

## 放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和3年度年次報告書（詳細版）

研究課題名	大気拡散シミュレーションによる時間空間放射能データベースを用いた避難行動パターン毎の初期線量評価
研究期間	令和3年4月1日～令和4年2月28日

氏名	所属機関・職名
主任研究者	鈴木 元 国際医療福祉大学クリニック・院長

氏名	所属機関・職名
研究協力者	石川 徹夫 福島県立医科大学医学部・教授
研究協力者	長谷川 有史 福島県立医科大学医学部・教授
研究協力者*	大葉 隆 福島県立医科大学医学部・助教
研究協力者	永井 晴康 日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター・ディビジョン長

研究要旨	<p>2011年の福島第一原発事故の被ばく線量と甲状腺がんの関連を解析するためには、子供達の個人甲状腺等価線量（TED）を評価する必要がある。環境省の放射線健康管理・健康不安対策事業の予算を得て2014年から2019年に行った先行包括研究において、私たちは大気拡散シミュレーション法を改良し、逆解析手法によりソースタームを精緻化した。その成果として世界版緊急時環境線量情報予測システム（WSPEEDI）により時間空間放射能濃度データベース（WSPEEDI_2019DB）を構築した。私たちは、また、福島県「県民健康調査」データベースから無作為に抽出された事故当時原発周辺16自治体に住んでいた19歳以下の住民の匿名化行動調査票3,256件を入手した。このWSPEEDI_2019DBの一時間毎の地上1mの粒子状、蒸気状、およびメチル化ヨウ素-131濃度と個人行動調査票の緯度経度情報をキーに、吸入被ばくによる<math>^{131}\text{I}</math>-TEDを個人ごとに評価した。屋内退避による防護係数として0.5を採用し、また、日本人の甲状腺体積はICRPモデルと変わらないものの、ヨウ素甲状腺取り込み率が18.6%（SD6.0%）とICRP甲状腺モデルの30%より低いため、線量換算係数の補正係数0.62を導入した。次いで、年齢別、期間別の<math>^{132}\text{Te}</math> (<math>^{132}\text{I}</math>)/<math>^{131}\text{I}</math>比および<math>^{133}\text{I}</math>/<math>^{132}\text{I}</math>比を使って、<math>^{131}\text{I}</math>、<math>^{132}\text{Te}</math>、<math>^{132}\text{I}</math> および <math>^{133}\text{I}</math> からの TED を計算した。さらに、WSPEEDI_2019DB からワン・コンパートメント・モデル（1-コンパートメント・モデル）を使って1時間毎、3kmメッシュ毎の水道水<math>^{131}\text{I}</math>濃度のメタデータベースを構築した。このメタデータベースと個人行動調査票を組み合わせて、水道水の経口摂取によるTEDを個人ごとに推計した。最後に、2011年3月12日から3月25日までの吸入被ばくと経口被ばくによるTEDを個人ごとに統合した。TEDの分布は、2011年3月にいわき市、川俣町、飯舘村で甲状腺測定された1,080名のTED分布とよく整合した。1歳児のTEDは、伊達市の1.3mSvから南相馬市小高区の14.9mSvまで分布し、同じく95パーセンタイル値は、伊達市の2.3mSvから浪江町の28.8mSvまで分布した。私たちの評価値は、UNSCEAR2020報告書の数値と整合している。本研究で開発された方法論は、将来、福島原発事故後の甲</p>
------	--

	甲状腺がんの疫学調査に利用できるであろう。
キーワード	福島第一原発事故、甲状腺等価線量、大気拡散シミュレーション、個人行動調査票、吸入被ばく、経口被ばく

## I 研究目的

**【背景】**2011年3月の東電福島第一原発事故で漏洩した放射性ヨウ素の環境汚染により、小児の甲状腺がんが増加するのではないかと懸念があった。しかし、甲状腺内部被ばくの実測値は1300件程度しか報告されておらず、地理的、年齢別の線量分布は判っていなかった。実測値の少なさを補うために、原発からの放射性物質の経時的放出情報と大気拡散シミュレーション(ATDM)を用いて、住民の内部被ばくレベルがシミュレーションされたが、ATDMシミュレーションを利用したWHO福島報告書<sup>1</sup>、UNSCEAR 2013報告書<sup>2</sup>における甲状腺線量評価は不確実性が大きく、1080名の小児甲状腺<sup>131</sup>I実測値から推計された線量<sup>3</sup>や、事故後5ヶ月までにホールボディカウンター測定された住民の<sup>137</sup>Cs内部被ばく分布<sup>4</sup>から判断すると、過大評価になっていると考えられた。他方、小児甲状腺がんに関する住民の懸念に答えるため2011年10月から開始された福島県「県民健康調査」・甲状腺検査では、2018年3月時点で187名の甲状腺がん・がん疑いが発見され、そして2021年6月時点でその数は265名に達する。原発事故による内部被ばくと甲状腺がんの関連性を解明するためには、福島県民全体のより精緻な小児甲状腺等価線量(TED)の推計が必要である。

**【目的】**UNSCEARによる福島原発事故の影響再評価作業に寄与するため、無作為抽出した行動調査票を使った線量評価法を開発し、その妥当性を検討する。先行して5年間実施した包括研究の成果である精緻化されたソースタームとATDMシミュレーションにより計算された時間空間放射能濃度データベース(WSPPEEDI\_2019DB)と個人行動調査票を組み合わせた解析により、TEDを推計する。この際、日本固有の屋内退避の防護効果やICRPモデルより低い甲状腺ヨウ素取り込み率を反映した補正項を提案し、実態に近いTEDを推計し、その妥当性を検討する。また、線量評価の不確かさを評価する。

**【環境行政の課題との関連性】**本研究成果は、住民の放射線被ばくに対する不安に寄り添い、云われなき差別や風評被害に対処する基礎データとなる。また、本研究で開発した線量評価プログラムは、福島県の疫学調査に利用可能である。

## II 研究方法

**【先行包括研究の概要】**本研究は、先行する包括研究班(2014年度～2018年度)の成果を使った研究であるので、その研究方法の概要を最初に纏めておく。第一に、日本原子力研究開発機構(原子力機構)の永井等は、2013年以降に発掘された環境測定値、とりわけ環境研究総合推進費で実施された森口班「原発事故により放出された大気中微粒子等の曝露評価とリスク評価のための学際研究」の研究成果<sup>5</sup>を利用してATDMシミュレーションの精緻化を行った。すなわち、福島県等の浮遊粒子状物質(SPM)の観測ステーションのSPM収集濾紙に残されていた放射性セシウム<sup>137</sup>Csの連続測定値を使って、逆解析手法(注1)とアンサンブル計算手法(注2)をつかってソースタームの最適化とATDMの一種である世界版緊急時環境線量情報予測システム(WSPPEEDI)による推計の精緻化を行った<sup>6</sup>。

(注1) 逆解析手法：モデル計算の出力結果(ここでは濃度や沈着量)が測定データを再現するように、モデル計算の入力条件(ここではソースターム)を求める解析手法。

(注2) アンサンブル計算手法：モデル計算の初期値にばらつきを与えて複数の計算を行い、初期値に含まれる誤差により予測結果がどの程度変わるかを示す計算手法。異なる予測結果の解析から予測精度の向上や確率的予測を行うことができる。

第二に、福島県立医大の Ohba 等は、3月12日に浪江町で被ばくした住民の衣服の $\gamma$ スペクトル分析結果に基づき、 $^{131}\text{I}$ 以外の短半減期核種の甲状腺線量への寄与率を求めた<sup>7</sup>。また、浪江町、南相馬市の避難者に高い体表面汚染が有ることを報告し、2013年段階の評価ではプルームは主に海上に流れていたとのシミュレーション結果であったが、南相馬市では3月12日のプルーム曝露が重要であることを指摘した。第三に、Ohba 等は、避難シナリオを見直し、19歳以下の県民の行動調査票を避難地区7市町村別に無作為抽出し、市町村別に複数の避難行動パターンとその割合を同定した<sup>8</sup>。第四に、東京大学大学院薬学系研究科の楠原等は、ICRPのモデルのヨウ素クリアランス率30%と比較すると日本人の値が18.6%と低い事、しかし甲状腺体積はほぼ同じである事を確認した<sup>9</sup>。そこで、Ohba 等は、線量評価の際に甲状腺等価線量換算係数に0.62(=18.6/30)の補正係数を乗じて線量評価を行うことを提案した<sup>8</sup>。第五に、原子力機構のHirouchi 等が実験的に求めた日本家屋の屋内退避防護係数<sup>10</sup>を利用した。屋内退避防護係数は建造時期、風速、退避経過時間等により異なるので、風速2.5m/s、経過時間6時間の場合の、2008年の福島県の個人住宅の建造時期別戸数の統計を使って、建造時期加重平均の屋内退避防護係数を計算した<sup>8</sup>。そして、全てのプルーム曝露に使う防護係数として0.5を使った。第六に、Miyatake 等は、水道水からの経口被ばく線量を推計するに当たり、先行研究で確立したワン・コンパートメント・モデルの方法論を踏襲しつつも、新たに全国のアンケート調査により得られた1歳児、10歳児、成人の水道水摂取量(中央値、平均値、95パーセンタイル値(以下95%値という))を使い線量を推計した<sup>11 12</sup>。第七に、量子科学技術研究開発機構(量研機構)のKim らは、2011年3月末にいわき市、川俣町、飯舘村で実施した1,080名の簡易甲状腺検査データの見直しを実施し、急性被ばくシナリオおよび慢性被ばくシナリオで市町村別、年齢階層別のTED分布を求め直した<sup>3</sup>。

方法論は完成していたが、実測値との整合性を高めるため、逆解析手法を使ったソースタームの最適化、ATDMの精緻化が完了し、WSPEEDIによる時間空間放射能濃度シミュレーションが完成したのは2019年秋であった<sup>6</sup>。このため、精緻化された時間空間放射能濃度データベース(WSPEEDI\_2019DB)を用いたTED計算は、2020年度から始まる本研究に引き継がれた。

## 【本研究の方法論】

### 1. 匿名化行動調査票の無作為抽出

国際医療福祉大学および福島県立医大の倫理委員会による研究計画書の審議、そして研究計画の実施許可(IUHW: 13-B-185, 2016年8月; 13-B-339, 2019年3月、FMU: No.29100, 2018年8月; No.2019-003, 2019年7月)を受けた後、避難地区およびその周辺市町村住民の事故時19歳以下の行動調査票を福島県「県民健康調査」データベースより無作為抽出した。抽出数は、先行して入手した市町村に関しては、南相馬市300、双葉町、大熊町、富岡町、楡葉町、浪江町、飯舘村各100、後から入手した市町村に関しては、いわき市1,000、相馬市、田村市、伊達市各300、広野町、新地町、川俣町、川内村、葛尾村各100である。

そのうち、3月11日から3月25日間の行動記録が有り、解析対象となった総数は3,256名である。

## 2. 行動調査票をベースとした吸入被ばく線量の評価（簡略法）

WSPEEDI\_2019DBは、NetCDFという言語で書かれたデータベースで、一時間毎の1kmメッシュないし3kmメッシュの代表地点の緯度経度毎の放射性核種（総 $^{131}\text{I}$ 、蒸気状 $^{131}\text{I}$ 、粒子状 $^{131}\text{I}$ 、有機化 $^{131}\text{I}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{132}\text{Te}$ ）の地上1mから上空までの放射能濃度および地上沈着量を格納している<sup>6</sup>。本研究の前半においては、量研機構で開発されたPython言語で書かれたプログラムを利用し、NetCDFのデータベースの一部をMicrosoft Excelにコピーし、利用した。このプログラムは、手動で緯度経度情報を入力すると、それに該当する1kmメッシュおよび3kmメッシュの地上1mの核種濃度データがExcelファイルとして出力される。その制約のため、研究前半では、避難地区住民の避難経路に沿った代表的152地点の放射能濃度情報を使って吸入被ばく線量を計算した。また、移動経路・時間の不確かさを丸めて、一日24時間を6時間毎（0-6、6-12、12-18、18-24）の4ステップとすることで、3月12日0時から3月25日24時までの56ステップに簡略化し、6時間帯の最も多くいた場所の核種濃度情報を使い、吸入被ばく $\text{TED}_{\text{inhal}}$ を以下の計算式で求めた。

$$\text{TED}_{\text{inhal}} = \sum_{i=1}^{56} \frac{V}{4} \times (C_{i-p} \times e_{\text{inhal-p}} + C_{i-el} \times e_{\text{inhal-el}} + C_{i-met} \times e_{\text{inhal-met}}) \times FC \times DF_{\text{shelter}}$$

(式1)

この(式1)の $V$ はICRPの年齢階層別一日換気量( $\text{m}^3/\text{day}$ )、 $C_{i-p}$ 、 $C_{i-el}$ 、 $C_{i-met}$ は、それぞれWSPEEDI\_2019DBの粒子状、元素ヨウ素蒸気、有機化 $^{131}\text{I}$ の濃度( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )、そして $e_{\text{inhal-p}}$ 、 $e_{\text{inhal-el}}$ 、 $e_{\text{inhal-met}}$ は、ICRP Publ 71の年齢階層別のエアロゾル粒子状、蒸気状、有機化 $^{131}\text{I}$ の甲状腺等預託価線量係数( $\text{Sv}/\text{Bq}$ )である(表1)。 $FC$ は、日本人のヨウ素甲状腺取り込み率の低さを反映させるための補正項で中央値は0.62、 $DF_{\text{shelter}}$ は日本家屋の屋内退避による吸入被ばく防護係数で中央値0.5を採用している。補正項や屋内退避防護効果の不確実性評価は後述する。

表 1 吸入被ばく甲状腺預託等価線量係数(ICRP Publ 71)

化学型	有機化 ( <sup>131</sup> I)	元素蒸気 ( <sup>131</sup> I)	粒子 ( <sup>131</sup> I), AMAD=1.0 mm, Type F	換気量
単位	Sv/Bq			m <sup>3</sup> /日
1 歳	2.5×10 <sup>-6</sup>	3.2×10 <sup>-6</sup>	1.4×10 <sup>-6</sup>	5.16
5 歳	1.5×10 <sup>-6</sup>	1.9×10 <sup>-6</sup>	7.3×10 <sup>-7</sup>	8.72
10 歳	7.4×10 <sup>-7</sup>	9.5×10 <sup>-7</sup>	3.7×10 <sup>-7</sup>	15.3
15 歳	4.8×10 <sup>-7</sup>	6.2×10 <sup>-7</sup>	2.2×10 <sup>-7</sup>	20.1 (男性)
成人	3.1×10 <sup>-7</sup>	3.9×10 <sup>-7</sup>	1.5×10 <sup>-7</sup>	22.2 (男性)

### 3. 行動調査票をベースとした吸入被ばく線量の評価 (詳細法)

本研究において新たに Python プログラムを構築し、詳細な移動経路に応じた線量評価ができるようにした。個人行動調査票をベースに 3 月 12 日 6 時から 3 月 24 日 24 時までの 1 時間ステップでの居場所の緯度経度を決定し、その緯度経度に応じて自動的に WSPEEDI\_2019DB の情報を参照する事を可能とした。移動中の居場所は、UNSCEAR2020 報告書に習い、出発時間 t1 出発地点 A、到着時間 t2 到着地点 B とした場合、A と B を直線で結んだ経路を (t2 - t1) の時間をかけて等速で移動したと仮定し、1 時間毎の居場所の緯度経度を割り付けた。移動中も車による微粒子侵入軽減率を参考に、日本家屋と同等の屋内退避効果があるとして TED<sub>inhal</sub> を次式により計算した。前式と線量計算のスタート時点が 6 時間違うが、実際の WSPEEDI による線量計算が開始された 3 月 12 日 6 時に合わせている。

$$TED_{inhal} = \sum_i \frac{V}{24} \times (C_{i-p} \times e_{inhal-p} + C_{i-el} \times e_{inhal-el} + C_{i-met} \times e_{inhal-met}) \times FC \times DF_{shelter}$$

(式 2)

(式 2) の変数は、(式 1) と共通である。

### 4. ワン・コンパートメント・モデルを使った水道水からの経口被ばく線量評価 (詳細法)

先行する包括研究のなかで、WSPEEDI のシミュレーション結果を使って水道水の <sup>131</sup>I 汚染濃度を推計する手法を開発した。水道水の <sup>131</sup>I 実測値がある浄水場の場合には、その実測値と WSPEEDI の浄水場に経時的に沈着する <sup>131</sup>I 濃度との関係から実効減衰係数 λ を推計し、

実測値のある時期はその実測値を使い、実測値が無い時期には、シミュレーション結果により  $^{131}\text{I}$  濃度を推計した。実測値のない浄水場に関しては、実測値のある複数の浄水場で求めた実効減衰係数の平均を用いてシミュレーションを行った。ワン・コンパートメント・モデル式は、以下の通りである。

$$\frac{dC}{dt} = p - \lambda C \text{ or } \frac{dC}{dt} = ap' - \lambda C$$

(式 3)

ここで、 $C$ は水道水の  $^{131}\text{I}$  濃度 (Bq/kg)、 $p$ は水源への  $^{131}\text{I}$  沈着率 (Bq/kg h)、 $\lambda$ は実効減衰係数 (1/h) である。後半の式では  $p = ap'$  とし、水源周辺の陸地への  $^{131}\text{I}$  沈着率  $p'$  (Bq/m<sup>2</sup> h) と水道汚染への変換係数  $a$  (m<sup>2</sup>/kg) で代替している。しかし、先行研究<sup>11,12</sup>では代表的避難シナリオに対応した線量評価しかできておらず、個人行動調査票の1時間ステップの緯度経度情報に基づく線量評価ができていなかった。これに対応するため、WSPEEDI\_2019DBの3kmメッシュ全てに浄水場があると仮定して、3kmメッシュ毎の水道水  $^{131}\text{I}$  濃度時系列のメタデータベースを作成した。次いで、実測値が有り、かつ水道水  $^{131}\text{I}$  汚染濃度が比較的高い飯舘村、いわき市に関しては、浄水場毎の水道供給地域では同じ  $^{131}\text{I}$  濃度になるように実際の浄水場のある3kmメッシュの計算値を割り当てる修正をメタデータベースに加えた。こうして、1時間ステップの居場所に対応した水道水からの経口被ばく線量を自動計算するPythonプログラムを構築した。経口被ばく  $\text{TED}_{\text{ingest}}$  は、次式により求めた。

$$\text{TED}_{\text{ingest}} = \sum_i^{330} \frac{p\text{TWI}}{24} \times C_{i\text{-tap}} \times e_{\text{ingest}} \times \text{FC}$$

(式 4)

ここで  $p\text{TWI}$  は、ペットボトルやビバレッジを含めた一日の飲料水量と調理水の合計値 (L/日) で、10歳児と成人は Ohno らの報告値<sup>13</sup>、1歳児と5歳児は我々のアンケート調査値を用いた (表 2)。 $C_{i\text{-tap}}$  は、ワン・コンパートメント・モデルにより計算した水道水  $^{131}\text{I}$  濃度 (Bq/m<sup>3</sup>)、 $e_{\text{ingest}}$  は ICRP Publ 76 の年齢階層別経口被ばくの  $^{131}\text{I}$  甲状腺等価線量換算係数 (Sv/Bq) である (表 3)。飯舘村に関しては、水道の普及割合が 70%であるので、経口  $\text{TED}$  に 0.7 を乗じて補正した。

表 2 年齢階層別 pTWI (mL/日)

	中央値	平均値	95 パーセンタイル値
1 歳	786	862	1802
5 歳	1105	1440	2525
10 歳	1546	1653	2913
15 歳	1546	1653	2913
成人	1546	1653	2913

表 3 経口被ばく甲状腺等価線量換算係数 (ICRP Publ 67)

単位	Sv/Bq
1 歳	$3.6 \times 10^{-6}$
5 歳	$2.1 \times 10^{-6}$
10 歳	$1.0 \times 10^{-6}$
15 歳	$6.8 \times 10^{-7}$
成人	$4.3 \times 10^{-7}$

5.  $^{131}\text{I}$ -TED から短半減期核種 ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{Te}/^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ) -TED の計算

本研究では、 $^{132}\text{Te}$  ( $^{132}\text{I}$ ) / $^{131}\text{I}$  比および  $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$  比は、半減期のみにより変化すると仮定し、3月12日のプルーム曝露した避難住民の衣服の $\gamma$ 線スペクトル分析結果、および3月15日以降は WSPEEDI のソースタームの比をベースに短半減期核種全体による甲状腺等価線量を  $^{131}\text{I}$ -TED に係数 SF を乗じて計算した (表 4)。この点は UNSCEAR2020 報告書<sup>14</sup>と違う方法論なので、その影響に関しては、VI.考察のところで議論する。

表 4 短半減期核種全体の TED 計算のための補正係数 SF

年齢	プルーム曝露時期 2011 年		
	3月 12-13 日	3月 15-16 日	3月 17 日以降
1 歳	1.59	1.08	1
5 歳	1.5	1.07	1
10 歳	1.45	1.07	1
15 歳	1.44	1.06	1
成人	1.44	1.06	1

## 6. 行動調査票をベースとした吸入被ばく TED と経口被ばく TED の統合

個人行動調査票に付けた整理番号 ID をキーに、吸入被ばく線量と水道水による経口被ばく線量を個人毎に統合する Python プログラムを作成し、線量を統合した。

## 7. 不確実性の評価

WSPEEDI シミュレーションの不確実性に関しては、機械的にファクター2の不確実性を仮定し、確率密度として 0.5 から 2.0 の一様分布を仮定した。日本人甲状腺ヨウ素取り込み率の低さに関しては、Kudo 論文<sup>9</sup>のモンテカルロシミュレーション結果を採用し、確率密度として正規分布 (18.6±6.0) /30 % を仮定した。また、屋内退避の吸入被ばく防護係数に関しては、Hirouchi らの報告<sup>10</sup>を参照し、事故前の福島県の建造物の建造年代構成比をつかって建造時期加重  $DF_{shelter}$  を 0.5 とした (表 5)。そして、その確率密度を三角分布 (最小 0.1, 最大 0.95, ピーク 0.5) と仮定した。水道水からの経口被ばくに関しては、 $pTWI$  の確率密度をアンケート調査の解析値より 1 歳児はガンマ分布 ( $\theta = 186.15, k = 4.94009$ ) とした。

表 5 屋内退避によるブルーム防護効果

建造年代	2008 年福島県建造物の建造年代割合*	建造年代別 $DF_{shelter}$ (6 時間退避時)		
		1**	4**	2.5**
pre-1980	0.4	0.55	0.95	0.75
1980-1992	0.2	0.15	0.78	0.47
post-1992	0.4	0.1	0.43	0.26
福島県建造時期加重 $DF_{shelter}$ 値		0.29	0.7	0.5

\*平成 20 年住宅・土地統計調査の福島県の統計 (第 4 表 住宅の種類 (2 区分)、構造 (5 区分)、建築の時期 (13 区分) 別住宅数—都道府県、14 大都市) を使って福島県の個別住宅の建造時期別の割合で補正, \*\*風速 (m/s)

パラメータの合成不確実性幅は、Crystal Ball (version 7.2、構造計画研究所) を用い、Latin Hypercube 法によりモンテカルロシミュレーションを実施した。吸入被ばくに関しては、WSPEEDI と  $FC$  と  $DF_{shelter}$  の合成不確実性幅を求めるため、10 万回モンテカルロシミュレーションを反復した。経口被ばくに関しては、2D モンテカルロ法により、変数  $pTWI$  に関して 1000 回、WSPEEDI と  $FC$  部分に関して 5000 回反復して合成不確実性幅を求めた。

### (倫理面への配慮)

研究方法の1で既に述べたように、本研究は国際医療福祉大学と福島県立医大の倫理委員会で別個に審査され、両倫理委員会から承認 (IUHW: 13-B-185, 2016年8月; 13-B-339, 2019年3月、FMU: No.29100, 2018年8月; No.2019-003, 2019年7月) を受けて実施している。倫理委員会の指示

に従い、研究計画の内容（どのようなデータが何件入手され解析されるか等）を国際医療福祉大学および福島県立医大のホームページ上に公開し、対象者にオプトアウトする機会を提供することにより、インフォームドコンセントの取得は行わず、個人同定情報を削除した匿名化データとしてデータを入手し解析した。

### III 研究結果

#### 1. 吸入被ばくと経口被ばくの統合 TED

表 6A は、包括研究で入手した避難地区 7 市町村の解析結果、表 6B は、本研究計画で入手した 9 市町村の解析結果である。平均値でみていくと最も低い伊達市の 1.3mSv から最も高い小高区の 14.9mSv の間に分布している。また、95 パーセンタイル値でみると、最も低い伊達市の 2.3mSv から最も高い浪江町の 28.8mSv の間に分布している。

包括研究で避難対象地区に関して代表的な避難シナリオを南相馬市は小高区と原町/鹿島区にわけ、その他は町村毎に 4~5 の避難シナリオを論文発表した<sup>8</sup>。そして、避難時期と避難方向が線量に関係していることを報告している。今回の周辺市町村では、とりわけブルームが複数回流れた浜通りの市町村で線量が高い傾向があり、それらの市町村では避難時期が線量と関係している。いわき市には、3 月 15 日朝、16 日朝、21 日から 22 日、そして 24 日にブルームが流れているが、最初のブルームが届いた 3 月 15 日朝に避難を完了していた割合は 19%で、3 月 21 日午後になっても 47%の子供達はいわき市に留まっていた。一方、広野町は、3 月 13 日までに 100%の子供が避難を完了しており、いわき市に避難した場合を除くと甲状腺等価線量は低く抑えられていた。南相馬市や相馬市や新地町には、3 月 12 日午後~13 日未明、18 日夜~19 日朝、20 日夜、22 日夜にブルームが到達しているが、南相馬市では 3 月 18 日までに中通や県外に避難した割合は 93%におよぶが、相馬市では 51%、新地町では 37%であった。原発から遠方になるに従い吸入被ばく量は減少するが、避難時期が遅れると繰り返し曝露となり、線量が増えていると思われる。田村市では、都路地区の子供は 100%早期に田村市内ないし郡山市等の遠方に避難していたが、田村市全体の 45%の子供は避難しなかった。葛尾村は 3 月 14 日までに全員避難をしており、川内村でも 3 月 16 日まで全員避難していた。一方、飯舘村の子供達は 3 月 14 頃から 3 月 19 日にかけて段階的に避難していたが、19 日になって避難した子供が 18%いた。双葉町、富岡町、大熊町、楡葉町、浪江町の子供達は、3 月 12 日の午前から午後に避難しているが、避難時刻の遅れた場合と避難の方向がブルームの方向の北方向の場合に、線量が高くなっている。

表 6 吸入被ばく・水道水からの経口被ばくを合算した1歳児甲状腺等価線量(mSv)

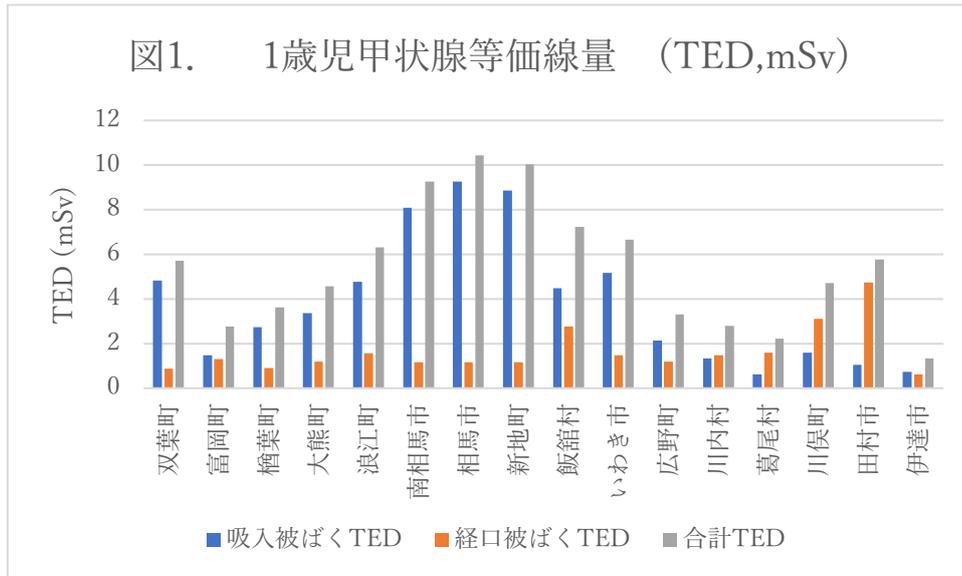
A.

市町村	南相馬市		飯舘村	双葉町	富岡町	檜葉町	大熊町	浪江町
	小高区	原町/ 鹿島区						
平均値	14.9	7.8	8.4	5.7	2.8	3.6	4.6	6.3
中央値	15	6	7.6	2.3	1.5	3.3	3.4	2.6
25%値	10.8	4.7	2.6	0.8	0.7	0.8	1.5	1
75%値	19.2	7.8	14.1	4.6	3.4	5.3	5.9	6.6
95%値	28.4	27	16.6	20.8	10.6	11.1	14.5	28.8

B

市町村	いわき市	相馬市	田村市	伊達市	広野町	川俣町	新地町	川内村	葛尾村
平均値	6.7	10.4	5.8	1.3	3.3	4.7	10	2.8	2.2
中央値	5.1	8.3	4.6	1.3	1.8	5.2	11.6	2	0.7
25%値	1.9	4.9	2.5	1.2	0.6	3	5	0.9	0.2
75%値	10.1	16.6	8.9	1.4	3.9	5.8	14	3.6	2.5
95%値	17.2	18.5	13.9	2.3	13.1	9.4	15.9	9.8	11.4

包括研究の報告と違い、本報告書では吸入被ばくTEDと経口被ばくTEDを個人毎に統合した。吸入被ばくと経口被ばくの割合は、避難地区とそうでない地域により異なっており、またプルームが飛来したときに地上への放射性物質の沈着速度が高くなる雨や雪が降ったかどうかにより異なる。図1に、市町村別の吸入被ばくと経口被ばくの割合を示す。



## 2. シミュレーションに基づく<sup>131</sup>I-TED評価値と甲状腺実測値との比較

シミュレーションに基づく線量評価は、評価に用いたATDMの不確実性に加え、甲状腺ヨウ素取り込み率や屋内退避の防護効果などのパラメータを一つの値に固定して求めている。実測値のTEDの分布と比較して、その妥当性を評価する必要がある。2011年3月下旬にいわき市、川俣町、飯館村で1,080名の15歳以下の小児に対して甲状腺簡易測定が実施された。その結果は、Kim等が再解析し論文報告している<sup>3</sup>。また、4月上旬に弘前大学のTokonamiらがガンマ線スペクトルメータを用いて福島市内に南相馬市小高区から避難してきた住民37名と浪江町津島地区住民17名の甲状腺測定を行っており、その結果も論文化されている<sup>15</sup>。また、長崎大の森田等は現地から長崎市に帰還した三菱重工関係者や県派遣職員のホールボディカウンター測定を行って報告している<sup>16</sup>。これらの甲状腺評価値は<sup>131</sup>IによるTEDなので、シミュレーションにより計算した<sup>131</sup>I-TEDと以下比較検討する。

表7は、Kim等<sup>3</sup>が報告した<sup>131</sup>I-TED (mSv) との比較である。Kimらのシナリオ1は、3月15日の急性摂取、シナリオ2は3月15日から3月下旬の甲状腺測定日までの間の慢性摂取シナリオである。実際の被ばく状況は、シナリオ1とシナリオ2の中間的な状況で、1.節で述べた様な複数回の離散的吸入被ばくと濃度変動する水道水からの慢性被ばくと考えられる。Kimらの報告で、25%値や中央値が0 mSvの場合があるが、これは甲状腺に放射エネルギーがゼロであった事を意味するのではなく、むしろバックグラウンドのガンマ線線量率に隠れてしまい、甲状腺に蓄積していた小さな<sup>131</sup>I-放射エネルギーを検出できなかった事を意味している。表7Aの5歳児で比較すると、私たちのシミュレーション・ベースのTED評価値は、中央値、75%値、最大値でシナリオ1とシナリオ2の間の値となっており、実測値との整合性が高いことが示されている。他方、表7Bの10歳児で比較すると、私たちの評価値がシナリオ1よりやや大きくなっている。一般に、甲状腺体積の大きい10歳児の方が甲状腺に蓄積している<sup>131</sup>Iの量は多く、測定誤差が少ない事を考慮すると、シミュレーション・ベースの評価値が若干過大評価になっている可能性が示唆される。

表7 1080人甲状腺実測値に基づく<sup>131</sup>I甲状腺等価線量(mSv)との比較

A.

5 歳児	いわき市			川俣町			飯舘村		
	Kim et al. <sup>3</sup> (N=48)		本研究 (n=980)	Kim et al. <sup>3</sup> (n=333)		本研究 (n=99)	Kim et al. <sup>3</sup> (n=99)		本研究 (n=100)
	シナリオ 1*	シナリオ 2**		シナリオ 1*	シナリオ 2**		シナリオ 1*	シナリオ 2**	
25%値	0	0	1.7	0	0	2.5	0	0	2.3
中央値	5	2.6	4.6	0	0	4.3	7.3	3	6.4
75%値	10.6	5.2	9.2	5.9	2.7	4.9	14.7	5.9	12.0
最大値	47.5	25	27.1	29.3	11.9	7.9	29.3	11.9	20.9

B.

10 歳児	いわき市			川俣町			飯舘村		
	Kim et al. <sup>3</sup> . (N=38)		本研究 (n=980)	Kim et al. <sup>3</sup> . (n=156)		本研究 (n=99)	Kim et al. <sup>3</sup> (n=114)		本研究 (n=100)
	シナリオ 1*	シナリオ 2**	吸入と 経口被ばく	シナリオ 1*	シナリオ 2**	i 吸入 と経口 被ばく	シナリオ 1*	シナリオ 2**	吸入と 経口被ばく
25%値	0.6	0.3	1.4	0	0	2.1	0	0	2.0
中央値	2.8	1.5	4.0	0	0	3.5	3.7	1.6	5.4
75%値	5.6	2.9	7.8	3.4	1.6	3.9	7.5	3.3	8.9
最大値	15.3	8.2	23.6	11.2	4.9	6.3	22.4	9.8	17.4

\*3月15日の急性摂取シナリオ

\*\*3月15日から3月下旬の甲状腺測定日までの慢性摂取シナリオ

表8は、南相馬市から避難していた住民の甲状腺実測値を基にして評価されたTEDとの比較である。オリジナルの論文では3月15日の急性被ばくとしているところを表8では3月12日の急性被ばくとして線量評価し直している。測定者数が少なかったため、Kim等の報告<sup>3</sup>では南相馬市の集団を1歳から15歳までの集団として纏めて評価している。そこで、比較のための私たちの評価値は、系統的に線量が高くなる1歳児と最も小さくなる15歳児の値を示している。私たちの評価値は、ほぼシナリオ1とシナリオ2の間の値となっている。一方、Tokonami等は、γ線スペクトルメータを使った甲状腺測定を行っており、Kimらのデータより精度が高い。小高区からの避難住民は、原町区に一旦避難してから中通り方面に再避難する割合が高いので、3月12日の急性曝露シナリオで評価した表8のTokonami等のTEDは、実際より大きめの評価になっていると思われるが、本研究の評価値はそのTokonami等のTEDを上回っており、若干過大評価になっている可能性が示唆される。

表8. 南相馬市からの避難住民のTEDの比較

	南相馬市				南相馬市小高区	
	Kim et al. <sup>3</sup> (n=31)		本研究 (n=300)		Tokonami et al. <sup>15</sup> (n=32)	本研究 (n=62)
	15歳以下小児		1歳	15歳	成人 <sup>s</sup>	成人
	シナリオ1	シナリオ2				
25%値	0*	0**	3.3	2.2	1.6	3.4
中央値	3.9*	1.8**	4.6	3	4	4.8
75%値	10.5*	4.6**	7.8	5.2	6	6.3
最大値	36.8*	16**	36.4	24.9	44.5	16.1

\*Kimらのオリジナル論文では、3月15日の急性被ばくであるが、3月12日の急性被ばくとして再計算している。

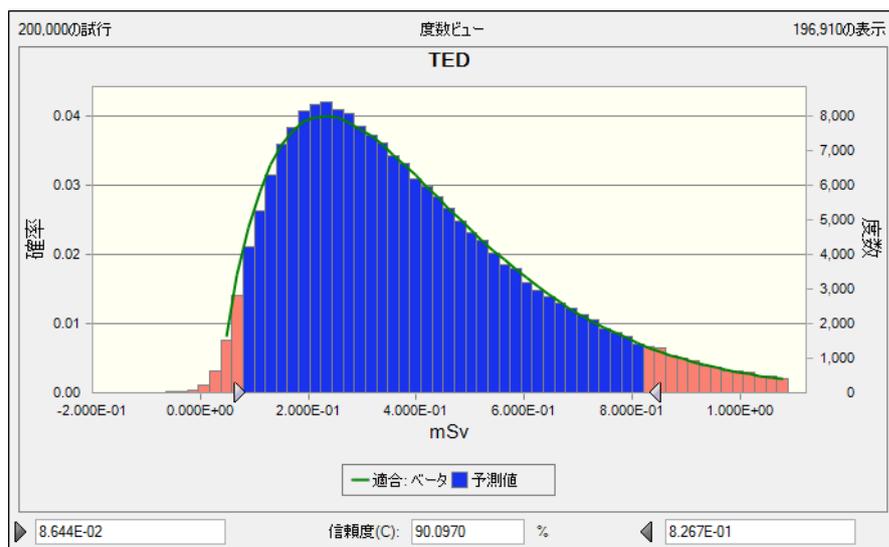
\$ Tokonamiらの実測値を使い、3月12日の急性摂取として再計算

この他、私たちは、Tokonami等より避難せず4月中旬まで浪江町島津地区に残っていた成人17名の甲状腺測定結果も入手している。その実測値を基に、3月15日と3月18日に3：1の割合でメチルヨウ素のプルーム吸入曝露をしたと仮定した場合のTEDを参考までに計算してみると、TEDは1.7mSvから38.5mSvに分布する。また、長崎大のMorita等は、福島から帰還した作業員や県の派遣員をホールボディカウンター測定し、3月11日から4月20日の期間に福島に滞在していた196名中49名から<sup>131</sup>Iを検出し、その49名のTEDは0.135～18.5mSvに分布したと報告している<sup>16</sup>。これらの報告では、曝露時期や曝露場所が明確でないため避難行動が一般住民より早い傾向のある小児の行動調査票に基づく私たちの評価値と直接比較することはできないが、表6と表7の本研究のTED評価値の分布と大きな齟齬はないと思われる。

### 3. 線量評価の不確実性の検討

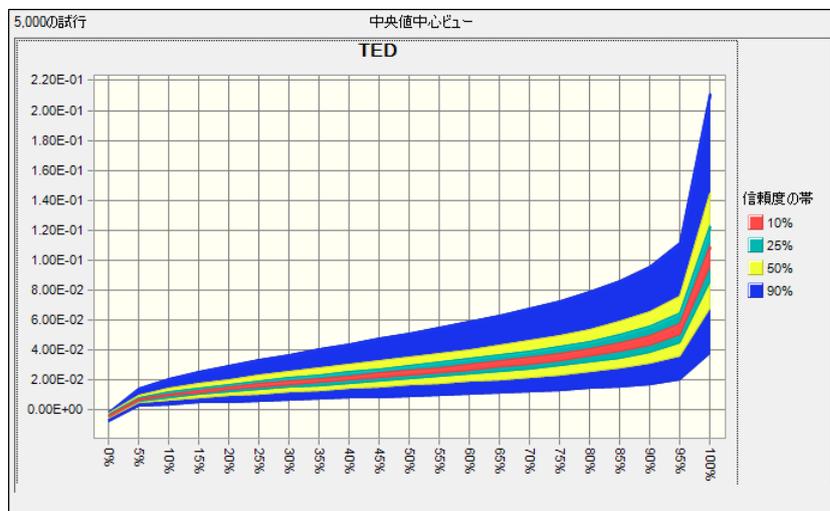
「II.研究手法」で示したTED計算式のパラメータは、それぞれ不確実性がある。それぞれのパラメータに確率密度関数を仮定し、その合成不確実性をモンテカルロシミュレーション法で求めた。1歳児の吸入被ばくに関しては、図2に示すように単位Bq吸入時のTEDの90%不確実性区間は、評価値（中央値）の0.33倍～2.8倍である。一方、1歳児の経口被ばくに関しては、TEDの90%不確実性区間は評価値（中央値）の0.35倍～2.7倍である（図3）。個人により吸入と経口の比率が違いため、両者を統合した不確実性幅は一律に求める事はできないが、両者の90%不確実性区間がほぼ同じであることより、吸入被ばくと経口被ばくの割合が変わっても90%不確実性区間は大きく変わらないと思われる。

図2 1歳児吸入被ばくの不確実性シミュレーション



ATDMシミュレーションの確率密度関数を一様分布 (0.5,2.0)、屋内退避低減係数 $DF_{shelter}$ の確率密度関数を三角分布 (0.1, 0.95, peak 0.5)、甲状腺預託等価線量係数の補正項 $SF$ の確率密度関数を正規分布 ((18.6±6.0) /30) として、合成不確実性の幅をモンテカルロシミュレーションで計算した。単位Bq吸入時の一歳児TED評価値の分布を示す。青色の棒グラフは、90%不確実性範囲。

図3 1歳児水道水経口被ばくの各パーセンタイルレベルにおける不確実性の傾向グラフ



$^{131}\text{I}$  1Bq/Lの水道水を飲水、調理水に利用した場合の一歳児TEDの2Dモンテカルロシミュレーションを示す。ATDMシミュレーションの確率密度関数を一様分布 (0.5,2.0)、甲状腺預託等価線量係数の補正項 $SF$ の確率密度関数を正規分布 ((18.6±6.0) /30)、および1歳児のpTWIをガンマ分布 ( $\theta = 186.15$ ,  $k = 4.94009$ ) として合成不確実性幅をシミュレーションした。横軸は水道水利用量 (pTWI) のパーセンタイル、縦軸はTED (mSv) を示す。カラー表示の帯の上限下限は、推計値の信頼度の幅 (赤10%、緑25%、黄50%、青90%) を示す。pTWIの中央値でのTED評価値と比較すると、不確実性の90%値幅は、0.35倍から2.7倍と評価された (グラフの横軸50パーセンタイルの部分の赤帯の中央値と青帯の上限下限値の比に相当)。

#### IV 考察

1歳児のTEDの平均値は、伊達市の1.3mSvから南相馬市小高区の14.9mSvに分布した。同じくTEDの95パーセンタイル値は、伊達市の2.3mSvから浪江町の28.8mSvに分布した。このシミュレーション・ベースのTED評価値は、Kim等<sup>3</sup>により報告されているいわき市、川俣町、飯舘村の1080名の甲状腺簡易測定、およびTokonami等により報告された南相馬市小高区住民の甲状腺測定から推計されたTEDの分布の中の比較可能な中央値と75パーセンタイル値、最大値で極めて良く合致することが判明した。本研究の評価値は、WHO福島報告書<sup>1</sup>やUNSCEAR2013報告書<sup>2</sup>の評価値より大幅に低くなっているが、UNSCEAR2020年報告書<sup>14</sup>とほぼ同じレベルの評価値となっている。

本研究と包括研究で行ったOhba論文<sup>8</sup>およびUNSCEAR2020報告書<sup>14</sup>の方法論を比較してみる。

①ATDMに関しては、3者ともWSPEEDI\_2019DB<sup>6</sup>をベースにしている。②放射性ヨウ素の甲状腺取り込み率の補正項に関しては、UNSCEARが0.5を採用したのに対し、私たちは0.62を採用しているため、私たちの方が一律24%高めの評価になる。③屋内退避の防護効果に関しては、UNSCEARも私たちも同じHirouchi論文をベースに0.5の係数を使っている。しかし、UNSCEAR2020報告書では、車移動中は防護効果がないと仮定したのに対し、本研究およびOhba論文では車に対しても屋内退避と同じプルーム防護効果を仮定した。車の換気率に関しては、岩下の報告を参照した<sup>17</sup>。この違いは、3月12日午後にプルームが飛散している時間帯に避難し、プルーム曝露した一部の双葉町、浪江町および小高区の住民で違いが出る。④一方、本研究及びOhba論文では、短半減期核種の寄与を3月12日に関しては3月12日にプルーム曝露した住民の衣服の核種組成に基づき<sup>131</sup>I-TEDに係数(表4)を掛けて求めたのに対し、UNSCEAR2020報告書では、WSPEEDI\_2019DBの<sup>132</sup>Te・<sup>132</sup>I濃度を利用し、<sup>133</sup>Iに関しては炉内の<sup>133</sup>I/<sup>131</sup>Iを計算で求め、短半減期核種の線量を求めているところが異なっている。實際上、この違いは3月12日に午後から13日未明に北方向に向かったプルームの吸入被ばく以外には大きな影響は無い。UNSCEARは、WSPEEDI\_2019DBのシミュレーション通りに、この日の午後のプルームは粒子状の放射性物質が減少していたとし、<sup>132</sup>Te/<sup>132</sup>Iの寄与を低めに評価している。この影響で、本研究及びOhba論文のTED評価は、UNSCEAR2020報告書より<sup>132</sup>Te/<sup>132</sup>Iの寄与を多く見積もっており、双葉町、浪江町の避難シナリオの一部、および南相馬市、相馬市、新地町の線量がUNSCEARと同じ手法を採用した場合より約20%高くなっている。⑤UNSCEARと私たちは行動調査票に基づく線量計算で異なる点がある。Ohba論文では、避難指示のあった7市町村の19歳以下の住民の行動調査票に基づき線量を評価したが、NetCDF言語で書かれたWSPEEDI\_2019DBのデータを抽出するPythonプログラムが発展途上で、移動経路に最も近い代表的152地点の核種濃度を使った評価になっていた。また、行動調査票の扱いも6時間ステップに丸めて、その時間帯に主に滞在した地点の緯度経度情報をもって、線量を評価した。6時間ステップをまたいで移動した場合は、当該6時間枠の前半は出発地、後半は到着地の3時間の核種濃度を用いた。一方、UNSCEAR 2020報告書では、Ohba論文で抽出した各市町村4ないし5の避難シナリオを用いているため、やはり6時間ステップの居場所を使った評価となっているものの、UNSCEARは、6時間ステップの始まりに移動が開始されたと仮定して線量評価し、かつ、6時間ステップの開始時刻にA地点を出発し、目的地に到着した6時間ステップにB地点に到着した場合、A地点からB地点まで直線距離(C km)を等速スピードで要した時間で移動したと仮定し、1時間毎の居場所を計算し、1時間毎の線量を計算している。このため、UNSCEARの方が実際の移動経路に近いメッシュのWSPEEDI\_2019DB情報を

使い、きめ細かな線量評価となっている。今回、本研究ではUNSCEARに見習い、3月12日から3月25日まで1時間ステップで居場所の緯度経度を使い、線量評価するPythonプログラムを作り、線量評価を精緻化させている。⑥UNSCEAR2020報告書では、吸入被ばく線量と外部被ばく線量に加えて、食品と水道からの経口被ばく線量をMurakami等の報告<sup>18</sup>に基づき算定しているが、私たちは吸入被ばく以外では水道からの経口被ばく線量のみを考慮している。このような違いがあるため、両者を単純に比較することは不可能である。とはいえ、全般的に両者の整合性は高い。

本研究での評価値は、表7、表8で見たように、甲状腺実測値に基づくTED評価値と極めて整合性が高い。一方、10歳児や成人で比較すると、私たちの<sup>131</sup>I-TED評価値は、やや過大評価になっている可能性があるが、90%不確実性幅を考えれば、その幅に収まっている。本研究では、水道水以外からの食品摂取によるTEDを算定していない。Murakami等<sup>18</sup>は、福島市市民が小売店から購入した食品のみを摂取するケース1と、自家栽培の野菜を含む県内産の食品のみを摂取するケース2で成人のTEDを推定し、ケース1で平均値0.84mSv、ケース2で平均値2.7mSvという値を報告している。2011年3月に自家栽培の野菜を摂取した住民がいたと言われているが、その割合あるいは摂取量や摂取期間は不明である。このため、個人毎に食品からの線量を計算することは本研究ではできていない。他方、1,080名の甲状腺測定では、飯舘村では対象年齢住民の約4割の315名、川俣町では対象年齢住民の約3割の631名が測定を受けており、表7に示したように最大値でも30mSv未満であったことは重要である。このことは、汚染野菜等を摂取してTEDが高くなる可能性がある住民がいたとしても、土壤汚染レベルの高かった飯舘村や川俣町にあっては例外的であったことを示している。

本研究は、集団の甲状腺がんリスクを推計する事を目的としていない。また、100mGy以下の線量域でも甲状腺がんリスクはあるとされているが、100mGy以下の線量効果関係に関しては、「直線しきい値なしモデル」にも30~40mGy前後にしきい値がある「しきい値モデル」にも合致すると報告されている<sup>19</sup>。このため、被ばく線量の大きな集団で得られたリスク係数を福島の小児集団に適用できるのかどうか、科学的エビデンスはない。それを承知の上でチェルノブイリ原発事故後の疫学調査で報告されている甲状腺線量当たりのリスクの大きさを参考に述べる。事故当時19歳以下の福島県民37万人と同じ性・年齢構成の日本人非被ばく集団で、甲状腺スクリーニング検査を受けなかった場合の甲状腺がん罹患数を、2016年から2018年のがん罹患統計の数値を使い計算してみる。その数は、2011年から2020年までの10年間、2030年までの20年間でそれぞれ63名、265名である。この数字を元に、37万人の小児が平均10mSvの甲状腺被ばくがあったとき、事故後10年、20年で何名甲状腺がんが増加するかをチェルノブイリ原発事故後の疫学データを使い計算してみる。Cardisは、ベラルーシとロシアで実施された症例対照研究の結果から、直線モデルで過剰相対リスク(ERR) = 4.5 /Gy (95%CI: 1.2, 7.8) を報告<sup>20</sup>し、Brenner等は9年間の追跡をおこなったウクライナの cohorts 研究から ERR = 1.91/Gy (95%CI: 0.43, 6.34) を報告<sup>21</sup>している。これらの報告の95%信頼区間の最小値と最大値の数字0.43/Gyと7.8/Gyを使い計算してみよう。被ばく線量から予測されるリスクの大きさは、ERR/10 mSv = 0.0043 ~ 0.078 となり、<sup>131</sup>I 内部被ばくによる過剰発症数は、事故後10年で 63 x 0.0043 ~ 63 x 0.078 = 0.3 ~ 4.9 (名)、事故後20年で 265 x 0.0043 ~ 265 x 0.078 = 1.1 ~ 20.7 (名) と計算できる。2021年6月現在、265名の甲状腺がん(がん疑い)症例が県民健康

調査で発見されているが、被ばく線量のレベルから判断するとその多くは、高精度の超音波検診により早期発見された臨床症状を呈する前の甲状腺がん、ないし生涯臨床症状を起こさない自然退縮する甲状腺がんと考えられる。

本研究は、行動調査票を有している個人に関しては、甲状腺等価線量を個人毎に評価する手法を開発した点で、従来の研究から大きく前進している。今回開発したPythonプログラムを用いれば、行動調査票を有している個人全体の個人線量評価が可能となっており、今後、本研究で開発した手法を応用して個人線量を使った疫学解析が可能になると思われる。また、汚染野菜等の摂取に関しては、個人行動調査票に定性的な記述をしている住民がいるので、個人線量を用いた疫学調査を実施する場合に汚染野菜等摂取が甲状腺がんリスクに影響しているかどうか併せて検討できる可能性がある。

## V 結論

個人行動調査票と大気拡散シミュレーション法による大気中放射能濃度の時間空間データベース（WSPEEDI\_2019DB）を組み合わせて、精度良く個人のTEDを推計する事が可能となった。避難地区およびその周辺の16自治体の1歳児のTEDは、伊達市の1.3mSvから南相馬市小高区の14.9mSvまでに分布した。同じくTEDの95パーセンタイル値は、伊達市の2.3mSvから浪江町の28.8mSvまでに分布した。TEDの不確実性幅を考慮しても、放射線による甲状腺がんリスクは極めて低いと思われる。

## VI 次年度以降の計画

本研究計画は終了するが、福島県の甲状腺がんの疫学調査に本研究成果は応用可能である。県民健康調査基本調査の外部被ばく線量と本研究で求めた内部被ばく線量を個人ベースで合算できるようにすればさらに精度の高い個人線量となり、甲状腺がんの疫学調査が可能になると期待される。

## 引用文献

1. WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. Geneva, Switzerland: WHO Press, 2012.
2. UNSCEAR. Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. *UNSCEAR 2013 Report 2014*;1(Annex A).
3. Kim E, Yajima K, Hashimoto S, et al. Reassessment of Internal Thyroid Doses to 1,080 Children Examined in a Screening Survey after the 2011 Fukushima Nuclear Disaster. *Health physics* 2020;118(1):36-52.
4. Kim E, Kurihara O, Kunishima N, et al. Early Intake of Radiocesium by Residents Living Near the TEPCO Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant after the Accident. Part 1: Internal Doses Based on Whole-body Measurements by NIRS. *Health physics* 2016;111(5):451-64.
5. Tsuruta H, Oura Y, Ebihara M, et al. First retrieval of hourly atmospheric radionuclides just after the Fukushima accident by analyzing filter-tapes of operational air pollution monitoring stations. *Scientific reports* 2014;4:6717.
6. Terada H, Nagai H, Tsuduki K, et al.. Refinement of source term and atmospheric dispersion simulations of radionuclides during the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. *Journal of environmental radioactivity* 2020;213:106104.
7. Ohba T, Hasegawa A, Kohayagawa Y, et al. Body Surface Contamination Levels of Residents under Different Evacuation Scenarios after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Health physics* 2017;113(3):175-82.
8. Ohba T, Ishikawa T, Nagai H, et al. Reconstruction of residents' thyroid equivalent doses from internal radionuclides after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *Scientific reports* 2020;10(1):3639.
9. Kudo T, Inano A, Midorikawa S, et al. Determination of the Kinetic Parameters for  $^{123}\text{I}$  Uptake by the Thyroid, Thyroid Weights, and Thyroid Volumes in Present-day Healthy Japanese Volunteers. *Health physics* 2020;118(4):417-26.
10. Hirouchi J, Takahara S, Komagamina H, Munakata M. INVESTIGATION OF REDUCTION FACTOR OF INTERNAL EXPOSURE FOR SHELTERING IN JAPAN. *ASTRAM2018-010* 2018.
11. Kawai M, Yoshizawa N, Suzuki G.  $^{131}\text{I}$  Dose Estimation from Intake of Tap Water in the Early Phase after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Radiation protection dosimetry* 2018;179(1):43-48.
12. Miyatake H, Kawai M, Yoshizawa N, Suzuki G. Estimation of internal dose from tap water after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident using newly obtained data. *J Radiat Res* 2020;61(2):231-36.
13. Ohno K, Asami M, Matsui Y. Is the default of 2 liters for daily per-capita water consumption appropriate? A nationwide survey reveals water intake in Japan. *Journal of water and health* 2018;16(4):562-73.
14. UNSCEAR. Levels and effects of radiation exposure due to the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: implications of information published since the UNSCEAR 2013 Report.

2020.

15. Tokonami S, Hosoda M, Akiba S, et al.. Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident. *Scientific reports* 2012;2:507.
16. Morita N, Miura M, Yoshida M, et al. Spatiotemporal characteristics of internal radiation exposure in evacuees and first responders after the radiological accident in Fukushima. *Radiation research* 2013;180(3):299-306.
17. Iwashita T. Primarily Discussion on Perceived Air Quality in Vehicles (in Japanese). *Journal of Japan Association on Odor Environment* 2011;42(6):413-19.
18. Murakami M, Oki T. Estimated dietary intake of radionuclides and health risks for the citizens of Fukushima City, Tokyo, and Osaka after the 2011 nuclear accident. *PloS one* 2014;9(11):e112791.
19. Lubin JH, Adams MJ, Shore R, et al. Thyroid Cancer Following Childhood Low-Dose Radiation Exposure: A Pooled Analysis of Nine Cohorts. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 2017;102(7):2575-83.
20. Cardis E, Kesminiene A, Ivanov V, et al. Risk of thyroid cancer after exposure to <sup>131</sup>I in childhood. *Journal of the National Cancer Institute* 2005;97(10):724-32.
21. Brenner AV, Tronko MD, Hatch M, et al. I-131 dose response for incident thyroid cancers in Ukraine related to the Chernobyl accident. *Environmental health perspectives* 2011;119(7):933-9.

Reconstruction of thyroid doses in the early phase of accident based on a spatiotemporal radionuclides concentration database created by atmospheric transfer, diffusion, and deposition model simulation in combination with individual behavioral survey sheets.

Chief Investigator: Gen Suzuki<sup>1</sup>

Co-investigators: Tetsuo Ishikawa<sup>2</sup>, Arifumi Hasegawa<sup>3</sup>, Takashi Ohba<sup>4</sup>, Haruyasu Nagai<sup>5</sup>

*1 International University of Health and Clinic, Tochigi, Japan*

*2 Department of Radiation Physics and Chemistry, School of Medicine, Fukushima Medical University, Fukushima, Japan*

*3 Department of Radiation Disaster Medicine, School of Medicine, Fukushima Medical University, Fukushima, Japan*

*4 Department of Radiation Health Management, School of Medicine, Fukushima Medical University, Fukushima, Japan*

*5 Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki, Japan.*

*Keywords:* Fukushima Dai-ichi nuclear accident, thyroid equivalent dose, ATDM simulation, individual behavioral survey sheets, inhalation dose, ingestion dose

## **Abstract**

To elucidate the association between radiation dose and thyroid cancer after the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS) accident, it is essential to estimate individual thyroid equivalent doses (TEDs) to children. In the preceding comprehensive studies conducting as a part of the Research on the Health Effects of Radiation (2014-2019) organized by Ministry of the Environment, Japan. , we had improved an atmospheric transport, diffusion, and deposition model (ATDM) and refined a source term by reverse modelling method. As a result, a spatiotemporal radionuclides' concentration database named the Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information \_2019Data Base (WSPEEDI\_2019DB) was constructed. We also obtained 3,256 anonymized personal

behavioural questionnaire sheets of residents under 19 years old at the time of accident living in 16 municipalities around FDNPS by randomly selecting sheets from the Fukushima Health Management Survey database. By utilizing hourly  $^{131}\text{I}$  concentrations of particulate, vapor, and methylate forms at 1 m height from WSPEEDI\_2019DB in combination with individual behavioural survey sheets, individual  $^{131}\text{I}$ -TEDs from inhalation were estimated using latitude and longitude as a key. A decontamination factor of 0.5 was introduced to reflect sheltering, and a correction factor of 0.62 for dose coefficient was also introduced because iodine uptake rate in Japanese is 18.6% (SD 6.0%), lower than the 30% used in the ICRP thyroid model, whereas thyroid volume in Japanese does not differ from that of the ICRP reference man. Next, TEDs from  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{I}$  and  $^{133}\text{I}$  were calculated by multiplying age- and time-specific  $^{132}\text{Te}(^{132}\text{I})/^{131}\text{I}$  and  $^{133}\text{I}/^{132}\text{I}$  ratios. In addition, a meta database was created from WSPEEDI\_2019DB by calculating hourly  $^{131}\text{I}$ -concentrations in tap water in each 3 km-mesh area using one compartment model. TEDs from the ingestion of tap water were estimated based on individual behavioural sheets in combination with this meta database. Finally, TEDs from inhalation and ingestion from 12 to 25 March 2011, were combined individually. Distributions of estimated  $^{131}\text{I}$ -TEDs were very close to estimates based on direct thyroid measurements in 1,080 children in Iwaki City, Kawamata Town, Iitate Village, and Minamisoma City. Mean TEDs in 1-year-old children ranged from 1.3 mSv in Date City to 14.9 mSv in Odaka Ward in Minamisoma City, and the 95<sup>th</sup> percentiles varied from 2.3 mSv in Date City to 28.8 mSv in Namie Town. Our estimates were consistent with those figures in UNSCEAR 2020 Report. The methodology developed in the present study can be useful for the future epidemiological studies of thyroid cancer after the FDNPS accident.