

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

鈴木 元（国際医療福祉大学クリニック・院長・教授）

研究要旨

2011 年 3 月に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故に伴い ^{131}I や $^{132}\text{I}/^{132}\text{Te}$ や ^{133}I などの照射性核種が大量に環境中に放出された。これらの核種は甲状腺に取り込まれる傾向があるため、福島県の住民は子ども達の甲状腺がんリスクが増加すると懸念している。しかし、事故後の甲状腺実測値は少なく、甲状腺等価線量の分布など全体像は判っていなかった。私たちの研究グループは、大気拡散シミュレーションの一種である世界版緊急時環境線量情報予測システム (WSPEED) と最新の放出源情報 (ソースターム) を用いて計算された放射性核種濃度の時間空間放射能密度分布のデータベース (WSPEEDI_2019DB) を用いて線量再構築を行ってきた。住民の行動の多様性を反映するため、市町村毎に 100~1000 人の 19 歳以下の行動調査票を入手し、それを使って 3 月 12 日から 3 月 25 日までの滞在場所の緯度経度を用いて、WSPEEDI_2019DB から地上 1m の ^{131}I (蒸気状ヨウ素元素、有機化ヨウ素、粒子状ヨウ素、総ヨウ素) の 1 時間毎の大気濃度を参照し、吸入被ばく線量を推計した。避難地区等 7 市町村の解析データは 2020 年 1 月に論文報告し、「原子放射線の影響に関する国連科学委員会」(以下 UNSCEAR と略す) 2020 年報告書の線量評価改訂に貢献した。今回、避難地区 7 市町村に加え、周辺 9 市町村の 1 歳児の吸入被ばく線量を評価した。推計された ^{131}I -甲状腺等価線量は、1080 名の小児甲状腺実測値から評価された甲状腺等価線量の分布と整合性が高く、シミュレーションの精度が高いことが確認された。短半減期核種の吸入被ばくによる甲状腺等価線量の平均値は、小高区の 14.9mSv を除くと全ての市町村で 10mSv 未満であり、95 パーセンタイル値で 30mSv を超すのは双葉町のみであった。

UNSCEAR 2020 年報告書と比較検討した結果を合わせて報告する。行動調査票の移動開始時間、移動時間帯にどの地点の大気中放射能濃度を使うのかに関し、UNSCEAR を含め 4 種類の手法により線量を比較検討した。その結果、多くの避難シナリオで線量評価の不確実性は大きくないことが判明した。

キーワード: 東京電力福島第一原子力発電所事故、甲状腺等価線量、大気拡散シミュレーション、行動調査票

研究協力者

大葉 隆（福島県立医大・医・放射線健康管理学講座・助教）

石川徹夫（福島県立医大・医・放射線物理化学講座・教授）

長谷川有史（福島県立医大・医・放射線災害医療講座・教授）

長井晴康（日本原子力研究開発機構・原子力基礎研究センター・ディビジョン長）

I. 研究目的

福島第一原発事故後の周辺住民の甲状腺直接測定は凡そ1200人と少なく、甲状腺被ばく線量の地域的、年齢階層別の線量分布は判っていない。そこで、避難地域および周辺16市町村の19歳以下住民の行動調査票を無作為抽出して、個人毎にWSPEEDI_2019DBと行動調査票をベースに吸入被ばく線量および経口被ばく線量（水道水）を推計する手法を確立する。もって市町村の甲状腺等価線量の統計値（平均、中央値、25・75および95パーセンタイル）を推計する。また、これらの推計値の不確実性の幅を評価する。この線量推計のプログラムは、将来の福島県県民健康調査で発見された甲状腺がんの解析に貢献する。

II. 研究方法

II-1. 行動調査票をベースに吸入被ばく線量を評価

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}I 、蒸気状 ^{131}I 、粒子状 ^{131}I 、有機化 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{132}Te ）の地上1mの放射能濃度および地上沈着量を格納している(1)。NetCDFのデータベースをWindows Excelで利用できるようにするため、Python言語で書かれたプログラムを開発し、利用した。福島県民健康調査基本調査の中から避難地区およびその周辺地町村の19歳以下の行動調査票を無作為に100~1000抽出し、個人毎に2011年3月12日から3月25日までの居場所の緯度経度情報を鍵にWSPEEDI_2019DBの放射性ヨウ素データと照合することにより、吸入被ばく線量を推計する。吸入被ばくの推計は、国際放射線防護委員会ICRPの定義に従い、年齢階層別の一日換気量、甲状腺等価線量換算係数を用いる(2)。吸入被ばく線量の補正項として、屋内退避による吸入被ばく低減係数、および日本人甲状腺ヨウ素取り込み率の低さを反映させるための補正項を使用する。屋内退避による低減係数に関しては、Hirouchi等の報告(3, 4)をベースに福島県の家屋の建造年代の比率および風速2.5m/秒、屋内退避時間6時間の平均値として0.5を採用する。甲状腺取り込み率の補正項は、Kudoらの報告(5)にしたがい0.62(=18.6/30)を用いる。それぞれの補正による不確実性の幅を以下のように評価する。屋内退避の防護効果は、同じ建造年代でも防護効果に幅があるため、その確率密度関数を三角分布（最小0.1,最大0.95,ピーク0.5）とし、甲状腺取り込み量の補正項の確率密度関数を正規分布（平均 $18.6 \pm 6.0/30$ ）と仮定し、それらの合成不確実性幅をモンテカルロシミュレーション法で推計する(6)。飯舘村に関しては、水道がなく井戸水を利用している地域は水の汚染がないとし、水道供給のある地域に関しては主要な3浄水場により汚染レベルが異なることより、吸入被ばくに加えて飲水による経口被ばく線量を個々の行動調査票毎に合算する。また、水道普及率0.7を反映させるため、水道水から

の内部被ばく線量に関しては、水道水利用割合の確率密度関数を二項分布とし、甲状腺取り込み率の確率密度分布を上記の正規分布としてそれらの合成不確実性幅をモンテカルロシミュレーション法で評価する(6)。 ^{131}I の吸入被ばく等価線量から他の半減期核種 (^{133}I , $^{132}\text{I}/^{132}\text{Te}$) を含めた甲状腺等価線量を推計するために、私たちは、体表面汚染検査で実測した ^{131}I と ^{133}I や $^{132}\text{I} \cdot ^{132}\text{Te}$ との核種比をもちいて比例計算により推計する(7)。この点は UNSCEAR2020 報告書と異なるところであり、代表的避難シナリオ毎にその影響を評価する必要がある。

先行研究で富岡町、大熊町、双葉町、楡葉町、浪江町、飯舘村および南相馬市の解析を行い論文発表した(6)。本研究で新たにいわき市から 1000 サンプル、田村市、伊達市、相馬市から各々 300 サンプル、川俣町、広野町、新地町、川内村、葛尾村から各々 100 サンプル行動調査票を無作為抽出し、解析する。

II-2. 行動調査票ベースの線量評価における不確実性

Ohba 論文(6)においては、移動開始時間や移動中の経路の不確実性、および WSPEEDI での大気拡散シミュレーションを行う際に利用している気象場データの不確実性を考慮し、また、Python 解析プログラムの限界も有り、行動調査票 1 件ごとの移動経路の全ての緯度経路に最も近い地点の WSPEEDI_2019DB の情報を使うのではなく、一日を 6 時間毎の 4 時間帯 (AM1, AM2, PM1, PM2) に分割し、それぞれの時間帯で一番長く滞在して居た場所の緯度経度と最も近い 152 カ所のランドマークの核種濃度情報を使った。一方、UNSCEAR 2019 年報告書では、Ohba 論文(6)で私たちが提案した避難市町村別 4 ないし 5 の代表的避難シナリオ毎に、6 時間の時間帯の始まりに出発し、到着地の移動経路を一時間毎に滞在場所を按分してその途上の全ての緯度経度に最も近い地点の WSPEEDI_2019DB 核種データを使い線量を評価した。本年度は、行動調査票の移動時間帯の居場所の不確実性を、【方法 1】 6 時間毎の代表的ランドマーク 152 カ所での線量情報を使う評価法、【方法 2】 緯度経度は行動調査票通りの情報を使い、6 時間の時間帯に拘らず、移動時間帯の前半は出発点、後半は目的地の線量情報を使う評価法、【方法 3】 6 時間の時間帯に拘らず、緯度経度情報は行動調査票の情報を使い、出発点と目的地の直線距離を一時間毎に定速で移動したと仮定して 1 時間毎の線量情報を使う評価値を UNSCEAR2020 の評価値と比較する。

II-3. 行動調査票をベースに飲水による経口被ばく線量を評価

Hirakawa 等の調査(8)により、東日本大震災直後は、生産地から地域の集積所さらには市場そして小売店に至る流通経路が寸断されたため、避難住民および福島県民は大震災以前にストックされていた食品を摂取していたと考えられる。また、流通が再開された後には、県外産の野菜や牛乳等が小売店に出荷されたが、それらは暫定規制レベルをクリアした食品のみが流通したため、甲状腺等価線量への寄与は少ないと判断した。一方、福島県内の水道は、震災後一旦断水となっていたが 3 月 14 日頃から徐々に断水が解消され、県民は水道水を調理水や飲料水として利用した。このため、3 月 15 日以降の内陸に向かった放射性プルームにより汚染した水道水からの内部被ばくは無視することはできず、水道水利用による甲状腺等価線量を推計した。

福島県内の水道水で放射性ヨウ素を継続的に実測していた市町村は少なかったため、WSPEEDI

による取水地への ^{131}I 沈着量と実測値を組み合わせて実質的な移行係数を求めるワン・コンパートメント・モデルにより市町村別の水道水の汚染濃度を推計した(9, 10)。その後、アンケート調査により年齢階層別の水分摂取量を調べ、その全量を水道水から摂取したと仮定して摂取量を改定すると共に、飯舘村に関しては住所情報をもとに、供給されている浄水場別の水道水汚染濃度を使い、再評価した(10)。また、吸入被ばくと同様に甲状腺等価線量の補正項を使用した（上記）。今年度は、南北に広しいわき市に関して、主要な浄水場により水道水の濃度を別個に推計し、線量評価を精緻化する。

（倫理面への配慮）

本研究計画書は、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り承認を受け、実施している。国際医療福祉大学研究倫理審査承認番号 13-B-339 「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」（平成 31 年 3 月 28 日）、福島県立医科大学一般倫理委員会 整理番号 一般 2019-003 「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」（令和元年 7 月 16 日、変更申請分 令和 2 年 1 月 6 日）

III. 研究結果

III-1. 行動調査票をベースに吸入被ばく線量を評価

先行調査では、放射線医学総合研究所から提供された Python プログラムを使い、UNSCEAR_2019DB からの線量情報抽出を半自動で実行した。このため、緯度経度情報を代表的な 152 ランドマークに限定せざるをえず、ランドマークの密度が粗い市町村に関しては精緻な線量評価になっていなかった。今回、大量の行動調査票を扱うに当たり、Python プログラムを新規に開発し直し、行動調査票に書かれている緯度経度を全て網羅的に使い、線量を自動的に評価する手法に切り替えた。次節で比較検討結果を述べるが、行動調査票の取り扱いで、以下の 3 手法を比較検討できるようになっている。すなわち、先行研究で採用した従来法である【方法 1】152 ランドマークの放射能情報と 6 時間ステップの時間帯に最も長く滞在した居場所の緯度経度を使い、その居場所に最も近いランドマークの放射能情報を用いて吸入被ばく線量を積算する方法と、【方法 2】行動調査票の緯度経度情報に従い、行動調査票の A 地点から B 地点へ移動した場合、移動時間の前半は A 地点、後半は B 地点の緯度経度の放射能情報を使い一時間毎の線量を積算する方法、そして【方法 3】行動調査票の緯度経度情報に従い、A 地点から B 地点に移動している場合には A 地点から B 地点の距離を移動時間で割り、一時間毎の移動場所の緯度経度を求めてその放射能情報を使い一時間毎の線量を積算する方法の 3 種類である。【方法 3】は、UNSCEAR2020 で採用されている手法であるが、UNSCEAR は、Ohba 論文(6)の 6 時間ステップの行動記録をベースにしており、移動開始時間を特定できなかったため、移動している場合は移動中の 6 時間ステップの最初の時間から移動が始まっているとして計算している。結論的に【方法 2】と【方法 3】

は、福島第一原発に近い双葉町や大熊町で若干の違いが出たが、ほぼ同じ結果であり、原発から 30Km 圏外の市町村は【方法 2】で十分であることが判った。

表 III-1、表 III-2 は、方法 2 による 1 歳児甲状腺等価線量(mSv)の集計表である。Scientific Reports 誌に発表した 152 ランドマークの線量情報を使った時と比較すると、3 月 12 日避難開始前後の居場所の精度が高くなった影響で、双葉町、大熊町で約 1.7 倍、富岡町、楡葉町で約 1.2 倍評価値が高くなった。一方、ランドマーク地点が比較的多かった浪江町、小高区、原町/鹿島区、および福島第 1 原発から 30Km 圏外で吸入被ばくより経口被ばくの寄与が大きかった飯館村に関しては両者の違いは 1mSv 未満であった。短半減期核種による甲状腺等価線量は、南相馬市小高区を除く 16 市町村全てにおいて、1 歳児の吸入被ばくによる甲状腺等価線量の平均値は 10mSv 未満であり、また、95 パーセンタイル値は、一番高い双葉町で 37.9mSv であり、その他の市町村では 30mSv 未満であった。

表 III-3 は、Kim 等(11)が 2011 年 3 月下旬に実施した 1080 名の小児甲状腺実測値から評価された甲状腺等価線量と我々の推計値の比較である。シナリオ 1 およびシナリオ 2 は、それぞれ 3 月 15 日の急性曝露と 3 月 15 日から甲状腺測定までの期間の均等慢性被ばくである。私たちの評価値は、シナリオ 1 により近い評価となっている。一方、水道水からの内部被ばくを考慮すると、いわき市および川俣町の評価値は、1~2 mSv 過大に評価している可能性もあるが、屋内退避や甲状腺取り込み率の不確実性幅を考慮すると、極めて整合性の高い評価結果となっている。

表 III-1. 【方法 2】による 1 歳児 ¹³¹I による甲状腺等価線量 (mSv)

	川俣町	川内村	葛尾村	田村市	伊達市	いわき市	広野町	相馬市
平均値	1.5	1.2	0.6	1.0	0.7	5.0	2.0	7.9
中央値	1.6	0.9	0.3	1.0	0.7	4.0	1.0	5.5
25%-tile	1.1	0.5	0.1	0.7	0.7	1.1	0.3	2.9
75%-tile	1.8	1.1	0.6	1.2	0.8	7.9	2.5	13.6
95%-tile	2.3	3.6	2.2	1.8	0.9	13.8	8.5	15.2
新地町	大熊町	富岡町	楡葉町	双葉町	浪江町	南相馬市		飯館村*
						小高区	原町区・鹿島区	
7.7	4.2	1.3	2.6	6.1	4.2	9.8	5.1	9.5
9.2	1.1	0.8	1.7	1.6	1.1	9.7	3.5	7.7
3.7	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	6.6	2.8	1.9
11.3	4.7	1.5	4.0	4.2	4.7	12.2	4.6	17.4
12.7	19.0	6.8	8.8	24.0	19.0	19.7	22.8	20.2

*水道水利用による経口被ばくと吸入被ばくの合計値

表 III-2. 【方法 2】による 1 歳児 短半減期核種 (^{131}I , $^{132}\text{I}/^{132}\text{Te}$, ^{133}I) による甲状腺等価線量 (mSv)

	川俣町	川内村	葛尾村	田村市	伊達市	いわき市	広野町	相馬市
平均値	1.6	1.3	0.6	1.1	0.7	5.2	2.2	9.3
中央値	1.7	0.9	0.3	1.0	0.7	4.1	1.0	7.1
25%-tile	1.2	0.5	0.1	0.8	0.7	1.2	0.3	4.5
75%-tile	1.9	1.2	0.6	1.3	0.8	8.1	2.7	15.3
95%-tile	2.5	3.7	2.3	1.9	0.9	14.1	9.2	16.7
新地町	大熊町	富岡町	檜葉町	双葉町	浪江町	南相馬市		飯舘村*
						小高区	原町区・鹿島区	
9.0	5.9	1.4	2.8	9.1	5.9	14.9	6.7	9.8
10.7	1.3	0.8	1.8	1.8	1.3	15.3	5.2	8.1
5.0	0.5	0.4	0.5	0.6	0.5	10.5	4.4	1.9
12.7	5.8	1.7	4.3	5.1	5.8	19.3	6.6	17.9
14.1	29.6	6.9	9.5	37.9	29.6	26.9	24.3	20.7

*水道水利用による経口被ばくと吸入被ばくの合計値

表 III-3. 5 歳児の甲状腺実測値に基づく ^{131}I -甲状腺等価線量(mSv)と【方法 2】による ^{131}I -甲状腺等価線量(mSv)の比較

	いわき市			川俣町			飯舘村**		
	Kim et al. (N=48)		本研究	Kim et al. (n=333)		本研究	Kim et al. (n=99)		本研究
	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	
25th パーセントイル	0*	0*	1.2 [§]	0*	0*	3.1 ^{&}	0*	0*	1.5
中央値	5	2.6	6.0 [§]	0*	0*	3.7 ^{&}	7.3	3	7
75th パーセントイル	10.6	5.2	9.8 [§]	5.9	2.7	4.2 ^{&}	14.7	11.9	14

*Kim らの報告(11)の 0 mSv は、測定が行われた 2011 年 3 月下旬にバックグラウンドの線量率が高かったこともあり、甲状腺の ^{131}I 活性が検出限界以下であったことを意味しており、必ずしも被ばくがなかったことを意味している訳ではない。

§ いわき市では、水道水からの経口被ばくによる甲状腺等価線量が平均 2.0 mSv 追加される、

& 川俣町では、水道水からの経口被ばくによる甲状腺等価線量が平均 2.5mSv 追加される

**飯館村の甲状腺等価線量は、個人毎に吸入被ばくと居住地区の水道水からの経口被ばくを合算した甲状腺等価線量である

III-2. 行動調査票ベースの線量評価における不確実性

UNSCEAR2020 では、Terada 等のソースタームと WSPEEDI で用いた大気拡散シミュレーションを使い、代表的避難シナリオに関しては、Ohba 論文で提唱した避難地区 7 市町村毎 4~5 避難シナリオを採用している。ここまでは我々と共通である。一方、①時間帯の扱いおよび②行動調査票の緯度経度情報の取り扱いが違っている。UNSCEAR は、移動の開始時間を常に 6 時間ステップの開始時間（例えば 3 月 12 日 12:00 あるいは 18:00）とし、移動中の居場所を【方法 3】と同じく出発地から目的地まで一時間毎に居場所を按分し、一時間毎の ^{131}I 濃度を用いて線量を積算している。一方、私たちは、既に述べたように Ohba 論文では 6 時間ステップの滞在時間の多い居場所の 6 時間の平均 ^{131}I 濃度を使って線量を積算した。今回、【方法 2】【方法 3】では、行動調査票通りの出発時間を採用し、【方法 2】では移動時間を折半し、移動前と移動先の ^{131}I 濃度を一時間毎積算しており、一方【方法 3】では、移動中の緯度経度を 1 時間毎按分し、それぞれの緯度経度に対応した ^{131}I 濃度を使って線量を積算している。③また UNSCEAR は、短半減期核種の線量寄与の計算法に関しても私たちと異なっている。さらに、④移動中の屋内退避の防護係数に関して、我々は乗用車の内循環モード時の換気率が外気導入運転時の十分の一に減少することより、建造物の屋内退避防護効果と同じ吸入被ばく低減係数を用いている。一方、UNSCEAR2020 では、自動車での避難途中は外気を吸入していたとして、低減係数を適用していない。④に関しては、自動車の空気質に関する文献より、車室内換気量は停車中も走行中でも外気導入モードに比して内気循環モードで約 1/10 に下がること、PM2.5 の粉塵や超微粒子の車室内濃度も内気循環モードでは外気導入モード時の約 40%に低下すると報告されていることより(12)。自動車での避難は屋内退避と同等のプルームからの吸入被ばく低減効果があると考えて良いと思われる。

行動調査票の移動時間や移動経路の取り扱いによる線量への影響を検討するために、【方法 1】代表的避難シナリオ毎に Ohba 論文の 6 時間ステップ+152 代表地点による評価法、【方法 2】、【方法 3】で計算した吸入被ばく ^{131}I -甲状腺等価線量と UNSCEAR2020 の Table A-22.4 の ^{131}I -吸入被ばくによる甲状腺吸収線量の平均値を比較検討した。多くの避難シナリオで私たちと UNSCEAR の評価値に大きな差異はない。一方、青でハイライトしたシナリオは、私たちの評価値が UNSCEAR より 1.5 倍以上高かった避難シナリオ、肌色でハイライトしたシナリオは、UNSCEAR の評価値が私たちの評価値より 1.5 倍以上高かった避難シナリオである。例えば、FT2 や FT4 および FT5 などの避難シナリオでは、避難開始時刻を何処に設定するかで大きく異なる事が UNSCEAR 2020 報告書 Table A-22.5 で述べられており、その影響もあると思われる。違いが大きいシナリオは、3 月 12 日午後に浪江町や南相馬市に滞在しているシナリオであり、プルームとどの時間帯に遭遇したとするかにより、線量評価が違っていると思われる。一方、私たちの 3 種類の方法論は、お互いに齟齬がないことを強調しておく。

短半減期核種の寄与に関して、私たちと UNSCEAR の方法論は異なっており、それに関しては考察で触れることとする。

表 III-4 ¹³¹I- 1 歳児甲状腺線量：UNSCEAR2020 報告書と私たちの評価値の比較

線量比較	UNSCEAR 2020	Ohba 論文	方法 2	方法 3		線量比較	UNSCEAR 2020	Ohba 論文	方法 2	方法 3
避難シナリオ(利用率 %)	Table A-22.4 (mGy)	吸入被ばく ¹³¹ I-甲状腺等価線量 (mSv)				避難シナリオ(利用率 %)	Table A-22.4 (mGy)	吸入被ばく ¹³¹ I-甲状腺等価線量 (mSv)		
OK1 (29.0)	3.1	2.4	2	1.9		NM1 (16.0)	3.3	2.9	2.9	3.6
OK2 (40.0)	3.6	3	3.2	4.3		NM2 (6.0)	10.9	20.1	19.3	17.3
OK3 (7.0)	2.7	2.9	3.5	3.4		NM3 (55.0)	1	0.3	0.4	0.5
OK4 (19.0)	0.8	1	0.9	0.9		NM4 (7.0)	6.9	5	5.6	5.6
OK5 (16.0)	4.3	10.8	8.3	8.2		NM5 (16.0)	10.2	7	7.2	7.2
NR1 (11.2)	0.9	0.6	0.9	0.9		OD1 (6.3)	25.7	16	19.8	19.8
NR2 (34.7)	3.3	4	3.4	3.4		OD2 (9.6)	0.1	8.2	7.7	7.1
NR3 (6.1)	7.7	10.1	9.4	9.4		OD3 (6.2)	0.2	0.1	0.4	0.4
NR4 (44.9)	0.3	0	0.3	0.3		OD4 (71.5)	18.9	10.2	10.4	10.3
NR5 (3.1)	4.5	4.3	6	6.4		OD5 (6.3)	10.7	20.3	20	17.5
TM1 (18.0)	0	0	0.3	0		HK1 (80.5)	3.3	2.9	3.1	3.1
TM2 (8.0)	1.6	1.5	1.7	1.7		HK2 (6.8)	0.5	0.4	2.5	2.1
TM3 (69.0)	1.2	0.7	0.9	0.9		HK3 (3.8)	7.6	10.2	9.7	9.7
TM4 (5.0)	7.6	10.1	9.2	9.2		HK4 (8.9)	13.7	16	15.7	15.7
FT1 (72.6)	1.1	1.3	1.9	1.8		IT1 (30.0)	7.9	5.8	5.7	5.8
FT2 (6.1)	12.1	3.3	6.8	6.8		IT2 (24.0)	0.3	0.3	0.3	0.3
FT3 (6.1)	7.6	7.6	7.9	7.7		IT3 (25.0)	3.2	5.3	5.8	5.8
FT4 (6.1)	9.8	23.7	24.3	31.5		IT4 (21.0)	4	6.2	6.1	5.7
FT5 (9.1)	0.5	18.8	14.2	10.9						

IV. 考察

今回、先行調査で解析した避難地区 7 市町村に加えて、その周辺の 9 市町村の ¹³¹I-吸入被ばく線量および短半減期核種 (¹³¹I, ¹³²Te・¹³²I, ¹³³I) の平均値、中央値、25 パーセントイル値、75 パーセントイル値、95 パーセントイル値を報告する事ができた。水道水からの内部被ばくに関しては、一部の自治体に関する解析ができていますが、全体像は最終年度に報告したい。私たちの評価値は、表 III-3 に示すように 1080 人の甲状腺実測に基づく線量評価と整合性が高く、信頼性は高い。短半減期核種の吸入被ばくによる甲状腺等価線量の平均値は、小高区の 14.9mSv を除くと全ての市町村で 10mSv 未満であり、95 パーセントイル値で 30mSv を超すのは双葉町のみであった。最新の小児甲状腺がんのプール解析結果(13)を踏まえれば、東電福島第一原発事故により環境に

拡散した放射性物質の影響による甲状腺等価線量は低く、甲状腺がんが増加する可能性は極めて低いと思われる。

大気拡散シミュレーション (ATDM) である WSPEEDI に基づく線量評価は、不確実性を伴う。しかし、大気拡散シミュレーションそのものの不確実性は、私たちにはコントロールできないため、最終的な甲状腺等価線量の評価値が実測値からの評価値とどの程度整合しているかどうかにより評価するしかない。そのためには、ATDM 以外の不確実性を少なくし、不確実性の幅を理解しておくことが重要である。今回、私たちは、行動調査票の避難開始時間や避難途上にどの場所の放射性プルームを吸入していたかに関する解釈により、どの程度線量評価が変わるかを検討した。表 III-4 は、同じ WSPEEDI_2019DB を使い、同じ避難シナリオを使って UNSCEAR の手法を含め 4 種類の評価法で線量を評価したものである。3 月 12 日午後に浪江町や小高区、原町区を通過する避難パターンで UCSCEAR と我々の間で齟齬が認められた。既に Ohba 論文で私たちの評価と南相馬市小高区からの避難住民 (OD4 に近い避難パターン) の実測に基づく評価値に齟齬がないことを確認している。しかし、私たちの評価値が大きかったその他の避難パターンに関しては、十分なバリデーションがなされておらず、UNSCEAR と私たちのどちらの評価が実際に近いのかは判っていない。

短半減期核種の寄与に関しても、UNSCEAR2020 年報告書と私たちで違いがある。短半減期核種の寄与に関しては、私たちは先行研究で実施した衣服の核種分析結果を元に ^{131}I ベースの甲状腺等価線量に 3 月 12 日のプルーム、3 月 15~16 日のプルーム、3 月 18 日以降のプルームに分けて短半減期核種の寄与割合で補正する推計法を採用している。具体的には 3 月 12 日の午後に北に向かった放射性プルームの組成に関して、避難住民の汚染衣服データの核種解析より $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比を一律 2.4 と仮定し、また $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$ 比を一律 1.14 と固定した。一方、UNSCEAR は、WSPEEDI-2019DB の ^{132}Te (^{132}I) の濃度情報をそのまま使い、 ^{133}I に関しては 3 月 12 日 12:00 時点で $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$ 比=1.1 と仮定し、その後は物理的減衰に応じて比は減少するとした。 ^{133}I の減衰を私たちは考慮していないため、3 月 12 日の夜にプルーム曝露した南相馬市や相馬市においては、 ^{133}I による甲状腺線量が低下しているため数%過大評価になっている。一方、WSPEEDI-2019DB では、森口班の南相馬市原町の浮遊状粒子物質 (SPM) の $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比を重視し、ソースタームの段階で $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比を小さくとっている。その結果、3 月 12 日に南相馬市や相馬市、新地町に到達したプルームの $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比は小さくなっている (表 IV-1)。しかし、私たちの評価法では元々 $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ の線量寄与率は 1 歳児で 16%程度であるので、その寄与が 1/10 以下になったとしても、その影響は ^{133}I の減衰分を含めても 1 歳児の甲状腺等価線量が 20%程度の低下で収まっている。

一方、WSPEEDI の $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比の仮定に関しても不確実性が残っている。原子炉内の $^{137}\text{Cs}/^{131}\text{I}$ 比や $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比は、燃料棒を装着してから核分裂を継続した経過時間により一義的に決まるが、炉内ではガス状であった核種は炉外に漏れ出すと沸点の違い (ヨウ素 184.3°C vs. セシウム 671°C vs. テルル 988°C) により固化 (他の非放射性粒子への付着) や水への溶解スピードが変わるため、存在比は変わっていく。急激に温度変化をもたらす湿性ベント操作では、ガス状の放射性核種が放出されやすく、高温のまま炉から漏れ出した場合であっても沸点の高い核種ほど環境中の粒子等に付着するスピードが早い。このため、 $^{137}\text{Cs}/^{131}\text{I}$ 比や $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比は炉内より小さくなる。一般

的には、遠方になればなるほどこれらの比は小さくなる。さらに複雑なのは、ヨウ素はガス状の元素ヨウ素と有機化ヨウ素および粒子型の 3 形態をとるため、衣服に付着した核種の分析結果は大気中の核種組成そのものではないし、SPM モニタリングのフィルター上に残っていた核種から計算された $^{137}\text{Cs}/^{131}\text{I}$ 比も大気中の核種組成そのものではない。SPM のフィルターの解析では原町ステーションとそれより遠方の新地ステーションで一貫した傾向は認められておらず、前者より後者の方が $^{137}\text{Cs}/^{131}\text{I}$ 比は大きくなっていった。結論として 3 月 12 日に複数の核種組成のプルームが漏れ出ていた可能性が高く、短半減期核種の寄与の大きさに関しては不確実性が残っている。実際の短半減期核種の寄与は、UNSCEAR と私たちの評価の間にあるものと思われるが、上述したように私たちの手法であっても、過大評価の程度は 20%程度である。

表 IV-1. 甲状腺線量評価における $^{132}\text{Te}/^{131}\text{I}$ 比の仮定

日時	UNSCEAR2020/WSPEEDI_2019DB						Ohba 論文
	双葉町 広町	浪江町 役場	小高区 小高駅前	原町区 南相馬市市役所	相馬駅	新地町 新地	
2011/3/12/13:00	1.635886	1.704989	1.642902				2.4
2011/3/12/14:00	0.234166	1.74179	1.688866	1.696134			2.4
2011/3/12/15:00	0.84597	0.25448	0.780309	1.678543	1.77E+00		2.4
2011/3/12/16:00	0.258086	0.243617	0.666822	0.430369	1.65E+00	1.67E+00	2.4
2011/3/12/17:00	2.158452	1.264796	0.411788	0.91848	3.27E-01	1.61E+00	2.4
2011/3/12/18:00	2.137049	2.161094	0.468721	0.662157	6.22E-01	2.68E-01	2.4
2011/3/12/19:00		1.736871	0.451288	0.586576	5.09E-01	4.17E-01	2.4
2011/3/12/20:00		0.170848	0.368609	0.587648	5.07E-01	4.01E-01	2.4
2011/3/12/21:00		2.179248	2.110374	0.207335	4.56E-01	5.86E-01	2.4
2011/3/12/22:00		2.305844	2.04221	1.660225	4.72E-01	4.51E-01	2.4
2011/3/12/23:00		2.513218	2.124347	2.465321	2.12E+00	1.24E+00	2.4
2011/3/13/00:00		#DIV/0!	2.256866	2.504152	2.28E+00	2.00E+00	2.4

表のハイライト部分は、1 歳時の甲状腺等価線量が 1mSv を超えた時間帯

V. 結論

避難地区 7 市町村に加え、周辺 9 市町村の 1 歳児の吸入被ばく線量を評価した。私たちの方法論で推計した ^{131}I -甲状腺等価線量は、1080 名の小児甲状腺実測値から評価された甲状腺等価線量の分布と整合性が高く、短半減期核種の吸入被ばくによる甲状腺等価線量の平均値は、小高区の 14.9mSv を除くと全ての市町村で 10mSv 未満であり、95 パーセンタイル値で 30mSv を超すのは双葉町のみであった。線量が低いことより、東電福島第一原発事故により環境に拡散した放射性

物質の影響で甲状腺がんが増加する可能性は極めて低いと思われる。

VI. 次年度以降の計画

当面ソースタームの改定は予定されておらず、従って ATDM による放射性ヨウ素等の大気中濃度の再評価も予定されていない。そこで、令和 3 年度（最終年度）の研究では、避難地区周辺市町村の線量評価結果とその不確実性の解析を進め、論文化を目指す。吸入線量と経口摂取線量の合算を個人ベース行えるように python プログラムを作成し、将来の個人線量をベースとした疫学研究のための基盤を確立する。

VII. この研究に関する現在までの研究状況、業績

ア) 論文・雑誌等

- 1) Hirakawa S, Yoshizawa N, Murakami K. et. al.: Surveys of food intake just after the nuclear accident at the Fukushima Daiichi nuclear power station. *Shokuhin Eiseigaku Zasshi*, 58(1): 36-42, 2017.
- 2) Ohba T, Hasegawa A, Kobayakawa Y, Kondo H, et al.: Body-surface contamination levels of residents under different evacuation scenarios after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Health physics* 117(3): 175-182, 2017.
- 3) Kawai M, Yoshizawa N, **Suzuki G.**: ¹³¹I dose estimation from intake of tap water in the early phase after Fukushima Daiichi Power Plant accident. *Radiation Protection Dosimetry*, 179: 43-48, 2017. Doi:10.1093/rpd/ncx208.
- 4) Miyatake H, Yoshizawa N, **Suzuki G.**: ESTIMATION OF EFFECTIVE DOSE FROM EXTERNAL EXPOSURE DUE TO SHORT-LIVED NUCLIDES IN THE PREFECTURES SURROUNDING FUKUSHIMA. (14) *Radiation Protection Dosimetry*, 2018;182(3):370-6, doi:10:1093/rpd/ncy075.
- 5) Ohba T, Hasegawa A. and **Suzuki G.**: Estimated thyroid inhalation doses based on body surface contamination levels of evacuees after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. *Health Physics*, 117 (1): 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000990>.
- 6) H. Miyatake, M. Kawai, K. Murakami, et al.: Estimation of internal dose from tap water after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident using newly obtained data. *J. Radiat. Res.* 61(2):231-236 (2020) <https://doi.org/10.1093/jrr/rrz089>

- 7) T. Ohba, T. Ishikawa, H. Nagai, et al.: Reconstruction of residents' early internal doses after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *Sci. Rep.* (2020) 10:3639 / <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60453-0>
- 8) **Suzuki G.** Communicating with residents about 10 years of scientific progress in understanding thyroid cancer risk in children after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident. *J.Rad.Res.* 62 (Suppl.1) i7-i14 (2021). Doi: 10.1093/jrr/rrea097.

イ) 学会発表等

- 1) なし
- 2)

ウ) 書籍・総説

- 1) 滝澤真理、義澤宣明、河合理城、宮武裕和、平川幸子、村上佳菜、佐藤 理、高木俊治、鈴木 元 「福島第一原発事故後の食品からの内部被ばく線量の考察」 *安全工学* 55(1): 26-33, 2016
- 2) 宮武裕和、義澤宣明、河合理城、平川幸子、滝澤真理、村上佳菜、佐藤 理、高木俊治、鈴木 元 「福島第一原発事故後の栃木県内の外部被ばく線量評価」 *安全工学* 55 (2): 101-106, 2016
- 3) 鈴木元 「福島の環境汚染—過去、現在、そして未来」 *エネルギーレビュー* 2017 2 : 38-41
- 4) 鈴木 元 「福島住民における甲状腺被ばく線量推計の方法論・現状と課題」 *公衆衛生情報* 48(9): 6-7, 2018
- 5) 鈴木 元 「原子力のいまと明日」 (日本原子力学会編) 第6章分担 「6.1 事故による放射線の健康影響」 pp. 126-136 , 丸善出版、東京, 2019. 3
- 6) 鈴木 元 「放射線医学の事典」 (日本影響学会編) 分担執筆 「1.9 福島原発事故による環境汚染と健康影響」 (朝倉書店、2019. 10, 東京)
- 7) 鈴木 元 「東電福島第一原発事故後の小児甲状腺被ばく線量の再評価—UNSCEAR2013年報告書より大幅に低くなる」 *ISOTOPE NEWS* 2021(2): 773, 40-43.

エ) 受賞

- 1) なし
- 2)

オ) 特許

- 1) なし
- 2)

カ) 環境行政への活用・貢献実績

- 1) UNCEAR2020 年報告書の線量評価に貢献
- 2) 福島県民健康調査の甲状腺がん疫学調査（症例対照研究研究計画）に貢献

VIII. 引用文献

1. 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. *J Environ Radioact.* 2020;213:106104.
2. ICRP. ICRP PUBLICATION 71. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4. Inhalation Dose Coefficients.
3. Hirouchi J, Takahara, S., Komagamine, H., et al. Factors affecting the effectiveness of sheltering in reducing internal exposure. *ASTRAM2017-1001*, 2017.
4. Hirouchi J, Takahara, S., Komagamine, H., et al.. Investigation of reduction factor of internal exposure for sheltering in Japan. 2018.
5. Kudo T, Inano A, Midorikawa S, et al. Determination of the Kinetic Parameters for ¹²³I Uptake by the Thyroid, Thyroid Weights, and Thyroid Volumes in Present-day Healthy Japanese Volunteers. *Health Phys.* 2020;118(4):417-26.
6. 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. *Sci Rep.* 2020;10(1):3639.
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 Phys.* 2017;113(3):175-82.
8. Hirakawa S, Yoshizawa N, Murakami K, et al. Surveys of Food Intake Just after the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. *Shokuhin Eiseigaku Zasshi.* 2017;58(1):36-42.
9. Kawai M, Yoshizawa, N., Suzuki, G. ¹³¹I Dose estimation from intake of tap water in the early phase after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Radiat Prot Dosimetry.* 2017.
10. Miyatake H, Kawai M, Yoshizawa N, et al. 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):231-6.
11. 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 Phys. 2020;118(1):36-52.
12. 岩下剛. 自動車車室内の空気質の知覚に関する基礎的検討. J.Japan Association on Odor Environment. 2011;42(6):413-9
 13. Lubin JH, Adams MJ, Shore R, et al. Thyroid Cancer Following Childhood Low-Dose Radiation Exposure: A Pooled Analysis of Nine Cohorts. J Clin Endocrinol Metab. 2017;102(7):2575-83.
 14. Miyatake H, Yoshizawa, N., Suzuki, G. Estimation of effective dose from external exposure due to short-lived nuclides in the prefectures surrounding Fukushima. Radiat Prot Dos. 2018.

Estimation of doses in the early phase of accident utilizing a spatiotemporal radionuclides' distribution database by atmospheric transport, diffusion and deposition model simulation and the evacuation patterns of residents.

Gen Suzuki

International university of Health and Welfare Clinic ・ Director and Professor

Key word: thyroid dose, ATDM simulation, Fukushima Daiichi Nuclear Plant Accident, personal behavioral record

Abstract

A large amount of radionuclide such as ^{131}I , ^{132}Te , ^{132}I , and ^{133}I was released into the environment after the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS) accident in March 2011. As these radionuclides tend to accumulate in the thyroid gland, Fukushima residents are concerned about the risk of thyroid cancer in their children. However, the measurements of ^{131}I activities in the thyroid had not been systematically conducted in large scale, and the thyroid-dose distribution among children was not elucidated. Our research group have been conducting the dose reconstruction of thyroid doses using the spatiotemporal distribution database of radionuclides' density that was simulated by the World-wide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (WSPEEDI). In order to reflect the diverse behavioral patterns after the accident, 100 to 1000 whereabouts questionnaire sheets under 20-year-old residents were randomly selected from each 16 municipalities around the FDNPS, and the individual thyroid doses were estimated based on the latitude and longitude of their evacuation routes as a key to refer hourly ^{131}I concentrations (elemental-, particulate- and methylated-forms) at 1m height in the database from 12 March to 25 March 2011. Our work on 7 municipalities in the evacuation ordered area was published in January 2020 and contributed the update of dose reconstruction in 2020 by the United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR), UNSCEAR 2020 Report. In the present study, thyroid equivalent doses in 1-year-old children in 9 municipalities surrounding 7 municipalities in the evacuation ordered area were evaluated. Estimated ^{131}I -thyroid equivalent doses were consistent with those figures based on 1080 thyroid measurements in Iwaki city, Katsurao town and Iitate village in March 2011, which validated the appropriateness of our methodology. Mean thyroid equivalent doses in 1-year-old children from ^{131}I , ^{132}Te , ^{132}I and ^{133}I were less than 10 mSv except for 14.9 mSv in Odaka ward, Minamisoma city, and 95th percentiles more than 30 mSv was recorded only in Futaba town.

In the study, we evaluated 4 different modalities including UNSCEAR 2020 Report one to treat evacuation timing or route from a whereabouts questionnaire sheet that did not specified detailed information, and compared the doses by different modalities. The present analyses demonstrated the differences were not great.