

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

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): I. Comparison of individual dose with ambient dose rate monitored by aircraft surveys

著者

Makoto Miyazaki and Ryugo Hayano

掲載論文誌

J. Radiol.Prot. 37(2017)1-12

<http://doi.org/10.1088/1361-6498/37/1/1>

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: 1. 個人線量と航空機で測定された周辺線量率の比較

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

福島県伊達市は福島原発事故後、全市民に対する個人線量測定を行ってきており、市民の個人線量のユニークで包括的なデータを提供している。この論文はシリーズの最初のものであり、入手可能な周辺線量率の調査データに基づき実効線量を評価する方を確立するものである。それゆえ、私たちは航空機によって調査された空間線量のデータと個人の被曝線量との相関を調べてみた。得られた結論は、航空機による周辺線量測定が行われたすべての期間において、個人線量率は周辺線量率に 0.15 をかけたものにほぼ等しいというものであり、この 0.15 という係数は日本政府が採用している値の 1/4 である。この研究に用いられた方法は、将来、大規模な汚染をとまなう放射線事故がおこったときに、その初期のフェーズでの個人線量の予測を行う助けとなるであろう。

1. イントロダクション

(福島第一原発事故のような)核事故後の放射能汚染に対する適切な防護方針を定めるにあたって、個人被曝線量の分布を知ることは非常に重要である。ICRP は、責任のある機関が被曝した人々の集団の個人線量の分布の特徴をとらえること、そして ALARA の原則にしたがって適切かつ最適化された対策をとるよう勧告している。[1,2]

東日本大震災後の最初の 4 か月の間の外部被曝線量は福島県による県民健康調査の一環として、福島県民に対する住民の移動と行動についてのアンケートに調査によって評価された。[3]

2011 年の夏以後は、福島県の多くの市町村は、一般公衆に対する大規模な測定は通常の放射線防護では必要とされていないのにもかかわらず、被曝が起こりえる地域に住む公衆に対する個人外部被曝線量モニタリングを開始した。これらの市町村による被曝線量測定は中央政府によって主導されたのでも監督されたのでもなく、それゆえ、対象とされるグループ、線量計の配布と回収方法、データ報告のフォーマット、そして線量計の使用方法については、標準化されてはいなかった。汚染された地域の住民と行政が得た情報はバラバラなものであった。このような事情によって、個々の市町村 (例えば、福島市[4])や学術研究[5]としてデータが発表されているにもかかわらず、市民が外部被曝についての総合的な描像を持つことは困難であった。要するに、集められたデータは、影響を受けたコミュニティにと

って十分に活用されたとは言えないのである。

伊達市は福島第一原発から 50-60km 北西に位置する。伊達市に隣接し 2011 年 4 月に全村避難を命じられた（計画的避難区域[6]という）飯舘村とは異なり、日本政府によって事故後の最初の 1 年間に 20mSv を超える被曝をすると評価された限られた数(128)の世帯（特定避難勧奨地点とよばれる[6]）を除いては避難勧告が住民に出されていない。福島第一原発事故後全住民が避難することなく住み続けた市町村のうちで、伊達市は市内各地の間で汚染度の違いが最も大きいところである。

伊達市では、市民は、事故直後から、空間線量測定と学校の除染という放射線防護活動を自主的に開始し、積極的に参加した。市役所も最初からこれらの活動を承認し支援してきた[7]。伊達市長は、汚染レベルに従って除染にプライオリティをつけるのに必要な情報を得ることを重点とする住民の個人線量測定と全市域における周辺線量測定を開始するように指令した。

個人外部被曝線量の測定のため、伊達市は 2011 年 8 月に、個人線量計（蛍光線量(RPL)ガラス線量計:ガラスバッジ）を幼稚園、小学校、中学校に通う子供たちに配布した。対象となるグループは、ガラスバッジの供給元の生産能力の増大にともない順次拡大され、現在も測定が続いている。

伊達市が、市民とのコミュニケーションにおいては実際の線量値が必要となることを予測し、すべての市民（～65000 人）に 2012 年の 7 月から 2013 年の 6 月までの 1 年間にわたってガラスバッジを配布したことは注目に値することである。伊達市によって発表された結果は IAEA によっても解析されている[9]。福島県においてはこれに匹敵する外部被曝線量測定は行われていないため、伊達市のデータは福島第一原発事故後に行われた個人線量測定のうちで最も包括的なものである。

外部被曝線量にくわえて、伊達市は 2011 年 10 月から市民の内部被曝線量の測定を始め今も引き続いて行っている。公共施設と道路の除染は 2011 年の秋から始まり、2012 年の秋からは宅地の除染が開始された（これらについては次節でさらに議論する）。2014 年 3 月に伊達市は除染が終了したことを発表した。

著者たちは、伊達市から提供された福島第一原発事故後 5 か月から 51 か月の間の大規模個人線量モニタリングデータを用い、個人線量と日本政府が行った航空機による線量調査結果[10]との関係、除染の個人への影響、そして外部被曝線量と内部被曝線量の相関について分析を行った。これらの結果は 3 つの連続した論文として発表する。

シリーズの最初である本論文は、個人外部被曝線量を利用可能な周辺線量率調査データから評価する方法を確立することをめざす。

倫理についての記述

伊達市の市長室は著者たちにデータを託してくれた。著者のうちの一人 (MM) は伊達市政アドバイザーである。ガラスバッジによる被曝線量測定に参加した世帯の住所の geocode(地理コード) は準匿名化のために、解析にさきだって経度と緯度が 1/100 度に丸められている。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)。

2. 材料と方法

2.1. 伊達市の地勢と放射能汚染

伊達市は福島第一原発から 50-60 km 北西に位置する。伊達市に隣接して、南西に県の首都福島市が、川俣町が南に、飯舘村が南東にある。市の面積は 265 平方 km であり、そのうちの約 27% は農地、約 37% は山林である。伊達市は豊かな自然環境と肥沃な農耕地に恵まれている。事故前の 2010 年の人口は 67000 人であり、世帯数は約 20000 である。世帯のほとんどは市の北西の平地に在住する。東部と南部の阿武隈高地に属する山地の人口密度は低い。約 5400 世帯(26%) は農業に従事しており、そのうちの 900 世帯は専業農家である。農家の収入は主として果物の生産による[12]。これは、農地が占める割合がおおきいこととあいまって、農業が伊達市における生活の主要な部分をなすことを意味する。

福島第一原発事故から放出された放射性物質は図 1 に示すように、北西方向に不均一に降下した。その結果として、伊達市の汚染レベルは南(高)から北(低)に大きく変化している。

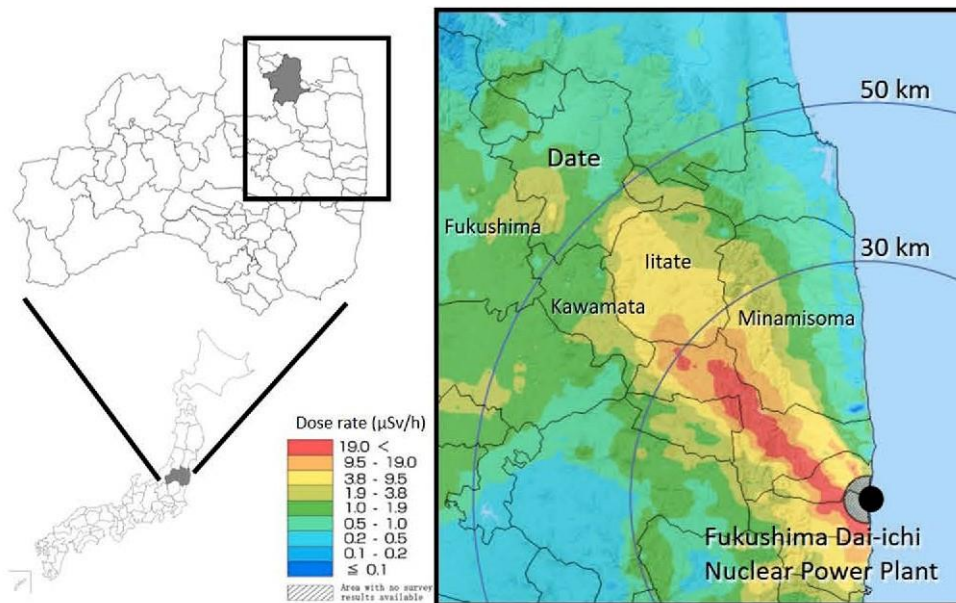


Figure 1. Maps showing the location of Date City and the distribution of ambient dose rates as of November 5, 2011, based on the airborne monitoring surveys conducted from October to November 2011. Adapted from a map published in [11].

図1 伊達市の位置と2011年10月と11月に行われた航空機による周辺線量調査で得られた2011年11月5日における空間線量分布を示す地図。参考文献[11]として発表された地図を用いた。

2.2. 伊達市における汚染レベルの違いによる区域分け

市の全域にわたる周辺線量率の分布を評価するために、2011年8月に、伊達市は市域を1 km ごと（中心部では500 m ごと）のグリッドにわけ地上1 m における空間線量のマップを作製した。このマップに基づいて、伊達市は2011年10月に除染計画（第一版）を定め、その中で除染は汚染レベルに従って行うと宣言した[13]。

2012年8月に策定された伊達市の除染計画（第二版）では区域分けが導入された[14]。2011年8月の空間線量マップと日本政府によって用いられている式（文献[15]の式(2)）を用い、年間外部被曝線量が20 mSv を超える区域をA、5 mSv 以下の世帯を区域C、それ以外を区域Bとした。空間線量率では、次のようになる：A 区域 ($>3.5 \mu\text{Sv/h}$)、B 区域 ($1 \mu\text{Sv/h}$

$1 \sim 3.5 \mu\text{Sv/h}$) そしてC 区域 ($<1 \mu\text{Sv/h}$)。これらの3つの区域分けは図2に示されている。

除染はこの優先度によって行われる予定であった。各区域の世帯数は2012年8月の時点で次のようである。

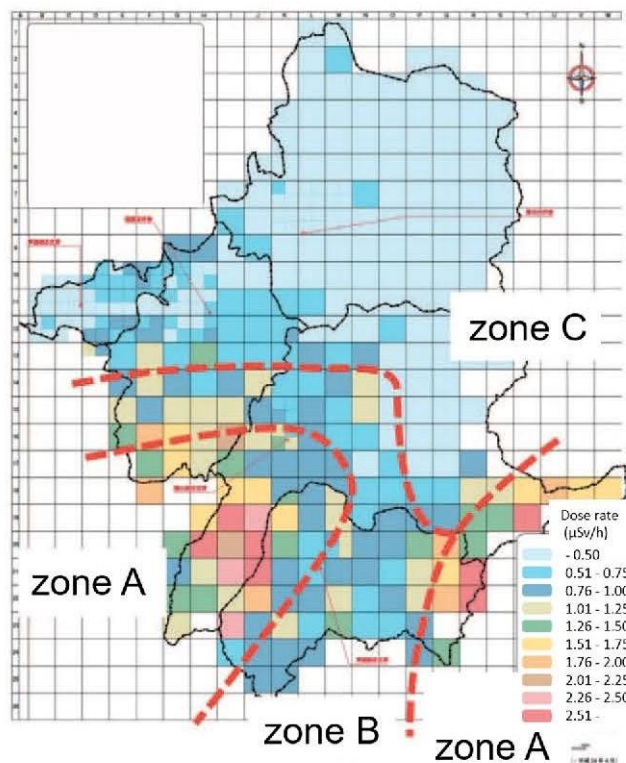


Figure 2. The ambient dose rate map of Date City measured in March 2012, together with the zoning according to the dose rate (as measured in August 2011): zone A ($>3.5 \mu\text{Sv h}^{-1}$), zone B ($1 \mu\text{Sv h}^{-1} \sim 3.5 \mu\text{Sv h}^{-1}$) and zone C ($<1 \mu\text{Sv h}^{-1}$). Adapted from a map published in [7].

図2 2012年3月に測定された伊達市の空間線量のマップおよび2011年8月の線量に従って定められた区域分け。区域A ($>3.5 \mu\text{Sv h}^{-1}$)、区域B ($1 \mu\text{Sv h}^{-1} \sim 3.5 \mu\text{Sv h}^{-1}$)、区域C ($<1 \mu\text{Sv h}^{-1}$)。参考文献[7]を用いた。

区域A～2500世帯

区域B～3700世帯

区域C～15600世帯

注：原論文では図2に対してページのフットノートとして「伊達市から著者に与えられたマップは2012年3月のものであり、2011年8月に比べて線量率が低い」というコメントが付加されている。この日本語訳ではこれをここに記す。

2.3. ガラスバッジによる住民の個人線量測定

伊達市の住民に対する個人線量の測定は放射線作業従事者によって通常用いられるガラ

スバッジによって行われた；汚染地域に住む住民がガラスバッジを用いることは事故前には想定されていなかったことである。

ガラスバッジはポリメチル・メタクリレート (PMMA) の板ファントムを用いて、前方照射条件 (AP) のときに $\text{Hp}(10)$ を示すよう較正されている [16]。しかしながら、福島第一原発事故から放出された放射性セシウムは環境中にほぼ一様に分布するため、汚染された地域に住む住民は ROT 照射条件に近い照射を受けることになる。このような場合でも、体幹に装着された線量計は実効線量の良い近似となることが示されている [17]。

ガラスバッジは自然放射線（地面からのガンマ線と宇宙線）に対しても反応する。事故によって放出された放射性セシウムによる追加線量を評価するためには、バックグラウンドの寄与を差し引く必要がある。福島県民に対してガラスバッジの読み値を報告するときには、ガラスバッジの供給者である千代田テクノルは、福島第一原発事故による汚染が小さい茨城県大洗町（福島第一原発から 130km 南）で計測された 0.54 mSv^{-1} 相当分を差し引いている [18]。伊達市はこのようにして得られた結果を各参加者に郵送する。

2.4. 線量測定に参加者と計測期間

伊達市における最初の外部被曝線量測定は、15 歳以下の子どもと妊婦を対象に 2011 年 8 月に 1 か月間行われた。その後の測定はすべて 3 か月間（すなわち 1/4 年、以後 Q と表す）にわたって行われた。特に、Q2 2012（日本の会計年度によるため、2012 年 7 月から 9 月）から Q1 2013 は全市民、すなわち ~65000 人が対象となり、市民の 81% (52783 人) が 3 か月ごとにバッジを渡されそれを返還することを一年間継続して行った。その後は、18 歳（訳者注；これは 15 歳のまちがい）までのすべての子ども、すべての妊婦、区域 A のすべての住民が継続して測定に参加した。一方区域 B と区域 C からの参加者は次第に減少した；これらの区域では、全員を対象とするのではなく、バッジは住民からランダムに選ばれた人々と測定を望む人々に限られて配布されたのである。

表 1 に Q1 2015 までのガラスバッジによる計測時期、対象者の構成の変化、年齢分布、そしてこの解析のもととなった参加人数が示されている。

表 1 福島第一原発事故から 5 か月から 51 か月にわたるガラスバッジ計測の測定期間

Table 1. Timeline of the glass-badge measurement surveys in Date City from 5 to 51 months after the FDNPP accident.

Japanese Fiscal Year	Quarter/ Month(s)	Participants	Airborne Monitoring	Age distribution of the glass-badge monitoring participants
2011	Aug	1.Pregnant women, 2.Kindergarten 3.Elementary 4.Junior High		<p>2011 Sep - Nov N = 8989</p>
	Sep-Nov	1.Ages 0~15 2.Pregnant women 3.the specific spots recommended for evacuation	4 th (November)	
	Dec-Feb			
2012	Q1 (Apr-Jun)	All citizens	5 th (June)	<p>2012 1Q N = 9304</p>
	Q2 (Jul-Sep)			<p>2012 3Q N = 59056</p>
	Q3 (Oct-Dec)		6 th (November)	
	Q4 (Jan-Mar)			
2013	Q1	1.Ages 0~15 2.Pregnant women 3.Zone A&B 4.Zone C random sampling+ applicant		<p>2013 2Q N = 24278</p>
	Q2		7 th (September)	<p>2013 3Q N = 24162</p>
	Q3		8 th (November)	
	Q4			
2014	Q1	1.Ages 0~15 2.Pregnant women 3.Zone A&B 4.Zone C random sampling+ applicant		<p>2014 3Q N = 21080</p>
	Q2			<p>2014 3Q N = 21080</p>
	Q3		9 th (November)	
	Q4			
2015	Q1			

2.5. 個人線量と周辺線量の比較方法

日本政府は事故の影響を受けた地域を放射線測定器を積んだ航空機により 300m 上空からモニタリングすることを継続的に行ってきた[19]。測定器のカウントレートは地上 1m の $H^*(10)$ に換算され、その結果は 250 m x 250 m のグリッドの平均値として発表されている。各グリッドの経度と緯度および $H^*(10)$ の値を示す表はインターネット上に公表されている[20]。

航空機による空間線量はガラスバッジによって測定された個人被曝線量と比較された。表 1 に示すように、6 回の航空機による測定（第 4 次から第 9 次）はガラスバッジの測定期間と対応している。私たちはこのようにして得られた 6 個のデータのペアを解析に用いている。

各期間および各個人について、私たちは伊達市役所から提供された参加者の住所の GIS、すなわち経度と緯度を用いて、この期間に対応する航空機による線量調査データベースから、住所に最も近いグリッドの $H^*(10)$ 、今後これをグリッド線量率と呼ぶ、を求めた。

図 3 に、6 つのそれぞれの期間に対する参加者の地理的位置とグリッド線量率を示す。グリッド線量率は色によってコード化されており、各円の面積ははそのグリッドに属する参加者数に比例している。

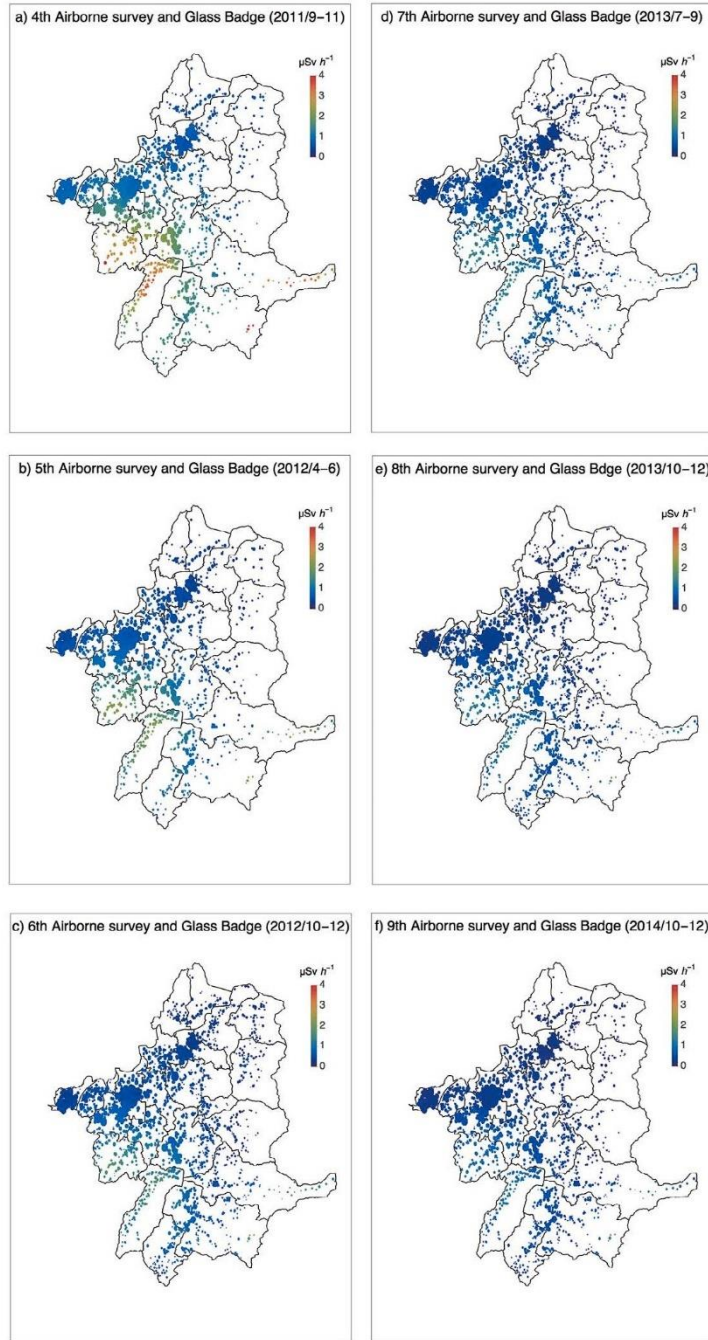


Figure 3. Geographical locations of the survey participants and their grid dose rates for each of the six measurement periods. The left-hand column (a)–(c) shows the 4th, 5th and 6th airborne monitoring, the right-hand column (d)–(f) shows the 7th, 8th and 9th airborne monitoring. The grid dose rates are color coded ($0\text{--}4\ \mu\text{Sv h}^{-1}$), and the area of each circle is drawn proportionally to the number of participants within the grid. In the period corresponding to the 6th airborne monitoring, glass badges were distributed to all citizens, so that (c) indicates the overall population distribution within the city.

は第4次、5次、および6次の航空機による線量調査に対応し、右側のコラム (d)-(f) は第7次、8次、および9次に対応する。グリッド線量率は色によってコード化 ($0\text{--}4\ \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) されており、各円の面積ははそのグリッドに属する参加者数に比例している。第6次の航空機による線量測定に対応する期間では全市民が参加している。それゆえ、(c) は伊達市の人口分布を示すことになる。

グリッド線量率は色によってコード化されており、各円の面積ははそのグリッドに属する参加者数に比例している。

バックグラウンドがガラスバッジの計測値から差し引かれているため、私たちは、 $0.04\ \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ を航空機による線量調査から得られた $H^*(10)$ から差し引く補償を行っている。この 0.04 という数値は日本政府が周辺線量を実効線量に関連づけるときに用いた式中の値である[15]。

3. 結果

図4は6つの期間の、個人線量を縦軸にとりグリッド線量率を横軸にとったときの箱ひげ図である。左側のコラムの上から順に第4次、5次、そして6次の航空機モニタリング調査に対応し、右側のコラムは上から第7次、8次、9次に対応する（表1も参照のこと）。

横軸ではグリッド線量率が $0.1\ \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ずつ大きくなっている。箱ひげ図はグリッド線量率が各ビンに対応する対象者の3か月間の積算線量から求められた個人線量率の分布を示している。箱は25パーセンタイルから75パーセンタイルを含み、ひげは1パーセンタイルと99パーセンタイルを示している。ドットは外れ値を示す。箱ひげ図の下に、グリッド空間線量率に対応する人口分布のヒストグラムを示してある。

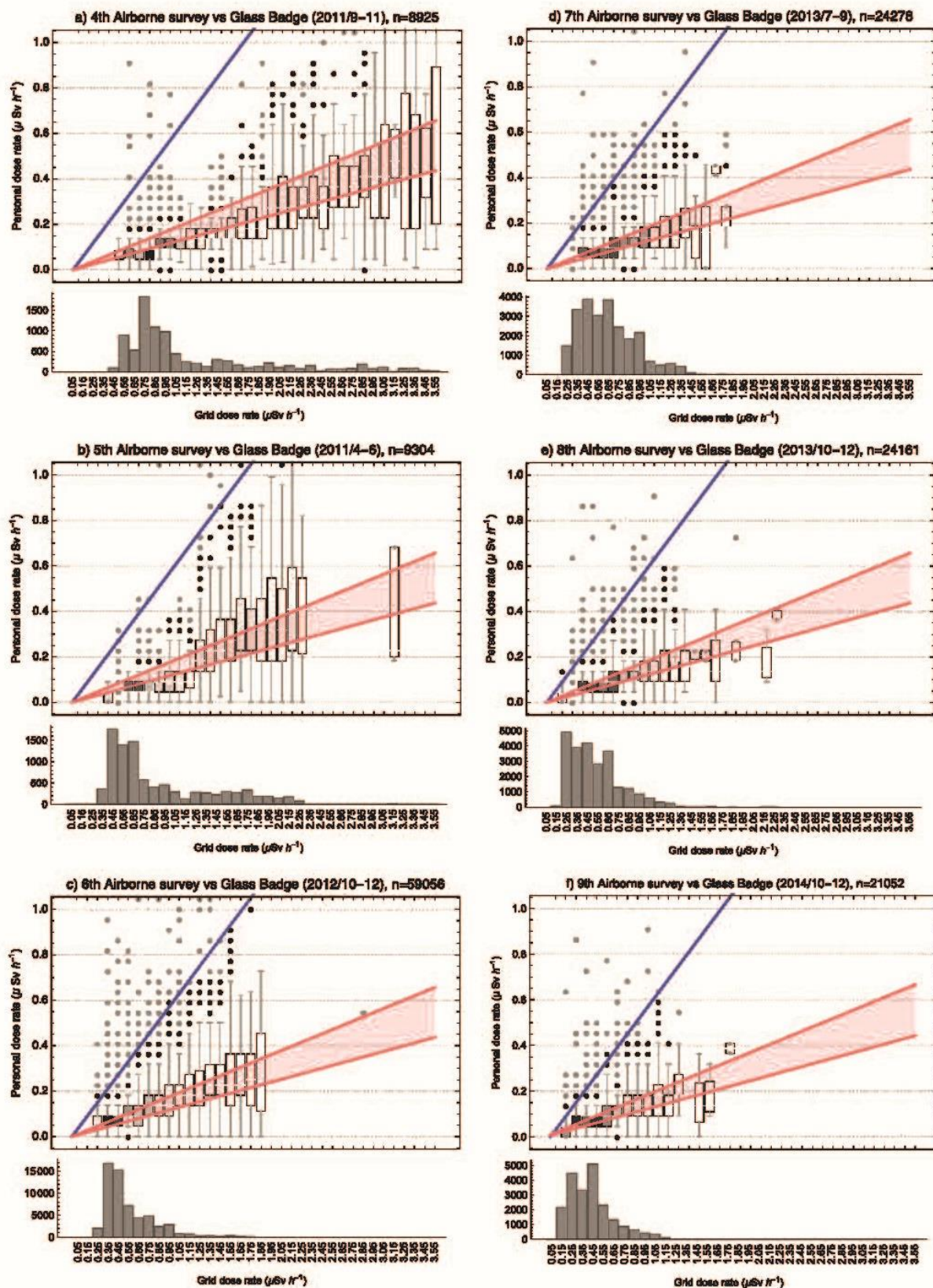


Figure 4. Box-and-whisker plots of the individual dose rates versus grid dose rates for the six periods. The left-hand column (a)–(c) shows the data corresponding to the 4th, 5th and 6th airborne survey periods, and the right-hand column (d)–(f) shows those corresponding to the 7th, 8th and 9th periods.

図4 6つの期間におけるグリッド線量率に対する個人線量率の箱ひげ図。左側のコラムの(a)-(c)は第4次、5次、6次の航空機による空間線量測定に対応し、右側のコラムは第7次、8次、9次に対応する。

第 4 次から 9 次のモニタリングに進むにしたがってグリッド線量率が小さくなることはすでに図 3 よりあきらかである。これに対応して、図 4 の各グリッド線量率に含まれる対象者の分布は順次左側に（すなわちより低い線量に）移行している。

係数の平均 $\langle c \rangle$ 、すなわち個人線量率とグリッド空間線量率の比の平均は

$$\langle c \rangle \equiv \left\langle \frac{\text{individual dose rate}}{\text{grid dose rate}} \right\rangle = 0.15 \pm 0.03, \quad (1)$$

となる。なお $\langle \rangle$ は外れ値を除く 6 期間のすべてのデータについての平均をとることを意味する。この係数は図 4 の各パネルの中のピンク色のバンドを描くときに用いられている。ここで日本政府が周辺線量に基づいて追加実効線量を評価するときに採用した次のような標準的な行動様式[15]を思い起こしてほしい：ある個人は 8 時間を遮蔽のない屋外で過ごし、16 時間を線量が屋外の 40% となる木造家屋の中で過ごし[21]、自然放射線のバックグラウンドは $0.04 \mu\text{Sv h}^{-1}$ である。このシナリオでは、自然放射線のバックグラウンドを引いた周辺線量から追加実効線量を得るための係数は 0.6、すなわち

$$\text{individual dose rate } (\mu\text{Sv h}^{-1}) = 0.04 + 0.6 \times \text{ambient dose rate}. \quad (2)$$

である。図 4 の各パネルの太い青い線はこのシナリオに対応する線である。図に示されているように、青い線、すなわち日本政府が標準的な行動シナリオから評価したものは、実際の測定から求められたピンクのバンドのはるか上にあることになる。

係数 c は 図 5 のような分布をもち、この図では c の積算確率分布が対数正規分布のグリッドを用いて示されている。図からわかるように、50 パーセンタイルでは $c=0.15$ 、90 パーセンタイルでは $c=0.31$ 、そして 99 パーセンタイルでは $c=0.56$ である。日本政府の値 0.6 を超える係数を持つ参加者は 0.7% しかない。

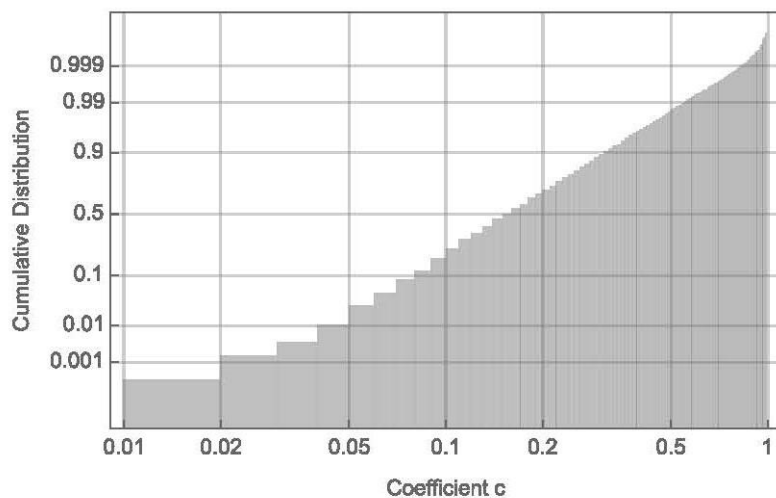


Figure 5. A log-normal plot of the cumulative probability distribution of the c coefficient.

図5 計数 c の積算確率分布を示す対数正規分布プロット。

4. 議論

伊達市は福島第一原発の事故後5か月目から市民の個人線量を測定してきた。その結果、伊達市によって集められた個人線量モニタリングデータは時間の経過による変化や場所の違いによる変化について、事故の影響を受けた地域の中で最も包括的なものである。このような詳細な線量値情報のアーカイブは以下に示す ICRP の勧告に適合するものである。勧告では、次のように書かれている。「長期にわたる汚染状況では、放射線の状況の追跡を可能とする放射線モニタリングシステムを構築し、適切な防護戦略を実施することは非常に重要である」[2]。著者たちは伊達市の要請によって、事故後の状況に対応できる必要で不可欠な知識を求めるためにデータの解析を行ったものである。これは、特に現在の被曝状況において必要なものと、将来起こりうる放射線事故にどのようなことが必要かを理解することに資するためである。

我々の研究は、個人線量は周辺線量に比例し、その比例係数は $c=0.15\pm0.03$ である。この研究で求められた係数は政府が採用している係数 0.6 の 0.25 倍である。内藤たちは[22] 100 人ほどの小グループを対象として、係数 0.2 を得ており、やはり政府の係数より小さい。これらの結果は、距離間隔が荒い測定である航空機によるものであっても、汚染された地域に住む住民の個人線量を評価するのに役立つことを示している。

私たち(および内藤たち)の研究では、 $H^*(10)$ を航空機を用いた、 $H_p(10)$ を個人線量計を用いて実際に測定しており、これらの測定から c を計算している。一方、2011 年に日本政

府は実効線量を $H^*(10)$ から評価するモデルを作成したが、振り返ってみると、個人線量を 3-5 倍過大評価していることになる。

福島第一原発事故のような大規模放射能汚染をともなう事故の後では、地方政府の応答能力に大きな無理をかけることが想定される。福島においては、地方政府は線量計を住民に配布することに努力を集中しており、すべての人に線量計を正しく使用してもらうことを、放射線作業従事者に対するように徹底することは不可能であった。この結果、伊達市によって集められたデータは、各参加者が実際に住民登録された住所に住んでいたのか、またいつもルーティンとしてガラスバッジを要請されたように正しく装着していたかが不明である。それゆえ、厳密に言えば、ガラスバッジで測定された値は、必ずしも実際の個人線量と等しいとは言えない。これは、この論文の限界であるといえる。しかしながら、私たちは、線量計の実際の使い方のパターンの相違が、次のパラグラフで述べるように、得られた結果に大きく影響しないと信じる。

野村たちは[23]南相馬市の学校に通う子どもに対して継続して行われたガラスバッジの測定を解析し、アンケートにガラスバッジを正しく着用していたと答えたグループとそうでないグループの間に統計的に個人線量に有意な差はみられなかった報告している。

内藤たちの研究においては[22]、参加者に対して厳密に使い方の指導が行われており、そして正しい使い方がしっかりと守られている。さらに参加者は1時間ごとの線量値を測定できる電子的線量計のほかにGPSを携帯しており、1時間あたりの線量は、GPSと航空機線量調査データベースと突き合わされることによってえられた周辺線量と比較されている。このようなよくコントロールされた少人数を対象とする学術研究によって得られた係数は、市によって行われた数万人を対象とする長期的なモニタリングプログラムに基づく私たちの研究によって得られた係数に非常に近いのである。

5. 結論

私たちは伊達市においてガラスバッジを用いて測定された個人線量は航空機によって測定された参加者が住む家の周辺線量に比例することを示した。この結果、著者たちは、まず、個々の市民が受けた外部被曝線量は航空機モニタリングデータから推定することが可能であると結論する。この研究によって得られた変換係数は、福島第一原発事故によって汚染された地域に実際に生活することで受ける被曝線量を評価する際に大いに役立つであろうと結論する。この研究によって適用された方法は、大規模な汚染をともなう将来起こりうる放射線事故の初期のフェーズでの住民の外部被曝線量を予測するのに役立つであろう。

謝辞

著者は千代田テクノルに感謝する。また、放射線安全フォーラムの多田博士には有益な議

論を行っていただいたことに感謝する。この研究の一部は RH に対して東京大学を通して
多くの方から寄せられた寄付に支えられている。

References

- [1] ICRP Publication 103 2007 The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection *Ann. ICRP* **37** (2-4)
- [2] ICRP Publication 111 2009 Application of the commission's recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency *Ann. ICRP* **39** (3)
- [3] Ishikawa T, Yasumura S, Ozasa K, Kobashi G, Yasuda H, Miyazaki M, Akahane K, Yonai S, Ohtsuru A and Sakai A 2015 The Fukushima health management survey: estimation of external doses to residents in Fukushima prefecture *Sci. Rep.* **5** 12712
- [4] 2015 Result of the Fukushima city glass badge survey (Japanese) www.city.fukushima.fukushima.jp/uploaded/attachment/50133.pdf (accessed 1 July 2016)
- [5] Tsubokura M, Kato S, Morita T, Nomura S and Kami M 2015 Assessment of the annual additional effective doses amongst minamisoma children during the second year after the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster *PLoS one* **10** e0129114
- [6] Ministry of Economy, Trade and Industry web site on evacuation areas www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/evacuation_areas.html
- [7] Date City Report since 2011.3.11 (Japanese) www.city.date.fukushima.jp/soshiki/9/7146.html
- [8] Date city Fukko-Saisei News Vol 8 (Japanese) www.city.date.fukushima.jp/uploaded/attachment/10035.pdf
- [9] International atomic energy agency 2015 Radioactivity in the environment IAEA *The Fukushima Daiichi Accident Technical Radiological Consequences* vol 4 (Vienna: International Atomic Energy Agency) pp 103–5
- [10] Nuclear Regulation Authority, Japan. Airborne Monitoring Survey Results <http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/307/list-1.html>
- [11] Extension site of Distribution Map of Radiation Dose, etc <http://ramap.jmc.or.jp/map/eng/>
- [12] Date city statistics (Japanese) www.city.date.fukushima.jp/soshiki/3/4313.html
- [13] Date City Decontamination Plan v1 (Japanese) www.city.date.fukushima.jp/uploaded/attachment/1964.pdf
- [14] Date City Decontamination Plan v2 (Japanese) www.city.date.fukushima.jp/uploaded/attachment/1963.pdf
- [15] Safety assessment study committee and environmental recovery review meeting Joint Study Group (Ministry of the Environment meeting 10 Oct 2011 in Japanese) http://josen.env.go.jp/material/session/joint_001.html
- [16] ICRU Report 74 2005 Patient dosimetry of x rays used in medical imaging *J. ICRU* **5** i
- [17] Hirayama H 2013 An evaluation of personal dosimeter for widely distributed ^{134}Cs and ^{137}Cs by using EGS code (Japanese) *Radioisotopes* **62** 335–45
- [18] 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
- [19] 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
- [20] Nuclear Regulation Authority. Airborne Monitoring Survey Results (Japanese, including CSV files) <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/362/list-1.html>
- [21] 2000 IAEA: Generic procedures for assessment, response during a radiological emergency, TECDOC-1162 and table E4
- [22] Naito W, Uesaka M, Yamada C, Kurosawa T, Yasutaka T and Ishii H 2016 Relationship between individual external doses, ambient dose rates and individuals' activity-patterns in affected areas in Fukushima following the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident *PLoS one* **11** e0158879
- [23] Nomura S, Tsubokura M, Hayano R and Yoneoka D 2015 Compliance with the proper use of an individual radiation dosimeter among children and the effects of improper use on the measured dose: a retrospective study 1820 months following Japan's 2011 Fukushima nuclear incident *BMJ Open* **5** e009555