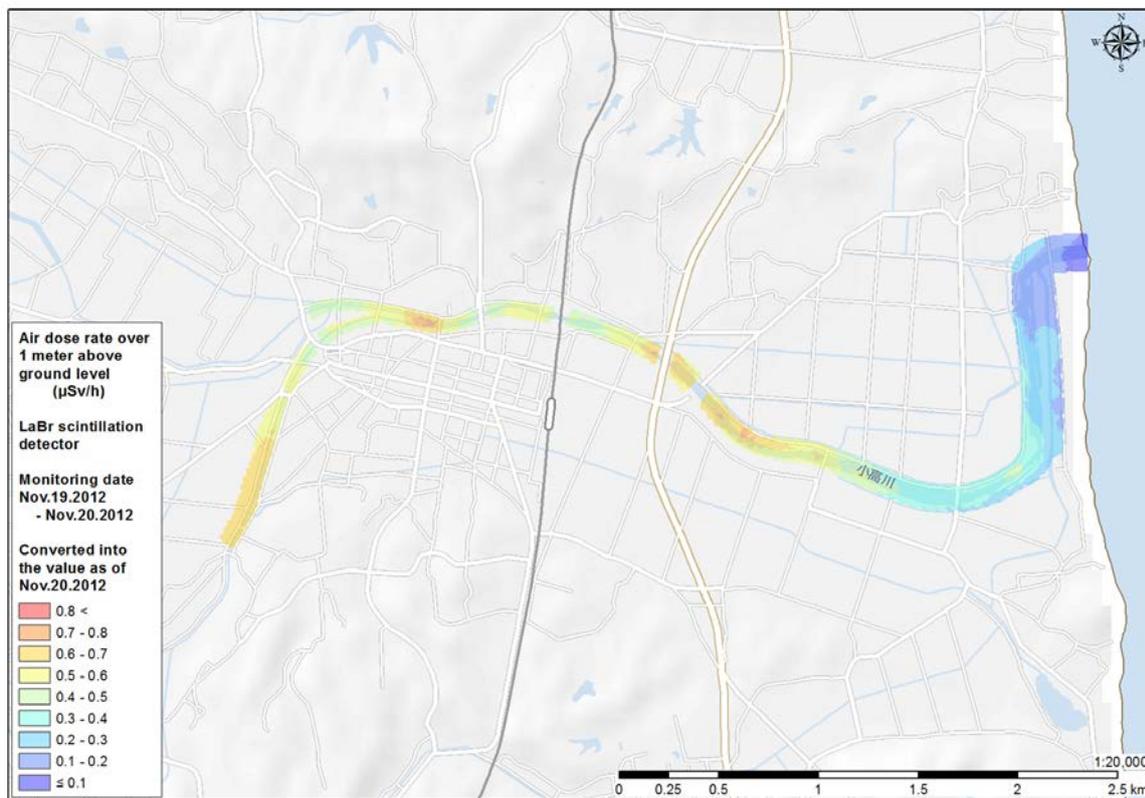


Fig. 5-11 小高川線量率マップ (2回目)

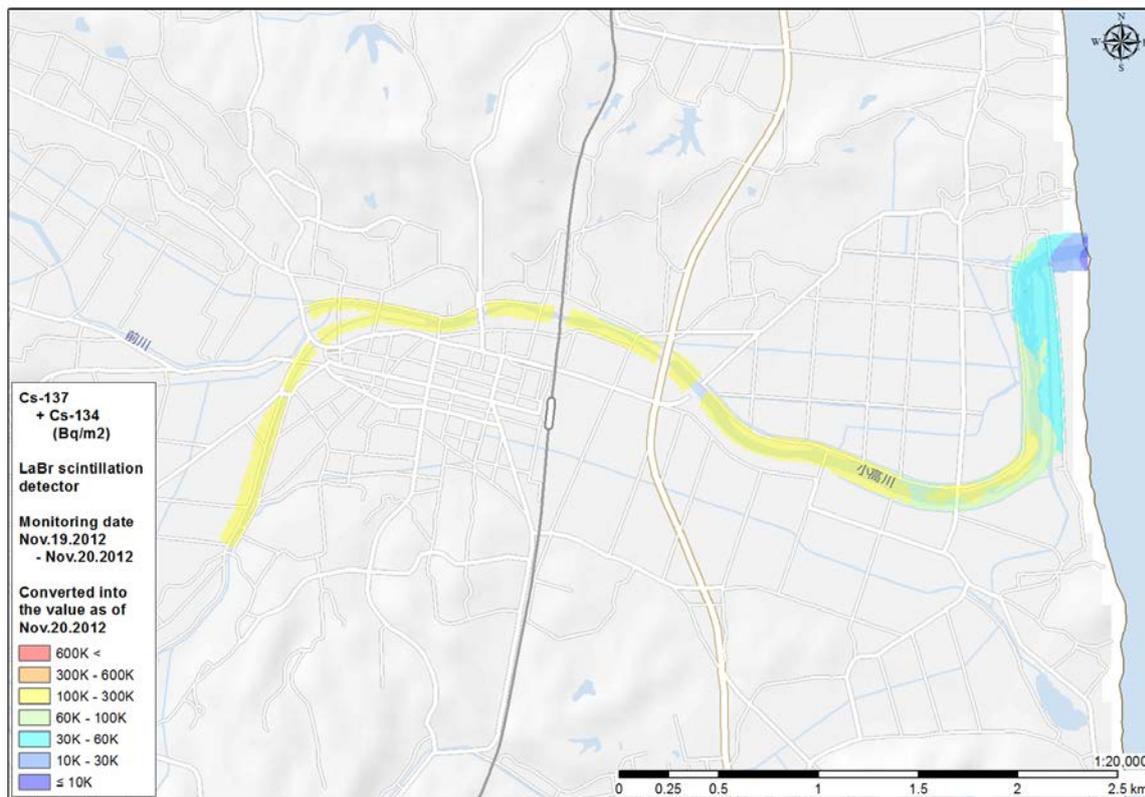


Fig. 5-12 小高川 Cs 沈着量マップ (2 回目)

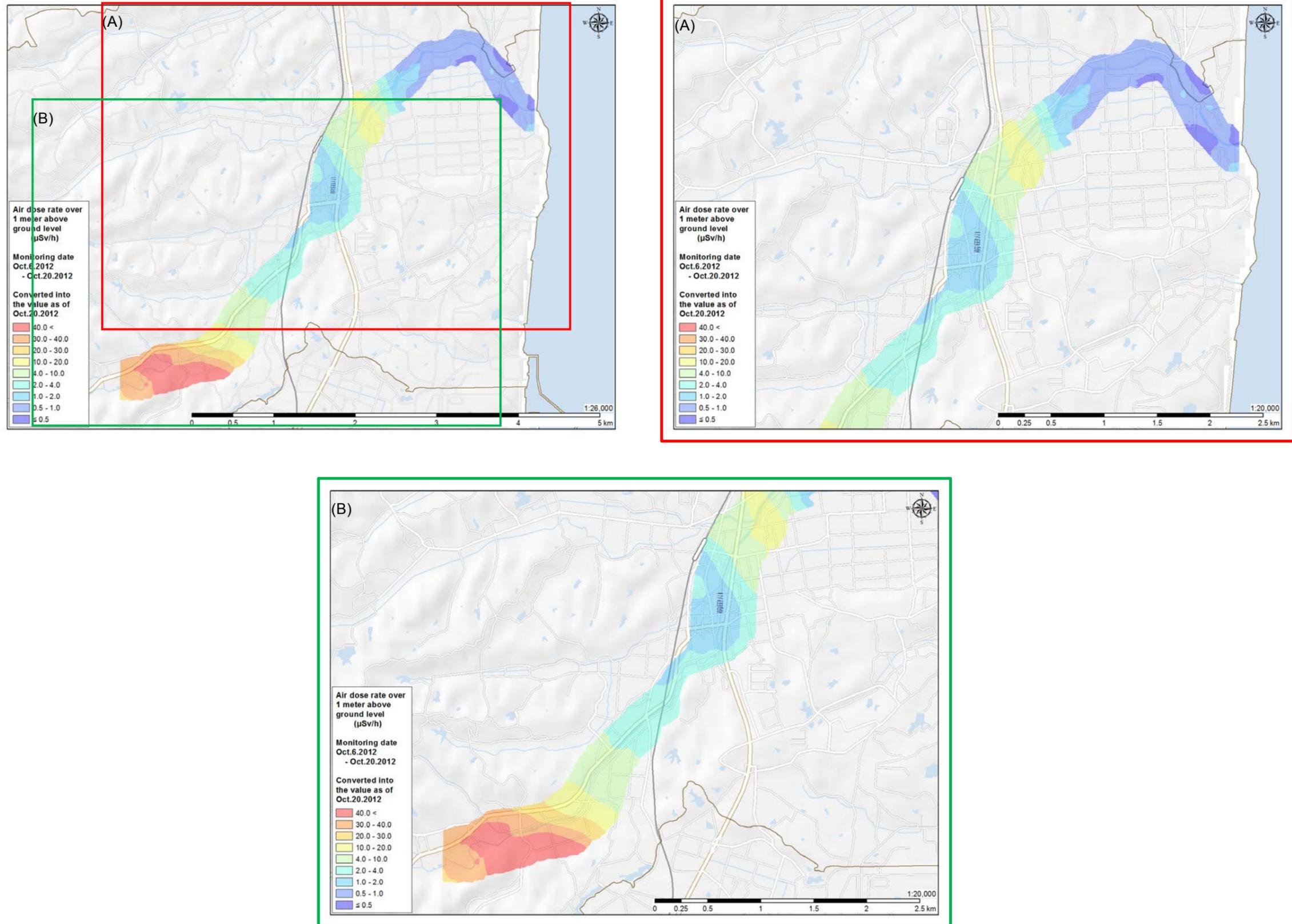


Fig. 5-13 前田川線量率マップ

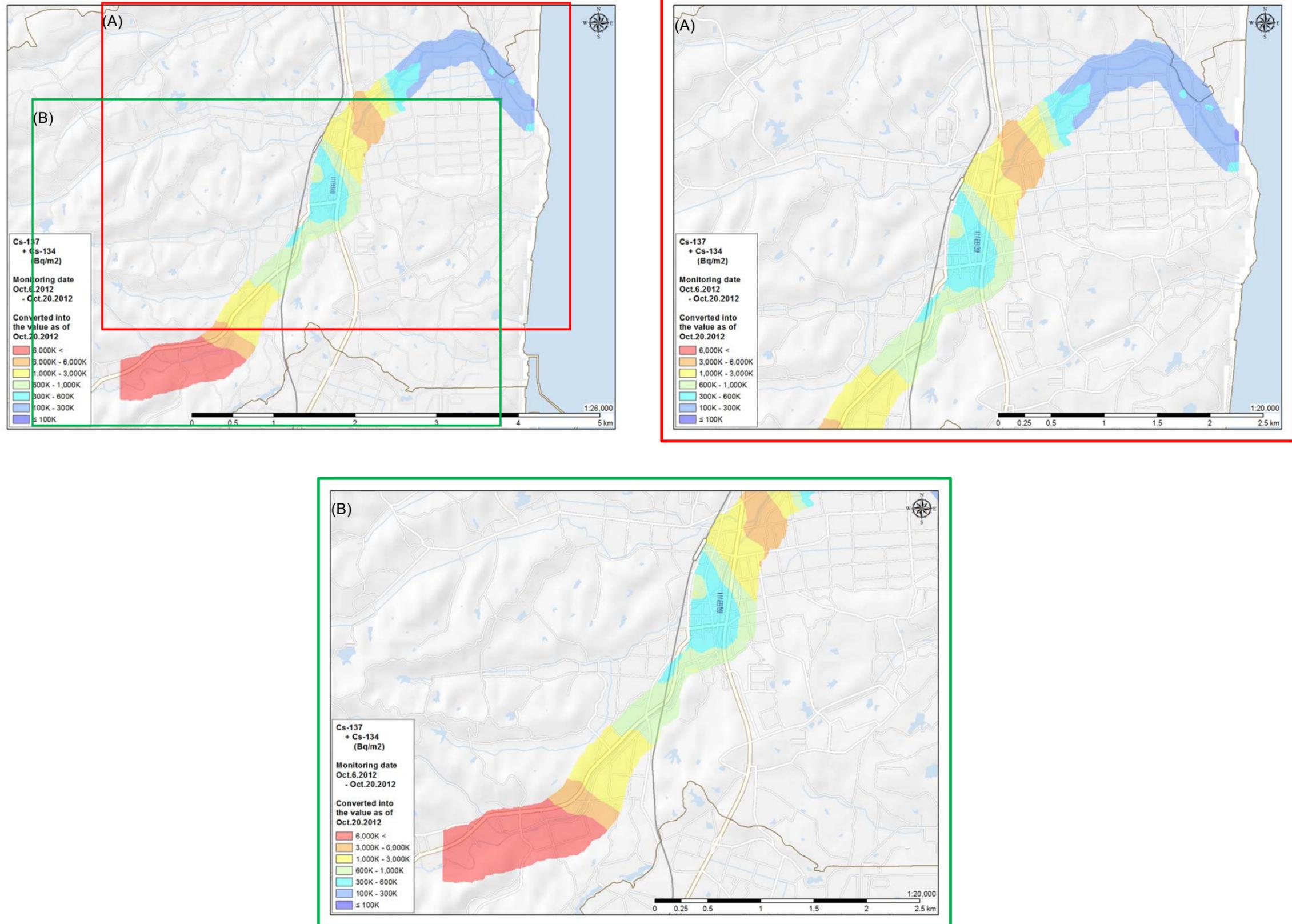


Fig. 5-14 前田川 Cs 沈着量マップ

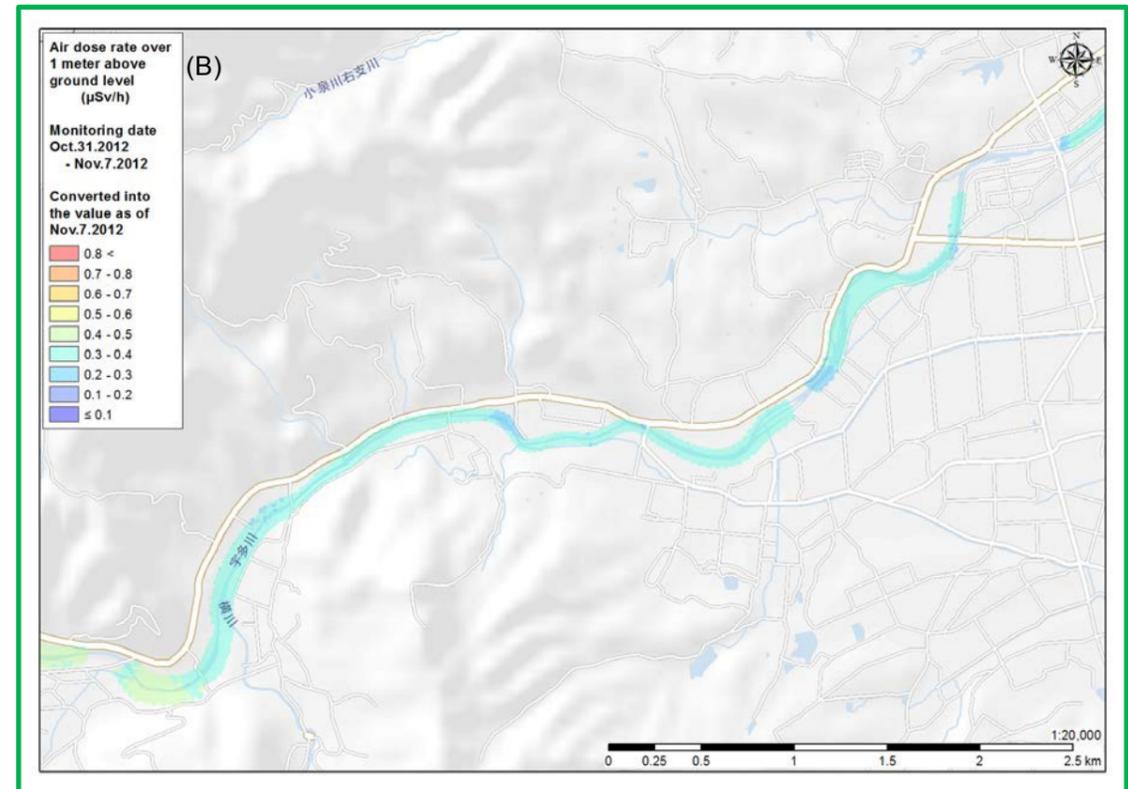
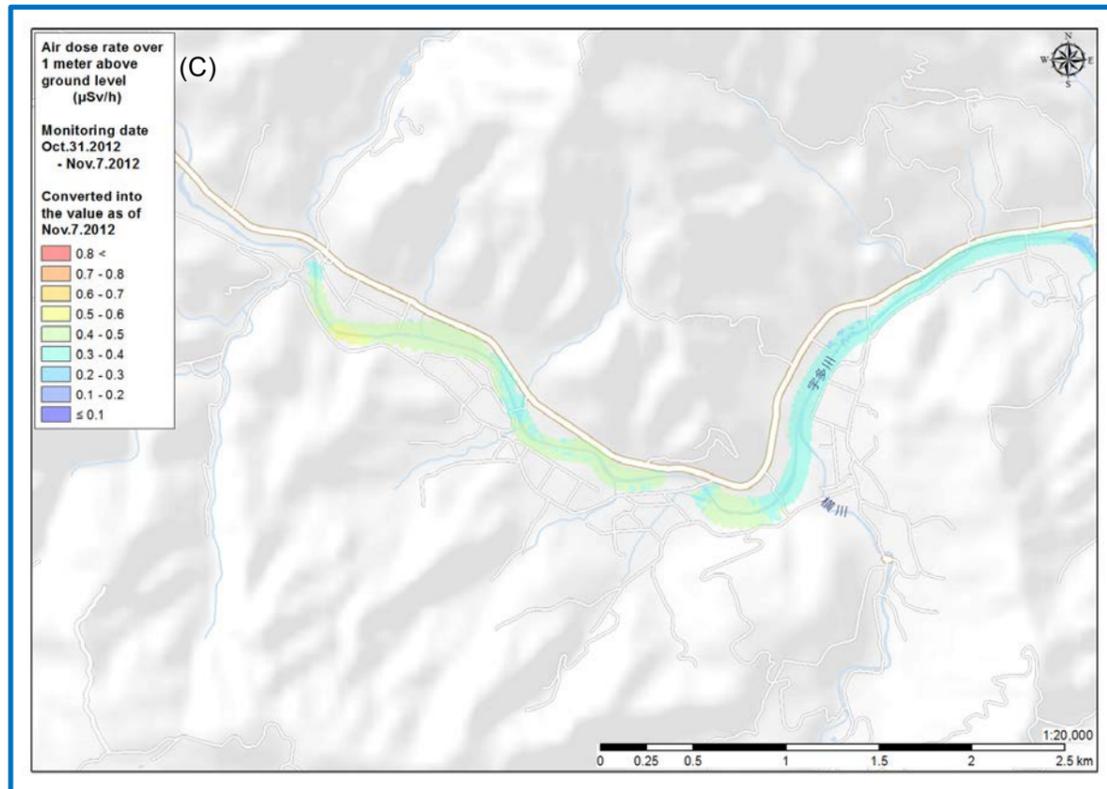
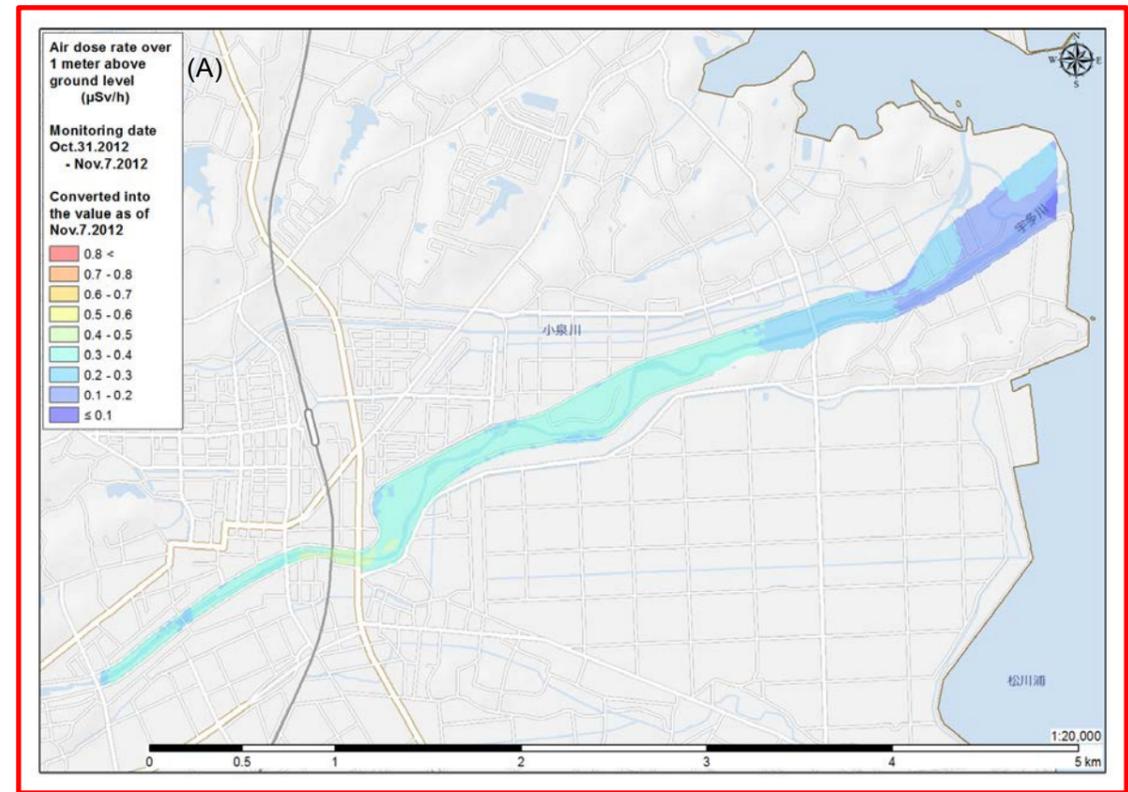
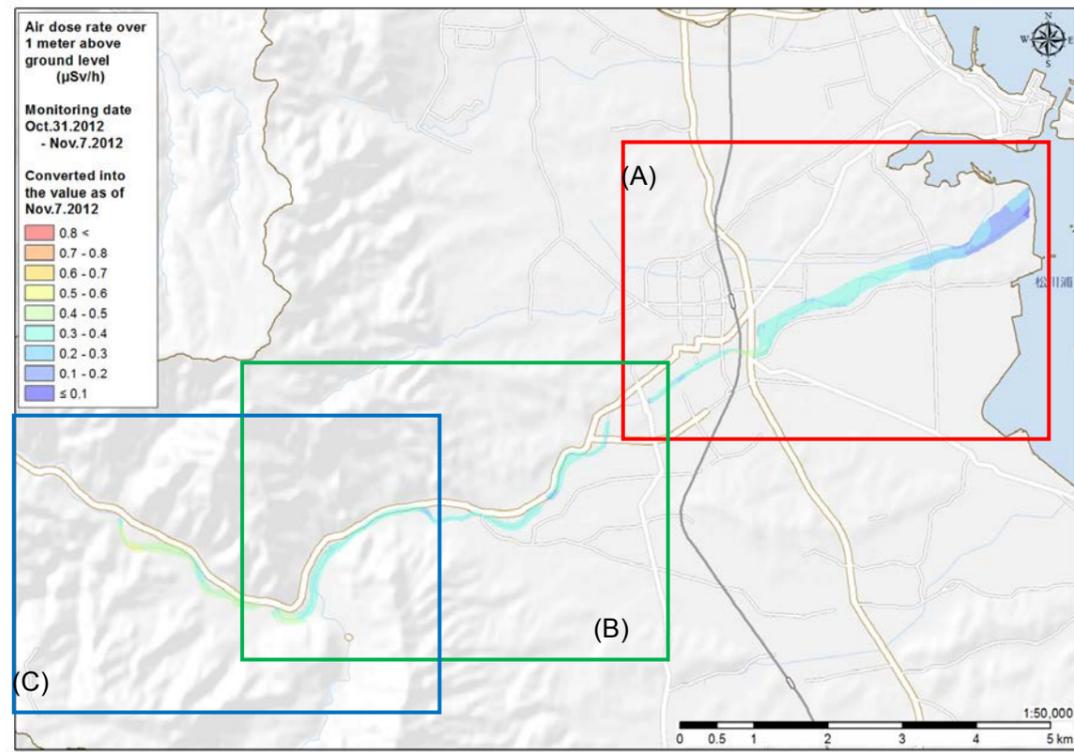


Fig. 5-15 宇多川線量率マップ

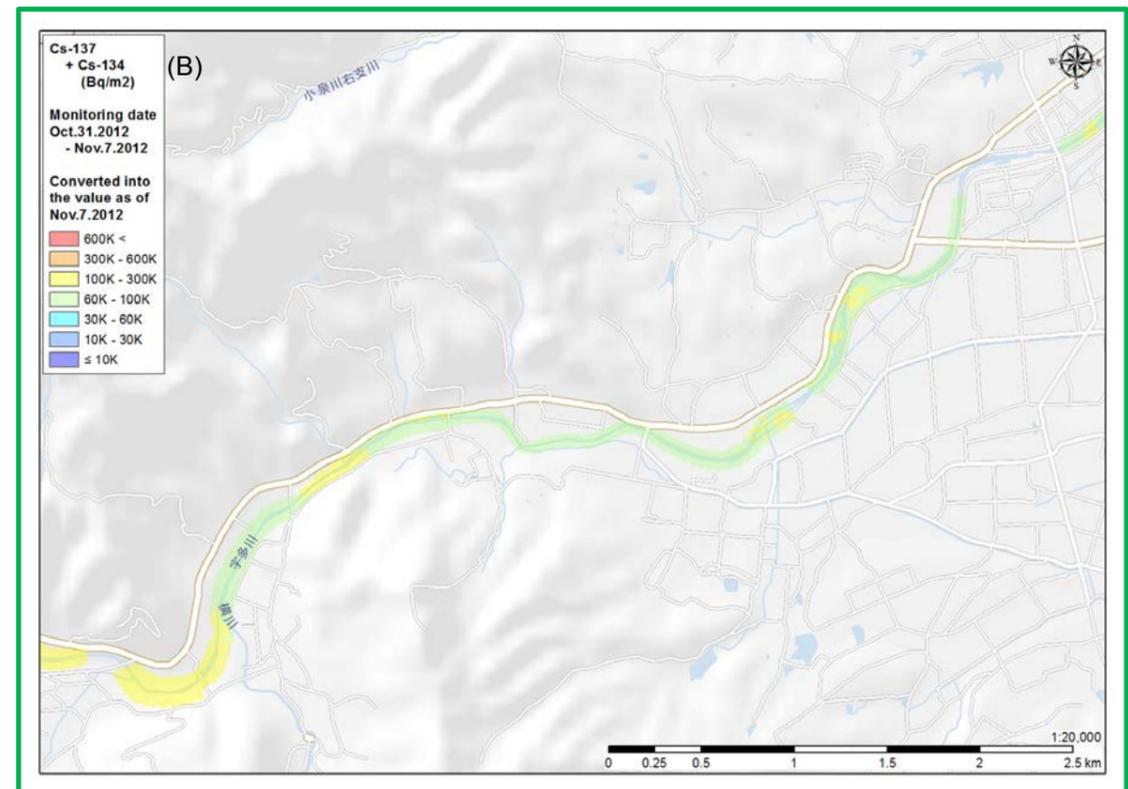
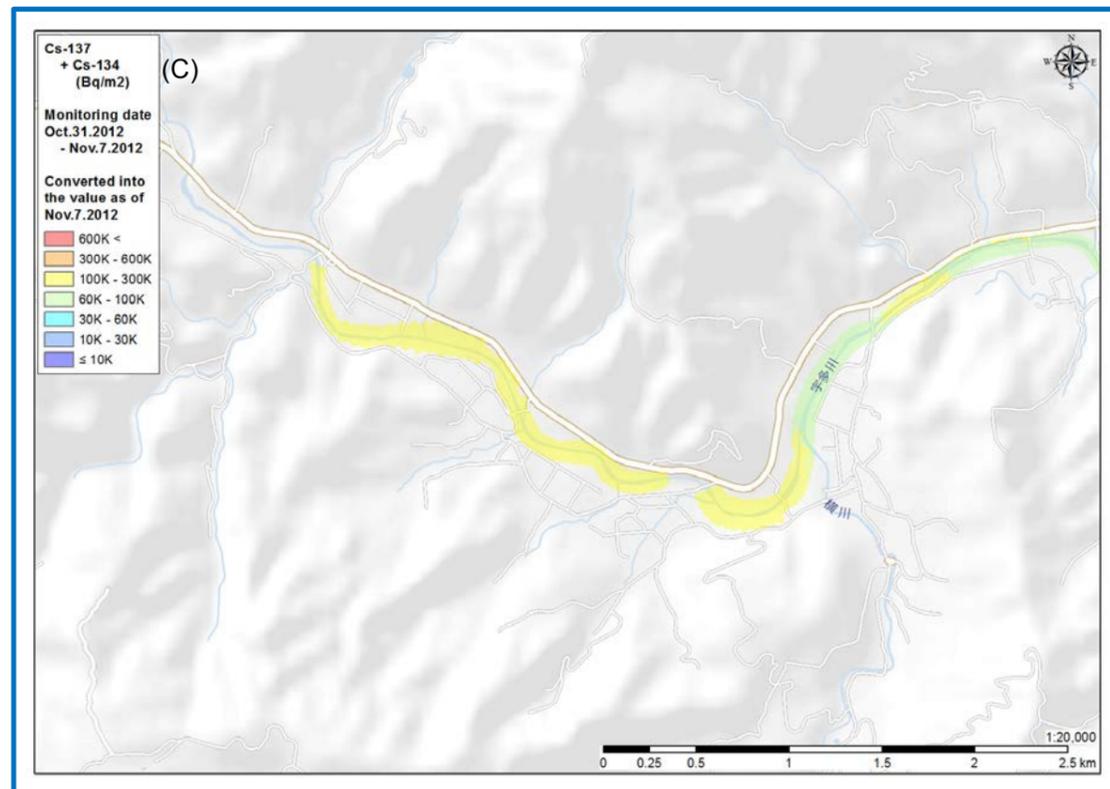
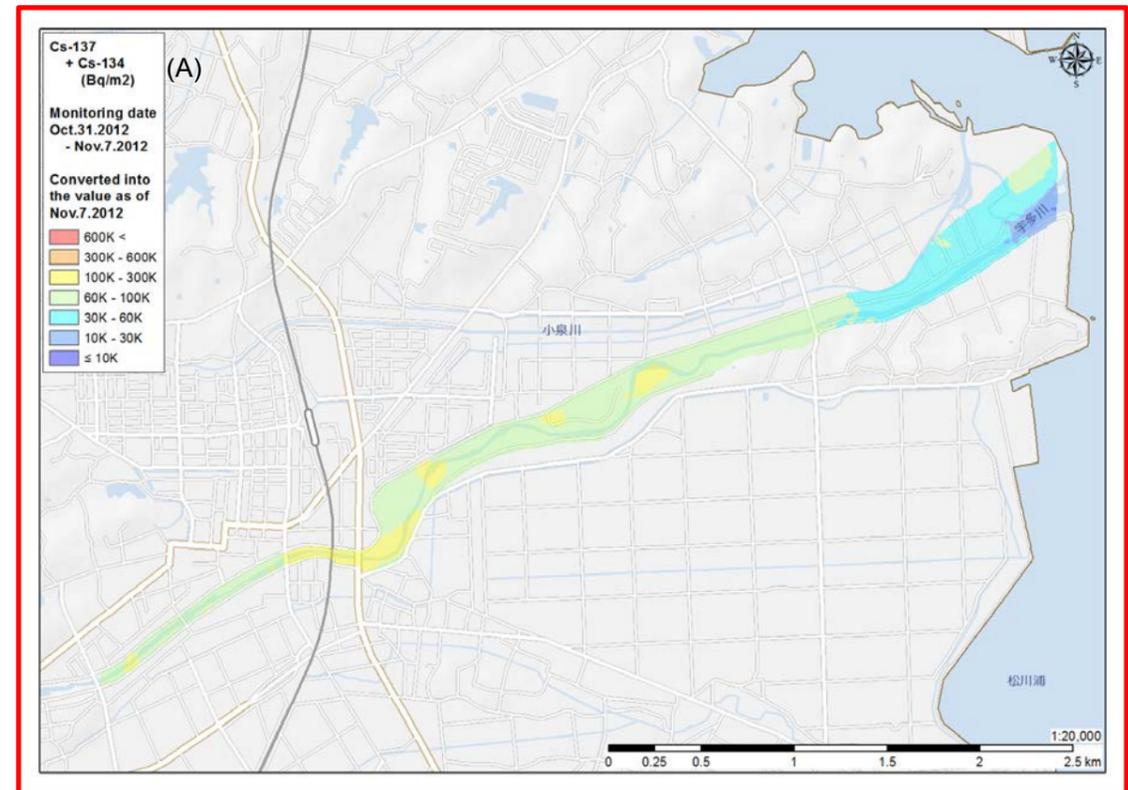
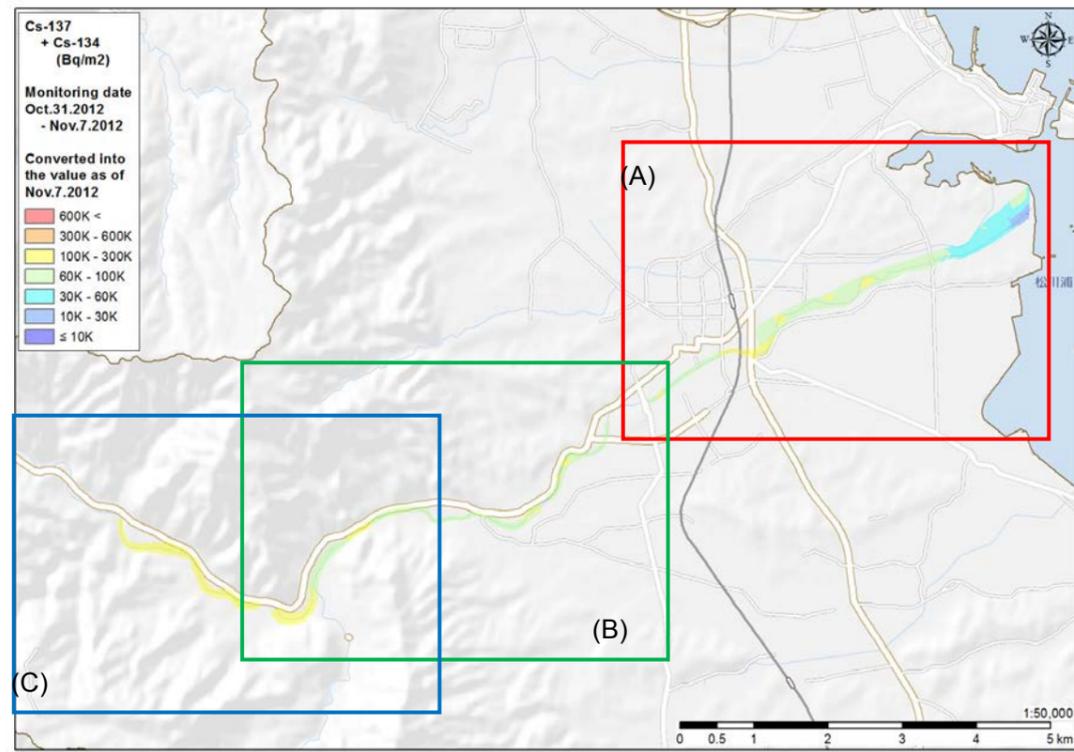


Fig. 5-16 宇多川 Cs 沈着量マップ

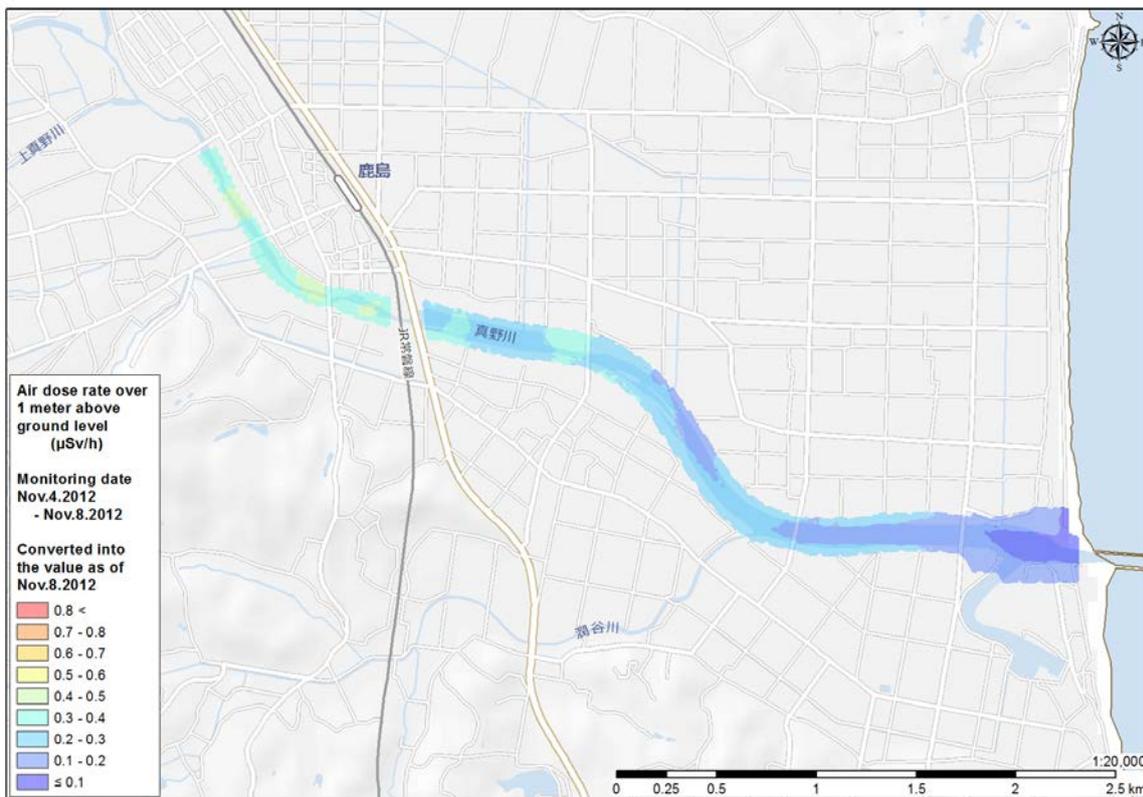


Fig. 5-17 真野川線量率マップ

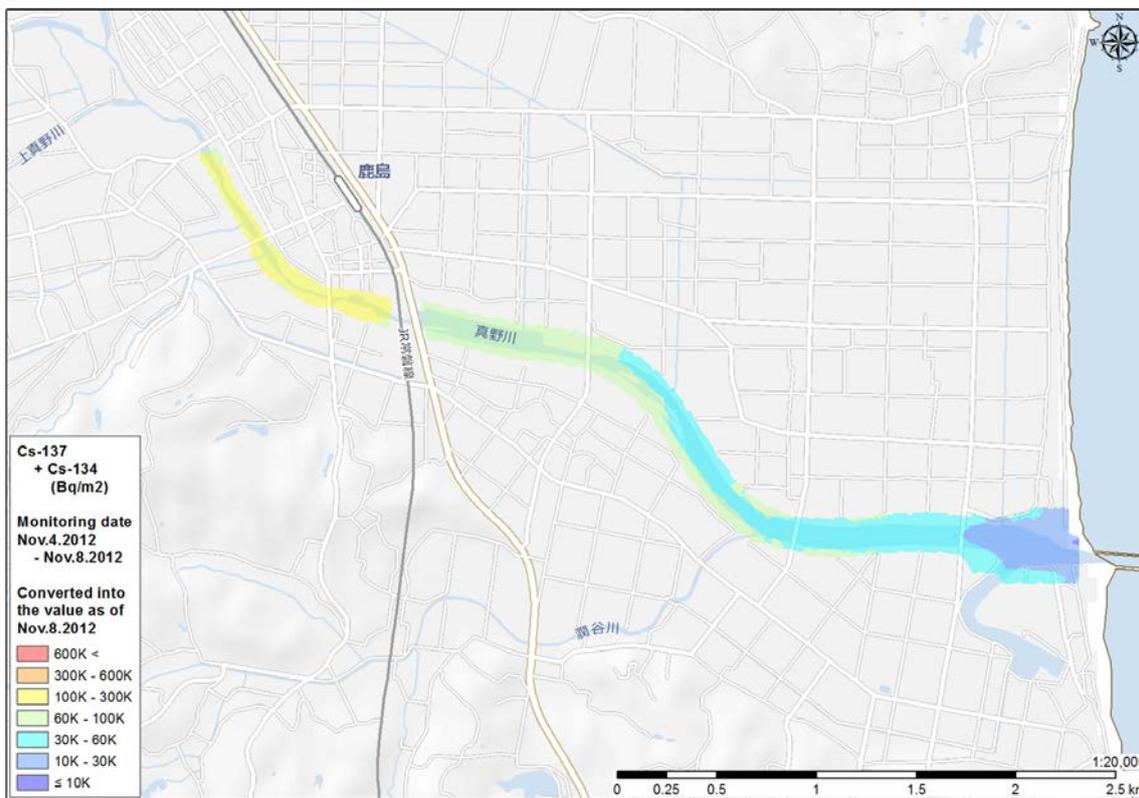


Fig. 5-18 真野川 Cs 沈着量マップ

This is a blank page.

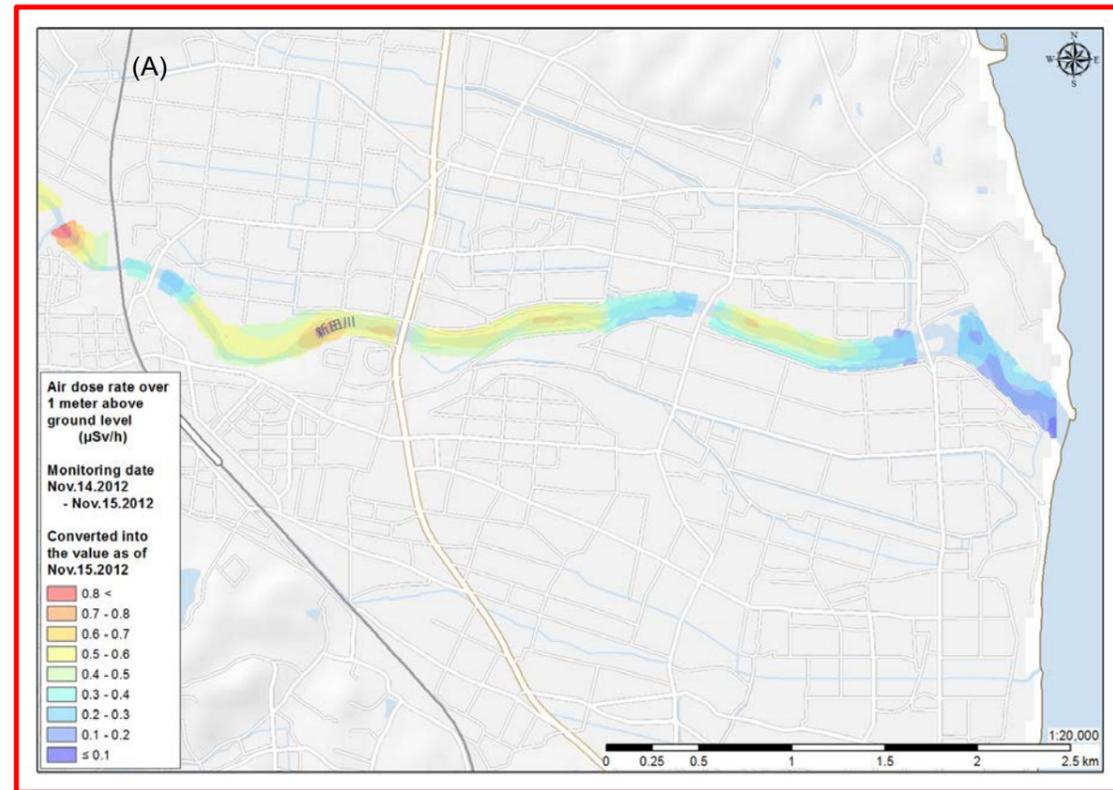
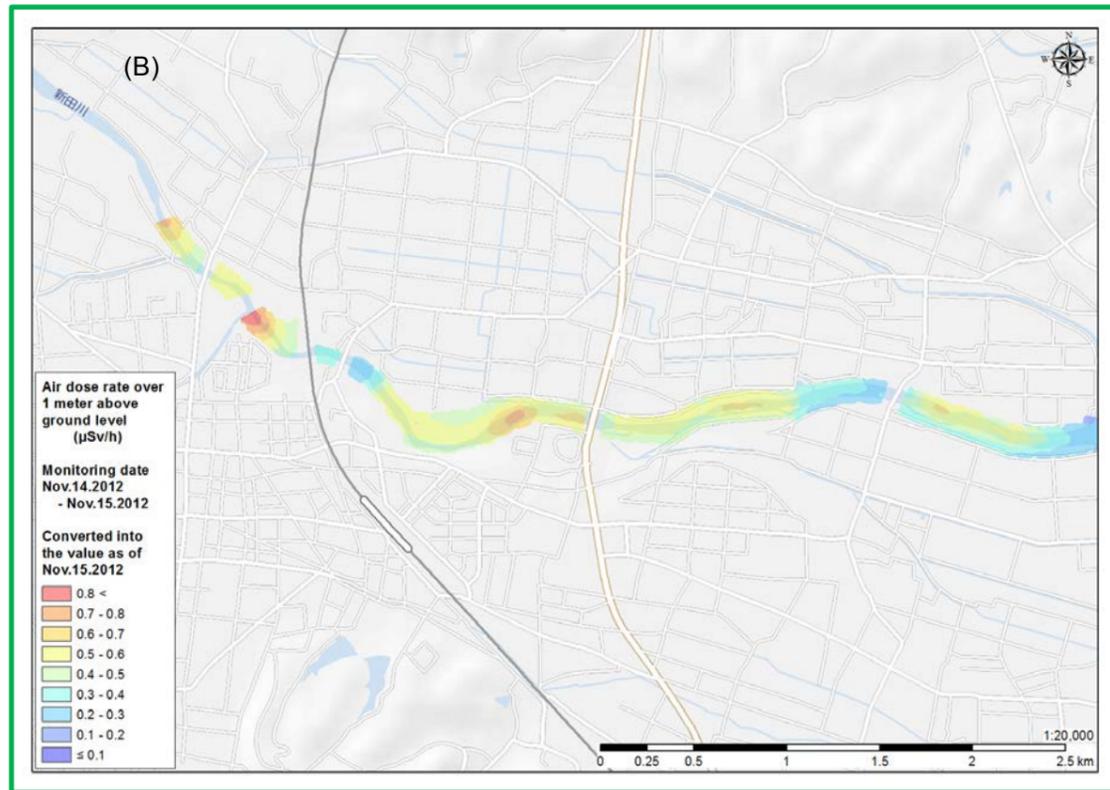
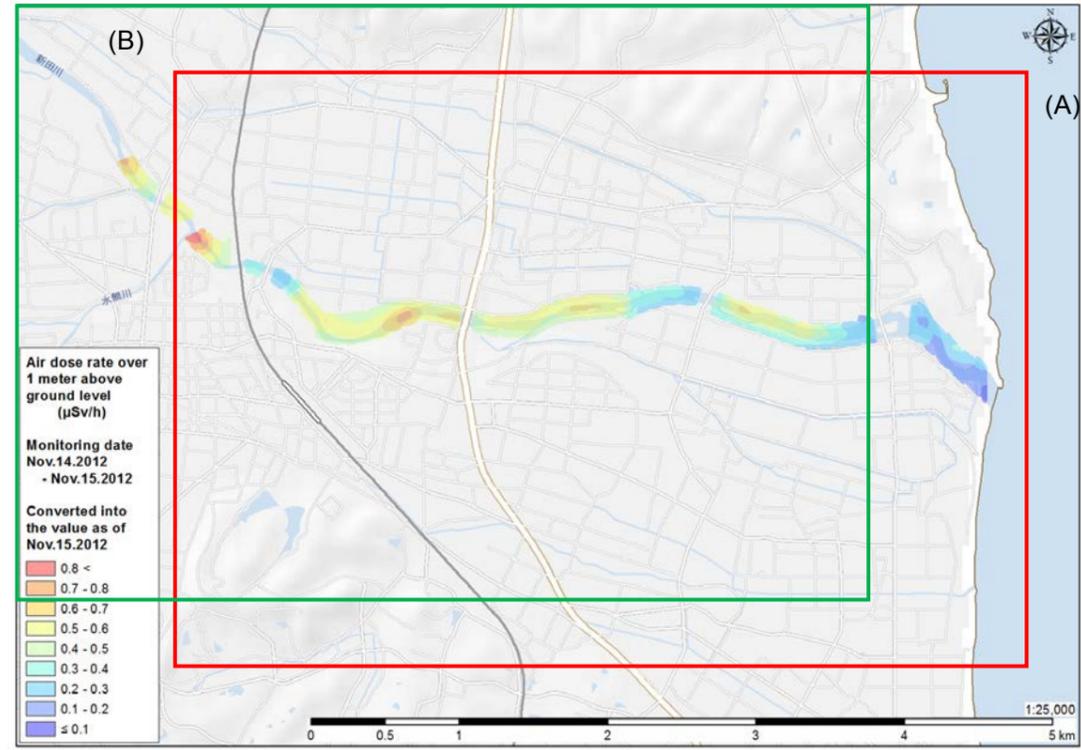


Fig. 5-19 新田川線量率マップ

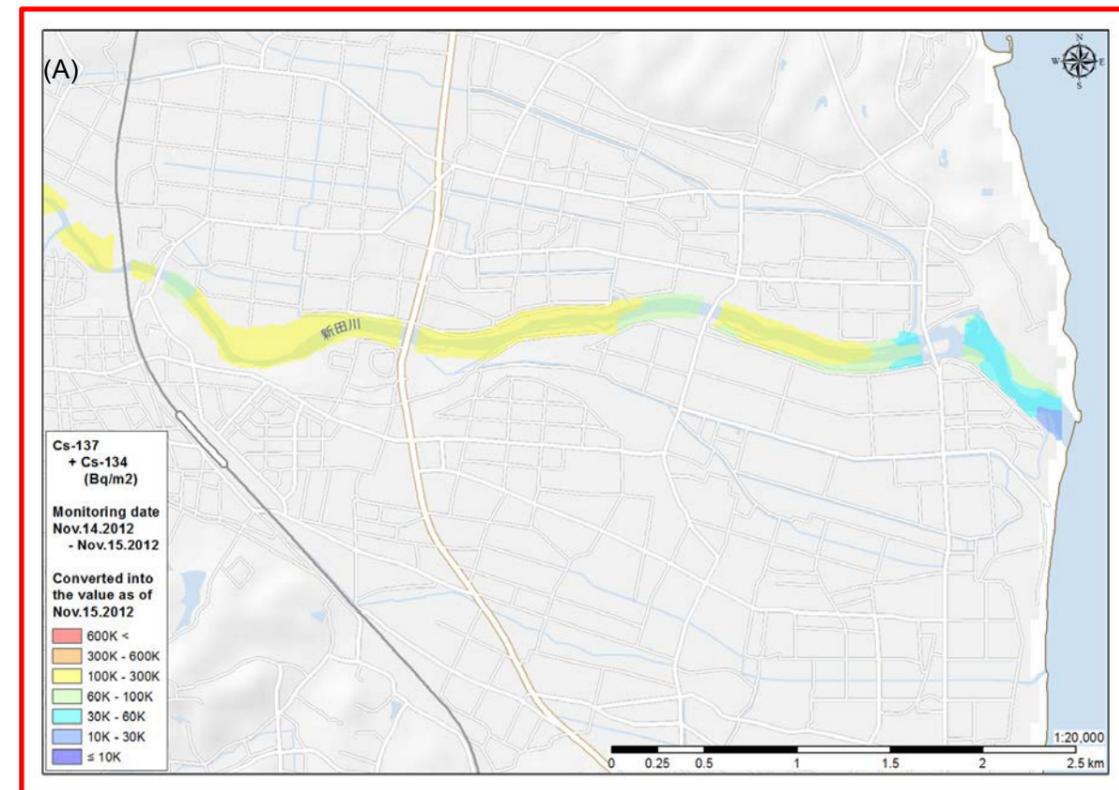
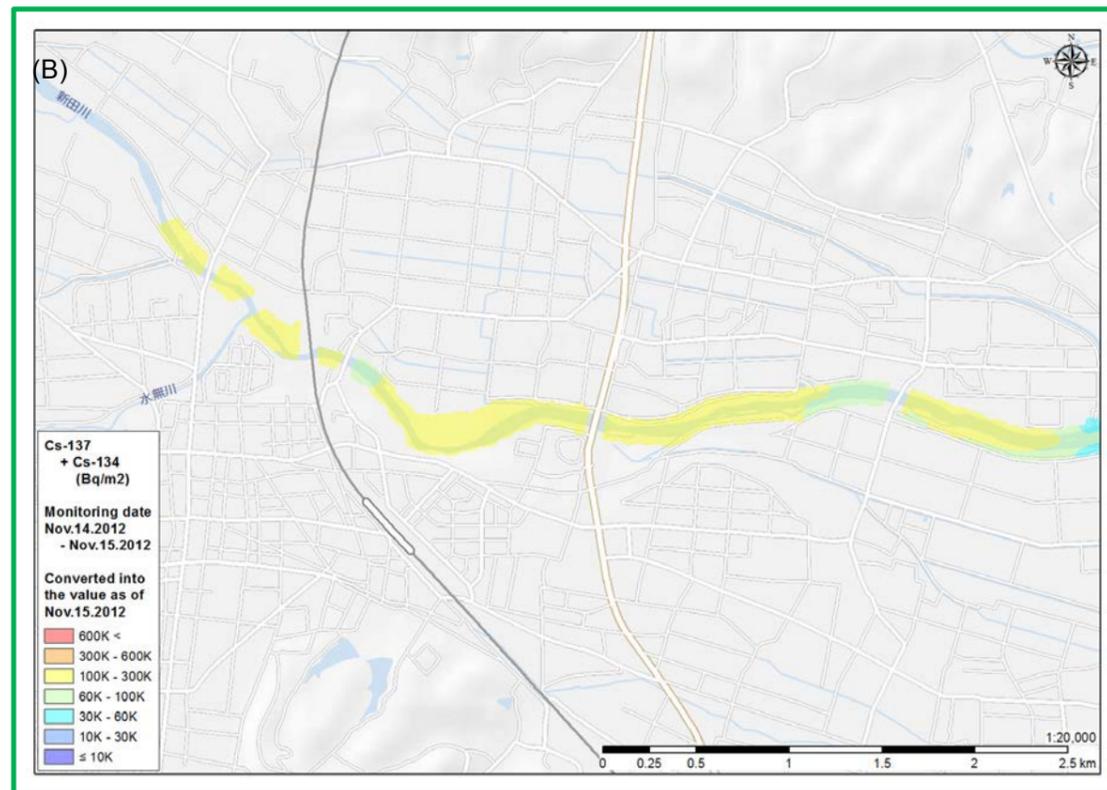
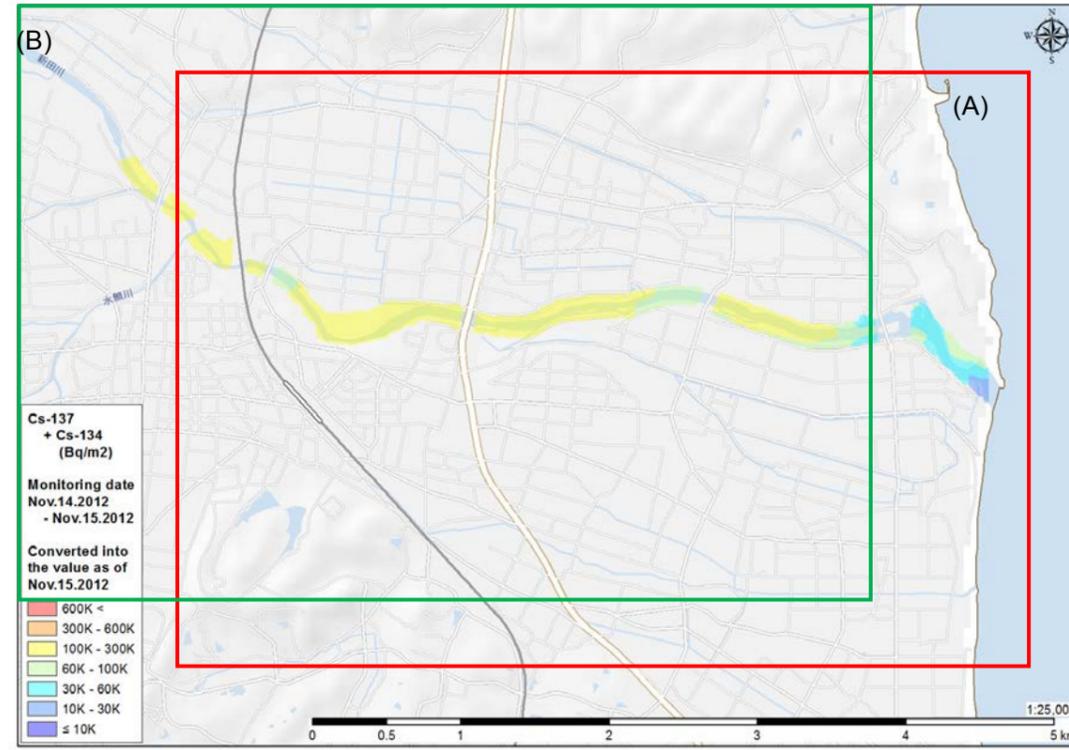


Fig. 5-20 新田川 Cs 沈着量マップ

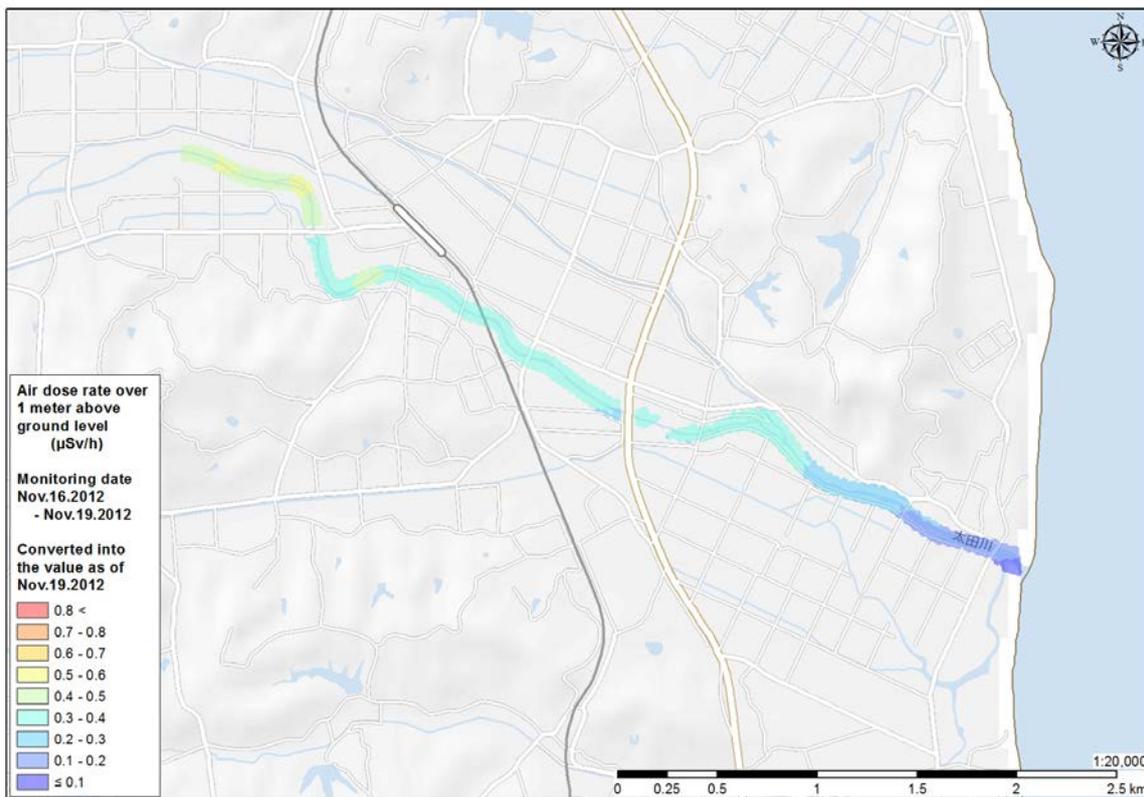


Fig. 5-21 太田川線量率マップ

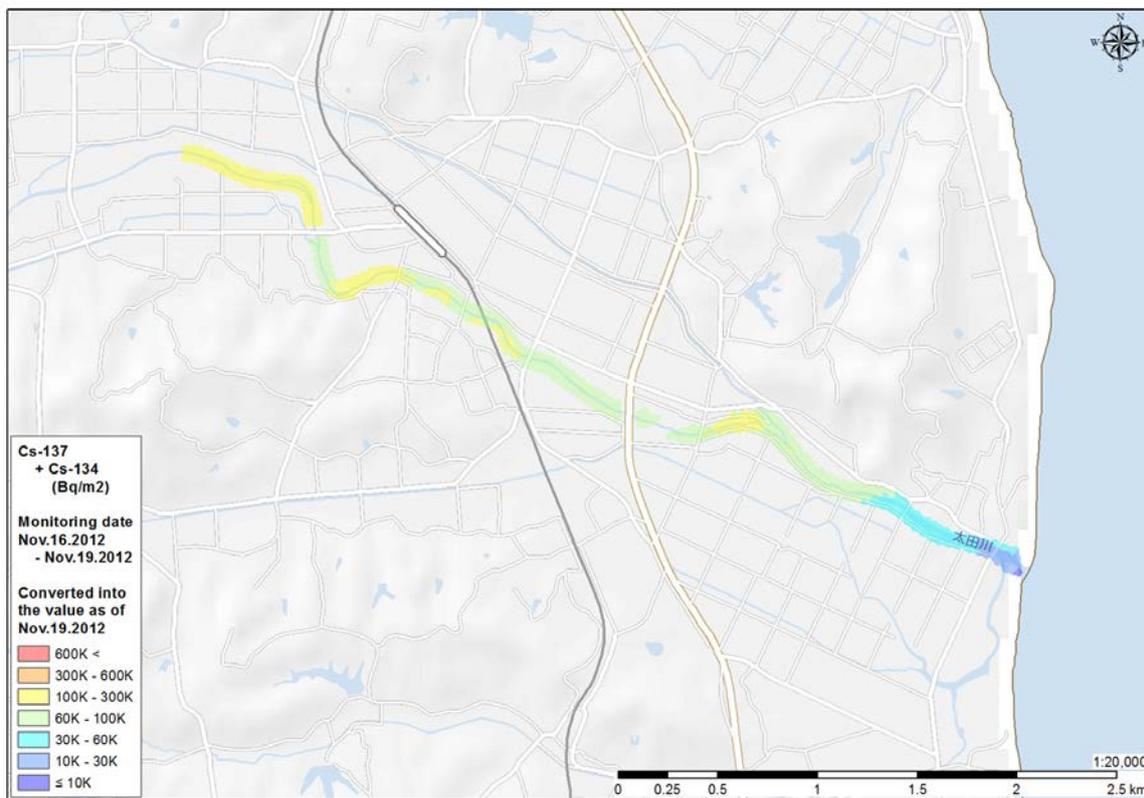


Fig. 5-22 太田川 Cs 沈着量マップ

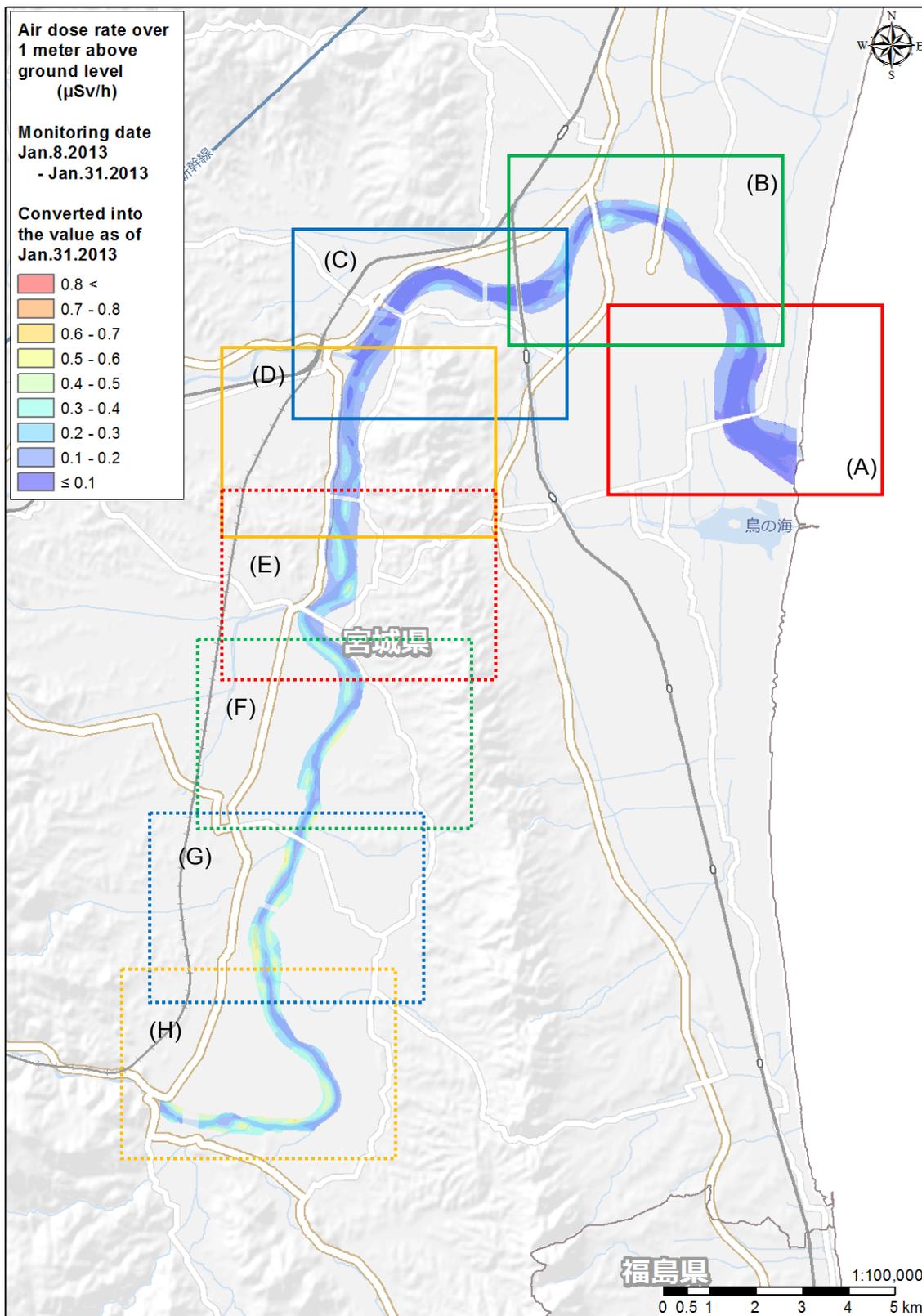


Fig. 5-23 阿武隈川線量率マップ(1/3)

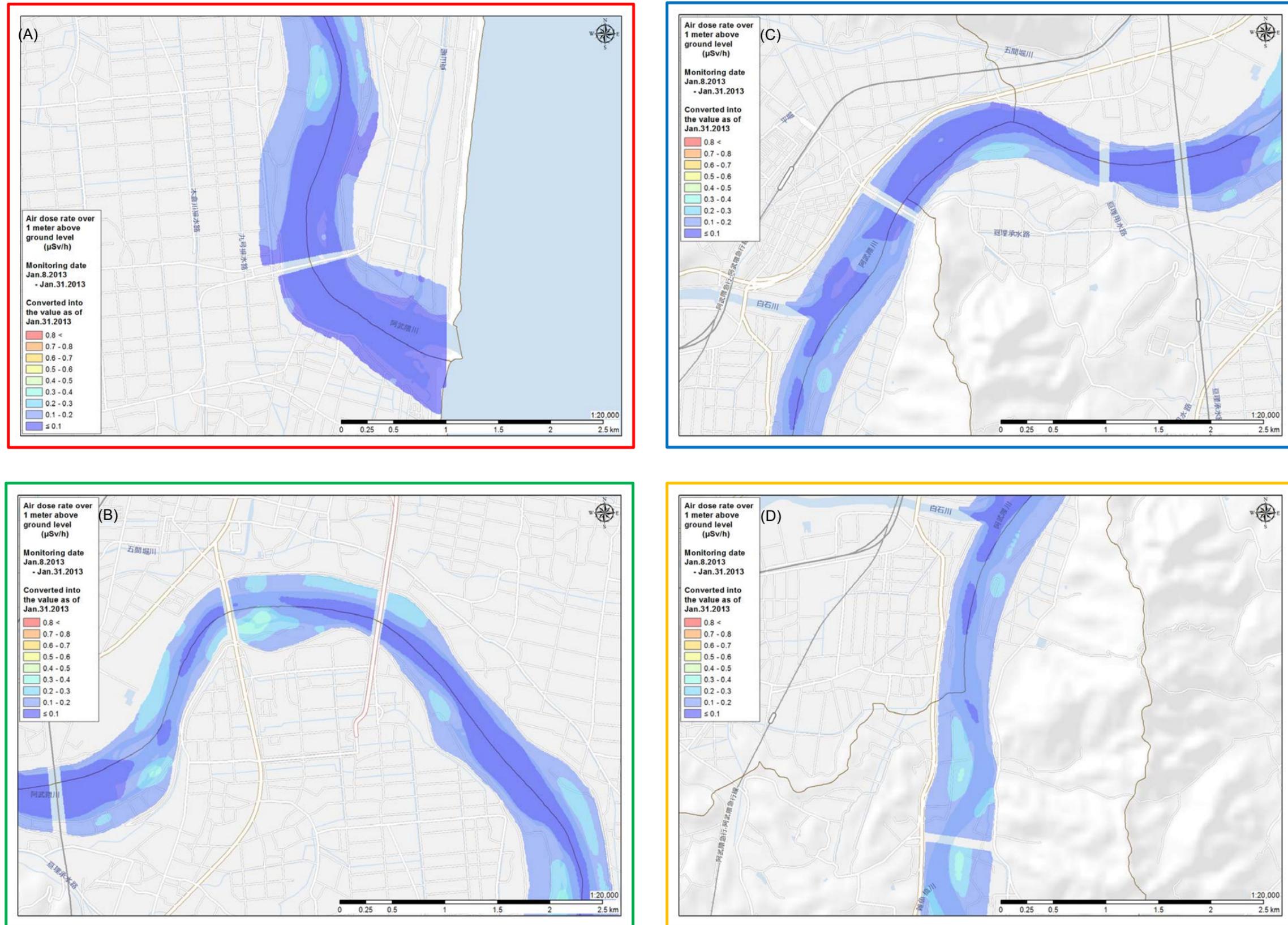


Fig. 5-23 阿武隈川線量率マップ(2/3)

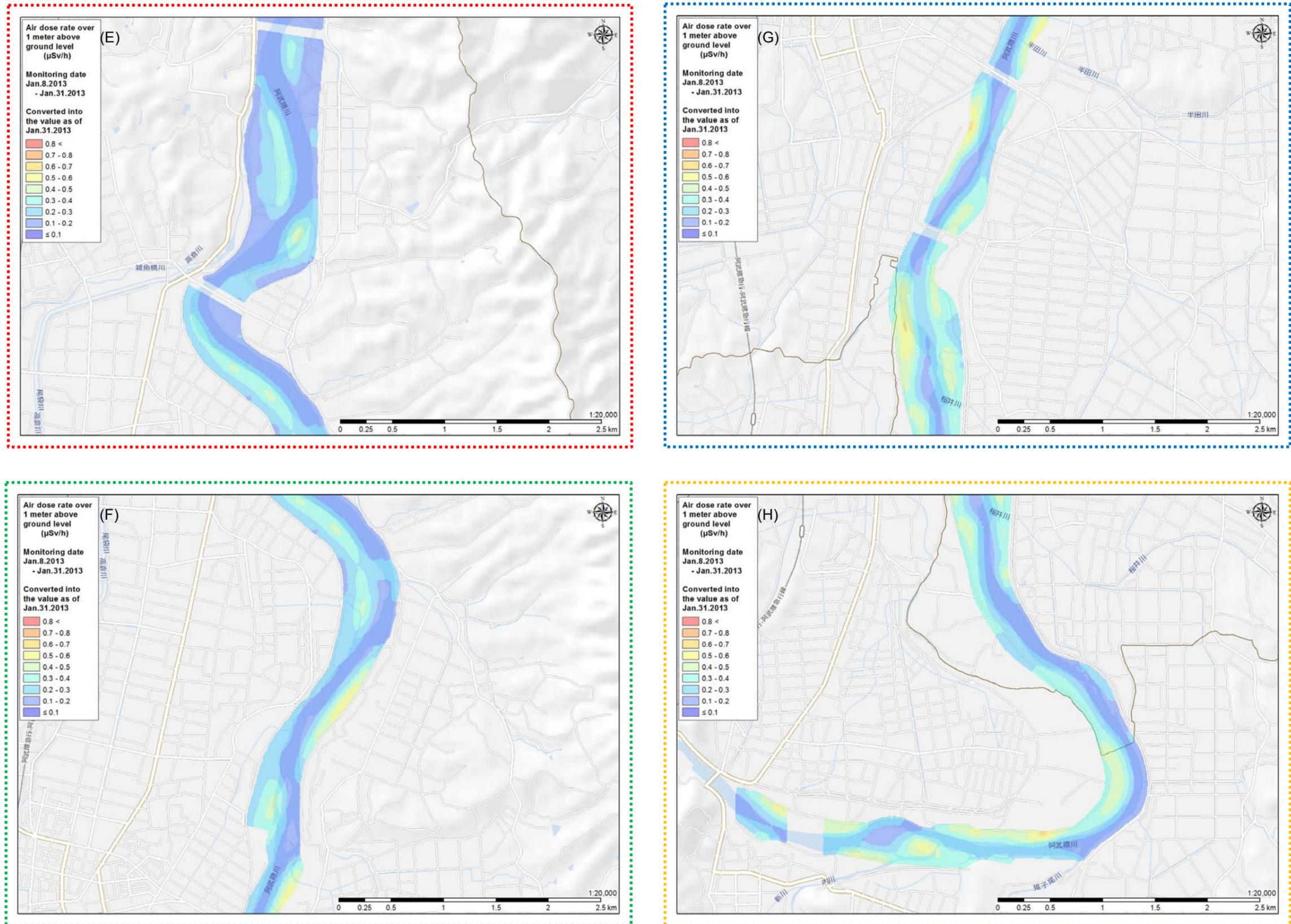


Fig. 5-23 阿武隈川線量率マップ(3/3)

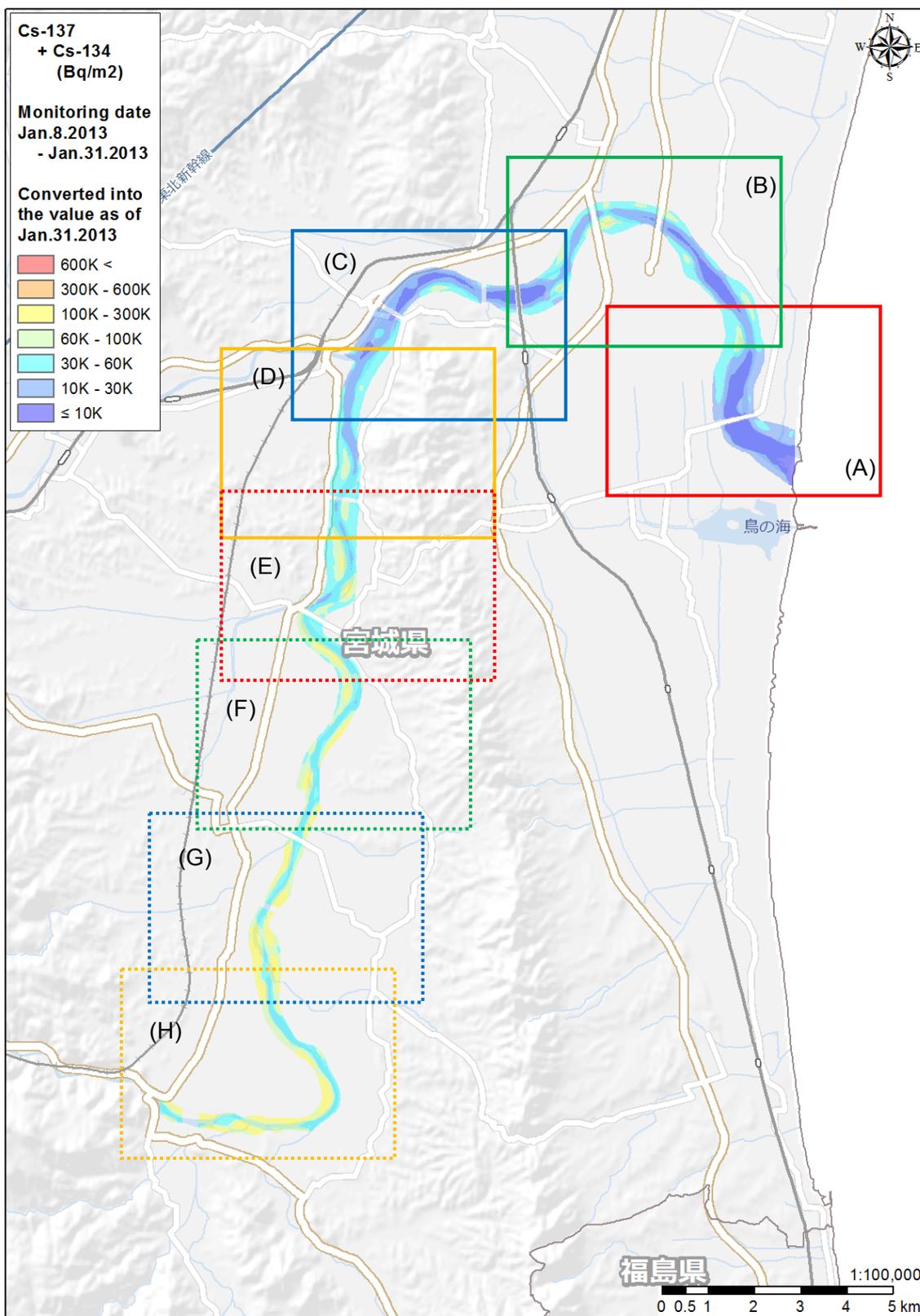


Fig. 5-24 阿武隈川 Cs 沈着量マップ(1/3)

This is a blank page.

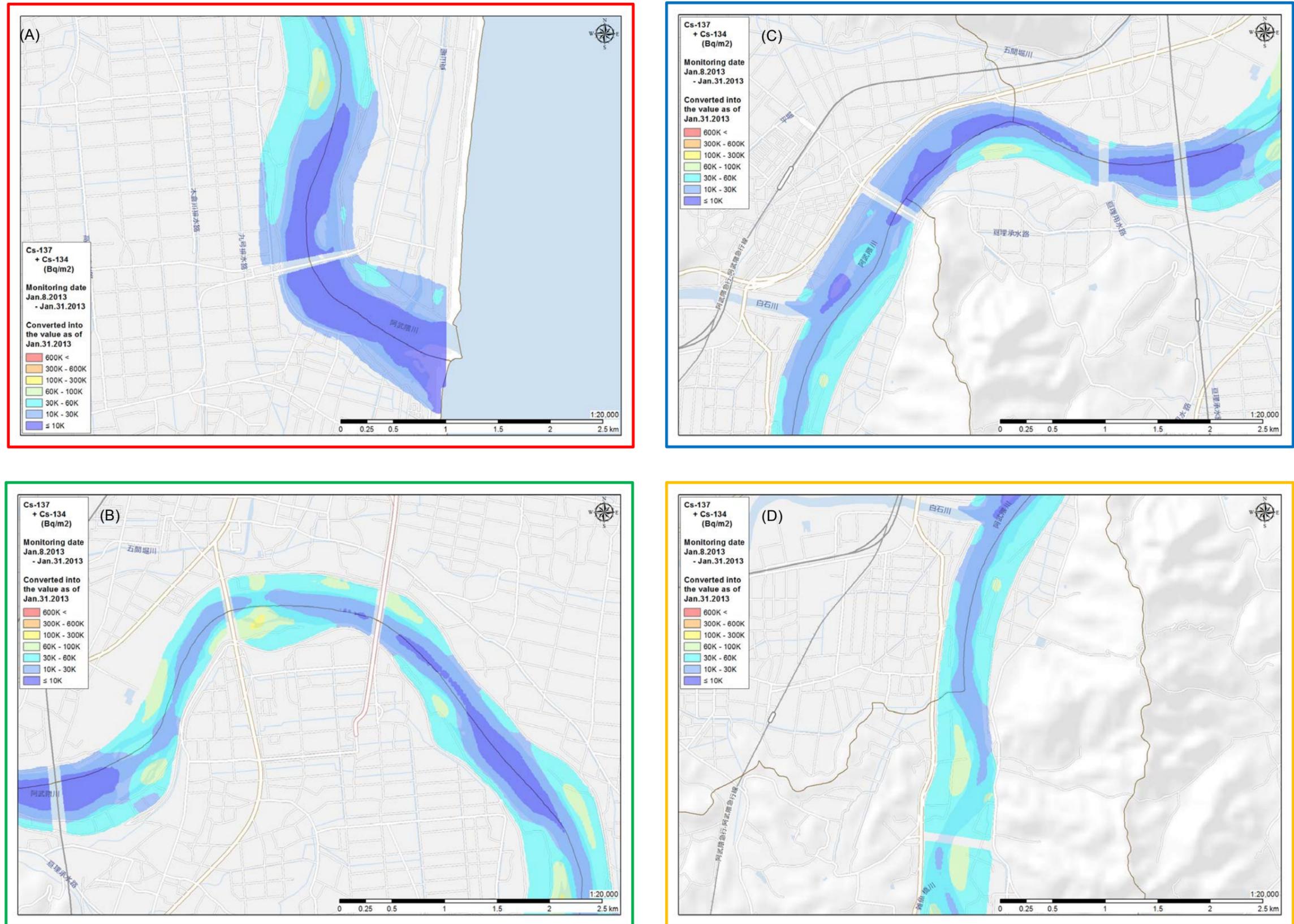


Fig. 5-24 阿武隈川 Cs 沈着量マップ(2/3)

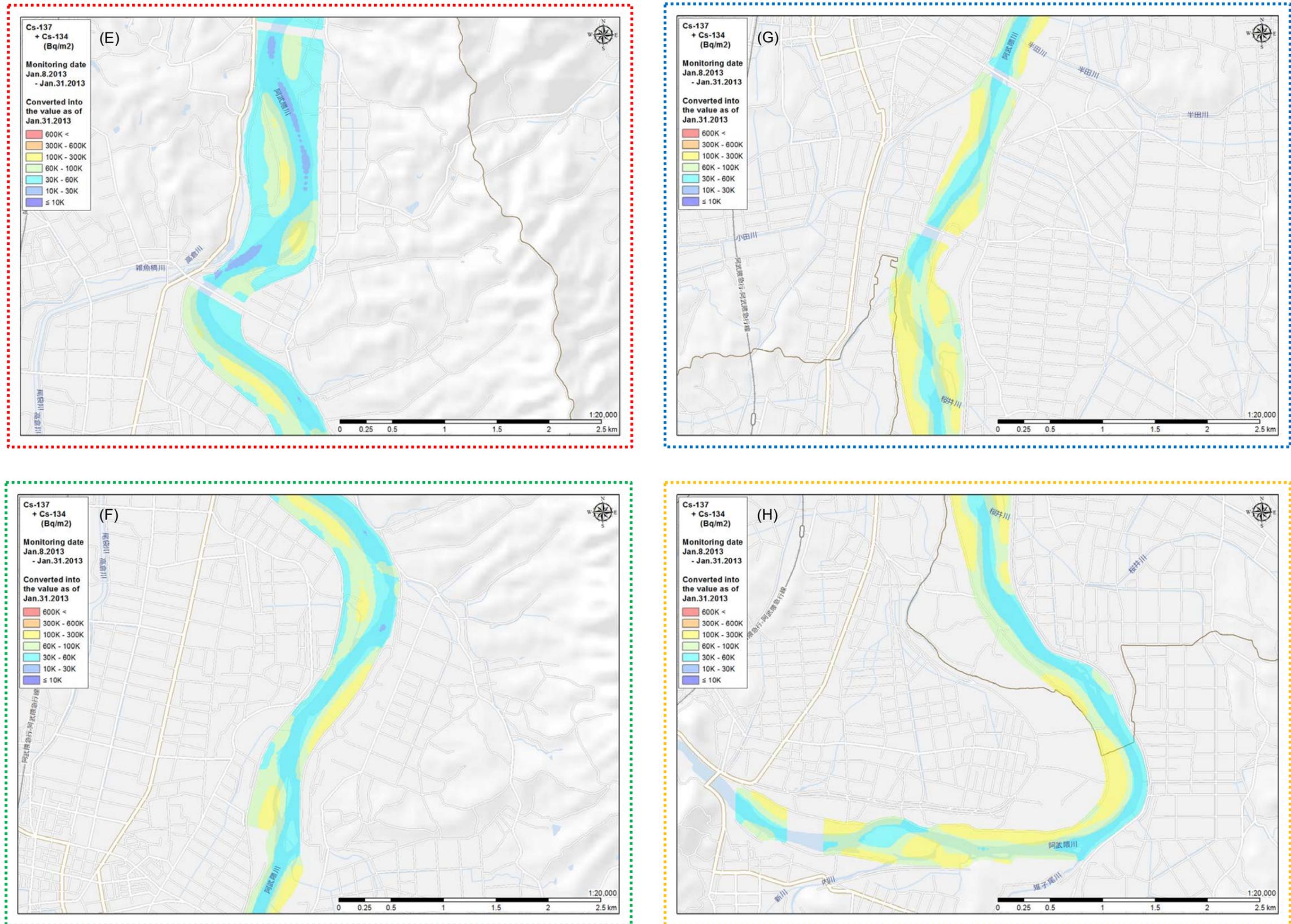


Fig. 5-24 阿武隈川 Cs 沈着量マップ (3/3)

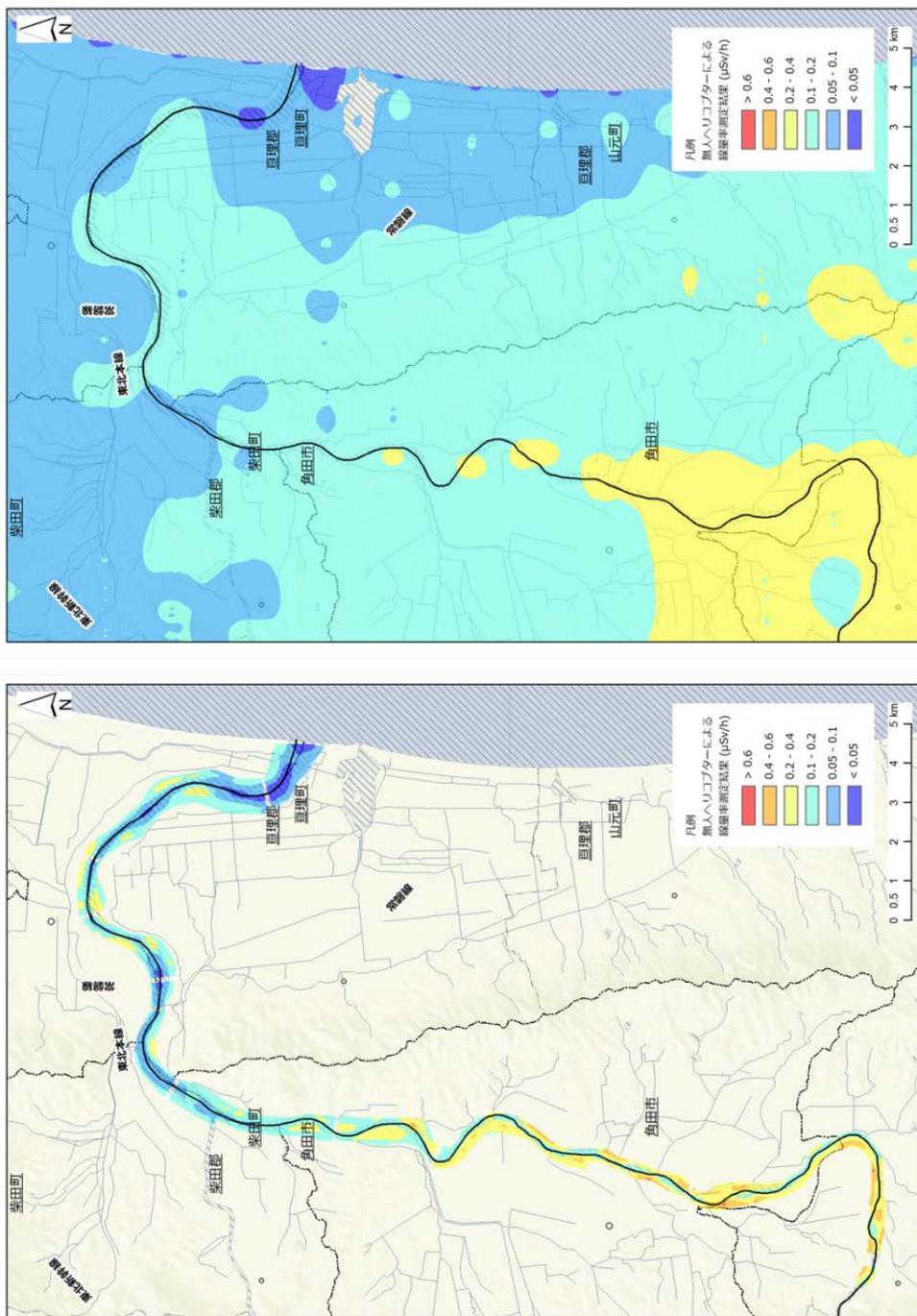


Fig. 5-25 阿武隈川河川敷の空間線量率マップ  
(左: 無人ヘリコプターによる測定結果、右: 第6次航空機モニタリング結果)

### 5.3. 発電所敷地内上空のモニタリング

#### 5.3.1. 調査目的

福島第一原子力発電所（以下、発電所）から 3 km 圏内の空域は、上空の線量率が不明のため、現在、飛行禁止区域となっている。国土交通省では、3 km 圏内の対地高度 1,500 m (= 5,000 ft) 以上の空域の飛行禁止を解除することを検討しており、解除には地上におけるモニタリング結果を基に上空 5,000 ft における被ばく量を評価する必要がある。今回、航空法の対象外である無人ヘリコプターを用いて、発電所敷地内の無人ヘリによるモニタリングを実施し、その結果をもとに 5,000 ft の線量率の算定を行った。

#### 5.3.2. 調査期間

- 発電所敷地内: 平成 24 年 12 月 22 日～23 日
- 発電所敷地内以外の 3 km 圏内: 平成 24 年 8 月 30 日～10 月 20 日

#### 5.3.3. データ取得方法

##### 1) 発電所敷地内 (Fig. 5-26 参照: 緑ライン)

測定にあたっては、自律型無人ヘリを使用し、飛行高度は対地高度 200 m 程度、測線間隔は 300 m (重要施設上空は除く) 程度で飛行しながら、地上からの  $\gamma$  線及散乱線による  $\gamma$  線 (計数率) とエネルギースペクトルを 1 秒間に 1 回測定した。また、放射線検出器は LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器を用いた。

##### 2) 発電所敷地以外の 3 km 圏内 (Fig. 5-26 参照: 青ライン)

発電所敷地以外の 3 km 圏内については、5.1 節に述べたように、無人ヘリコプターにより高さ 1m での空間線量率及び放射性セシウムの地表面沈着量のモニタリングを実施している。ここでは、3 km 圏内での上空の線量率を評価することが目的であるため、実施した対地高度 (約 80 m) での線量率に対し、あらかじめ同モニタリングで求めた放射線の空気減弱係数 AF から上空 200 m の線量率に換算した。

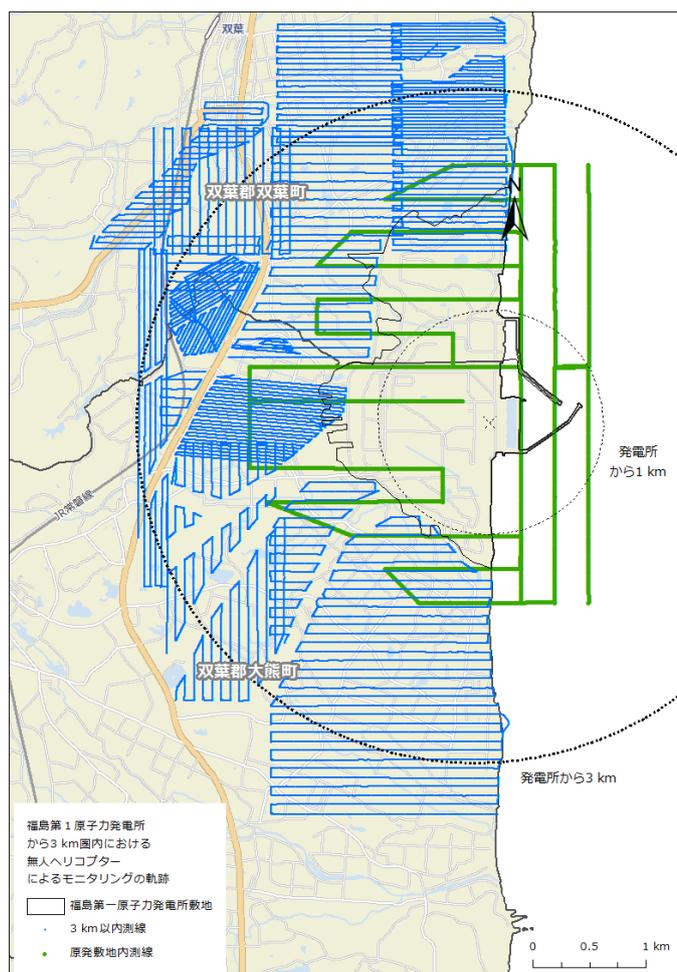


Fig. 5-26 3 km 圏内における飛行軌跡

5.3.4. 上空 1,500 m における線量率の推定方法

発電所周辺の無人ヘリコプターによる線量率測定の結果から、上空 200 m における線量率を、あらかじめ設定した AF を用いて換算した。敷地内では、200 m 上空からの測定で、高線量地点の線源の大きさは把握できないので、以下のように、遮へい計算コードを用いて、線源半径と距離の減衰の関係を評価した。一般的に、放射線の距離による減衰率は線源の大きさによって異なる。そこで、放射線源の大きさを変化させ、遮へい計算コード (QAD-CGGP2R) を用いて計算した結果を Fig. 5-27 に示す。図に示すように、距離による減衰率は、放射線源が大きいほど減衰率は小さくなることから、線源半径は大きい方が距離による減衰が小さくなるので、空間線量率を評価するには、線源半径を大きく見積もる方が安全側になる。そこで、今回の評価においては、警戒区域内のテストサイトにおいて 20 回程度、実測して求めた AF を用いて、1,500 m の線量率を換算することとした。用いた換算係数  $R_{1500/200}$  は  $5 \times 10^{-4}$  である。

Fig. 5-28 に示したように、線源半径 1,000 m とした計算結果と実測値を比較すると、実測値の方が安全側（線量を大きく見積もる数値）であることが分かる。敷地内の結果を合わせて最大の線量率を示すポイントを抽出した。

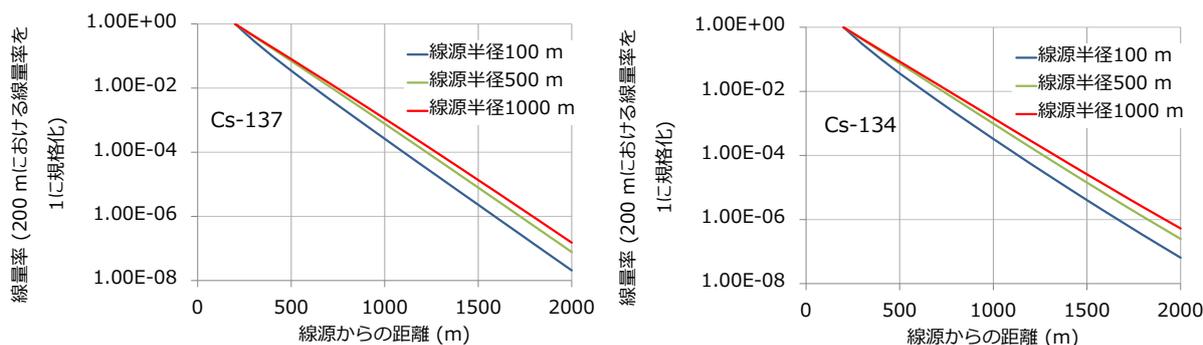


Fig. 5-27 放射線の線源と距離による減衰率の関係 (QAD-CGGP2R 計算結果)

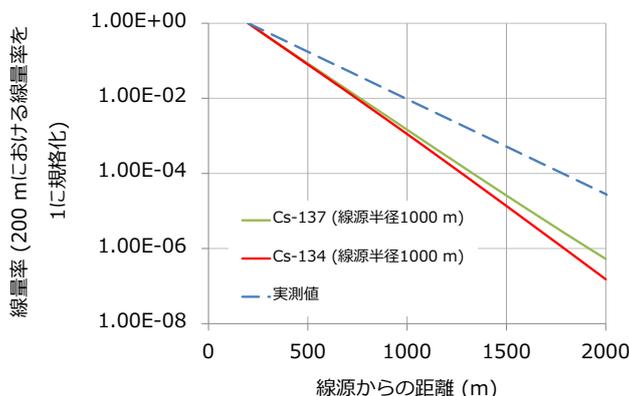


Fig. 5-28 線源半径 1,000 m の計算結果と実測値

### 5.3.5. 調査結果

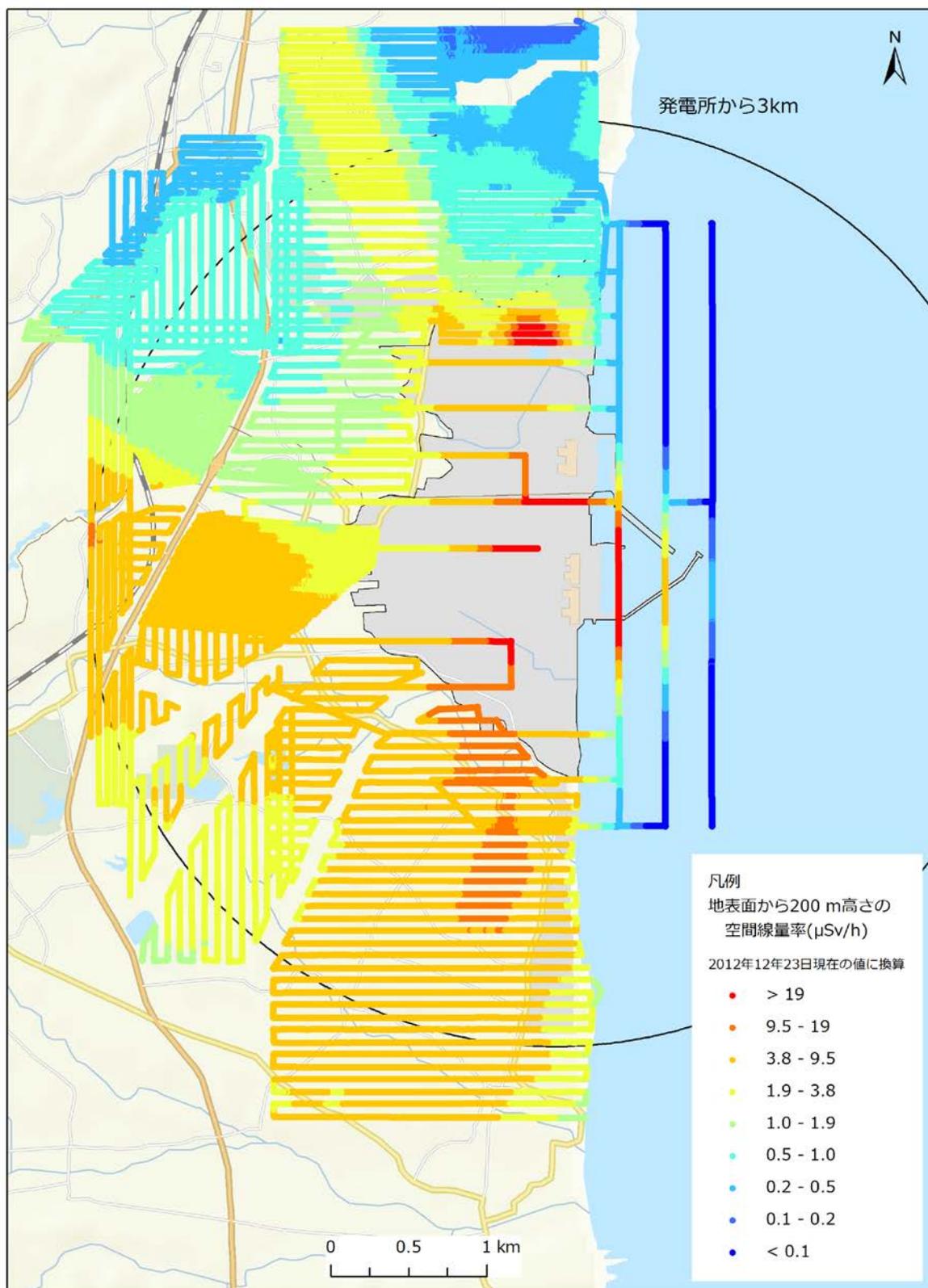
#### 1) 発電所敷地内高度 200 m の線量率マップ

測定点と上空 200 m における線量率を Fig. 5-29 に示す。線量率の最大値は、敷地内の 1 号機原子炉建屋付近で 127  $\mu\text{Sv/h}$  であった。敷地内外における測定結果を基に作成した、上空 200 m における線量率マップを Fig. 5-30 に示す。施設内外のマップの傾向はよく一致した。

#### 2) 3 km 圏内上空 1,500 m における線量率の推定結果

今回の測定における最大値である 127  $\mu\text{Sv/h}$  に設定した  $R_{1500/200}$  ( $5.0 \times 10^{-4}$ ) を使用し、上空 1,500 m の線量率を見積もると、0.064  $\mu\text{Sv/h}$  となる。今回の結果から、発電所敷地内を含めた 3 km 圏内上空 1500 m では、最大 0.064  $\mu\text{Sv/h}$  となり、仮に最大線量の地点を年間最大飛行時間の 1,000 時間飛行したとしても、被ばく量は年間 0.064 mSv 程度となり、年間 1 mSv に満たない。上空 1,500 m における線量率を安全側 (線量率が高くなる方向) に評価するため、以下の検討を行った。Fig. 5-30 に検討内容と検討結果を示す。今回の測定では、無人ヘリコプターは多くの重要施設を含む半径 200 m 程度の範囲を測定しているものの、重要施設の上空はフライトできなかったため、原子炉建屋の直上の測定結果はない。最大値を示した測定点は、最も原子炉建屋に近づいた場所であった。また、海側からの測定結果を見ると原子炉建屋に沿って、空間線量率は 70 – 80  $\mu\text{Sv/h}$  であった。そこで、陸側で最大の線量率を示したポイントを A として、Fig. 5-31 に示す 3 本のラインを引き、線量率の断面図を調査した。すべての地点で、陸側及び海側とも上昇傾向にあったため、測定点のない地点を内挿し、最大値を求めた。その結果、最大でも 190  $\mu\text{Sv/h}$  となることが分かった。本検討で、推定される最大の線量率は、約 200  $\mu\text{Sv/h}$  ( $\approx 190 \mu\text{Sv/h}$ ) となり、上記の  $R_{1500/200}$  ( $5.0 \times 10^{-4}$ ) により、上空 1,500 m の線量率を見積もると、0.1  $\mu\text{Sv/h}$  となる。よって、仮に最大線量率の地点を年間最大飛行時間の 1,000 時間を飛行したとしても、被ばく量は年間 0.1 mSv 程度となり、年間 1 mSv に満たない。

本結果を基に、国土交通省は、発電所から 3 km 圏内上空 1,500 m 以上の飛行禁止を解除した<sup>20)</sup>。この結果、解除前まで使用できなかった空路が使用できるようになった。



\*本マップには天然核種による空間線量率が含まれている。

Fig. 5-29 発電所 3 km 圏内における測定点と上空 200 m における線量率

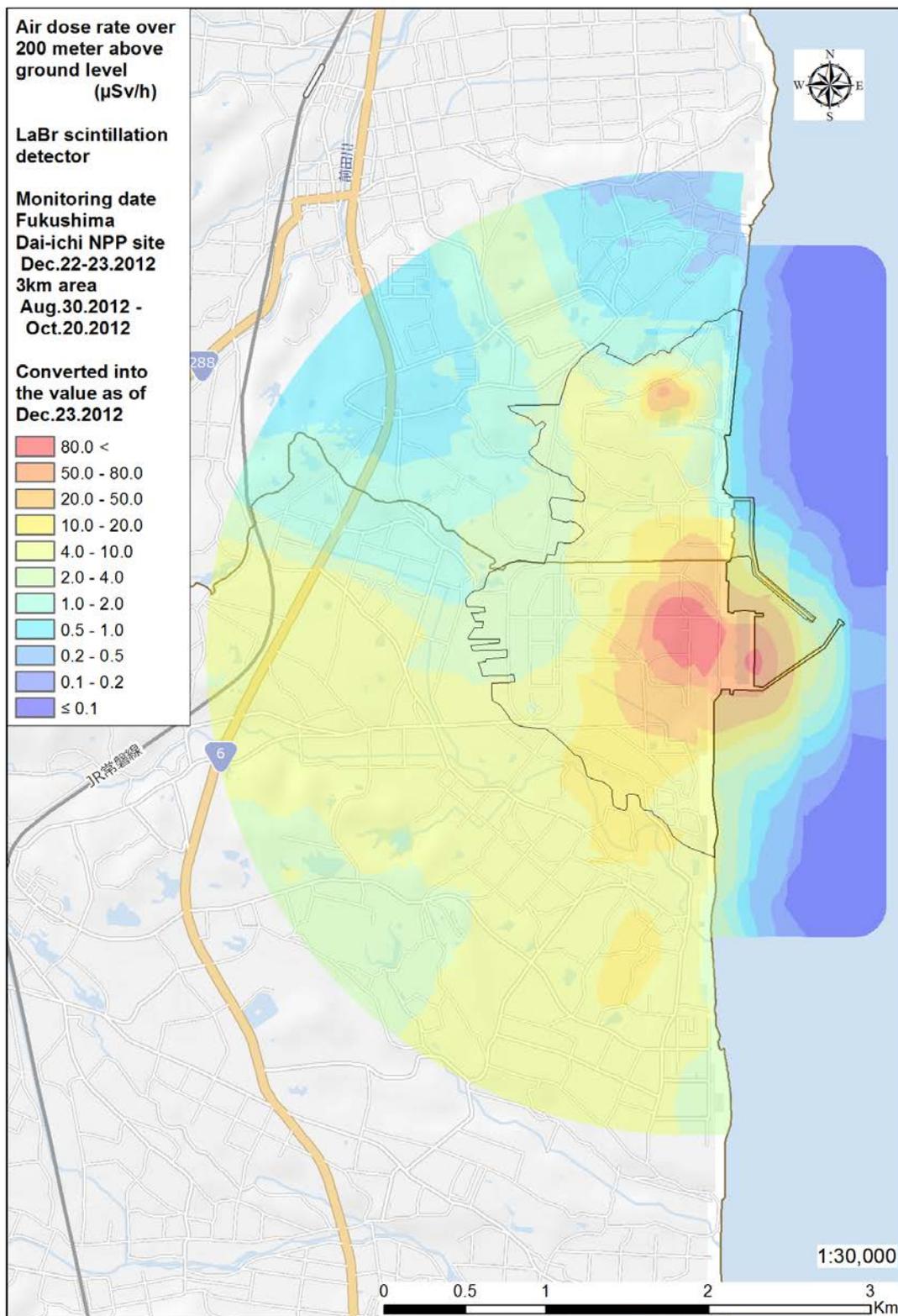


Fig. 5-30 発電所 3 km 圏内における上空 200 m における線量率マップ

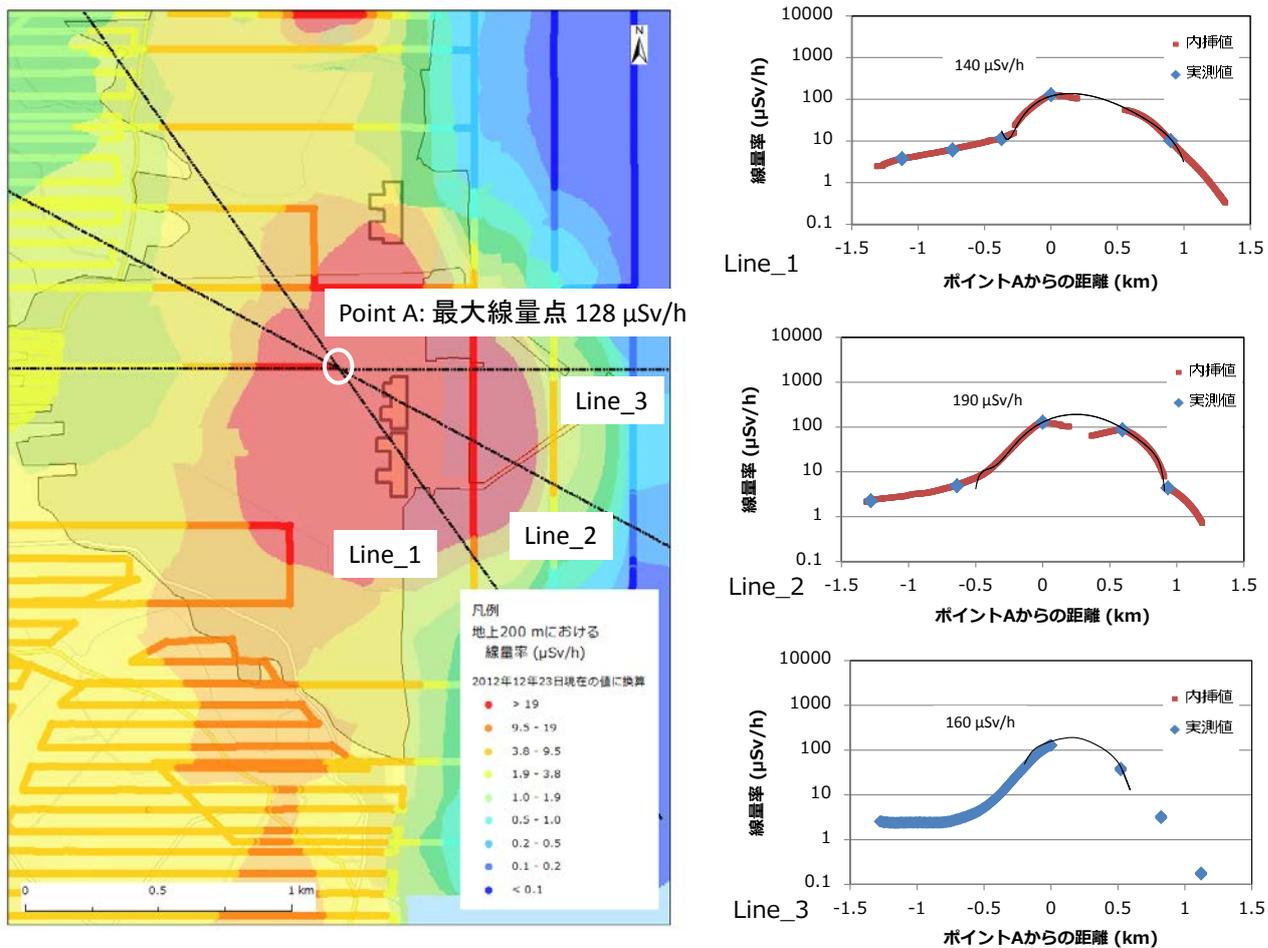


Fig. 5-31 高線量率箇所の推定方法

5.4. 除染前後のモニタリング

5.4.1. 調査目的

除染作業を実施していく上で必要となる技術や知見を整備することを目的とする「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務」が、平成23年度に行われた<sup>21)</sup>。福島県内で、10カ所程度のモデル地区が設定され、様々な除染技術が試された。その除染の効果を評価する技術として、平成23年度に無人ヘリコプターによるモニタリングが実施され、空間線量率マップとして示された。その後、時間の経過に伴う放射性物質の移行状況を空間線量率の変化として調査するために、除染した地区のうちの8地区において平成24年度に再度無人ヘリによるモニタリングを実施した（以下、フォローモニタリングという）。ここでは、その結果について示す。

5.4.2. 調査場所と測定期間

測定は自立型無人ヘリを用いて、Table 5-2 測定場所と測定期間のような地区・日程で行った。なお、除染後の測定は平成24年2月24日から4月25日に実施されており、フォローモニタリングまでの測定間隔はおよそ6から8カ月間となる。なお、富岡町の2地区については、短期間内の変化を把握する目的のために今回は2回の測定を実施した。

Table 5-2 測定場所と測定期間

図番号	測定場所 (地区,場所名)	除染前	除染後		フォロー モニタリング
		測定日	測定日	積雪状況	測定日
			(H24年)	範囲	
5-32	浪江町(矢沢町)	2011/12/5	2/24	無し	10/7
5-33	浪江町(松木山)	2011/12/5	2/27	5-15cm	11/28
5-34	田村市(地見城)	2011/12/2	4/25	無し	12/2
5-35	川内村(貝ノ坂1)	2011/12/6	3/1	3-15cm	11/22
5-36	川内村(貝ノ坂2)	2011/12/6	3/1	5-15cm	11/23
5-37	富岡町(夜ノ森公園)	2011/12/14	2/24	無し	10/26, 11/21
5-38	富岡町(第二中学校)	2011/12/14	2/24	無し	10/26, 11/21
5-39	大熊町(役場)	—	2/28	無し	10/9
5-40	大熊町(大野病院)	2012/11/3	2013/3/13-20	無し	

注：積雪の記録は地上でのサーベイメータ測定地点の状況の記録に基づき、また、範囲や平均とはそれらの測定点での積雪の深さの記録の範囲や平均値であり、地区全体の代表地点に対する値で参考値である。網掛けは LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器を使用

#### 5.4.3. 調査方法

測定にあたっては、自律型無人ヘリを使用し、飛行高度は 50 m 程度、測線間隔は 50 m 程度で飛行しながら、地上からの  $\gamma$  線及び直達線や散乱線による  $\gamma$  線（計数率）とエネルギースペクトルを 1 秒間に 1 回連続測定した。また、放射線検出器は PS 検出器及び LaBr<sub>3</sub>:Ce シンチレーション検出器(1.5"Φ×1.5"×3 本)を用いた。各地点の測定結果は測定日が異なるため、各測定地点における地上 1 m 高さの空間線量率の値は、放射性セシウムの物理的減衰を考慮し、最終の測定最終日の値に換算した。

#### 5.4.4. 調査結果

各地域の、除染前、除染後、フォローモニタリングについて、空間線量率マップを Fig. 5-32、Fig. 5-33、Fig. 5-34、Fig. 5-35、Fig. 5-36、Fig. 5-37、Fig. 5-38、Fig. 5-39、Fig. 5-40 に示す。除染前と除染後を比較すると、マップの色合いが大きく変わっていることが分かる。このことから、除染の効果は大きいことが言える。Fig. 5-40 に示した大熊町大野病院のように、マップ上は除染の前後で変化が小さいように見えるが、周辺の線量率が高いため、上空からの測定では効果が見えにくいことが考えられる。本地区の除染箇所において、地上でサーベイメータにより、測定を実施したところ、有意な減少が確認できた。

また、除染後の測定については、一部、積雪が見られた。そのような地域（松木山、貝ノ坂 1、貝ノ坂 2）については、見かけ上、フォローモニタリングの方が、線量率が上昇しているように見える。その他の地区については、6～8 カ月間の中に物理的減衰以外の効果（ウェザリング等）により、凡例の低めの空間線量率区間のエリア拡大といった低減の様子が見られる。また、富岡町の 2 地区の 1,2 回目の比較（Fig. 5-37, Fig. 5-38）においては、マップがほぼ同等であり、物理的半減期以外の効果は見られなかった。

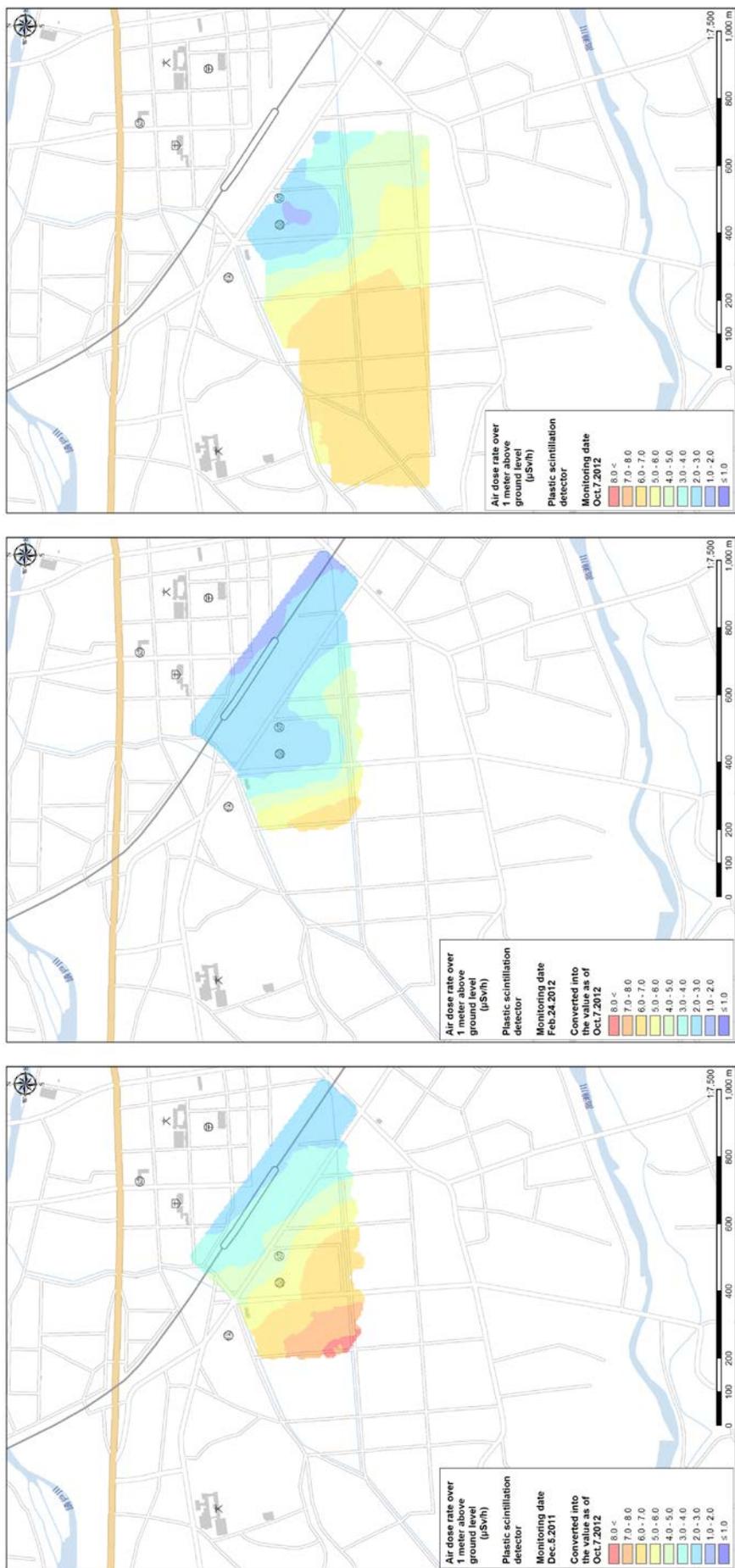


Fig. 5-32 浪江町矢沢町地区 (左：除染前、中：除染後、右：フォロモニタリング)

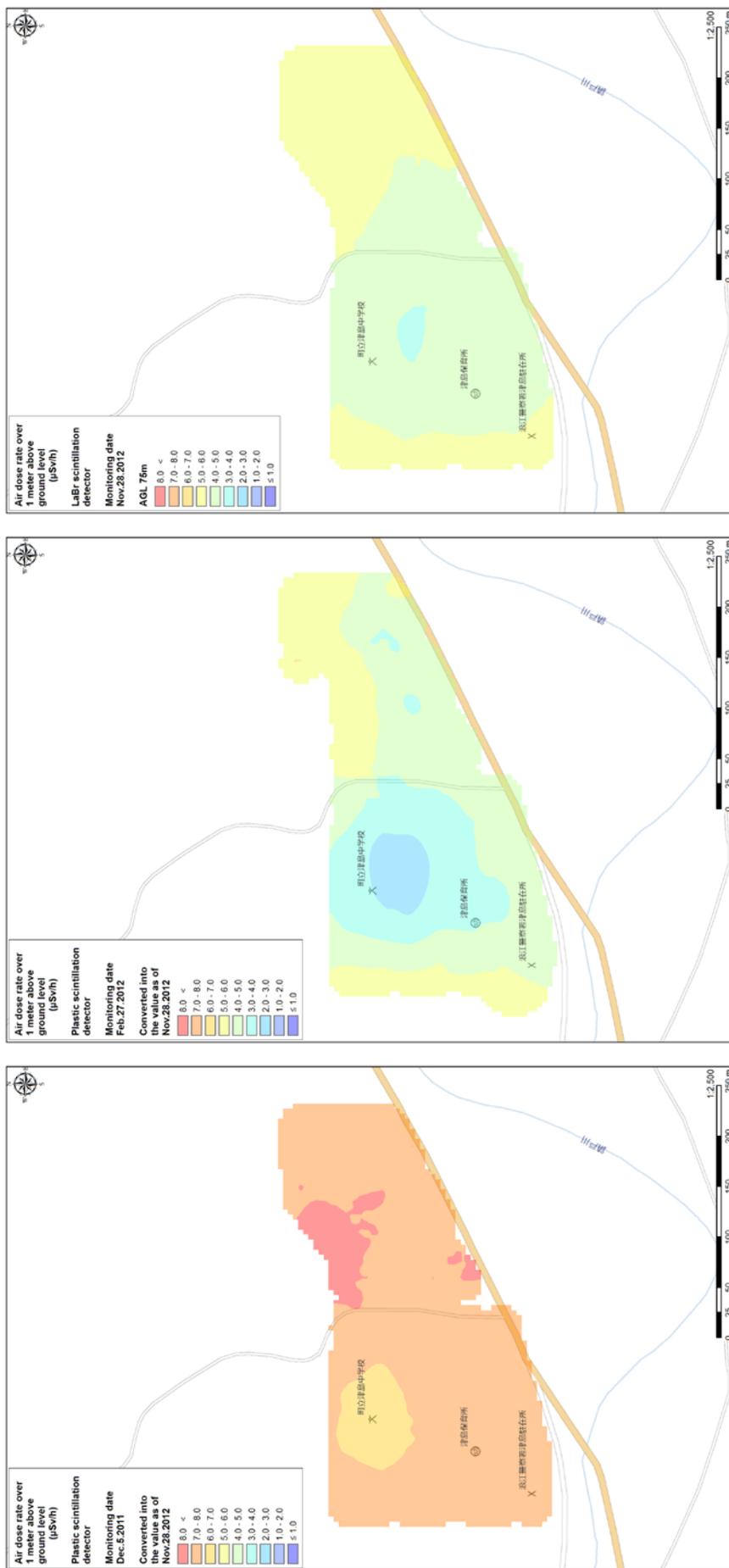


Fig. 5-33 浪江町松木山地区 (左：除染前、中：除染後[積雪有り]、右：フォローモニタリング)

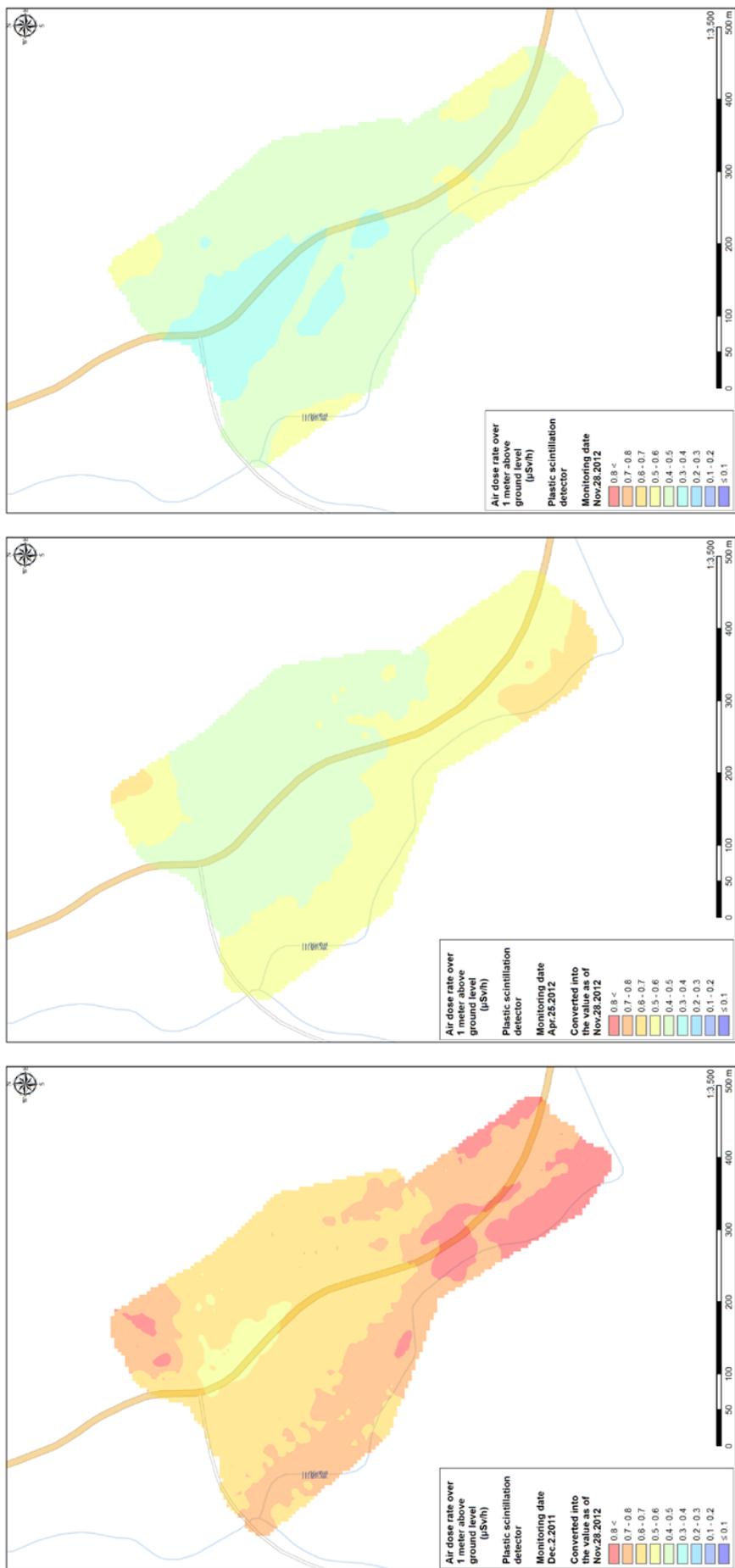


Fig. 5-34 田村市地見城地区 (左：除染前、中：除染後、右：フォローモニターリング)

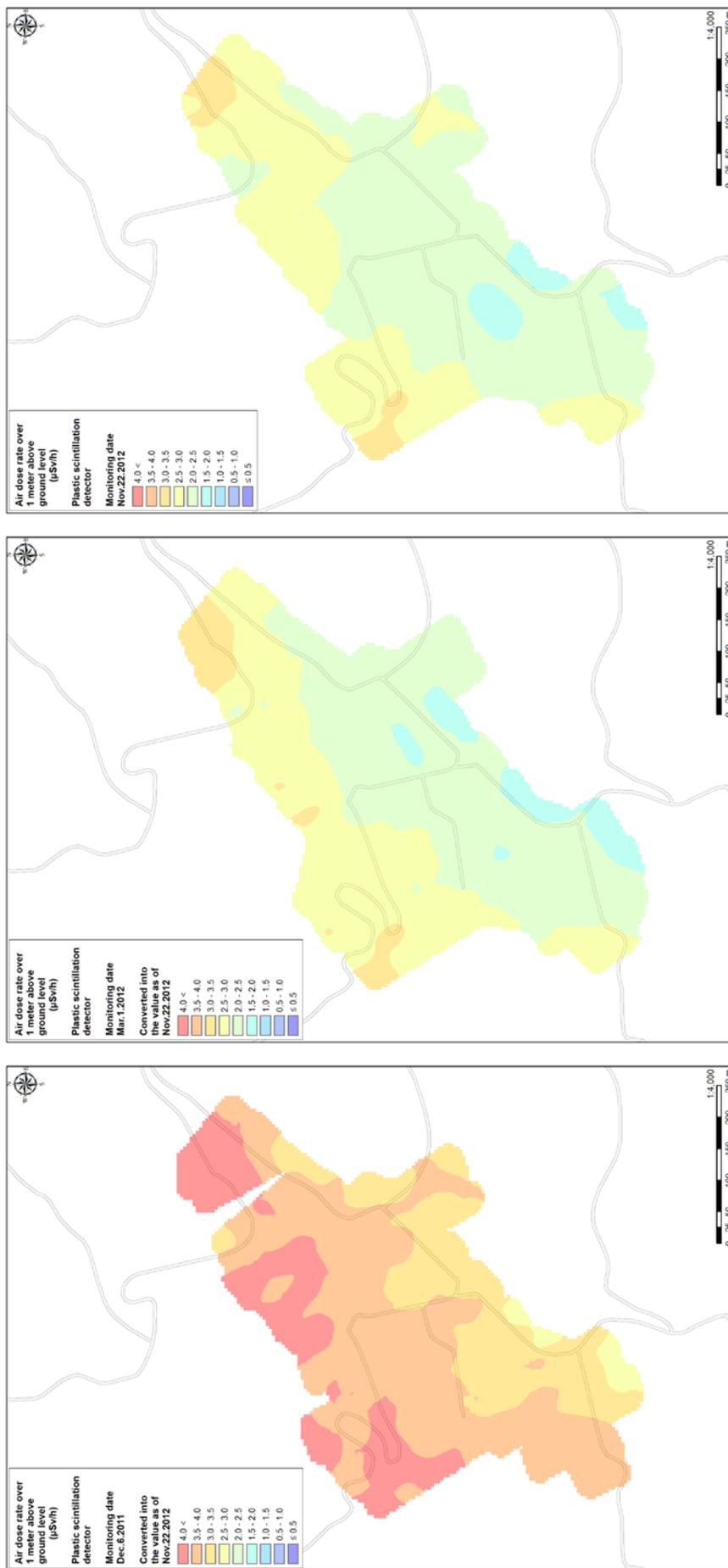


Fig. 5-35 川内村具ノ坂地区1 (左：除染前、中：除染後[積雪有り]、右：フォロワーモニタリング)

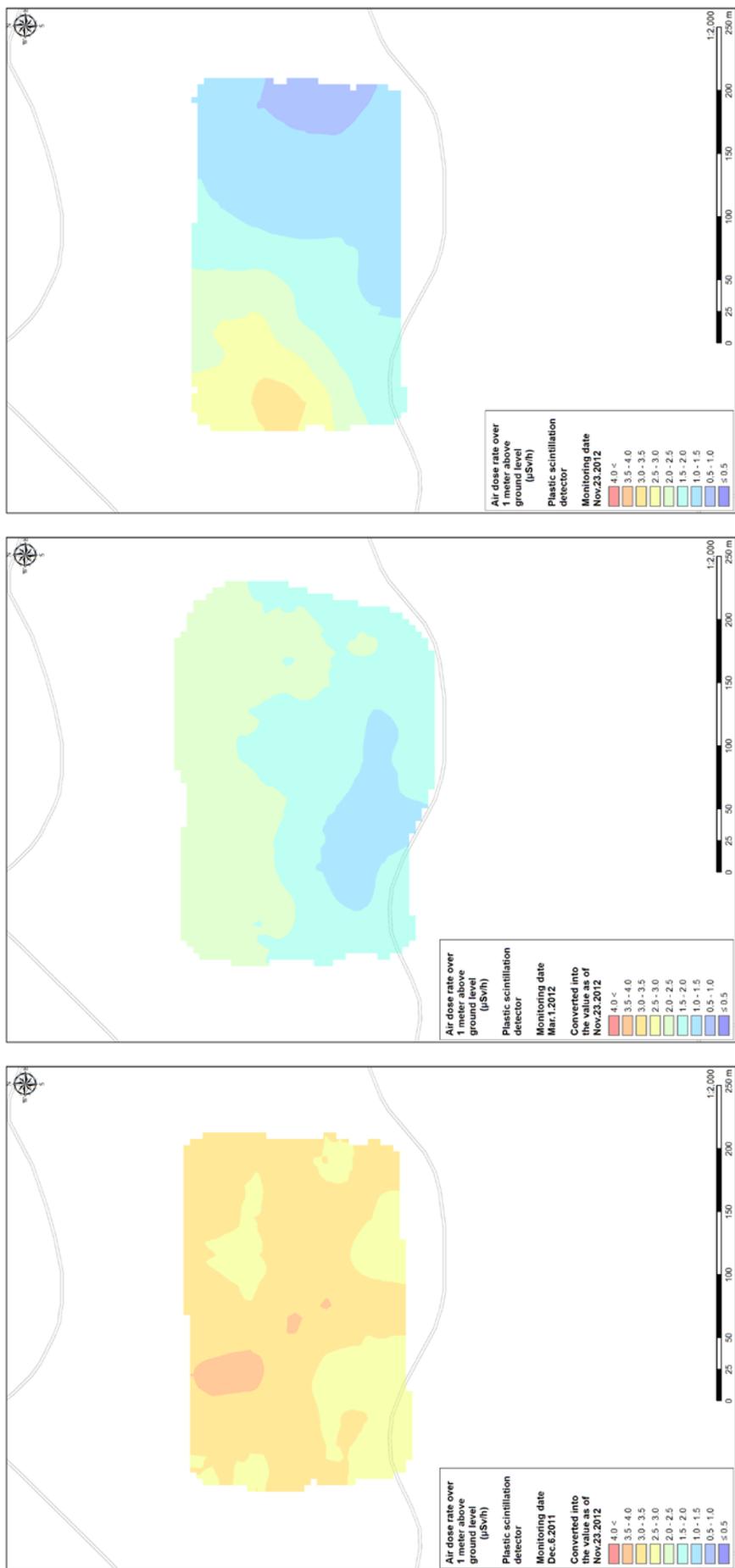


Fig. 5-36 川内村具ノ坂地区2 (左：除染前、中：除染後[積雪有り]、右：フォローモニターリング)

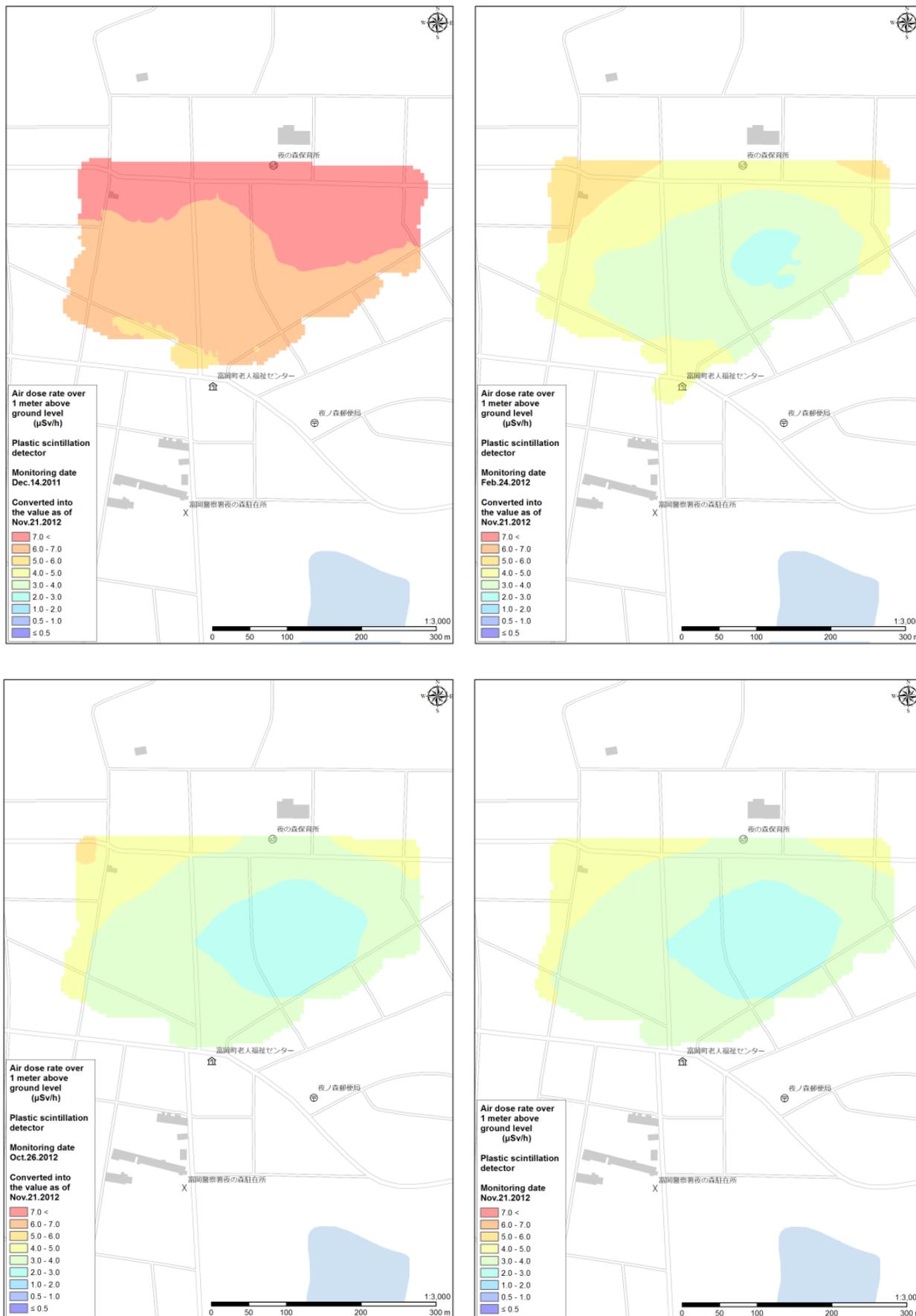


Fig. 5-37 富岡町夜ノ森公園 (左上：除染前、右上：除染後、左下、右下：フォローモニタリング 1,2)

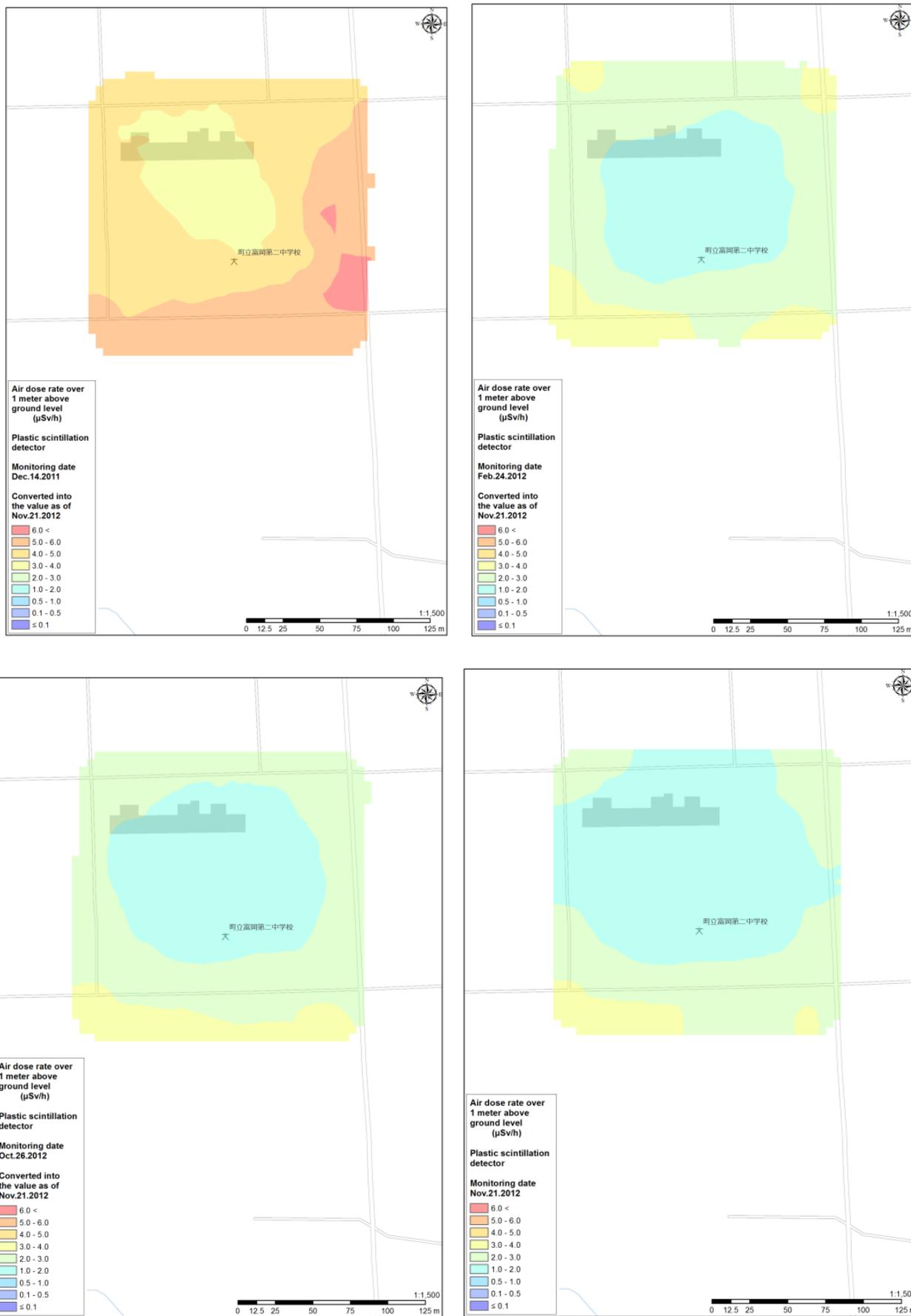


Fig. 5-38 富岡町第二中学校 (左上：除染前、右上：除染後、左下、右下：フォローモニタリング 1, 2)

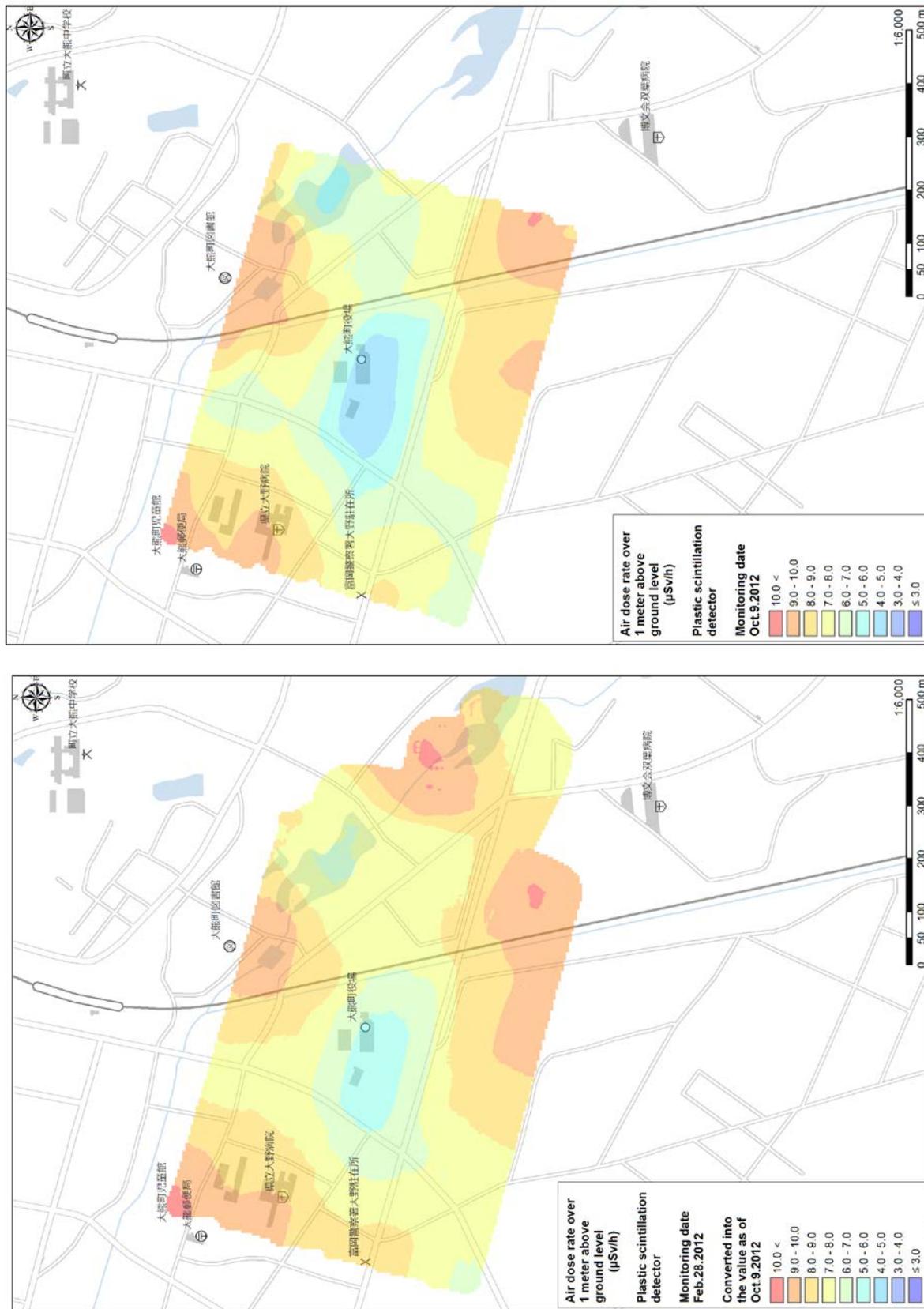


Fig. 5-39 大熊町役場 (左：除染後、右：フォローモニタリング)

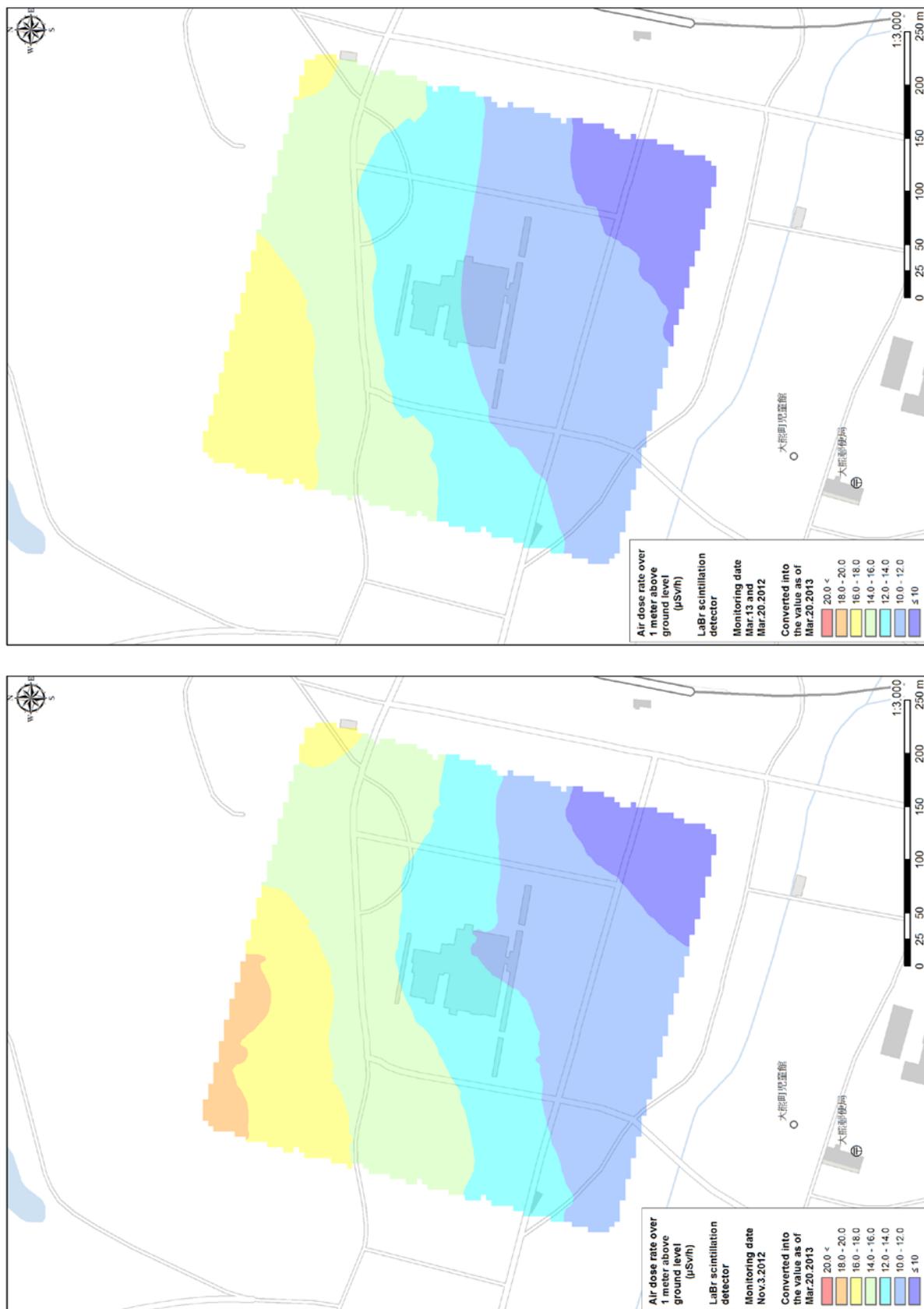


Fig. 5-40 大熊町大野病院 (左：除染前、右：除染後)

## 5.5. 発電所敷地内からの直達線・散乱線の測定

### 5.5.1. 調査目的

原子力発電所の敷地周辺は、原子炉建屋等の主要な放射線源に近いことから直達線や散乱線（スカイシャイン含む）の影響があると考えられた。無人ヘリコプターによるモニタリングは、上空から地上の一定の面積の放射線の平均値を測定し、高度による減弱を補正し地上の線量率に換算する方法である。すなわち、直下の放射線を想定していることから、直下からの放射線よりも原子炉建屋起源の放射線の影響が強い場合には、直下の線量率を過大評価することが考えられる。

ここでは、福島第一原子力発電所から 3 km 圏内における原子力発電所の施設起因の直達線や散乱線、地表面に沈着した放射性セシウム以外からの $\gamma$ 線の影響を確認した。

### 5.5.2. フライト条件

無人ヘリコプターを活用した、福島第一原子力発電所起因の直達線や散乱線による $\gamma$ 線の影響の測定：福島第一原子力発電所から 1 km 程度（海上）（Fig. 5-41 参照）。測定にあたっては、自律型無人ヘリを使用し、放射線検出器は LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器を用いた。

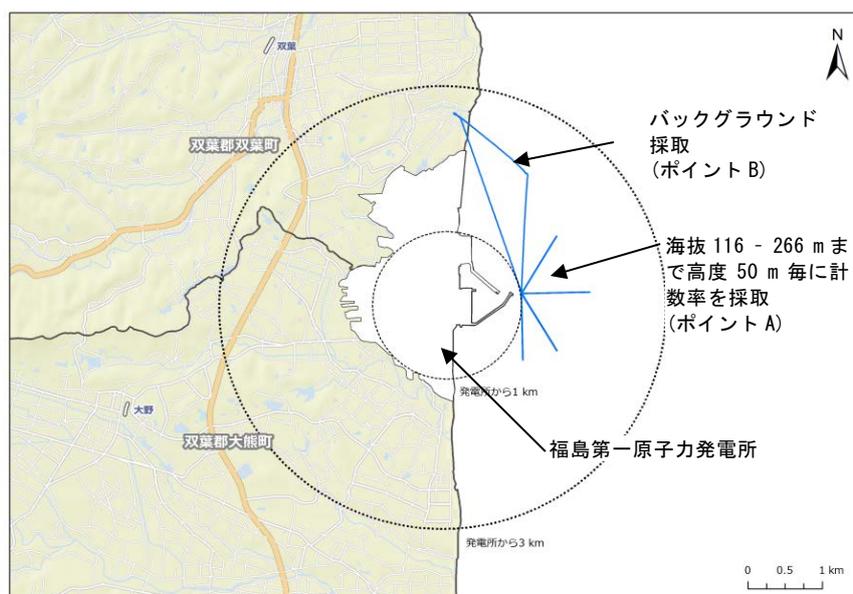


Fig. 5-41 海上からの福島第一原子力発電所起因の直達線や散乱線の $\gamma$ 線量（計数率）の測定における飛行軌跡(青色)

### 5.5.3. 調査内容

海上における原子炉建屋からの水平位置と放射線の間係を明らかにするために、1号機から4号機の原子炉建屋の中心から海上に向けて900 mの地点（ポイント A）を起点として、扇状に海洋に向けて1 km程度フライトし、検出器のデータを取得した。フライト条件は、速度 8 m/s とし、海拔の高度は 150 m と 250 m とした。取得したデータは、GPS による位置情報（緯度、経度、高度）と 1 秒毎にサンプリングした $\gamma$ 線スペクトルである。海上において、発電所及び陸からの放射線の影響がない地点（ポイント B）における測定結果を機体や検出器に起因するバックグラウンドとした。また、海拔高度と、放射線の間係を明らかにするために、ポイント

Aにおいて海拔高度 116–266 m まで 50 m 毎に 1 分間程度のホバリングを行い、検出器のデータを取得した。

5.5.4. 結果・考察

1) 海上における原子炉建屋からの水平位置と放射線の関係

ポイント A を中心に扇状にフライトしたデータを Fig. 5-42 に示す。線量率の換算は、検出器から 1 m 地点において値付けされた  $^{137}\text{Cs}$  の線源で照射し、評価した換算係数を用いた。最大の線量率はポイント A から南方向に 200 m ほど下がった場所の海拔高度 250 m 地点であり、ここでの線量率  $0.4 \mu\text{Sv/h}$  であった。

Fig. 5-43 にポイント A 及びポイント B における  $\gamma$  線スペクトルを示す。ポイント A における  $\gamma$  線スペクトルは、ポイント B における  $\gamma$  線スペクトルと比較すると、800 keV 以上の計数率が上昇していることが分かる。また、ポイント A における  $\gamma$  線スペクトルには、662 keV の  $^{137}\text{Cs}$  や 796 keV の  $^{134}\text{Cs}$  のピークが観測されなかった。このことから、海上における  $\gamma$  線は、建物や地表面、大気等によって多重散乱したスカイシャインを含む散乱線が主な成分であると考えられる。また、ポイント B におけるスペクトルには、250 keV 付近にピークが見られた。これは、検出器に使用した  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  シンチレータに含まれる天然核種の自己汚染の影響である。ポイント A 及びポイント B のスペクトルにおける 800 keV 以上の計数率が同様であるのも、 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  に含まれる天然核種の自己汚染の影響である。海拔高度 150 m と海拔高度 250 m における結果を比較すると、250 m で測定した結果が高い傾向を示した。高度と放射線量の関係については次章の結果を踏まえて考察する。

高度 150 m における測定点と原子炉建屋の中心 (3 号機付近: Fig. 5-42×点) との水平距離と計数率の関係を Fig. 5-44 に示す。図に示すように、距離と計数率はよい指数関数的な相関関係にある。また、原子炉建屋から 1.2 km 以上は、バックグラウンドレベル (114 cps) 以下となり、発電所起因の放射線の影響範囲は、1.2 km 程度までであると考えられる。

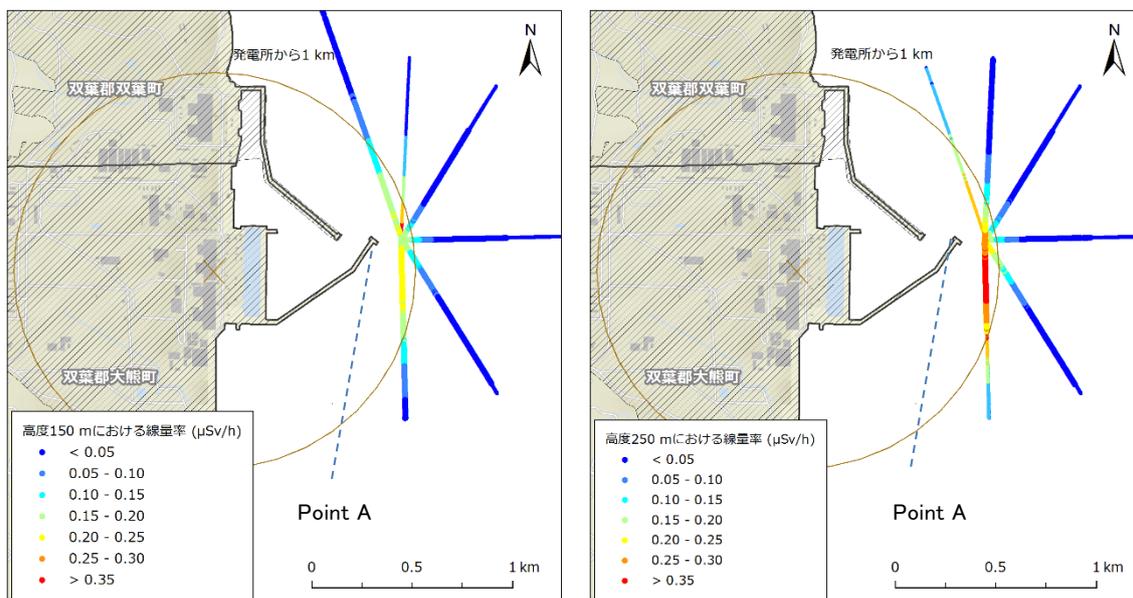


Fig. 5-42 高度 150 m (左) 及び 250 m (右)における線量率測定結果

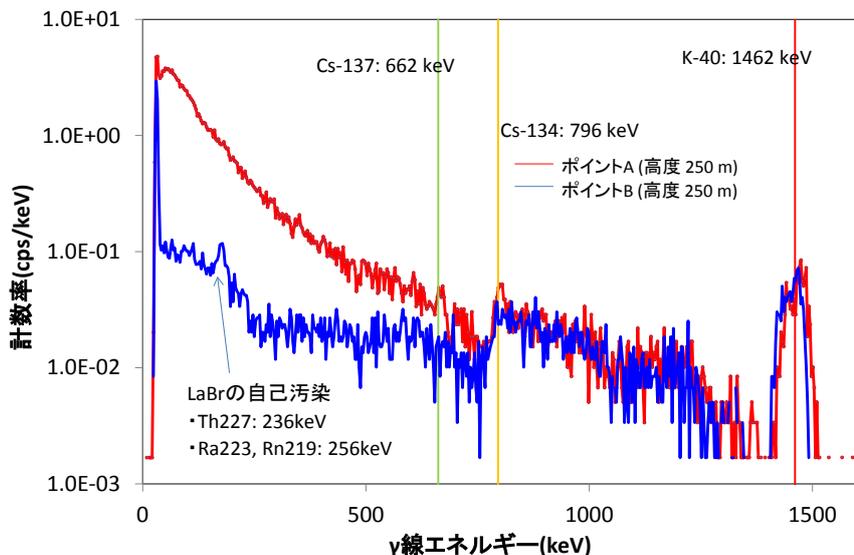


Fig. 5-43 ポイント A (高度 250 m) 及びポイント B (海上 (バックグラウンド))における  $\gamma$  線スペクトル (LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器 1 本分)

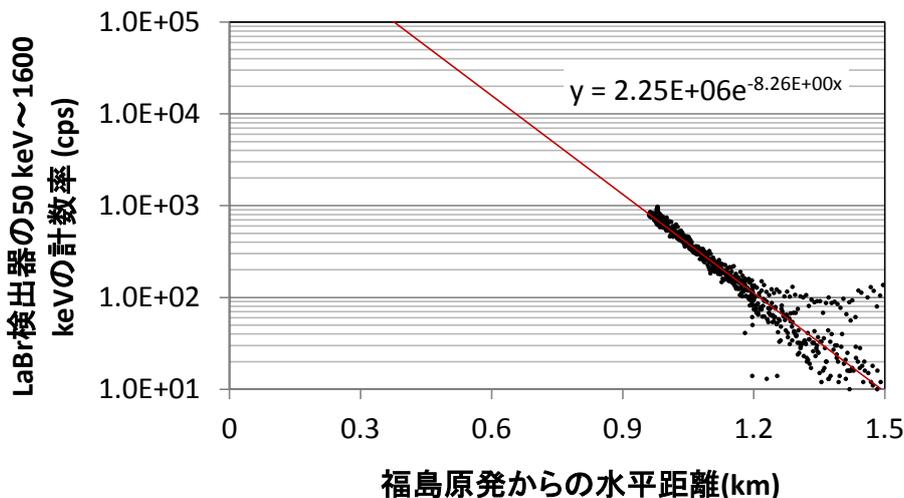
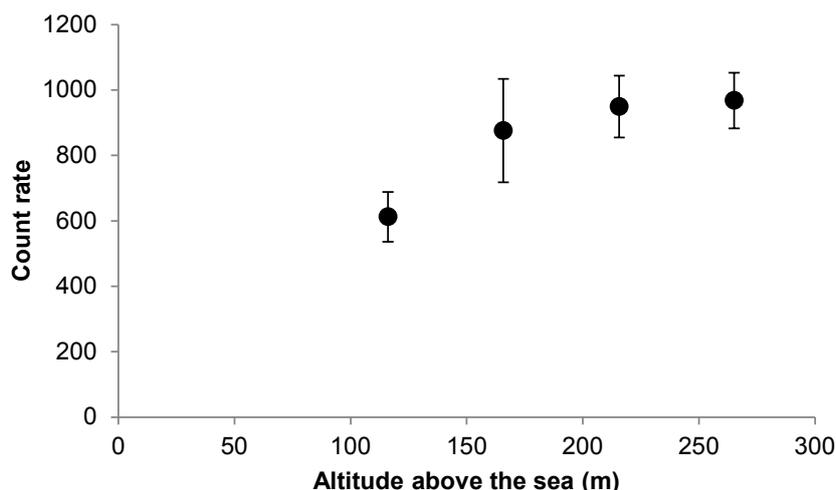


Fig. 5-44 原子力発電所からの水平距離と LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器の計数率の関係(高度 150 m におけるデータ)

2) 海拔の高度と放射線の関係

ポイント A における高度と計数率の関係を Fig. 5-45 に示す。ここで、y 軸の誤差は、1 分間の測定データ 60 個 (1 分間分)の 3 $\sigma$  である。図に示すように、高度が上昇するとともに、計数率は上昇傾向にある。また、200 m 以上において、計数率は一定となる。これは、原子炉建屋からの上方に向けて放出され散乱した散乱線の影響であると考えられる。



**Fig. 5-45** ポイント A における高度と計数率の関係  
(y 軸の誤差は、1 秒間の測定データ 60 個の  $3\sigma$ )

(1) 無人ヘリコプターによる放射線測定における原子炉建屋からの散乱線の影響  
今回の結果から以下のことが確認できた。

- 福島第一原子力発電所の東側正面の海上で最も計数率が高い。
- 海上で測定された $\gamma$ 線のエネルギースペクトルから放射性セシウムのピーク（662 keV、796 keV 等）が見られず、低エネルギー成分（数 10 keV – 500 keV）の計数率が大きいことから、海上で測定された $\gamma$ 線は、放射性セシウムの直達線ではなく、建物、地面及び大気により多数回の散乱を経た散乱線である。
- 原子炉建屋からの距離が離れるにつれて $\gamma$ 線（直達線、散乱線）の計数率は減少する傾向にある。
- この計数率の大きさは高度によるバラツキはあるにしろ、海拔高度が高くなるにつれて、 $\gamma$ 線（直達線、散乱線）の計数率は増加する傾向にある。
- 無人ヘリコプターによる通常の測定高度は、対地高度で 80 m である。今回の海拔 150 m における最大の計数率を示した地点はポイント A から南に 200 m 程度下がった場所であり、その計数率は、約 600 cps 程度であった。福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の無人ヘリコプターの測定において、高度 80 m でこの計数率（600 cps）を計数したと仮定すると、地上 1 m 高さの空間線量率の値に換算すると約 0.2  $\mu$ Sv/h 相当になる。

上記の結果から、福島第一原子力発電所の 3 km 圏内の無人ヘリコプターの測定結果に対する、原子力発電所起因の直達線や散乱線による $\gamma$ 線の影響としては以下のことが言える。

- 今回の原子力発電所の 3 km 圏内の無人ヘリコプターの測定は、フライト高度は高くても対地高度で 80 m 程度であり、原子炉建屋から水平距離で 1 km 程度以遠において測定している。この範囲において、若干の原子力発電所起因の直達線や散乱線による $\gamma$ 線の影響は考えられる。
- 他方で、今回の調査から直達線や散乱線による $\gamma$ 線の影響は距離が離れるほど、対地高度が低くなるほど小さくなることが確認されている。

- また、原子炉建屋から直線距離で 1 km 以遠の位置で無人ヘリコプターを活用して空間線量率を測定した場合、直達線や散乱線による $\gamma$ 線を計測するため、地上 1 m 高さの空間線量率の値に換算して、最大で約 0.2  $\mu\text{Sv/h}$  高めに測定されているものと考えられる。原子力発電所から 3 km 圏内での無人ヘリコプターによる空間線量率の測定結果の最小値は 1.4  $\mu\text{Sv/h}$  であったことから、原子力発電所起因の直達線や散乱線による $\gamma$ 線の影響は測定誤差の範囲内であると言える。
- このため、今回の無人ヘリコプターを活用した原子力発電所から 3 km 圏内の空間線量率、放射性セシウムの沈着量の測定結果をマップ化するにあたっては、発電所施設起因の $\gamma$ 線（直達線、散乱線）の影響を無視して考えることとした。

## 6. まとめ

無人ヘリコプターを用いた広域の放射線測定システムを開発し、地上 1 m 高さの線量率及び放射性セシウムの沈着量への換算方法を考案した。本システムを用いた測定結果は、地上での測定結果とよく一致することが分かった。本システムを用いて、原子力発電所の事故後、以下の場所に適用し、有効性を示した。

航空機モニタリングにより面的な測定が行われていなかった原子力発電所から 3 km 圏内において、無人ヘリコプターを用いたモニタリングを実施することにより、3 km 圏内の敷地外における空間線量率分布及び放射性セシウムの沈着量分布が明らかになった。本モニタリング結果は、地上で測定可能な地点での測定結果とも良く一致しており、妥当なものと判断された。

放射性物質の移行経路として、懸念されている河川について着目し、河川敷のモニタリングを実施した。その結果、一部の河川について、周辺の線量率よりも河川敷の線量率が高い場所があった。本結果は、上流からの放射性物質の移行を示すものと考えられる。

発電所敷地内の上空 200 m の線量率を測定した。本結果を基に、国土交通省は、発電所から 3 km 圏内上空 1,500 m 以上の飛行禁止を解除した。この結果、解除前まで使用できなかった空路が使用できるようになった。

除染モデル事業に合わせ、除染の前後での測定を実施した。作成したマップにより、除染の効果が視覚的に評価できることが分かった。

原子力発電所の海側から、無人ヘリコプターにより測定を行い、散乱線の影響を評価した。原子炉等の施設からの散乱線は、1.2 km まで影響があることが分かったが、周辺の線量率よりと比較すると無視できることが分かった。

また、本測定技術には下記のような課題があると考えている。

### 1) 測定場所の線量分布の不均一

地上でのサーベイメータによる測定範囲は、狭い（半径 3 m 程度）ことに対し、上空からの測定範囲は広い（例えば、高度 80 m の場合は地上の半径 80 m の円の平均値を求めていることになる）。よって、測定場所が不均一であれば、地上の測定値と合致しない可能性がある。

### 2) 地形の効果

無人ヘリコプターの換算係数は、下からの放射線に限定して決定しており、山間部、森林や高い建物の脇等が無人ヘリコプターと地上との距離よりも近くにある場合、横からの放射線の影響を受けて、過剰評価する場合は考えられる。また、対地高度の求め方は、海拔高度から地表面の海拔高度（DEM データ）を差し引いて求めており、森林や建物の上空では、過大評価となる可能性がある。

今後、この要因については、対地高度のより正確な測定方法の確率、検出器の位置分解能の向上等、測定・評価補正方法を含めて検討が必要である。

## 謝辞

本調査研究は、内閣府からの受託事業「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務」、及び文部科学省からの受託研究「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」の成果の一部を使用している。本データの取得には、無人ヘリの運用及びデータ取得を応用地質株式会社の皆さんにご協力を得ました。また、機器の整備や無人ヘリの操縦についてヤマハ発動機株式会社及び東北スカイテック株式会社の皆さんのご協力を得ました。心より感謝を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 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*, 54, pp. 160-165 (2012).
- 2) 眞田幸尚, 近藤敦哉, 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, pp. 137-140 (2012).
- 3) 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).
- 4) Kaneko T., Koyama T., Yasuda A., Takeo M., Yanagisawa T., Kajiwara K. and Honda Y., Low-altitude remote sensing of volcanoes using an unmanned autonomous helicopter: an example of aeromagnetic observation at Izu-Oshima volcano, *Japan, Int. J. Remote Sens.*, 32, pp. 1491-1504 (2011).
- 5) Won I. J and Taylor, D.W.A., Geophex airborne unmanned survey system, DOE/MC-30358/95/C0432 (1995).
- 6) 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, 8-14 (2009).
- 7) Okuyama, S., Torii, T., Suzuki, A, Shibuya, M. and Miyazaki, N., A remote radiation monitoring system using autonomous unmanned helicopter for nuclear emergency. *J. Nucl. Sci. Tech.*, Supp. 5, pp. 414-416 (2008).
- 8) Nicolini R., Camera F., Blasi N., Brambilla S., Bassini R., Boiano C., Bracco A., Crespi F.C.L., Wieland O., Benzoni G., Leoni S., Million B., Montanari D. and Zalite A., Investigation of the properties of a 1" x 1" LaBr<sub>3</sub>:Ce scintillator, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res.*, A582, pp.554-561 (2007).
- 9) Covell, D. F., Determination of Gamma-Ray Abundance Directly from Total Absorption Peak, *Analytical Chemistry*, 31, pp. 1785-1790 (1959).
- 10) GSI, 2011, Geospatial Information Authority of Japan, [http://www.gsi.go.jp/ENGLISH/page\\_e30031.html](http://www.gsi.go.jp/ENGLISH/page_e30031.html)
- 11) IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, *IAEA-TECDOC-1363*, (2003)
- 12) 文部科学省, ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法, 放射能測定法シリーズ

33.

- 13) MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology), Preparation of Distribution Map of Radiation Doses, etc. (Map of Radioactive Cesium Concentration in Soil) by MEXT. [http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/5000/4165/24/1750\\_083014.pdf](http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/5000/4165/24/1750_083014.pdf) (2011): 2013 年 11 月閲覧
- 14) Kaiser, H. Zum Problem Der Nachweisgrenze, *Fresenius. Z Anal. Chem.* 209, pp.1-18, (1965).
- 15) Prudnikov, E. D., Detection limits and error estimation in analysis, *Fresenius. Z Anal. Chem.* 337, pp.412-425 (1990).
- 16) Casanovas, R., Morant, J. J. and Salvado, M., Energy and resolution calibration of NaI(Tl) and LaBr<sub>3</sub>(Ce) scintillators and validation of an EGS5 Monte Carlo user code for efficiency calculations., *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res.*, A675, pp.78-83 (2012) .
- 17) 東京電力株式会社 HP, <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/surveymap/images/f1-sv-20131220-j.pdf> : 2013 年 11 月 閲覧
- 18) Matsunaga T., Nagao S., Ueno T., Takeda S., Amano H. and Tkachenko Yu., Association of dissolved radionuclides released by the Chernobyl accident with colloidal materials in surface water. *App. Geochem.*, 19, pp.1581-1599 (2004).
- 19) 原子力規制庁 HP, [http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/7000/6749/24/191\\_258\\_0301\\_18.pdf](http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/7000/6749/24/191_258_0301_18.pdf), (2013) : 2013 年 11 月 閲覧
- 20) 国土交通省報道発表資料「東京電力福島第一原子力発電所周辺の飛行禁止区域の縮小について」 [http://www.mlit.go.jp/report/press/kouku10\\_hh\\_000047.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/kouku10_hh_000047.html) (2012): 2013 年 11 月 閲覧
- 21) 日本原子力研究開発機構, 福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務【除染計画策定のための詳細モニタリング事業編】報告書 [http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/d-model\\_report/report\\_5.pdf](http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/d-model_report/report_5.pdf), (2013) : 2013 年 11 月 閲覧

Appendix 1 LaBr<sub>3</sub>:Ce 検出器の全テストフライトデータ

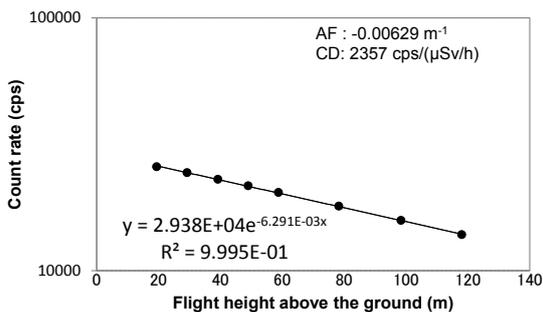


Fig. A-1 2012/08/30 1 回目測定 of 空気減弱係数 (試験飛行のモニタリング)

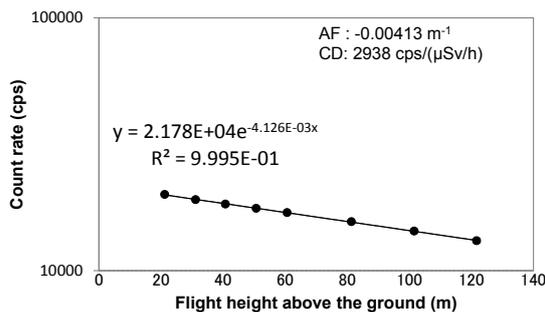


Fig. A-2 2012/08/30 2 回目測定 of 空気減弱係数 (試験飛行のモニタリング)

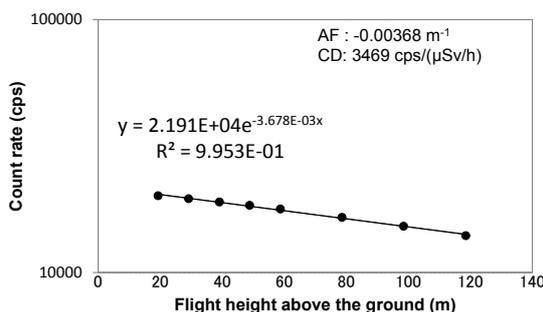


Fig. A-3 2012/08/30 3 回目測定 of 空気減弱係数 (試験飛行のモニタリング)

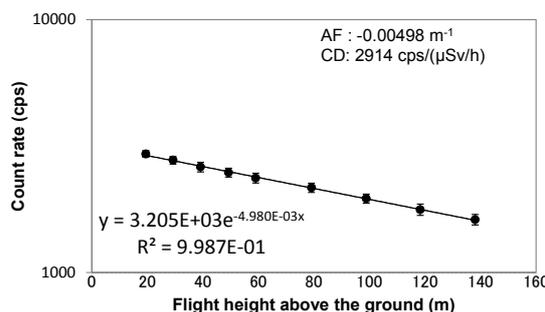


Fig. A-4 2012/08/31 測定 of 空気減弱係数 (試験飛行のモニタリング)

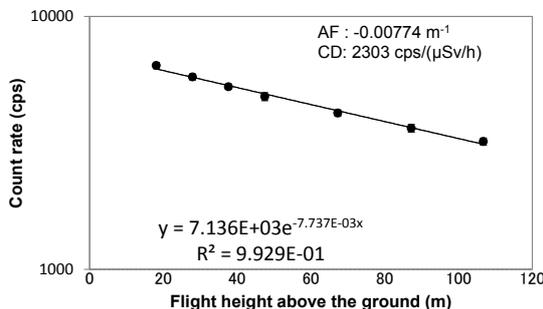


Fig. A-5 2012/10/02 測定 of 空気減弱係数 (原子力発電所周辺のモニタリング 1 回目)

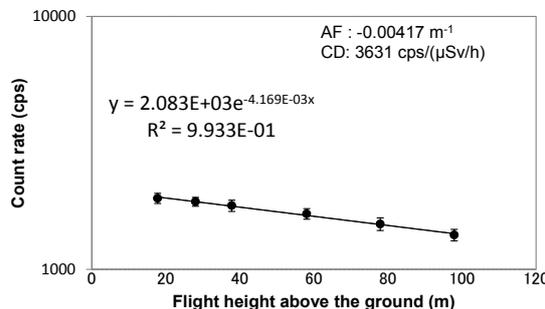


Fig. A-6 2012/10/06 1 回目測定 of 空気減弱係数 (原子力発電所周辺のモニタリング 1 回目)

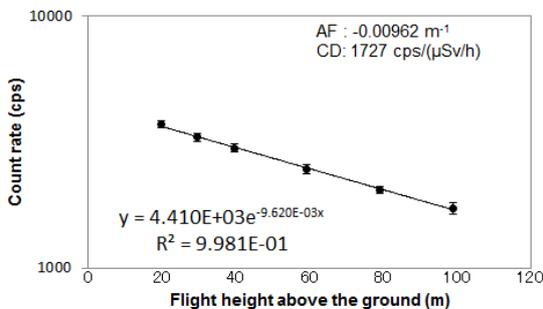


Fig. A-7 2012/10/06 2 回目測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

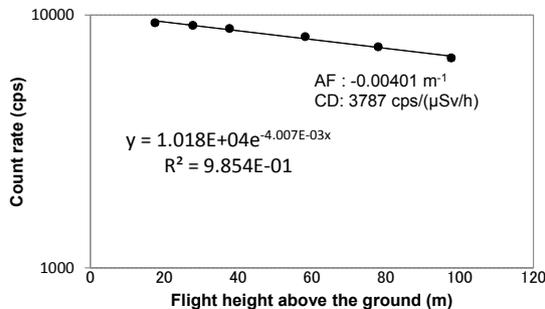


Fig. A-8 2012/10/07 測定 of 空気減弱係数 (フライトパターンによる影響)

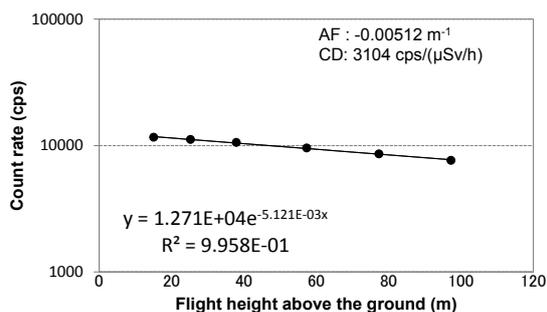


Fig. A-9 2012/10/08 1 回目測定 of 空気減弱係数 (原子力発電所周辺のモニタリング)

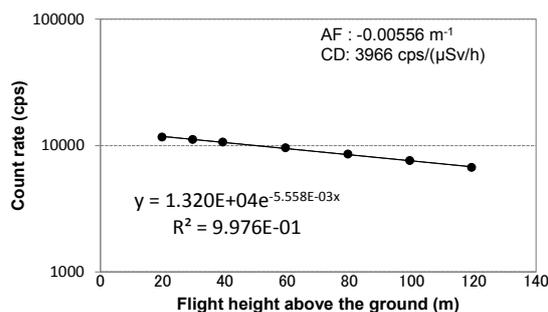


Fig. A-10 2012/10/08 2 回目測定 of 空気減弱係数 (原子力発電所周辺のモニタリング)

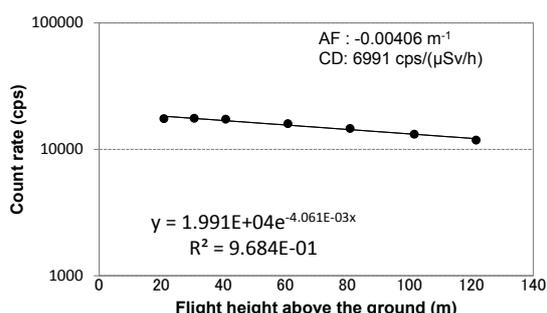


Fig. A-11 2012/10/09 測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

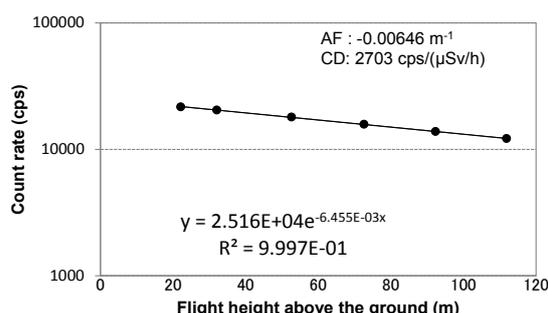


Fig. A-12 2012/10/10 測定 of 空気減弱係数 (原子力発電所周辺のモニタリング)

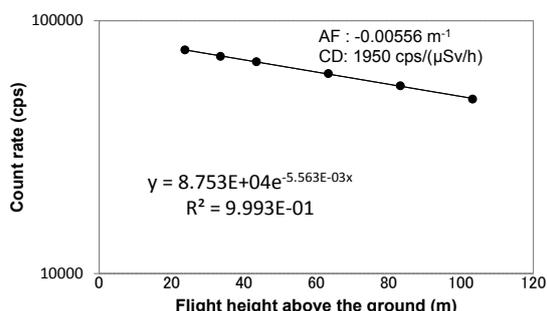


Fig. A-13 2012/10/11 1 回目測定 of 空気減弱係数 (原子力発電所周辺のモニタリング)

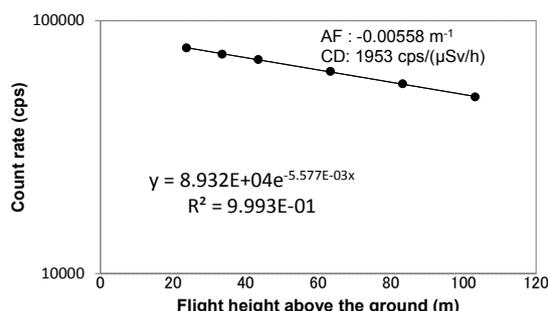


Fig. A-14 2012/10/11 2 回目測定 of 空気減弱係数 (原子力発電所周辺のモニタリング)

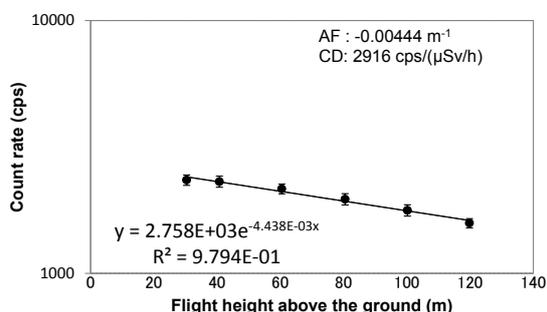


Fig. A-15 2012/10/12 1 回目測定 of 空気減弱係数 (原子力発電所周辺のモニタリング)

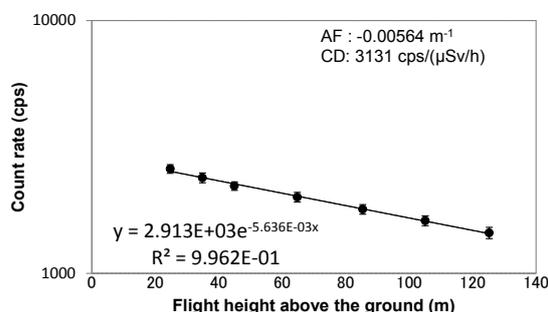


Fig. A-16 2012/10/12 2 回目測定 of 空気減弱係数 (原子力発電所周辺のモニタリング)

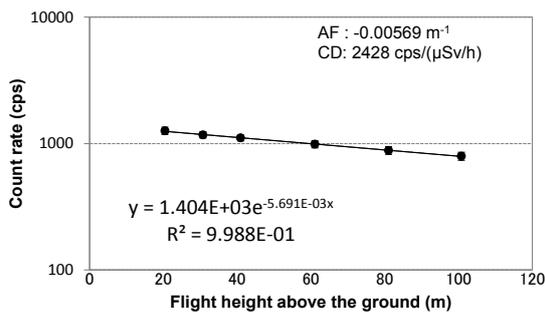


Fig. A-17 2012/10/17 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

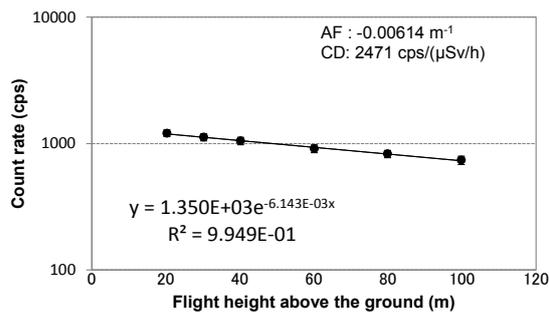


Fig. A-18 2012/10/18 測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

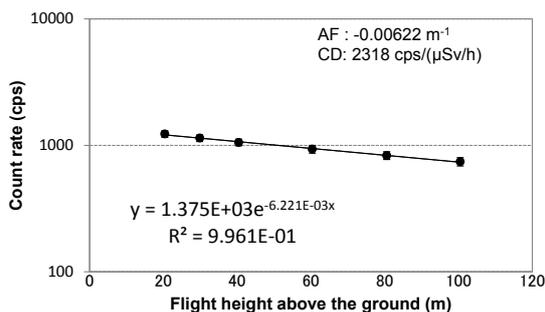


Fig. A-19 2012/10/19 測定 of 空気減弱係数 (河川敷モニタリング)

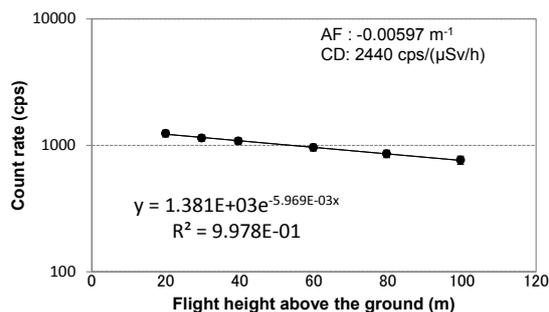


Fig. A-20 2012/10/20 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

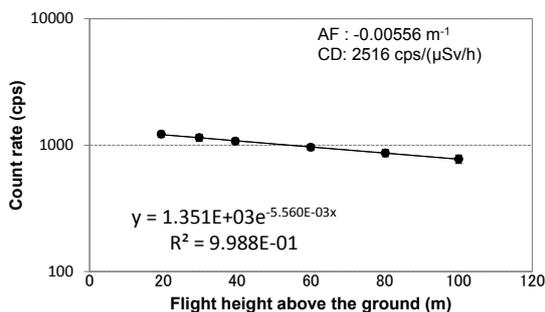


Fig. A-21 2012/10/21 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

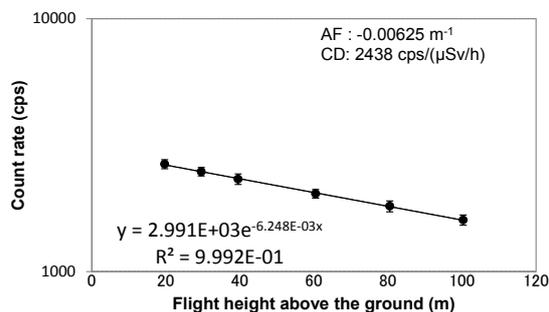


Fig. A-22 2012/10/22 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

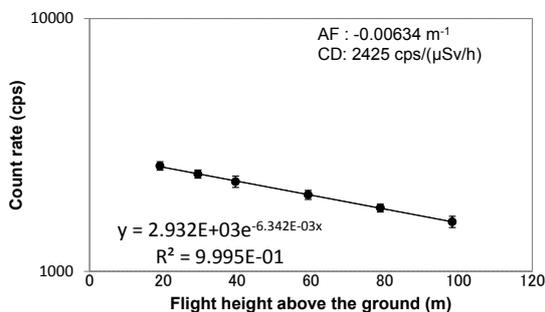


Fig. A-23 2012/10/24 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

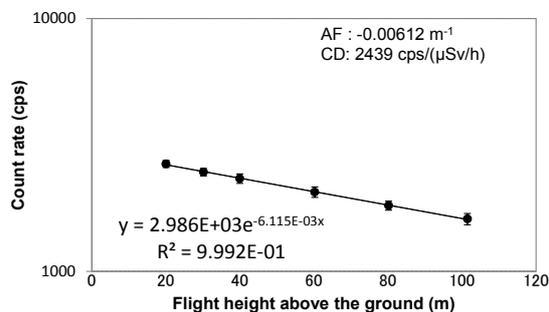


Fig. A-24 2012/10/25 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

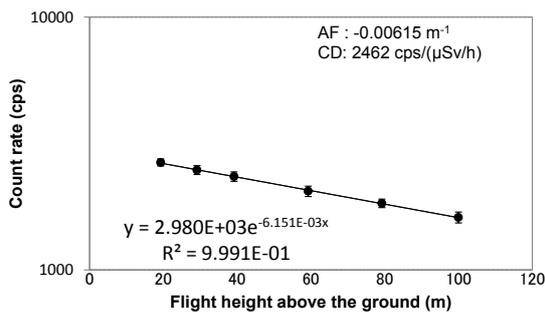


Fig. A-25 2012/10/26 測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

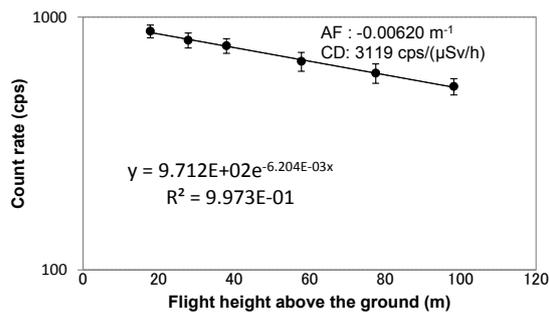


Fig. A-26 2012/10/31 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

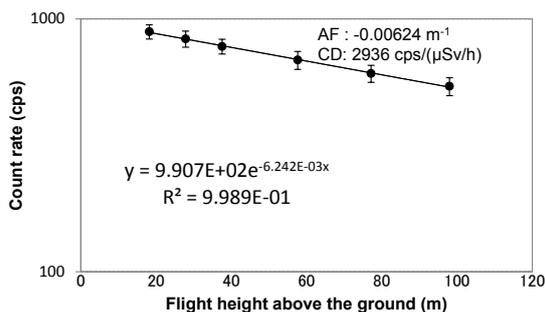


Fig. A-27 2012/11/01 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

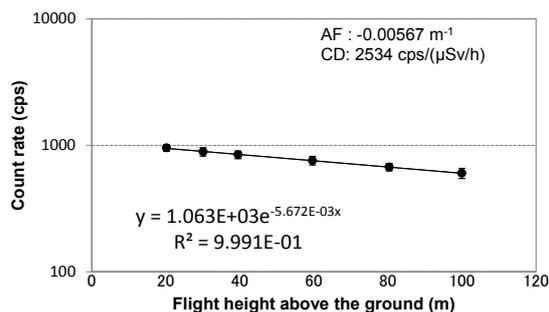


Fig. A-28 2012/11/07 測定 of 空気減弱係数 (原河川敷のモニタリング)

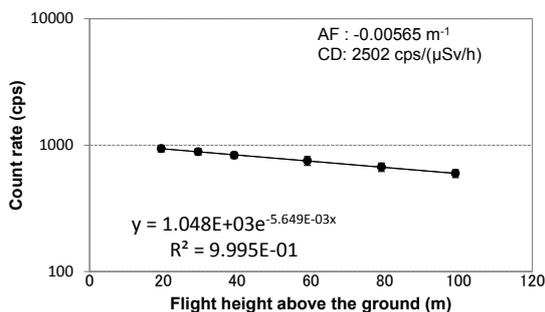


Fig. A-29 2012/11/08 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

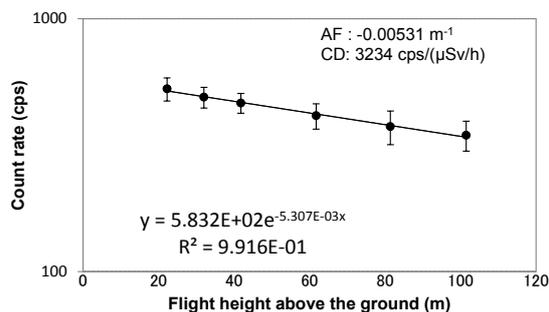


Fig. A-30 2012/11/14 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

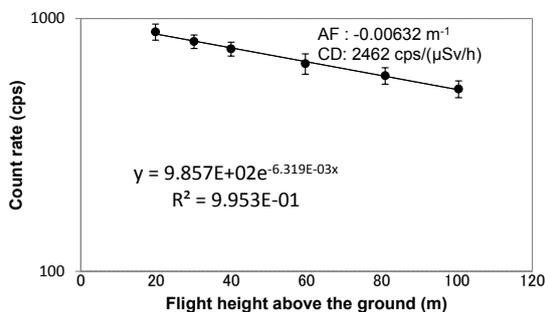


Fig. A-31 2012/11/16 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

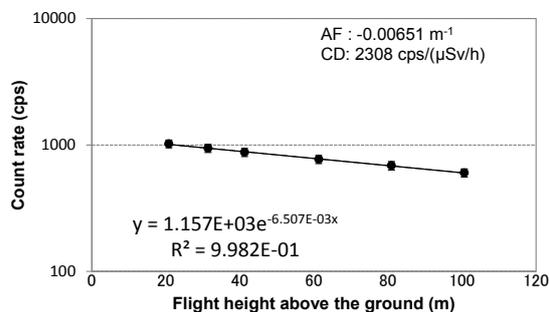


Fig. A-32 2012/11/19 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

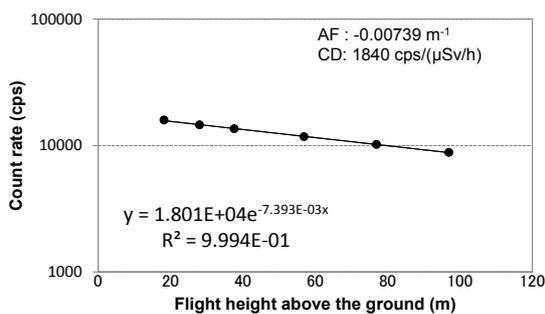


Fig. A-33 2012/11/21 1回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

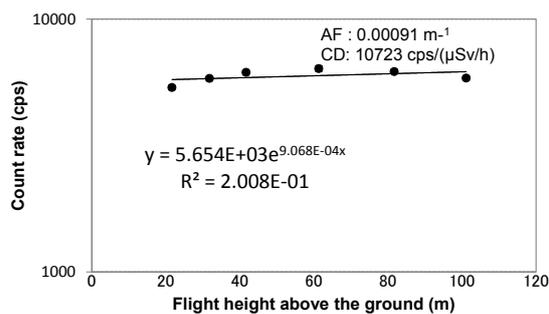


Fig. A-34 2012/11/21 2回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

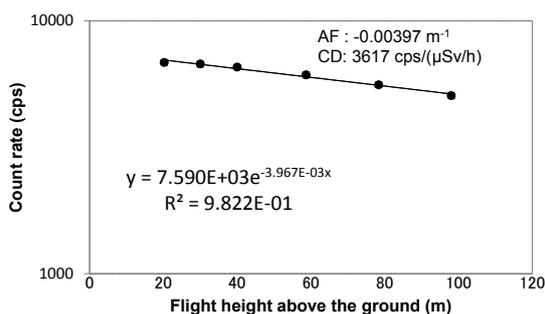


Fig. A-35 2012/11/22 測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

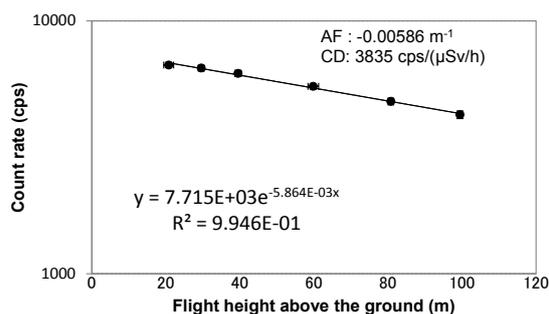


Fig. A-36 2012/11/23 測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

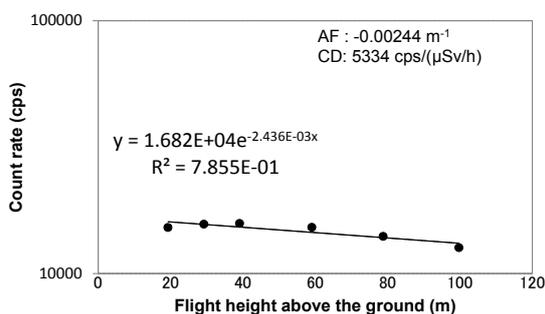


Fig. A-37 2012/11/28 測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

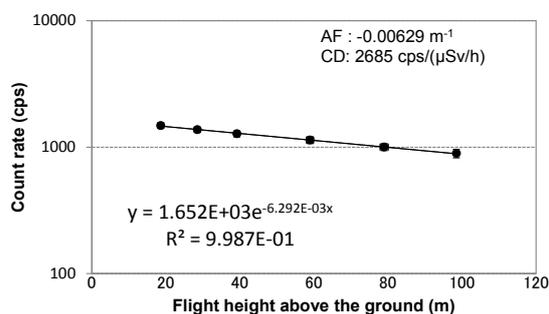


Fig. A-38 2012/11/29 1回目測定 of 空気減弱係数 (積雪影響評価のモニタリング)

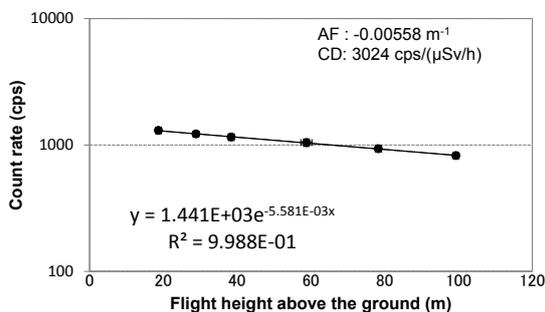


Fig. A-39 2012/11/29 2回目測定 of 空気減弱係数 (積雪影響評価のモニタリング)

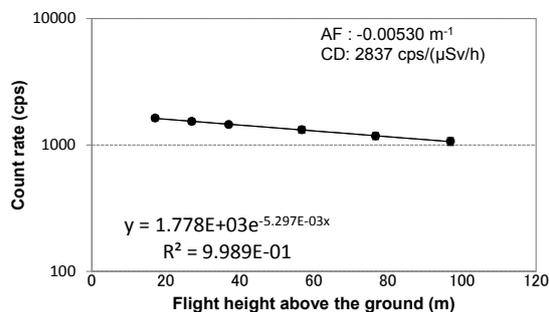


Fig. A-40 2012/11/29 3回目測定 of 空気減弱係数 (積雪影響評価のモニタリング)

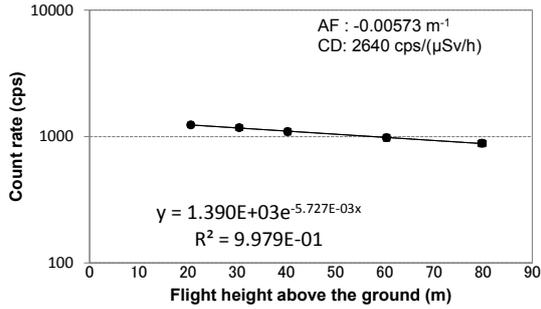


Fig. A-41 2012/12/01 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

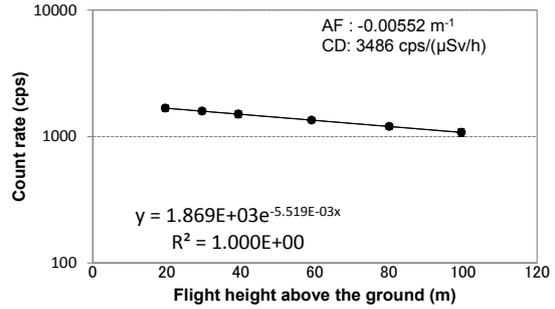


Fig. A-42 2012/12/02 測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

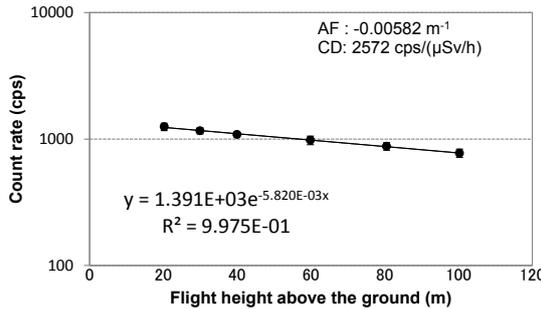


Fig. A-43 2012/12/03 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

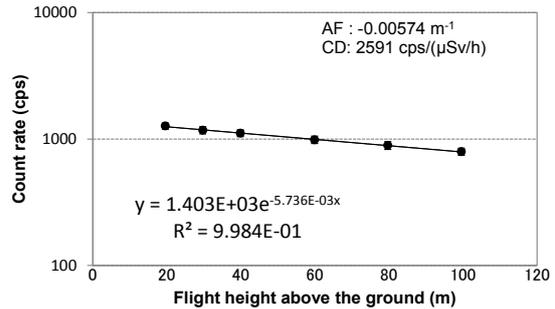


Fig. A-44 2012/12/11 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

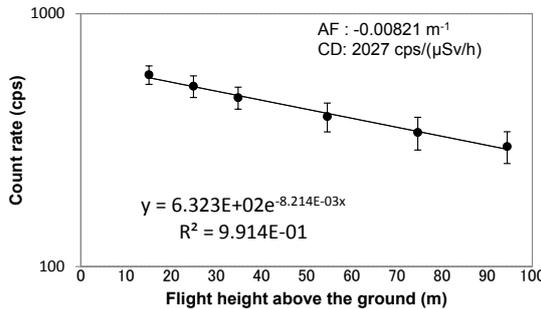


Fig. A-45 2013/01/08 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

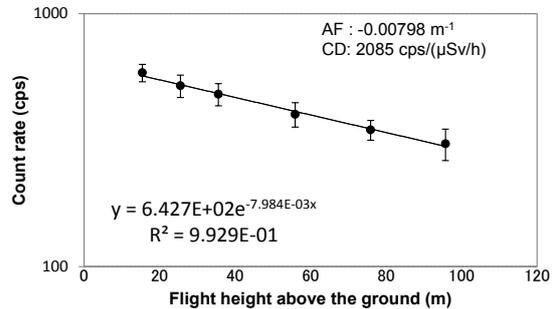


Fig. A-46 2013/01/09 測定 of 空気減弱係数 (河川敷のモニタリング)

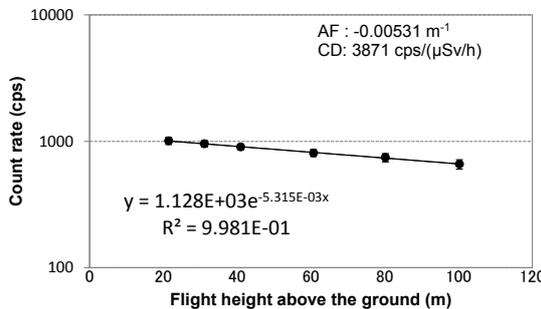


Fig. A-47 2013/01/16 測定 of 空気減弱係数 (積雪影響評価のモニタリング)

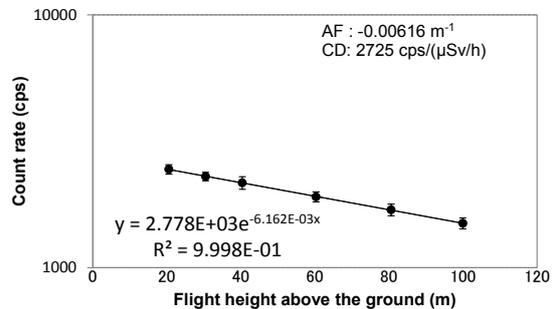


Fig. A-48 2013/01/27 測定 of 空気減弱係数 (原子力発電所周辺のモニタリング 2回目)

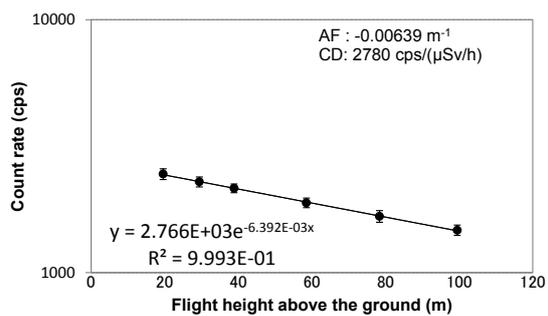


Fig. A-49 2013/02/09 測定 of 空気減弱係数 (原子力発電所周辺のモニタリング 2 回目)

Appendix 2 PS 検出器の全テストフライトデータ

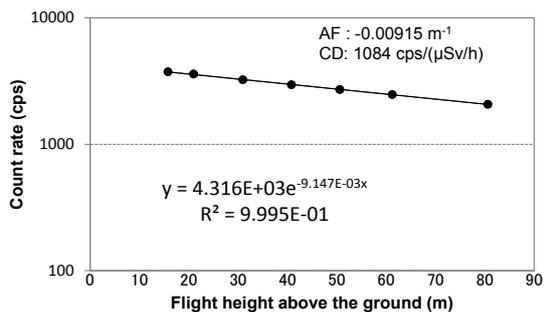


Fig. A-50 2011/12/02 測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

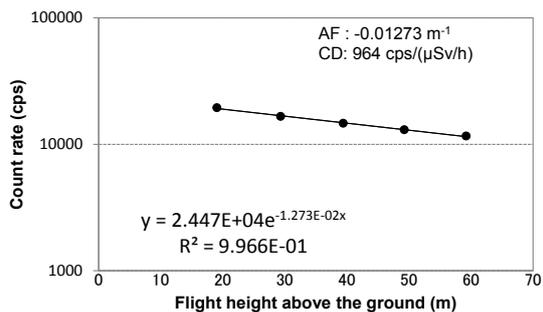


Fig. A-51 2011/12/05 1 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

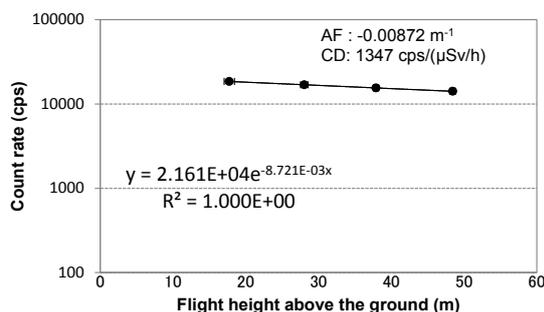


Fig. A-52 2011/12/05 2 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

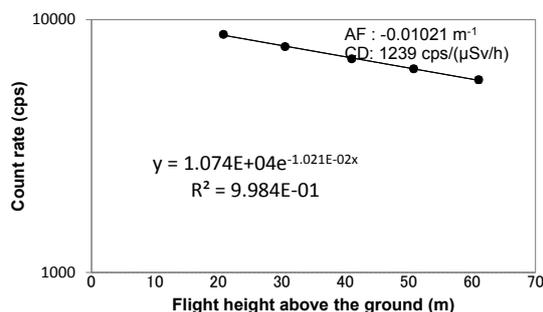


Fig. A-53 2011/12/06 1 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

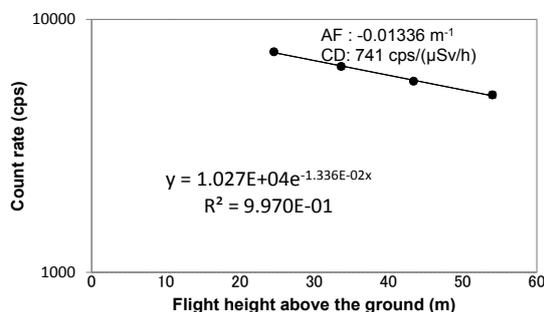


Fig. A-54 2011/12/06 2 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

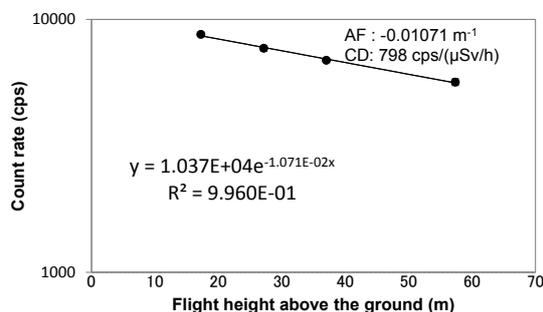


Fig. A-55 2011/12/06 3 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

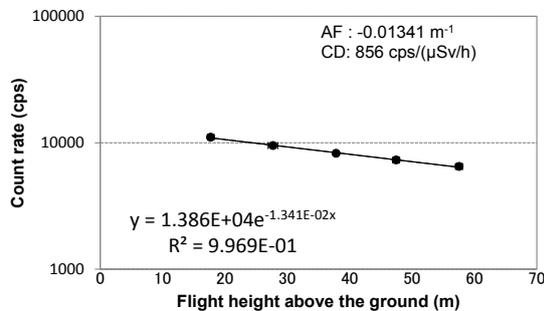


Fig. A-56 2011/12/12 1 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

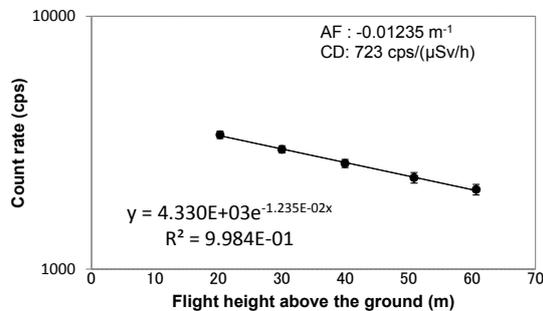


Fig. A-57 2011/12/12 2 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

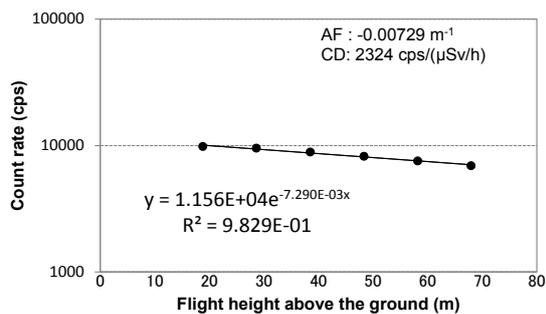


Fig. A-58 2011/12/14 1回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

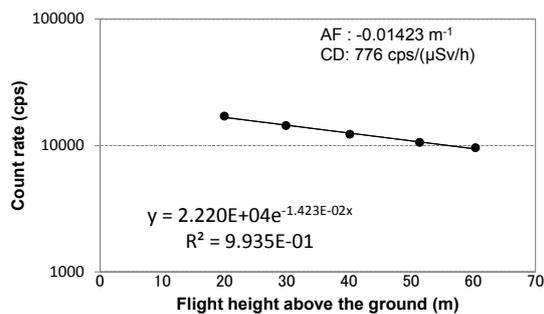


Fig. A-59 2011/12/14 2回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

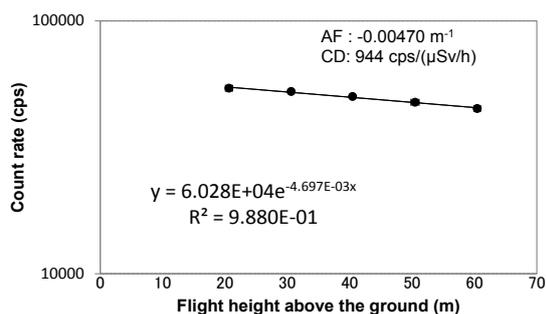


Fig. A-60 2011/12/15 1回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

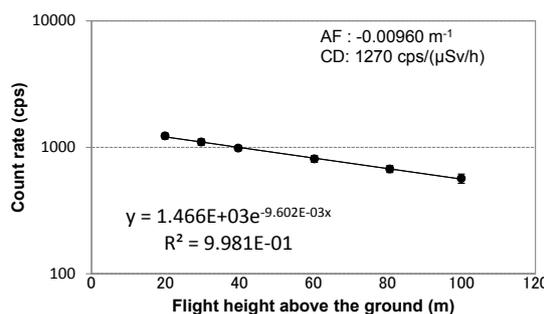


Fig. A-61 2011/12/15 2回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

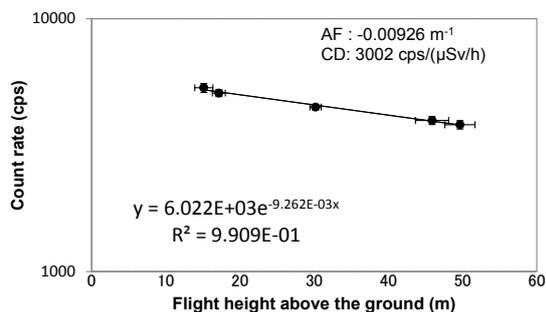


Fig. A-62 2012/01/06 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

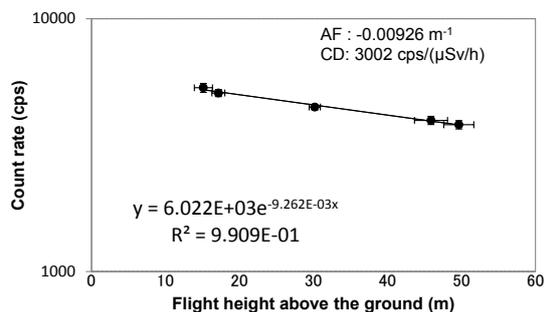


Fig. A-63 2012/01/06 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

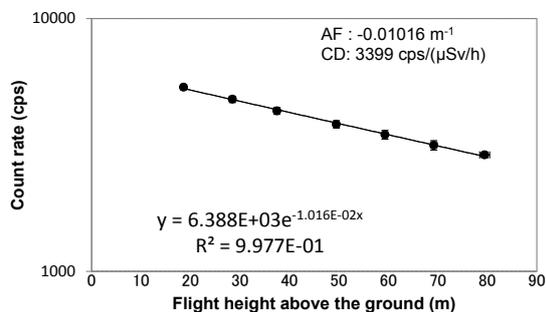


Fig. A-64 2012/01/06 3回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

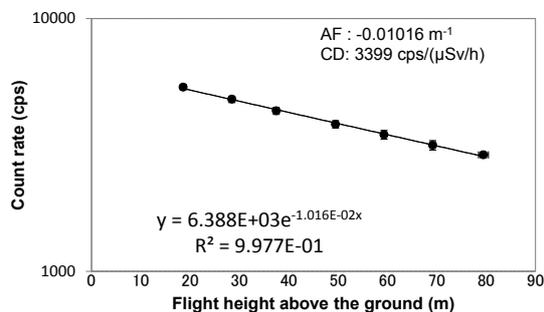


Fig. A-65 2012/01/06 4回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

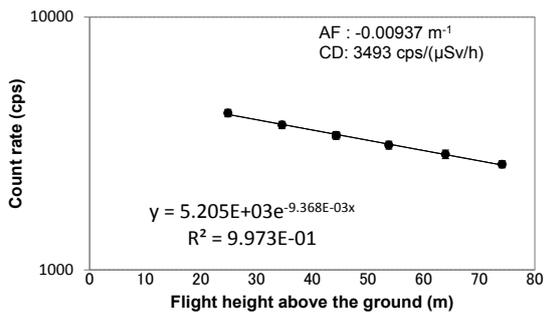


Fig. A-66 2012/01/07 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

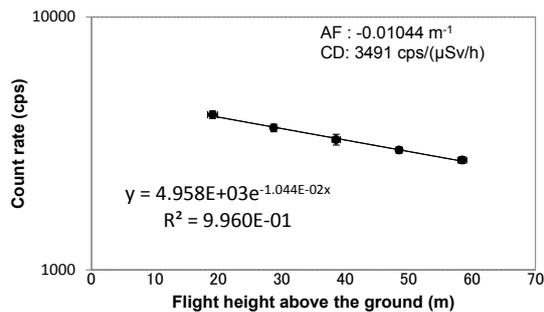


Fig. A-67 2012/01/07 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

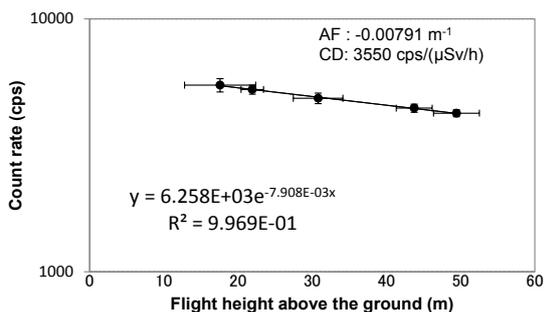


Fig. A-68 2012/01/08 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

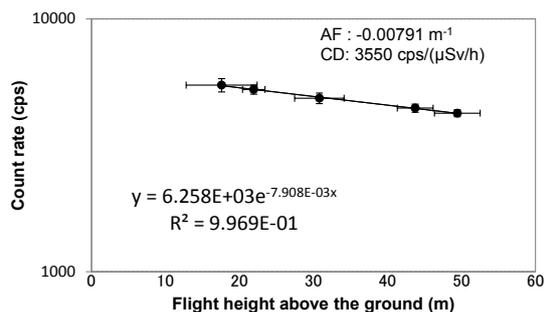


Fig. A-69 2012/01/08 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

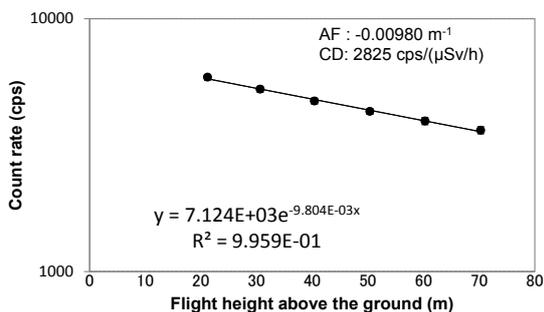


Fig. A-70 2012/01/09 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

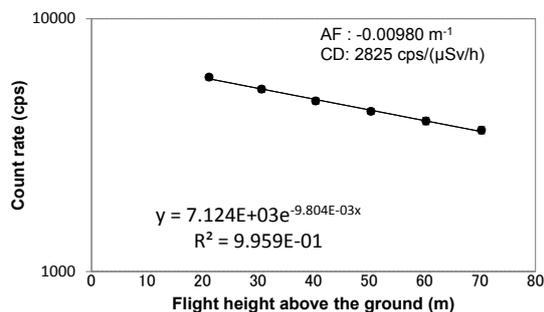


Fig. A-71 2012/01/09 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

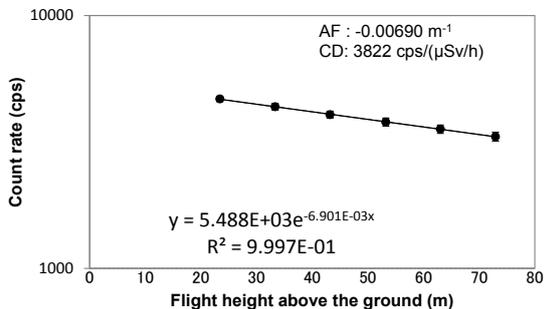


Fig. A-72 2012/01/09 3回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

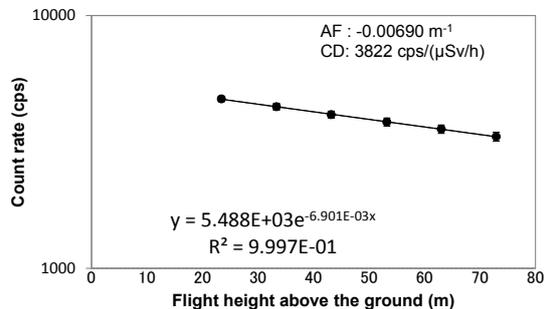


Fig. A-73 2012/01/10 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

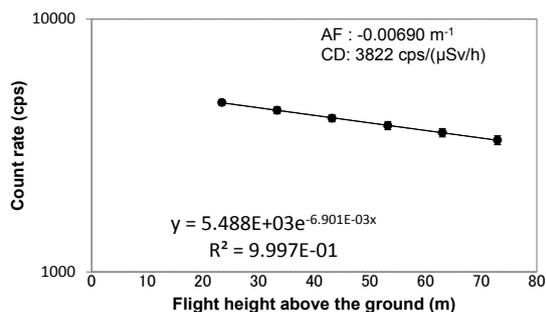


Fig. A-74 2012/01/10 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

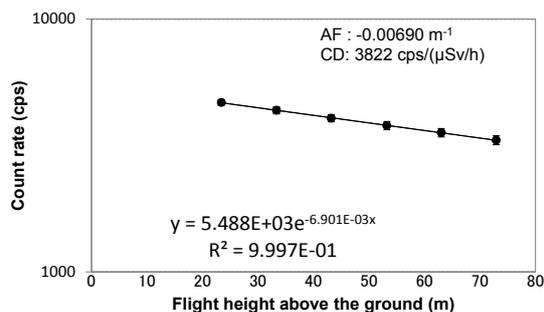


Fig. A-75 2012/01/10 3回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

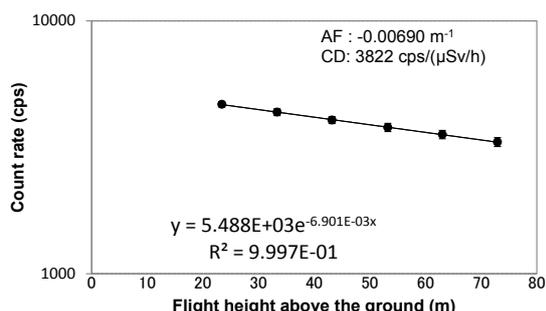


Fig. A-76 2012/01/10 4回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

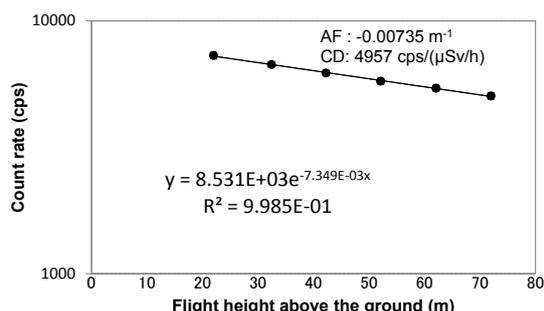


Fig. A-77 2012/01/10 5回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

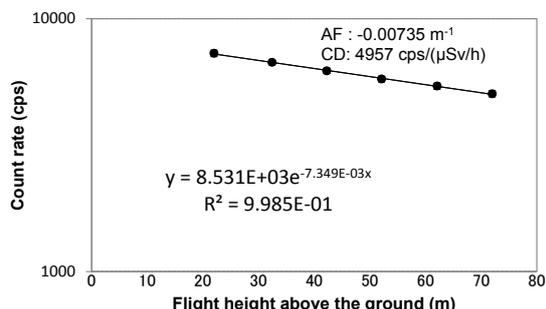


Fig. A-78 2012/01/12 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

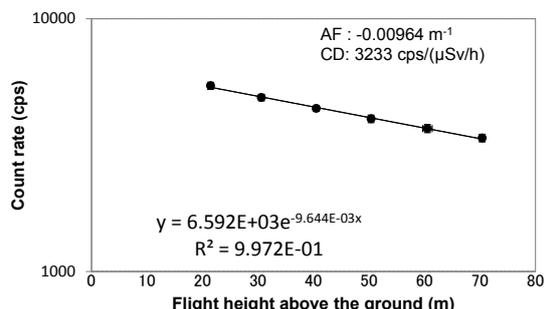


Fig. A-79 2012/01/12 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

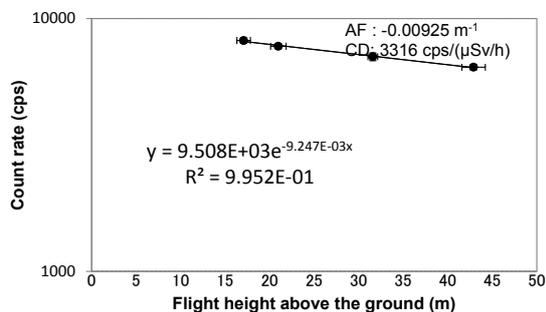


Fig. A-80 2012/01/13 測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

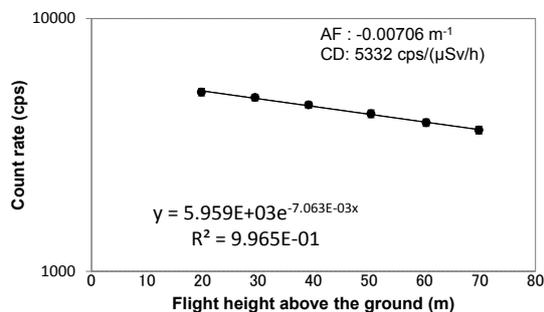


Fig. A-81 2012/01/14 測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

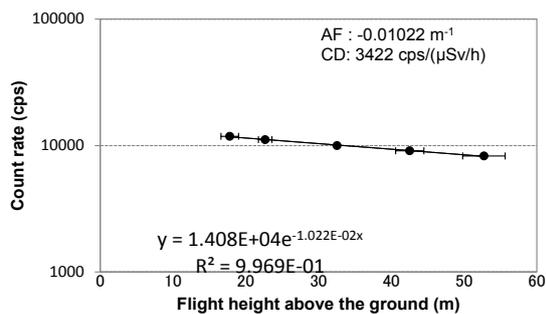


Fig. A-82 2012/01/15 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

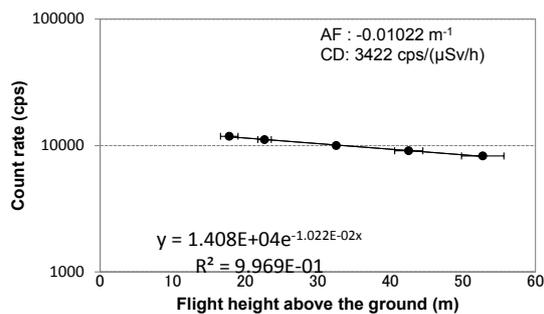


Fig. A-83 2012/01/15 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

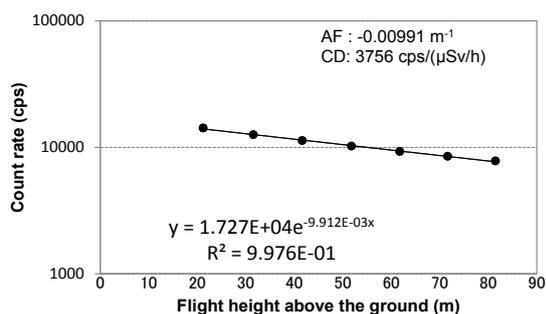


Fig. A-84 2012/01/15 3回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

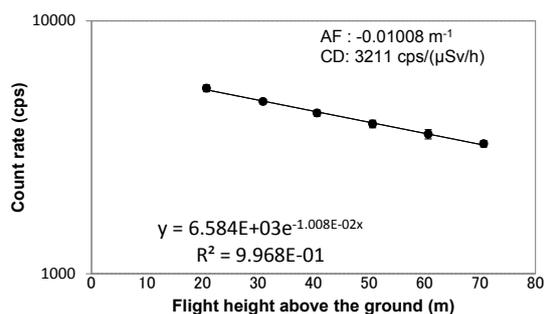


Fig. A-85 2012/01/25 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

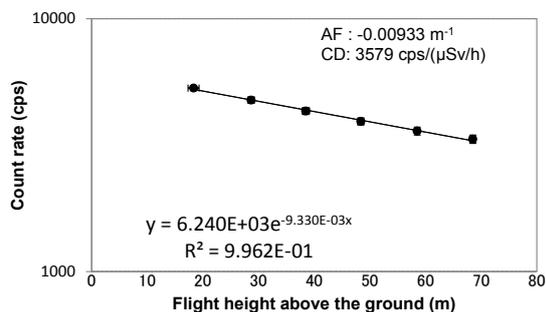


Fig. A-86 2012/01/25 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

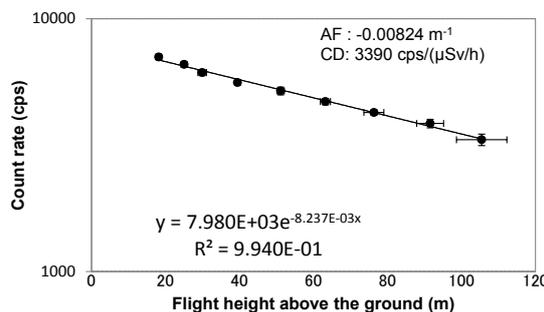


Fig. A-87 2012/01/25 3回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

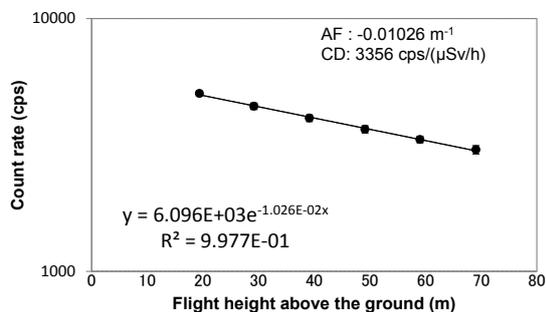


Fig. A-88 2012/01/26 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

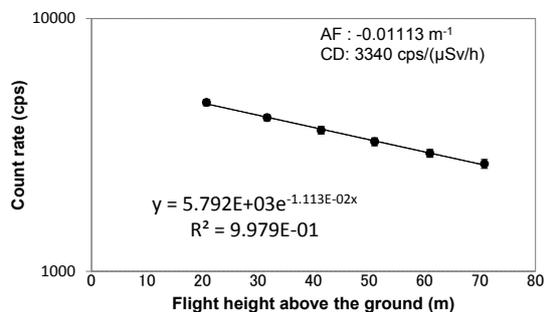


Fig. A-89 2012/01/26 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

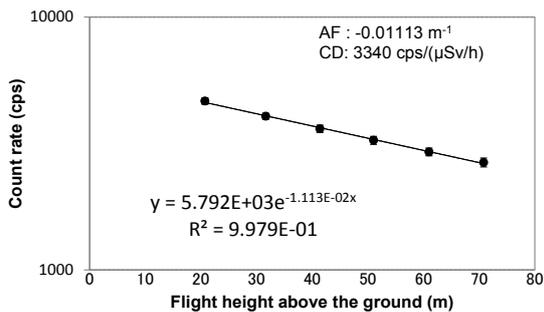


Fig. A-90 2012/01/27 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

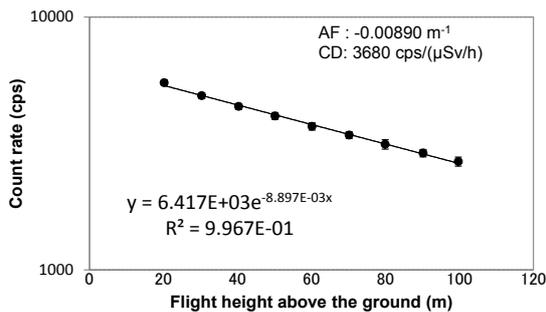


Fig. A-91 2012/01/27 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

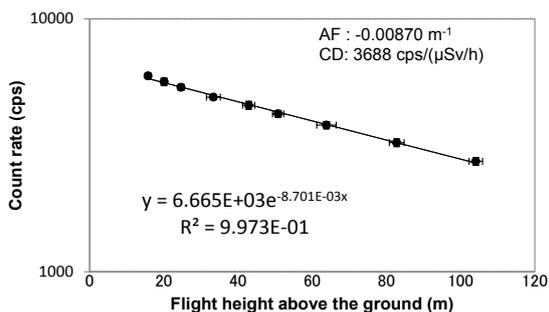


Fig. A-92 2012/01/27 3回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

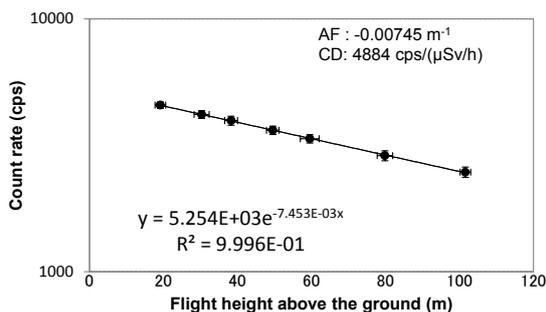


Fig. A-93 2012/01/27 4回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

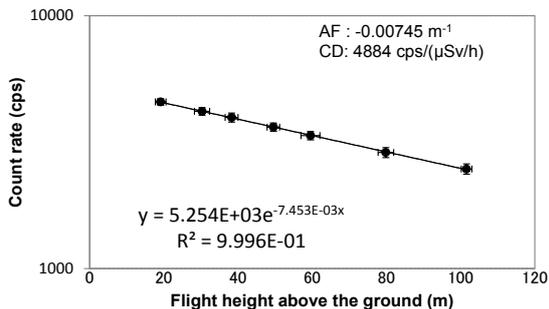


Fig. A-94 2012/01/28 測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

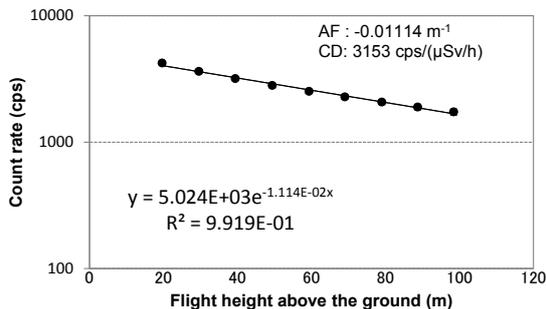


Fig. A-95 2012/01/29 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

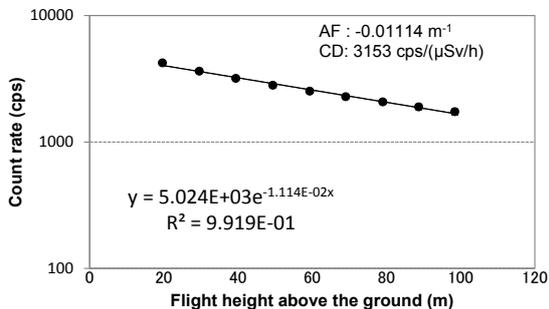


Fig. A-96 2012/01/29 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

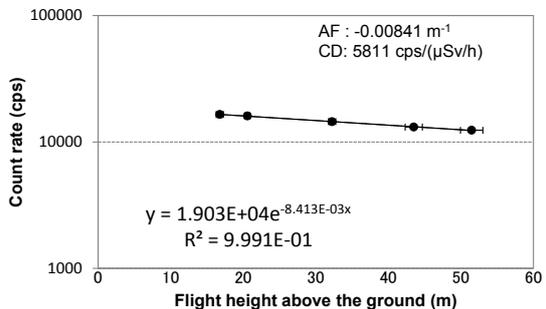


Fig. A-97 2012/01/31 測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

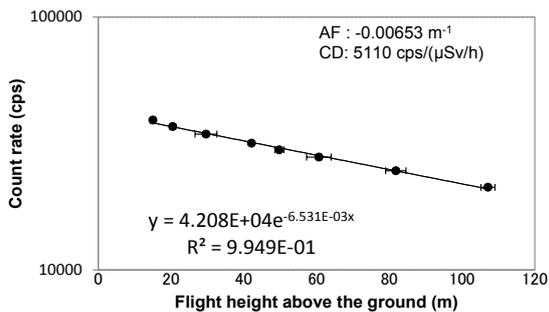


Fig. A-98 2012/02/01 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

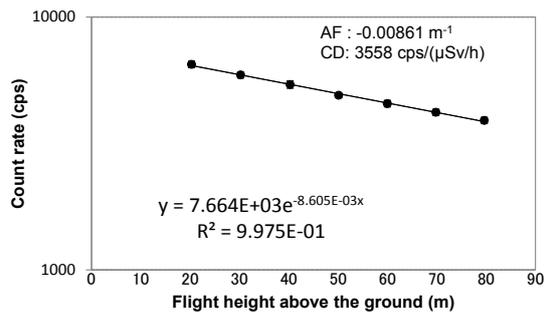


Fig. A-99 2012/02/01 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

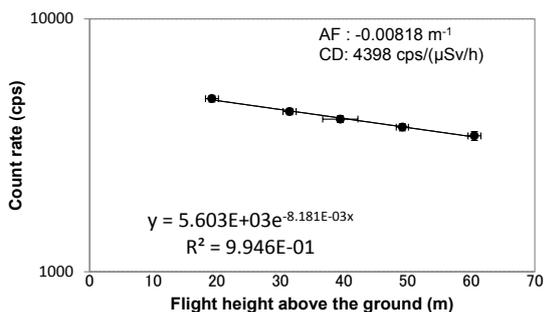


Fig. A-100 2012/02/03 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

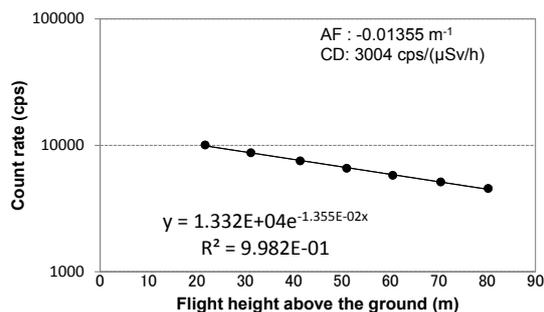


Fig. A-101 2012/02/03 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

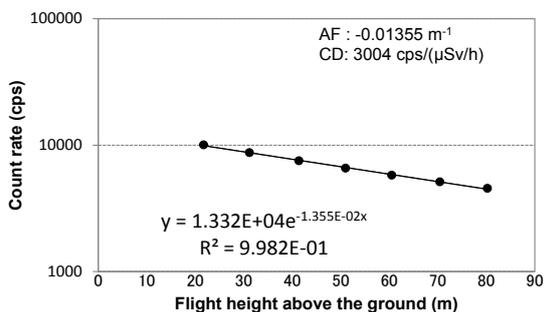


Fig. A-102 2012/02/03 3回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

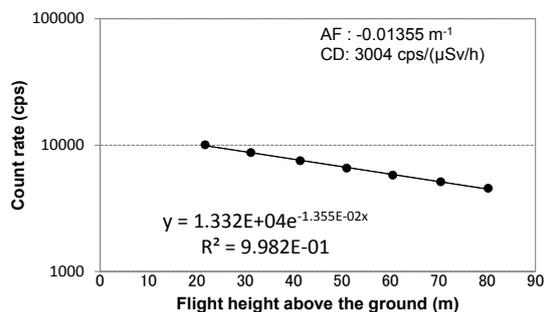


Fig. A-103 2012/02/04 測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

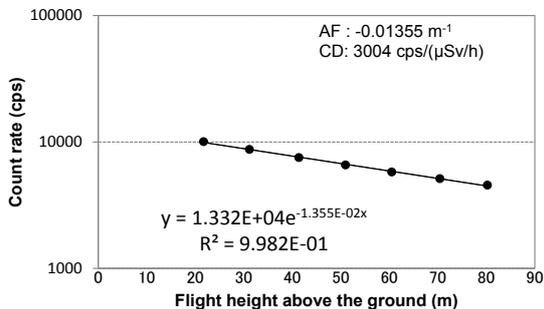


Fig. A-104 2012/02/05 1回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

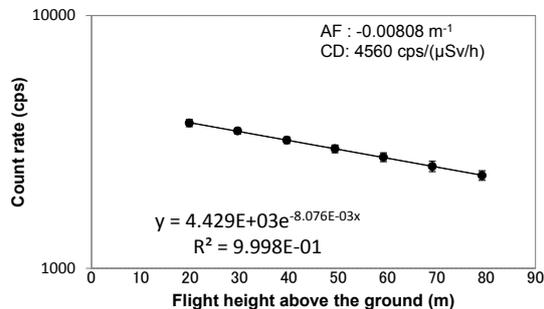


Fig. A-105 2012/02/05 2回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

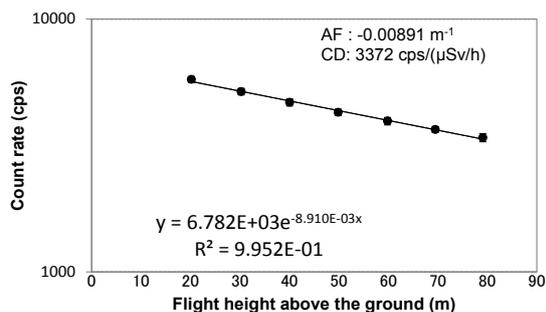


Fig. A-106 2012/02/05 3 回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

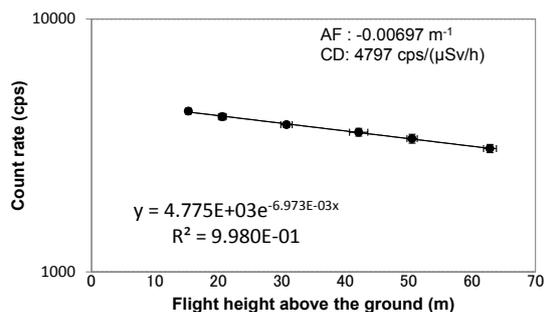


Fig. A-107 2012/02/06 1 回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

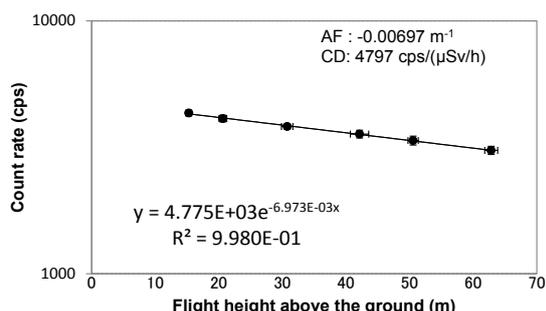


Fig. A-108 2012/02/06 2 回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

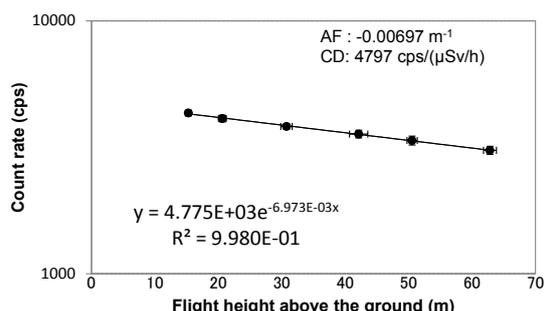


Fig. A-109 2012/02/06 3 回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

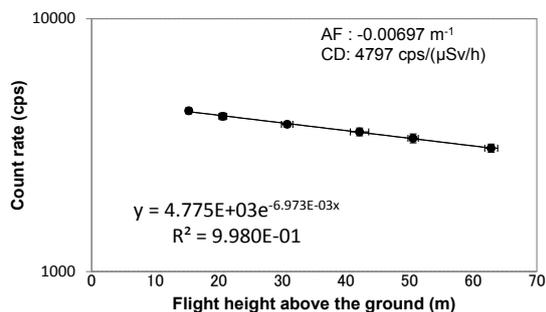


Fig. A-110 2012/02/08 1 回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

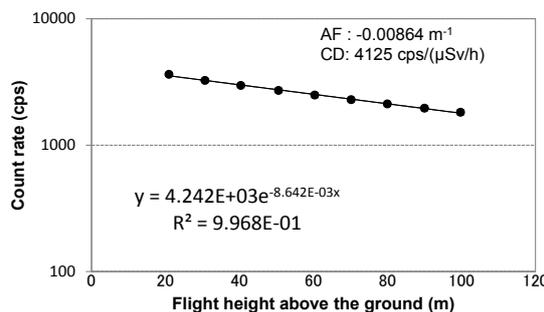


Fig. A-111 2012/02/08 2 回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

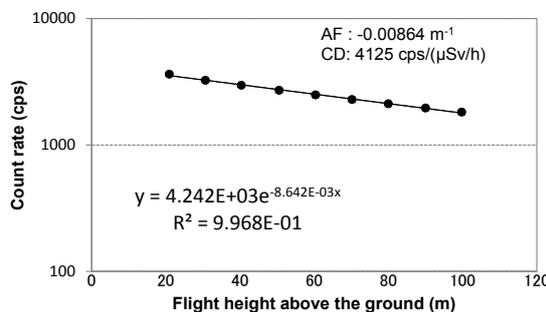


Fig. A-112 2012/02/09 1 回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

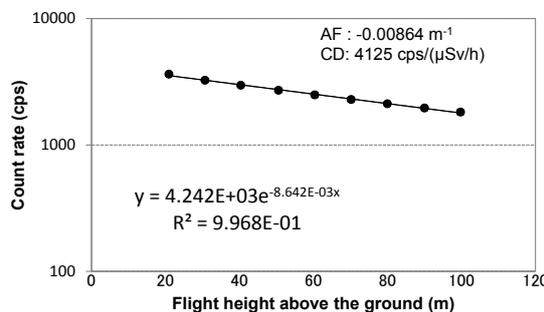


Fig. A-113 2012/02/09 2 回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

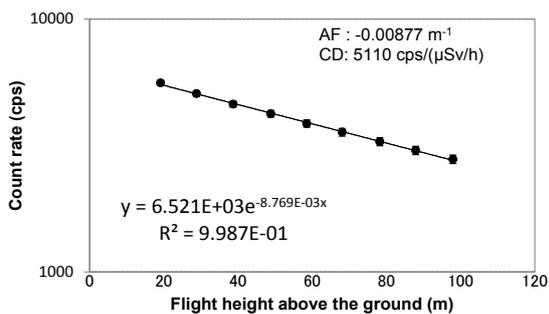


Fig. A-114 2012/02/10 1 回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

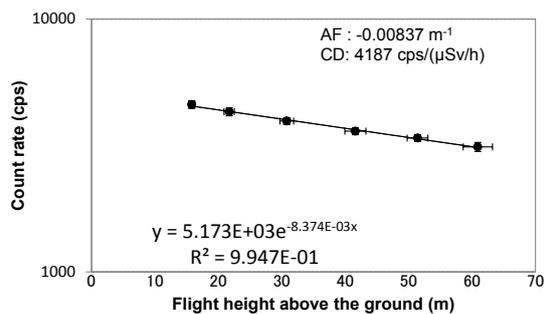


Fig. A-115 2012/02/10 2 回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

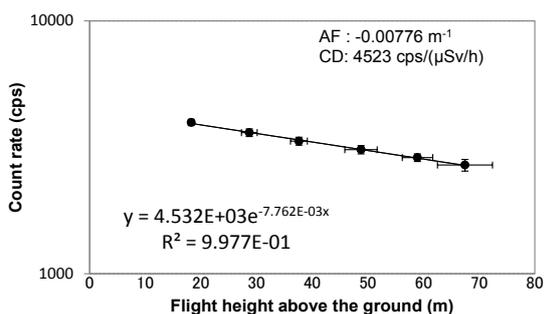


Fig. A-116 2012/02/21 測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

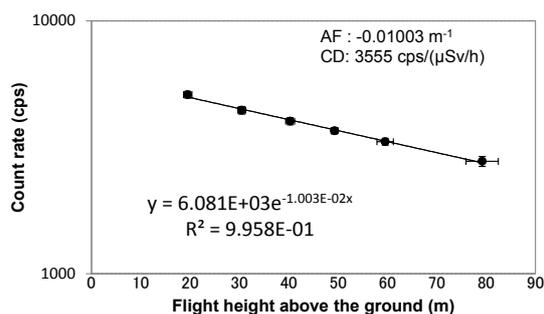


Fig. A-117 2012/02/26 測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

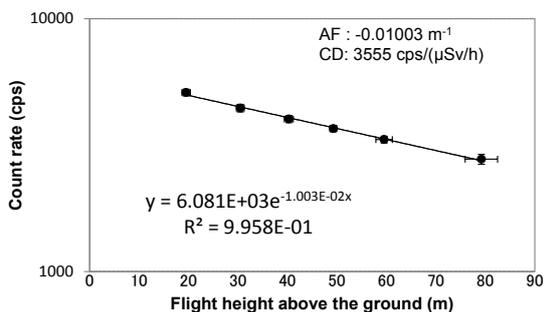


Fig. A-118 2012/02/27 測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

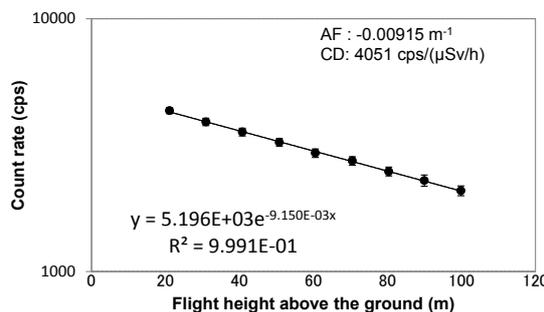


Fig. A-119 2012/03/03 1 回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

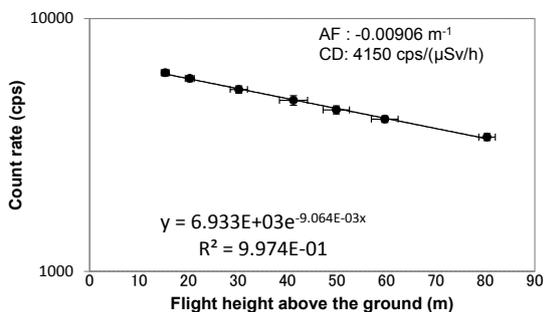


Fig. A-120 2012/03/03 2 回目測定 of 空気減弱係数 (警戒区域内の詳細モニタリング)

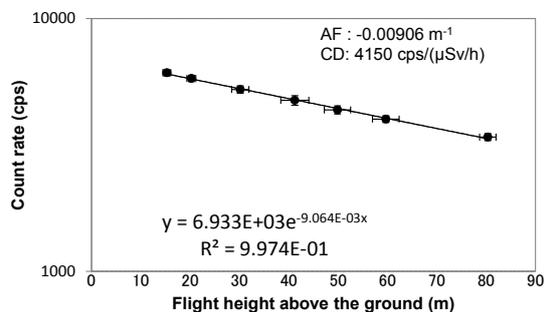


Fig. A-121 2012/02/21 2 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

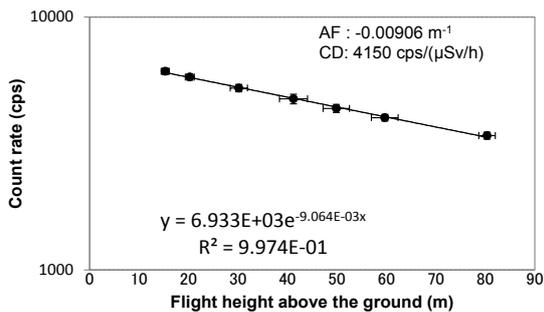


Fig. A-122 2012/02/21 3 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

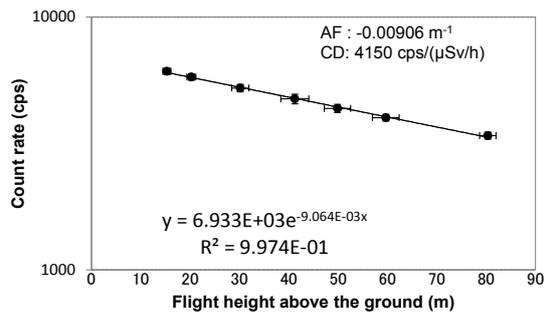


Fig. A-123 2012/02/22 1 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

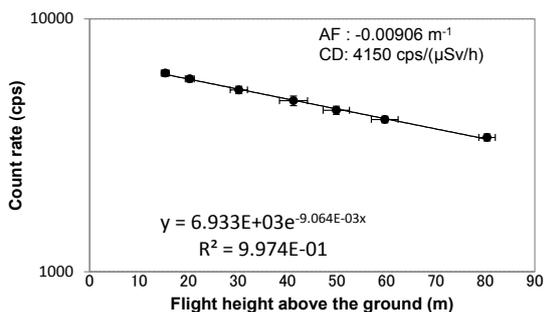


Fig. A-124 2012/02/22 2 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

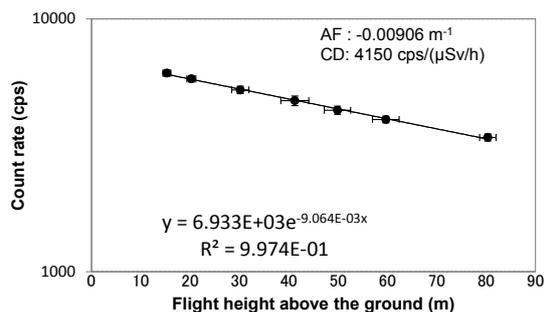


Fig. A-125 2012/02/24 1 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

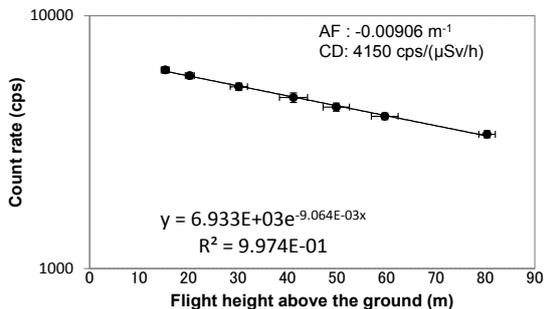


Fig. A-126 2012/02/24 2 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

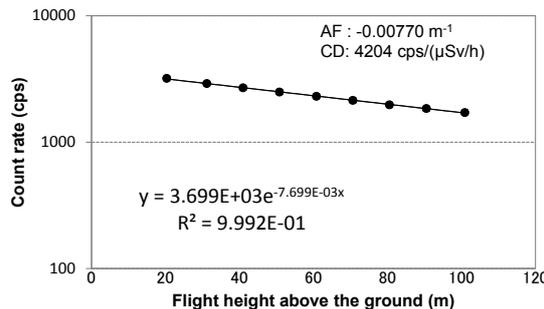


Fig. A-127 2012/02/26 2 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

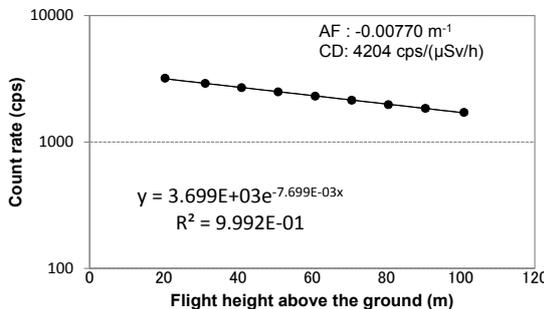


Fig. A-128 2012/02/26 3 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

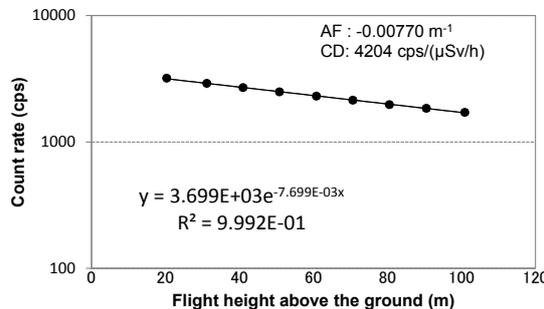


Fig. A-129 2012/02/26 4 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

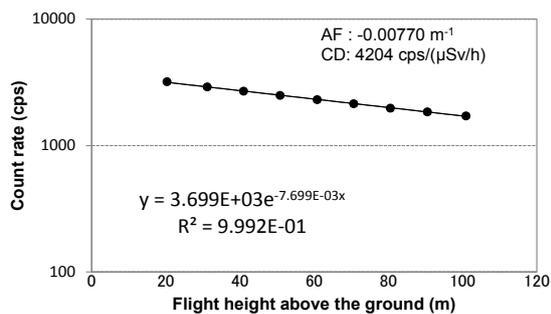


Fig. A-130 2012/02/27 2 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

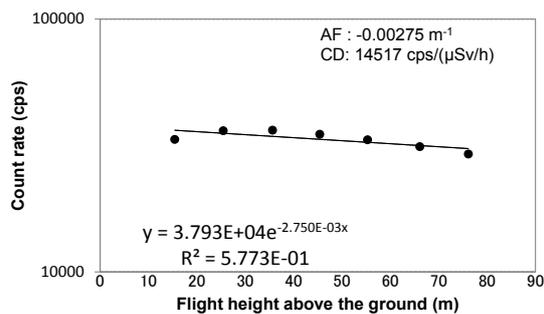


Fig. A-131 2012/02/28 1 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

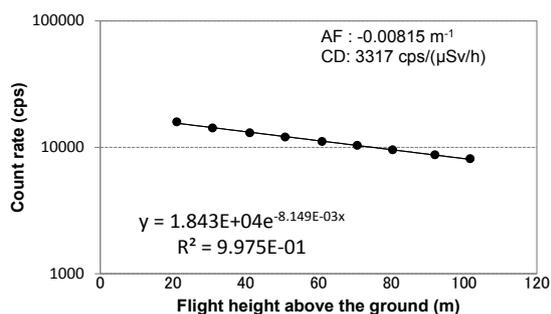


Fig. A-132 2012/02/28 2 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

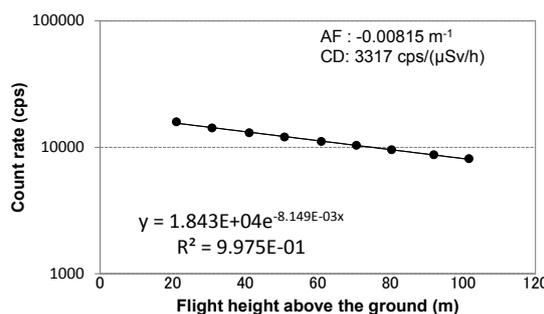


Fig. A-133 2012/03/01 1 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

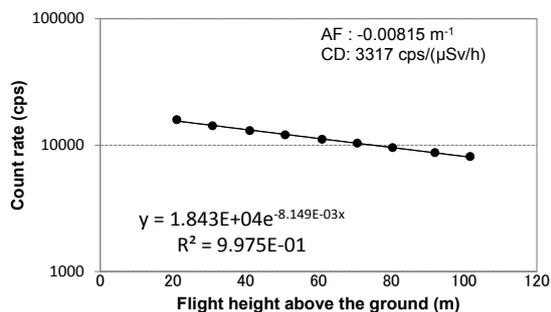


Fig. A-134 2012/03/01 2 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

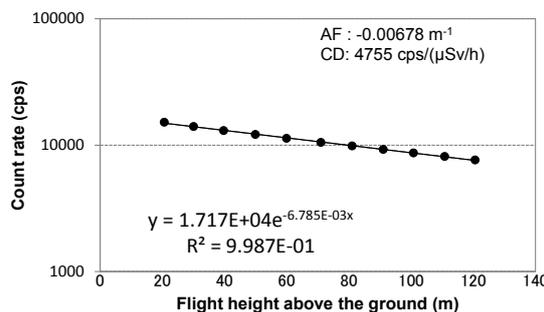


Fig. A-135 2012/03/01 3 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

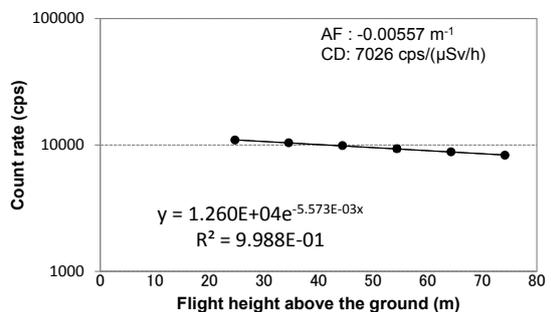


Fig. A-136 2012/03/01 4 回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

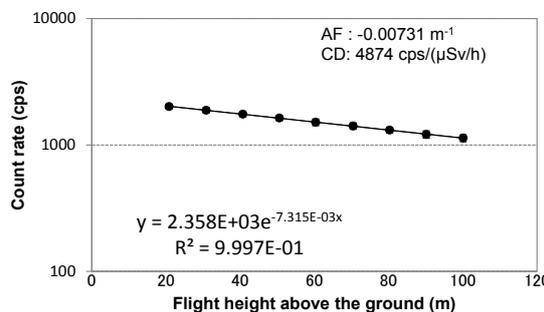


Fig. A-137 2012/03/02 測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

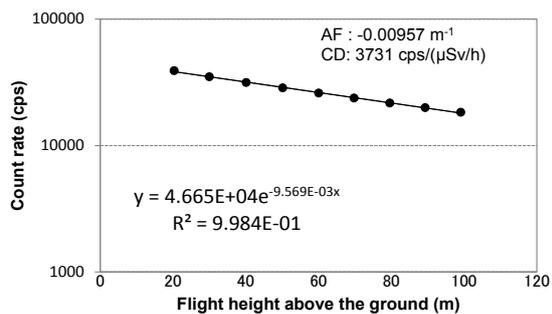


Fig. A-138 2012/03/04 測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

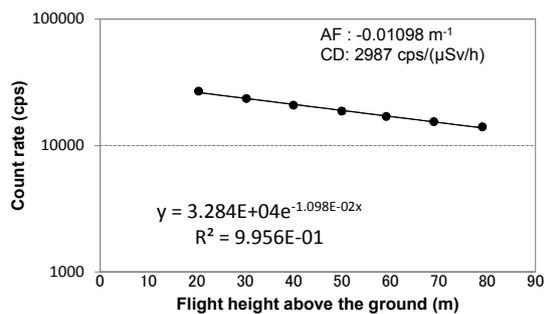


Fig. A-139 2012/03/13 測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

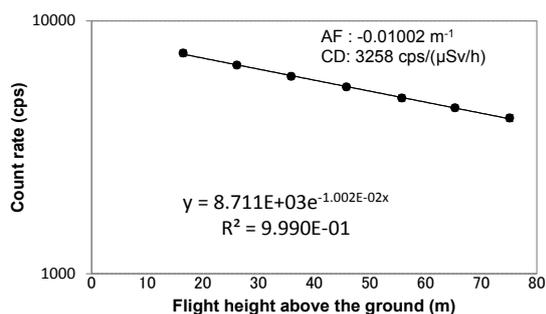


Fig. A-140 2012/03/14 1回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

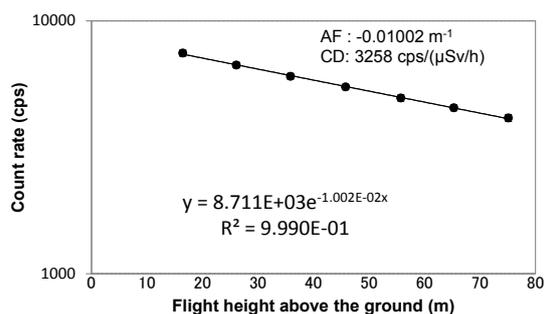


Fig. A-141 2012/03/14 2回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

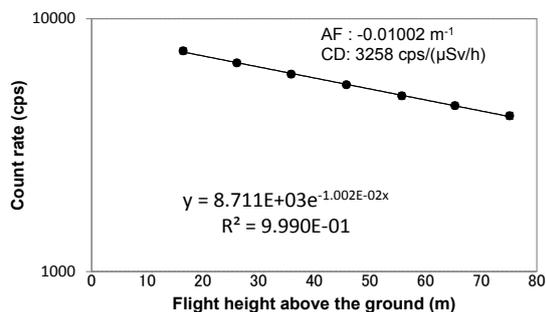


Fig. A-142 2012/03/14 3回目測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

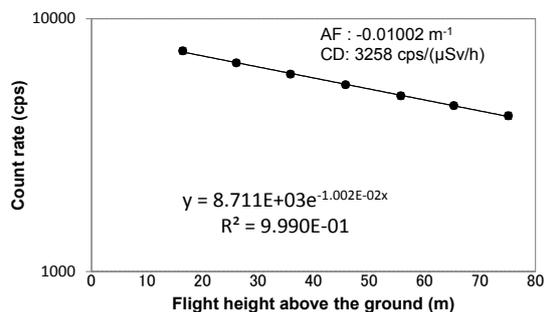


Fig. A-143 2012/03/15 測定 of 空気減弱係数 (除染前後のモニタリング)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

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

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI 接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

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

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

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

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

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

