

# 個人線量計・測定論文の諸問題

---

オープンフォーラム

福島原発事故後の科学—個人線量測定論文をめぐって @ 東大

2019年9月14日

濱岡豊

[hamaoka@fbc.keio.ac.jp](mailto:hamaoka@fbc.keio.ac.jp)

慶應義塾大学商学部

1

## Who am I?

---

### ■ 経歴

■ 広島出身

■ 大学院(修士)では 原子力工学専攻修了

■ 研究内容は核融合炉への超伝導マグネット用材料についての基礎研究

■ その後 シンクタンク勤務を経て

### ■ 現在

■ 慶應義塾大学商学部 でマーケティング・リサーチなどを担当

### ■ 所属学会

■ マーケティング・サイエンス学会 など

■ 原子力市民委員会 第1部会(福島原発事故部会) メンバー

## 内容

---

- データ分析入門
  - はじめに
  - レビュー対象論文
  - 個人線量計の測定結果
  - 空間線量と個人線量の関係
  - 関連研究
  - まとめ
  - 参考文献
- 

3

## データ分析入門

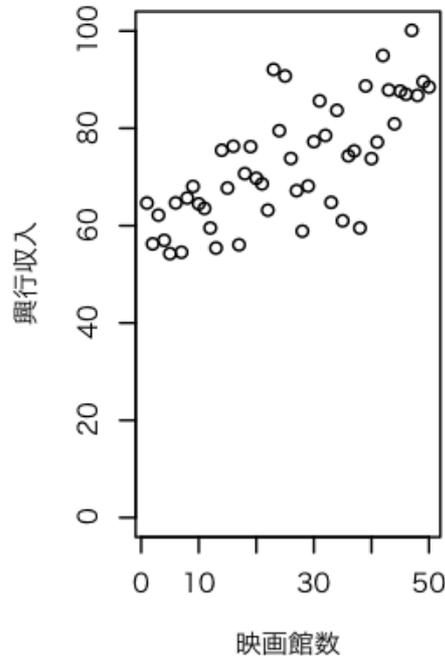
---

- 映画を公開予定である。
  - 30館で公開予定、目標は興行収入80である。目標は達成できそうか？
  - 過去50本の映画の実績をみると、(上映)映画館数が多いほど、興行収入は増加するような気がする。
    - このような場合、どのようなデータを用いて、どのような分析をすればよいか？
    -
- 

4

## 回帰分析

- 過去の50本の映画について、(上映)映画館数と興行収入をプロット。



5

## 回帰分析

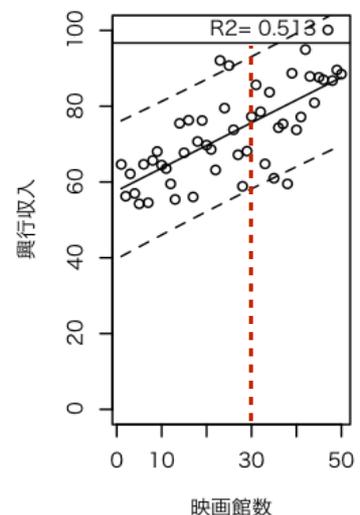
- このデータに直線をあてはめる。

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x$$

興行収入 = 57.7 + 0.599 \* 映画館数 (N=50, R<sup>2</sup>=0.513)

(23.40)\*\*\* (7.12)\*\*\* 係数の下の括弧内はt値

- 0.599: 映画館を1館増加すると、これだけ収入増加
- t=7.12\*\*\*: 絶対値が2より小さいので、誤差を考慮しても、上記の値は0ではなさそう。
- R<sup>2</sup>=0.513 このモデルでデータの変動の51.3%を説明している。
- Q 予測(意思決定)に用いるにはR<sup>2</sup>の値はどうなることが望ましいか?



6

# いろいろな状況

## ■ いずれも50本の映画のデータ

■ 実線:あてはめた回帰直線

■ 破線:95%予測区間

■ 予測を100回行ったとき、この区間内に95回は予測値が含まれる。

■  $R^2$ が高いほど予測の精度は高くなる。

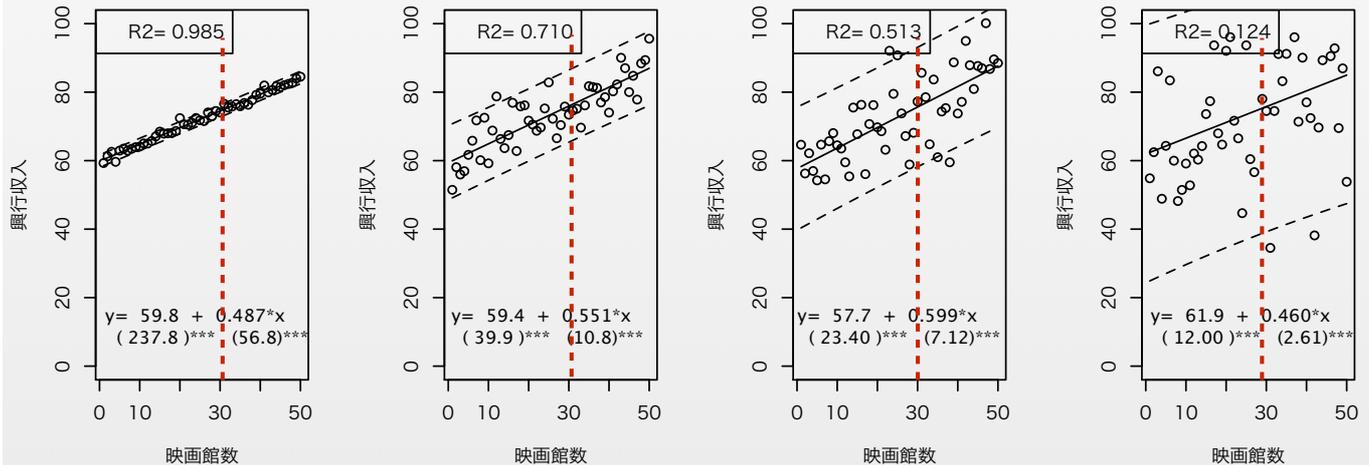


図 4つの状況と回帰直線、予測区間

7

■ Qここまでの映画では最大50館程度しか公開されていなかった。頑張って、400館公開したときの予測値はどうなるか？

■

8

■ 50本の映画のデータを用いて推定された結果から、最大500館まで公開した時の収入を予測。

■ 予測に用いたデータ区間よりも離れる程、予測区間は拡大(予測の精度が下がる)。

■  $R^2$ が低い程、これが顕著に。

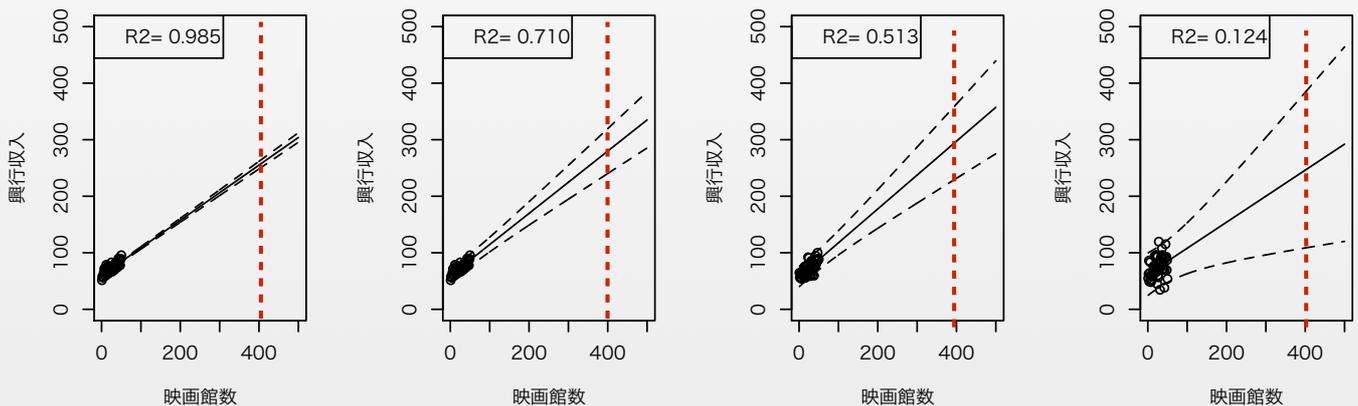


図 4つの状況について、500館まで予測した結果

9

## データ分析入門のまとめ

■ 回帰分析:二つの変数間の関係を分析

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x$$

■ 診断情報

■ モデル全体

■  $R^2$ :モデルのあてはまりのよさを表す。1に近いほど、よりあてはまりがよい。

■ パラメーター

■ t値:サンプルサイズが大きい場合、この値が2を越えていると、傾きは0ではないと  
いってよい。

■ 実用上は $R^2$ がたかいことが望ましい。

■ 結果の提示

■ 論文などでは、これらの情報を提示すべき。

■ 予測

■ 予測にも誤差が生じる。

■ 予測に用いたデータ区間よりはずれるほど、予測の誤差は大きくなる。

10

# はじめに:レビューする論文(濱岡 2019+α)

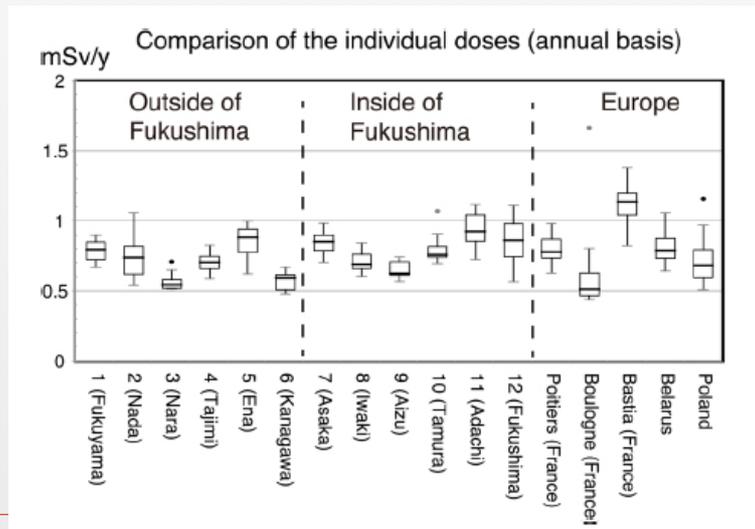
- 個人線量計の測定結果
  - Dシャトル
    - 福島などの高校間比較 Adachi et al.(2015)
    - 南相馬などの公務員間比較 Tsubokura et al.(2018)
- 空間線量と個人線量の関係
  - 航空機モニタリング-Dシャトル
    - 個人平均 Naito et al. 2015, 2016, 2017)
  - 航空機モニタリング-ガラスバッジ
    - 個人平均 Miyazaki and Hayano (2017a)
  - 地上シンチレーションメーター-Dシャトル
    - 地区平均: 伊達市(2013)
    - 測定のみで分析せず: Tao et al.(2019)
- 除染の効果
  - Miyazaki and Hayano (2017b): 累積被曝についても
  - Tsubokura et al.(2019)
- 関連研究
  - バッジの装着状況と線量 Nomura et al.(2015)
  - 屋内での減衰 Yoshida et al.(2015)
  - 航空機モニタリング、地上で測定した空間線量 奥村(2019)

## ■ 個人線量計

- ガラスバッジ(斉藤、斉藤2011)
  - 蛍光ガラス素子に放射線が照射されると蛍光中心が形成
  - レーザー光を当てるとフォトルミネッセンス現象で発光
  - 3ヶ月毎に測定
- D-シャトル(Suzuki and Ohguchi 2018)
  - 半導体方式の個人線量計
  - 線量率を測定、1時間毎に記録。本体には表示機能は無いが、読み取り機に差しこむと1日分、過去100日間の累積線量を表示できる。パソコンにつなぐことによって、記録された1時間あたりの被曝量100日×24時間分を取り出し可能。

## 福島などの高校間比較:Adachi et al.(2015)

- 福島県内、国内および欧州の高校生を中心として個人線量計で測定した線量率(もしくはそれを累積した被曝量)を比較したものである。計測に参加した高校生など200名以上が著者
- Hayano(早野)氏がcorrespondence author
- 2週間測定された個人線量率を高校別に集計することによって、各高校(地域)間での差はないと結論



13

### ■ サンプルの代表性がない

#### ■ 恣意的な対象地域(高校)選択

- 福島については避難地区外の線量が低い地域
- 国内ではバックグラウンドの高い地域から高校を選ぶ
- フランス、ポーランドでは自発的な参加高を選ぶ
- チェルノブイリ事故の影響を受けたベラルーシを含める。

#### ■ 参加者の選択

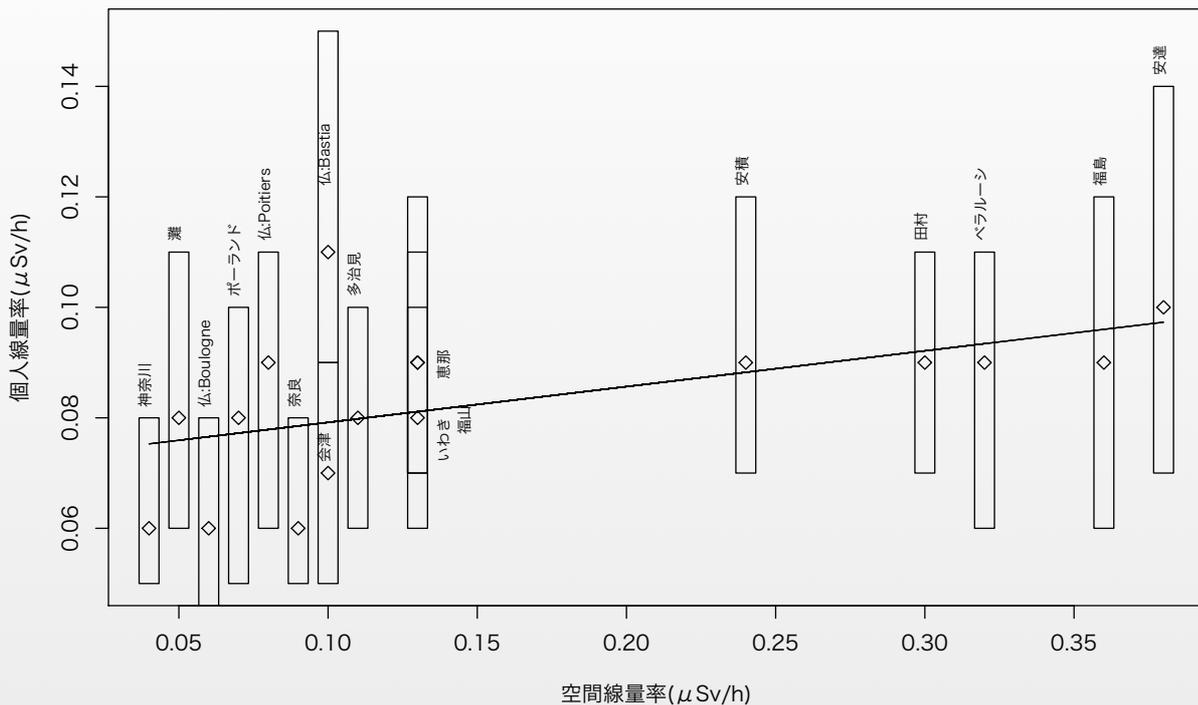
- 高校生等を選択する際も、主に自発的な参加を求めており、各地域の代表ともいえない。

### ■ 分析の問題

- 同一人物から複数回測定した値であることを無視して集計
- 箱ひげ図を描いただけで検定もしていないにも関わらず、有意差はないと結論
- 平均値や分散も表示されていない
  - 平均値の差の検定を読者がつい検証できない。
  - 統計的な手続きをまったく無視している。
- 福島では例えば屋外での行動を避けるといった防護的な行動を行っている可能性もあるが考慮されていない。

14

## 各地域のバックグラウンドと個人線量測定値(中央値)の関係



縦軸の矩形の下部、上部はそれぞれ25、75パーセンタイル(同論文Tab.2)。菱形は中央値。  
 右上がりの直線は次式の回帰直線の推定結果。傾きの係数のt値= 2.40、5%水準で有意。  
 個人線量率(中央値)= 0.072+ 0.064×空間線量率

## 市役所職員間比較:Tsubokura et al.(2018)

- 南相馬市については、旧避難地区、そうでない地区に居住している者を選ぶ
- 県外についてはAdachi et al.と同様にバックグラウンドが高いとされる福山市、南砺市、多治見市を選んだ。
- 比較的属性が類似しているとして、各市の職員25名ずつ。
  - Dチャトル、行動記録(日記)
- 個人から複数回測定されたことを考慮したランダム効果モデルで推定。  
各市役所間の個人線量率の差(μSv/h)

**Table 3.** Differences in the mean personal dose equivalent rate between municipalities, adjusted for covariates<sup>a</sup>

Differences in external dose rate	μSv/h	P value
Nanto versus Minamisoma	0.001 (-0.009 to 0.010)	1.000
Fukuyama versus Minamisoma	-0.005 (-0.015 to 0.004)	0.829
Tajimi versus Minamisoma	-0.010 (-0.020 to -0.001)	<0.05 <sup>b</sup>
Fukuyama versus Nanto	-0.006 (-0.016 to 0.004)	0.585
Tajimi versus Nanto	-0.011 (-0.021 to -0.001)	<0.05 <sup>b</sup>
Tajimi versus Fukuyama	-0.005 (-0.015 to 0.005)	1.000

<sup>a</sup> Adjusted for behaviours, time and interaction term of 'behaviour' and 'municipality'.

<sup>b</sup> P value of <0.05 is considered statistically significant.

- 
- 各地区からの代表性のあるサンプルではない
  - 比較的線量が高いことから選んだ多治見市よりも南相馬市の方が個人線量率が有意に高かったにも関わらず、南相馬市における外部線量は、他の市とcomparableであるという結論。
  
  - レビューする論文の中では唯一、個人×時間レベルのデータをそのまま用いて分析しているが、モデルのあてはまりに関する情報はまったく与えられていない。
  - 繰り返しデータを分析するモデルとしては、ここで用いられたランダム効果モデル以外に、個人別に定数として推定する固定効果モデル、傾きの係数がランダムに変動するランダム係数モデルなどもある。それらとのモデルのあてはまりの比較をすべき
- 

17

## 空間線量と個人線量:Naito et al. (2015, 2016, 2017)

---

- 線量、位置、行動の記録
  - 参加者に個人線量計とあわせてGPSも装着してもらう。
    - GPS位置情報+航空機モニタリングによる空間線量率を使って、各個人の空間線量率を同定
  - 一時間毎の行動(自宅、屋外などどこにいたか)を日記として記録してもらう。
  - 個人レベルで1時間毎の空間線量、個人線量、遮蔽状況(自宅、屋外などどこにいたか)を収集。
  
- 分析の際は、それぞれ個人別に平均値を算出。それを用いて回帰分析。

(個人平均)個人線量率 $\langle H_p(10) \rangle = \beta_0 + \beta_1$  (個人平均)空間線量率 $\langle H^*(10) \rangle$

- (自宅、自宅以外の屋内、屋外、交通機関、その他)、自宅、屋外にいた時点でのデータに限定して同様に分析することによって、遮蔽効果も考慮
- 

18

## 推定結果

### ■ Naito et al.(2015)

- 個人別に集計した値を用いて単回帰分析。  $\langle Hp(10) \rangle = 0.19 \times \langle H^*(10) \rangle$  ( $R^2=0.70$ )

### ■ Naito et al.(2016)

- 上と同様の分析を全サンプル、自宅、屋外でのサンプルに限定し推定。それぞれ(個人平均)個人線量率は(個人平均)空間線量率の18%, 14%, 36%となったとあるが、パラメータや $R^2$ は明示されていない。
- データが公開されているので、再分析。屋外での行動時間が0の者は「屋外」での分析からは除外されるのでサンプルサイズが異なる。

- 全体  $\langle Hp(10) \rangle = 0.065 + 0.172 \langle H^*(10) \rangle$  ( $R^2=0.441$ ,  $N=142$ )

- $(6.72)^{***}$   $(10.51)^{***}$

- 自宅(Home)  $\langle Hp(10)_{Home} \rangle = 0.076 + 0.118 \langle H^*(10)_{Home} \rangle$  ( $R^2=0.351$ ,  $N=142$ )

- $(9.30)^{***}$   $(8.70)^{***}$

- 屋外(Outdoor)  $\langle Hp(10)_{Outdoor} \rangle = 0.032 + 0.395 \langle H^*(10)_{Outdoor} \rangle$  ( $R^2=0.547$ ,  $N=119$ )

- $(1.53)$   $(11.88)^{***}$

### ■ Naito et al.(2017)

- 自宅(Home)  $\langle Hp(10)_{Home} \rangle = 0.15 \langle H^*(10)_{Home} \rangle$  ( $R^2=0.80$ ,  $N=30$ )

- 屋外(Outdoor)  $\langle Hp(10)_{Outdoor} \rangle = 0.18 \langle H^*(10)_{Outdoor} \rangle$  ( $R^2=0.230$ ,  $N=32$ )

19

## 問題点

- サンプルの代表性がなく、サンプルサイズも比較的小さい。

### ■ Naito et al.(2015)

- 福島県内の住民26名
- 屋外労働者(主に農家)17名、7 屋内労働者、その他2名)。
- 2013年9月20日~11月7日の 3~10日間。

### ■ Naito et al.(2016)

- 福島県内の住民142名(フルタイムの農家70名, パートタイムの農家8名、オフィスワーカー35名、自営業6名、不明17名)。
- 2013年9月~2015年3月の3~14日間。
- 29,550 データポイント,

### ■ Naito et al.(2017)

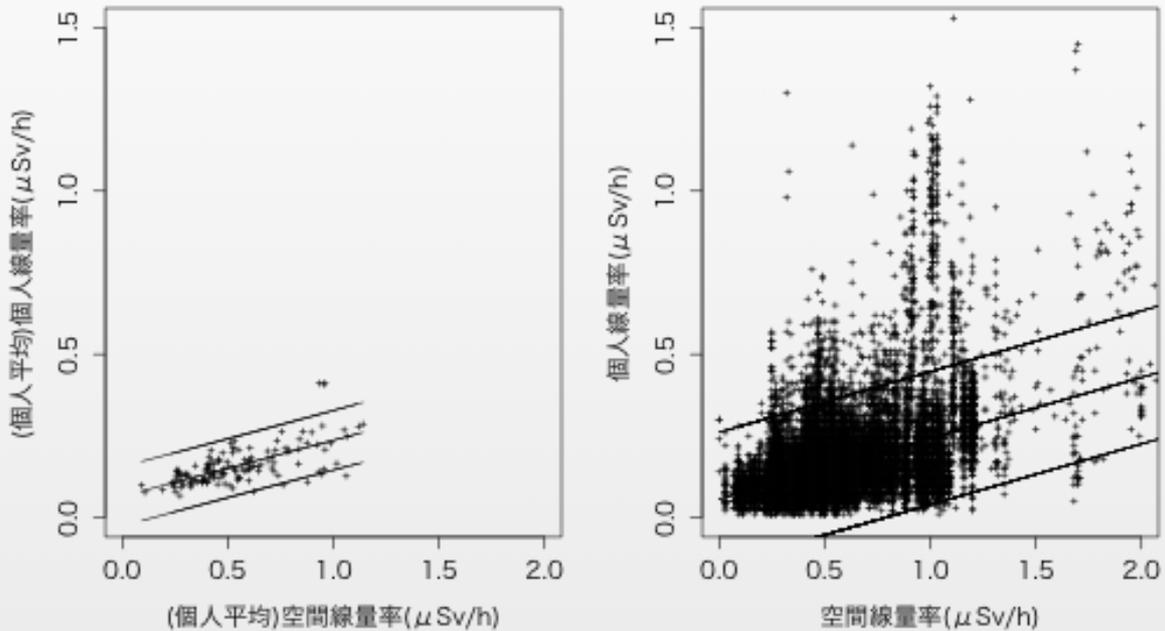
- 飯舘村の住民38名
- 2015年9月~11月の5~14日間。
- 10,366データポイント

20

■ 一時間毎のデータを収集したにも関わらず、個人別に集計

(a)個人平均(N=142)

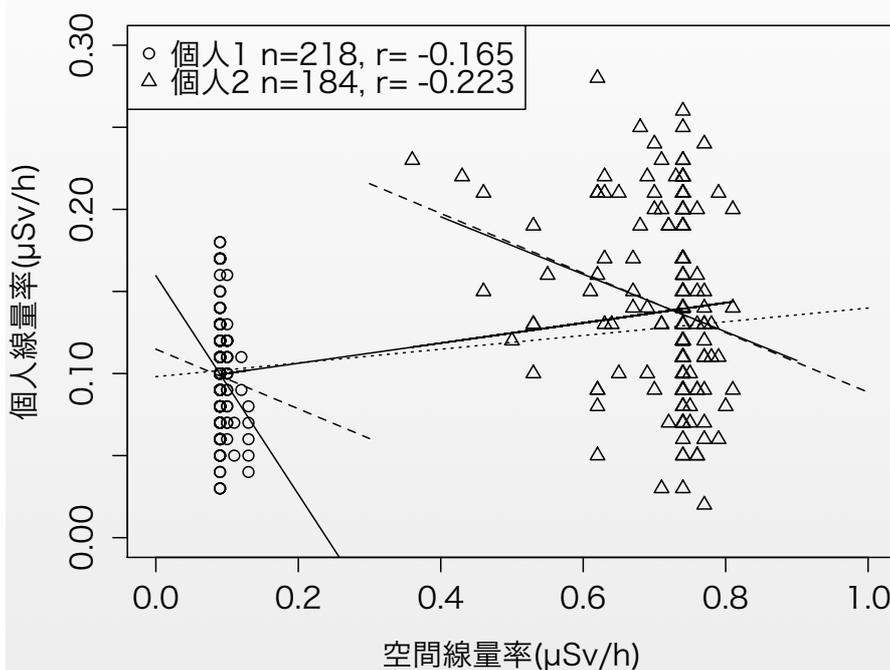
(b)生データ(N=28,035)



注)3本のうち中心の直線が回帰直線。上下は95%予測区間。いずれも個人線量率を空間線量率で説明した結果。

図2 Naito et al.(2016)データの散布図と回帰直線、予測区間

## 集計バイアス(ecological fallacy)の可能性



注)2人分の測定値。直線は以下の回帰分析の推定結果。

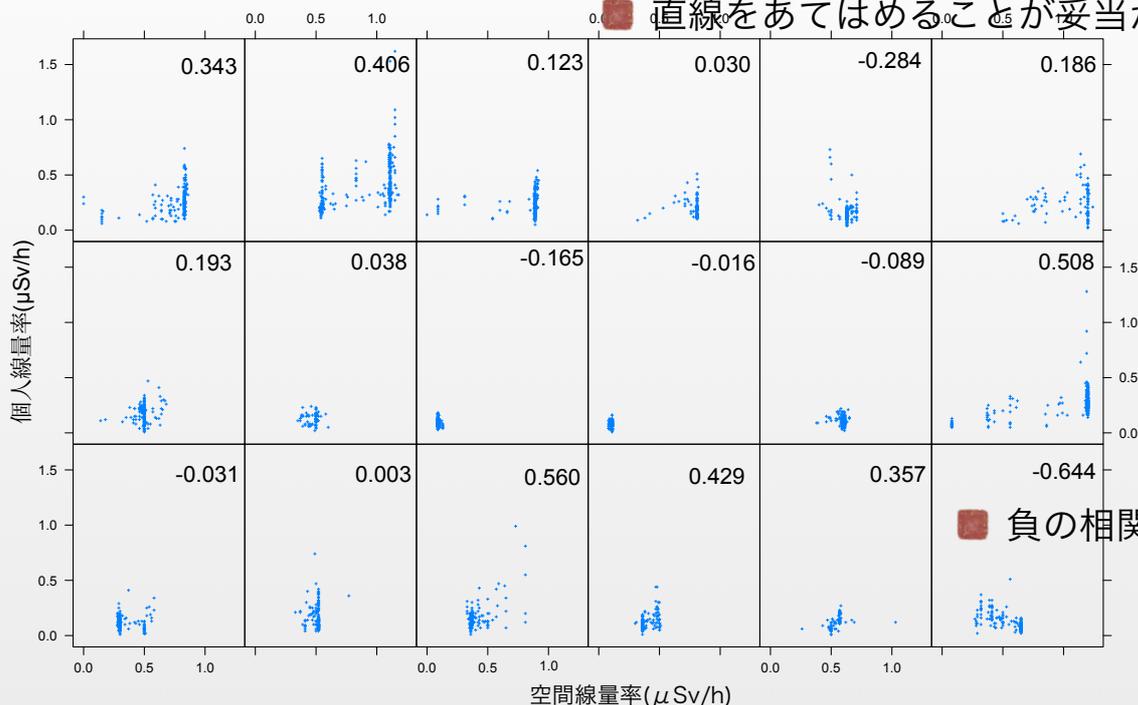
- ・右上がりの実線: 個人ごとに平均値を計算し、平均値を用いて推定。
- ・右上がりの点線: 個人レベルのデータ(n=402)で、個人を無視して推定。
- ・各個人を通る右下がりの破線: 同、個人によって切片のみが異なるとして推定。
- ・各個人を通る右下がりの実線: 同、個人によって切片、傾きとも異なるとして推定。

図 集計バイアスの実例

# 測定の妥当性

■ 個人ごとに生データを用いて、空間線量率—個人線量率をプロット

■ 直線をあてはめることが妥当か??

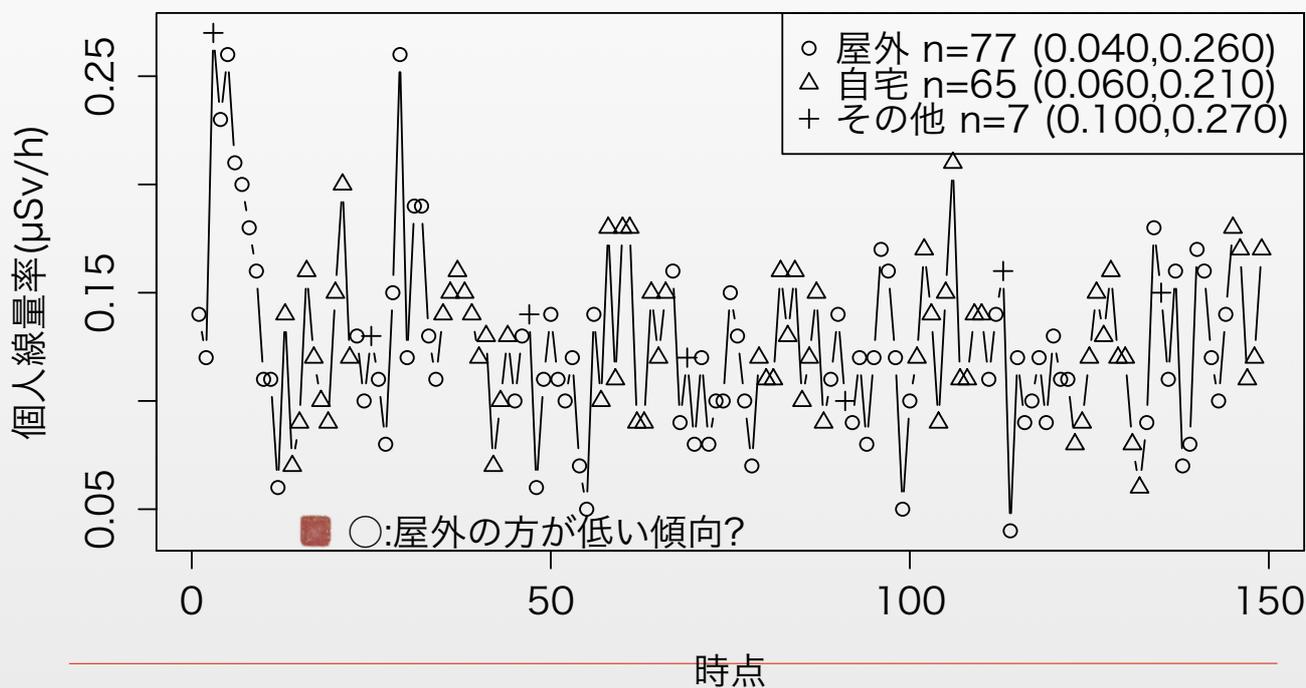


■ 負の相関??

注》公開データに含まれている個人IDが小さい18名についてプロットした。

図5 Naito et al.(2016)参加者の空間線量率—個人線量率の例

## 空間線量率の変動がゼロの方の個人線量率の時系列プロット



# 全員分



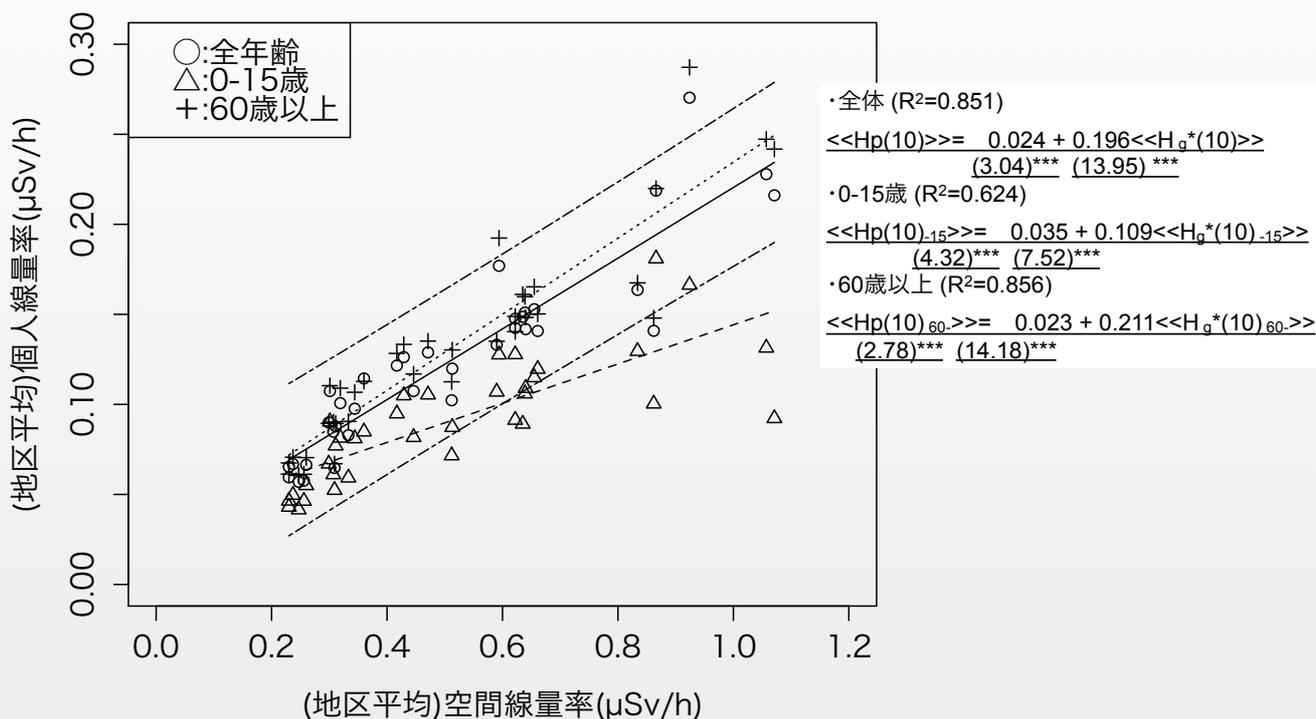
## (地区平均)空間線量-(地区平均)個人線量の分析:伊達市(2013)

- 2012年10月からの1年間、伊達市民にガラスバッジを装着してもらい、個人線量を測定。
- 空間線量としては、同市内744箇所(1kmメッシュ)の地表面1mをNaIシンチレーション・サーベイメーターで測定。
- 空間線量率については個人レベルでは測定されていないため、個人線量および空間線量率を市内の大字別に集計
- (地区平均)個人累積線量 (mSv)、(地区平均)空間線量率 $\langle\langle Ha^*(10) \rangle\rangle$  ( $\mu\text{Sv/h}$ )を算出。後者を用いて、屋外に8時間、遮蔽係数0.4の木造住宅内に16時間いると仮定し、空間線量から予測される1年間の追加被曝量(以下、予測線量)を次式で計算した。

(地区平均) 予測年間追加被曝量(mSv)=

$$\{(\text{地区平均})\text{空間線量率}-\text{バックグラウンド}0.04\mu\text{Sv/h}\} \times (8\text{時間}+0.4 \times 16\text{時間}) \times 365\text{日}/1000$$

(地区平均)予測年間累積被曝量 $=\beta_0+\beta$  (地区平均)空間線量率+誤差



出所)伊達市(2013)のデータより作成。同資料では個人線量は1年間の累積量(mSv)が掲載されているが、それに1000/(365\*24)を乗じて算出した。

実線は全年齢、破線は0-15歳、点線は60歳以上の回帰直線(N=36地区)。推定結果は表1を参照のこと。実線を挟む二つの平行な一点鎖線は全年齢の回帰直線の95%予測区間。空間線量率は他の研究(航空機モニタリング)と異なり、地上での測定値。

27

- ここでの分析はNaito et al.の分析よりも集計度の高い「地区平均」レベルでの分析結果であり、この結果を個人レベルにあてはめることは不適切。このことは、この行政資料でも自覚している。
- 「一方で、生活パターンによっては、上述の推計値よりも個人被ばく線量が高くなる人も一部存在しうることには注意が必要である。また、ここで用いている空間線量率は、個人の住宅が位置する地域の平均的な空間線量率であり、平均的な空間線量率と個人被ばく線量を結びつけることについても十分に注意が必要である。(復興庁等 2014, p.9)」

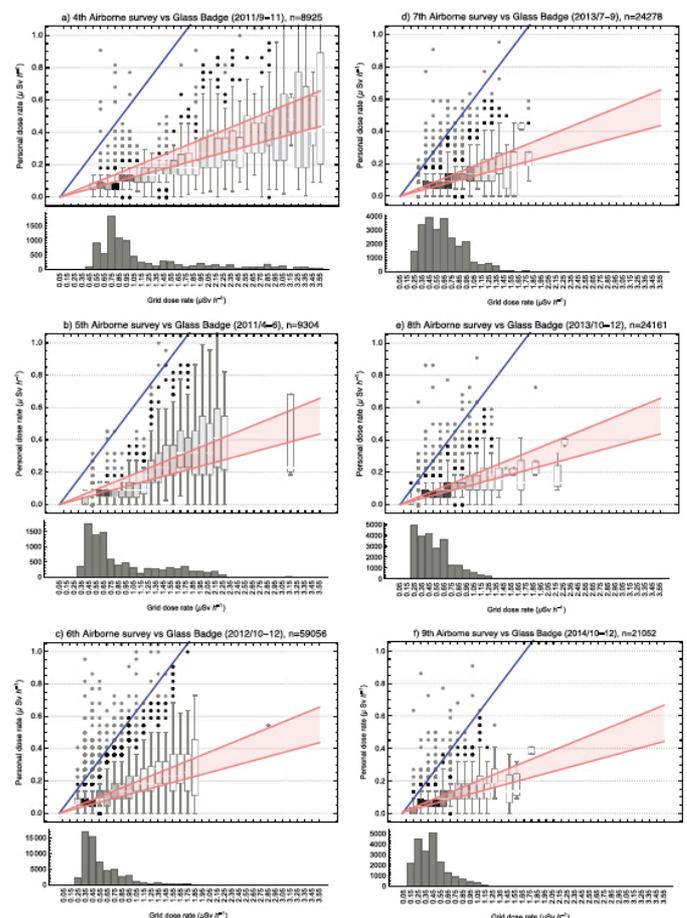
# Miyazaki and Hayano(2017a)

- 伊達市(2013)で用いたデータの他に、その前後に行われた調査結果も含めて分析。
- 空間線量については、同時期に行われた航空機モニタリングでのグリッド空間線量を参加者の住所とマッチング。
- 個人別に(個人平均)個人線量率<Hp(10)>と、(個人平均)空間線量率<H\*(10)>を算出し、これらの比の平均を算出。

$$\langle c \rangle = \langle \langle Hp(10) \rangle / \langle H^*(10) \rangle \rangle = 0.15 \pm 0.03$$

- 「ガラスバッジの線量は、住む場所の航空機モニタリング調査による空間線量率に良く比例し、その比例係数はおおよそ0.15倍でした。式で表すと、「ガラスバッジの線量(1時間あたりに換算) = 0.15 × 航空機モニタリング調査による空間線量率」となります。(中略) 実際の測定結果にもとづく解析によって得られた比例係数0.15は、環境省が2011年に採用した空間線量率から実効線量への換算係数0.6(「実効線量 = 0.6 × 空間線量」で示されます)が、結果的に4倍ほど安全側に立つ係数であったことを示しました。(宮崎真(2017))
- 航空機モニタリング(2011-14年の4-9次)は文字通り上空から測定された線量を直径約300mから1500mの円内の地上1mでの空間内で平均化したもの(250m × 250 m グリッドデータとして公開)であり、個人の値として用いることには注意が必要

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		2011 Sep - Nov N = 8989
	Sep-Nov	1.Ages 0~15 2.Pregnant women 3.the specific spots recommended for evacuation	4 <sup>th</sup> (November)	2012 1Q N = 9304
	Dec-Feb			
2012	Q1 (Apr-Jun)		5 <sup>th</sup> (June)	2012 3Q N = 59056
	Q2 (Jul-Sep)	All citizens		
	Q3 (Oct-Dec)		6 <sup>th</sup> (November)	
	Q4 (Jan-Mar)			
2013	Q1			2013 2Q N = 24278
	Q2	1.Ages 0~15 2.Pregnant women 3.Zone A&B 4.Zone C	7 <sup>th</sup> (September)	
	Q3		8 <sup>th</sup> (November)	
	Q4	random sampling + applicant		2013 3Q N = 24162
2014	Q1			2014 3Q N = 21080
	Q2	1.Ages 0~15 2.Pregnant women 3.Zone A&B 4.Zone C	9 <sup>th</sup> (November)	
	Q3			
	Q4	random sampling + applicant		
2015	Q1			

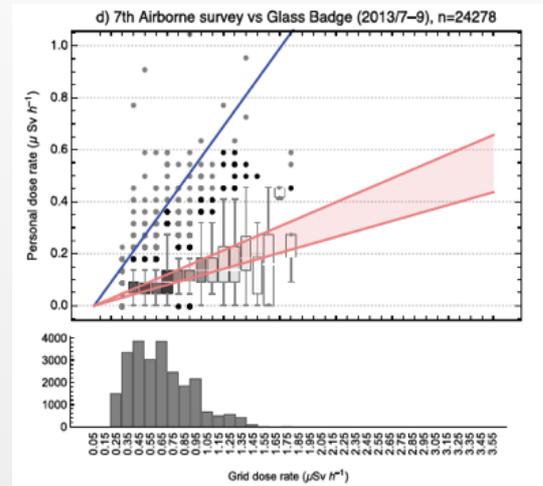


## ■ 説明や記述統計の不足

- $\langle c \rangle = 0.15 \pm 0.03$  → 0.03の意味
- 用いたサンプルサイズ
  - 6期間分のデータを用いており、それぞれ参加者(数)が異なる。それらをどのように扱ったか説明がない。
  - 同一人物が複数回参加したと考えられる。 $\langle c \rangle$ を算出する際に、同一個人が複数回参加した場合、通算しているのか、それとも別カウントしているのかは重要な情報だが、説明されていない。
- 記述統計、ヒストグラムも記されておらず、基礎的な情報がまったく与えられていない。
- 二つの変数の関係を箱ひげ図で示しているため、実際にどのように分布しているのかも不明。

## ■ 安易なはずれ値削除

- 「ひげ」は1パーセンタイル、99パーセンタイル点を示すが、それよりも外にある値を「はずれ値」として除外。箱の下部よりも上部にはずれ値は多く分布しており、それらを安易に除外することは $\langle c \rangle$ の過小評価につながる。



31

## ■ 他の要因を考慮せず、妥当性も評価できない分析

$$\langle c \rangle = \langle \langle Hp(10) \rangle / \langle H^*(10) \rangle \rangle = 0.15 \pm 0.03$$

- 計算の際には分子からバックグラウンド $0.04 \mu\text{Sv}$ を差し引き。→この値に完全に依存。
- 年齢、性別、職業など考慮していない。
- 回帰分析の $R^2$ のようにモデルのあてはまりを評価する仕組がない
  - 100人程度の成人を対象としたNaito et al.(2016)でもモデルのあてはまりを示す $R^2$ は0.4程度であった。この研究では全年齢、5万人を対象としており、同様の方法を適用すると、 $R^2$ はさらに低くなる可能性が高い。
- 予測の誤差も評価できない。
- 回帰分析ならば、これらの問題を解決できる。

$$\langle 3\text{ヶ月累積}Hp(10) \rangle = \langle c \rangle \langle H^*(10)_{\text{Home}} \rangle + \sum \beta_k \text{年齢、性別}$$

32

# Tao et al.(2019)の測定

- 飯舘村 2017/3-6月
- 6名について、3つの線量計で測定、結果を比較
  - 空間線量=航空機ではなく地上で測定
    - NaI scintillation survey meters,ALOKA TCS-172
  - 個人線量
    - Electronic pocket dosimeter PDM-501 (Hitachi Healthcare)
    - Electronic personal D-Shuttle dosimeter
  - GPS



<http://www.as-1.co.jp/rental/detail.php?id=303>

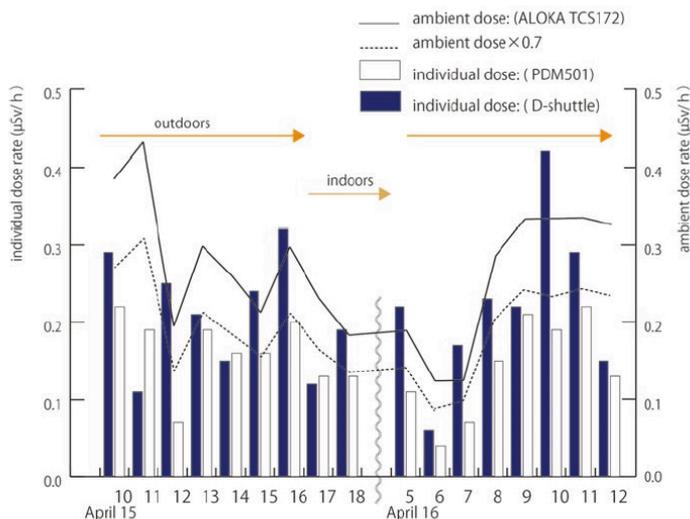
<http://www.hitachi.co.jp/products/healthcare/products-support/radiation/dosemeter/pdm501/index.html>

33

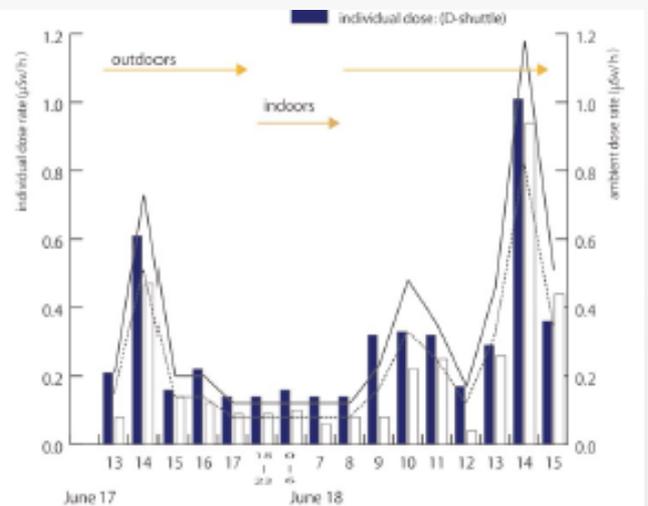
## 参加者2名の測定例

- 空間線量と個人線量計の相関は高い。ただし、個人線量計の測定値は空間線量計の0.7倍程度

Participant A: April 15-16, 2017 Relationship between Individual Dose and Ambient Dose



April 15, 18:00~April 16, 5:00, TCS172/D-shuttle/PDM501 were placed in the same place on the 2nd floor of the house.



June 17, 17:00 - June 18, 8:00, the ambient dose used was 0.12 µSv/h measured at the same place.

- Tao et al.(2019)によるMiyazaki and Hayano(2017a,b)批判
  - 空間線量についても個人レベルで行うべき(位置、時間の長さ)
  - 個人ではなく、平均に注目している。
    - 個人に注目すべき
  - バッジを装着していないのでは(特に屋外)

35

### 長期累積被曝、除染の効果: Miyazaki and Hayano(2017b)

- Miyazaki and Hayano(2017a)の結果に基づいて、個人の今後の被曝量(70才までの平均積算線量)を計算。除染の影響も評価。
- $c$ が時間的に変化しないことを仮定。複数回の航空機モニタリングでの空間線量の低下から今後の空間線量率の低下を外挿。
- 2011/9-2015/6までガラスバッジ測定を行った者に限定
  - まずは、そうでない人との比較を行うべき(選択バイアス)。
- 伊達市の汚染度による区分A,B,C地域毎に $c$ を計算(Aが汚染度最も高い)。
  - A:476人、B:693人、C:3280人
  - $A \rightarrow 3\mu\text{Sv}/h, B \rightarrow 1\mu\text{Sv}/h < 3\mu\text{Sv}/h, C \rightarrow < 1\mu\text{Sv}/h$
  - 測定前の4ヶ月間の追加被曝量は1.4mSvで共通と想定(基本調査の結果)

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

36

■  $c$ も地区によって異なるとした。

■  $c^A = 0.10, c^B = 0.12, c^C = 0.15$

■ Fig2.によると4次モニタリングに対して、9次モニタリングの空間線量は0.3程度に減少。この間、 $\langle c \rangle$ が一定としておきながら、地域別(3倍程度の差)には異なると主張。さらに汚染度が高いところ程、 $c$ が小さい。

■ A、B地域では $c < 0.15$ なので、平均は0.15よりも低くなるはず。

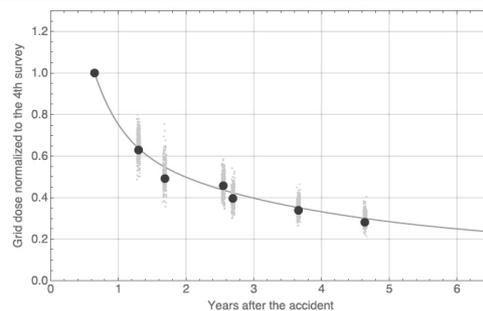


Figure 2. The ratios of the  $n$ th ( $n = 5$  to  $10$ ) grid dose to the 4th grid dose are plotted as a function of elapsed time since the accident. In order to help alleviate overlaps of points, the data were horizontally jittered, and the average ratios are shown in filled circles. The curve is a 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.

37

■ We focused on 1700 houses where decontamination was done in zone A, among which all family members continuously held glass badges from 2011Q3 to 2014Q1 (September 2011 to June 2014), and decontamination was carried out during 2012Q3 (from October to December 2012). This narrowed the number of subjects to 425, living in 132 houses.

■ 除染(2012/10-12)されたA地域における1700戸に注目、うち、期間中バッジをもっていた425名(132戸)。

■ The glass badge data and the GIS information of the subjects were anonymized by Date City, and was provided to the authors.

■ 匿名化は伊達市が行い、著者に提供された。

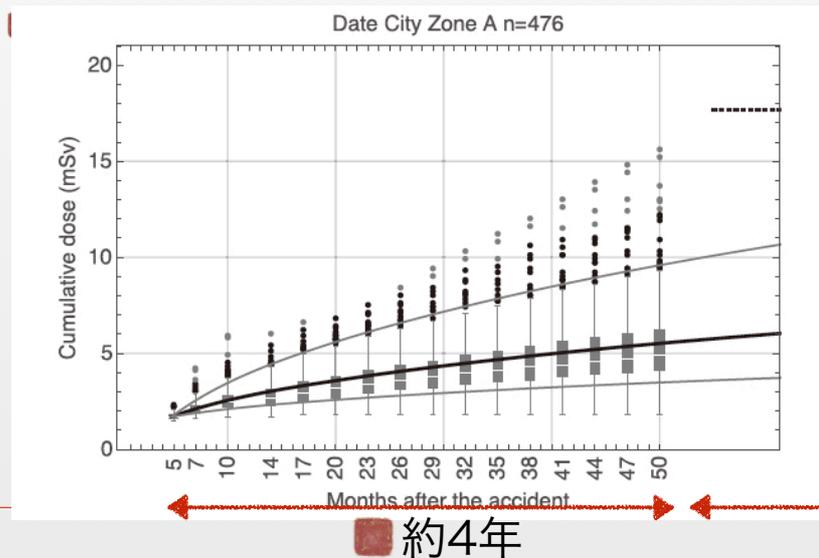
■ 前述のとおり、通期もっていた人とそうでない人の比較をすべき(通期もっていた人は、気をつけていた人である可能性が高い)。

■ held glass badgesとあるが、単にデータが7回分揃った人であって、実際にもったかどうかは不明なはず。

38

# データへのフィット?と将来予測

- 2011/9-2015/6という約4年間のデータに基づいて70年間の累積線量を予測。
- 実線:中央値、上下の薄い線:1-99%となる人の推定例
  - 累積(中央値、括弧内は95%タイル)
    - A:18mSv(35mSv), B:15mSv(28mSv), A:11mSv(20mSv)
- 推定にともなう誤差、外挿による誤差を無視



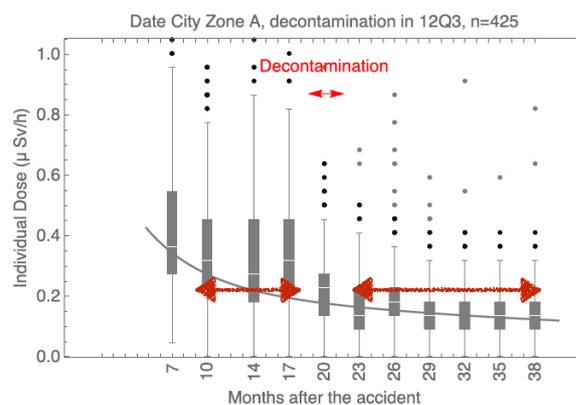
## 66年分外挿

- 実際はこの図の累積曲線ではなく、各年の被曝量を計算して積算

39

## 除染の効果

- 除染前後の被曝量の平均値の差の検定(自然減衰分を補正後)をすべきだが、されていない。



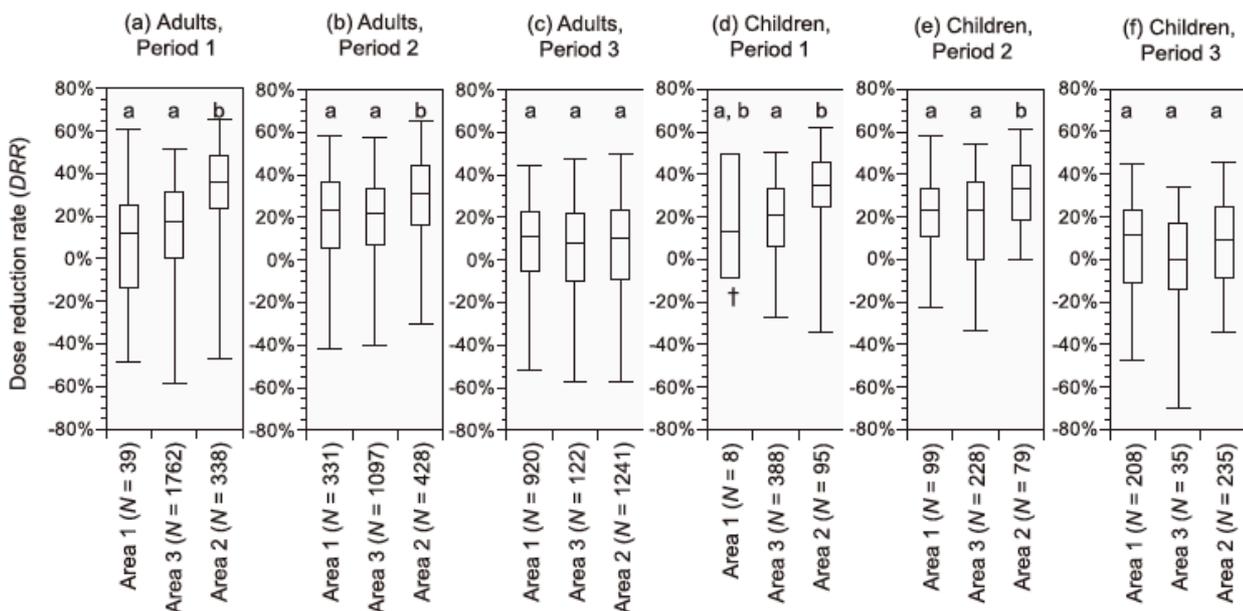
**Figure 6.** A box-and-whisker plot of the distribution of individual doses of 425 people who lived in zone A, whose houses were decontaminated during Q3 of 2012 (indicated by an red arrow); the measured value of the glass badge for 3 months is converted to the dose rate per hour. The superimposed curve,  $H_p(t)$  was calculated for zone A using the median grid dose  $H_{10}^A$  (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.

40

# 除染の効果の検討:Tsubokura et al.(2019)

- 南相馬市の成人18392名、子供3650名
  - 2013/6-2016/9の間、ガラスバッジ測定参加者(自発的)
  - 2013/6-8    2014/6-8
  - 2014/6-8    2015/7-9
  - 2015/7-9    2016/7-9
  - 除染は(線量が高いところから)2012/9- 2016/12
  - 上記期間毎に
    - Area1 除染終了
    - Area2 除染中
    - Area3 未除染
  - 空間線量についてはCs134、137が存在するとして、指数関数的に減少すると想定。各時点の測定値からこれを差し引く(バックグラウンド $0.062\mu\text{Sv/h}$ (大洗))。
  - 欠損値がある者、年間(換算)線量が $5\text{mSv}$ を越える者は除外(人数明示されず)。
  - 除染による低減率を算出

## Adults, Children別×期間×除染状況別の線量低減率



**Figure 3.** DRR for three areas. The lowercase letters indicate significant differences between areas ( $P < 0.05$ ). The box plots show the 5th, 25th, 50th, 75th, and 95th percentiles. †: the 5th and 95th percentiles are not shown due to the small number of participants.

## 線量計装着状況の比較:Nomura et al.(2015)

- 南相馬市の小中高生(1637名)に個人線量計(ガラスバッジ)を装着してもらい、3ヶ月間の累積線量を測定。
- 「測定期間中、1日中装着していたか」を回答してもらったところ119名(有効回答者の7%)のみが装着していたと回答。
- 装着ありの者119名のデータを用いて、次式を推定。

$$\log<3ヶ月累積Hp(10)> = \beta_2<H^*(10)_{Home}> + \sum \beta_k \text{年齢、性別など}$$

- 得られたパラメーターを用いて、装着していない者の線量を予測。実測値と比較(通学、学校、自宅、屋外についても同様に)。
  - 通学中については、測定値0.37mSv (標準偏差=0.14)の方が予測値0.33 mSv (同0.09)よりも有意に高い、つまり予測値(装着していない者の実測値の代替指標)は過小評価であることを示したが、全体としては有意差がない(0.33 vs 0.33)

Table 3 Comparison of the measured dose and regression estimates of dose (mSv) (n=1518)

	Measured dose (SD)	Estimated dose (SD)	Ratios (SD)
Overall	0.33 (0.11)	0.33 (0.09)	0.99 (0.35)
Time period			
To school	0.37 (0.14)	0.32 (0.07)	1.13 (0.43)**
At school	0.32 (0.10)	0.33 (0.09)	0.98 (0.31)
At home	0.33 (0.11)	0.33 (0.09)	0.99 (0.34)
Outdoors	0.32 (0.10)	0.33 (0.09)	0.97 (0.33)*
At bedtime	0.33 (0.11)	0.33 (0.09)	0.99 (0.35)

\*p<0.05, \*\*p<0.01: paired t test.

43

### 問題点

- 本来ならば装着していない者の実測値と、装着している者の実測値を比較すべき。

ガラスバッジ累積線量(測定値)=

$$\beta_1 \text{ガラスバッジ装着有無} + \beta_2 <H^*(10)_{Home}> + \sum \beta_k \text{年齢、性別など}$$

### 基本的な統計量が掲載されていない

- 装着した者、していない者の被曝量の平均値、標準偏差が示されていれば、読者がt検定を行うこともできるが、この論文には線量計を装着していた者の平均累積線量という重要な記述統計が示されていない

### 欠損値の扱い

- 住所などの情報が得られなかった319名を無造作に除外

44

Yosida et al.(2015)屋外、屋内の空間線量率から遮蔽係数を算出

- 飯舘村22戸、南相馬市(小高地区)37戸
- NaI (TI) scintillation survey meter TCS-172B (Hitach)
- 屋内外で空間線量を測定 減衰係数を算出。

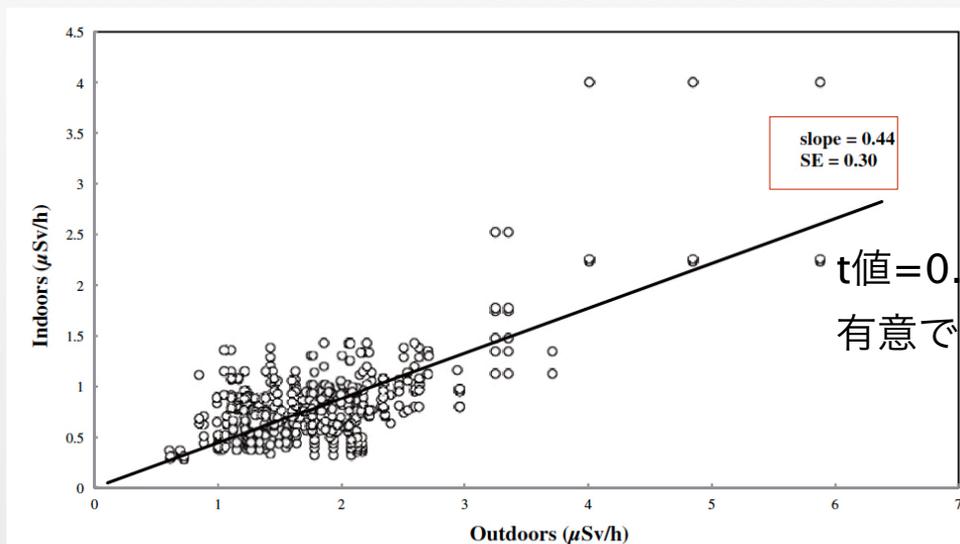
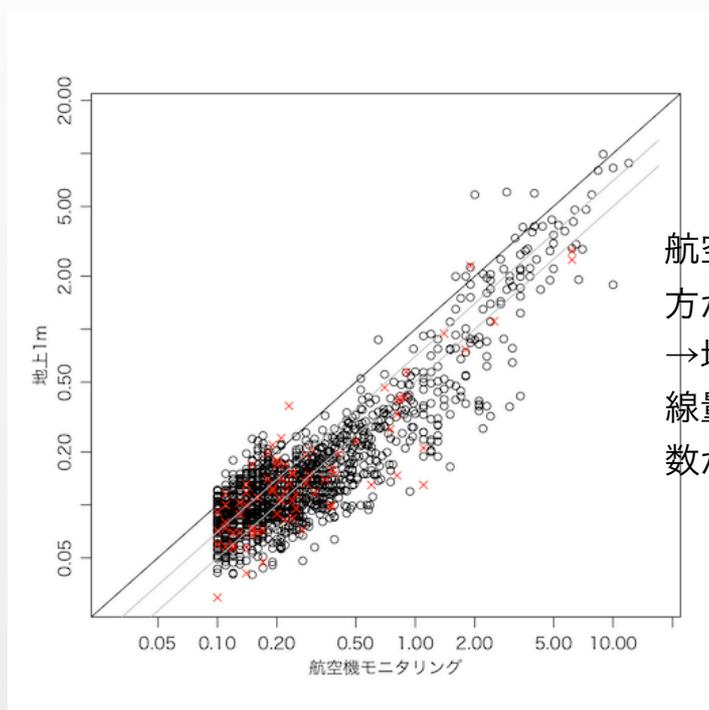


Figure 2 | Relationship between the indoor and outdoor ambient dose equivalents.

45

奥村(2019)航空モニタリングと、地上1mでの空間線量率



航空機モニタリングの方が空間線量率高い  
→地上で測定した空間線量率と比べて変換係数が低くなる。

三重大学、奥村「空間線量率の航空機モニタリング」

<https://oku.edu.mie-u.ac.jp/~okumura/stat/190118.html>

46

## まとめ1:空間線量率—個人線量計の変換係数の特性

- 航空機モニタリング
  - ガラスバッジ:個人平均×3ヶ月累積 Miyazaki and Hayano (2017a)
    - (総合) 0.15
  - Dシャトル: 個人×2週間累積 Naito et al.(2016)
    - (総合) 0.172 (屋内) 0.118 (屋外) 0.395
- シンチレーションメーター(地上)
  - ガラスバッジ:地区平均×3ヶ月累積 伊達市(2015) (総合) 0.196(遮蔽考慮)
  - D-シャトル: 個人×数週間 Tao et al.(2019) (屋外) 0.7程度
- 航空機モニタリング-個人線量計 変換の問題点
  - 航空機モニタリングによる空間線量率 > シンチレーションメータ
  - 測定誤差(未装着など)
  - 個人平均などの集計による変数間の関係の減衰
    - などによって変換係数は小さめに

47

## まとめ2:個人線量測定研究の問題点

- サンプルの代表性の欠如
  - 伊達市(2013)、Miyazaki and Hayano(2017a)は人口約6万人の伊達市から5万人以上が参加したデータを用いているとはいえ、参加しなかった方との差異の有無
- 安易な欠損値削除
- 必要な情報、記述統計が
- 分析の前提の確認不足
  - 個人レベル、集計レベルでの空間線量率—個人線量率の関係が同一であることを暗黙の前提としている。そのことが正しいのかをまずは個人レベルのデータで確認しておくべき
- 統計学、データ分析に関する知識不足
  - 非効率な分析(サンプルを屋内、屋外に分けて推定)
  - 各パラメータやモデルのあてはまりの評価
- 測定の誤差を無視
  - 装着していない、回答ミスなど
  - 説明変数側に誤差がある場合、傾きのパラメーターは過小評価される。
- 予測時の誤差の無視
  - 個人レベルの予測に使うにはモデルのあてはまりが $R^2=0.5$ 程度。
  - 長期的な予測をする際、長期になるほどより後の誤差が大きくなるが無視されている。
- 航空機モニタリングの分解能や測定の確からしさの問題
  - 地上での測定より高めに測定される。

48

## まとめ3

- 研究倫理、研究不正の問題がないとしても、紹介した研究の測定、データ分析には大きな問題があり、実務上使用すべきではない。
- 可能な研究については、研究者向けに匿名化データを公開し、再分析できるようにすべきである。

## 参考文献

- Adachi et al. 'D-Shuttle' Project," J Radiol Prot, 36 (1), 49-66.
- Čemusová, Z., D. Ekendahl, and L. Judas (2017), "Testing of the D-Shuttle Personal Dosimeter," Radiation Measurements, 106, 214-17.
- ICRP (2006), "Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public. Icrp Publication 101a," Ann. ICRP, 36 (3), (日本アイソトープ協会『公衆の防護を目的とした代表的個人の線量評価』 [http://www.icrp.org/docs/P101b\\_Japanese.pdf](http://www.icrp.org/docs/P101b_Japanese.pdf) (2019/1/28 access)).
- Kurokawa, Shin-ichi (2018), "Comment on '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'," <https://arxiv.org/abs/1812.11453>.
- Miyazaki, M. and R. Hayano (2017a), "Individual External Dose Monitoring of All Citizens of Date City by Passive Dosimeter 5 to 51 Months after the Fukushima Npp Accident (Series): 1. Comparison of Individual Dose with Ambient Dose Rate Monitored by Aircraft Surveys," J Radiol Prot, 37 (1), 1-12.
- ---- (2017b), "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," J Radiol Prot, 37 (3), 623-34.
- Murayama, Kentaro (2018), "D-シャトルの概要とその応用について(D-Shuttle Electric Dosimeter and Its Applications)," Radioisotopes, 67 (9), 453-60.
- Naito, W., M. Uesaka, T. Kurosawa, and Y. Kuroda (2017), "Measuring and Assessing Individual External Doses During the Rehabilitation Phase in Iitate Village after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident," J Radiol Prot, 37 (3), 606-22.
- Naito, W., M. Uesaka, C. Yamada, and H. Ishii (2015), "Evaluation of Dose from External Irradiation for Individuals Living in Areas Affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Plant Accident," Radiat Prot Dosimetry, 163 (3), 353-61.
- Naito, W., M. Uesaka, C. Yamada, T. Kurosawa, T. Yasutaka, and H. Ishii (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 (8), e0158879.
- Nomura, S., M. Tsubokura, R. Hayano, D. Yoneoka, A. Ozaki, Y. Shimada, T. Furutani, Y. Kanazawa, and T. Oikawa (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 18-20 Months Following Japan's 2011 Fukushima Nuclear Incident," BMJ Open, 5 (12), e009555.
- Suzuki, Ryoichi and Hiroyuki Ohguchi (2018), "個人向け放射線線量計「D-シャトル」の開発(Development of "D-Shuttle" Personal Radiation Dosimeter)," Radioisotopes, 67 (9), 447-52.
- Tao, Yoichi, Muneo Kanno, Soji Obara, Shunichiro Kuriyama, Takaaki Sano, and Katsuhiko Ninomiya (2019), "Chapter 14 Parallel Measurement of Ambient and Individual External Radiation in Iitate Village, Fukushima," in Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident (Iii): After 7 Years, Tomoko Nakanishi and Martin O'Brien and Keitaro Tanoi, eds.: Springer.
- Tsubokura, M., S. Nomura, I. Yoshida, T. Sawano, M. Miyazaki, S. Tomita, O. Tomoyoshi, and M. Watanabe (2018), "Comparison of External Doses between Radio-Contaminated Areas and Areas with High Natural Terrestrial Background Using the Individual Dosimeter 'D-Shuttle' 75 Months after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident," J Radiol Prot, 38 (1), 273-85.
- WHO (2013), "Health Risk Assessment from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, Based on a Preliminary Dose Estimation," [http://www.who.int/ionizing\\_radiation/pub\\_meet/fukushima\\_risk\\_assessment\\_2013/en/index.html](http://www.who.int/ionizing_radiation/pub_meet/fukushima_risk_assessment_2013/en/index.html).

## 参照文献

- 伊達市 (2014), "ガラスバッジ測定の実態調査の集計について," だて復興・再生ニュース, 11(平成26年2月27日), 2-3.
- ---- (2013), "外部被ばく線量年間実測値の分析結果について," だて復興・再生ニュース, 8, 2-5.
- 宮崎真 (2017), "伊達市のガラスバッジ測定から明らかになった大事なこと," だて復興・再生ニュース, 30, 2.
- 宮崎真、早野龍五 (2014), "福島個人の線量測定のいま," Isotope News (10月号), 28-32.
- 黒川眞一 (2019), "被曝防護には空間線量そのものを使うことが妥当である——信頼性なく被曝線量を過小評価する宮崎早野第1論文," 科学(岩波書店), 89 (3), 270-86.
- 黒川眞一、島明美 (2019), "住民に背を向けたガラスバッジ論文: 7つの倫理違反で住民を裏切る論文は政策の根拠となり得ない," 科学(岩波書店), 89 (2), 152-61.
- 復興庁、環境省、福島市、郡山市、相馬市、and 伊達市 (2014), "除染・復興の加速化に向けた国と4市の取組中間報告(平成26年8月)," <https://www.env.go.jp/press/files/jp/24939.pdf> (accessed 2019/1/27).
- 放射線審議会 (2019), "東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえた緊急時被ばく状況及び現存被ばく状況における放射線障害防止に係る技術的基準の策定の考え方について (案)," 第143回総会放射線審議会 (<http://www.nsr.go.jp/data/000259695.pdf> accessed 2019/1/27).
- 牧野淳一郎 (2019), "3.11以後の科学リテラシー No.75," 科学(岩波書店), 89 (3), 266-69.
- 木原雅子、木原正博監訳 (2008), WHOの標準疫学: 三煌社.
- 濱岡豊(2015a)「放射線被曝と甲状腺結節 関連研究のサーベイと福島甲状腺検査の分析」『科学(岩波書店)』, Vol.85, No.6, pp.586-595
- ——(2015b)「広島・長崎原爆被爆者データの再分析」『科学(岩波書店)』, Vol.85, No.9, pp.875-888
- ——(2019)「個人線量計測定論文の諸問題」『科学(岩波書店)』, Vol.89, No.4