



福島県伊達市における空間線量率の観測データを用いた長期被ばく線量の推定

藤長, 愛一郎 ; 村山, 留美子 ; 岸川, 洋紀 ; 内山, 巖雄 ; 菅野, 幸雄 ; 島田, 久也 ; 引地, 勲

(Citation)

リスク学研究, 32(2):181-192

(Issue Date)

2023-01-15

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2022 一般社団法人日本リスク学会
クリエイティブ・コモンズ [表示 4.0 国際]

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100489083>



【資料論文】

福島県伊達市における空間線量率の観測データを用いた 長期被ばく線量の推定*

Estimation of Long-Time Radiation Doses by Measuring Ambient Dose Equivalent Rates in Date City, Fukushima Prefecture

藤長 愛一郎**, 村山 留美子***, 岸川 洋紀****, 内山 巖雄*****
菅野 幸雄*****, 島田 久也*****, 引地 勲*****

Aiichiro FUJINAGA, Rumiko MURAYAMA, Hiroki KISHIKAWA, Iwao UCHIYAMA,
Yukio SUGENO, Hisaya SHIMADA and Isao HIKICHI

Abstract. Date City in Fukushima prefecture has manually measured ambient dose equivalent rates after the Fukushima Nuclear Power Plant accident on March 11, 2011. The purpose of this study is to estimate long-time radiation doses by measuring ambient dose equivalent rates. In order to estimate the dose equivalent rates, mathematical models were used. The model consists of fast and slow weathering components (two-component), and radioactive decays of ^{134}Cs and ^{137}Cs . And after the decontamination, the dose rate was calculated by a one-component model. As a result, the half-lives of component 1 and component 2 at the sites were 1.2×10^{-2} – 7.5×10^{-2} years and 1.2–3.1 years, respectively. The values of component 2 were about two orders of magnitude larger than those of component 1. Furthermore, the half-lives of the one-component model after decontamination were 2.7–7.2 years, which were bigger than those of the component 1. The extra radiation dose for 50 years was estimated as approximately 85 mSv at the site of the maximum initial ambient dose equivalent rate and less than 40 mSv at other 14 sites. More than 80% of the extra radiation doses were integrated within 10 years after the accident.

Key Words: Fukushima Prefecture, monitoring, ambient dose equivalent rate, mathematical model, long-time radiation dose

1. はじめに

2011年3月11日に起こった福島第一原子力発電所（以下、「福島第一原発」という）の事故によって、放射性物質が広く拡散した。事故の時点

において、既に緊急時を含めた「環境放射線のモニタリング指針」が設定されていた（原子力安全委員会, 2008）。しかし、現在設定されている様な広域での環境放射線モニタリング体制（原子力

* 2020年3月25日受付, 2022年10月28日受理

** 大阪産業大学 (Osaka Sangyo University)

*** 神戸大学 (Kobe University)

**** 武庫川女子大学 (Mukogawa Women's University)

***** ルイ・パストゥール医学研究センター (Louis Pasteur Center for Medical Research)

***** 環境ワーキンググループ伊達 (Environmental Working Group Date)

規制庁，2014）は，整備されていなかった。そのような状況の中，福島県は3月17日より，県内の代表的な地点の空間線量率の測定を始めた（福島県，2011）。また，3月末には福島第一原発周辺30 km圏外を対象とした，研究者チームによる自動車を使った測定も行われた（今中ら，2011；Imanaka et al., 2012）。さらに4月に入ると，文部科学省は福島県一帯の空間線量率の航空機による測定を開始した（鳥居ら，2012）。

一方で，自分達の生活している場所を測定してほしいという要望が，住民の間に事故当初よりあった（藤長ら，2017）。しかし，地方自治体においても測定器が入手できない状況であり，事故直後は住民の居住地域周辺での測定が進まなかった。

今回の対象地域である福島県伊達市では，原発事故約2週間後に可搬型サーベイメータを入手し，公共的な場所，数カ所での測定を始めた。住居地区については，2011年7月16日から我々NPO法人環境ワーキンググループ伊達（以後，「環境WG伊達」という）が市から受託した測定を開始し，2012年5月より測定地点を19地点に増やして，2021年7月16日まで測定を実施した（伊達市，2020；環境WG伊達，2021）。また，伊達市では2012年4月から，リアルタイムでの測定が可能なモニタリングポストなどが，学校や公園に88台，その他の場所に15台設置された（伊達市，2014）。

可搬型サーベイメータによる測定は，モニタリングポストによる測定に比べ，毎回，運搬して測定する必要があるが，検出器周辺の汚染や温度変化の影響を受けにくく，測定条件が明確であることが利点として挙げられている（三枝ら，2017）。また，可搬型サーベイメータで住民の住居地区を測定しているため，モニタリングポストが設置された後も可搬型サーベイメータによる測定は継続された。

今後は，空間線量率の測定の継続に加えて，得られたデータを利用して，長期的な放射線による健康影響を評価することが課題となると考えられる。そこで，この研究の目的は，空間線量率の変化を予測する数理モデルを作成し，将来や事故直後の空間線量率を予測して，長期被ばく線量を推定することである。

数理モデルについては，Galeら（1964）による先行研究があり， ^{137}Cs を用いた空間線量率の変

化は， ^{137}Cs の放射性減衰と風雨にさらされて起こるウェザリング（風化）が原因で，低減速度が大きい成分と小さい成分の2つに分けられ，この2成分の指数関数を用いた式で表せるとされている。また，この数理モデルを用いて，チェルノブイリ原発事故後の空間線量率を解析した例が報告されている（Karlberg, 1987; Likhtarev et al., 2002）。また，Smithら（2002）は，この数理モデルに ^{137}Cs の放射性減衰を表す指数関数を乗じた式を提示している。

福島第一原発事故後の空間線量率の変化については， ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射性減衰の指数関数にウェザリングによる低減速度が大きい成分（成分1）と小さい成分（成分2）による減少を示す指数関数を乗じた式（以後，「2成分モデル」という）を用いて解析されている（Kinase et al., 2017; 三枝ら，2017）。これらの2成分モデルを用いると，空間線量率の初期の急激な減少とその後のゆるやかな減少の傾向を表すことができる。

2成分モデルの未知のパラメータを正確に求めるには，事故直後から長期にわたる空間線量率の測定データを使用した最小二乗法を用いる必要がある。しかし，事故後，何カ月も経って，空間線量率の初期値がかなり低減してから測定を開始する場合は，2成分モデルの減少速度が大きい成分1が主に減少していて，そのまま2成分モデルを使用することは適切でないと考えられる。

そこで，この研究では福島第一原発事故後から空間線量率を測定している地点の実測値を使用して，2成分モデルとウェザリングによる低減を1成分で表す数理モデル（以後，「1成分モデル」という）を用いて，空間線量率の経時変化を推定した。そして，その推定値と実測値との回帰式を求めて，これらの数理モデルが妥当であることを確認した。その後，将来や事故直後の空間線量率を推定し，長期被ばく線量を試算した。

2. 方法

2.1 空間線量率測定

(1) 測定地点

福島県伊達市は，福島県の中央北部に位置し，福島第一原発からは50～70 km離れている。しかし，事故直後には伊達市にも，避難指示の基準となる年間被ばく線量20 mSv（3.8 $\mu\text{Sv/h}$ ）（原子力災害対策本部，2012）超過の場所が存在した。それで，2011年6月には特定避難勧奨地点に指定され

た場所が存在したが、2012年12月には解除されている（原子力災害現地対策本部、2012）。

この研究では、事故直後（2011年3月24日）から測定を続けている5地点（地点1～5）、および約4カ月後の7月16日から測定を続けている10地点（地点6～15）の合計15地点を対象とした。Figure 1に今回対象とする15地点の位置図を示す。また、Table 1に各地点の、舗装の種類、定点、および定点に近接する草地の除染情報を示す。Table 1の地点番号は、Figure 1中の番号に対応する。15地点の内、定点も草地もどちらも除染をしていない地点は、地点1, 2, 15の3地点である。

(2) 測定位置

環境WG伊達には、舗装された定点（高さ100 cm）の測定を伊達市から委託されているが、定点付近には草地が存在するため、定点に隣接する草地についても高さ5 cmと100 cmで測定している。

各測定地点では以下の3つの位置で測定を行っている。

- ・ 定点：アスファルトの駐車場や道路、インターロッキングブロック、セメントコンクリートや敷砂利などで舗装された場所の地表面から100 cmの高さ
- ・ 草地5 cm：定点に最も近い草地（土壌）がある場所の地表面から5 cmの高さ
- ・ 草地100 cm：草地5 cmと同じ地点の地表面から100 cmの高さ

また、定点か草地の一方でも除染をした地点は、地点3～14の12カ所である。それらの除染の効果として、空間線量率の除染率（Table 1の注3）参照）は、定点で10～49%、草地で0～85%であった。これらの測定結果については、ウェブサイトや報告書で公表されている（伊達市、2020；環境WG伊達、2019）。

(3) 測定機器・測定回数

可搬型サーベイメータには、NaIシンチレーション検出器（日立アロカメディカル、TCS-172B）を用いた。検出部位を福島第一原発のある南東方向に向け、測定した。可搬型サーベイメータは半年に1回校正を受けて使用した。空間線量率の測定は1日1回、年間ほぼ毎日実施した。

検出器の時定数は、空間線量率が $1 \mu\text{Sv/h}$ 付近なら10秒、 $0.3 \mu\text{Sv/h}$ 以下なら30秒としたので、1地点あたりの測定は、30秒待ってから10秒間した（最小単位 $0.01 \mu\text{Sv/h}$ ）。なお、実測値が10秒以内に3回以上変化する場合、5回の読み取りで同じ数値が2回以上出ない場合、または5回の読み取りの最大値と最小値の差が20%以上の場合は、測定をやり直した。

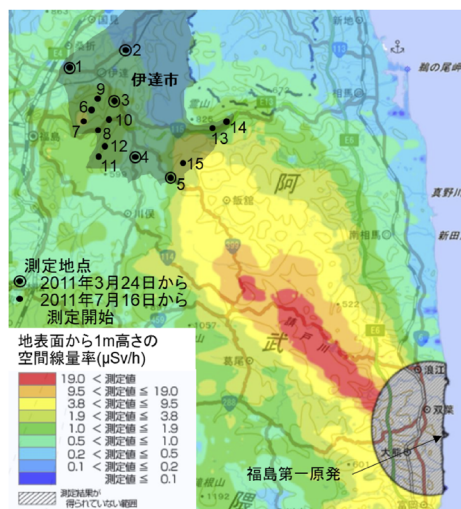


Figure 1 Location map of 15 monitoring points in this research for ambient dose equivalent rates in Date City, Fukushima Prefecture (The map was made using the ambient dose equivalent rates distribution map on 29th April, 2011, which was provided by JAEA.)

2.2 解析方法

15地点の定点の空間線量率を、数理モデルを用いて推定し、長期被ばく線量を算出した。

(1) 原発事故直後に測定を開始した5地点

原発事故直後（2011年3月24日）に空間線量率の測定を開始した地点1～5については、事故後初期からの実測値の利用が可能であることから、既往文献（Kinase et al., 2017; 三枝ら、2017）と同様に2成分モデルで将来の空間線量率を推定した。ただし、除染を実施した地点3～5については、除染後の推定には1成分モデルを使用した。

(2) 原発事故4カ月後に測定を開始した10地点

原発事故の4カ月後（2011年7月16日）に測定を開始した地点6～15については、長期被ばく線量を求める際に、初期の値の大きい空間線量率が無視できないと考えられる。そこで、地点6～15における2011年3月24日の空間線量率の初期値 $D_{3/24}$ は、地点1～5の5地点の $D_{3/24}$ と2011年7月16日の値 $D_{7/16}$ の単回帰の直線式を求めて推定し

Table 1 Information of 15 monitoring sites about decontamination

地点番号	測定地点	舗装 種類 ^{注1)}	定点の 除染 ^{注2)}	定点の 除染率 ^{注3)}	草地の 除染 ^{注2)}	草地の 除染率 ^{注3)}
1	伊達総合支所	駐車場	除染せず	—	除染せず	—
2	梁川総合支所	ブロック	除染せず	—	除染せず	—
3	霊山総合支所	駐車場	除染せず	(36)	花壇表土入替 (2013年5月)	67
4	月館総合支所	駐車場	除染せず	(25)	花壇表土入替 (2013年7月)	34
5	399号線飯館村境	駐車場	除染せず	(26)	表土削除 (2013年6月)	68
6	富成沼田地区	駐車場	表面除染 (2015年7月)	25	部分的な除染 (2012年11月)	0
7	富成十区集会所	砂利	隣接道路の洗浄 (2012年11月)	25	表土入替 (同左)	25
8	富成新若林団地	ブロック	表面除染 (2013年6月)	38	表土入替 (同左)	85
9	富成郵便局	道路	隣接道路の土砂除去 (2013年6月)	43	表土入替 (同左)	77
10	岩代小国郵便局	道路	道路補修 (2012年9月)	42	除染せず	9
11	大木バス停留所	道路	道路改修 (2012年10月)	10	表土入替 (同左)	27
12	末坂バス停留所	道路	表面除染 (2012年9月)	19	土砂入替 (同左)	45
13	坂ノ上集会所	コンクリート	周辺表土入替 (2011年12月)	49	表土入替 (同左)	68
14	八木平バス停留所	道路	除染せず	(16)	表土入替 (2012年12月)	0
15	月館相霞飯館村境	道路	除染せず	—	除染せず	—

注1)「舗装種類」の駐車場と道路はアスファルト舗装のことで、ブロックはインターロッキングブロックのことを指す。

注2) ここでいう「除染」とは、市が業者に委託して行う、土の入れ替えや全面的な洗浄などを指す。

注3)「除染率(%)」は、除染月の1日の空間線量率(除染前)と翌月の1日の値(除染後)の差を、除染月の1日の値(除染前)で除した。

定点の除染をしていなくても草地の除染をしていれば、定点の除染率をカッコ書きで記した。なお草地の除染率については、地上5cmでの実測値を使用した。

た。そして、2成分モデルを用いて、将来の空間線量率を推定した。ただし、除染を実施した地点6～14については、除染後の推定に1成分モデルを使用した。

(3) 除染後

福島県内の15カ所の空間線量率トレンド解析をした三枝ら(2017)は、2012年3月までは成分1の空間線量率変化への寄与が支配的であることを報告している。さらに、空間線量率が $1\mu\text{Sv/h}$ 以下と低い場合に、成分1と成分2とが区別できない地点があることも報告している。そこで、本研究では、除染した地点3～14における除染後の空間線量率は $1\mu\text{Sv/h}$ 未満であったので、除染後の

空間線量率の推定には、2成分モデルを使用せず、1成分モデルを用いて、新たにパラメータを算出した。

1) 2成分モデル

2011年3月24日から測定している5地点の定点の空間線量率は、当初大きく変動しながら急激に減少した。この現象は3～4カ月経つと変化し、減少速度が穏やかになった。この傾向を2成分モデル(式(1)～(3))で解析した(IAEA, 2010; Kinase et al., 2017; 三枝ら, 2017)。成分1の環境半減期を T_1 、成分2の環境半減期を T_2 とした。そして、Microsoft Office Excelのソルバー機能を用い最小二乗法で、 $D_{3/24}$ 、 f_1 、 T_1 、および T_2 を求めた(三枝

ら, 2017)。なお, バックグラウンド値は, 全ての地点において一定とした。

$$D(t) = D_{3/24} \left(W_{134} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{134}} \cdot t} + W_{137} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{137}} \cdot t} \right) \times \left(f_1 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_1} \cdot t} + f_2 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_2} \cdot t} \right) + D_{BKG} \quad (1)$$

$$W_{134} = \frac{a_{134} \cdot b_{134}}{a_{134} \cdot b_{134} + a_{137} \cdot b_{137}} \quad (2)$$

$$W_{137} = 1 - W_{134} \quad (3)$$

ここで,

$D(t)$: 2成分モデルによる日数 t における定点の空間線量率($\mu\text{Sv/h}$)

t : 2011年3月24日からの日数(d)

$D_{3/24}$: 空間線量率の初期値 (2011年3月24日の値) ($\mu\text{Sv/h}$)

f_1, f_2 : 減少速度が大きい成分1と小さい成分2の割合 ($f_1 + f_2 = 1$)

T_1, T_2 : 成分1, 成分2の環境半減期 (1/d)

W_{134}, W_{137} : $^{134}\text{Cs}, ^{137}\text{Cs}$ の寄与率

a_{134}, a_{137} : $^{134}\text{Cs}, ^{137}\text{Cs}$ の単位面積当たりの放射能 (Bq/m^2)の比 (2011年8月1日の値が1:1とされている (原子力災害対策本部, 2011) ことから, ^{134}Cs と ^{137}Cs の半減期を用いて, その日以前と以後の値を日ごとに計算した。

b_{134}, b_{137} : $^{134}\text{Cs}, ^{137}\text{Cs}$ の線量換算係数, $5.47 \times 10^{-9}, 2.00 \times 10^{-9}$ ($\text{mSv/h}/(\text{Bq/m}^2)$) をそれぞれ使用した (原子力災害対策本部, 2011)。

T_{134}, T_{137} : $^{134}\text{Cs}, ^{137}\text{Cs}$ の半減期 (2.0648 y, 30.1671 y (日本アイソトープ協会, 2011)) より算出。

D_{BKG} : バックグラウンド線量率, 事故前の2010年の福島県の実測値を参考に $0.05 \mu\text{Sv/h}$ と設定 (福島県, 東京電力, 2010; 三枝ら, 2017)

2) 1成分モデル

除染後の空間線量率の経時変化は, 環境半減期が1成分だけからなる1成分モデルを用いると, 式(4)で表される。定点または草地の除染が実施された地点 (12地点) については, 除染後はこの1成分モデルで解析した。このモデルでは, D_{S0} と T_S をMicrosoft Office Excelのソルバー機能を用い最小二乗法で求めた。なお, バックグラウンド値は, 2成分モデルと同様に全ての地点において一定とした。

$$D(s) = D_{S0} \left(W_{134} \cdot e^{-\left(\frac{\ln 2}{T_{134}} + \frac{\ln 2}{T_S}\right) \cdot s} + W_{137} \times e^{-\left(\frac{\ln 2}{T_{137}} + \frac{\ln 2}{T_S}\right) \cdot s} \right) + D_{BKG} \quad (4)$$

ここで,

$D(s)$: 除染後の定点の空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

s : 除染後からの日数 (d)

D_{S0} : 除染後の定点の空間線量率の初期値 ($\mu\text{Sv/h}$)

W_{134}, W_{137} : $^{134}\text{Cs}, ^{137}\text{Cs}$ の寄与率 (2成分モデル, 式(1)と同様)

T_S : 除染後の環境半減期 (d)

D_{BKG} : バックグラウンド線量率 (2成分モデルと同様, $0.05 \mu\text{Sv/h}$ と設定)

3) 長期被ばく線量の算出

長期被ばく線量 (mSv) は, 空間線量率を被ばく期間50年間 (2011年3月24日～2061年3月23日) として積算した。これは, 原発事故当時からその場所に住んでいて, 50年間同じ場所に住み続ける想定である。長期被ばく線量にバックグラウンド値の $0.05 \mu\text{Sv/h}$ の分は加算せずに, 余剰被ばく線量として算出した。除染を実施した地点では, 除染までと除染後に分けて推定し, 積算した。ただし, 実測値のある場合には, そちらを優先して使用した。

なお, 1日当たりの被ばく線量は, 屋内で16時間, 野外で8時間過すと仮定し, 屋内の遮蔽率を0.4 (環境省, 2011) として計算した換算係数 $A = 1 \mu\text{Sv/h} \times 10^{-3} \text{ m} \times (8 \text{ h/d} + 0.4 \times 16 \text{ h/d}) = 1.4 \times 10^{-2} (\text{mSv/d})/(\mu\text{Sv/h})$ と1時間当たりの空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) の積で計算した。

①原発事故直後から実測値がある場合

2011年3月24日から測定した地点1～5については, 2020年7月10日までは実測値を使用した。それ以後は, 除染が定点でも草地でも行われていない地点1および地点2では, 2成分モデルを使用して空間線量率を推定した。除染を実施した地点3～5では, 除染後の推定に1成分モデルを使用した。

②原発事故直後からの実測値がない場合

2011年7月16日から測定を開始した地点6～15の長期被ばく線量については, 2011年3月24日～7月15日は2成分モデルによる推定値, 7月16日～除染前までは実測値, 除染以後～2020年7月10日までも実測値, それ以後は1成分モデルを用

いて推定した。除染が行われていない地点15は、2成分モデルを用いて推定した。

③仮に除染をしなかった場合

仮に除染をしなかった場合の50年間の余剰被ばく線量の推定には、初期値(D_{s0})に除染前の実測値を使用し、環境半減期(T_s)には除染をした場合と同じ1成分モデルで、除染後の空間線量率から求めた値を使用した。ここで1成分モデルを使用することについての是非については、3.3に記述する。

3. 結果および考察

3.1 草地の空間線量率と除染率

どの地点でも定点に隣接する草地の空間線量率は、草地を除染するまでは、定点よりも高かった(環境WG伊達, 2019)。また、除染率も草地の方が、定点より高い地点が多かった(Table 1参照)。これは、アスファルト舗装などの定点と比較して、草地では土や植物に付着した放射性物質が、草を含む表層の土を入れ替える除染で除去されるためと考えられる。

除染をした地点(15地点中12地点, Table 1参照)の空間線量率の変化の例として、地点8の定点(地上100 cm)と隣接草地(地上5 cmと100 cm)の値をFigure 2に示す。草地5 cmの値は定点の倍以上であり、草地100 cmの値も定点より高かった。一方、除染前後の空間線量率の変化については、定点、草地5 cmと草地100 cmのどれも、2013年6月の除染前まで空間線量率の減少が続き、除染後一挙に約0.5 $\mu\text{Sv/h}$ に減少し、その後、徐々に減少して、他の地点もこの傾向は同じであった。なお、2012年1月から3月と2013年1月に値がそれぞれ3~4割減少しているのは積雪の影響(環境WG伊達, 2017)で、先行研究で報告され

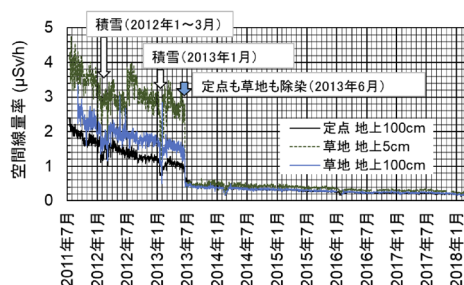


Figure 2 Variation of the ambient dose equivalent rates at monitoring point and grass field No. 8 (Tominari-sin-wakabayashi estate)

ている現象と同様である(三枝ら, 2017)。

3.2 空間線量率の変化

(1) 原発事故直後の空間線量率の推定

まず、2011年3月24日から測定を開始した地点1~5の同日の初期値 $D_{3/24}$ (実測値のばらつきを抑えるための最小二乗法による推定値)と7月16日の $D_{7/16}$ (実測値)を用いて、回帰式を求めたところ、 $D_{3/24}=6.035 D_{7/16}-0.988$ となった。Figure 3に、横軸に $D_{7/16}$ を縦軸に $D_{3/24}$ をプロットしたグラフを示す。ここで、相関係数 r は+0.985であり、2011年3月24日の空間線量率と約4カ月後の空間線量率には、相関性があることが分かった。同年7月より測定を開始した地点6~15については、2011年3月24日の初期値 $D_{3/24}$ をこの式を用いて推定した。

(2) 数理モデルを用いた空間線量率の推定

次に空間線量率を定点も草地も除染していない地点1, 2, 15は式(1)を用いて、定点か草地かどちらかを除染した地点3~14は式(1)と除染後には式(4)を用いて推定した。地点1を地点1, 2, 15の代表として、地点8を地点3~14の代表として選び、実測値と推定値をFigure 4の(A)と(B)に示す。

Figure 4(A)の地点1の空間線量率は、原発事故後の数カ月間、急激に減少し、その後、ゆるやかに減少した。他の2カ所の地点も初期値は異なるが、変化の傾向は同様であった。一方、(B)の地点8の測定は2011年7月16日からであり、原発事故後の3カ月で空間線量率が減少したことが予想されるが、7月16日からの推定値が実測値とよく

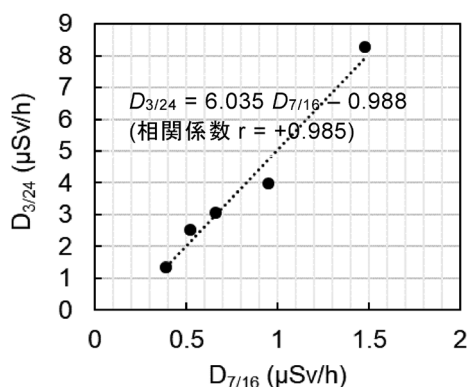


Figure 3 Relation between the ambient dose equivalent rates on March 24, 2011($D_{3/24}$), and the rates on July 16, 2011 ($D_{7/16}$) of Monitoring point No. 1-5

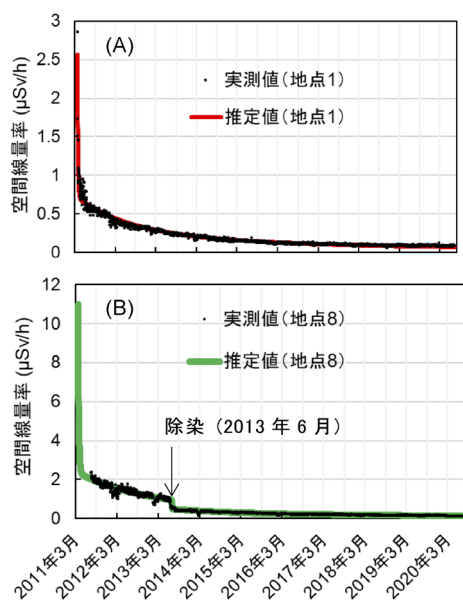


Figure 4 Variation of the ambient dose equivalent rates and the calculated dose equivalent rates at monitoring point No. 1 (Date regional city office which was not decontaminated) (A) and No. 8 (Tominari-shin-wakabayashi estate) (B)

一致している。2013年6月の急な減少は、同じ月に実施した定点および草地の除染の効果で、0.90 μSv/hから0.56 μSv/hに0.44 μSv/h低減した。

Table 2に本報で解析対象とした全地点（地点1～15）の空間線量率の実測値と推定値の最小二乗法によって求めた各パラメータ、回帰係数、および推定した50年間の余剰被ばく線量を示す。地点6～15で推定した $D_{3/24}$ は、全て原発事故後に避難の目安とされた年間20 mSv（原子力災害対策本部、2012）を時間当たり換算した3.8 μSv/hを超過しているが、2011年7月16日の実測値で3.8 μSv/hを超過したのは、地点15のみであった。

次に、2成分モデルの成分1の割合 f_1 は0.66～0.83であった。成分1と成分2の環境半減期 T_1 と T_2 は、それぞれ $1.20 \times 10^{-2} \sim 7.45 \times 10^{-2}$ yと1.24～3.06 yであり、 T_2 の方が2桁程大きくなった。さらに除染後の1成分モデルの環境半減期 T_s は、2.65～7.24 yであり、 T_2 より大きくなった。

ここで、空間線量率の推定値の実測値との適合性を確認するために、推定値と実測値の関係を検討した。Figure 5に各地点（定点）における空間線量率の測定開始後から2020年7月10日までの実測値をx軸に、式(1)または式(1)と式(4)の両方

による推定値をy軸にプロットしたグラフを示す。

Figure 5の上段(A)に地点1を地点1～5の代表として、下段(B)に地点8を地点6～15の代表として、それらのデータを示す。Figure 5 (A)の地点1の実測値と推定値に線形関係が見て取れ、回帰係数は0.986、95%信頼区間の半値幅は0.004と求められた。空間線量率が0～1 μSv/hの範囲にデータが多く、1～2.5 μSv/hの範囲にデータが少ないのは、事故直後に急激に空間線量率が減少して1 μSv/h程度になり、その後は徐々に減少したことを示している。地点1以外の地点2～5を含めた回帰係数は、0.982～0.989となり、どれも1に近い値となっている。

また、Figure 5 (B)の地点8についても、線形関係が認められ、2011年7月16日の測定開始からの回帰係数は0.994、95%信頼区間の半値幅は0.003と求められた。空間線量率の0.5～1.0 μSv/hの範囲にデータが見られないのは、除染で空間線量率が1.0 μSv/hから0.5 μSv/hに急に低減したためである。地点8を含めた地点6～15の回帰係数は、0.974～1.004であり、地点1～5と同様でどれも1に近い値となっている。

なお、Figure 5(B)の推定値が1.0と1.5 μSv/h付近については、実測値への当てはまりが悪いデータが多くなっている。これは2012年12月および2013年1月の積雪による影響が原因であると考えられる。

以上のことにより、全地点において、測定開始から2020年7月10日までの全期間の空間線量率の実測値と推定値の回帰係数は1に近く、推定値が実測値とよく合っているといえる。

3.3 長期被ばく線量の推定

Table 2に示した50年間の余剰被ばく線量については、100 mSvを超過している地点はなく、2011年3月24日の空間線量率が約30 μSv/hと最も大きく推定された地点15でも余剰被ばく線量は約85 mSvであり、その他の地点は40 mSv以下となった。Figure 6に除染をしなかった地点1, 2, 15の中から地点1と地点15の余剰被ばく線量を示す。地点15は今回対象の15地点の中で初期空間線量率が最大値の地点である。また、定点または草地を除染した地点3から14で、2013年6月に定点除染した地点8と同じ月に草地除染した地点5の余剰被ばく線量も示す。この図を見ると、原発事故数年から10年程度で余剰被ばく線量が落ち

Table 2 Parameters of two component model from 2020/3/24 and one component model after decontamination, regression coefficients, and extra radiation doses for 50 years at 15 monitoring points

地点 番号	解析 終了日 (除染前)	2成分モデル (2011/3/24～除染前)				1成分モデル (除染後～2020/7/10)			回帰係数± 95%信頼 区間の 半値幅 ^{注2)}	50年間 余剰被ばく 線量 ^{注3)} (mSv)
		初期空間 線量率 ^{注1)} $D_{3/24}$ ($\mu\text{Sv/h}$)	減少速度 が大きい 成分1の 割合 f_1	成分1の 環境 半減期 T_1 (y)	成分2の 環境 半減期 T_2 (y)	除染後の 解析 開始日	除染後の 初期空間 線量率 D_{S0} ^{注1)} ($\mu\text{Sv/h}$)	除染後の 環境 半減期 T_s (y)		
1	2020/7/10	2.51	0.74	1.20×10^{-2}	2.11	(除染なし)	—	—	0.986 ± 0.004	7.8
2	2020/7/10	1.36	0.66	4.32×10^{-2}	2.77	(除染なし)	—	—	0.988 ± 0.004	7.2
3	2013/5/1	3.96	0.67	1.86×10^{-2}	1.44	2013/6/1	0.24	3.23	0.986 ± 0.004	12.3
4	2013/7/1	3.07	0.70	2.61×10^{-2}	1.42	2013/8/1	0.16	2.71	0.982 ± 0.004	8.4
5	2013/6/1	8.27	0.77	1.46×10^{-2}	2.40	2013/7/1	0.59	3.69	0.989 ± 0.005	25.9
6	2015/7/1	10.6	0.78	1.47×10^{-2}	2.10	2015/8/1	0.25	7.24	0.995 ± 0.002	31.5
7	2012/11/1	16.1	0.79	1.21×10^{-2}	2.02	2012/12/1	0.95	3.84	0.974 ± 0.005	40.3
8	2013/6/1	10.9	0.79	1.21×10^{-2}	3.06	2013/7/1	0.44	3.84	0.994 ± 0.003	27.3
9	2013/6/1	5.43	0.76	1.21×10^{-2}	2.36	2013/7/1	0.24	3.84	0.992 ± 0.003	14.4
10	2012/9/1	6.42	0.76	1.22×10^{-2}	1.64	2012/10/1	0.42	2.87	0.986 ± 0.003	14.5
11	2012/10/1	4.20	0.72	1.22×10^{-2}	1.37	2012/11/1	0.34	2.65	0.996 ± 0.002	10.7
12	2012/9/1	11.6	0.77	1.22×10^{-2}	1.41	2012/10/1	0.77	3.52	0.993 ± 0.003	27.4
13	2011/12/1	13.8	0.79	1.21×10^{-2}	1.67	2012/1/1	0.96	2.76	1.004 ± 0.004	23.8
14	2012/12/1	7.03	0.75	1.21×10^{-2}	1.24	2013/1/4 ^{注4)}	0.42	2.92	0.991 ± 0.003	15.5
15	2020/7/10	29.8	0.83	7.45×10^{-2}	2.63	(除染なし)	—	—	0.974 ± 0.005	84.9

注1) 地点1～5の $D_{3/24}$ と除染後の D_{S0} は1日ごとのばらつきが大きいので、最小二乗法で求めた。地点6～15の2011/3/24の $D_{3/24}$ は、地点1～5の $D_{3/24}$ と $D_{7/16}$ の回帰係数より推定した。

注2) 回帰係数を求めた期間は、測定開始日から2020/7/10までの全期間とし、除染が実施された月（1カ月間）は2成分モデルを使用した。

注3) 実測値を優先、実測値がない期間（地点6～15の2011/7/16以前、および全地点の2020/7/10以後）は推定値を使用した。

注4) 除染率の解析開始日は、除染実施日の翌月の1日で統一しているが、2013年以降1/1～1/3は測定をしていないので、地点14の解析開始日は2013/1/1になるところを1/4とする。

着き、それ以上あまり増加しなくなっているのが分かる。50年間の余剰被ばく線量の内訳を見ると、最初の10年間で余剰被ばく線量の割合は、15地点の内、地点6が83%でそれ以外は90%以上と高い割合を占めている。

次にFigure 7に、定点除染をした地点6から13までの地点の50年間の余剰被ばく線量と仮に除染をしなかった場合の50年間の余剰被ばく線量の推定値を示す。除染を行った時期は、福島原発事故後1年半以上経過していて、2成分モデルの成分1の環境半減期(T_1)は 10^{-2} y程度 (Table 2参照)であるため、成分1はほとんど残存していないと考えられる。よって、この時点からの空間線量率を表す式は、1成分モデルが適していると考えられる。

また、実測値からパラメータを推計した結果 (Table 2参照)を見ると、2成分モデルの成分2の環境半減期 (T_2)が除染後の1成分モデルの環境半減期 (T_s)より小さくなる傾向がみられた。空間線

量率が初期の急激な減少の後、事故直後の空間線量率が高い時の環境半減期 T_2 の値を適用すると、線量を低く評価することになると考えられる。そのため、除染をしなかった場合も、事故から数年経って空間線量率が低くなった後の実測値がある場合は、 T_2 ではなく T_s に基づいて計算する方が、実態に合っていると考えられる。

この結果より、除染をした場合の50年間の余剰被ばく線量の低減率は、除染をしなかった場合の1割以下となった。除染率が数割から5割程度であることから考えると、この低減率は低い様に見える。この理由は、対象地点の空間線量率は福島第一原発事故後、ウェザリングにより急速に低減したため、除染の効果が相対的に表れにくくなっているためである。

4. おわりに

福島第一原発の事故後の福島県伊達市の住居地区の空間線量率を、数理モデルを用いて将来の空

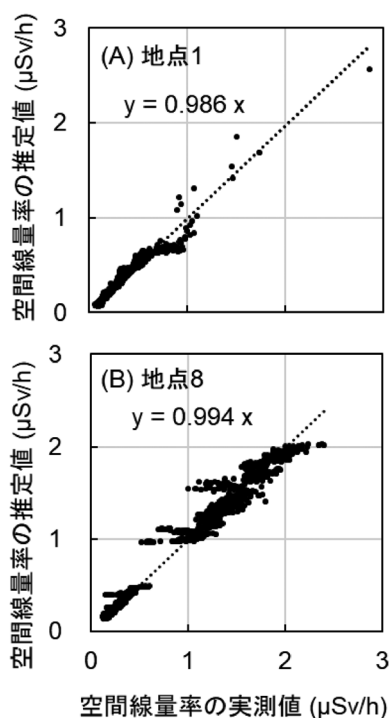


Figure 5 Relation between the measured ambient dose equivalent rates (X axis) and the calculated dose equivalent rates by the equation (1), or the equation (1) and (4) (Y axis) at monitoring point No. 1 (A) and No. 8 (B)

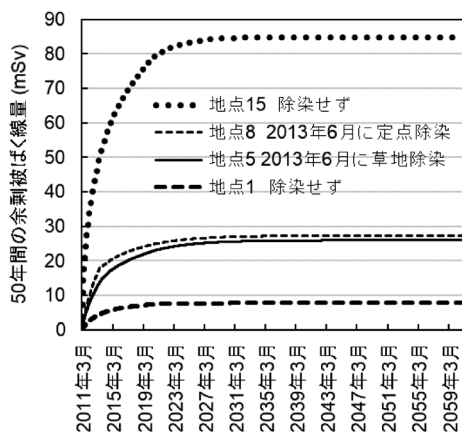


Figure 6 Variations of extra radiation doses at monitoring point No. 1, No. 5, No. 8, and No. 15 for 50 years from May 24, 2011 (The values of 50 years' extra radiation doses are shown in Table 2)

間線量率と長期被ばく線量を推定した。推定には¹³⁴Csと¹³⁷Csの放射性減衰以外に、ウェザリングによる減少として、減少速度が大きい成分1と小

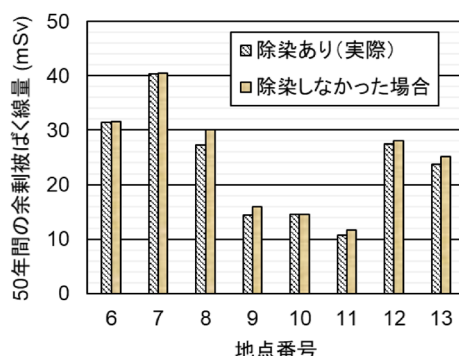


Figure 7 Extra radiation doses for 50 years from May 24, 2011 with/without decontamination at monitoring points from No. 6 to No. 13

さい成分2を考慮する2成分モデルを用いた。また、除染後は空間線量率が低減しているため、1成分モデルを用いた。

成分1と成分2の環境半減期は、それぞれ $1.2 \times 10^{-2} \sim 7.5 \times 10^{-2}$ 年と1.2~3.1年であり、成分2の方が成分1の値より2桁程大きくなった。さらに除染後の1成分モデルの環境半減期は、2.7~7.2年であり、成分2の値より大きい傾向があった。

そして、各地点における50年間の長期の余剰被ばく線量を推定した結果、空間線量率が15地点で最大の地点で約85 mSvで、その他の地点は40 mSv以下となった。また、どの地点でも最初の10年間で50年間の余剰被ばく線量の8割以上を占める推定結果となった。これは原発事故後の最初の10年程度で、空間線量率が急速に低下するためであるといえる。

謝辞

伊達市役所元理事の半澤隆宏氏には、2013年から長年にわたり、調査だけでなく色々な面で世話になった。そして、伊達市放射能対策課には様々な情報を提供して頂いた。また、データの統計的な取り扱いについては、龍谷大学先端理工学部岸本直之教授にご教授頂いた。さらに、査読して下さい下さった先生方には、非常に丁寧に見て頂き、ご指摘を多数頂いた。ここに厚くお礼申し上げます。

本研究はJSPS科研費JP15H02868の助成を受けたものです。

参考文献

Date City (2014) Higashinohon-daishinsai/Genpatsu-

- Jiko, Date city report since 2011.3.11. (in Japanese)
伊達市 (2014) 東日本大震災・原発事故伊達市3年の記録, 伊達市.
- Date City (2020) Date city hoshasen map, Dateshi shimin katsudo shien center, <http://www.date-civilsupport.jp/?p=461> (Access: 2020, August, 13) (in Japanese)
- 伊達市 (2020) 伊達市放射線測定マップ, 伊達市市民活動支援センター, <http://www.date-civilsupport.jp/?p=461> (アクセス日: 2020年8月13日)
- Fujinaga, A., Murayama, R., and Kishikawa, H. (2017) How do the residents understand the information about the Fukushima nuclear disaster, and how do they act? - Results of group interviews to Fukushima residents and voluntary evacuees, *ATOMOS of Atomic Energy Society of Japan*, **59**(2), 99–102. (in Japanese)
- 藤長愛一郎, 村山留美子, 岸川洋紀 (2017) 原発事故に関する情報を住民がどのように理解し, 行動したのか. - 福島在住者および自主避難者へのグループインタビューで分かったこと -, 日本原子力学会誌, **59**(2), 99–102.
- Fukushima Prefecture and Tokyo Electric Power Co. (2010) Genshiryoku hatsudensho shuhen kankyo hoshano sokutei kekka hokokusho, Heisei 22 nendo (p.128), reiwa 2 nen 12 nichi ni teiseiban, <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/369478.pdf> (Access: 2020, August, 13) (in Japanese)
- 福島県, 東京電力 (2010) 原子力発電所周辺環境放射能測定結果報告書, 平成22年度 (p.128), 令和2年2月12日に訂正版, <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/369478.pdf> (アクセス日: 2020年8月13日)
- Fukushima Prefecture (2011) Kenhoku-chiho kankyo hoshano sokutei kekka (zanteichi) heisei 22・23 nendo, kennai kaku shichoson kankyo hoshano sokutei kekka, https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec_file/monitoring/m-2/zenken0311-0331.pdf (Access: 2021, May, 15) (in Japanese)
- 福島県 (2011) 県北地方 環境放射能測定結果 (暫定値) 平成22・23年度県内各市町村環境放射能測定結果, https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec_file/monitoring/m-2/zenken0311-0331.pdf (アクセス日: 2021年5月15日)
- Gale, H.J., Humphreys, D.L.O, and Fisher, E.M.R. (1964) Weathering of caesium-137 in soil, *Nature*, **49**16, 257–261.
- Genshiryoku Saigai Taisaku Honbu (2011) Genzai no kukansenryoritsu kara shourai no kukansenryoritsu wo yoso suru kangaekatanitsuite, Dai 64 genshiryoku anzen iinkai (Heisei 23 nen 8 gatsu 24 nichi), Shiryō dai 1-1 go, <http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/8382007/www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/shidai/genan2011/genan064/siryo1-1.pdf> (Access: 2020, August 13) (in Japanese)
- 原子力災害対策本部 (2011) 現在の空間線量率から将来の空間線量率を予測する考え方について, 第64回原子力安全委員会 (平成23年8月24日), 資料第1-1号, <http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/8382007/www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/shidai/genan2011/genan064/siryo1-1.pdf> (アクセス日: 2020年8月13日)
- Genshiryoku Saigai Taisaku Honbu (2012) Hinan shiji kuiki no minaoshi niokeru Kijun (Nenkan 20mSv Kijun) nitsuite, Dai 6 kai Genshiryoku karano Fukushima Fukko Saisei Kyogikai) (Heisei 24 nen 7 gatsu 1 nichi), Sankō Shiryō 1, https://www.reconstruction.go.jp/topics/11_6kijyun.pdf (Access: 2020, August, 13) (in Japanese)
- 原子力災害対策本部 (2012) 避難指示区域の見直しにおける基準 (年間20mSv基準) について, 第6回原子力災害からの福島復興再生協議会 (平成24年7月1日), 参考資料1, https://www.reconstruction.go.jp/topics/11_6kijyun.pdf (アクセス日: 2020年8月13日)
- Genshiryoku Saigai Genchi Taisaku Honbu (2012) Date-shi niokeru tokutei hinan kansho chiten no kaijo nitsuite, Ministry of economy, trade and industry, https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/121214/20121214_04.pdf (Access: 2020, August, 13) (in Japanese)
- 原子力災害現地対策本部 (2012) 伊達市における特定避難勧奨地点の解除について, 経済産業省, https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/121214/20121214_04.pdf (アクセス日: 2020年8月13日)
- IAEA (2010) Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments technical reports series, No. 472.
- Imanaka, T., Endo, S., Sugai M., and Ozawa S. (2011) Fukushima genpatsu jiko ni tomonau litate-mura no hoshasen osen chosa hokoku, *Kagaku*, **81**(6), 549–

600. (in Japanese)
- 今中哲二, 遠藤暁, 菅井益郎, 小澤祥司 (2011) 福島原発事故にともなう飯館村の放射線汚染調査報告, 科学, **81**(6), 549–600.
- Imanaka, T., Endo, S., Sugai, M., Ozawa, S., Shizuma, K., and Yamamoto, M. (2012) Early radiation survey of iitate village, which was heavily contaminated by the Fukushima daiichi accident, Conducted on 28 and 29 March 2011, *Health Physics*, **102**(6), 680–686. DOI: 10.1097/HP.0b013e31824cfe18.
- Japan Radioisotope Association (2011) *Isotope techo 11-han*, Japan Radioisotope Association (in Japanese)
- 日本アイソトープ協会 (2011) アイソトープ手帳 11 版, 社団法人日本アイソトープ協会
- Kankyo WG Date (2017) Sekisetsu niyoru Kukan-senryoritu no Teika nitsuite, Hokokusho, “Date-shi Kankyo Hoshasen Monitoring 2,000 nich no Kiroku”, 30. (in Japanese)
- 環境 WG 伊達 (2017) 積雪による空間線量率の低下について, 報告書「伊達市環境放射線モニタリング 2,000 日の記録」, 30.
- Kankyo WG Date (2019) Hokokusho, “Date-shi Kankyo Hoshasen Monitoring 3,000 nich no Kiroku”, 8–26. (in Japanese)
- 環境 WG 伊達 (2019) 報告書「伊達市環境放射線モニタリング 3,000 日の記録」, 8–26.
- Kankyo WG Date (2021) Hokokusho, “Date-shi Kankyo Hoshasen Monitoring 10 nenkan no Kiroku”, 2–3. (in Japanese)
- 環境 WG 伊達 (2021) 報告書「伊達市環境放射線モニタリング 10 年間の記録」, 2–3.
- Karlberg, O. (1987) Weathering and migration of Chernobyl fallout in Sweden, *Radiation Protection Dosimetry*, **21**, 75–78.
- Kinase, S., Takahashi, T., and Saito, K. (2017) Long-term predictions of ambient dose equivalent rates after the Fukushima daiichi nuclear power plant accident, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **54** (12), 1345–1354.
- Likhtarev, I.A., Kovgan, L. N, Jacob, P., and Anspaugh, L.R. (2002) Chernobyl accident: retrospective and prospective estimates of external dose of the population of Ukraine, *Health Physics*, **82**, 290–303.
- Ministry of the Environment (2011) Hoshasei Busshitsu Osen Taisho Tokusoho ni Motozuku Osen Haikubutsu Taisaku Chiiki, Josen Tokubetsu Chiiki oyobi Osenjokyo Juten Chosa Chiiki no Shitei ni tsuite (Oshirase), Hodo Happyo Shiryō, Heisei 23 nen 12 gatu 19 nichi, <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14598> (Access: 2020, August, 13) (in Japanese)
- 環境省 (2011) 放射性物質汚染対処特措法に基づく汚染廃棄物対策地域, 除染特別地域及び汚染状況重点調査地域の指定について (お知らせ), 報道発表資料, 平成 23 年 12 月 19 日, <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14598> (アクセス日: 2020 年 8 月 13 日)
- Nuclear Safety Commission (2008) Kankyo hoshasen monitoring shishin, heisei 20 nen 3 gatsu (Heisei 22 nen 4 gatsu ichibu kaisei) <https://www.nsr.go.jp/data/000168451.pdf> (Access: 2021, October, 1)
- 原子力安全委員会 (2008) 環境放射線モニタリング指針, 平成 20 年 3 月 (平成 22 年 4 月一部改訂), <https://www.nsr.go.jp/data/000168451.pdf> (アクセス日: 2021 年 10 月 1 日)
- Nuclear Regulation Authority (2014) Kinkyuji monitoring ni tsuite (Genshiryoku saigai taisaku shishin hosoku sanko shiryō), Heisei 26 nen 1 gatu 29 nichi (Reiwa gan nen 7 gatsu 5 nichi ni saigo no ichibu kaitei), <https://www.nsr.go.jp/activity/monitoring/monitoring6-1.html> (Access: 2021, May, 7)
- 原子力規制庁 (2014) 緊急時モニタリングについて (原子力災害対策指針補足参考資料), 平成 26 年 1 月 29 日 (令和元年 7 月 5 日に最後の一部改訂), <https://www.nsr.go.jp/activity/monitoring/monitoring6-1.html> (アクセス日: 2021 年 5 月 7 日)
- Saegusa, J., Yoda, T., Murakami, M., and Takeishi, M. (2017) Analysis of ambient-dose-rate trends in Fukushima - ecological half-life, effect of snow covering -, *Journal of the Society for Remediation of Radioactive Contamination in the Environment* **5**(2), 79–93. (in Japanese)
- 三枝純, 依田朋之, 村上晃洋, 武石稔 (2017) 福島県内の空間線量率トレンドの解析 - 環境半減期, 積雪の影響 -, 環境放射線除染学会誌, **5** (2), 79–93.
- Smith, J.T., Cross, M.A., and Wright, S.M. (2002) Predicting transfers of Cs-137 in terrestrial and aquatic environments, *Radioprotection*, **37**, (C1), 37–42.
- Torii, T., Sanada, Y., Sugita, T., Kondo, A., Shikaze, Y.,

Takahashi, M., Ishida, M., Nishizawa, Y., and Urabe, Y. (2012) Investigation of radionuclide distribution using aircraft for surrounding environmental survey from Fukushima dai-ichi nuclear power plant, JAEA-Technology, No. 2012-036 (in Japanese)

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 (2012) 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, No. 2012-036.