

## 前書き

この文書は下に示す論文の、私、黒川 眞一、による日本語訳である。原論文の日本語訳を作成することは、論文名と著者を明らかにし、どの論文誌のどの号のどのページに掲載されたかを明示するという条件を満たせば許される行為である。翻訳は昨年7月に行い、少人数のグループ内の議論の参考資料としたものである。今回広く公開してみてもいいという意見をいただいたので、読み直しを行い手直ししたものを日本語訳 version 3 として公開する。

なお、この日本語訳の文責は私、黒川 眞一、にある。質問やコメントは

[shinichi.kurokawa@gmail.com](mailto:shinichi.kurokawa@gmail.com)

に連絡してほしい。

2018 年 12 月 9 日

## 論文題目

Individual external dose monitoring of all citizens of Date City by passive dosimeter 5 to 51 months after the Fukushima NPP accident (series): II. Prediction of lifetime additional effective dose and evaluating the effect of decontamination on individual dose

## 著者

Makoto Miyazaki and Ryugo Hayano

## 掲載論文誌

J. Radiol.Prot. 37(2017)623-634

<http://doi.org/10.1088/1361-6498/aa6094>

## パッシブな線量計による福島原発事故後 5 か月から 51 か月の期間における伊達市民全員の個人外部被曝線量モニタリング: 2. 生涯にわたる追加実効線量の予測および個人線量にたいする除染の効果の検証

宮崎真 福島県立医科大学放射線管理学部

早野龍五 東京大学理学部物理学科

### 要約

この論文シリーズの第一論文において、私たちは、福島第一原発事故後、個人線量と周辺線量の比  $c$  は福島県伊達市において時間の経過によって変化しないことを示した。この第二論文は、継続的なガラスバッジ・モニタリングのデータを用い、航空機を用いた線量調査によって得られた周辺線量減衰関数を外挿することにより、伊達市の居住者の生涯にわたる被曝線量を評価することを目的としている。私たちの得た結果は、伊達市の居住者の生涯にわたる追加外部被曝線量の平均値は  $18 \text{ mSv}$  を超えることはないというものである。さらに、除染には個人線量低減効果があるとは明確にいえないという結果も得ている。個人線量と周辺線量を組み合わせて用いる私たちの方法は、放射能汚染地域に住み続ける人々の生涯被曝線量を十分な確度をもって予測することができるものである。

### 1. イントロダクション

このシリーズの第一論文において[1]、私たちは福島県伊達市の市民によって福島第一原発事故の 5 か月から 51 か月後までの期間に用いられたガラスバッジ個人線量計の測定値を解析した結果、次のような結論をえた。

- (1) 個人線量計によって得られた個人線量値と、同時期に行われた航空機によるモニタリング調査[2]によって得られたガラスバッジ装着者の住居の周辺線量 ([1]で定義されたグリッド線量のこと) は比例し、その比例係数は  $0.15$  である。
- (2) 得られた係数  $0.15$  は 2011 年 11 月 (第 4 次の航空機によるサーベイ) から 2014 年 11 月 (第 9 次サーベイ) の間に時間変化はみられなかった。
- (3) 環境省によって定められた変換係数である  $0.6$  [3] は実際の測定によって求められた係数  $0.15$  より約 4 倍大きい。

結論(2)は周辺線量率と個人線量率は同じように減少していくことを示唆している。これからさらにいえることは、汚染された地域に住み続ける住民の生涯線量が航空機による調査で得られた周辺線量から推定できるということである。

伊達市のガラスバッジ測定に基づく二番目の論文である本論文では私たちは航空機による

モニタリング・データに基づき周辺線量の時間変化を示す関数  $f(t)$  をまず求める。続いて周辺線量率の時間積分である

$$F(t) = \int^t f(\tau) d\tau$$

を福島第一原発事故後 5 から 51 か月の間に測定された累積追加線量と比較する。そして、 $F(t)$ を用いることで、生涯にわたる追加線量の評価値を求める。

これに加えて、私たちは、この研究があつまっている全期間の間、特定の除染地域に住み続け、ガラスバッジを使い続けてきた住民の個人線量に除染が及ぼす効果を調べた。その上で、長期にわたる累積線量の低減に除染が有効であるかについて議論することにする。

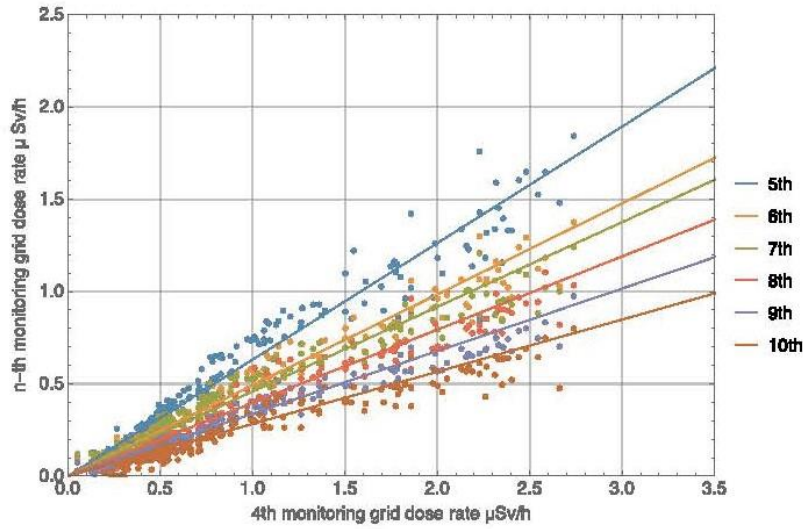
この論文はこれらの二つの研究に関するものであり、汚染地域に住む住民の長期にわたる累積外部被曝線量を高い信頼度で予測する方法を確立することを目指すものである。

## 2. 材料と方法

### 2.1. 周辺線量の時間変化についてのモデル化

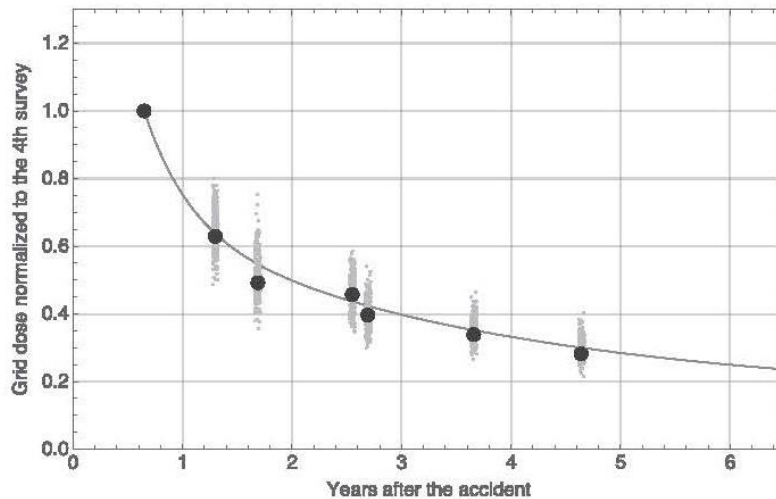
日本政府は定期的に福島第一原発事故からの放射能の影響を受けた地域を 300 m の高度を飛ぶ航空機によってモニターしてきており[2]、測定で得た値を地上 1 m の周辺線量  $H^*_{10}$  に変換してきた。250 m ごとにあるグリッドにおける平均値はマップと数値データとして発表されてきた[4]。空からの調査は 2011 年 4 月に始められ、最新のものは 2015 年 11 月に行われた第 10 次の調査である。前論文[1]では私たちは、2011 年 9 月から 2014Q3 までのガラスバッジ測定と時期が重なる第 4 次から 9 次までの航空機によるモニタリング調査のデータを用いた。航空機によるモニタリングによって得られた周辺線量から追加被曝線量率を求めるときには、環境省によって採用された自然放射線線量率に対応する  $0.04 \mu\text{Sv h}^{-1}$  を差し引いていることに注意してほしい。

伊達市における周辺線量の時間変化を知るために、私たちはまず各グリッド点について、バックグラウンドを差し引いた第 5 次から 10 次までの航空機による調査によって求められた周辺線量率を、第 4 次の周辺線量率で割った値を表にまとめた。その結果を図 1 に示す。図に示されているように、 $n$  次と 4 次の測定のあいだにはよい比例関係が存在する。そこで私たちは図 1 に示されているように第 5 次から 10 次までの調査データを直線でフィットした。各直線の傾きが第 4 次と比べたときの周辺線量率の平均的な減衰を示しており、これらを図 2 に、横軸を事故からの年数として、丸で示してある



**Figure 1.** The ambient-dose rates of 5th (blue) to 10th (brown) airborne monitoring surveys (ordinate) are plotted for each grid point in Date City, versus those of the fourth monitoring survey (abscissa). The six straight lines fitted through each of the 5th to 10th survey points are drawn in the corresponding colours.

図1 伊達市における第5次(青)から第10次(茶)の航空機モニタリング調査の各グリッド点の周辺線量率(縦軸)を第4次の調査のグリッド線量率(横軸)に対して示す。第5次から10次まで調査をフィットした6本の直線を色を変えて示してある。



**Figure 2.** The ratios of the  $n$ th ( $n = 5$  to 10) grid dose to the 4th grid dose are plotted as a function of elapsed time since the accident. In order to help alleviate overlaps of points, the data were horizontally jittered, and the average ratios are shown in filled circles. The curve is a fit to equation (1) through all the data points, the best fit parameters being  $a_{\text{fast}} = 0.68 \pm 0.01$  and  $T_{\text{fast}} = 0.32 \pm 0.01$  y.

図2 第n次(n=5から10)のグリッド線量の第4次のグリッド線量の比が事故後に経過した時間の関数としてプロットしてある。点が重なり合うのをさけるため、データは水平方向に少しずらしたところがある。比の平均は黒い丸で示している。曲線はすべての点を式(1)にベスト・フィットしたものであり、パラメータは  $a_{\text{fast}}=0.68\pm0.01$ ,  $T_{\text{fast}}=0.32\pm0.01$  y となる。

次に、周辺線量率の時間依存性を、これまでに行われた研究[5,6]から分かっている次のような関数でモデル化した。この関数はCs-134とCs-137の半減期( $T_{134}=2.06$ y,  $T_{137}=30.17$ y)、早い風化半減期と遅い風化半減期( $T_{\text{fast}}$ と $T_{\text{slow}}$ )そして早い風化減衰の割合( $a_{\text{fast}}$ )というパラメータを持つ。

$$f(t) = \frac{H_{10}^*(t)}{H_{10}^*(0.65)} = \{a_{\text{fast}}2^{-t/T_{\text{fast}}} + (1 - a_{\text{fast}})2^{-t/T_{\text{slow}}}\} \cdot \frac{(k \times 2^{-t/T_{134}} + 2^{-t/T_{137}})}{k + 1}, \quad (1)$$

ここで  $H_{10}^*(0.65)$ はこの関数が  $t=0.65$  年に相当する第4次航空機サーベイによってノーマライズされていることを示す。また係数  $k$ は次のようにして求められた：伊達市における放射能汚染は主として福島第一原発の2号炉から2011年3月15日に放出された放射性物質による[7]。福島第一原発の各炉中の放射能についての解析は2012年にJAEAから発表されており[8]、炉の停止時点において2号炉には  $2.76 \times 10^8 \text{Bq} (^{134}\text{Cs})$ と  $2.55 \times 10^8 \text{Bq} (^{137}\text{Cs})$ の放射能があった。kBqm<sup>-2</sup>あたりのカーマレート換算率  $4.86(^{134}\text{Cs})$ および  $1.72(^{137}\text{Cs})\text{nGyh}^{-1}$  [9] から係数  $k$ は  $k=2.95$  となる。

## 2.2 追加生涯線量の評価

伊達市はガラスバッジによる個人線量の測定を2011年8月に始めた。そのときは、妊婦および15歳以下の子どもが対象であり、期間はひと月であった。2011年9月から、測定期間は3か月(1クォーター)に延長された。測定はこの論文の執筆中も継続されている(文献[1]の表1参照のこと)。線量計の供給元である千代田テクノルは事故後の自然放射線の寄与によるバックグラウンドを福島全域で  $0.54 \text{ mSvy}^{-1}$  としている。この値は茨城県の大洗で得られたものであり、伊達市などの関係市町村に千代田テクノルが追加外部被曝線量を報告するときには、ガラスバッジの読み値からこの値が差し引かれている[10]。

この論文においては、私たちは対象者として、ガラスバッジを2011年のQ3から2015年Q1(2011年9月から2015年6月まで)まで継続して用いていた人々を選んだ。なぜならば、このような選択により、上記の期間における累積個人線量を直接的に知ることができるからである。このようにして選択された対象者の数は区域Aで  $n=476$ 、区域Bで  $n=693$ 、

そして区域 C では  $n=3280$  である（区域分けについては 2.3 節を参照してほしい）。ガラスバッジによる測定が開始される前の事故後の最初の 4 か月の追加線量は  $1.4 \text{ mSv}$  と仮定した。この値は福島県北部地方の住人に対して評価された外部被曝線量の平均値であり、福島健康管理調査の基本調査として発表されている[11]。

累積個人線量  $H_p(t)$  は次のような関数である、

$$H_p^i(t) = \int_{t_1}^t (\dot{H}_{10}^{*i}(0.65) \times c^i \times f(\tau)) d\tau + I, \quad (2)$$

ここで  $f(\tau)$  は式(1)で求められた周辺線量率減衰関数であり、 $i$  は各区域 A,B,C である。第 4 次航空機モニタリングのときの平均周辺線量率は  $\dot{H}_{10}^{*A}(0.65)=2.1 \text{ } \mu\text{Svh}^{-1}$ 、 $\dot{H}_{10}^{*B}(0.65)=1.4 \text{ } \mu\text{Svh}^{-1}$ 、そして  $\dot{H}_{10}^{*C}(0.65)=0.8 \text{ } \mu\text{Svh}^{-1}$  であり、 $c$  は地域  $i$  の換算係数（下をみてほしい）であり、 $t_1=0.39$  はガラスバッジサーベイの開始時(2011 年 8 月 1 日)である。そして  $I$  は事故後の最初の 4 か月の平均外部被曝線量である(上をみてほしい)。

換算計数  $c$  は

$$\langle c \rangle \equiv \left\langle \frac{\text{individual dose rate}}{\text{grid dose rate}} \right\rangle, \quad (3)$$

であり、前論文で  $c=0.15 \pm 0.03$  と計算されおり[1]、全てのガラスバッジによるサーベイの参加者の平均値である。現在の研究においては、私たちは  $c$  を継続的にガラスバッジを使用した人々に対し各地域ごとに再計算した。その結果は： $c^A=0.10$ 、 $c^B=0.12$ 、 $c^C=0.15$  である。

最後に、平均的な生涯追加外部被曝線量を求めるために関数  $H_p(t)$  が  $t=70\text{y}$  まで外挿された。

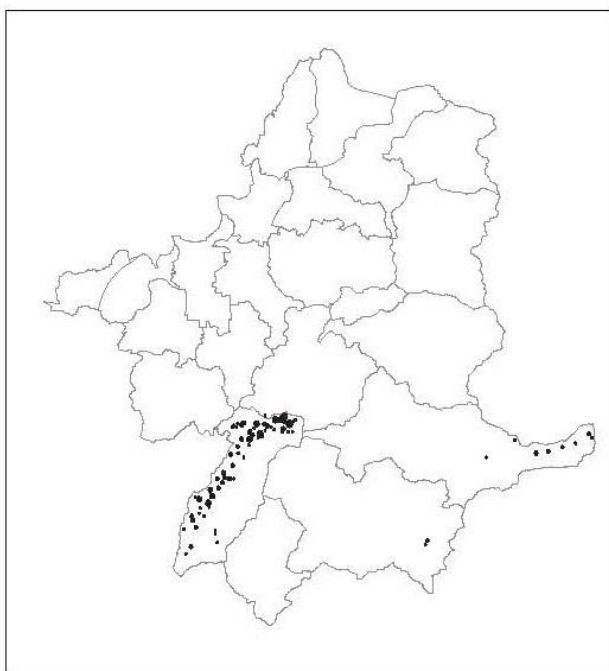
### 2.3. 伊達市の各地域間での除染方法の違い

伊達市は、2011 年 10 月に発表された除染計画（第一版）に記述されているように、表土の除去などについて除染のパイオニアである[12]。2012 年 8 月に発表された第 2 版では、伊達市は市域を次のような 3 つの区域に分割することにした。すなわち区域 A ( $> 3.5 \text{ } \mu\text{Svh}^{-1}$ )、区域 B ( $1 \text{ } \mu\text{Svh}^{-1}$  から  $3.5 \text{ } \mu\text{Svh}^{-1}$ )、そして区域 C ( $< 1 \text{ } \mu\text{Svh}^{-1}$ )である。このような区域分けは主として除染方法の確立と除染のプライオリティの設定のためのものであり、また、除染

を適切かつ迅速に行うためであった。実行計画によれば、区域 A では宅地と宅地境界から 20m までの森林を除染し、区域 B では宅地のみを除染し、区域 C ではホットスポットのみを除染することになっている。区域 A の除染方法は環境省が発行した除染ガイドライン[14]に記載されているものと同じである。伊達市の実行計画に基づく宅地の除染は 2014 年 3 月に完了した。

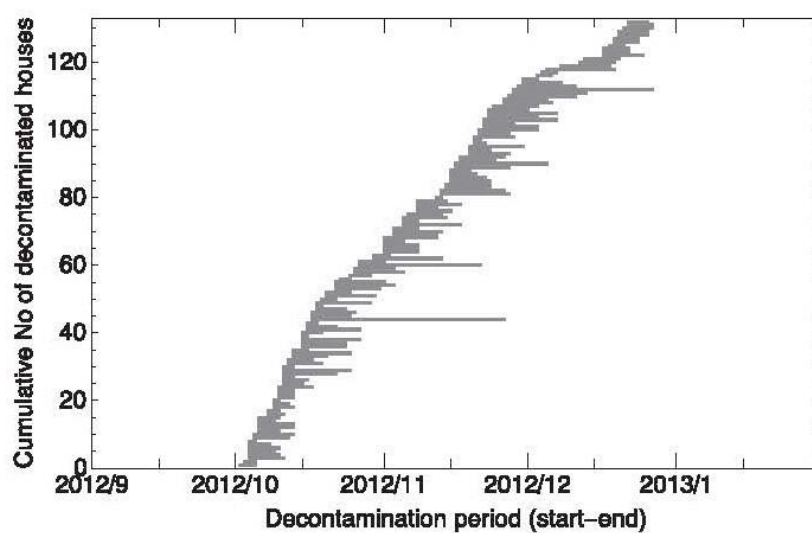
#### 2.4. 個人線量に対する除染の効果の評価

伊達市が採用した除染方法は区域ごとに異なるので、個人線量に対する除染の効果をただしく評価するためには、(除染の方法が共通である) 単一の区域を選び出し、また、自宅が除染される間継続してガラスバッジを使用していた対象者を選び出す必要がある。私たちは区域 A の除染された 1700 世帯に着目し、その中ですべての家族メンバーが 2011Q3 から 2014Q1 (2011 年 9 月から 2014 年 6 月) の期間継続してガラスバッジを携帯しており、さらに除染が 2012Q3 (2012 年 10 月から 2012 年 12 月) に行われた対象者を選び出した。このことによって、対象者は 132 世帯 425 人に絞られることになった。対象者のガラスバッジのデータと GIS 情報は伊達市により匿名化されたのちに著者に渡された。図 3 と図 4 はそれぞれ 132 世帯のおおまかな位置と除染が行われた期間を示している。選択された対象者のこの期間のガラスバッジの測定値と、除染のガラスバッジの測定値に対する効果が評価された。



**Figure 3.** The geographical distribution of 132 houses in zone A of Date City, for which the decontamination work took place in Q3 of 2013 (October to December, 2013).

図3 除染が2013年のQ3(2013年10月から12月)に行われた伊達市の区域Aの132世帯の地理的位置。



**Figure 4.** The start and end of the decontamination work of the 132 houses are indicated by horizontal bars.

図4 132世帯の除染の開始と終了が水平の線分で示されている。

### 3. 結果

#### 3.1. 周辺線量の時間変化

モデルとなる式(1)を第4次の航空機による調査に対する第5次から10次までの調査によって測定された周辺線量率(図2の塗りつぶされた丸)にフィットすることで、式(1)のパラメータが次のように決まる。すなわち、 $a_{\text{fast}}=0.68\pm0.01$ ,  $T_{\text{fast}}=0.32\pm0.01$  y,  $T_{\text{slow}}>700$  y(それゆえ、遅い風化半減期は私たちの目的に対しては無視してよい)。図2の線はベスト・フィット曲線である。

#### 3.2. 追加生涯線量の評価

図5-1、-2、および-3はそれぞれ伊達市の区域A、B、Cの住人で継続的にガラスバッジを携帯していた人の累積個人被曝線量の箱ひげ図である。黒丸は外れ値(>99パーセンタイル)である。

各累積線量分布の図に、各地域のグリッド線量率  $H_p(t)$  ( $i=A,B,C$ ) から評価された個人線量を積分したものが黒い実線として重ねあわされている。薄い実線で示されているものは、式(2)の係数  $c$  の1パーセンタイルと99パーセンタイルを求めることで評価された1パーセンタイルと99パーセンタイルの曲線である。測定された個人線量率を積分した曲線とグリッド線量率から評価された個人線量はすべての地域で50パーセンタイルと99パーセンタイルでよく一致している。

$H_p(t)$  を  $t=70$  y に外挿し(そして見積もられた最初の4か月の外部被曝線量を加えることによって)私たちは各区域の生涯追加線量を評価した。区域Aにおける累積線量の中央値(と99パーセンタイル値)は18 mSv(35 mSv)、区域Bでは15 mSv(28 mSv)、そして区域C地域は11 mSv(20 mSv)である。図5(a)、5(b)、5(c)では、累積線量の中央値は破線で示されている。

#### 3.3. 個人線量に対する除染の影響の評価

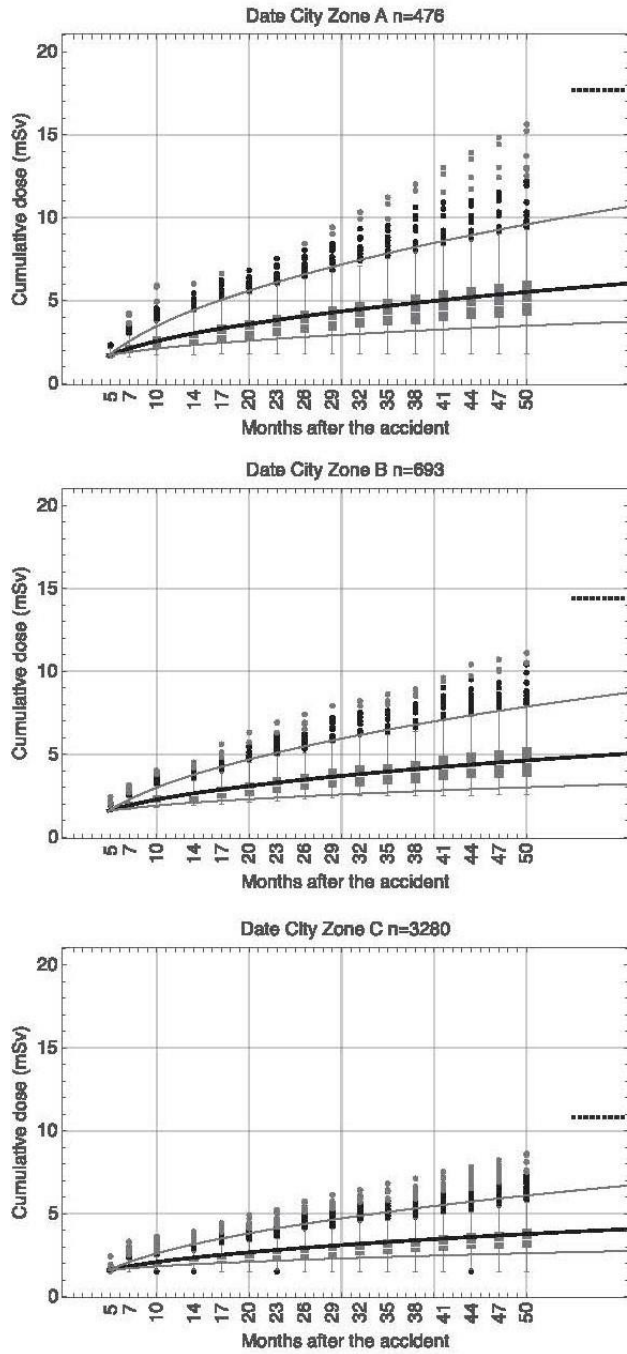
区域Aの425人の2011Q3から2014Q1の間の時間あたりの線量  $\mu\text{Svh}^{-1}$  に換算された個人線量の箱ひげ図を図6として示す。

関数  $f(t)$  のベストフィット曲線に第4次航空機モニタリングの周辺線量の平均値( $H_{10}^*A(0.65)=2.1 \mu\text{Svh}^{-1}$ )と地域Aの周辺線量と個人線量の比を表す係数( $c^A=0.1$ )を乗じたものがプロットに重ねてある。また、除染の時期(2012Q3)は矢印で示されている。図7

では、 $H_p^A(t)$  が図 6 の累積個人線量分布に重ね合わせられている。図に示すように、累積線量に対する除染の効果は明瞭でない。対象者の 3 か月あたりの個人線量の中央値は 2011Q3 の 0.8 mSv から 2013Q3 の 0.3 mSv にほぼ 2 年間で 62% の減少を示している。これに対して、伊達市における第 7 次航空機モニタリング調査(2013 年 10 月)は第 4 次(2011 年 11 月) の値と比較すると図 2 に示すように 60% の減少となる。個人線量と航空機によって測定された線量の減少率はほとんど変わらない。

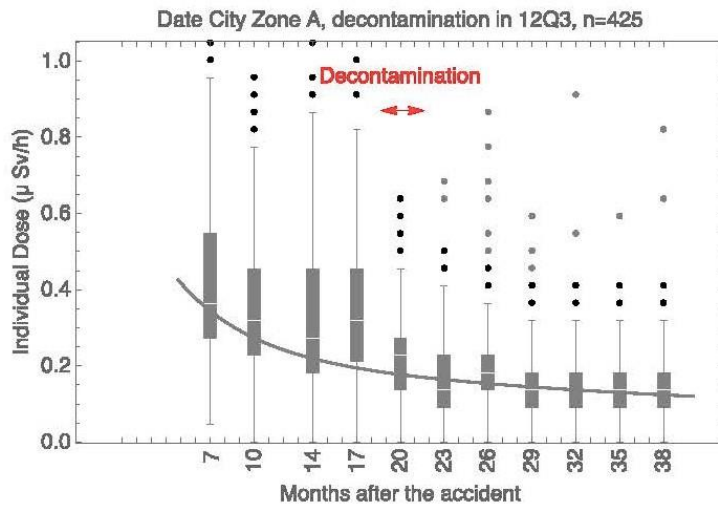
#### 4. 議論

この研究はいくつかのユニークな特徴を持つ。まず、汚染が長期間にわたるエリアの住民の継続的な、参加人数が大きいモニタリングの記録がほかには存在せず、比較可能な個人線量データがない。例えば、チェルノブイリ事故の後では外部被曝線量は個人線量計によるのではなく、周辺線量率にもとづいて評価されてきた[15]。それゆえ、汚染地域に住む人々にとって重要な情報である生涯累積線量は測定された個人線量から求められたものではなかった。



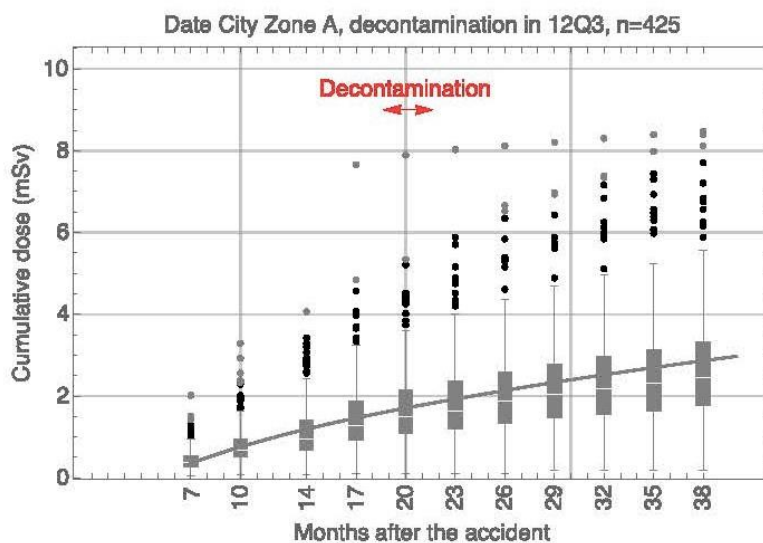
**Figure 5.** Box-and-whisker plots of the cumulative individual doses of Date City residents (figure 5-1) is for zone A, 5-2 is for zone B and 5-3 is for zone C, who continuously held glass badges during the study period. The boxes cover 25-percentile to 75-percentile of the distribution, and the whiskers cover the 1-percentile to 99-percentile of the distribution. The dots represent outliers. The dark solid curve is the estimated median  $H_p(t)$  (equation (2)), while upper and lower light curves correspond to the 1- and 99-percentile estimates, respectively. The dotted line along the right vertical axis of the graph represents the estimated median lifetime doses (up to 70 years) from external exposure pathways, 18 mSv for zone A, 15 mSv for zone B, and 11 mSv for zone C.

図5 伊達市の区域 A で継続してガラスバッジを携帯していた住民の累積個人線量を箱ひげ図で示す（図 5-1）。図 5-2 は区域 B、5-3 は区域 C に対応する。箱は分布の 25 パーセントイルと 75 パーセントイルをふくみ、ひげは 1 パーセントイルと 99 パーセントイルをふくむ。ドットは外れ値である。濃い実線は式 (2) の  $H_p(t)$  の中央値の評価値であり、上下の薄い線はそれぞれ 99 パーセントイルと 1 パーセントイルの評価値である。グラフの右端の軸に沿った点線は外部被曝による生涯線量(70 年)の中央値の評価値であり、区域 A では 18 mSv、区域 B では 15 mSv、区域 C では 11 mSv である。



**Figure 6.** A box-and-whisker plot of the distribution of individual doses of 425 people who lived in zone A, whose houses were decontaminated during Q3 of 2012 (indicated by an red arrow); the measured value of the glass badge for 3 months is converted to the dose rate per hour. The superimposed curve,  $\dot{H}_p(t)$  was calculated for zone A using the median grid dose  $\dot{H}_{10}^{iA}$  (0.65) and the coefficient  $c^A$ , and hence contains no adjustable parameters. As shown, the median values of individual doses are in good agreement with the reduction curve, except for that of 2012 Q2 (17 months); the reason for this deviation was not clear from the data used for the present analysis.

図6 自宅の除染が2012年Q3（赤い矢印で示されている）に行われた区域Aに住む425人の個人線量の箱ひげ図；ガラスバッジの3か月間の測定は時間あたりの線量率に変換されている。曲線  $H_p(t)$  はグリッド線量  $H_{10}^{iA}(0.65)$  と係数  $c^A$  だけから求められており、調整可能な他のパラメータはない。この図にしめすように、個人線量の中央値は2012Q2(17月)を除けば曲線とよく合っている。不一致の理由はこの解析に用いられたデータからはよくわからない。



**Figure 7.** The glass-badge data and the reduction curve shown in figure 6 are converted to cumulative dose distributions and  $H_p^A(t)$ , respectively. The  $H_p^A(t)$  curve is the same as was used in figure 5(1). In this cumulative distribution, the deviation observed for 2012 Q2 in figure 5 is no longer dominant.

図7 図6のガラスバッジ線量と曲線が累積線量と  $H_p^A(t)$ に変換されている。 $H_p^A(t)$ を示す曲線は図5(1)と同じものである。この累積分布では図5の2012Q2のはずれは観測されない。

福島第一原発事故の後に福島県で行われた除染の規模もこれまでになかった規模であった。これは、大きな人口を持つ集団における除染による個人線量の減少の有効性について福島と比較できる定量的なデータが存在していなかったことを意味している。日本においても、福島第一原発事故の後、除染前後の周辺線量率の変化を敷地の周辺のいくつかの点でサーベイメータで測定することによって、除染による線量の低減のぐあいが評価されてきた。しかし、住民の個人線量に対する除染の効果の評価は回顧的か、希望的観測でなされてきたのである。

幸運なことに、福島第一原発事故の事故後の最初の4か月を除いて、個人線量は福島県の多くの市町村で継続的に記録されてきた。ただし、ほとんどの市や町や村では、個人線量測定は限定されたグループと時期にのみ行われてきた。伊達市は2011年8月から学童と比較的高線量の地域の住民に対する個人線量測定を始め、数万人の市民の測定をとぎれることなく行ってきた貴重な例外である。このような大きな人口に対する個人線量測定、対象者が居住する地域における大規模な除染、そして除染前後の空から調査データが使えることが、私たちの研究を可能にした。

私たちは、このシリーズの最初の論文で[1]伊達市におけるガラスバッジで測定された個人線量と航空機によるモニタリングから求められた住居の周辺線量率の相関は時間の経過では変化しないことを報告した。この結論に基づいて、この論文では、私たちは生涯にわたる累積線量を、継続してガラスバッジを携帯してきた伊達市の住民の個人線量を式(2)を用いて外挿することで評価した。伊達市で最も汚染された地域である区域 A に住み続けた住民（この人々は福島第一原発事故後最も高い線量を浴びた人々でもあるが）の外部被曝による生涯累積線量の中央値は 18 mSv と評価された。ICRP は現存被曝状況において、年あたり 1-20 mSv を許容範囲として採用している[16]。この研究は伊達市の住民の福島第一原発事故による追加生涯線量の中央値が 20 mSv を超えることがないことを示している。

チェルノブイリ事故においては、ロシア、白ロシア、そしてウクライナの住民は生涯線量（最長事故後 70 年）の 1/4 を事故後の最初の 1 年間に受けたと評価されている[15]。伊達市民の事故後の最初の一年間の累積線量は生涯線量の $\sim 1/6$ と評価されている。

2011 年 8 月に、日本の内閣府は、一般公衆の被曝線量を 2011 年 8 月末から 2013 年 8 月末までの 2 年間の間に（物理的な核崩壊による減少と風化による減少分も合わせて）50%削減することを目標として除染の基本方針を策定した。環境省（MoE、除染の責任官庁）は 2015 年 3 月に報告書を発表し、ガイドラインに従って除染されたエリアでは、サーベイメータによる測定から評価された追加外部線量は、2 年間に 62%の減少しており、そのうちの除染の寄与は 22%であり核崩壊と風化によるものは 40%であるとしている。伊達市においては、2011 年 10 月から 2013 年 10 月までのグリッド線量率の（航空機による調査によって測定した）低減率は 60%であり、（ガラスバッジによる）個人線量の低減率は区域 A において同じ時期で 62%であり、MoE の報告書に示されて結果と同様である。

しかしながら、伊達市における周辺線量率の 60%の低減は核崩壊と風化によるものだけであると説明することもできる。それに加え、伊達市における個人線量と周辺線量のあいだの比較においては、政府のガイドラインに従って除染を行った区域 A の住人の除染による個人線量量の 22%の低減を、私たちの研究では確認することができなかった。著者たちは伊達市において除染の効果がみえない理由は、MoE 報告書の結果ことなる次のような理由によるものであると信ずる。

1. 実際に除染された面積の航空機モニタリングがカバーしてる面積に対する割合が小さい。そこで、除染はグリッド線量率を小さくすることがほぼできない。
2. 住民はすべての時間を除染された居住エリアにいつも滞在するわけではない、そして
3. MoE 報告書の中の測定は宅地の中の屋外の地点で行われており、屋内の線量に対する

除染の効果を反映していない。

この研究が利用できた情報によっては、しかしながら、個々の住民の行動パターンや、個々の線量計の保管状態について評価することはできない。そのため、なぜ除染の効果が個人線量に反映されないのかの理由をこれ以上探索することはむずかしい。他に比較できるデータがないので、このようなことが他のエリアでも起こりうるか이나かを決定することはできない。しかしながら、伊達市の区域 A の住民は公衆におけるもっとも大きな外部線量を浴びた人々であり、除染が比較的早い時期に行われたことから、除染の効果があればもっともはっきりとその効果がみえるはずである。著者たちは、伊達市の区域 A のこのような状況は、他のエリアのケースを代表するものであると信ずる。

## 5. 結論

この論文において、私たちは航空機によるサーベイによって得られた周辺線量率の低減関数は伊達市のすべての地域で等しく適用できることをしめた。周辺線量の大きさ、除染方法の違い、そして除染が行われたかいかにかかわらず、低減関数は伊達市全域で同一であった。これらの結果に基づき、測定された個人線量から、周辺線量低減関数を用いて外挿することで生涯追加線量を実際的に評価することができた。個人線量と周辺線量を結合するこのような方法を確立するためには、大規模な長期にわたる伊達市のガラスバッジデータの存在がなくてはならないものであった。比例係数  $c=0.15$  が一般的に成り立つのでなくとも、著者たちは、この方法は、将来、周辺線量と個人線量の比例係数  $c$  を求めることを目的とした小規模の個人線量モニタリング調査によって補強された、定期的な航空機によるモニタリング調査によって汚染地域に住む住民の生涯線量を信頼度高く評価することが可能であると信ずる。

## 謝辞

著者たちは千代田テクノル株式会社と放射線安全フォーラムの多田博士との有益な議論に感謝の意を表する。

## 倫理について

この研究は福島県立医科大学の倫理委員会の承認を得ている（承認番号 No.2603）

## 参考文献

### References

- [1] Miyazaki M and Hayano R 2016 Individual external dose monitoring of all citizens of Date City by passive dosimeter 5 to 51 months after the Fukushima NPP accident (series): I. Comparison of individual dose with ambient dose rate monitored by aircraft surveys *J. Radiol. Prot.* **37** 1–12
- [2] Sanada Y, Sugita T, Nishizawa Y, Kondo A and Torii T 2014 The aerial radiation monitoring in Japan after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident *Prog. Nucl. Sci. Technol.* **4** 7680
- [3] Safety assessment study committee and environmental recovery review meeting Joint Study Group (Ministry of the Environment meeting, Oct 10, 2011, in Japanese) [http://josen.env.go.jp/material/session/joint\\_001.html](http://josen.env.go.jp/material/session/joint_001.html)
- [4] Nuclear Regulation Authority. Airborne Monitoring Survey Results (including CSV files). <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/362/list-1.html> (Japanese)
- [5] Kinase S, Takahashi T, Sato S, Sakamoto R and Saito K 2014 Development of prediction models for radioactive caesium distribution within the 80-km radius of the Fukushima Daiichi nuclear power plant *Radiat. Prot. Dosim.* **160** 318–21
- [6] Gale H L, Humphreys D L O and Fisher E M R 1964 Weathering of caesium-137 in soil *Nature* **201** 257–61
- [7] Chino M, Terada H, Nagai H, Katata G, Mikami S, Torii T, Saito K and Nishizawa Y 2016 Utilization of  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  in the environment to identify the reactor units that caused atmospheric releases during the Fukushima Daiichi accident *Sci. Rep.* **6** 31376
- [8] Fuel Composition Evaluation of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: <http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-Code-2012-018.pdf>
- [9] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) *Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume 1. Annex A: Levels and Effects of Radiation Exposure due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Appendix C (Assessment of doses to the public), Attachment C-12* (New York: United Nations)
- [10] Nomura S, Tsubokura M, Hayano R, Furutani T, Yoneoka D, Kami M, Kanazawa Y and Oikawa T 2015 Comparison between direct measurements and modeled estimates of external radiation exposure among school children 18 to 30 months after the Fukushima nuclear accident in Japan *Environ. Sci. Technol.* **49** 1009–16
- [11] Ishikawa T *et al* 2015 The Fukushima Health Management Survey: estimation of external doses to residents in Fukushima Prefecture *Sci. Rep.* **5** 12712
- [12] Date City Decontamination Plan v1 (Japanese) <http://city.date.fukushima.jp/uploaded/attachment/1964.pdf>
- [13] Date City Decontamination Plan v2 (Japanese) <http://city.date.fukushima.jp/uploaded/attachment/1963.pdf>
- [14] Ministry of the Environment. Decontamination Guidelines II. Ed., 2013 (Tentative Translation) [http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/decontamination\\_guidelines\\_2nd.pdf](http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/decontamination_guidelines_2nd.pdf) (the first edition was published in December 2011)
- [15] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2000 *Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume 2. Annex J: Exposures and Effects of the Chernobyl Accident* (New York: United Nations)
- [16] ICRP Publication 103 2007 The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection Ann. ICRP **37** (2-4)
- [17] Ministry of the Environment. FY2014 Decontamination Report—A compilation of experiences to date on decontamination for the living environment conducted by the Ministry of the Environment—(Tentative Translation) [http://josen.env.go.jp/en/cooperation/pdf/decontamination\\_report1503\\_full.pdf](http://josen.env.go.jp/en/cooperation/pdf/decontamination_report1503_full.pdf)