

[招待論文]

福島第一原発事故の疫学的知見

Some Epidemiological Findings from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster

古谷 知之

慶應義塾大学総合政策学部教授

Tomoyuki Furutani

Professor, Faculty of Policy Management, Keio University

Abstract: 本研究の目的は、福島第一原発事故後の環境放射線測定と可視化及び疫学的解析に関する、筆者の経験の一部を紹介することにある。具体的には、(1) リスクコミュニケーションにおけるデータサイエンスの可能性と限界について指摘すること、(2) 浜通り地域（南相馬市など）を中心とする病院で実施された健康影響被害調査（内部被曝調査）データの解析事例を紹介すること、(3) 避難者と帰還者の健康影響被害の差異に関する解析事例を紹介すること、である。

This study aims to introduce several parts of author's experiences regarding monitoring, visualizing and epidemiological analysis on environmental radiation after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster. First of all, the author introduces possibilities and limitations of data science for risk communication especially on nuclear disaster. Secondary, analysis results on internal radiation exposure surveys in Hamadori area (ex. Minamisoma city) are shown. Thirdly, differences of healthcare impact of evacuees and returners after the disaster are statistically compared.

Keywords: 福島第一原発事故、空間疫学、内部被曝

Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster, spatial epidemiology, internal radiation exposure

1 はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震が引き起こした福島第一原発事故災害とその後の関係機関の対応は、複合災害におけるデータサイエンスのあり方を考える上で、筆者をはじめ統計学者に貴重な経験をもたら

したといえる。本稿では、筆者の経験と研究成果のいくつかを紹介することで、得られた知見を記しておきたい。これまでの研究成果は巻末の【主な研究成果】に示しているので、詳細を知りたい方は原文を読んで頂ければと考えている。

福島第一原発事故災害後に筆者らが実施した研究は、(1) 空間線量率データの収集と可視化、(2) 放射線リスクの健康影響被害に関する疫学的分析、(3) 避難者データの解析、に大別される。(1) の空間線量率データの収集と可視化については、ドローン (UAV) や車両、センサーネットワークを用いた放射線測定システムを構築し、GIS (地理情報システム) 上に可視化し、住民などと共有できるようにした。一連の研究の中では、放射性物質 ^{137}Cs の将来推計も試みたが、現況再現性の検証までの十分な確証が得られているとはいいがたく、方法論を提唱するにとどまった。(2) の健康影響被害に関する疫学的分析では、ホールボディカウンター検査 (南相馬市立総合病院)、甲状腺検査 (公益財団法人放射能対策研究所)、ガラスバッジ調査に基づくデータを解析し、空間線量率と各検査結果との関係について統計的に解析するなどした。(3) の避難者データの解析は、南相馬市民を対象に実施された震災後の避難行動履歴調査から、原発事故発災後の人口推計を行ったものだが、これについては現時点で論文投稿中のため、本稿では割愛することとする。このうち、(1) は植原啓介准教授(環境情報学部)などとの共同研究、(2) と (3) は坪倉正治医師 (東京大学大学院医科学研究所・南相馬市立総合病院)、森田知宏医師 (東京大学大学院医科学研究所・相馬中央病院)、野村周平氏 (インペリアル・カレッジ・ロンドン)、渡部肇医師などとの共同研究である (肩書と所属は本原稿執筆時点のもの)。

本稿はこのうち、空間疫学的な観点からの知見をまとめた、(2) の研究成果に焦点を当てて、研究成果を紹介する。空間的な分析も行っているが、紙面の都合上と被験者の個人情報保護の観点から、個人の住所などが特定される空間分析結果は、本稿から割愛する。本稿で用いているデータは必ずしも最新の調査結果を反映しているわけではないことを予め断わっておく。各病院・調査機関では現在も継続的にデータを更新し公開している。

具体的な内容に入る前に、原発事故後5年が経過した現在において、改めて研究活動を通じての筆者なりの経験と意見を述べておきたい。研究内容が

よくわからないという方には、研究の裏事情や筆者らの苦勞を知っていただくだけでもよいだろう。

まず、原発事故災害のリスクコミュニケーションにおける、データサイエンスの有効性と限界について指摘しておきたい。ここで得られた経験は、実務や現場においては、最新の統計解析の手法は必ずしも必要とされないこと、統計学的に正しいことが必ずしも受け入れられないこともあるということ、である。放射線の空間線量率データはポイントサンプリングにより収集され、サンプリング地点以外の線量率を空間統計学の空間内挿補間手法を用いて内挿される。原発事故直後には、自治体や研究者から、誤った内挿手法を用いた空間線量率マップがしばしば提供されていた。最新の空間内挿補間手法を用いれば、予測誤差なども提示できるのだが、文科省が提供する放射線マップなどで最新の統計手法が用いられることはない。放射線マップ作成担当者からは、「最新の手法だからといって、国が公表したマップと異なる結果を持ってきてもらっては困る。国民が混乱する。」という指摘を受けたこともある。事故後に迅速な情報提供が行うことができなかった、ある放射能影響を予測するシステムは、可視化に必要な GIS (地理情報システム) のバージョンをダウングレードした (正確には、最新版にアップグレードしなかった)。これはシステムを扱う技術者が高齢化し、最新版のソフトウェアを十分に扱うことができないからであった。福島第一原発事故発災時に用いられていた原発事故対策に関する技術のいくつかは、1986 年のチェルノブイリ原発事故後の技術を継承していた。当時は GIS が普及しておらず、空間内挿補間の計算に現代のような高性能コンピュータを用いることもできなかったし、ドローンも活用されていなかった。このような状況を目の当たりにした筆者は、「なぜ最新の解析技術を使わないのか？」と訝ることもあったが、最新の技術を使える人がいなければ、対応できないのもまた事実である。リスクの現場でもデータサイエンティストを育成する必要があると強く感じたのは、この時以来である。

次に、放射能汚染に伴う健康影響調査データの解析結果を紹介する。現時点では福島第一原発事故発生に伴う深刻な健康への影響 (甲状腺がんなど) が見られるとは統計学的にも疫学的にも言えないことがわかっている。勿論

今後、モニタリング調査を継続することにより、長期的な評価を実施する事が必要であることは言うまでもない。また、子供を対象とした甲状腺検査から甲状腺がん発がんリスク（発生率）が高まったと言う方もいるが、原発事故前後でサンプルの規模と質を揃えた調査データが存在しないため、比較は困難である。またサンプル数が増加することでリスク発生確率が上昇することがあるが、これは調査の精度が飛躍的に改善したことによる影響と考えるのが妥当である。南相馬市や相馬市では医療機関を中心にガラスバッジやホールボディカウンター、甲状腺検査を含む健康影響被害調査が継続的に実施されてきた。問診票に付随するアンケート調査票が時期によって異なるため、社会調査データとして不備はあるものの、事後に健康影響評価を行う上では大変貴重なデータである。前述の子供を対象とした甲状腺検査を含め、震災前後で比較可能なデータセットが存在しないことが、今回の大きな教訓である。今後社会調査の内容や調査体制の整備について、あり方を検討すべきだろう。南相馬市立総合病院や相馬中央病院では、医師や技師らが疫学分析に必要な GIS や統計手法を自ら勉強し、技術習得に努めている。現時点では初歩的な技術や古典統計に限られているものの、論文作成には大きく役立っているようである。

筆者らが中心となり、昨年 12 月に「ドローン社会共創コンソーシアム」を立ち上げた。このきっかけとなったのは、福島でのドローンや UAV を用いた放射線計測に関する研究である。航空機を用いた計測 (air-borne survey) 技術は、放射線測定に関して言えば、チェルノブイリ原発事故後に開発された手法がレガシーとして残っていた。従来の手法は、広域での空間線量率分布を把握するのに適していたが、被災地の住民が必要とする、自宅や農地周辺の狭域的・局所的な情報提供には適切ではなかった。従来の航空機を用いた計測には、1 時間 100 万円ほどするヘリコプターをチャーターし、数百万円もする放射線測定器を搭載する必要があるなど、市民の日常に必要な情報を収集するには非常に高額であった。筆者らは狭域でのデータ収集には、農業散布用の UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いるなどしたが、やはり機体が数百万円もして高額なうえ、数年前までは離発着に高度な技術を要したために農業散布用 UAV の操作に長けたパイロットを雇う必要などもあった。こ

の数年、ドローン技術の飛躍的な進歩と廉価化により、ドローンを活用したデータ収集がしやすくなった。今後、IoT やロボティクス、ドローン、センシング技術が発展すれば、専門家や市民を巻き込んだリスクコミュニケーションを進めることができるだろう。

2 福島第一原発事故による地域住民の ^{137}Cs 体内被曝に関する基礎的研究

2.1 はじめに

福島第一原発事故発生直後には、福島県内で初期被曝医療機関 / チーム・二次被曝医療機関などを中心に緊急被曝医療体制が敷かれ、原発事故災害への対応がなされた^[1]。震災後約1年が経過する頃には、市中病院などでもホールボディカウンター (WBC) 導入も進むようになり、各病院での受検者の ^{137}Cs 体内量検査状況、さらには甲状腺に関する診断状況が各病院のホームページなどで公開されるようになった。これまで、体内放射エネルギーの時系列比較に基づく体内放射エネルギーの軽減効果や被曝要因の解析が試みられてきた^{[2][3][4]}。

福島第一原発事故に伴う WBC 受検者の多くは体内に ^{137}Cs が検出されない (Not Detected; ND) 受検者である。従って、体内放射エネルギーの被曝要因分析を行う際には、検出されない (される) 要因と検出された場合の体内放射エネルギーの分布とをそれぞれ要因分析する必要がある。

本研究では、主として医療法人誠励会ひらた中央病院 (福島県平田村) と公益財団法人震災復興支援放射能対策研究所が 2013 年 1 月 31 日までに実施した WBC による ^{137}Cs 受検者データ (以下、WBC データ) 及び問診票データを用いて ^{137}Cs 検出要因モデルを構築し、定量的・実証的な要因分析を行った。

2.2 研究の方針と方法

2.2.1 分析の方針

本研究では、ひらた中央病院が 2011 年 10 月 17 日から 2013 年 1 月 31 日までに実施した WBC データ、2011 年 10 月 17 日～2012 年 6 月 30 日の期間に実施した問診票データ①、2012 年 7 月 1 日以降に実施している問診票データ②を以下のように組み合わせて分析した。本章で用いたデータに関する基

礎的な集計結果については、本章末に示すこととする。

震災後の一日あたり屋外滞在時間と体内放射エネルギーとの関係を、全期間の WBC データと問診票データ①と②を用いて示し、2012 年 2 月までの時期と 3 月以降の時期とに分けて考察した。 ^{137}Cs 検出要因分析モデル構築には慢性期である 2012 年 3 月 1 日以降の WBC データと問診票データ②を用いる。外出時間と ^{137}Cs 検出率との関係は、急性期の 2011 年 10 月 1 日～2012 年 3 月 31 日の WBC データと問診票データ①を用いて、比率の差の多重比較にフィッシャーの正確確率検定を適用した。

ひらた中央病院の WBC 調査では、体内放射エネルギー検査にキャンベラ社製ホールボディカウンター (FASTSCAN) (図 1) を用いており、検出限界を 300Bq/Body としている。本論文では、検出限界を超えて ^{137}Cs が検出された受検者を、便宜上 ^{137}Cs 検出者と呼ぶ。公益財団法人震災復興支援放射能対策研究所における 2012 年 7 月末までの調査結果では、体内放射エネルギー 50Bq/kg 以上が検出された人の食生活に特徴があることが示されていることから^[5]、本研究でも 50Bq/kg 以上が検出された人の食生活について分析することとした。2012 年 2 月末までの WBC 調査では、検査時に着衣していた衣服に付着している放射エネルギーを検出している可能性があるため、それ以降のデータとは単純に比較できない。そこで、体内放射エネルギーのモデル構築には 2012 年 3 月 1



図 1 キャンベラ社製ホールボディカウンター (写真: ひらた中央病院)

日以降の WBC データを用いることとした。2012 年 7 月以降のデータは 2 回目以降の検査を受けた人も含まれているため、本論文に示す受検者数は延べ数である。分析には個人が特定されないよう十分に配慮した。

本研究に用いた WBC データの受検者数の延べ合計数は 34,008 人（うち男性 14,350 名、女性 14,691 名、性別未記入 4,967 名）である。受検者の震災前居住地は、福島県 (25,244 名)、茨城県 (7,393 名)、群馬県 (499 名) を中心に全国に分布している。問診票データ①（サンプル数 20,609）では、受検者個人の震災前後の住所、震災前後の一日あたり屋外滞在時間、自家栽培食品摂取状況、病気の既往歴、服薬品調査を実施している。問診票データ②（サンプル数 13,399）では、受検者個人の震災前後の住所、震災前後の一日あたり屋外滞在時間、避難履歴、震災後の食品購入時の注意事項、使用水（水道、飲料水、調理水）の種類、家庭菜園野菜摂取状況などを調査している。

2.2.2 分析方法

上述のデータを用いて本研究で明らかにしたい点は、以下の通りである。
(1) 受検時期別・年齢層別にみた ^{137}Cs 検出率、(2) ^{137}Cs 検出値が 50Bq/kg を超える受検者の食品購入・生活水利用状況、(3) 被災直後屋外滞在時間と ^{137}Cs 体内放射エネルギーとの関係、(4) ^{137}Cs 体内放射エネルギーと受検者の食品購入・生活水利用状況との関係、である。(3) は被災直後屋外滞在時間と ^{137}Cs 体内放射エネルギーとの関係を比率の差の多重比較を用いて比較した。(4) は 2012 年 7 月 1 日以降の WBC データと問診票データ②を用いてベイズ・ゼロ強調ポアソンモデルを推定した。

2.2.3 ベイズ・ゼロ強調ポアソンモデル

後述するように、本研究で用いる WBC データでは ^{137}Cs が ND となるケースが非常に多い。「ND である」ことを明示的にモデル化するために、ゼロ強調ポアソン（以下、ZIP）モデルを用いる。このモデルは、以下のような手順で推定する。

受検者 $i(i=1\dots N)$ について、体内放射エネルギーの検出結果が ND となる場合をイベント発生数 $y_i=0$ の場合とみなし、体内放射エネルギーが検出される場合をイベン

ト発生数 $y_i > 0$ の場合と見なす。ZIPモデルは $y_i = 0$ の場合と $y_i > 0$ の場合とで異なるモデルを仮定し、この二つのモデルを組み合わせたモデルである。体内放射エネルギーが検出される場合のイベント発生数がポアソン分布に従うと仮定した場合、 $y_i = 0$ となる確率を π_i 、ポアソン分布の階級区分 i に対するイベント数 λ_i とすると、ZIP モデルは式 (2-1) のように表せる^[6]。

$$y_i \sim \text{Zero Inflated Poisson}(\pi_i) \quad (2-1)$$

ただし、

$y_i = 0$ のとき：

$$\begin{aligned} P(y_i = 0) &= \pi_i + (1 - \pi_i) \frac{\lambda_i^0 \cdot \exp(-\lambda_i)}{0!} \\ &= \pi_i + (1 - \pi_i) \exp(-\lambda_i) \end{aligned} \quad (2-2)$$

$y_i > 0$ のとき：

$$P(y_i > 0) = (1 - \pi_i) \frac{\lambda_i^{y_i} \cdot \exp(-\lambda_i)}{y_i!} \quad (2-3)$$

である。いま、式 (2-4) を定義すると、

ZIP モデルの対数尤度関数は式 (2-5) のようになる。

$$w_i = \begin{cases} 0, & y_i = 0, \\ 1, & y_i > 0 \end{cases} \quad (2-4)$$

$$\begin{aligned} \log L &= \sum_{i=1}^N (1 - w_i) \log \{ (1 - \pi_i) + \pi_i \cdot \exp[-\lambda_i] \} \\ &\quad + \sum_{i=1}^N w_i [\log(\pi_i) - \lambda_i + y_i \log \lambda_i - \log(y_i!)] \end{aligned} \quad (2-5)$$

$y_i = 0$ の場合のモデルと $y_i > 0$ の場合のモデルを、それぞれ次式のように表すことにする。ここで、 α と β は回帰係数、 α_0 と β_0 は定数項、 x_i は説明変数（ベクトル）である。

$$\text{logit}(\pi_i) \equiv \log\left(\frac{\pi_i}{1-\pi_i}\right) = \alpha_0 + x'_i \alpha \quad (2-6)$$

$$\log(\lambda_i) = \beta_0 + x'_i \beta \quad (2-7)$$

本研究では、3つの年齢階層区分(0-14歳、15-64歳、65歳以上)に分けて上記のモデルを推定することとした。後述するように、年齢層に応じて原発事故後の食物摂取への対応が異なると考えられるためである。回帰係数を求める方法として最尤法も検討したが、年齢階層別にモデル推定した場合には解が得られなかった。そこで、回帰係数に正規分布 $N(0, 1 \times 10^{-6})$ に従う値事前情報を与えることにより、ゼロ強調ポアソンモデルの回帰係数の事後分布をベイズ推定した。ここでは、ギブズ・サンプリング法をもちいてマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)により事後分布を推定した。MCMC回数を45,000回、burn-in期間を15,000回、間伐(thin)を3回とした。Gewekeの方法によりMCMCの収束判定を行った。回帰係数の事後分布について平均と95%信頼区間を示す。ベイズ推定では通常、回帰係数の p 検定を行うことはないが、ここでは便宜上MCMCの疑似 p 値を示す。

モデル推定には、以下の説明変数を用いた。[性別](男性=1, 女性=0)、[震災後屋外滞在時間](30分未満=1, 30分以上=0)、[米]・[野菜]・[キノコ]・[肉]・[魚]・[牛乳]・[果物](地元産利用=1, その他=0)、[自宅水道井戸水利用]・[自家栽培野菜利用](利用する=1, しない=0)。なお、自宅水道、飲料水、調理水で井戸水を使うかどうかは互いに相関性が強く多重共線性が認められたため、説明変数には採用しなかった。

2.3 WBC データの分析結果

2.3.1 年齢層別分析結果

5歳階級年齢層別の受検者、 ^{137}Cs 検出者、年齢層別検出者を受検者で割った ^{137}Cs 検出率は、それぞれ図2・3・4のようになる。受検者と ^{137}Cs 検出者のピークはそれぞれ5-14歳と10-19歳となっているが、 ^{137}Cs 検出率は60-84

歳の高齢者と 15-19 歳人口でそれぞれ 15% を超えている。

体内放射能量の分布は図 5 に示した通りである。受検者全体に占める ^{137}Cs 検出者の割合は約 6.23% であり、子供 (14 歳未満) と大人 (15 歳以上) の ^{137}Cs 検出率はそれぞれ 3.15%、11.36% となっている。実効線量 1mSv/yr となる 50Bq/kg を超えて ^{137}Cs が検出された受検者の割合は、全体で 0.0324%、子供と大人がそれぞれ 0.00471% 及び 0.0786% となっている。子供の検出率

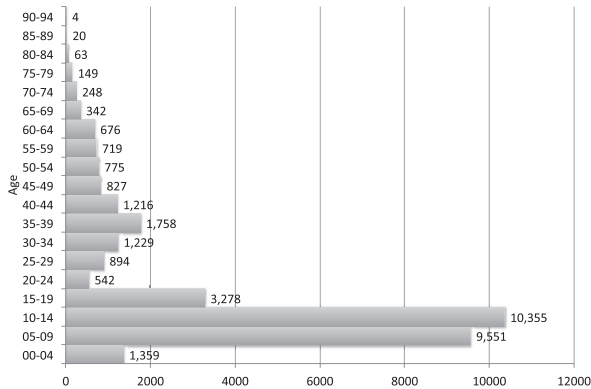


図 2 5 歳階級別 ^{137}Cs 受検者

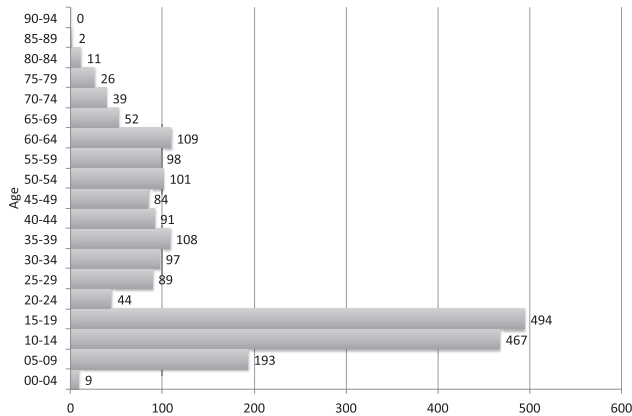


図 3 5 歳階級別 WBC 検出者

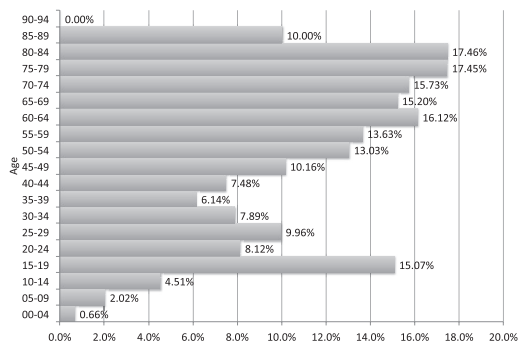


図4 5歳階級別 ^{137}Cs 検出率

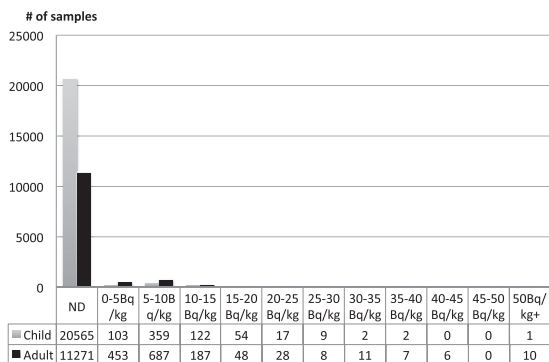


図5 体内放射能量の分布

は小さく、このことから子供の被曝率も小さいと言えよう。50Bq/kg を超えた子供が検出されたのは 2013 年 3 月までの時期であり、それ以降は検出されていない。

2.3.2 受検時期別分析結果

WBC 検査時期と ^{137}Cs 検出状況との関係性を示したものが、図 6 である。 ^{137}Cs 検出者数は検査開始時期から直近にかけて減少する傾向が見て取れる。しかしながら、50Bq/kg を超える人の数は、2012 年 3 月以前は 2 名程度であったのに対し、2012 年 4 月以降では 9 名と増加していることがわかる。いずれも 64 歳以上の高齢者であり、その多くの受検者は震災前住所が福島第一原

発から約 20km 圏内に位置する浪江町であった。

問診票データ②では、この 9 名の検査時における食品購入場所は、米・野菜・キノコのいずれかまたは複数以上を地元産または家庭栽培されたものであることが示された。

WBC 検査を 2 回以上受検した受検者のうち、いずれも ^{137}Cs が検出された受検者の体内放射能量の推移を示したのが図 7 である。いずれの受検者も食事の際に地元産の米・キノコや自家栽培野菜を使う、調理に自宅井戸水を使う、といった特徴が見られた。ここで示された受検者の多くは、震災以前から自

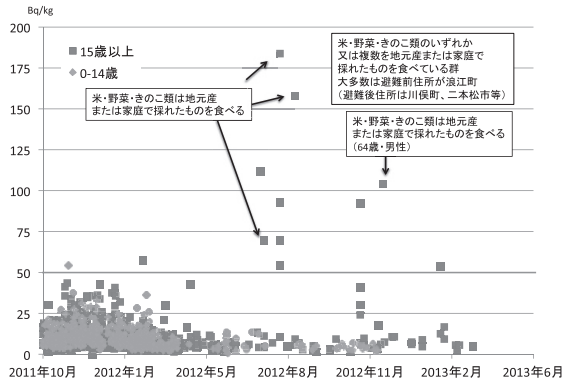


図 6 受検時期別 ^{137}Cs 検出者の体内放射能量

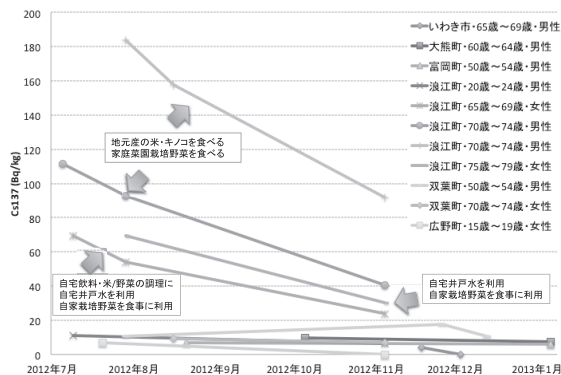


図 7 複数回受検者の体内放射能量の推移

家用食料を自給自足する傾向の強く、震災前から備蓄した米・野菜を摂取している農業従事者であると考えられる。

2.4 体内放射エネルギーのモデル推定結果

2.4.1 年齢別モデル推定結果

2.3 で示したゼロ強調ポアソンモデルのベイズ推定結果は、表 1 に示したとおりである。用いた説明変数のうち、[野菜]・[肉]・[魚]・[果物]・[自宅水道井戸水利用]・[自家栽培野菜利用]については、各年齢層で回帰係数の事後分布が 95% 信頼区間で負となり、[牛乳]は各年齢層で事後分布の 95% 信頼区間が正負値に分かれた。最終的に事後分布の 95% 信頼区間内で正負の符号が一致した変数のみを用いてモデル推定した結果が、表 1 に示した結果となっている。また、 $y_i=0$ の場合のモデルについては、定数項以外の回帰係数では、事後分布の 95% 信頼区間で正負符号が反転していたため、定数項のみを用いた。

この結果から、14 歳未満の小児については、性別（男児）、地元産米・キノコの摂取が体内放射エネルギーの高さと正の相関を持ち、屋外滞在時間の短さが負の相関を持つことがわかった。特に回帰係数の事後平均の絶対値を比較した場合には、屋外滞在時間が他の変数より強く影響する。15-64 歳人口につ

表 1 ゼロ強調ポアソンモデルのベイズ推定結果（年齢別）

	0-14 歳			15-64 歳			65 歳以上		
	事後平均	95%CI	p-MCMC	事後平均	95%CI	p-MCMC	事後平均	95%CI	p-MCMC
定数項 α_0	1.483	[1.363, 1.563]	<1e-04	2.097	[1.955, 2.257]	<1e-04	-15.537	[-30.658, -6.677]	<1e-04
定数項 α_0	6.145	[5.915, 6.371]	<1e-04	5.408	[5.147, 5.643]	<1e-04	-6.718	[-9.989, -2.940]	<1e-04
性別 β_1	0.125	[0.070, 0.205]	<1e-04	-0.749	[-0.886, -0.648]	<1e-04	-1.572	[-6.355, 3.087]	0.457
屋外滞在時間 β_2	-1.27953	[-1.409, -1.114]	<1e-04	0.646	[0.401, 1.004]	<1e-04	-6.460	[-17.800, 2.625]	0.151
米 β_3	0.244	[0.174, 0.356]	<1e-04	0.0367	[-0.0984, 0.219]	0.909	7.172	[1.489, 14.529]	0.001
キノコ β_4	0.931	[0.629, 1.105]	<1e-04	2.544	[2.352, 2.780]	<1e-04	9.399	[2.427, 17.383]	0.00008
DIC	549.52			375.90			154.01		
サンプル数	9,322			3,310			207		

* 95%CI: 95% 信頼区間、p-MCMC: 疑似 p 値

いては、地元産米の摂取は影響しないものの、地元産キノコの摂取が他の変数と比較して体内放射エネルギーの高さと相対的に高い正の相関を持つことが示された。65 歳以上人口については、とりわけ地元産米・キノコの摂取が体内放射線量と高い正の相関を持つことが示された。これらの高齢層は、3.2 で指摘されたような日常的に地元産農産物を摂取する農業従事者であり、震災前から自宅に備蓄していた食品を摂取している可能性がある。今後も継続的に食品摂取への注意喚起を行う必要があるだろう。

2.5 結論と今後の課題

本研究では、福島第一原発事故後にひらた中央病院で WBC 検査を受けた約 34,000 名のデータから ^{137}Cs 体内放射エネルギーと食物摂取などの関係を実証的・定量的に分析した。大量の WBC 受検者データを用いて体内放射エネルギーとの関係を定量的に分析している点で、本研究はオリジナリティがある。

本研究での分析の結果から、慢性期には体内への放射エネルギーの取り込みを抑制するために、高齢層（特に農業従事者）や小児を中心に日常的食物摂取への注意喚起が必要であること、などが示唆された。一部の例外はあるものの、総体として体内放射エネルギーは低いレベルであることが示された。今後、食物摂取への関心度と体内放射エネルギーとの関係性を明らかにすることが課題である。

3 環境放射線量と甲状腺被曝との関連に関する研究

3.1 はじめに

本章では、東日本大震災とそれに伴う東京電力福島第一原発事故により居住地が放射能汚染の影響を受けたと考えられる地域の住民を対象に、甲状腺被曝検査結果の原因を定量的・実証的に明らかにする。類似する既往研究は、甲状腺検査結果の整理・集計にとどまる^{[7][8][9][10]}。本研究では、ひらた中央病院と公益財団法人震災復興支援放射能対策研究所が実施した甲状腺検査のデータを用いて、年齢や甲状腺疾患の有無、震災前居住地などと、甲状腺検査結果との関係を定量的に示した点に新規性がある。

3.2 ひらた中央病院における甲状腺検査

本研究では、ひらた中央病院及び公益財団法人震災復興支援放射能対策研究所が2012年10月26日から2013年3月26日までに実施した甲状腺検査データのうち、震災前居住地が福島県内居住者を対象としたデータを用いる。ひらた中央病院では、希望者全員を対象に無料で甲状腺検査を実施しており(図8)、血液検査のほかに常勤の甲状腺専門医が必要と判断すれば細胞検査や尿検査も実施している。

分析対象期間内の受検者数は811名(男性:307名、女性:504名)であり、表2に示す4段階で判定する。「A1判定」は結節や嚢胞をみつめなかったもの、「A2判定」は5.0mm以下の結節や20.1mm以上の嚢胞を認めたものまたは境界不明瞭な低エコー域または高エコー域を認めたもの、「B判定」は5.1mm以上の結節や20.1mm以上の嚢胞を認めたもの、そして「C判定」は甲状腺の状態から判断して直ちに二次検査を要するもの、である。

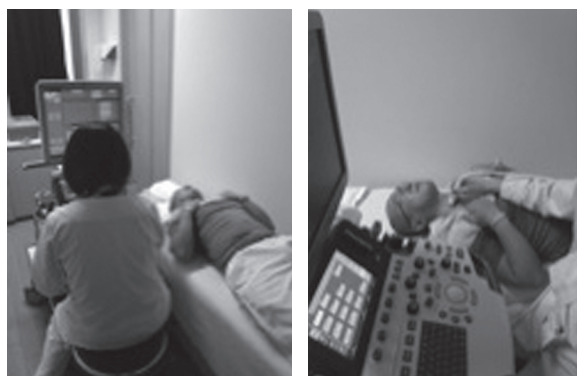


図8 ひらた中央病院における甲状腺検査の様子(注:写真は模擬被験者の病院職員)

表2 甲状腺検査の判定方法

判定結果		判定内容
A判定	A1	結節や嚢胞を認めなかったもの
	A2	5.0mm以下の結節や20.1mm以上の嚢胞を認めたもの。 境界不明瞭な低エコー域または高エコー域を認めたもの
B判定	5.1mm以上の結節や20.1mm以上の嚢胞を認めたもの	
C判定	甲状腺の状態から判断して、直ちに二次検査を要するもの	

分析では、甲状腺検査の集計、性別・年齢別の集計結果、医師判定結果と画像判定結果の違い、医師判定結果と嚢胞発現個数との関係分析、受検者の甲状腺疾患診断状況と血縁の甲状腺疾患有無、甲状腺診断結果と医師判定結果との関係分析を行ったが、ここでは紙面の都合上、その一部を示すに留める。

放射性ヨウ素による甲状腺被爆量が大人と子供とで異なること、さらに 50 歳以上では癌の発症率も高まることから、まず年齢を 18 歳以下 (子供) と 19 歳以上 (大人) に区分して判定結果を集計した。その結果は図 9 に示した通りである。検査結果が C 判定となったのは全体で 5 名に過ぎず (全体の約 0.6%)、18 歳以下と 19 歳以上のいずれのグループでも A2 判定となった人の数が多い (それぞれ各年齢別受検者数の 71.1%、47.8%)。

3.3 バイズ順序プロビットモデルによる甲状腺検査結果の分析

前節までに、甲状腺検査結果に関する調査結果を定性的に分析した。本節では、甲状腺検査結果を定量的に説明する分析モデルを構築する。分析対象とするのは、震災前福島県内に居住していた甲状腺検査受検者 752 名である。分析には、バイズ順序プロビットモデルを用い、個人属性のほかに甲状腺疾患既往歴、血縁の甲状腺疾患、震災前居住地の土壌 I131 汚染状況を説明変数とし、甲状腺検査判定結果 (A1, A2, B, C) を被説明変数とした。

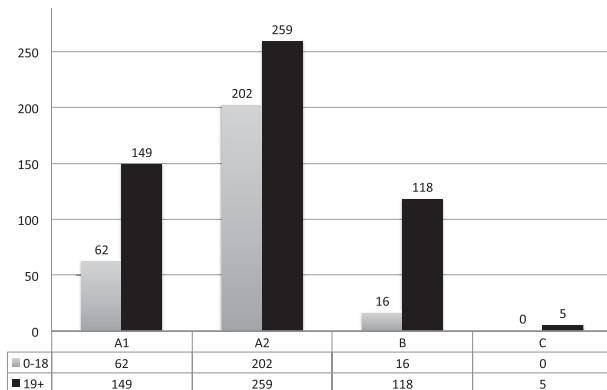


図 9 甲状腺検査判定結果の年齢別集計結果

3.4 分析結果

甲状腺検査の判定に関するモデル推定結果を表4に示す。なおここでは、モデルパラメータの事後分布に関する事後平均と標準偏差及び95%信頼区間を示す。モデルパラメータのシミュレーション結果は収束しており安定的な解が得られている。また、95%信頼区間において符号条件が一致しない変数を除いて推定したモデルを最終的に示すこととした。

この分析結果から甲状腺判定結果が、①前住地の土壌汚染濃度とは正の相

表3 モデル推定に用いた説明変数

変数名	概要
性別	男性 =1、女性 =0
年齢	2011 年 3 月 12 日時点の年齢
結節最大径	発現した結節の最大径 (mm) (発現しない場合は 0 とした)
既往歴	既往歴での甲状腺疾患の有無 有 =1、無 =0
血縁	血縁の甲状腺疾患の有無 有 =1、無 =0
慢性甲状腺炎	慢性甲状腺炎の有無 有 =1、無 =0
腺腫様甲状腺腫	腺腫様甲状腺腫の有無 有 =1、無 =0
単純性甲状腺腫	単純性甲状腺腫の有無の有無 有 =1、無 =0
甲状腺腫瘍	甲状腺腫瘍の有無 有 =1、無 =0
甲状腺機能亢進症	甲状腺機能亢進症の有無 有 =1、無 =0
潜在性甲状腺機能低下症	潜在性甲状腺機能低下症の有無 有 =1、無 =0
嚢胞性腺腫	嚢胞性腺腫の有無 有 =1、無 =0
二次性甲状腺機能亢進症(疑)	二次性甲状腺機能亢進症(疑)の有無 有 =1、無 =0
診断結果甲状腺	診断結果における甲状腺の有無 有 =1、無 =0
前住地の土壌 I131	震災前居住地における土壌 I131 濃度 (Bq/m ²) (文部科学省による 2011/6/4 半減期補正值を空間内挿入補間したもの)

表4 モデル推定結果

	事後分布		信頼区間	
	事後平均	標準偏差	2.5%	97.5%
定数項	-0.3130	0.1001	0.0213	0.3617
年齢	0.0071	0.0028	0.0002	0.0107
結節最大径	0.7293	0.0433	0.1406	0.1998
単純性甲状腺腫	1.0366	0.5513	0.3668	2.4001
甲状腺腫瘍	1.8208	0.7394	0.7246	3.5080
診断結果甲状腺	1.1679	0.1354	0.7308	1.2365
γ 2	2.4082	0.0968	1.8660	2.1304
γ 3	4.8887	0.2921	3.8599	4.6450

関が見られない、②甲状腺既往歴と正相関する、③甲状腺既往歴の中でも甲状腺腫瘍と強い正相関をもつ、ということが示された。この結果から、一部の人を除いては、甲状腺判定結果は前住地の放射線濃度などとは関係なく、むしろ本甲状腺検査を通じて（サンプル数が増えたことによる）甲状腺検査の精度が高まったと考えるのが妥当であると思われる。

3.5 結論と今後の課題

本章では、ひらた中央病院における甲状腺検査データを用いて、甲状腺検査による甲状腺疾患の判定結果がどのような要因によるものなのかを、定量的に明らかにした。その結果、甲状腺判定結果と福島県内における放射線土壌汚染濃度との関係は直ちには認められず、むしろ本人の甲状腺既往歴などとの関係が強い傾向にあることが示された。多くの受検者は震災前に甲状腺検査を経験していないため、甲状腺検査による甲状腺疾患の有無を詳細に把握できていたわけではない。そのため、今回の甲状腺検査の結果が、ただちに原発事故による影響とは断定できない。むしろ、受検者のサンプル数が増えたことにより、甲状腺疾患の罹患状況について精度の高いデータが得られたことが望ましいと言える。

今後、受検者データを増やすことにより、とりわけ18歳以下の子供たちに対して、甲状腺検査の影響要因を詳細に分析することが必要となる。また、甲状腺検査自体は福島県立医科大学などが実施しており、調査結果の比較分析を行うことも望ましい。

4 放射線事故避難者の帰還状況による被曝差 ～福島県川内村住民を対象に～

4.1 はじめに

川内村は東京電力福島第一原発から約10km～25kmの南西に位置し、面積は約197km²、震災前人口2,816人（2013年5月1日現在は2,622人）の村である。原発事故による汚染の影響で、2011年3月15日に全村避難が決定され^[11]、全員が近接する郡山市やいわき市などの県内または県外に避難をした。しかしながら、水素爆発の危険性や原子炉の冷却ができなくなる可能性

は低くなったこと、放射線量が比較的低かったことから、2011 年 9 月 30 日緊急時避難準備区域が解除されたことを根拠として、村長は 2012 年 1 月 31 日に帰村宣言を発した。その後、2013 年 5 月 27 日の時点では震災以前の人口の 15% である 506 人が帰村した^{注1}。

川内村は、平成 19 年の第一次産業人口が約 15% を占める自治体であり、汚染食品の摂取リスクが高く、帰村後汚染食品による内部被曝が強く生じることが予想される。川内村の汚染食品データを用いた過去の研究によると、帰村した場合の予想される内部被曝は年に 0.37-0.70 mSv/yr と報告されている。ホールボディーカウンター検査による原発事故後の体内被曝量の推移を調査した研究事例は、事故直後の検査^{[12][13][14]}から慢性期を含む検査^{[15][16][17]}まで、いくつか報告されている。しかしながら、今回の帰村以降、実際に内部被曝がどの程度かを計測した研究蓄積は十分にない。

川内村は事故後避難を行った自治体の中で帰村宣言を行った最初の例であり、川内村村民の内部被曝を明らかにすることは、帰村という政策的意思決定の妥当性の検証のために非常に重要である。今回我々は、川内村民（震災前の居住地が川内村の方）の内部被曝量を健診データから分析し、そのうち帰村された方の内部被曝量を調べた。また、帰村によって内部被曝が上昇傾向にあるかを調べるため、帰村された方と帰村されていない方における内部被曝の差を比較した。

4.2 分析の方針と方法

川内村では 2012 年 1 月 31 日に帰村宣言を発した。帰村宣言以前から川内村村民は、住民検診として村役場からの通知に従い自由に検査を受けることができる。ひらた中央病院では 2011 年 11 月以降、川内村村民を対象に内部被曝検査を実施してきた（延べ受検者数 492 名）。2012 年 4 月以降の検査では、川内村出身受検者の帰村状況も調査している。本分析では、2012 年 4 月 1 日から 2013 年 3 月 31 日までの間に、川内村出身者（東日本大震災前居住地が川内村）でひらた中央病院において内部被曝検査を受けた 347 名のうち帰村状況が不明の 10 名を除く 337 名のデータを用いて分析した。

ひらた中央病院では、CANBERRA 社製 Fastscan2251 を用いて内部被曝

検査を実施しており、検出限界は2分間の立位において ^{134}Cs 、 ^{137}Cs それぞれ220Bq/body、250Bq/bodyである。検査では、年齢、性別、体重あたり $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ のほか、震災前後居住履歴などを記録している。検査時に実施された食品問診調査では震災後の食物摂取について、米・肉・魚・野菜・キノコ類・牛乳・果物の購入時に地元産品または家庭採取品を摂取しているか、自宅水道・飲料水・調理用水に上水道や井戸水などを使用しているか、家庭菜園野菜を摂取しているか、などを尋ねた。

本分析においては、川内村村民の帰村宣言後における帰村による内部被曝量への影響を明らかにすることを目的としている。具体的には、帰村者と未帰村者、現居住地と村を往復する者（以下、往復）の3群間での、(1) 内部被曝量の検出率の差および、(2) 食品問診調査からの地元産または家庭栽培食品摂取比率の差、とを比較検討した。さらに(3) 複数回検査を受けた者のうち1回でも ^{137}Cs が検出された者の体内放射能量(Bq/body)の推移を示した。帰村者(G_1)、往復(G_2)及び未帰村者(G_3)の定義は表5の通りである。

帰村状況に応じた調査対象者数は、表6に示したとおりである。調査対象期間における内部被曝検査の受検者のうち、帰村者(G_1)、往復(G_2)及び未帰村者(G_3)はそれぞれ149名、61名、127名であった。

分析(1)では ^{137}Cs 体内放射能量が検出された人の率を $G_1 \sim G_3$ の3群間で求め、比率の差の多重比較を行った。分析(2)では食品問診検査のうち地元産または家庭菜園を摂取していると回答した者の比率が高い米と野菜について $G_1 \sim G_3$ の3群間で求め、比率の差の多重比較を行った。分析(1)(2)では、比率の差の多重比較にフィッシャーの正確確率検定(Fisher's exact test)を用い、推測統計学とベイズ統計学の2つのアプローチで適用した。分析(3)では、特に帰村状況に関わらず複数回受検した人の体内放射能量の推移を把握するため、川内村村民を対象に検査を開始した2011年7月以降のデータ

表5 帰村者・未帰村者・往復の定義

G_1 : 帰村者	週に4日以上川内村で生活
G_2 : 往復	週に1回以上川内村に滞在
G_3 : 未帰村者	不定期に川内村に滞在・全く川内村に戻っていない

表 6 川内村村民のひらた中央病院における内部被曝検査の受検状況
(2012 年 4 月 1 日から 2013 年 3 月 31 日)

年齢区分	全体		帰村		往復		未帰村		不明*	
	人数	割合	人数	割合	人数	割合	人数	割合	人数	割合
4-12 歳	14	4.0%	5	3.4%	3	4.9%	6	4.7%	0	0.0%
13-18 歳	5	1.4%	2	1.3%	0	0.0%	3	2.4%	0	0.0%
19-40 歳	34	9.8%	17	11.4%	4	6.6%	12	9.4%	1	10.0%
41-60 歳	92	26.5%	34	22.8%	26	42.6%	30	23.6%	2	20.0%
61-80 歳	188	54.2%	84	56.4%	25	41.0%	72	56.7%	7	70.0%
81-100 歳	14	4.0%	7	4.7%	3	4.9%	4	3.1%	0	0.0%
合計	347	100%	149	100%	61	100%	127	100%	10	100%

性別	全体		帰村		往復		未帰村		不明*	
	人数	割合	人数	割合	人数	割合	人数	割合	人数	割合
男性	154	44.4%	72	48.3%	31	50.8%	45	35.4%	6	60.0%
女性	193	55.6%	77	51.7%	30	49.2%	82	64.6%	4	40.0%
合計	347	100.0%	149	100.0%	61	100.0%	127	100.0%	10	100.0%

* 検査対象者のうち帰村状況が不明なためであり、本分析からは除外した。

を用いて、体内放射エネルギー (Bq/body) の推移を示すこととした。

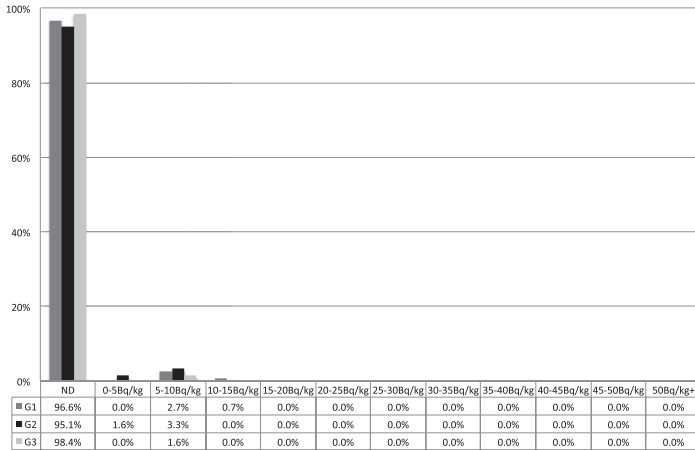
4.3 分析結果

4.3.1 ^{137}Cs 体内放射エネルギーの検出率の差

$G_1 \sim G_3$ の ^{137}Cs 体内放射エネルギーの状況は、図 10 に示したとおりである。 $G_1 \sim G_3$ の ^{137}Cs 体内放射エネルギー検出率は、それぞれ 3.47%、5.17%、1.60% となった。フィッシャーの正確確率検定を用いて 3 群間の p 値を求めたところ、 p 値はいずれも 0.05 より大きく、帰無仮説は棄却されない、すなわち 3 群間で検出率に差が無いという結果が示された。検出率を事後分布ベイズ推定したところ、いずれも 95% の確率では 3 群間に検出率の差が無いことを示された。以上の結果から、推測統計学とベイズ統計学いずれの結果も、帰村状況によって ^{137}Cs 体内放射エネルギー検出率に差が無いことを示している。

4.3.2 食品摂取における地元産品または家庭栽培食品摂取比率の差

食品問診調査では、震災後の食品摂取について、米・肉・魚・野菜・キノコ類・牛乳・果物の購入時の購入理由として、①スーパーで購入し産地を選

図 10 $G_1 \sim G_3$ の ^{137}Cs 体内放射能検出状況

ぶ (Category 1)、②スーパーで購入し産地を選ばない (Category 2)、③地元産または家庭で採れたものを選ぶ (Category 3)、を選択している。調査時には複数回答可としたが、ここでは回答に③を含む率に着目し分析を行った。無回答を含む $G_1 \sim G_3$ の選択割合は、それぞれ図 11～図 13 のようになった。

「地元産または家庭で採れたものを選ぶ (Category 3)」がされた食品のうち、米と野菜については比率が他の食品と比較して相対的に高い。そこで、米と食品について、「地元産または家庭で採れたものを選ぶ (Category 3)」比率を $G_1 \sim G_3$ の間で比較した。

フィッシャーの正確確率検定を用いて 3 群間の p 値を求めた。米については、 G_1 と G_3 、 G_2 と G_3 でそれぞれ p 値が 0.05 未満となり、5% 水準で統計的に有意となったことから、地元産または家庭で採れたものを選ぶ比率に差があることが示された。野菜については、 G_1 と G_2 、 G_1 と G_3 でそれぞれ p 値が 0.05 未満となり、5% 水準で統計的に有意となったことから、地元産または家庭で採れたものを選ぶ比率に差があることが示された。

米と野菜について地元産または家庭で採れたものを選ぶ比率の事後分布をベイズ推定した。米については、 G_1 と G_3 、 G_2 と G_3 で 95% の確率で比率に差があることが示された。また野菜については、 G_1 と G_2 、 G_1 と G_3 で 95%

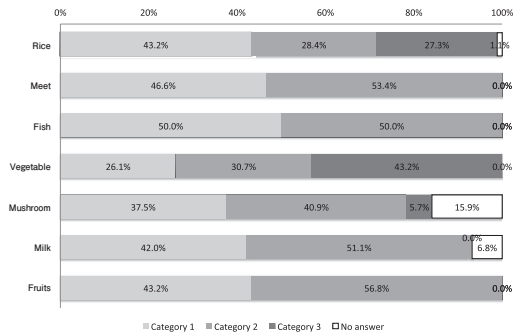


図 11 G_1 の食品購入理由

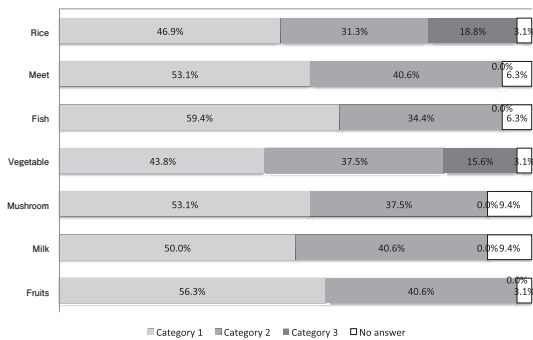


図 12 G_2 の食品購入理由

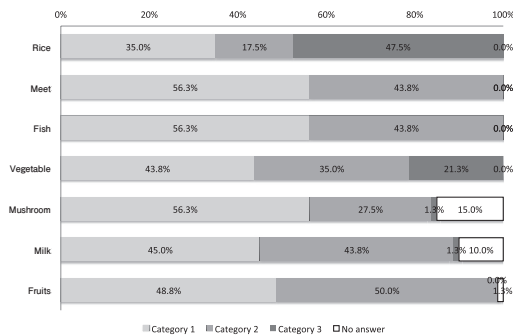


図 13 G_3 の食品購入理由

の確率で比率に差があることが示された。

以上の結果から、推測統計とバイズ統計いずれの結果からも、米については、 G_1 と G_3 、 G_2 と G_3 で地元産または家庭で採れたものを選ぶ比率が異なり、野菜については、 G_1 と G_2 、 G_1 と G_3 で地元産または家庭で採れたものを選ぶ比率が異なる結果が示された。

帰村状況に応じて ^{137}Cs 体内放射エネルギーの検出比率に差が無かったことが示されたことから、少なくとも米と野菜については地元産または家庭で採れたものを選ぶかどうか ^{137}Cs 体内放射エネルギーの検出に影響を与えないであろうと考えられる。

4.3.3 1回でも ^{137}Cs が検出された受検者の体内放射エネルギーの推移

2012年4月以降の帰村状況がわかる複数回受検者のうち、1回でも ^{137}Cs が検出された受検者16名の2011年11月以降の体内放射エネルギーの推移を図14に示した。2012年4月以降に ^{137}Cs が検出された受検者は2名であり、2012年6月時点で ^{137}Cs が検出された受検者を除いた15名は2回目以降の検査で ^{137}Cs が検出されない結果となっている。

5 まとめ

本研究では、応用統計学者としての筆者が福島第一原発事故後に、様々な研究者や医師らとの共同で実施した調査研究の一部を紹介することを目的とした。特に、浜通り地区を中心に実施された甲状腺検査やホールボディカウンター検査のデータ解析結果を中心に紹介した。ここで紹介した疫学研究、健康影響調査には、医師らによる解析を補助する立場に関わることが多かったが、本論文では筆者なりの解析や集計を行ったものを紹介している。既に述べたように、研究成果の詳細は、巻末の【主な研究成果】に示した論文を参照して頂ければ幸いである。調査・解析の結果は、いずれも調査データが得られた時点までのものである。今後中長期的に調査が継続されることにより、結果が更新、或いは更に裏付けられることを期待している。

本論の冒頭では、環境放射線の測定や可視化、解析の現場で得られた貴重な体験や筆者なりの考えについても一部紹介することができた。震災後5年

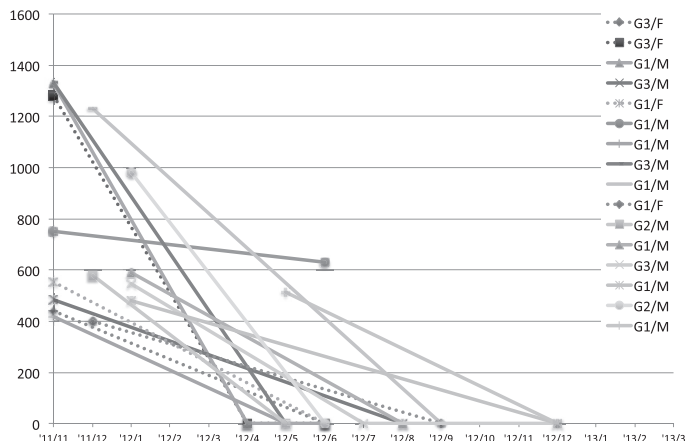


図 14 ^{137}Cs 体内放射エネルギーの推移

を経て、筆者が感じてきたことをまとめて記述するのは初めてのことである。紙面の都合上、十分に書ききれない内容もあったし、誤解を生むような表現もあるかもしれない。その点については予めお詫びしておく。

「次の原発事故」というのは決しておきてはならないことであるが、原発事故が発生した場合の環境計測、健康影響被害調査、被災者調査など必要となる調査方法、及びデータ解析手法については、今後体系的に整理され、次世代に継承すべきである。そのためにも、関係機関は時期が来れば保有するデータがある程度オープン化し、様々な研究者によって活用されるような仕組みづくりが必要である。また各専門機関においても、データサイエンティストを活用する体制を用意しておくべきだろう。

最後になるが、本研究を実施する機会を与えてくださった全ての方々に、改めて謝意を表する次第である。

主な研究成果

- (1) Shuhei Nomura, Masaharu Tsubokura, Ryugo Hayano, Daisuke Yoneoka, Akihiko Ozaki, Yuki Shimada, Tomoyuki Furutani, Yukio Kanazawa and Tomoyoshi Oikawa, "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*, 2015;5:e009555, doi:10.1136/bmjopen-2015-009555, 2015.
- (2) Shuhei Nomura, Masaharu Tsubokura, Tomoyuki Furutani, Ryugo S. Hayano, Masahiro Kami, Yukio Kanazawa, and Tomoyoshi Oikawa, “Dependence of radiation dose on the behavioral patterns among school children: a retrospective analysis 18 to 20 months following the 2011 Fukushima nuclear incident in Japan,” *Journal of Radiation Research*, doi: 10.1093/jrr/rrv051, 2015.
 - (3) Shuhei Nomura, Masaharu Tsubokura, Ryugo Hayano, Tomoyuki Furutani, Daisuke Yoneoka, Masahiro Kami, Yukio Kanazawa, and Tomoyoshi Oikawa, “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.*, doi: 10.1021/es503504y, 2014.
 - (4) Hajime Watanobe, Tomoyuki Furutani, Masahiko Nihei, Yu Sakuma, Rie Yanai, Miyuki Takahashi, Hideo Sato and Fumihiko Sagawa, “The Thyroid Status of Children and Adolescents in Fukushima Prefecture Examined during 20–30 Months after the Fukushima Nuclear Power Plant Disaster: A Cross-Sectional, Observational Study,” *PLoS ONE*, 9(12): e113804, doi:10.1371/journal.pone.0113804, 2014.
 - (5) Tomoyuki Furutani, Keisuke Uehara, Masaharu Tsubokura and Shuhei Nomura, “A Study on Spatio-temporal Epidemiological Database on Internal/External Exposure Caused by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant,” *Global Risk Forum, The 5th International Disaster and Risk Conference (IDRC) at Davos*, 2014.
 - (6) Tomoyuki Furutani, “Visualizing Long Term Decay of ^{133}I and ^{137}I Cs Soil Concentrations in Fukushima via Bayesian Kriging Interpolation,” *International Society for Bayesian Analysis World Meeting (ISBA2014)*, July, 2014.
 - (7) Masaharu Tsubokura, Shigeaki Kato, Masahiko Nihei, Yu Sakuma, Tomoyuki Furutani, Keisuke Uehara, Amina Sugimoto, Shuhei Nomura, Ryugo Hayano, Masahiro Kami, Hajime Watanobe and Yukou Endo, “Limited Internal Radiation Exposure Associated with Resettlements to a Radiation-Contaminated Homeland after the Fukushima Daiichi Nuclear Disaster,” *PLoS ONE*, 8(12): e81909, doi:10.1371/journal.pone.0081909, 2013.
 - (8) Tomoyuki Furutani, Masaharu Tsubokura, Keisuke Uehara, Masahiko Nihei and Yu Sakuma, “A Study on Internal Radiation Exposure due to ^{137}Cs Caused by Fukushima Daiichi NPP Accident,” *Journal of Disaster Research*, Vol.8 Special Edition, pp. 756–761, 2013. (共著)
 - (9) Tomoyuki Furutani, Keisuke Uehara, Kazunori Tanji, Masaki Usami and Toshihiko Asano, “A Study on Micro-Scale Airborne Radiation Monitoring by Unmanned Aerial Vehicle for Rural Area Reform Contaminated by Radiation,” *Proceedings of the Disaster Management 2013, The 9th Annual Conference of International Institute for Infrastructure, Renewal and Reconstruction*, 2013. (共著) (received a highly commended award)
 - (10) Tomoyuki Furutani, Keisuke Uehara and Jun Murai, “A Study on Community-Based Reconstruction from Nuclear Power Plant Disaster - A Case Study of Minamisoma Ota Area in Fukushima -,” *Journal of Disaster Research*, Vol.7 Special Edition Aug., pp. 432–438, 2012. (共著)
 - (11) Tomoyuki Furutani, Keisuke Uehara, Pieter Franken, Christopher Wang, Joe

- Morros and Jun Murai, “A Study on Platform to Scan the Earth Information Including Environmental Radiation in the Internet Society,” *Proceedings of the Disaster Management 2012, The 8th Annual Conference of International Institute for Infrastructure, Renewal and Reconstruction*, pp. 450–456, 2012. (共著)
- (12) 古谷 知之・植原 啓介・丹治 三則「走行測定に基づく放射線空間線量率空間分布の推定—南相馬市の農地・牧草地を事例に—」『応用統計学会一般講演論文集』2012 年。

注

- 1 安否情報上の帰村者数。後述するように、川内村では「週 4 日以上村にいる人」を帰村者と定義している。

参考文献

- [1] 宍戸 文男・田勢 長一郎・佐藤 久志・宮崎 真・長谷川 有史「緊急被ばく医療体制と東電原発事故災害への対応及び今後の課題」『Surgery Frontier』18(4), 2011 年、pp.35–38。
- [2] Tsubokura, M., et al., “Internal Radiation Exposure After the Fukushima Nuclear Power Plant Disaster,” *The Journal of American Medical Association*, 308(7), pp. 669–670, doi:10.1001/jama.2012.9839.
- [3] Harada, K. et al., “Dietary Intake of Radiocesium in Adult Residents in Fukushima Prefecture and Neighboring Regions after the Fukushima Nuclear Power Plant Accident: 24-h Food-Duplicate Survey in December 2011,” *Environ. Sci. Technol.*, 47(6), 2013, pp. 2520–2526, doi: 10.1021/es304128t.
- [4] Kamada, N. et al., “Radiation doses among residents living 37 km northwest of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant,” *Journal of Environment Radioactivity*, Vol. 110, August 2012, pp. 84–89.
- [5] 公益財団法人復興支援放射能対策研究所。<<http://www.fukkousien-zaidan.net/research/index.html>> (accessed on May 26th 2013, in Japanese)
- [6] 古谷 知之『空間データの統計分析』朝倉書店、2011 年。
- [7] S. Tomotani et al., “Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident,” *Schientific Report*, 2, 2011, p. 507, doi: 10.1038/srep00507.
- [8] S. Nagatani, “Thyroid Consequences of the Fukushima Nuclear Reactor Accident,” *Eur. Thyroid J.*, 1, 2012, pp. 148–158, doi: 10.1159/000342697.
- [9] K. Akahane, “The Fukushima Nuclear Power Plant accident and exposures in the environment,” *Environmentalist*, 32, 2012, pp. 136–143, doi: 10.1007.
- [10] Y. Hosokawa et al., “Thyroid Screening Survey on Children after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident,” *Radiation Emergency Medicine*, Vol. 2, No. 1, 2013, pp. 82–86.
- [11] 遠藤 雄幸「川内村における震災後の状況と復興に向けて」2011 年。<[http://www.iae.or.jp/jyosen/pdf/Fukushima\(Feb_4th\)/15_Endo%20\(Kawauchi_Village\)/Endo\(Kawauchi_Village\).Japanese.pdf](http://www.iae.or.jp/jyosen/pdf/Fukushima(Feb_4th)/15_Endo%20(Kawauchi_Village)/Endo(Kawauchi_Village).Japanese.pdf)> (2013 年 6 月 3 日閲覧)
- [12] 谷川 攻一・細井 義夫・寺澤 秀一・近藤 久禎・浅利 靖・宍戸 文男・田勢 長一郎・富永 隆子・立崎 英夫・岩崎 泰昌・廣橋 伸之・明石 真言・神谷 研二「福島原子

- 力発電所事故災害に学ぶ―震災後5日間の医療活動から―」『日本救急医学会雑誌』22(9)、2011年、pp.782-791。
- [13] S. Monzen et al., “Individual Radiation Exposure Dose Due to Support Activities at Safe Shelters in Fukushima Prefecture,” *PLoS One*, 6(11), 2011, e27761.
- [14] N. Kamada, O. Saito, Satoru Endo, Akirou Kimura, Kiyoshi Shizuma, “Radiation doses among residents living 37 km northwest of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant,” *Journal of Environmental Radioactivity*, 110, 2012, pp. 84-89.
- [15] N. Matsuda, A. Kumagai, A. Ohtsuru, N. Morita, M. Miura, M. Yoshida, T. Kudo, N. Takamura and S. Yamashita, “Assessment of Internal Exposure Doses in Fukushima by a Whole Body Counter Within One Month after the Nuclear Power Plant Accident,” *Radiation Research*, 179, 2013, pp.663-668, doi: 10.1667/RR3232.1.
- [16] Tsubokura M, Gilmour S, Takahashi K, Oikawa T, Kanazawa Y., “Internal radiation exposure after the Fukushima nuclear power plant disaster,” *J. Amer. Med. Assoc.*, 308, 2012, pp. 669-670.
- [17] Hayano R.S., M. Tsubokura, M. Miyazaki, H. Satou, K. Sato, S. Masaki, Y. Sakuma, “Internal radiocesium contamination of adults and children in Fukushima 7 to 20 months after the Fukushima NPP accident as measured by extensive whole-body-counter surveys,” *Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and Biological Sciences*, 89(4), 2012, pp. 157-163.

〔受付日 2016. 4. 3〕