

## 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	個人避難行動及び大気拡散シミュレーションに基づく福島第一原発事故における住民の初期内部被ばく線量推定の精緻化に関する研究
研究期間	令和3年4月1日～令和4年2月28日

氏名	氏名	所属機関・職名
主任研究者	栗原 治	量子科学技術研究開発機構・部長

氏名	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・教授

研究要旨	<p>東電福島第一原発事故による近隣住民の被ばく線量推計は重要である。本研究では、先行研究を基礎として、近隣住民の放射性ヨウ素による初期内部被ばく線量、特に甲状腺線量の推計精度の向上に取り組むものである。2021年度は、課題として残された<sup>131</sup>I以外の短半減期核種による線量寄与、大気拡散シミュレーションによる線量推計の精度検証、事故発生から時間が経過したWBC測定によって得られた放射性セシウム体内残留量の解釈等の検討を行った。最初の課題については、WSPEEDI-IIと個人の避難行動データを同一時刻で突合することにより推定された日別の吸入摂取量、及び、炉内インベントリから計算される短半減期核種の放射能比を用いて線量寄与を試算した。その結果、事故発生翌日の3月12日に吸入摂取が生じたとすると、<sup>131</sup>Iによる甲状腺線量の4割程度の線量寄与が推定された。二番目の課題については、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者の内、避難行動データを有する者について、WSPEEDI-IIの<sup>131</sup>I地表高大気中時系列濃度マップを用いて吸入摂取量及び甲状腺残留量を計算し、計測値との直接比較を行った。その結果、オーダーとしては概ね一致し、また、従前のWSPEEDI-IIと比較して線量推計の精度が向上することを確認した。三番目の課題については、浪江町、双葉町、大熊町及び富岡町の計4自治体の解析対象者について、WBC測定から得られたセシウム体内残留量と避難行動との関係を調べた。その結果、<sup>137</sup>Cs検出率については、福島第一原発の北側に位置する浪江町と双葉町では、3月12日15時時点の居場所によって分類した2グループに有意な差があることが分かった。これは同日に発生した1号機建屋の水素爆発の関与を示唆するという先行研究を補強する結果であるが、一時帰宅（第2巡目）が開始された同年9月以降にWBC測定が開始された双葉町、大熊町及び富岡町で</p>
------	---

	は、浪江町に比べてセシウムの預託実効線量が高い傾向があり、WBCの偽計数による可能性が考えられた。
キーワード	福島第一原発事故、線量評価、初期内部被ばく、ヨウ素、避難行動、大気拡散シミュレーション

## I 研究目的

東電福島第一原発事故の発生から10年が経過し、この間、屋内外の多くの研究者によって、同事故による近隣住民の被ばく線量の調査が行われてきた<sup>1,2)</sup>。研究代表者らが所属する量子科学技術研究開発機構)以下、量研)においても、主として放射性ヨウ素による事故初期の内部被ばく線量の推計を2012年度から継続してきた。2012年度の推計では、国が事故直後に実施した小児甲状腺被ばくスクリーニング検査及び福島県が避難地域の住民に対して行ったホールボディカウンタ(WBC)を用いた放射性セシウムによる内部被ばく検査から得られた人の実測データを基礎とし、これに大気拡散シミュレーションを補完的に用いることで、福島県各地域の住民が受けた甲状腺等価線量の代表値(90パーセンタイル値等)を導出した<sup>3)</sup>。この結果は、後の他の研究者らによる推計値と大きく乖離するものではない。2012年度の推計以降、量研では福島県立医科大学から上記の実測値を有する者の避難行動データの提供を受け、事故直後の避難行動とWBC実測値の関連性について解析するとともに、膨大な避難行動の類型化やアップデートされた大気拡散シミュレーションを用いた吸入摂取量の算出等を行ってきた<sup>4,6)</sup>。また、様々な形で可視化した避難行動データのアーカイブ化を実施した<sup>7)</sup>。本研究(2021~2022年度)は、以上の先行研究を進展させ、本事業「令和3年度放射線の健康影響に係る研究調査事業」において優先的に取り組むべき課題とされている福島県住民の初期内部被ばく線量の推計について、その更なる精緻化と信頼性の向上を図るべく、以下の新たな課題に取り組むものである。

課題1. ヨウ素-131以外の短半減期核種を含む甲状腺線量の評価

課題2. 大気拡散シミュレーションによる吸入摂取量の精度及び不確かさ評価

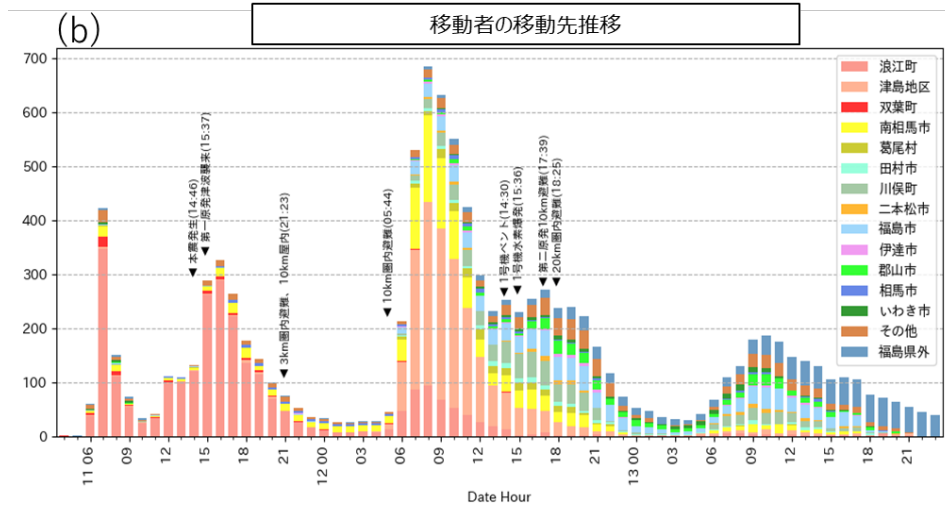
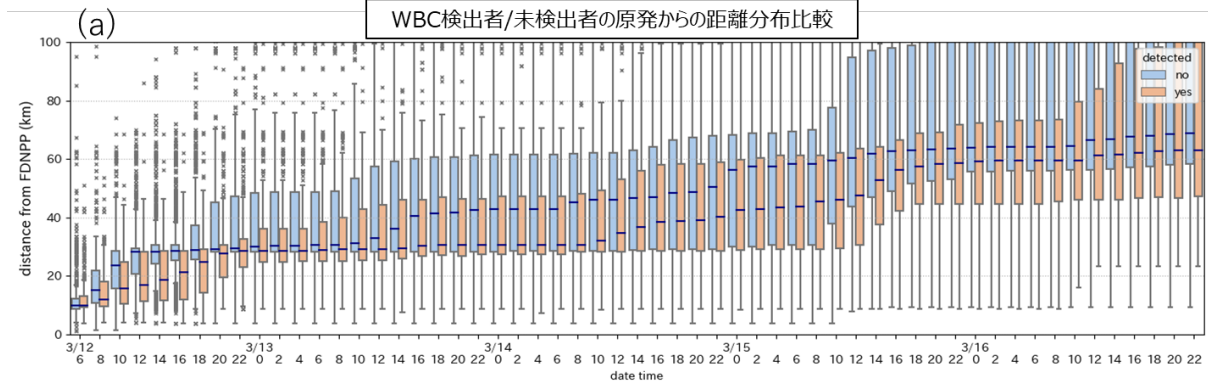
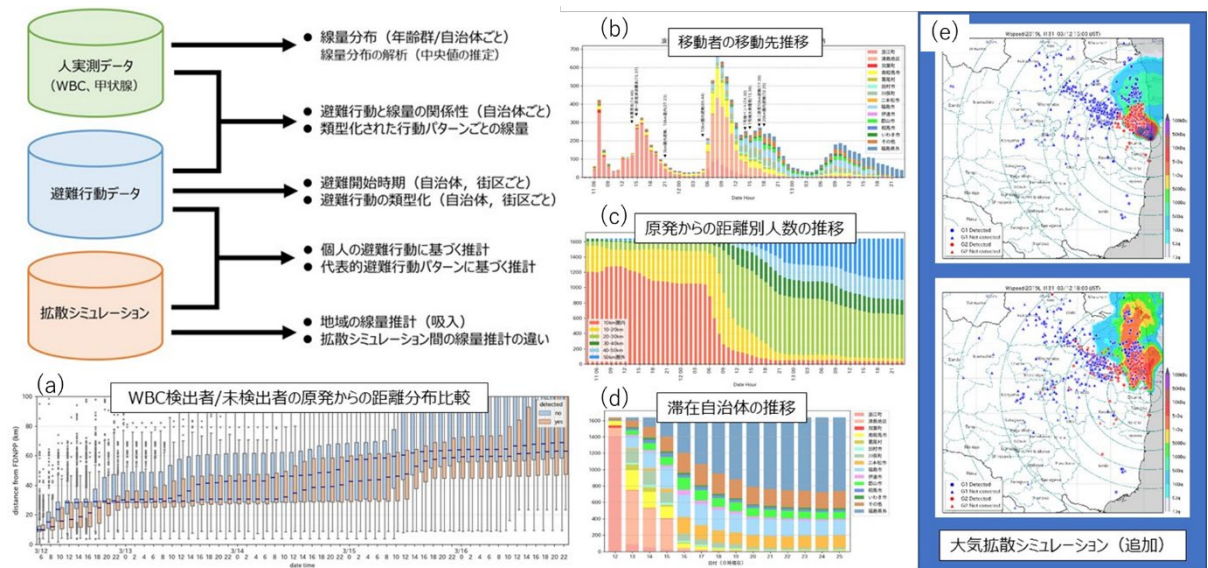
課題3. WBCで実測された体内セシウム残留量の解釈

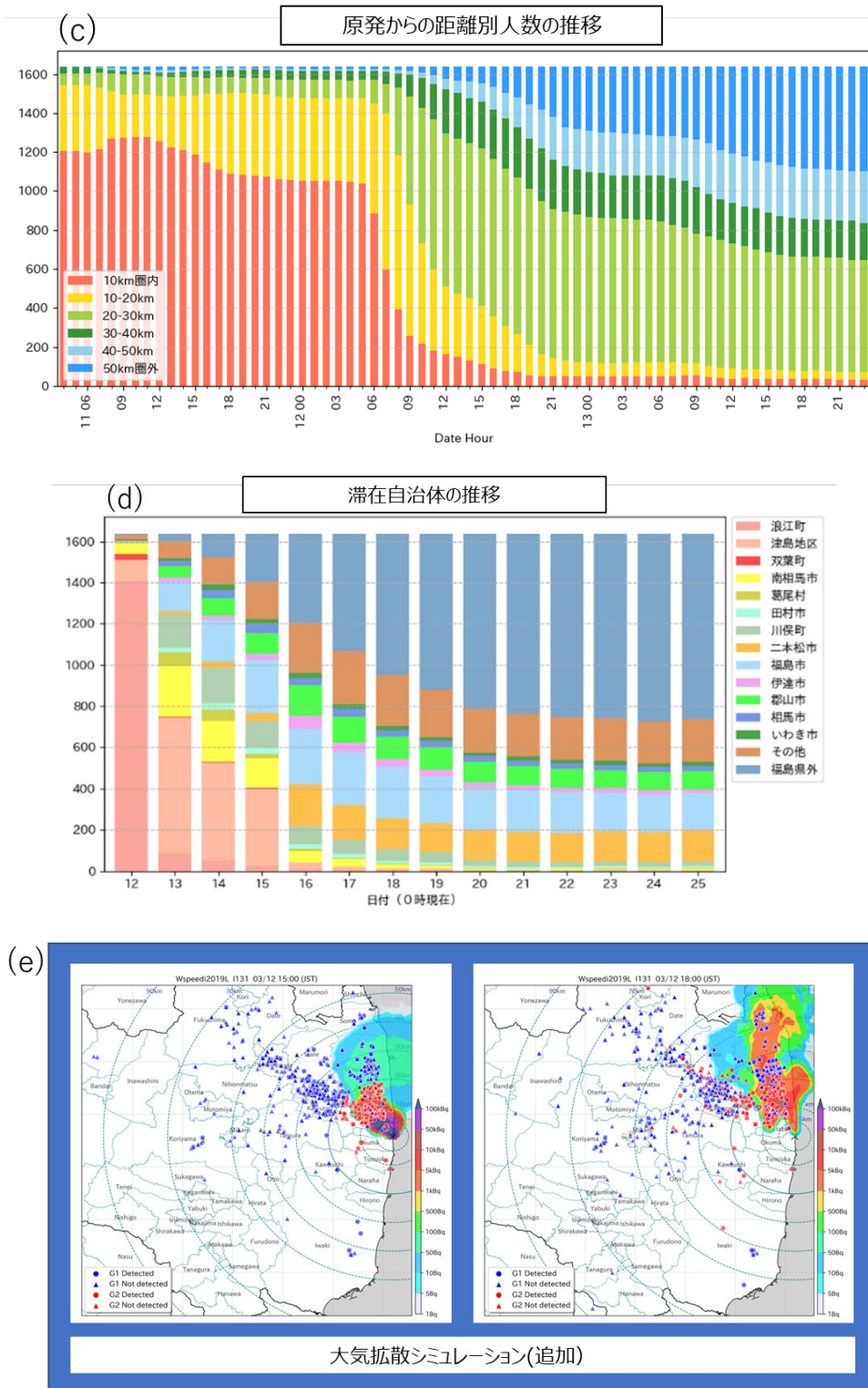
課題4. 打ち切り線量分布の再構成及び他研究との比較・検証

本報告では、上記課題の内、主に1から3の進捗について記述する。

## II 研究方法

先行研究(2019~2020年度)<sup>7)</sup>において作成した避難行動データ及び線量データのアーカイブ(図II-1)及び2020年に公開されたWSPEEDI-II<sup>8)</sup>による大気拡散シミュレーションデータ(<sup>131</sup>I、<sup>137</sup>Cs等の地表高大気中時系列濃度マップ)を主に使用した。個人の吸入摂取量は、解析対象者の避難行動データから推定される各時刻(毎時)の居場所(緯度経度)から、これに最も近いWSPEEDI-IIの計算格子点の空气中濃度を抽出し、年齢に応じた単位時間当たりの吸入量をこれに乘じ、評価対象期間である2011年3月12日から31日まで積算することで実施した。詳細は先行研究報告書を参照されたい。その他、福島第一原発近隣4自治体のWBC測定値の解析では、Igarashi et al. (2020)<sup>4)</sup>と同様な方法により行った。





図II-1 先行研究で作成した避難行動データ及び線量データのアーカイブ

(倫理面への配慮)

甲状腺中ヨウ素または全身セシウムを対象とした人の実測値及び個人の避難行動データの本研究での利用については、研究代表者らが所属する量研及び福島医大の臨床研究審査委員会での承認を得ている（量研 13-011、福島医大 1892）。研究目的外での利用、また、他機関への譲渡はしない。

### III 研究結果

#### 1. ヨウ素-131 以外の短半減期核種を含む甲状腺線量の評価

先行研究 (Igarashi et al. 2020) において、浪江町の解析対象者 (約 1,600 名) の WBC 測定結果と避難行動を解析したところ、3 月 12 日の滞在場所が関連することを見出した。すなわち、同日 15 時時点で当該原発から 20 km 圏外に避難したと推定されるグループ (G1) と 20 km 圏内に残留したと推定されるグループ (G2) について  $^{137}\text{Cs}$  検出率を比較したところ、G1 グループでは約 20%、G2 グループでは約 60%であった。ただし、G2 グループが解析対象者全体に占める割合は約 2 割であった。以上の結果を検証するため、WSPEEDI-II から生成された  $^{131}\text{I}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  の時系列大気中濃度マップデータと解析対象者の避難行動データ (緯度経度の時系列) を同時刻で突合したところ、両グループの吸入摂取量に同様な傾向が見られた。以上から、両グループの  $^{137}\text{Cs}$  検出率及び  $^{137}\text{Cs}$  摂取量の差異は、2011 年 3 月 12 日 15 時 36 分に発生した 1 号炉建屋における水素爆発により生じた放射性プルームが原因であることが示唆された。他方、大量放出のあった 15 日については、両グループの解析対象者はともに遠方に避難を完了しているため、放射性プルームへのばく露量は比較的小さかったことが示唆された。以上は  $^{131}\text{I}$  についても当てはまると予想される。なお、WSPEEDI-II から計算された  $^{131}\text{I}$  の甲状腺等価線量は、従前の推計値と同等であった。

図III-1 に、上記の計算で算出した両グループの  $^{131}\text{I}$  の各日吸入摂取量の相対値 (3 月 25 日までの吸入摂取量の合計値で規格化) を示す。同図から分かるように、G1 グループでは 12 日、15-16 日及び 21-22 日の吸入摂取量がおおよそ均等であるのに対し、G2 グループでは 12 日の吸入摂取量が全体の 8 割程度になる。図III-2 には、炉内インベントリ<sup>9)</sup>から計算される  $^{131}\text{I}$  以外のヨウ素同位体の相対放射能の経時変化を示した。ただし、 $^{132}\text{I}$  (物理半減期: 2.3 h) については、親核種である  $^{132}\text{Te}$  (物理半減期: 3.2 d) との放射平衡を仮定した。同図から、シャットダウンから 1 日程度では、 $^{131}\text{I}$  よりも  $^{132}\text{Te}/^{132}\text{I}$  及び  $^{133}\text{I}$  の放射能が高く、これらの核種による線量を、特に G2 グループでは考慮しなければならないことが示唆された。炉内インベントリの各核種の放射能比を用いると、ヨウ素が元素状、テルルが粒子状 (タイプ F) である場合、 $^{131}\text{I}$  の甲状腺等価線量 (1 歳児) に対する  $^{131}\text{I}$  以外の単半減期核種による線量寄与は、シャットダウン 1 日後で 39%、3 日後で 16%、5 日後で 9%となった。

#### 2. 大気拡散シミュレーションによる吸入摂取量の精度及び不確かさ評価

先行研究 (Kim et al. 2021, 2022)<sup>5,6)</sup>で実施した浪江町の解析対象者に引き続き、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の被検者の内、有効な避難行動データを有する 308 名について、新旧の WSPEEDI-II から  $^{131}\text{I}$  の吸入摂取量及び測定日時点の甲状腺残留量を計算した。後者については、摂取日毎の測定日における甲状腺残留率及び屋内低減係数 (0.5) を考慮した。図III-3 に、出身自治体が川俣町、飯舘村、いわき市、南相馬市の解析対象者について、年齢群毎に  $^{131}\text{I}$  甲状腺残留量の計算値と計測値を比較した結果を示す。同図中の点線は、計測値と計算値が一致した場合の関係を表している。同図から、全体的に計算値が計測値に比べて高い傾向が見られるものの、オーダーとしては概ね一致することが確認された。また、従前の WSPEEDI-II (Terada et al. 2012)<sup>10)</sup>に

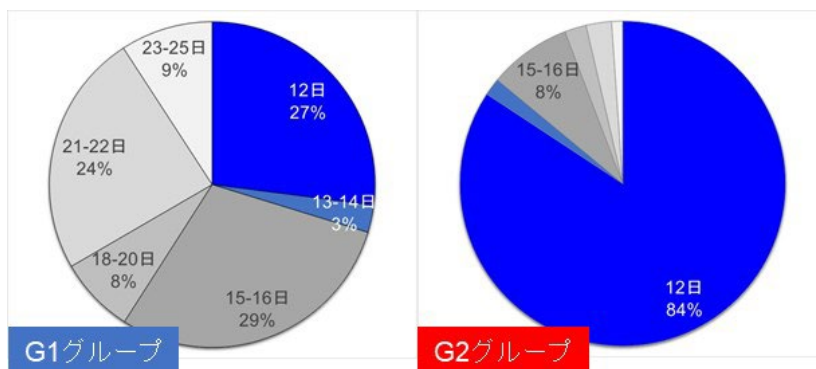
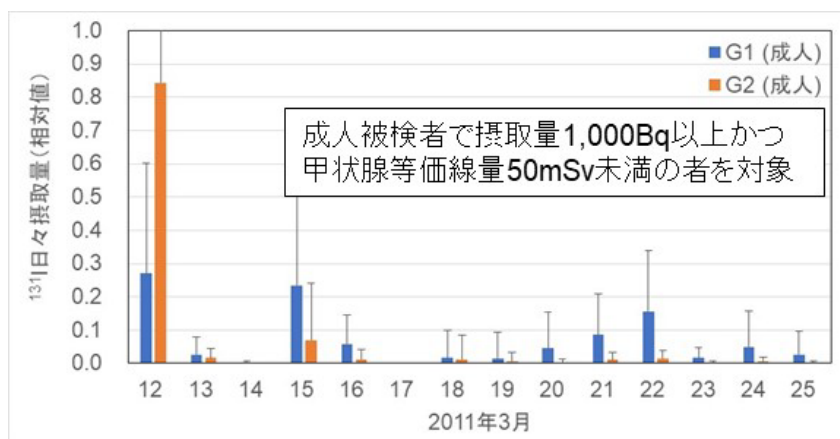
よる計算で見られた川俣町及び飯舘村の解析対象者に対する過大評価は解消され、推計精度が向上した<sup>11)</sup>。なお、結果は省略するが、WSPEEDI-IIの広域版（空間分解能：3 km メッシュ）と狭域版（1 km メッシュ）とで、計算値に大きな差異は認められなかった。

### 3. WBC で実測された体内セシウム残留量の解釈

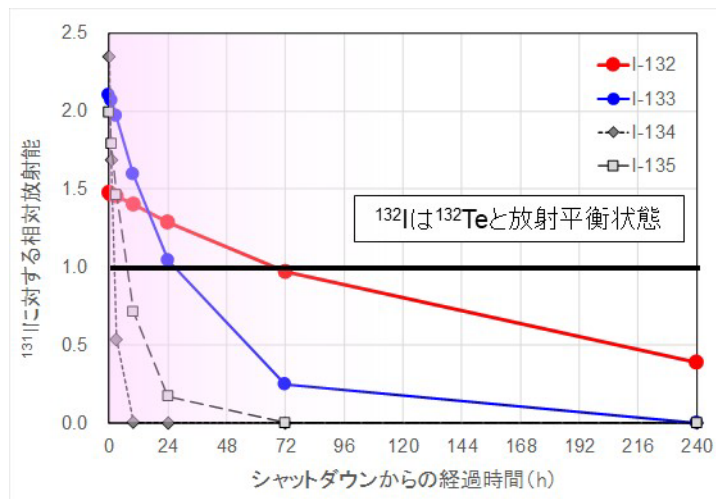
先行研究（Igarashi et al. 2020）と同様な観点で、浪江町以外の近隣自治体でも3月12日の避難行動がWBC測定結果に関連するか否かを解析した。解析には、浪江町、双葉町、大熊町及び富岡町の4自治体の解析対象者の内、セシウムの実効半減期の長い成人のデータ（1,145名）を用いた。各自治体の解析対象者は、3月12日15時時点の居場所と福島第一原発からの距離によって2群化し、境界距離以上の場合はG1グループ、境界距離未満の場合はG2グループとした。ここで、境界距離は、先行研究と同じ20 kmに、25 km及び30 kmを追加して解析を行った。

表III-1に、各自治体解析対象者の両グループの人数及び<sup>137</sup>Cs検出率を示した。両グループの<sup>137</sup>Cs検出率の差異は、Fisherの正確検定により判定した。この結果、浪江町と双葉町では両グループに有意差があり、大熊町と富岡町では両グループの有意差は認められなかった（富岡町の20 km境界を除く）。次に、これらの各グループの預託実効線量を比較した。預託実効線量は、<sup>134</sup>Cs及び<sup>137</sup>Csの体内残留量から、3月12日の急性吸入摂取シナリオを仮定して算出した。各自治体のWBC測定時期が異なるため、<sup>137</sup>Cs検出率を自治体間で単純に比較することはできないが、預託実効線量（高累積頻度値）の自治体間比較は適当である。図III-4に示す結果から、双葉町の解析対象者（G1）と浪江町の解析対象者（G2）の預託実効線量のレベルは類似している一方、浪江町の解析対象者（G1）の預託実効線量が全8グループの中で最も低いレベルであった。

次に、3月16日0時時点における避難先自治体を図III-5に示すエリアに区分し、それぞれのエリアでの解析対象者の人数（図III-6）及び預託実効線量（図III-7）を求めた。ここで、浪江町津島地区を除く4自治体に留まったと推測される3名は解析から除外した。各自治体の解析対象者の避難状況については、各自治体の代表的避難行動パターンに準じた人の動きが見られるものの、4自治体全てにおいて福島県外への避難者が最も多かった。預託実効線量についてはエリア間でばらつきが見られるものの、福島県外避難者が特に低い結果ではなかった。図III-8には、福島県外に避難した4自治体の解析対象者の預託実効線量を、両グループについて示した。双葉町と大熊町については、G2グループよりもG1グループの方が線量の高い傾向があり、事故直後の吸入摂取だけでは説明が難しい結果となった。

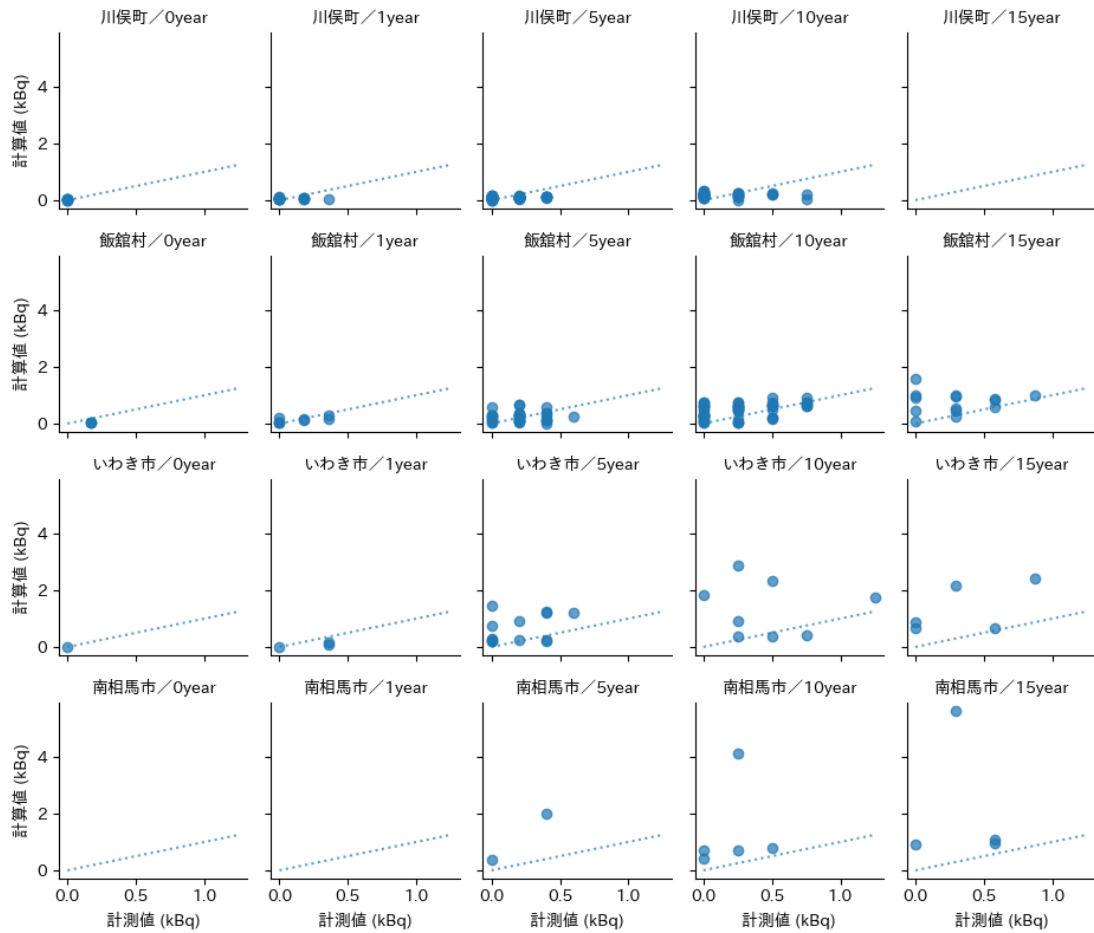


図III-1  $^{131}\text{I}$ の各日吸入摂取量の相対値 (WSPEEDI-IIからの計算値)

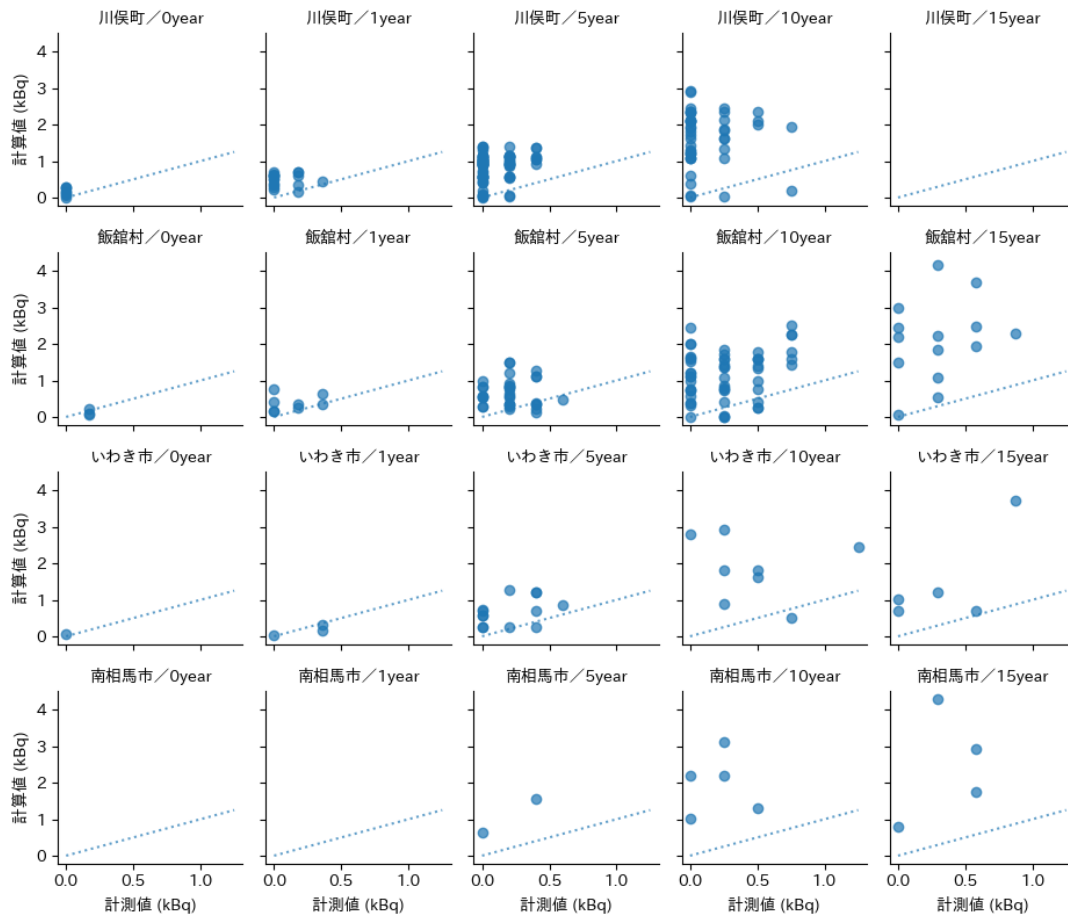


図III-2  $^{131}\text{I}$ に対する他のヨウ素同位体の相対放射能の経時変化

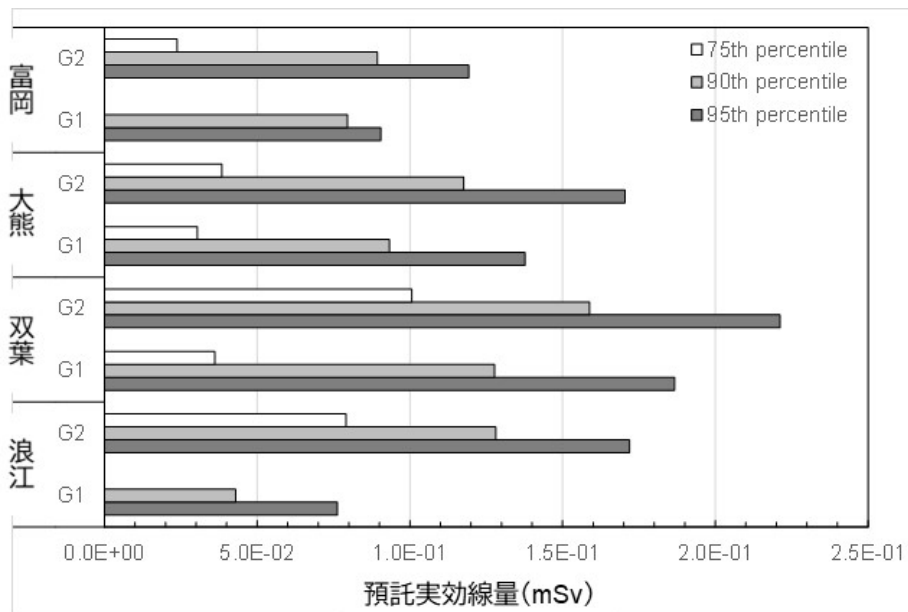




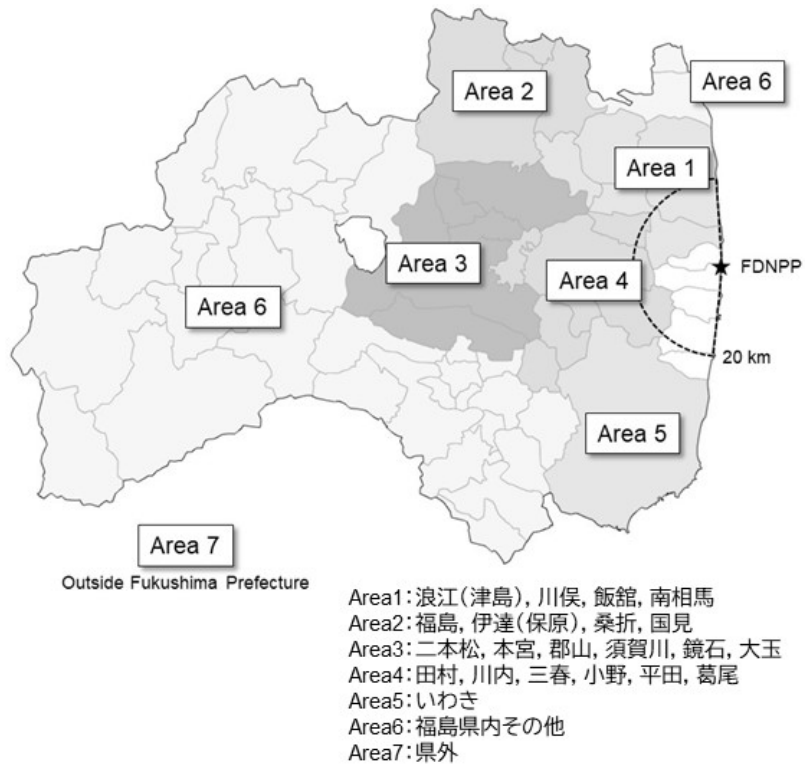
図III-3(1) 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の解析対象者の<sup>131</sup>I甲状腺残留量に対する計測値と計算値（WSPEEDI-II、新モデル：Terada et al. 2020 version）との比較



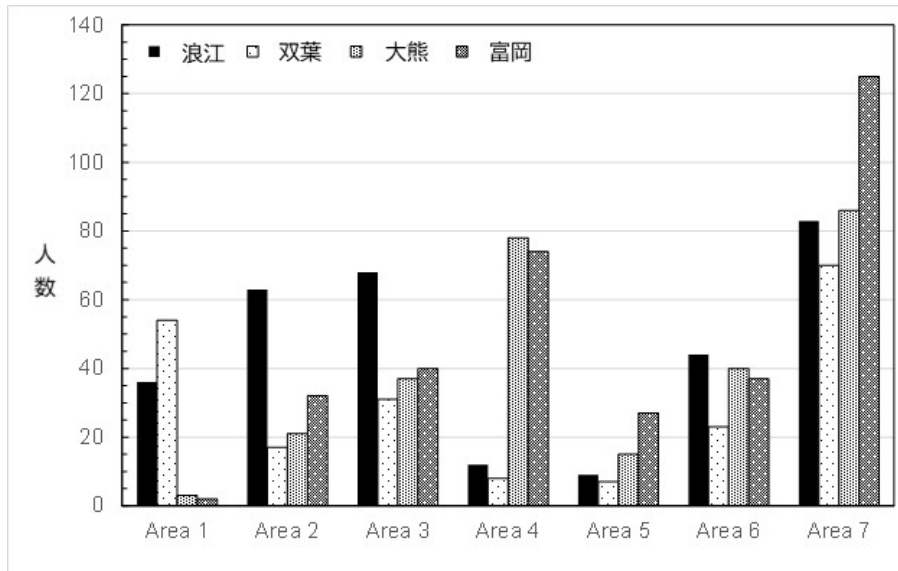
図III-3(2) 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の解析対象者の<sup>131</sup>I甲状腺残留量に対する計測値と計算値（WSPEEDI-II、旧モデル：Terada et al. 2012 version）との比較



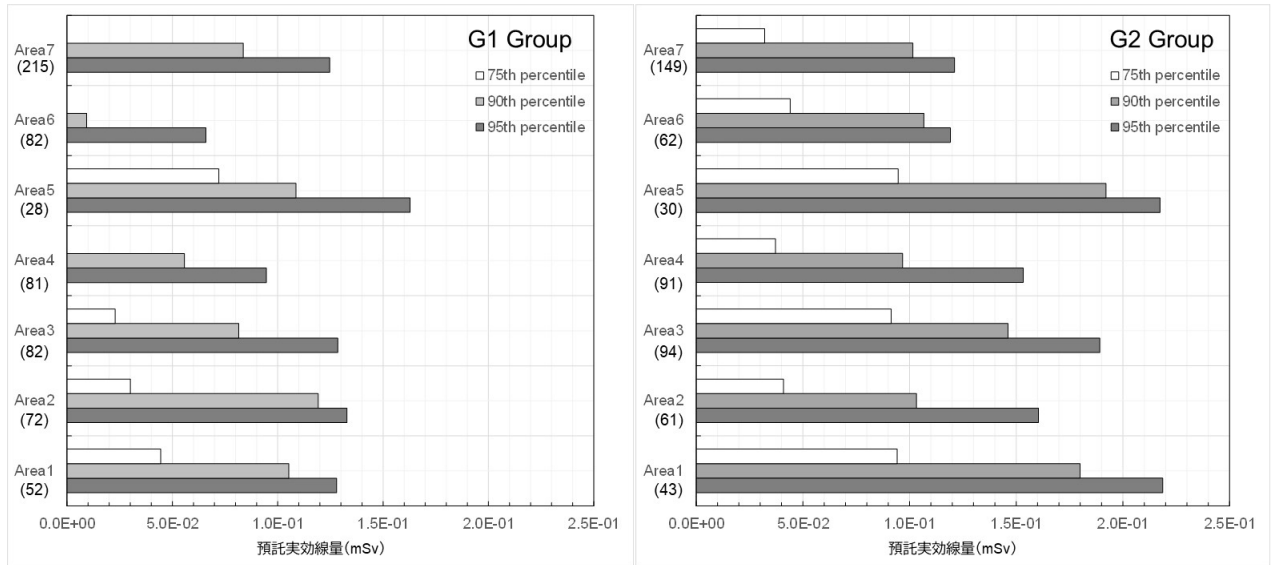
図III-4 4自治体解析対象者（成人）のG1及びG2グループの<sup>134</sup>Cs及び<sup>137</sup>Csによる預託実効線量



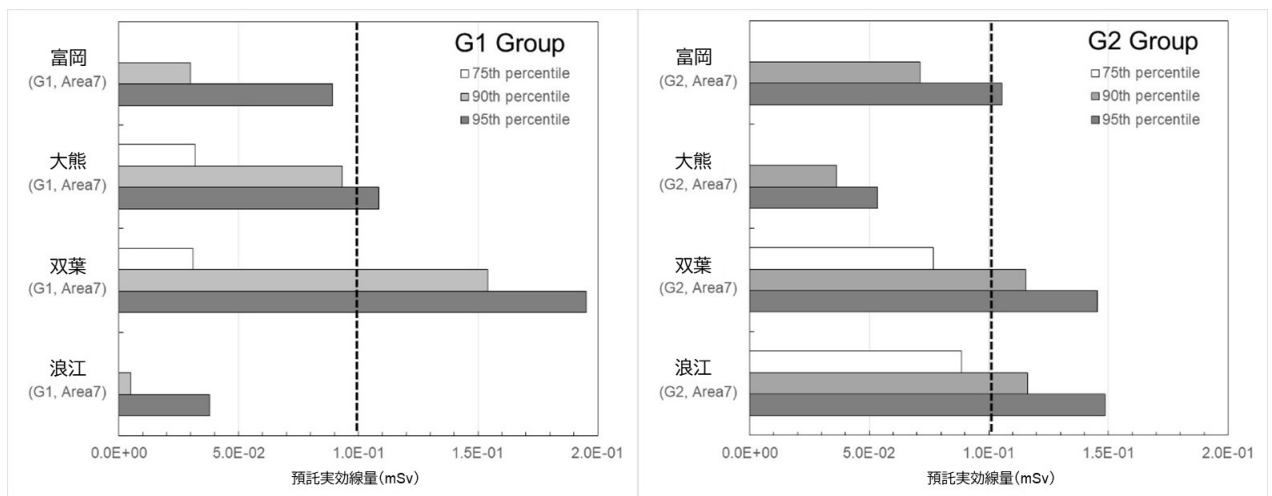
図III-5 避難地域のエリア区分 (エリア7は福島県外)



図III-6 2011年3月16日0時時点のエリア毎の各自治体解析対象者の人数



図III-7 解析対象者のエリア毎の預託実効線量  
括弧内の数値は人数



図III-8 福島県外に避難した解析対象者の自治体毎の預託実効線量

表III-1 4自治体解析対象者（成人）のG1及びG2グループの<sup>137</sup>Cs検出率

境界距離 (km)	20 km			25 km			30 km		
	G1 (prompt)	G2 (late)	<i>p</i> -value <sup>c</sup>	G1 (prompt)	G2 (late)	<i>p</i> -value	G1 (prompt)	G2 (late)	<i>p</i> -value
浪江町	48/167 <sup>a</sup> (22.3%) <sup>b</sup>	67/33 (67.0%)	**	35/151 (18.8%)	80/49 (62.0%)	**	13/77 (14.4%)	102/123 (45.3%)	**
双葉町	40/104 (27.8%)	39/27 (59.1%)	**	33/87 (27.5%)	46/44 (51.1%)	**	20/65 (23.5%)	59/66 (47.2%)	**
大熊町	59/169 (25.9%)	19/35 (35.2%)		45/124 (26.6%)	33/80 (29.2%)		40/111 (26.5%)	38/93 (29.0%)	
富岡町	56/215 (20.7%)	23/44 (34.3%)	*	28/111 (20.1%)	15/148 (25.6%)		25/96 (20.7%)	54/163 (24.9%)	
4自治体全 体	203/655 (23.7%)	148/139 (51.6%)	**	141/473 (23.0%)	210/321 (39.5%)	**	98/349 (21.9%)	253/445 (36.2%)	**

<sup>a</sup> <sup>137</sup>Cs 検出者/<sup>137</sup>Cs 未検出者

<sup>b</sup> 括弧内の数値は<sup>137</sup>Cs 検出率

<sup>c</sup> \* *p*<0.05, \*\* *p*<0.01

## IV 考察

### 1. ヨウ素-131 以外の短半減期核種を含む甲状腺線量の評価

他の研究<sup>12, 13)</sup>でも言及されているように、福島原発直後に放射性プルームへのばく露を生じた場合には、<sup>131</sup>I 以外の短半減期核種である <sup>132</sup>Te/<sup>132</sup>I 及び <sup>133</sup>I 等の線量寄与についても考慮する必要がある。これらの核種の甲状腺等価（または吸収）線量への線量寄与は、仮に 3 月 12 日のみに摂取があったとすると、<sup>131</sup>I による線量の 40%程度になる。ただし、表 IV-1 に示すように、特に重要な <sup>132</sup>Te の線量係数は、その物理化学的性状によって大きく変化するため、この点を精査する必要がある。さらに、ヨウ素とテルルの原子炉から環境中への放出割合は、原子炉の破損状況によって変化することから、炉内インベントリから計算される核種放射能比（図III-2）を補正する必要がある。他方、<sup>131</sup>I 以外の短半減期核種を特に考慮する必要のある住民は、1 号炉建屋の水素爆発により生じた放射性プルームが移流した福島原発から北北西－北方向の数十 km 圏内の住民と予想される。次年度の研究では、福島原発近隣の複数の自治体に対して、先行研究と同様（Kim et al. 2021, 2022）に解析対象者毎に摂取日のトレンドを評価し、<sup>131</sup>I 以外の短半減期核種による線量寄与を評価する。

表IV-1 1 歳児の甲状腺等価線量係数（吸入摂取量 Bq 当たりの Sv）

物理化学性性状	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> I	<sup>133</sup> I	<sup>132</sup> Te
蒸気状	3.2E-06 (1.00)	3.3E-08 (0.01)	6.3E-07 (0.20)	7.8E-07 (0.24)
ヨウ化メチル	2.5E-06	3.8E-08	8.0E-07	
粒子状タイプ F	1.4E-06	1.6E-08	3.5E-07	2.9E-07 (0.09)
粒子状タイプ M	2.1E-07	1.6E-09	4.5E-08	5.3E-08 (0.02)

※括弧内の数値は相対値

### 2. 大気拡散シミュレーションによる吸入摂取量の精度及び不確かさ評価

大気拡散シミュレーションによる吸入摂取量の精度及び不確かさの検証方法としては、人の線量測定値（WBC や甲状腺の実測値）と比較することが最も確実である。先行研究で行った浪江町住民の線量推計では、他研究による線量推計との比較を試みたものの、個人の実測値との直接的な比較ではなかった。ただし、実測値からの線量推計においても、摂取シナリオの不確実性や測定誤差等による不確実性を内包することを考慮する必要がある。摂取シナリオの不確実性は、摂取から測定までの期間が長くなるほど大きくなる。その代表的な例としては、福島原発近隣住民に対して事故発生から半年以降に実施された WBC 測定があり、保守的に仮定した事故発生翌日（2011 年 3 月 12 日）での急性摂取シナリオは、放射性セシウムの吸入摂取量及び預託実効線量を著しく過大評価する結果となった。

今回、最新版の WSPEEDI-II による <sup>131</sup>I 大気中濃度マップを用いて計算した小児甲状腺被ばく線量スクリーニング検査被検者の甲状腺残留量は、従前の WSPEEDI-II による計算値と比較して、計測値に近い傾向となった。比較対象とする計測値は少ないが、次年度は以下の点を検証し、大

気拡散シミュレーションによる線量推計方法の精度・不確かさを評価してゆく。

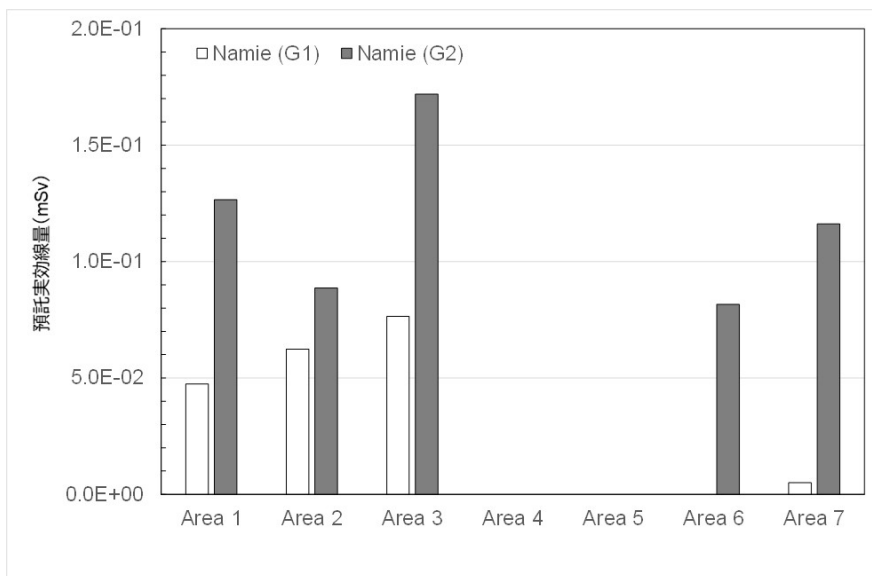
- ① 使用する WSPEEDI-II の計算格子点：解析対象者の居場所に最も近接した計算格子点だけでなく、隣接する計算格子点の値を加重平均して吸入摂取量を計算する。
- ② 移動中の居場所：移動元と移動先の等速直線移動だけでなく、移動中は移動元に居続ける場合の計算等を追加する。
- ③ 吸入摂取量の算出に及ぼす因子である、呼吸量の身体負荷に応じた変化、家屋や車両等の低減係数、ヨウ素の甲状腺アップテークの個人差等を考慮した不確かさ推定を行う。

### 3. WBC で実測された体内セシウム残留量の解釈

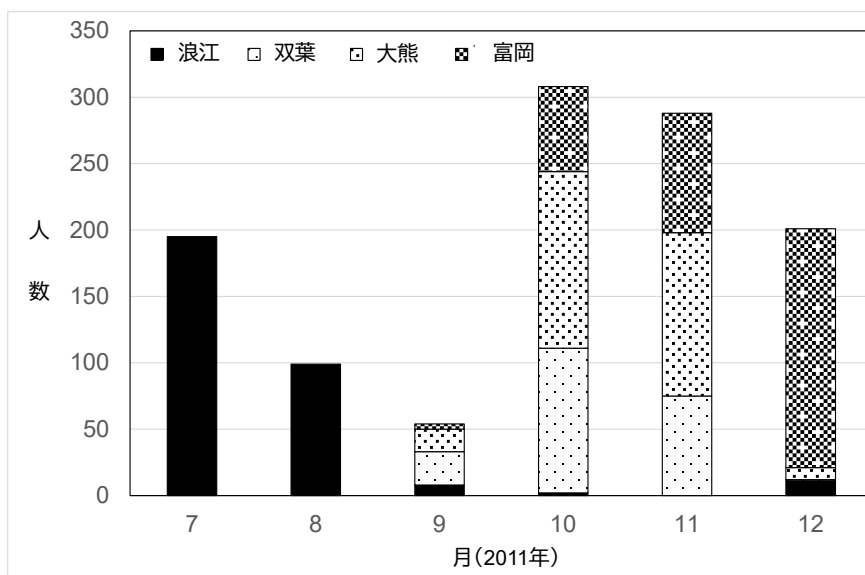
先行研究 (Igarashi et al. 2020) と同様な解析を、浪江町を含む福島原発近隣 4 自治体 (他に、双葉町、大熊町及び富岡町) に拡張し、解析対象者の 12 日の避難行動と WBC 測定値の関係性を調べた。その結果、同日の 15 時時点の居場所と福島原発間の距離で区分した 2 グループ、すなわち、境界距離より遠方に居たグループ (G1) と境界距離より近傍に居たグループ (G2) のそれぞれの <sup>137</sup>Cs 検出率は、福島原発から北に位置する浪江町と双葉町で有意差があり、南に位置する大熊町と富岡町では有意差は無かった。この結果は、浪江町の解析において、1 号機建屋の水素爆発による放射性プルームの関与が示唆されたことにも符合する。すなわち、同プルームは、12 日 15 時 36 分の爆発発生から同日夜半まで主に北西から北方向に移流している。

他方、浪江町に比べると、自治体では両グループの預託実効線量の差は小さく、また、浪江町と類似した避難経路を主に使ったとされる双葉町では、その G1 グループの預託実効線量が浪江町の G2 グループの預託実効線量の同等のレベルであった (図 III-4)。また、12 日のばく露量が少ないと考えられる G1 グループの福島県外避難者について、双葉町と大熊町の解析対象者の預託実効線量は、同自治体の G2 グループの預託実効線量よりも高く、矛盾を生じる結果となった (図 III-8)。

避難行動データの大半が 2011 年 3 月までしか有効でないために、3 月 16 日 0 時時点の居場所で分類したグループが、該当エリア (図 III-5) において受けた線量には必ずしもならないものの、浪江町の G1 グループのエリア間の預託実効線量の傾向は、3 月以降から測定までに経口摂取等による追加摂取が無いと仮定すると合理的に説明がつく結果であった (図 IV-1)。すなわち、福島原発事故により放出された放射性プルームの影響が小さい福島県会津地方 (エリア 6) や福島県外 (エリア 7) の G1 グループの預託実効線量は顕著に低く、福島県内の各地域 (エリア 1-3) は比較的高い。これに対し、浪江町以外の 3 自治体については、WBC 測定時期が 9 月以降であることから (図 IV-2)、同時期に報告された WBC 測定の偽計数による影響を受けた可能性が考えられる。解析した 4 自治体を含む避難地域住民については、2011 年 9 月 19 日からマイカーによる自宅への一時帰宅 (第 2 巡目) が始まり、自宅から持ち出しされる荷物も増えたことから、微量ながらも放射性核種が付着した着衣の搬出もあったものと思われる。浪江町については、一時帰宅 (第 2 巡目) の前に概ね WBC 測定が終了しているため、そうした影響が低かったとみられる。次年度は、この点と経口摂取による WBC 測定への影響についても解析を進め、初期摂取量の評価のための適切な補正方法を検討する。



図IV-1 浪江町解析対象者の各エリアの預託実効線量の90パーセンタイル値  
 ※15名以上のグループのみ表示



図IV-2 解析対象者のWBC測定時期



## V 結論

これまでの研究を基礎として、最新の大気拡散シミュレーション及び個人の避難行動データを活用した福島原発事故による近隣住民の初期内部被ばく線量の推計精度の向上を目的として、 $^{131}\text{I}$ 以外の短半減期核種による線量寄与、大気拡散シミュレーションによる吸入被ばく線量の精度検証、及び、WBC測定結果の解釈等の検討を進めた。浪江町住民に対する解析を行った先行研究において、3月12日に発生した1号機建屋の水素爆発による放射性プルームが、後のWBC測定結果に影響することを明らかにした。その他の近隣自治体についても同様な結果であったものの、浪江町住民と比較して放射性セシウムによる預託実効線量は高く、また、避難行動データから抽出した県外避難者について、12日の影響が小さいと推測される集団の方が、むしろ線量が高いといった矛盾する結果も得られた。今回解析を追加した双葉町、大熊町及び富岡町では、浪江町よりもWBC測定時期が遅く、2011年9月中旬以降から開始されており、同時期に始まったマイカーでの一時帰宅による影響について今後精査する必要がある。3月12日における放射性プルームによるばく露は、 $^{132}\text{Te}/^{132}\text{I}$ 及び $^{133}\text{I}$ による甲状腺線量を評価する上でも重要である。したがって、大気拡散シミュレーションによる $^{131}\text{I}$ の甲状腺線量推計の精度を検証しつつ、WBCで実測されたセシウム体内残留量について適切な補正を行い、初期摂取量の正確な評価を行うことが必要である。

## VI 次年度以降の計画

本研究は次年度も継続する予定である。研究計画に則り、各課題の解析・評価を進めてゆく。

### 課題1. ヨウ素-131以外の短半減期核種を含む甲状腺線量の評価

福島原発近隣の複数の自治体に対して、先行研究と同様（Kim et al. 2021, 2022）に解析対象者毎に摂取日のトレンドを評価し、 $^{131}\text{I}$ 以外の短半減期核種による線量寄与を評価する。

### 課題2. 大気拡散シミュレーションによる吸入摂取量の精度及び不確かさ評価

①使用する WSPEEDI-II の計算格子点（隣接する計算格子点の値を加重平均して吸入摂取量を計算）、②移動中の居場所（移動元に居続ける場合等を考慮）③吸入摂取量の算出に及ぼす因子（呼吸量の身体負荷に応じた変化、家屋や車両等の低減係数、ヨウ素の甲状腺アップテークの個人差等）について検証し、大気拡散シミュレーションによる線量推計方法の精度・不確かさを評価してゆく。

### 課題3. WBCで実測された体内セシウム残留量の解釈

経口摂取によるWBC測定への影響についても解析を進め、初期摂取量の評価のための適切な補正方法を検討する。

### 課題4. 打ち切り線量分布の再構成及び他研究との比較・検証

本研究に用いる人実測データは未検出が多く、中央値等が直接得られない、いわゆる打ち切り分布を呈するデータである。中央値は平均線量の推定に重要なパラメータであるため、QQプロットを用いたフィッティングやモンテカルロ法（マルコフ連鎖モンテカルロ等）を用いて推定する。検討した手法により、各自治体のWBC被検者の性別及び年齢群別の体内セシウム残留量等の中央値を算出する。

この研究に関する現在までの研究状況、業績

A. 論文：査読あり

- 1) Kim E, Kurihara O, Kunishima N, Momose T, Ishikawa T, Akashi M. Internal thyroid doses to Fukushima residents—estimation and issues remaining. *J Radiat Res* 2016; 57: i118–i126.
- 2) Kim E, Kurihara O, Tani K, Ohmachi Y, Fukutsu K, Sakai K, Akashi M. Intake ratio of  $^{131}\text{I}$  to  $^{137}\text{Cs}$  from thyroid and whole-body doses to Fukushima residents. *Radiat Prot Dosim* 2016; 168: 408–418.
- 3) Kim E, Kurihara O, Kunishima N, Nakano T, Tani K, Hachiya M, Momomse T, Ishikawa T, Tokonami S, Hosoda M, Akashi M. 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 Phys* 2016; 111: 451–464.
- 4) Kunishima N, Kurihara O, Kim E, Ishikawa T, Nakano T, Fukutsu K, Tani K, Furuyama K, Hashimoto S, Hachiya M, Naoi Y, Akashi M. Early intake of radiocesium by residents living near the TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant after the accident. Part 2: relationship between internal dose and evacuation behavior in individuals. *Health Phys* 2017; 112: 512–525.
- 5) Kim E, Yajima K, Hashimoto S, Tani K, Igarashi Y, Iimoto T, Ishigure N, Tatsuzaki H, Akashi M, Kurihara O. Reassessment of internal thyroid doses to 1,080 children examined in a screening survey after the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys* 2020; 118: 36–52
- 6) Igarashi Y, Kim E, Hashimoto S, Tani K, Yajima K, Iimoto T, Ishikawa T, Akashi M, Kurihara O. Difference in the cesium body contents of affected area residents depending on the evacuation timepoint following the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys* 2020; 119: 733–745.
- 7) Kim E, Yajima K, Igarashi Y, Tani K, Hashimoto S, Nakano T, Akashi M, Kurihara O. Intake ratio of  $^{131}\text{I}$  to  $^{137}\text{Cs}$  derived from thyroid and whole-body doses to residents of Iwaki City in Japan’s Fukushima Prefecture. *Health Phys* 2020; 120: 387–399.
- 8) Kim E, Kurihara O. Thyroid doses in children from radioiodine following the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *J Radiat Prot Res* 2020; 45: 2–10.
- 9) Kim E, Igarashi Y, Hashimoto S, Tani K, Ishikawa T, Kowatari M, Kurihara O. Estimation of the early  $^{137}\text{Cs}$  intake of evacuees from areas affected by the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident using their personal behavioral data and the latest atmospheric transport and dispersion model simulation. *Health Phys* 2021; 121: 133–149.
- 10) Kim E, Igarashi Y, Hashimoto S, Tani K, Kowatari M, Ishikawa T, Kurihara O. Estimation of the thyroid equivalent doses to residents in areas affected by the 2011 Fukushima nuclear disaster due to inhalation of  $^{131}\text{I}$  based on their behavioral data and the latest atmospheric transport and dispersion model simulations. *Health Phys* 2022; 122: 313–325.

B. 講演

Kim E and Kurihara O. Individual Monitoring in Fukushima–Emergency Phase. The 5th QST International Symposium on Radiation Emergency Monitoring and Medicine in Nuclear Disaster–Current Status of Each Country and Future Prospects–. 21 September 2021. Makuhari Messe, Chiba, Japan (on line)

## 引用文献

- 1) Ishikawa T. Radiation doses and associated risk from the Fukushima nuclear accident: a review of recent publications. *Asia Pac J Public Health* 2017; 29 (Suppl 2): S18–S28.
- 2) Kurihara O. Review: external and internal dose assessments of Fukushima residents after the 2011 nuclear disaster. *J Natl Inst Public Health* 2018; 67: 11–20.
- 3) Kim E, Kurihara O, Kunishima N, Momose T, Ishikawa T, Akashi M. Internal thyroid doses to Fukushima residents—estimation and issues remaining. *J Radiat Res* 2016; 57: i118–i126.
- 4) Igarashi Y, Kim E, Hashimoto S, Tani K, Yajima K, Iimoto T, Ishikawa T, Akashi M, Kurihara O. Difference in the cesium body contents of affected area residents depending on the evacuation timepoint following the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys* 2020; 119: 733–745.
- 5) Kim E, Igarashi Y, Hashimoto S, Tani K, Ishikawa T, Kowatari M, Kurihara O. Estimation of the early <sup>137</sup>Cs intake of evacuees from areas affected by the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident using their personal behavioral data and the latest atmospheric transport and dispersion model simulation. *Health Phys* 2021; 121: 133–149.
- 6) Kim E, Igarashi Y, Hashimoto S, Tani K, Kowatari M, Ishikawa T, Kurihara O. Estimation of the thyroid equivalent doses to residents in areas affected by the 2011 Fukushima nuclear disaster due to inhalation of <sup>131</sup>I based on their behavioral data and the latest atmospheric transport and dispersion model simulations. *Health Phys* 2022; 122: 313–325.
- 7) 栗原治. 避難行動データの多角的解析に基づく福島原発事故初期の内部被ばく線量推計. 環境省. 令和 2 年度 放射線健康管理・健康不安対策事業（放射線の健康影響に係る研究調査事業）報告書等.
- 8) Terada H, Nagai N, Tsuduki K, Furuno A, Kadowaki M, Kakefuda T. Refinement of source term and atmospheric dispersion simulations of radionuclides during the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *J Environ Radioact* 2020; 213: 106104.
- 9) 西原 健司, 岩本 大樹, 須山 賢也. 福島第一原子力発電所の燃料組成評価. JAEA-Data/Code 2012-018. 2012.
- 10) Terada H, Nagai N, Tsuduki K, Furuno A, Kadowaki M, Kakefuda T. Refinement of source term and atmospheric dispersion simulations of radionuclides during the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *J Environ Radioact* 2020; 213: 106104.
- 11) Kurihara O, Kim E, Kunishima N, Tani K, Ishikawa T, Furuyama K, Hashimoto S, Akashi M. Development of a tool for calculating early internal doses in the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident based on atmospheric dispersion simulation. *EPJ Web of Conferences* 2017; 153, 08007.
- 12) Shinkarev SM, Kotenko KV, Granovskaya EO, Yatsenko VN, Imanaka T, Hoshi M. Estimation of the contribution of shortlived radioiodines to the thyroid dose for the public in case of inhalation intake following the Fukushima accident. *Radiat Protect Dosim* 2015; 164:51–56.
- 13) Ohba T, Hasegawa A, Suzuki G. Estimated thyroid inhalation doses based on body surface contamination levels of evacuees after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Health Phys* 2019; 117, 1–12.

# Improvement on the early internal dose estimation for residents based on personal evacuation behaviors and atmospheric transport and dispersion model simulations in the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident

Dr. Osamu Kurihara

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

*Keywords:* Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, dose estimation, early internal dose, iodine, evacuation behavior, atmospheric transport and dispersion model simulation

## Abstract

It is of great importance to obtain reliable dose estimations for residents involved in the Fukushima Daiichi nuclear power plant (FDNPP) accident in 2011. The present study attempted to improve the estimation of the early internal dose, in particular the thyroid dose due to intake of radioiodine based on our previous studies. In this year (2021), we considered remaining issues in the dose estimation, namely, (1) dose contribution of short-lived radionuclides other than  $^{131}\text{I}$ , (2) the accuracy of the dose estimation method using atmospheric transport and dispersion model (ATDM) simulations, and (3) the interpretation of results from late whole-body counter (WBC) measurements.

Regarding the first issue, the dose contribution of the short-lived radionuclides was estimated using the daily inhalation intake of study subjects and a relative radioactivity ratio of these radionuclides calculated from the core inventory. As a result, the dose contribution was estimated to be about 40% of the thyroid dose from  $^{131}\text{I}$  assuming the intake on 12 March with a vapor form of iodine and an aerosol form of tellurium.

Regarding the second issue, the intake and the residual thyroid content were calculated based on time-series  $^{131}\text{I}$  ground-level air concentration maps from ATDM simulations (WSPEEDI-II) for subjects out of those who underwent screening campaigns for thyroidal exposure following the FDNPP accident and whose personal behavioral data were available. As a result, the calculated  $^{131}\text{I}$  thyroid contents were generally consistent as an order with those measured and were improved compared to those calculated using previous WSPEEDI-II simulations.

Regarding the third issue, we investigated the relation between personal behaviors and the Cs body contents for study subjects from Namie-town, Futaba-town, Okuma-town and Tomioka-town near the FDNPP. As a result, for subjects of Namie town and Futaba town, a significant difference was found in the  $^{137}\text{Cs}$  detection rate between two groups divided depending on the distance of the whereabouts of each subject to the FDNPP accident at 15:00 on 12 March. This would suggest the influence of radioactive plumes released following hydrogen explosion at the Unit 1 building on the same day and would support our previous studies. On the other hand, the committed effective doses of Futaba town, Okuma town and Tomioka town where WBC measurements were delayed, tended to be higher than those of Namie town, indicating the possibility of false-positive in the measurements.