テーマ (4)

事故初期の内部被ばく線量評価の精緻化に関する包括的研究

4-1 事故初期の住民内部被ばく線量評価の精緻化に関する包括研究

鈴木 元(国際医療福祉大学クリニック 院長)

4-1 事故初期の住民内部被ばく線量評価の精緻化に関する包括研究

住民内部被ばく線量の統合的解析とその不確実性評価

主任研究者:鈴木 元(国際医療福祉大学クリニック クリニック院長、教授)

分担研究者:栗原 治(量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所 部長)

分担研究者:楠原 洋之(東京大学大学院薬学系研究科 教授)

分担研究者:永井 晴康(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力基礎 工学研究センター ディビジョン長)

研究要旨

「原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR) 2013 年報告書」は、実測値が 乏しい事故初期の内部被ばく線量評価を、原発からの時間当たりの放射性核種放出情報 (ソースターム)と気象情報を組み合わせ、放射性核種の大気運搬・拡散・沈着モデル(ATDM) により評価した。そして、避難住民に関しては、典型的 18 避難シナリオを採用してきた。 しかし、UNSCEAR 2013 年報告書でも述べられているように、ATDM による内部被ばく線量の 推計は、大きな不確かさを持っており、数は少ないが実測値から得られた小児甲状腺線量 評価値と比べると、数倍過大評価になっていた。私たちは、先行した「包括研究」に加え、 平成 29 年度と平成 30 年度の 2 年間精緻化研究を実施し、より現実的な線量評価をするた めの研究を行っている。

平成 29 年度は、ATDM の一種である WSPEEDI の精緻化研究が最終段階を迎え、ソースター ムの修正を終え、平成 30 年度の第一四半期に公開予定の浮遊状粒子状物質(SPM)中の¹²⁹I 連続測定データを使って最後の微調整を行い、夏までに放射能の時間空間密度データベー スを更新し、それを用いた線量評価を行う準備を整えつつある。19 歳以下の避難住民の行 動調査票をランダムサンプリングし、避難行動パターンの12 時間ステップでの解析が可能 となったため、上記時間空間放射能密度データベースと組み合わせた解析が可能となった。 水道水からの内部被ばく線量評価の方法論が論文化され、アンケート調査結果に基づき、 最終年度には子供の水道水の消費量を精緻化する準備も整った。体表面汚染データから甲 状腺線量を推計する方法論に関しても、論文化が進んでいる。このように、少数の集団の 実測値、¹³⁴Cs ホールボディカウンター測定値から¹³¹I/¹³⁴Cs 比を仮定した内部被ばく線量評 価、ATDM ベースの吸入被曝、実測値と ATDM ベースの推計を組み合わせた飲水からの線量 体表面汚染からの吸入線量評価など、複数の方法で線量評価できる段階となった。私たち は、個々の方法論の不確実性を評価して、これらの線量を統合して最終的に甲状腺線量を 評価する。 キーワード1:ATDM、キーワード2: 粒子状浮遊物質、 キーワード3:甲状腺 等価線量, キーワード4:行動調査票、キーワード5:甲状腺体積

研究協力者

研究協力者1(所属 役職)中村尚司 (東北大学 名誉教授)
研究協力者 2(所属 役職)堤 知昭 (国立医薬品食品衛生研究所 室長)
研究協力者 3(所属 役職)茅野政道 (日本原子力研究開発機構 部門長)
研究協力者 4(所属 役職)山澤弘実 (名古屋大学 教授)
研究協力者 5(所属 役職)高橋知之 (京都大学 准教授)
研究協力者 6(所属 役職)浅見真理 (国立保健医療科学院 定石主任研究官)
研究協力者 7(所属 役職)長谷川有史 (福島県立医大 教授)
研究協力者 8(所属 役職)大葉 隆 (福島県立医大 助教)
研究協力者 9(所属 役職)石川徹夫 (福島県立医大 教授)
研究協力者 10(所属 役職)大津留 晶 (福島県立医大 教授)
研究協力者 11(所属 役職)安村誠司 (福島県立医大 教授)
研究協力者 12(所属 役職)緑川早苗 (福島県立医大 准教授)
研究協力者 13(所属 役職)稲野彰洋 (福島県立医大 准教授)
研究協力者 14 (所属 役職) Matthew Hort (UK Met Office Professor 相当)

I. 研究目的

【研究目的】 福島第一原子力発電所事故により放出された短半減期核種による住民 の内部被ばく線量、とりわけ甲状腺等価線量評価を精緻化する

【背景】私たちは、平成26年度より「東京電力福島第一原子力発電事故における住民の線量評価に関する包括研究」を3年間実施し、福島第一原子力発電所事故による住民の 被ばく線量評価、とりわけ短半減期核種による内部被ばく線量評価手法を開発、深化させ てきた。実測値の少ない短半減期核種による内部被ばく評価においては、ソースタームと 大気運搬・拡散・沈着モデル(ATDM)シミュレーションによる線量評価に依存する部分 が大きい。ATDMに基づく線量評価の不確かさは、①ソースタームとATDMと気象場のパ ラメータに関する不確かさ、②UNSCEAR 2013年報告書で採用されていた避難シナリオ の不確かさ、③食品・水からの内部被ばく評価の不確かさ、④日本人の放射性ヨウ素の甲 状腺取り込み率や甲状腺体積に関する不確かさなどがある。先行調査では、ATDMの一つ である世界版緊急時環境線量情報予測システム(WSPEEDI)の改良を行い、WRF同化手 法を導入して気象場再現性を向上させ、一部ソースタームの修正を行って¹³¹Iおよび¹³⁷Cs の土壌沈着マップとの整合性、モニタリングポストの連続的空間線量率との整合性を向上 させた。そして、平成28年度に暫定版の放射能濃度の時間空間データベースを完成させ、 他の班員がそのデータベースを使って線量評価を実施する体制を整えた。データベースは、 水道水からの内部被ばく線量評価に利用された。一方、ATDM シミュレーションによる大 気中核種濃度を使った内部被ばく線量評価は、大きな不確かさを伴うため、実測値ベース の線量評価法の開発も行ってきた。具体的には、事故後半年以内に実施された住民のホー ルボディカウンター(WBC)による放射性セシウムの実測値を利用し、131I/134Cs比を仮定 して甲状腺等価線量を推計する手法の開発、避難住民の体表面汚染レベルから¹³¹Iおよび その他の短半減期核種(¹³³I.¹³²I.¹³²Te)による甲状腺等価線量を評価する手法の開発、甲状 腺の ¹³¹I 実測値ベースの線量評価とモデルシミュレーションによる線量評価の系統誤差の 原因となる日本人と ICRP モデルのヨウ素代謝の違い、および甲状腺体積の違いに関して 調査を行ってきた。他方、先行研究では、大気中浮遊粒子状物質中(SPM)の放射性セシ ウムや ¹²⁹I の連続測定データの入手が途中段階であったこと、また避難行動のシナリオの 不確実性もある事より、WSPEEDI の大気中放射能濃度時間空間データベースを使った吸 入被ばく線量評価は実施しなかった。平成 28 年度に先行調査の評価として、WBC からの 内部被ばく線量評価、体表面汚染データからの内部被ばく線量評価、水道水からの内部被 ばく線量評価を試行的に行い、中間評価値として発表してきた。平成29年度、平成30年 度の2年間で、SPM データを取り込んでさらに WSPEEDI を精緻化させる。平行して、小 児の飲水量のアンケート調査、市町村別に行動調査票をランダムサンプリングし、避難シ ナリオの再評価を進め、WSPEEDI ベースの内部被ばく線量評価値と実測値ベースの内部 被ばく線量評価値との整合性検討を行い、最終的な自治体別の内部被ばく線量評価を行う。

【環境行政課題との関係】 本研究は、福島第一原発事故後の住民の放射能健康不安 に答えるため、現実的な内部被ばく線量の分布を明らかにするものである。また、本研究 は、将来の甲状腺がんの疫学研究や国際機関による線量評価に寄与するデータとなる事が 期待される。

II. 研究方法

II-1. WSPEEDI の精緻化

①SPM データ利用: モニタリングポストの連続的な空間線量率データに加えて、浮遊粒 子状物質(SPM)の連続測定データが使えるようになった。平成 29 年度は、SPM フィル ター上の放射性セシウムのデータを使って WSPEEDI のパラメータを精緻化する研究を 行った。平成 30 年度には、SPM フィルター上の¹²⁹Iの連続データも使えるようになる見 込みで、さらに精緻化研究を継続する。

②ソースタームの微修正: 先行研究では、実測値と齟齬が大きい WSPEEDI の評価値が でてしまう場所と日時に関して、手作業でソースタームの放出量を調整したが、より客観 的に調整するためにベイズ統計手法を用いソースタームの微調整(インバース・モデリング) を行う研究を開始した。 ③気象場の再現性向上: ソースタームの微調整を行っても、現在採用している気象場データでは再現性が悪い地域が出てくる問題点を、再現性の悪い日時に限り気象場の条件をアンサンブル計算手法を導入して微修正し、再現性の高い気象場データベースを得る研究を開始した。平成29年度に引き続き、平成30年度前半に気象場の修正を実現する。
 ④平成30年夏を目標に、精緻化された放射能濃度の時間空間データベースを完成させ、他の班員に提供する。

II-2. 行動調査票の解析: 避難シナリオの不確かさの評価

UNSCEAR 2013 年報告書で利用された避難シナリオは、放医研の赤羽等が報告した 18 パターンであった(参考文献 1)。しかし、複数のプルームに曝露した避難住民の割合など が明確でなく、線量評価の上で不確かさの一因となっていた。そこで、避難地域 7 市町村 の 19 歳以下の行動調査票を 6 町村各 100 名、1 市 300 名、合計 900 名分をランダムサンプ リングし、避難シナリオの妥当性を検討する。これと平行して、小児甲状腺簡易測定を実 施した小児集団、事故後半年以内にホールボディカウンター検査を受けた住民、3 月 17 日 までに体表面汚染検査を受けた避難住民に関しても行動調査票を入手し、行動調査票と WSPEEDI データとの組み合わせから内部被ばく線量を推計する手法と体表面汚染や WBC 等の実測値をベースに内部被ばく線量を評価する手法の相互比較解析を実施する。

II-3. ホールボディカウンター(WBC)による放射性セシウム実測値から甲状腺等価線 量を推計する手法開発

¹³¹I 甲状腺直接測定値のある町村住民の甲状腺 ¹³¹I 線量分布と、集団は違うが同じ町村 住民の WBC による ¹³⁴Cs 実測値の分布を比較して、¹³¹I と ¹³⁴Cs を同時に摂取したと仮定 した場合の ¹³¹I 摂取量(吸入量)を ¹³⁴Cs 実測値から推定する。避難住民の一時期宅が解除 される前の事故後概ね半年以内に実施された成人の WBC¹³⁴Cs の測定値を用いる。年齢別 の評価は、ICRP の呼吸モデルに従い年齢別一日換気量、年齢別甲状腺等価線量換算係数に より求める。

II-4. 飲食による内部被ばく推計

食品・水からの内部被ばくは、非避難住民にとって大きな曝露源となっている。 UNSCEAR 2013年報告書では、食品・水から受けた福島県の非避難地域の一歳児の甲状 腺線量は、一律 32.79mGy と評価されているが、報告書でも述べられているように仮に地 元産の野菜の流通市場占有率が 25%であれば、その線量は約 1/3 になるとされていた。先 行研究の中で、私たちは福島産野菜の卸売り市場占有率が 2011年3月の実績で福島市市場 といわき市市場で 13%しかなく、郡山市市場でも 17%と 25%よりさらに低い事を報告した (参考文献 2)。また、マーケットバスケット法や陰膳法での評価も UNSCEAR 報告書より 低い経口被ばく線量である事をレビューしてきた (参考文献 3)。一方、水道水に関しては、 代替の水が供給されるまで汚染があっても利用され続けたため、主要な内部被ばく源に なったと思われる。そこで、平成28年度版のWSPEEDIの時間空間放射能データベース を使って水源への¹³¹I沈着量を推計し、実測値のある水道水の¹³¹I濃度を参照しながら水 源汚染濃度から水道水汚染濃度を推計するワン・コンパートメント・モデルを構築し、水 道水からの内部被ばく線量を評価した。評価に当たり、非避難住民の飲水量を1歳児は1L/ 日、10歳児・成人は1.8L/日とし、避難住民はペットボトルの供給があった点を踏まえ、1 歳児は1L/日、10歳児・成人は1.2L/日と仮定し、ICRP71の年齢別線量換算係数を用いて 線量を推計した。避難住民に関しては、典型的な12避難パターンに基づいて¹³¹Iに汚染さ れた水道水からの甲状腺線量を推計した。本年度は、飲水量のデータを精緻化するため、 厚労省松井佳彦班研究の結果及び本年度に実施するアンケート調査結果をふまえ、1歳児、 5歳児、10歳児、15歳児、成人の飲水量の平均と分布を使って評価し直す。

1-1 II. 図 1 水道水の放射能濃度推計(1-コンパートメントモデル)



II-5. 外部被ばく線量評価

福島県内の避難住民、非避難住民の線量評価は、福島県民健康調査の行動調査票をベースとした評価値が公表されており(参考文献 8,9)、本研究班では行わない。その代わり福島周辺県の住民が受ける外部被ばく線量を評価する。岩手県、宮城県、栃木県、群馬県、茨城県、千葉県において JAEA が繰り返している走行サーベイのデータを用いて、放射性核種の物理的半減期およびウェザリング効果(雨風による平面的は移動、土壌への浸透)

をモデル化し、実測値のない事故初期から、10年後までの将来の線量を評価する。走行サー ベイ・データから事故前のバックグラウンドの空間線量率を引き、ウェザリング効果の出 やすい道路上の走行サーベイによる線量率を、ウェザリング効果が低い居住地区の線量に 換算するため同じ地域・時期の歩行サーベイとの比 1.2を掛け算して利用した。

II-6. 体表面汚染データからの線量評価

避難のタイミングおよび避難経路により、一部の自治体の住民は3月12日のプルームに比較的近距離で曝露されたと思われる。3月12日のプルーム曝露は、¹³¹I以外の短 半減期核種による内部被ばくが大きいと推測される。3月12日の20km 圏でのダストの 核種分析結果等と、12日に避難してきた住民の衣服をホールボディカウンターで核種分 析した結果をベースに、体表面の沈着した主要な核種(¹³¹I,¹³²I,¹³⁵I,¹³⁵I,¹³²Te,^{131m}Te,¹³⁴Cs, ¹³⁷Csなど)の核種汚染密度(Bq/cm²)比を求めた。そして、その比から内部被ばくに寄与 率が大きい¹³¹I:¹³²I:¹³³I:¹³²Te 核種毎のベータ線割合を計算し、GM サーベイメータによ る体表面汚染検査データ(cpm 単位)を体表面の主要核種の汚染密度に変換し、地域毎の 体表面汚染分布を求めた。避難途上に大気中から体表面への核種の沈着速度を仮定する と、避難途上に吸入していた大気中の核汚染濃度は、体表面汚染密度と沈着速度から推 計することができる。そこで、2次元モンテカルロシミュレーション法により、避難住 民の吸入被ばく線量を評価する手法を開発した。

図 2 体表面汚染密度分布から吸入被ばく線量を評価する

避難途中の大気中放射性核 種濃度 核種の沈着速度 K (cm/s) が一定なら, 体表面に沈着する核種の汚染密度 S(t) は



¹³¹ を例にとると、時間"0"から"T"までの1歳児の累積甲状腺線量 ED_{thy}(T)は、 体表面汚染密度S₁(T)と沈着速度vの関数として表され、時間による大気中放射性核種濃度の変動を知らなくとも、推計できる B:年齢別呼吸率、f_i:核種iの年齢別甲状腺等価線量換算係数、A₁(t):核種iの時間tにおける大気中濃度、



$$=\frac{B \cdot f_i \cdot S_i(T)}{3.6 \times 10^{-3} V_i}$$

ー方、 $S_i(t)$ は GMサーベイメータの測定値、衣服の核種分析 結果、核種毎のベータ線 線源効率、機器効率、核種のベー $S_i(T) = \frac{(N - N_b)}{\epsilon_{e,i} \cdot W \cdot \epsilon_{s,i} \cdot ER_i}$ タ線放出率などのパラメータを使い計算可能 II-6. ヨウ素代謝・甲状腺体積の日本人の特性: 日本人は日常的なヨウ素摂取量が高いた め、放射性ヨウ素の甲状腺取り込み率は ICRP の甲状腺モデルに比べると低いことが知ら れていた。一方、福島県民健康調査の超音波検査の結果から、甲状腺体積もまた ICRP モ デルより小さいと報告された。甲状腺取り込み率の低さは、シミュレーションベースの甲 状腺被ばく線量評価値と実測値ベースの評価値を比較する場合に、系統的誤差の原因とな る。一方、実際に受ける甲状腺線量という観点からは、甲状腺取り込み率が半減していた としても甲状腺体積も半減している場合は、ICRP モデルでの評価が実際に合っており、甲 状腺体積を ICRP モデルのまま、甲状腺取り込み率を半減させて評価すると、線量は 1/2 に過小評価してしまう。先行調査で成人男性の甲状腺取り込み率は 15~20%と ICRP モデル の 30%より低いことを確認してきた。平成 29 年度の調査で、東京監察院の検死結果を入手 し、日本人の甲状腺重量を調べる。また、52 名のボランティアを募り、福島県民健康調査 で実施したと同じ手法で超音波による甲状腺体積計測と MRI による甲状腺体積の計測を実 施する。

II-7. 包括的な甲状腺線量評価

避難住民:典型的避難パターン、および、19歳以下の行動調査票に基づく線量評価を WSPEEDI ベースで吸入被ばく線量、水からの線量評価を実施する。吸入被ばくでは、屋 内退避の防護係数を入れた評価をおこなう。

WSPEEDI ベースの線量評価は、実測値のない地域や時間帯の評価に大きな不確かさを 伴うため、WBC や体表面汚染からの線量評価、小児甲状腺実測値からの線量評価と相互検 証する。日本人のヨウ素甲状腺取り込み率と ICRP 甲状腺モデルの違いが、系統誤差の原 因となるので、その点も踏まえて相互比較する。

非避難住民:WSPEEDI ベースで吸入被ばく線量、水からの線量評価を実施する。吸入 被ばくでは、屋内退避の防護係数を入れた評価をおこなう。

(倫理面への配慮)

本研究で福島県民健康調査行動調査票との突合を図るための研究計画書の追加記載修正 を行い、国際医療福祉大学、および福島県立医大の倫理委員会で審査を実施してもらった。 国際医療福祉大学倫理委員会からは、平成 28 年 8 月 19 日付けで承認された(承認番号 13·B·185)。また、福島県立医大に提出した研究計画書を「これらの状況から福島県から福島 医大への委託業務として、「包括研究」でデータベース化した体表面汚染データと、県民健康調 査・基本調査で得られた個人の行動記録とを個人ごとに突合する。」と変更し、変更申請は福島県 立医大倫理委員会からは、平成 30 年 3 月 30 日付けで承認された(承認番号:一般 29100)。 実際のデータ突合は、福島県からの委託を受けたあと、データベース管理を委託されてい る福島県立医大の放射線医学県民健康管理センターが実施する。体表面汚染データと行動 調査票は、氏名、性、年齢、住所などの個人情報を鍵としてデータベース上で突合するが、 突合された後に放射線医学県民健康管理センターが個人情報を削除したデータセットとし て研究者側に手渡される。このような手続きで突合がされ情報が調査に使われる旨の開示 が医大ホームページでなされ、住民からのオプトアウトの権利に配慮している。飲水量の アンケート調査に関しては、包括研究の関連研究として研究計画書「小児の水摂取量のア ンケート調査」(「事故初期の住民内部被ばく線量評価の精緻化に関する包括研究」の三菱 総研委託部分の調査研究)を作成し、国際医療福祉大学倫理委員会の審査を受け、平成 30 年1月 25 日付けで承認された(承認番号:13-13-277)。アンケート調査は、調査会社のモ ニターを通じて行うので、本研究で個人情報取得は行わない。 III. 研究結果

III-1. WSPEEDIの精緻化 (詳細は、分担研究者 永井晴康の報告を参照のこと)

平成 29 年度は、SPM データの内、公開された放射性セシウムの連続測定データを取 り込み、パラメータの精緻化をおこなった。ベイズ統計手法(Synthesis Inversion 法)を WSPEEDI に導入し、実測値と WSPEEDI の計算結果の整合性を高めるため、放出源情報 (ソースターム)の調整を行った。この結果、図3に示すように平成28年度に手作業で行っ た修正の妥当性を検証できた。

また、平成29年度後半からアンサンブル計算手法を用いた気象場の再現性向上に向けた 試行実験を開始した。





III-2. 行動調査票の解析: 避難シナリオの不確かさの評価

甲状腺簡易測定を実施した小児の行動調査票や WBC 測定を実施した成人集団の行動調 査票と WSPEEDI の時間空間放射能濃度データベースとの照合による線量評価のための要 素検討を行った。3月12日のプルーム曝露が内部被ばく線量に重要であることが示唆され た。一方、単純に24時間屋外でプルームにさらされていたと仮定し屋内退避によるプルー ム防護効果を入れない、あるいは活動状況(睡眠)に伴う換気量の調整などを行わない場 合、WSPEEDI ベースの甲状腺等価線量評価は実測値ベースの評価値より過大になる事が わかった。放射性ヨウ素の甲状腺取り込み率とともに、実測ベースの甲状腺等価線量と比 較する際に系統的誤差の原因となるため、適切な調整が必要である。 平成 29 年度の第4四半期になり、大熊、富岡、楢葉、双葉、浪江、飯舘の19 歳以下の 行動調査票を各100名分ランダムサンプリングし、南相馬からは同様に300名ランダムサ ンプリングしたデータを入手し、解析を開始した。この解析により、避難住民の何パーセ ントが3月12日午後のプルーム曝露、15日の午後のプルーム曝露、16日午前のプルーム 曝露、18日のプルーム曝露に曝露されたか、そのうち複数回プルームに曝露された割合は どの程度かを明らかにできるようになった。放医研が作成し、UNSCEAR 2013年報告書に 採用されていた18避難シナリオから外れる避難住民が多いことが行動調査票の予備的解析 で判明してきており、ランダムサンプリングされた行動調査票を下に小児・青年の線量を 評価する重要性が判ってきた。

平成30年度は、行動調査票の解析結果を論文に纏めると共に、行動調査票とWSPEEDI を組み合わせた市町村毎の内部被ばく線量の分布を推計する。

III-3. ホールボディカウンター(WBC)による放射性セシウム実測値から甲状腺等価線量 を推計する手法開発

WBC の 134 Cs 測定値から 131 I の吸入被ばく量を推計する手法に関しては、栗原等のグルー プにより既に論文として発表されている(参考文献 4~6)。平成 29 年度には、報告されて いるデータのほか未発表データもふくめて 131 I/ 134 Cs 比の分布を検討した。そして、内部被 ばく測定に基づく 131 I/ 134 Cs 比は、東海村で連続測定された環境中の比 8 より小さい事を確 認した。Kim らの論文で提案されている 131 I/ 134 Cs 比=3.8 は、同一人での測定ではないの で不確実性がある。しかし、長崎大のグループが福島からの避難者や一時滞在者を WBC で 測定した集団の 131 I/ 134 Cs 比の幾何平均値 6.1 (参考文献 7)を Kim らの元素ヨウ素と type F セシウム粒子の吸入として計算し直すと 131 I/ 134 Cs 比=2.3 となる。Kim らの評価値は決し て過小評価にはなっていない。また、実際は経口摂取を含んだ慢性摂取シナリオの方が現 実的であるが、3月15日の急性摂取として評価する事より、 131 I/ 134 Cs 比=3.8 を使った 131 I 摂取量の評価は安全側の評価になっていることが判った。

行動調査票とWBC測定データの突合研究を行い、内部被ばく線量の高い要因分析を開始 している。避難開始時期や避難ルートなどが要因として抽出されつつあるが、未だ明確な 結論は得られていない。

III-4. 飲食による内部被ばく推計

飲食実態調査の報告を英文論文として発表(文献 3)し、WSPEEDIの時間空間放射能デー タベースを用いた 1-コンパートメントモデルによる水道水からの甲状腺線量評価を報告し た(文献 2)。表1および表2はそれぞれ避難住民および非避難住民の甲状腺等価線量の評 価値である。避難パターンは、文献 3 で報告した避難パターンに準拠しているが、飯舘村 に関してはWBC 実施者の行動調査票を反映した段階的避難シナリオにより評価している。

UNSCEAR2013 年報告書の経口摂取による福島県民非避難地域の甲状腺吸収線量評価

値が地域にかかわらず一律1歳児で32.79 mGy であったが、我々の評価値は非避難地域で 0~9mSv と地域により違いが有るだけで無く、レベルも低かった。避難地域に滞在し続け た場合、浜通りで0.3~34mSv、避難住民に関しては、2.1~22mSv と評価された。震災直 後の市場閉鎖や小売店の閉鎖、冬場で地元産の生鮮野菜のシェアが13~17%と低かったこ と、3月17日から出荷自粛、引き続き出荷制限がかかったため暫定規制レベル未満の野菜 しか流通しなかった事などより、野菜からの内部被ばくは小さかったと考えられる。 表1避難住民の水道水からの甲状腺等価線量(mSv)1

No.	 Municipality Thyroid equivalent dose (m 								
		Adult	10 Years old	1 Year old					
1	Tamura city	0.8	1.9	5.6					
2	Minamisouma city 1	0.3	0.7	2.1					
2'	Minamisouma city 2	1.3	3.1	6.1					
3	Kawamata town	0.7	1.6	4.9					
4	Hirono town	0.3	0.7	2.0					
5	Naraha town	0.6	1.4	4.3					
6	Tomioka town	1.5	3.4	10.2					
7	Okuma town	0.8	1.9	5.6					
8	Futaba town	0.5	1.2	3.5					
9	Namie town	0.9	2.1	6.3					
10	Katsurao village	0.0	0.1	0.3					
11	litate village	4.7	11	22					
12	Kawauchi village	1.5	3.4	10.2					

表 2 非避難住民の水道水からの甲状腺等価線量(mSv)

Region	Thyroid equivalent dose (mSv)						
	Adult	10 Years old	1 Year old				
Hamadori							
Iwaki city	0.9	2.0	4.0				
Shinchi town	0.8	1.8	3.6				
Souma city	0.6	1.4	2.8				
(Evacuation areas in	(0.0 - 7.2)	(0.1 - 17)	(0.3 - 34)				
Hamadori)							
Nakadori							
Kenpoku	0.1-0.3	0.2-0.6	0.4-1.2				
Kenchu	0.0-2.0	0.0-4.7	0.0-9.4				
Kennan	0.1-2.0	0.3-4.7	0.7-9.5				
Aizu	0.0-0.2	0.0-0.5	0.0-0.9				

III-5. 外部被ばく線量評価

JAEA の走行サーベイをベースにモデルを作成し、論文報告した(文献 4)。外部被ばく 線量に寄与する核種は、図 4 に示すように経過時間により変わる。事故御 1 年目の外部被 ばく線量は,最も低い群馬で 0.17mSv、最も高い栃木でも 0.64mSv と評価された。

図 4. 事故後の外部被ばく線量に寄与する核種



III-6. 体表面汚染データからの線量評価

約2000名の避難住民・地域住民の体表面汚染データの分布および核種組成に関する論文 を発表した(文献1)。予防的避難地域の中では、浪江の住民が3月12日のプルーム曝露が 大きいこと、次いで南相馬市小高地区住民のプルーム曝露がおおきい。大熊、富岡、楢葉、 双葉の住民の多くは、3月12日のプルームにほとんど曝露していない。予防的避難地域の 住民の内、北西方向の計画的避難地域へ避難した住民は、3月15日16日のプルームに2 度目の曝露を受けたと思われるが、その割合は行動調査票の解析を待って確定する。体表 面汚染の核種分析から、3月12日のプルーム曝露では、¹³¹I以外に¹³²I,¹³³I,¹³²Te から有意 な甲状腺内部被ばくを受けたことが明らかであり、その割合は1歳児の場合3月12日プルー ムで0.63:0.37、3月15日のプルームでは0.92:0.08であることが判明した。¹³¹I以外の 核種の寄与に関する割合は、土壌汚染データから Shinkarev らが報告した 30~40%という 評価値と合致している(参考文献8)。

体表面汚染分布をベースに、放射性核種の沈着速度の確率密度分布を 0.1-0.5cm/s の一様 分布と仮定して、2 次元モンテカルロシミュレーション (2D-MC) 法による線量推計を行 い、論文投稿中である。行動調査票との突合により、3 月 12 日と 3 月 15 日のプルーム曝 露別、滞在場所別にデータを再解析する予定である。

III-7. ヨウ素代謝・甲状腺体積の日本人の特性

東京監察院から男性 7,651 名(0-99 歳)、女性 3,467 名(0-100 歳)の摘出甲状腺重量のデー タを得た。20~54 歳までの甲状腺重量の中央値、幾何平均(SD)は、男性で 20g、21.5g (10.3)、 女性で 16g、17.4g (10.7)であり、日本人の甲状腺体積は昔と変わっていないことが明らかと なった。また、ICRP 標準人の甲状腺体積 男性 20g、女性 17g とほぼ同じであった。 ボランティア 52 名の超音波検査および MRI で計測された体積は、系統的に右葉が左葉よ り 20%程度大きく、左右の甲状腺葉を回転楕円体として計算した体積の和は、摘出甲状腺 重量より 10%小さかった。しかし峡部の体積を無視していることより、その違いは小さい と判断できる。一方、MRI による評価値はさらに小さく摘出甲状腺重量の平均より 30%程 度小さかったが、放医研で実施したボランティアを募っての MRI 画像と超音波検査の比較 では、両者による甲状腺体積計測は良く一致しており、MRI の画像処理技術の違いが考え られた。以上より、Suzuki らにより報告されていた日本人小児甲状腺体積が ICRP モデル の約半分という評価値は、簡易測定によるアーチファクトと考えられる(参考文献 9)。一 方、甲状腺体積は個人差が大きい事も確かであり、個人の甲状腺等価線量の評価において 不確かさの一因となる事が判明した。

III-8. 包括的な甲状腺線量評価

データが出そろわないため、平成 29 年度は、包括的な線量評価は実施しなかった。平 成 30 年度の最終報告書において包括的な評価を行う。

IV. 考察

WSPEEDIの精緻化は順調に進んでおり、平成 30 年度には放射性核種の時間空間データ ベースを更新し、線量評価に使う準備が整った。また、時間空間データベースを使った水 道水からの線量評価においても、保守的な飲水量ではなく、厚労科研のデータやそこに不 足している 1~5 歳のデータを補完するアンケート調査の準備が整った。本年度は、行動調 査票のランダムサンプリングが実施され、19 歳以下の住民の避難実態が明らかにされた。 従来の 18 避難シナリオと齟齬が大きい地域が明らかになったため、行動調査票に基づく避 難住民の線量評価を実施し、線量の違いを明らかにする必要がある。

WSPEEDI ベースの線量評価(呼吸と飲水)は、これまで実施してきていないが、最終 年度は実施し、WBC,体表面汚染からの評価、数少ないが実測値のある集団との比較を行う 必要があろう。その際には、比較の上で系統的誤差に原因になる¹³¹Iの甲状腺取り込み率 や、屋内退避によるプルーム防護係数を考慮に入れて実施する必要があろう。

V. 結論

最終年度の線量評価に向けた準備は順調に進んでおり、評価のための方法論の論文化が 2017年に進んだ。

VI. 次年度以降の計画

最終年度は、精緻化された WSPEEDI のデータベースを使い、避難住民に関してはラ ンダムサンプリングされた行動調査票をベースに吸入被ばくと経口被ばく線量を再評価す る。このシミュレーションベースの線量評価値を甲状腺測定やホールボシカウンター測定 や体表面汚染データからの線量評価値と比較検討し、妥当性検討を行う。非避難住民に関しては、WSPEEDIのデータベースを使い、吸入被ばくと経口被ばく線量を再評価する。

UNSCEAR による線量再評価に寄与するためには、平成 31 年夏前までに欧文原著論 文として発表できるよう、努力する。

- VII. 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
 - Ohba T, Hasegawa A, Kobayakawa Y, Kondo H, Suzuki G: 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
 - 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*, 2017. Doi:10.1093/rpd/ncx208.
 - Hirakawa S, Yoshizawa N, Murakami K et al. Survey of food intake just after the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. *Food Hyg. Saf. Sci.* 58(1): 36-42, 2017.
 - 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.* Accepted for publication.
 - 5) <u>Ohba T, Hasegawa A, Kohayakawa Y, Kondo H, Suzuki G</u>. "Estimation of thyroid equivalent doses during evacuation based on body surface contamination levels in the nuclear accident of FDNPS in 2011". *EPJ Web of Conferences 2017*, Vol. 153, pp. 08009; 10.1051/epjconf/201715308009
 - 6) Kawai M, Yoshizawa N, Hirakawa S, Murakami K, Takizawa M, Sato O, Takagi S, Miyatake H, Takahashi T, Suzuki G: Internal Dose from Food and Drink Ingestion in the Early Phase after the Accident, Proceedings of the ICRS13 & RPSD-2016 meeting, Paris, 2016 in *Eur. Phys. J. -Web of Conferencs 2017, vol,153. pp.08013*, DOI:https://doi.org/10.1051/epjconf/201715308013.
 - Miyatake H, Yoshizawa N, Hirakawa S, Murakami K, Takizawa M, Kawai M, Sato O, Takagi S, Takahashi T, Suzuki G: Internal Assessment of Effective Dose from External Exposure in Tochigi Prefecture, Proceedings of the ICRS13 & RPSD-2016 meeting, Paris, 2016 in *Eur. Phys. J. –Web of Conferencse* 2017, Vol 153, pp.08006, DOI:https://doi.org/10.1051/epjconf/201715308006.

- B. 論文: 査読なし該当なし
- C. 国内学会発表
 - ○大葉 隆、長谷川有史、<u>鈴木 元</u>:福島第一原発事故による体表面汚染密度からの避難途上の吸入による小児甲状腺等価線量分布の推定 第60回日本放射線 影響学会 京葉銀行文化プラザ 2017.10.25-26
 - 2) ○<u>鈴木 元</u>、大葉 隆、長谷川有史、河合理城、義澤宣明:体表面汚染サーベイメータ、水道水¹³¹I 濃度推計からの初期甲状腺被曝の推計 第 60 回日本放射線 影響学会 京葉銀行文化プラザ 2017.10.25-26
 - 3) ○宮武裕和、義澤宣明、<u>鈴木 元:</u>福島第一原子力発電所事故後の福島周辺県の 外部被ばく線量への短半減期核種の寄与 第 60 回日本放射線影響学会 京葉銀 行文化プラザ 2017.10.25-26
 - 4) ○河合理城,義澤宣明,鈴□元. "事故後初期における水道水の摂取による内部 被ばく線量の推計". 日本放射線影響学会第 60 回大会, 2017 年 10 月 25 日~ 28 日(千葉市)
 - 5)○宮武裕和,義澤宣明,河合理城,鈴木元. "空間線量率の時系列データと諸パ ラメータの分布を考慮した福島事故後の外部被ばく線量の推計".日本原子力 学2018 年春の年会,2018 月 3 月 26 日~28 日(吹田市)
 - 6) ○大葉 隆、長谷川 有史、鈴木 元. "避難途上の吸入による小児の甲状腺 等価線量の推定 - 体表面汚染測定結果を利用した解析-". 日本保健物理学会第 50 回研究発表会・日本放射線安全管理学会第16回学術大会合同大会, 2017月6 月 28 日~30 日(大分市)
 - 7) ○大葉 隆、長谷川 有史、鈴木 元. "福島第一原発事故における体表面汚 染密度からの避難途上の吸入による小児の甲状腺等価線量分布の推定". 第45 回 日本放射線技術学会秋季学術大会,2017月10月19日~21日(広島市)
 - 8) ○大葉 隆、長谷川 有史、鈴木 元. "福島原発事故時の体表面汚染密度を用いた避難中吸入による小児甲状腺線量分布の推定". 第88回日本衛生学会学術総会,2018月3月22日~24日(東京都)
- D. 国際学会発表
 - Ohba T, Hasegawa A, Suzuki G: Estimation of thyroid equivalent dose at 1-year-old children by inhalation based on body surface contamination levels after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident アジア/オセアニア核医学会 AOCNMB2017 横浜パシフィコ 2017.10.5-7
 - 2) \bigcirc Kawai M, Yoshizawa N, Suzuki G : ¹³¹I thyroid dose estimation from food and drink

in the early phase after Fukushima Daiichi nuclear power plant accident アジア/オセ アニア核医学会 AOCNMB2017 横浜パシフィコ 2017.10.5-7

- 3) Suzuki G, Ohba T, Hasegawa A, Kawai M, Yoshizawa N : Estimation of thyroid equivalent dose after the Fukushima Daiichi nuclear power plant (FDNPP) accident 第 63 回米国放射線研究学会, Cancun, Mexico 2017.10.15-18
- 4) Ohba T, Hasegawa A, Suzuki G : Estimation of thyroid equivalent dose at 1 year-old children by inhalation including short half-life radionuclides based on body surface contamination level after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident ICRP-ERPW 2017, Paris, 2017.10.10-12
- E. 著書

1) 鈴木元「福島の環境汚染ー過去、現在、そして未来」 エネルギーレビュー 2017 2:38-41

- F. 講演 該当なし
- G. 主催した研究集会 該当なし
- H. 特許出願・取得該当なし
- I. その他 該当なし

VIII. 参考文献

- Akahane K, Yonai S, Fukuda S et al.: NIRS external dose estimation system for Fukushima residents after the Fukushima Dai-ichi NPP accident. *Scientific Reports*.3:1670 / DOI: 10.1038/srep01670.
- 2) 平川幸子、村上佳奈、義澤宣明、他:原子力事故直後における食品等の供給実態と 課題について。 安全工学 53 (3):167-171, 2014.
- 3) 滝澤真理、義澤宣明、河合理城、他:福島原発事故後の食品からの内部被ばくの考察。 安全工学 55(19):26-33, 2016.
- 4) Kim E, Kurihara O, Kunishima N et al.: Early intake of radioncesium 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.* 111(5):451-464, 2016.

- 5) Kim E, Kurihara O, Tani K et al.: Intake ration of 131I to 137Cs derived from thyroid and whole-body doses to Fukushima residents. *Radiat Protect Dos*, 168(3): 408-418, 2016.
- Kim E, Kurihara O, Kunishima N et al. Internal thyroid doses to Fukushima residents – estimation and issues remaining. J. Radiat Res, 57(S1):i118-1i26, 2016.
- 7) 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. *Radiat Res*, 180(3): 299-306, 2013.
- Shinkarev SM, Kotenko KV, Granovskaya EO, Yatsenko VN, Imanaka T, Hoshi M. Estimation of the contribution of short-lived radioiodines to the thyroid dose for the public in case of inhalation intake following the Fukushima accident. *Radiat Prot Dosimetry* 164: 51-56; 2015.
- Suzuki S, Midorikawa S, Fukushima T et al. Systematic determination of thyroid volume by ultrasound examination from infancy to adolescence in Japan: The Fukushima Health Management Survey. *Endocrine J.* 62(3): 261-268, 2015.

Comprehensive studies on the refinement of internal dose estimates for residents during the early phase in Fukushima Nuclear Accident:

Integrated internal dose estimation for Fukushima residents and its uncertainty analyses

Chief investigator: Gen Suzuki, Professor, Director, National Institute of Health and Welfare Clinic

Co-investigators: Osamu Kurihara, Department Chief,

Hiroyuki Kusuhara, Professor,

Yasuhara Nagai, Chief, the Division of Nuclear Research, Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency

Because of the paucity of actual measurements, United Nation's Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR) estimated the internal radiation doses of residents by an atmospheric transfer, diffusion and deposition model (ATDM) simulation based on a source term (hourly released doses of radionuclides and an atmospheric database in its UNSCEAR 2013 Report. For evacuees, UNCEAR adopted typical 18 evacuation scenarios. However, as UNSCEAR admitted in its 2013 report, its estimated doses were several-fold higher than those estimates based on direct measurements in children, although a total number of such measurements was relatively small. We have conducted the research of realistic dose reconstruction since 2014, "comprehensive study on dose estimation" from 2014 to 2016, and "dose refinement study" from 2017 to 2018.

In a fiscal year of 2017, we have almost completed the improvement and refinement of our ATDM, WSPEEDI, and a source term. Now we are ready for final test using a data set of continuously measured ¹²⁹I on filters at suspended particulate maters (SPM) monitoring stations in Japan that will be available for use in the first quarter of 2018 fiscal year. Until summer, we will update the datasets of spatial and hourly radionuclides' densities in Fukushima and surrounding prefectures, which will be utilized for dose estimation. As to evacuation scenarios, we have selected randomly the individual questionnaire sheets of less than 19 years-old children in 6

municipalities, and are ready for estimating internal doses during evacuation by 12-hour-steps. As to the dose estimation from ingesting water, we have published a methodology paper this year, and we will conduct a questionnaire survey in order to update a mean and distribution of water intake by different age groups in Japan. As to a methodology for estimating inhalation dose based on body surface contamination, we have published the first paper and the second paper is under the review process for publication. Thus, we are able to estimate thyroid doses based on different methodologies, direct measurements in selected groups, whole body measurements of ¹³⁴Cs under the assumption of ¹³¹I/¹³⁴Cs ratio, inhalation dose based on body surface contamination. We are going to integrate these estimates into the final estimated thyroid doses after estimating uncertainty in each methodology.

4-1-a 事故初期の住民内部被ばく線量評価の精緻化に関する包括研究

事故初期段階の住民の初期内部被ばく線量の精度向上に関する研究

分担研究者:栗原 治(量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 部長)

研究要旨

東電福島第一原発事故により住民が受けた放射性ヨウ素による甲状腺内部被ばく線 量の正確な把握のため、大気拡散シミュレーション避難行動データ等を活用した線量 推計を行うための要素研究を実施した。原発近隣住民の避難行動データの解析から、 事故発生翌日のプルームのばく露が被ばく線量評価を行う上で重要であり、避難開始 時期によって被ばく線量が顕著に変わる可能性を示唆する結果が得られた。また、個 人の避難行動はかなり多様であり、様々な場所に避難をしたことが避難行動データの 可視化によって明らかになった。多くの近隣住民は迅速に避難を開始しており、国会 事故調査報告書のアンケート調査を裏付ける結果となった。その他、大気拡散シミュ レーション (WSPEEDI) のバージョン間のプルームの再現性の違いの確認、小児甲状 腺被ばくスクリーニング検査に用いられた検出器の換算係数の見直し、個人の甲状腺 形状を考慮した甲状腺吸収線量の評価のための準備などを実施した。

キーワード

東電福島第一原発事故、ヨウ素、甲状腺、内部被ばく、避難行動、ATDM

研究協力者

研究協力者	石川徹夫	(福島県立医科大学	≥ 教授)
研究協力者	國島直晃	(自衛隊中央病院	放射線科治療医長)

研究参加者

研究参加者	金ウンジュ	(量子科学技術研究開発機構	主任研究員)
研究参加者	谷幸太郎	(量子科学技術研究開発機構	研究員)
研究参加者	矢島千秋	(量子科学技術研究開発機構	主任研究員)
研究参加者	石榑信人	(量子科学技術研究開発機構	主幹研究員)
研究参加者	小畠隆行	(量子科学技術研究開発機構	次長)
研究参加者	岸本理和	(量子科学技術研究開発機構	医長)
研究参加者	土屋洋貴	(量子科学技術研究開発機構	診療放射線技師)

I. 研究目的

東電福島第一原発事故が発生してから現在に至るまで、福島県住民を主な対象とした一 般公衆の事故起因の被ばく線量の評価に関して多くの調査研究が行われてきた(1)。これらの 調査研究の共通の見解としては、一般公衆が受けた被ばく線量は総じて低いということで ある。しかしながら、事故初期に受けた被ばく、特に放射性ヨウ素による甲状腺の内部被 ばく線量に関しては、放射性ヨウ素が比較的小さい人体組織である甲状腺に集中して線量 を与えることや、チェルノブイリ原発事故において小児の甲状腺がんの発生率が増加した ことなどから、より詳細な評価が必要とされている。本研究の目的は、研究分担者(栗原) が所属する量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所(量研・放医研)において、 これまでに実施してきた研究成果(2-6)を基礎とし、より正確な福島県住民の事故初期の内部 被ばく線量(特に放射性ヨウ素からの甲状腺等価線量)を推計することである。具体的に は、甲状腺や全身の体外計測の実測値を有する者の行動情報を活用することにより避難行 動と内部被ばく線量との関連を解析することや、大気拡散シミュレーションにより得られ た放射性核種の空気中濃度の時空間マップに個人の滞在場所を重ねることにより吸入摂取 を推計すること等を試みる。また、内部被ばく線量推計の基礎に用いられる体外計測の実 測値の精度検証を行う。平成 29 年度はこれらの要素研究を行い、最終年度の平成 30 年度 には得られた研究成果を総括し、実測値が得られていない大半の福島県住民に適用できる 初期内部被ばく線量の推計方法を提案するまでを目指す。

II. 研究方法

本研究において行う以下の要素研究の手法及び資料・材料の収集方法を述べる。

1. 大気拡散シミュレーションを用いた初期内部被ばく線量推計

先行研究(「東京電力福島第一原発事故における住民の線量評価に関する包括研究(鈴木元(研究代表者))、2014年度から2016年度、環境省)において日本原子力研究開発 機構から提供されたWSPEEDIのヨウ素-131(¹³¹I)やセシウム-137(¹³⁷Cs)等の大気 中濃度の時空間マップに、福島県立医科大学から提供された体外計測値を有する者の避 難行動データ(原発事故発生後の滞在場所の時期列データ)を同時刻で突合することに より、吸入摂取による内部被ばく線量を計算する。2017年度は、後述する2.避難行動 と内部被ばく線量の関連性の解析において、原発事故翌日の2011年3月12日の吸入 摂取が重要と考えられたため、同日の放射性核種の拡散状況を精査した。 2. 避難行動と内部被ばく線量の相関解析

個人の避難開始時刻や避難経路等の条件と内部被ばく線量との関連性を見いだせれ ば、注視すべき避難パターンの抽出の参考になる。そこで、多数の個人の避難行動デー タを様々な条件で分類し、内部被ばく線量との相関について解析を行った。膨大な避難 行動データの可視化等の処理のために、Python 言語によるプログラムを作成した。な お、本研究で使用した避難行動データは、国が原発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の被検者及び日本原子力研究開発機構が 2011 年 7 月上旬から 2012 年 1 月末までに実施したホールボディカウンタ (WBC) 測定の被検者から得られ たものであり、それぞれ約 300 名分及び約 5,000 名分のデータである。

3. ヨウ素/セシウム摂取量比の評価

2012 年度に量研・放医研が環境省(当時、資源エネルギー庁)からの委託研究によ り行った線量推計では、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査(15 歳以下の子ども) 及び WBC 測定の両方の被検者(成人)の体外計測の実測値が得られた飯舘村及び川俣 町を対象として、同一地域の子どもと成人がそれぞれ標準的な呼吸量で同一の核種組成 比(¹³¹I/¹³⁷Cs)の空気を吸入したと仮定してヨウ素/セシウム摂取量比を導出した⁽³⁾。 この摂取量比は、全身に残留するセシウムのみを測定対象としていたものの、比較的多 くのデータが取得された WBC の実測値から、ヨウ素による甲状腺線量の算定に利用で きると考えられる。今年度の研究では、前述のヨウ素/セシウム摂取量比の導出に使わ れた小児甲状腺被ばくスクリーニング検査について、同検査に使用された NaI(Tl)サー ベイメータ(TCS-171/172、日立製)の年齢別換算係数(計測値から甲状腺残留¹³¹I 量 を換算するための係数)を Ulanovsky と Eckerman が作成した数学ファントム⁽⁷⁾ (0 歳児、1 歳児、5 歳児、10 歳児、15 歳児及び成人の計 6 体)を用いたシミュレーショ ン及び物理ファントム(ORINS 型ファントム⁽⁸⁾)を用いた実験値を参考にして見直し を行った。

4. 個人の甲状腺形状を考慮した甲状腺吸収線量の評価

疫学的研究等の観点から、標準人の体格や代謝等に関するパラメータを用いて導出さ れる甲状腺等価線量よりも、個人のパラメータを用いて導出された吸収線量を放射線影 響の尺度とする方が良い場合がある。放射性ヨウ素の体内摂取による甲状腺被ばくは、 放射性ヨウ素が甲状腺のみに集積する性質を有することから、超音波診断装置等で得ら れる個人の甲状腺形状から甲状腺吸収線量を評価できる。今年度の研究では、その準備 として、ボランティアの頸部の MRI 画像を取得するための研究倫理審査の手続きと数 値ファントムを作成するための MRI 画像の処理を進めた。使用した MRI 装置(Inter Achieva1.5T、フィリップス)による頸部の撮像に際しては、別研究において甲状腺の 輪郭抽出に最適な設定(3D isotropic fast spin-echo T2-weighted sequence)を決定し ており、今回もその設定を用いた。MRI 画像の処理には、専用のソフトウエアを使用 した。次年度は、作成した個人の数値ファントムを用いて、甲状腺領域を線源とする放 射線輸送シミュレーションを行い、甲状腺吸収線量評価の基礎となるS値(比吸収エネ ルギー)及び甲状腺形状の個人差が甲状腺計測に及ぼす影響等について評価する。

(倫理面への配慮)

本研究において使用した個人の避難行動データの利用については、量研・放医研及び福島県立医科大学の両機関における研究倫理審査委員会において承認を得た(13-011)。また、 ボランティアの MRI 撮像についても、量研・放医研の研究倫理審査委員会において承認を 得た(17-036)。

III. 研究結果

1. 大気拡散シミュレーションを用いた初期内部被ばく線量推計

先行研究において得られた WSPEEDI の放射性核種の大気中濃度の時空間マップの 一例として、図 III-1 に ¹³⁷Cs の 2011 年 3 月 12 日 15 時から 17 時までの積算濃度マッ プを示す。同図では、WSPEEDIの3バージョンの計算結果、具体的には、Terada et al. (2012)⁽⁹⁾ (Terada2012 と表記)及び Katata et al. (2015)⁽¹⁰⁾ (Katata2015 と表記) に 公表された計算条件により得られた結果と Katata et al. (2015)をベースに改良が加え られた最新版の結果(Katata2016と表記)を比較している。図 III-2 には、2011 年 3 月 12 日 12 時から 18 時までの ¹³¹I の積算濃度マップと小児甲状腺被ばくスクリーニン グ検査の被検者の同時間帯における滞在場所を重ねて示した。表 III-1(1)及び表 III-1(2) には、選択した地点での各日の吸入摂取による内部被ばく線量の計算値の一例として、 いわき市、飯舘村、川俣町、浪江町、津島地区(浪江町)及び南相馬市の各代表地点(役 場等)における1歳児の¹³¹の甲状腺等価線量の結果を示した。ただし、同表の計算で は各地点において屋外に滞在し続けた条件で計算しており、建屋内では屋外に比べて放 射性核種の空気中濃度が低減する効果や生活サイクルに伴う呼吸率の変化等は考慮し ていない。あくまでシミュレーション間の比較を行うために示したものである。なお、 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査等による人の実測値から推定された甲状腺等価 線量は、表 III-1(1)及び表 III-1(2)に示した数値よりも相当低い結果となっている。

23



 図 III-1 WSPEEDIで得られた3月12日15時から17時までの¹³⁷Cs積算濃度
 ※上段左:Terada2012、上段中央:Katata2015-広域版、上段右:Katata2016-広域版 下段左:Katata2015-狭域版、上段右:Katata2016-狭域版



 図 III-2 WSPEEDI で得られた3月12日12時から18時までの¹³¹I 積算濃度と小児甲状腺 被ばくスクリーニング検査の被検者の滞在位置

※上段左: Terada2012、上段中央: Katata2015 狭域版、上段右: Katata2016 狭域版

表 III-1 WSPEEDIから計算した¹³¹I吸入による甲状腺等価線量(1)



(1 歳児、単位 mSv)

表 III-2 WSPEEDI から計算した¹³¹I 吸入による甲状腺等価線量(2)



(1 歳児、単位 mSv)

※左表: 浪江町、中表: 浪江町(津島地区)、右表: 南相馬市

以上の結果において線量評価の観点から特に重要な点として考えられるのは、3月 12日午後に放出されたプルームの挙動に関してシミュレーション間で差異が見られる ことである。Katata2015と2016を比較すると、後者のプルームの方がより北側に流 れており、浪江町からの避難住民の一部が同様な方角に避難している(後述)。また、 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査が実施された3市町村(いわき市、飯舘村、川 俣町)の結果(表 III-1)を見ると、川俣町ではTerada2012がKatata2015、2016に 比べて線量が高く、逆にいわき市及び飯舘村ではTerada2012がKatata2015、2016 に比べて線量が低い結果となった。

2. 避難行動と内部被ばく線量の相関解析

避難行動と内部被ばく線量の相関を見出すため、避難行動データの多角的な解析を 行った。その一例を図 III-3 から図 III-7 に示す。紙面の都合上、ここでは一部の自治体 の結果しか示していないが、解析に十分な数の避難行動データが得られた自治体の分に ついては同様な解析をほぼ終了している。各図の説明は以下のとおり。



図 III-3 浪江町と飯舘村の住民の避難状況 ※2011 年 3 月 11 日から 25 日までの住民の滞在場所を原発からの距離によって 6 時間 毎に棒グラフで示したもの



図 III-4 浪江町の住民の避難状況-住民の滞在場所の経時変化

図 III-3 は浪江町及び飯舘村を例として、各時刻の住民の滞在場所を原発からの距離 に応じて分類し、それを時系列として示したグラフである。同図から分かるように、即 時避難が指示された浪江町では事故発生翌日の3月12日の午前中には住民の大半が避 難を開始し、即時避難の指示が出されなかった飯舘村においても3月15日頃以降から 自主的に避難を開始している状況が確認された。これらは国会事故調査報告書⁽¹¹⁾に示さ れた住民の避難状況の報告を裏付ける結果であった。図 III-4 には避難行動データが得 られた浪江町住民の滞在場所を地図上に示した。同図から、これまで代表的と考えられ てきた避難行動 18 パターンにはない南相馬市方面への避難者が確認された。また、3 月15日時点の住民の滞在場所は福島県内各地に分布している。



Cs137摂取量 (Bq)										
4	齡区分	グループ	人数	平均	未検出	5k未満	5~10k	10~20	検出率	
1	all	g	1348	1573.1	1095	65	105	83	19%	
2	all	g0	418	3021.0	282	27	57	52	33%	
3	all	g1	882	961.1	767	37	47	31	13%	
4	all	g2	48	208.8	46	1	1	0	4%	
5	all	g00	96	4791.0	45	9	25	17	53%	
6	all	g01	270	2609.6	195	15	30	30	28%	
7	all	g02	52	1889.0	42	3	2	5	19%	
8	all	g11	711	1080.8	608	34	40	29	14%	
9	all	g12	171	463.5	159	3	7	2	7%	



	平均値の差の検定 (ウェルチの検定=等分散を仮定しない)										
	年齡区分	グループ1	グループ2	t-值	p-值	有意差					
1	all	g0	g1	7.8624	2E-14	0					
2	all	g0	g2	9.7614	5E-20	0					
3	all	g1	g2	4.1908	7E-05	0					
4	all	g00	g01	3.5255	0.0006	0					
5	all	g00	g02	3.4707	0.0007	0					
6	all	g01	g02	1.0321	0.3054	×					
7	all	g11	g12	3.4584	0.0006	0					

図 III-5 浪江町の住民の避難行動分類(その1)

期間対比 避難方向別Cs137摂取量評価(浪江町) 合計人数10名以上の地区



3月15日から17日の 間に48時間以上滞 在した場所で分類

図 III-6 浪江町の住民の避難行動分類(その2)



図 III-5 に示すのは、浪江町住民を対象として、個人の滞在場所と原発からの距離及び避 難開始時刻によって分類した避難パターンに応じて、WBC の測定結果から得られた¹³⁷Cs 検出率と¹³⁷Cs 全身残留量から計算された¹³⁷Cs 摂取量に有意な差異があるかを解析した例 である。ここに示した結果を見ると、避難開始時刻の早い集団(図中に示すg2)と3月13 日 0 時の時点まで 20km 圏内に留まった集団(g00)との間には、¹³⁷Cs 検出率及び¹³⁷Cs 摂取量ともに大きな差異が認められる。さらに、3月12日0時及び3月13日0時の時点 での距離で分類した集団の間には、一部を除き¹³⁷Cs 摂取量に有意差が認められる結果と なった。

図 III-6 に示すのは、同じく浪江町住民を対象として、前半期(3月12日から14日)と 後半期(3月15日から17日)において、それぞれの期間で48時間以上滞在した市町村で クロス集計を行った結果である。この結果から、前半期に津島地区、南相馬市、川俣町、 福島市等の様々な方面に避難を開始したこと、後半期では福島県外への避難者も多いこと、 前半期及び後半期ともに避難中(上記の条件に当てはまらない場合を避難中とした)の住 民が相当数いることなど、住民の避難行動はかなり多様であることが分かった。

図 III-7 に示すのは、WBC 被検者(成人のみ)から得られた約1千人分の避難行動デー タから、各時刻における対象者の滞在場所の分布を地図上に表示した結果である。同図中 に示した丸印の大きさが被検者数に対応し、丸印の色が¹³⁷Cs 検出率に対応している。同図 から、原発近隣住民の避難は、原発から見てほぼ等方的であることが分かる。事故発生か ら最初の数日間の結果を見ると、数が少ないが¹³⁷Cs 検出率の高い集団が原発近傍の北から 北西方向にかけて見受けられる。3月13日から15日までに南西方面の遠方に避難した集 団の¹³⁷Cs 検出率は低いが、3月16日以降は¹³⁷Cs 検出率の高い原発近傍の少数の集団が 合流する形で¹³⁷Cs 検出率が増加する。

表 III-3 には WBC 被検者の内、避難行動データが得られた約5千人分の構成及び放射性 Cs 検出率をまとめた。放射性 Cs 検出率について成人の方が子どもより高い結果となるの は、成人の摂取量がより大きく、放射性 Cs の体内半減期が長いことを考えれば当然である が、成人の放射性 Cs 検出率については男女差が明確に認められた。同じく成人の放射性 Cs 検出率については、即時避難指示の出された警戒区域(20 km 圏内)内の町村よりも、 計画的避難地域に指定された飯舘村及び川俣町の方が高い結果となった。

29



図 III-7 WBC 成人被検者の各時刻における滞在場所 ※図中の丸印の大きさが被検者数に対応し、丸印の色が ¹³⁷Cs の検出率に対応する。

+++	5歳児区分		10歳児区分		15歳児区分			成人				
ſŢ⊞IJ∱J	男性	女性	合計	男性	女性	合計	男性	女性	合計	男性	女性	合計
	180	168	348	238	247	485	240	245	485	88	221	309
八尺八二四〕	12.8%	11.9%	12.4%	18.5%	15.0%	16.7%	37.1%	23.7%	30.3%	60.2%	28.5%	37.5%
	126	114	240	134	135	269	87	96	183	33	248	281
∕────」	11.9%	6.1%	9.2%	8.2%	7.4%	7.8%	13.8%	7.3%	10.4%	60.6%	27.8%	31.7%
épur	112	105	217	120	123	243	7	3	10	57	276	333
	4.5%	9.5%	6.9%	12.5%	7.3%	9.9%	42.9%	0.0%	30.0%	59.6%	17.0%	24.3%
20.450-	80	67	147	71	62	133	32	47	79	50	163	213
──────────────────────────────────────	8.8%	7.5%	8.2%	25.4%	12.9%	19.5%	18.8%	12.8%	15.2%	74.0%	30.1%	40.4%
	66	62	128	89	98	187	14	15	29	7	119	126
個樂回」	6.1%	0.0%	3.1%	16.9%	11.2%	13.9%	57.1%	6.7%	31.0%	42.9%	23.5%	24.6%
*=	45	45	90	57	67	124	26	38	64	21	26	47
良汉古吕个门	13.3%	8.9%	11.1%	24.6%	10.4%	16.9%	61.5%	34.2%	45.3%	95.2%	73.1%	83.0%
rt- ma m-	44	37	81	33	37	70	0	0	0	14	70	84
	6.8%	10.8%	8.6%	18.2%	13.5%	15.7%				78.6%	30.0%	38.1%
	21	11	32	27	17	44	27	18	45	8	24	32
	9.5%	9.1%	9.4%	7.4%	5.9%	6.8%	7.4%	0.0%	4.4%	12.5%	8.3%	9.4%
	8	7	15	18	16	34	5	6	11	36	30	66
川版回	12.5%	14.3%	13.3%	11.1%	25.0%	17.6%	60.0%	16.7%	36.4%	69.4%	30.0%	51.5%
*****	17	10	27	17	13	30	9	3	12	8	12	20
因尾州	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	22.2%	0.0%	16.7%	37.5%	0.0%	15.0%

表 III-3 避難行動データが得られた WBC 被検者の構成及び放射性 Cs 検出割合

※表中のパーセントは 134Cs または 137Cs の両方又はいずれかが検出された割合

3. ヨウ素/セシウム摂取量比の評価

図 III-8 に今回見直した NaI(Tl)サーベイメータ(TCS-171/172、日立製)の年齢別換 算係数を示す。これらは、放射線輸送シミュレーションによって求めた数学ファントム (前述)6 体の換算係数の内、成人の換算係数を物理ファントム(ORINS ファントム) の実験値に一致するように他の年齢に対する換算係数を規格化して求めた。適用した放 射線輸送シミュレーションの精度は、ポイント線源や物理ファントムに対する実験値と 比較し、正確に再現できることを事前に確認した。

物理ファントムから実験的に得られた換算係数は 33 ±2 kBq (μ Sv h⁻¹)⁻¹ であったのに 対し、数学ファントム対する換算係数は成人モデルの場合で 24 kBq (μ Sv h⁻¹)⁻¹ (頸部に 密着測定の場合。検出器が頸部から 1 cm 離れた場合は 36 kBq (μ Sv h⁻¹)⁻¹ であった。物 理ファントムの結果は、過去の報告⁽¹²⁾とほぼ一致した。見直した年齢別換算係数は、従 前のものと比べて 10 歳児及び 15 歳児で若干大きくなるものの、5 歳児以下ではほぼ同 じになった。なお、従前の年齢別換算係数は、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査時 に成人を模擬した別の物理ファントムを用いて得られた結果と Tanaka と Kawamura(1978)の文献値を成人の換算係数 (33 ±2 kBq (μ Sv h⁻¹)⁻¹) で規格化した結 果を平均して求めた。

図 III-9 には、これまでに報告された摂取量比(¹³¹I/¹³⁴Cs または ¹³¹I/¹³⁷Cs)を比較 して示した。これらは、主に人の実測値(体外計測)から評価された結果である。各 報告における対象者や摂取量比の算定方法が異なるために単純な比較はできないもの の、日本原子力研究開発機構・核燃料サイクル工学研究所(茨城県東海村)において 連続サンプリングされた空気中濃度から算定された¹³¹I/¹³⁷Cs濃度比は約8(2011年5 月までの積算濃度として)であり、体外計測から評価された結果はこれより低い報告 が多かった。



図 III-8 NaI(TI)サーベイメータの甲状腺中 ¹³¹I に対する年齢別換算係数
 ※左図:これまでの線量評価に使用した年齢別換算係数(赤線)、
 右図:今回見直した年齢別換算係数(青線)



図 III-9 摂取量比(¹³¹I/¹³⁴Cs または¹³¹I/¹³⁷Cs)の文献間の違い

4. 個人の甲状腺形状を考慮した甲状腺吸収線量の評価

今年度の進捗としては、ボランティア頸部の MRI 撮像を行い、得られた画像から個 人毎の数値ファントムを作成し、これを用いて甲状腺吸収線量や甲状腺計測の測定精度 などの評価を行う一連の研究(図 III-10) について、量研・放医研内の研究倫理審査の 承認が得られ、現在ボランティアの MRI 撮像を適宜実施している状況である。なお、 別研究において、MRI 画像から各スライスにおける甲状腺領域を決定して全スライス 分について合計して求めた甲状腺体積と、超音波診断装置から得られた甲状腺像の長径、 短径及び厚さから回転楕円体を仮定して算出した甲状腺体積を比較したところ、両者は 良く一致した。また、甲状腺吸収線量の評価に用いる S 値については、甲状腺体積のみ でほぼ決定できることを確認した。



図 III-10 MRI を用いた個人数値ファントムの作成及びシミュレーションモデルの構築

IV. 考察

1. 大気拡散シミュレーションを用いた初期内部被ばく線量推計

結果で述べたとおり、事故発生翌日の3月12日のプルームの大気拡散シミュレーションの再現性が重要である。これは、原発近傍の高い濃度のプルームにばく露する可能性に加えて、¹³¹I以外の短寿命核種による内部被ばく線量への寄与があるためである。3月12日に吸入摂取があった場合、¹³²Te/¹³²I及び¹³³Iによる甲状腺線量への寄与は全体の30%から40%に達すると評価されている⁽¹³⁾。

現時点での最新版の大気拡散シミュレーション(Katata2016)では、それ以前のもの (Terada2012 及び Katata2015)に比べて、3月12日のプルームが沿岸部に沿ってより北 方向に移流する結果であった。浪江町住民の中には同様な方角に避難した者もおり、今後 精査する必要がある。

大量放出のあった3月15日のプルームについては、原発近隣住民の大半が既に遠方に避 難しているため、3月12日のプルームと比較すると、多くの住民が長時間にわたり均等に ばく露を受けたものと推察される。このことから、避難パターンに応じて、重要となるプ ルームのイベントが異なると考えられる。次年度は、更新予定の大気拡散シミュレーショ ンの結果を用いて、以上述べた点に着目しながら解析を進めてゆく。

2. 避難行動と内部被ばく線量の相関解析

結果に示したとおり、住民の避難行動データを様々な角度から解析し、内部被ばく線量 との関連性を調べた。その結果、避難開始時刻が内部被ばく線量を決定する要因の1つで あることを示唆する結果が得られたが、定量的な説明をするためには、大気拡散シミュレー ションと併せた解析が今後必要である。一方、新たな避難パターンの抽出については、個 人の避難行動が多様過ぎるために、避難開始時期や避難先の最小限の組み合わせで行うこ とが適当である。次年度は、これまでの結果を再度精査し、適宜取りまとめを行ってゆく 予定である。

3. ヨウ素/セシウム摂取量比の評価

人の実測値から評価されたヨウ素/セシウム摂取量比が環境中のヨウ素/セシウム濃度 比と比べて小さくなる傾向がある理由に、日本人のヨウ素甲状腺移行率が ICRP の定義し た標準人モデルと比較して低いことが考えられるが⁽³⁾、その他の要因についても探索する必 要がある。考えられる要因としてはセシウム摂取量の過大評価がある。セシウムの摂取量 は、WBC の測定値から3月12日の急性摂取シナリオを仮定して算定しているために、事 故発生からWBC測定までの間(大半は半年以上)に追加摂取があれば、摂取量を過大評価 することになる。この可能性については、時期の異なるWBC測定間のセシウム検出率の推 移や被ばく線量のアウトライヤー(追加の経口摂取に因るものと考えられる)の頻度等か ら推定することが考えらえる。他方、WBCの成人被検者は男性よりも女性の方が多く、女 性の方がセシウムの生物学的半減期が短いことを考慮すると摂取量はむしろ大きくなる。

今年度に見直した NaI(Tl)サーベイメータの年齢別換算係数については、これまでの線量 評価に用いたものとほぼ同等であった。次年度は、必要に応じて新しい年齢別換算係数を 用いた小児甲状腺被ばくスクリーニング被検者の甲状腺等価線量及びヨウ素/セシウム摂 取量比について再評価を行う予定である。

4. 個人の甲状腺形状を考慮した甲状腺吸収線量の評価

摂取シナリオの変更が無ければ、個人の甲状腺形状を考慮した甲状腺吸収線量の評価は、 既存の甲状腺等価線量の評価値に、個人の甲状腺体積の標準人モデルの甲状腺体積に対す る比の逆数を乗じて行えると考えられる。これは、甲状腺に線量を付与する大部分が¹³¹ からのβ線によるためである。次年度は、この確認とともに、MRI 画像から作成する数値 ファントムを用いて、個人の甲状腺形状の違いが甲状腺計測に及ぼす影響等について評価 を行う。

V. 結論

東電福島第一原発事故によって住民が受けた放射性ヨウ素による甲状腺内部被ばく線量 のより正確な把握を目的として、大気拡散シミュレーションや避難行動データ等を用いた 線量推計を行うための要素研究を今年度実施した。避難行動データの解析から、原発事故 発生の翌日(3月12日)におけるプルームのばく露が線量評価を行う上で重要であり、避 難開始時期によって被ばく線量が大きく変わる可能性があることを示唆する結果が得られ た。また、大気拡散シミュレーションの解析では、これまでに提供されたバージョン間の 違いを把握した。その他、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査に使用された検出器の年 齢別換算係数の見直しや、個人の甲状腺形状を考慮した甲状腺吸収線量の評価のための準 備などを行った。

VI. 次年度以降の計画

次年度に更新予定の大気拡散シミュレーションの結果及び避難行動データを用い、ヨウ 素やセシウム等の吸入による内部被ばく線量の再評価を行うとともに、これまでに得られ た結果を取りまとめ適宜公表してゆく。詳細は前術したとおりである。

VII. 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
 - N. Kunishima, O. Kurihara. et al. "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.
- B. 論文: 査読なし なし
- C. 国内学会発表
 - 1) ○栗原治. "原子力災害時における初期内部被ばく線量の測定と評価". 日本放射
線技術学会, 20171019-21 (広島市) (招待講演)

- 2) ○栗原治,金ウンジュ,谷幸太郎,明石真言葉,國島直晃."放射性ヨウ素からの 甲状腺被ばく線量推計の現状と課題".日本放射線影響学会,20171025-28(千葉 市)(招待講演)
- D. 国際学会発表

なし

E. 著書

なし

- F. 講演
 - O. Kurihara. "Experiences of population monitoring for internal contamination in the Fukushima nuclear disaster". 3rd Asian Dosimetry Group (ARADOS) meeting. 20171108-1110 (QST-NIRS, Chiba city).
 - O. Kurihara. ""Experiences of population monitoring for internal contamination in the Fukushima nuclear disaster". On-site Radiation Medical Preparedness and Dose Assessment. 20171201 (KHNP, Seoul).
- G. 主催した研究集会 なし
- H. 特許出願・取得 なし
- I. その他 なし

VIII. 参考文献

- 1) O. Kurihara. "External and internal dose assessments of Fukushima residents after the 2011 nuclear disaster". J. Natl. Inst. Public Health. 2018, 67: 11-20.
- E. Kim, K. Tani et al. "Estimation of early internal doses to Fukushima residents after the nuclear disaster based on the atmospheric dispersion simulation". Radiat. Prot. Dosim. 2015, 171: 398-404.
- E. Kim, O. Kurihara. et al. "Intake ratio of ¹³¹I to ¹³⁷Cs derived from thyroid and whole-body doses to Fukushima residents". Radiat. Prot. Dosim. 2016, 168:

408-418.

- 4) E. Kim, O. Kurihara et al. "Internal thyroid doses to Fukushima residents-estimation and issues remaining". J. Radiat. Res. 2016, 57: i118-i126.
- 5) E. Kim, O. Kurihara 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 Phys. 2016, 111: 451-464.
- 6) N. Kunishima, O. Kurihara. et al. "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.
- A. V. Ulanovsky, K. F. Eckerman. "Modifications to the ORNL phantom series in simulation of the responses of thyroid detectors". Radiat. Prot. Dosim. 1998, 79: 429-431.
- M. Brucer. "Thyroid radioiodine uptake measurement a standard system for universal intercalibration". Oak Ridge Institute for Nuclear Studies, Inc. Oak Ridge. Tennessee. ORINS-19. 1959.
- 9) H. Terada, G. Katata et al. "Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. Part II: verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion". J. Environ. Radioact. 2012, 112: 141-154.
- 10) G. Katata G, M. Chino et al. "Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi nuclear power station accident by coupling simulations of atmospheric dispersion model with improved deposition scheme and oceanic dispersion model". Atoms. Chem. Phys. 2015. 15: 1029-1070.
- 11) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会. "国会事故調報告書". 徳間書店. 592, ISBN 978-4-19-863486-5.
- G. Tanaka, H. Kawamura. "Measurement of ¹³¹I in the human thyroid grand using a NaI(Tl) scintillation survey meter". J. Radiat. Res. 1978, 19: 78-84.
- S. M. Shinkarev, K. V. Kotenko et al. "Estimation of the contribution of short-lived radionuclides to the thyroid dose for the public in case of inhalation intake following the Fukushima accident". Radiat. Prot. Dosim. 2015, 164: 51-56.

A study to improve the accuracy of early internal dose estimates of residents

in the 2011 Fukushima nuclear disaster

Osamu Kurihara National Institute of Radiological Sciences of National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST-NIRS)

Abstract

In order to understand accurate internal thyroid doses of residents from radioiodine due to the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, we conducted elemental studies on the internal dose estimation using atmospheric transport and dispersion model (ATDM) simulations, personal evacuation behavior data, and so on. The results of analysis of the personal evacuation data suggested that exposure to radioactive plumes on the next day after the occurrence of the accident (March 12) was important from the viewpoint of the dose estimation, and the resulting doses would be significantly influenced by the starting time of evacuation. It was also demonstrated that the evacuation behavior was of great variety among the individuals and the residents evacuated to various locations. Most of the residents started their evacuation shortly after the accident, supporting the result of a questionnaire survey on the National Diet Report. Beside, we performed a comparison of the ATDM simulation among different versions, revising age-dependent conversion factors for the device used in the screening survey for children regarding thyroid exposure, and a preparation for evaluation of the thyroid absorbed dose considering individual thyroid shapes.

Keywords

Fukushima Daiichi NPP accident, iodine, thyroid, internal exposure, evacuation behavior, ATDM

4-1-b 事故初期の住民内部被ばく線量評価の精緻化に関する包括研究

日本人甲状腺モデルの構築

分担研究者:楠原 洋之(東京大学大学院薬学系研究科 教授)

研究要旨

最近の日本人甲状腺容積を精緻化することを目的として、死後摘出された甲状腺の 重量の調査および超音波エコーグラム、MRIにより取得した画像情報に基づいた容積 推定を実施した。成人後の摘出甲状腺重量は年齢および性別が交絡因子であり、男性 では 65 歳以上で減少が認められた。女性では、加齢に伴う変動は男性よりも小さい。 25-69 歳では、男性と女性では 20%程度の差異が認められた。超音波エコーグラム、 MRIにより取得した甲状腺容積(健常成人男性、52名)について、左葉・右葉で容積 が異なり、左葉の方が平均して 20%程度の低値を示した。甲状腺容積は5倍程度の個 人差が認められた。超音波エコーグラムおよび MRI で推定した甲状腺容積は、左葉・ 右葉いずれも線形の相関を示し、回帰式を用いることで変換可能である。MRI で取得 した甲状腺容積は超音波エコーグラムを用いた推定値は 20%程度低値であり、摘出甲 状腺重量の中央値や ICRP reference person で設定される甲状腺容積と超音波エコーグラ ムで得た値の平均値は同程度であり、MRI で取得した値は 20%程度の低値を示した。

キーワード

甲状腺容積、MRI、超音波エコーグラム

研究協力者

稲野彰洋(福島県立医科大学 臨床研究センター 副センター長(准教授)) 緑川早苗(福島県立医科大学・放射線健康管理学講座、甲状腺内分泌学 准教授)

研究参加者

前田和哉(東京大学大学院薬学系研究科 講師)

I. 研究目的

日本人における放射性ヨウ素の甲状腺集積に関する個人間変動予測を精緻化するため、 甲状腺容積および体内動態パラメータを収集することを目的とした。平成25年度に実施し た放射性ヨウ素(123-I)の体内動態試験において、超音波エコーグラムを用いて測定した甲状 腺容積は、重量から推定される値の半分程度であった。福島県内で実施された子供を対象 とした検診で得られた甲状腺容積が報告¹⁾されているが、その平均値は従来の値よりも小さい。1986年に中村らが CT を用いて推定した甲状腺重量の平均値は 15g 程度である²⁾。超音波エコーグラムによる甲状腺容積推定は、10~50 mL の範囲において、MRI と同等とする報告³⁾もあるものの、超音波エコーグラムでは、近似法である方法論に由来する過小評価、実際に甲状腺容積が減少傾向にある可能性も否定できない。

甲状腺容積については、従来通りの値を想定して各種推定が行われていることから、現 代日本人において、甲状腺容積値の集団情報を得ることは不可欠である。そこで1)東京 都監察医務院における摘出甲状腺の重量データ、2)超音波エコーグラムおよび MRI を用 いて甲状腺容積を推定し、両者を比較する試験を行った。

II. 研究方法

1. 摘出甲状腺の重量調査

東京都監察医務院より、平成 24~28 年に摘出された甲状腺重量および年齢、性別に関する情報収集を行った。

2. 甲状腺容積の測定

① 被験者のリクルート

2011年3月11日以降、福島県内の居住歴のない、関東在住であり、20歳以上の男性を対象 とし、以下の選択基準、除外基準を設定した。

選択基準

- 1) 本試験への参加を志願する文書同意能力のある者
- 2) 同意取得時の年齢が 20 歳以上の男性
- 3)体格指数(Body Mass Index : BMI*)が18.5~27.0kg/m2の者 *BMI = 体重(kg)÷[身長(m)]2で算出する。
- 4) 診察、問診等から試験担当医師が健康上問題ないと判断された者
- 5) 祖父母及び父母が日本人である者
- 6) 2011 年 3 月 11 日以降、福島県内の居住歴のない、関東在住の者 除外基準
- 1) 現在、治療を必要とする急性疾患のある者
- 2) 過去に甲状腺機能の異常を指摘されたことがある者
- 3) 薬物依存、アルコール依存の者
- 4)体内金属所持や閉所恐怖症等、画像診断の評価に影響を及ぼすと 考えられる者
- 5) その他、試験担当医師が本試験の対象として不適当と判断した者

その結果、表 II-1 の背景情報を有する被験者を、本研究の参加者とした。福島県立医科大 学 試験担当医師は、本試験の実施に先立ち、予め倫理委員会の承認が得られた説明文書・ 同意文書に基づいて、被験者に対して本試験の内容等を十分に説明した。被験者には質問 する機会および本試験に参加するか否かを判断するのに十分な時間を与え、本試験の内容 を良く理解したことを確認した上で、試験開始前に本試験への参加について自由意思によ る同意を本人より文書で得た。同意文書には、説明を行った試験担当医師および同意した 被験者が署名し、日付を記入し、その写しを説明文書とともに被験者に渡した。同意文書 の原本は実施医療機関にて保管している。

人数	52
身長(cm)	170.7±6.1
体重(kg)	64.3±6.8
BMI (k/m^2)	22.1±2.1
年齢 (歳)	32.5±8.0
収縮期血圧(mmHg)	119.2±10.9
拡張期血圧 (mmHg)	68.7±8.5
心拍数(拍/分)	74.8±12.6
体温(℃)	36.5±0.5
遊離 T4	1.12±0.12
遊離 T3	2.91±0.26
TSH	1.74 ± 0.96
サイログロブリン	10.6±5.9
抗サイログロブリン抗体 ^a	2.16±1.63
抗 TPO 抗体 ^a	0.50 未満

表 II-1 被験者全体の背景

人数と抗 TPO 抗体以外は、平均値±標準偏差(SD)を表す

^{*1}名 抗サイログロブリン抗体値 218、抗 TPO 抗体値が 135 と高い値を示した

② 甲状腺容積の推定

a) 超音波エコーグラムによる甲状腺容積推定

LogiQ S7 Expert (GE 社製)、プローブ幅は4 cmを用いてデータ取得を実施した。超音波専門 医ならびに超音波検査士(体表)による検査実施した。甲状腺体積は、右葉、左葉に対し それぞれ横径、厚さ、縦径を計測し、回転楕円体モデルで算出する。甲状腺容積算出のた めの計算式は、下記の通りである。

甲状腺容積= $\pi/6 \times$ width × thickness × height

b) MRI による甲状腺容積推定

PET/MRI (Biograph mMR, シーメンス社)を用いて、頭頸部用コイルを装着した被験者 に対して脂肪抑制併用 T1 強調画像 (3D) および脂肪抑制併用 T2 強調画像 (2D,3D)の 3 手法を用いて、甲状腺容積測定のための MR 画像を横断像にて取得する。嚥下運動による アーチファクトの出現を防ぐため、被験者に測定中の唾液の飲み込みを我慢するよう指示 を与えた。

容積測定は、Biograph mMR あるいは Syngo.via 等の画像処理機能を用い,スライスごと に甲状腺の外輪郭に用手的に関心領域(ROI: region of interest)を設定し、スライス毎の面積を 測定すると共に総面積とスライス厚の積算、あるいは三次元解析により表示された値を容 積値とする。

③生化学検査

甲状腺容積と同日に、下記の生化学検査を実施した。

TSH、FT3、FT4、サイクログロブリン、抗サイログロブリン抗体、抗 TPO 抗体 予定採取血液量 10 mL。測定は株式会社 LSI メディエンスに委託した。

(倫理面への配慮)

本件は、臨床研究であるため、東京大学薬学部、東京都監察医務院、福島県立医科大学 倫理委員会の承認を得て、実施した。被験者に対して、文書による説明および同意を取得 した後、試験を実施した。今回の試験に参加することで、甲状腺異常などが発見されるこ とがある。US Preventive Services Task Force Recommendation では、無症候性成人に対する甲 状腺癌スクリーニング検査に反対の勧告が発出されている。試験に関係する全スタッフは この点を最大限考慮した。被験者候補への説明、選定、本研究の同意取得にあたり、検査 の実施後に結果が判明するリスクを必ず説明した上で、同意を得た。さらに、良くない検 査結果が得られた場合の医学的なフォロー方法までを考慮することとした。

III. 研究結果

1. 摘出甲状腺の重量調査

男性 7,651 名(0-99 歳)、女性 3,467 名(0-100 歳)の情報を得た。甲状腺重量は出生後、成長 に伴って増大し、20 歳付近で定常に達する。男性では、55 歳以降で中央値の低下が始まり、 65 歳以上では、25-29 歳の平均重量に対して有意な低下が認められる(図 III-1)。女性にお いても、55 歳以降に中央値の低下が認められるものの、その程度は男性よりも小さく、統 計的な有意差を得るには至らなかった(図 III-1)。



図 III-1 摘出甲状腺の重量の性差および加齢に伴う変動 A 男性および女性の個別のデータを示した。B 成人以降の甲状腺重量を5歳間隔で示した。 図中シンボルはメジアンを、バーは四分位数範囲(25-75%)を示す。**p<0.01, ***p<0.005 vs 25-29、\$ p<0.05, \$\$ p<0.01, \$\$\$ p<0.005 vs female

20~54 歳までの甲状腺重量の中央値は 20g(男性)、16g(女性)であり、女性の方が小さい値を示した(図 III-2)。20~54 歳までの、甲状腺重量の平均値及び分散、最小値、最大値を表 III-1 に示した。

表 III-1 20~54 歳における摘出甲状腺重量

性別	甲状腺重量	CV(%)	最小值	最大値
	(G, 平均值±標準偏差)			
男性	21.5±10.3	48%	0.69	122
女性	17.4±10.7	61%	3	147

甲状腺重量のヒストグラムを作成したところ、男性は2峰性を示し、15gおよび20gに ピークが認められた。一方、女性では12、13gにほぼ同程度のピークが、認められた(図 III-2)。

甲状腺中毒症など甲状腺を理由とした死因を除いた事例を対象として、20~54歳の甲状腺 重量について、ICD10に従った死因別に甲状腺重量を比較した(図 III-3)。男性では「内分 泌、栄養及び代謝疾患 E00-E90」のうち、何らかの欠乏を含む場合(図中 deficiency)、「消 化器系の疾患」、「症状、徴候及び異常臨床所見・異常検査所見で他に分類されないもの」 および「不詳」の群では、他の群に比較して、甲状腺容積のメジアンは低値を示した。女 性では、「内分泌、栄養及び代謝疾患 E00-E90」のうち、何らかの"欠乏"を含む場合(図中 deficiency)、「消化器系の疾患」、「先天奇形、変形及び染色体異常」において、甲状腺容積 のメジアンは低値を示した。何らかの欠乏症および「消化器系の疾患」は、男性・女性い ずれもメジアンは低値を示したことになる。



図 III-2 摘出甲状腺重量のヒストグラム





A 20~54 歳までの死因別例数 1 感染症及び寄生虫症(A00-B99)、2:新生物(C00-D48)、3: 血液及び造血器の疾患並びに免疫機構の障害(D50-D89)、4:内分泌、栄養及び代謝疾患 (E00-E90)、5:精神及び行動の障害(F00-F99)、6:神経系の疾患(G00-G99)、7:眼及び付属器の 疾患(H00-H59)、8:耳及び乳様突起の疾患(H60-H95)、9:循環器系の疾患(I00-I99)、10:呼吸器 系の疾患(J00-J99)、11:消化器系の疾患(K00-K93)、12:皮膚及び皮下組織の疾患(L00-L99)、13: 筋骨格系及び結合組織の疾患(M00-M99)、14:腎尿路生殖器系の疾患(N00-N99)、15:妊娠、分 娩及び産褥(O00-O99)、16:周産期に発生した病態(P00-P96)、17:先天奇形、変形及び染色体 異常(Q00-Q99)、18:症状、徴候及び異常臨床所見・異常検査所見で他に分類されないもの、 19:損傷、中毒及びその他の外因の影響(S00-T98)、20:傷病及び死亡の外因(V01-Y98)、21: 健康状態に影響を及ぼす要因及び保健サービスの利用(Z00-Z99)、22:不詳 B 甲状腺異常を除く各死因の甲状腺重量 Box and Whisker plot で示した。 2. 日本人健常者における甲状腺容積の測定結果

本試験にエントリーした被験者の背景情報を表 III-2に示した。甲状腺容積測定と同日 に、下記の生化学検査を実施した:TSH、FT3、FT4、サイクログロブリン、抗サイログロ ブリン抗体、抗 TPO 抗体。検査結果を入手後、異常値を中心に責任医師および分担医師か ら臨床的な意義、追跡の必要性についての医学的判断を仰いだ。その結果、医学的に追跡 を必要とする症例はなかった。画像取得は、下記の日程で実施した。

- 1日目 2017年11月18日(土) 4名
- 2日目 2017年12月10日(日) 15名
- 3日目 2017年12月23日(土) 16名
- 4日目 2018年1月14日(日) 17名

超音波エコーグラムおよび MRI の2つの方法により、被験者の甲状腺容積を推定した。 甲状腺の右葉と左葉では容積が異なり、いずれの方法で測定しても、左葉の方が右葉より も 19%(超音波エコーグラム)、23% (MRI) ほどの低値を示した(表 III-2、図 III-3)。甲状 腺左葉・右葉の容積は正の相関が認められた。左右の甲状腺容積の差異は個人差を示し、 超音波エコーグラムでは最大 43%、MRI では最大 55%の差異が認められたが、右葉の甲状 腺容積の絶対値への依存性は認められなかった(図 III-3)。

表 III-2 超音波エコーグラムおよび MRI を用いて測定した甲状腺容積

測定法	甲状腺容積	CV(%)	最小值	最大値	
	(mL, 平均值±標準偏差)				
超音エコーグラム	17.5±5.2	30%	7.53	36.3	
MRI	14.2±5.2	37%	7.15	33.2	



図 III-4 超音波エコーグラムおよび MRI を用いた甲状腺容積推定

男性被験者 50 名に対して、超音波エコーグラム (Echo) および MRI を用いて、甲状腺左 葉・右葉を測定した。

A 測定値を Box and Whisker プロットで示した。** p<0.01 B 甲状腺容積左葉および右葉の容積の相関を示した。C(右葉容積-左葉容積)/右葉容積を示した。

MRI で測定した左右いずれの甲状腺容積の方が、エコーよりも低値を示し、超音波エコー グラムで測定した容積に対して 20%小さい値を示した。各方法で測定した甲状腺容積を表 III-2 に示す。両手法で測定された右葉および左葉の甲状腺容積は線形の相関関係が認めら れた(図 III-4)。



図 III-5 超音波エコーグラムおよび MRI で測定された甲状腺容積の比較

A 超音波エコーグラムおよび MRI で測定された甲状腺容積を Box and whisker plot で示した。B 超音波エコーグラムおよび MRI を用いて推定された左葉、右葉の甲状腺容積の値の 相関を示した。

本試験にエントリーされた被験者の年齢、身長、体重、BMI と総甲状腺容積との相関を 検討した。体重および BMI とは、正の相関が認められた(図 III-6)。



図 III-7 甲状腺容積と被験者背景パラメータとの関連 超音波エコーグラム(赤)および MRI(青)により推定した甲状腺容積と被験者の体重、 BMI、身長、年齢との関連を図示した。グラフ中の実線は、回帰直線を示す。

また、被験者の甲状腺機能を反映した生化学検査値(TSH、FT3、FT4)との関連を検討した結果、FT3 および FT4 とは正の相関が認められたものの、この正の相関に統計学的な有意差を認めるには至らなかった(図 III-7)。



図 III-8 甲状腺容積と甲状腺機能との関連

超音波エコーグラム(赤)および MRI(青)により推定した甲状腺容積と被験者の TSH 値、 FT3 値、FT4 値との関連を図示した。グラフ中の実線は、回帰直線を示す。

IV. 考察

摘出甲状腺の重量は、65歳以降の男性で、加齢に伴う減少が認められた(図 III-1)。この 傾向は、Sawabe らの報告(表 IV-1)と一致している。女性では、男性に比較してこの傾向 やゆるやかであり、加齢に伴う重量減少には統計学的に有意な減少は認めらなかった。70 歳以降では、甲状腺重量の性差は消失していた。同様に、20-24歳、30-34歳においても、 甲状腺重量の性差は有意ではない。例数は少ないものの、19歳までも明確な性差は認めら れていない。

年齢	例数	容積	CV	最小值	最大値
60-69	87	15.0±5.3	35.3	6.2	31
70-79	340	13.6±5.1	37.2	5.3	38
80-89	281	13.3±5.4	40.3	5.5	35
90-99	88	12.0±3.9	32.6	6.2	25
100-	11	11.8±4.7	40.0	7.1	21

表 IV-1 高齢者における摘出甲状腺重量

参考文献4)より引用

20~54 歳を対象とすると、男性被験者における平均重量(あるいは中央値)は、ICRP reference personの甲状腺容積(20.5 mL)と近い値である。女性は、ICRP reference personに比較して 20%程度小さい値である。男性および女性のいずれにおいても、甲状腺重量は非常に大きな個人差認められた(図 III-2)。甲状腺機能の異常を死因とする事例を排除して、甲状腺重量との関連を解析した結果、いくつかの疾患では、他の群に比較して、甲状腺重量の低下が認められた(図 III-3)。特に、何らかの欠乏が疑われる事例をのぞいたが、中央値は大きく影響を受けないことを確認した(図 III-3 中、All-deficiency が該当)

健常成人における甲状腺容積情報を得るため、従来から用いられてきた超音波エコーグ ラムによる体積推定法と、MRI を用いて取得したより精度の高い画像情報に基づいた容積 推定法の2つのモダリティを用いることで、両データ間の相関を検討することとした。Van Isselt JW らが実施した臨床研究では、超音波エコーグラムでは甲状腺容積によらず、MRI よりも20%程度の過小評価が認められている³⁾。本試験には、52名の健常成人男性(表 II-1) をリクルートした。追跡が必要な状態にあると判断された被験者は0名であった。

左葉と右葉の甲状腺容積が異なり、右葉の方が平均値では 20%程度大きい事が、2つの 方法論で示された(図 III-4)。甲状腺左葉・右葉容積には相関が認められたが、右葉と左葉 の容積差は、甲状腺容積には依存していなかった。さらに、超音波エコーグラムと MRI で 推定された甲状腺容積との間には、左葉・右葉に関わらず、正の相関が認められ、回帰直 線を利用することで、両者の値を相互変換可能であることが確認できた(図 III-5)。しかし、 その絶対値は既報³⁾と異なり、MRI による容積の方が 20%程度の低値を示した。その結果、 超音波エコーグラムで推定した甲状腺容積は、摘出甲状腺の男性の中央値(20g)の10%程度の差異に留まるのに対して、MRIで測定された値は30%程度の差異に広がる。

摘出甲状腺と同様に甲状腺容積に個人差が認められ、今回の被験者群では最大で5倍程度の差異が認められた。被験者の各背景情報と、甲状腺容積との関連を比較した(図III-6)。 体重ないし BMI とは弱いながらも正の相関が認められたが、その他のパラメータとは相関が認められなかった。平成25年度に実施した臨床研究では、甲状腺容積と¹²³Iの甲状腺摂取率との間には明確な相関が認められなかったが、甲状腺容積の大きさも考慮した被曝線量の推定は今後の課題と考える。今回の試験で測定された甲状腺容積は、ある時間でのスナップショットであるため、同一被験者で甲状腺容積は一定値なのか、あるいは日内変動や日間変動を示すことがあり得るパラメータなのか、など、検討すべき項目もある。

V. 結論

死後摘出された甲状腺重量は加齢および性、および栄養状態の影響をうけることを確認した。20-55歳における中央値は、ICRP reference personで設定されている容積から期待される 重量とほぼ一致していた。超音波エコーグラムと MRI により甲状腺容積を推定した結果、 左葉・右葉でも絶対値が異なることが認められた。両手法は推定した甲状腺容積は線形の 関係を示し、推定値の変換が可能であることを確認した。超音波エコーグラムでは、ほぼ ICRP reference person における値や摘出甲状腺重量の中央値と 10%程度の差異であるのに対 して、MRI では 30%と差異が大きくなる。

VI. 次年度以降の計画

本研究により、健常成人男性の甲状腺容積を推定した結果、平均値あるいは中央値は従 来値との比較で、最大で 30%程度の乖離が生じ得ることを明らかとした。また、年齢によ り男性と女性では、異なる甲状腺容積をシミュレーション研究に供する必要性が示唆され た。超音波エコーグラムとは良好な相関関係が認められたことから、簡便さとして超音波 エコーグラムを利用したとしても、回帰式を利用することで相互変換が可能である。甲状 腺容積がいずれの方法によっても、最大で5倍程度の乖離が認められた。この容積に差異 が、甲状腺集積率に関連しているか否かは、放射線ヨウ素の被曝線量の精緻化を進める上 では課題となるであろう。体重あるいは BMI と弱い相関が認められたものの甲状腺容積の 個人差を説明するほど強い相関ではなかった。甲状腺容積の日内・日間変動に関する情報 も、精緻化を進める上で取り組むべき課題である。超音波エコーグラムでは、4 cm のプロー ブを用いたが、プローブ間で得られる情報精度の検証なども課題と考える。 VII. この研究に関する現在までの研究状況、業績

- A. 論文:査読あり該当なし
- B. 論文:査読なし該当なし
- C. 学内学会発表該当なし
- D. 国際学会発表該当なし
- E. 著書

該当なし

F. 講演

該当なし

- G. 主催した研究集会 該当なし
- H. 特許出願・取得該当なし
- I. その他 該当なし

VIII. 参考文献

- Suzuki S, Midorikawa S, Fukushima T, Shimura H, Ohira T, Ohtsuru A, Abe M, Shibata Y, Yamashita S, Suzuki S; Thyroid Examination Unit of the Radiation Medical Science Center for the Fukushima Health Management Survey. Systemic determination of thyroid volume by ultrasound examination from infancy to adolescence in Japan: The Fukushima Health Management Survey. Endocr J. 62(3):261-8, 2015
- 中村修、秋山三郎、佐野芳知、内山暁 CT による甲状腺重量(体積)の測定、日本放射線技 術学会雑誌、1986;42:612-619
- 3) van Isselt JW1, de Klerk JM, van Rijk PP, van Gils AP, Polman LJ, Kamphuis C, Meijer R, Beekman FJ. Comparison of methods for thyroid volume estimation in patients with Graves' disease. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 30(4):525-31, 2003 3
- Sawabe M, Saito, M, Naka M, Kasahara I, Saito Y, Arai T, Hamamatsu A, shirasawa T. Standard organ weights among elderly Japanese who died in hospital, including 50 centenarians. Pathol Int 56:315-323, 2006

Construction of thyroid model in Japanese

Hiroyuki Kusuhara

Graduate School of Pharmaceutical Sciences, the University of Tokyo

Abstract

In order to obtain thyroid volume in Japanese, weight of thyroid gland excised after death were collected, and a clinical study was conducted in healthy male volunteers to estimate thyroid volume based on imaging data acquired by ultrasonic echogram and MRI. Age and sex were confounding factor for the weight of thyroid gland. It was significantly decreased in men in 65 years and over, but such effect was not obvious in women. At the age of 25-69, a difference of about 20% on average was observed between men and women. The thyroid volume was acquired in 52 healthy adult males by ultrasonic echogram and MRI. There was significant difference between the left and right lobes. The left lobe showed a 20% lower volume than the right lobe on average. The thyroid volume showed 5 times difference in the volunteers enrolled in this study. Thyroid volume estimated by ultrasonic echogram and MRI showed reasonable linear correlation, and hence, it can be converted each other using the regression equation acquired in this study. Thyroid volume acquired by MRI was 20% lower than that by ultrasonic echogram on average. The mean volume estimated by ultrasonic echogram was similar to the weight of thyroid excised, and the thyroid volume set in ICRP reference person, whereas the value obtained by MRI showed a 20% lower volume.

Keywords

thyroid volume, MRI, ultrasonography

4-1-c 事故初期の住民内部被ばく線量評価の精緻化に関する包括研究

ソースタームと大気拡散シミュレーションの精緻化

分担研究者:永井 晴康(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力基礎工学 研究センター 環境・放射線科学ディビジョン ディビジョン長)

研究要旨

東京電力福島第一原子力発電所の事故時に放出された放射性物質による住民の被ば く線量について、平成26年度より3年計画で実施してきた研究「東京電力福島第一原 子力発電事故における住民の線量評価に関する包括研究」の成果をふまえ、被ばく線 量評価のさらなる精緻化を行う。本研究テーマにおいては、先行研究で整備した「放 射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布データベース」について、当時利用可能と なっていなかった新規測定データや放出源に関する情報を調査・収集し、データベー スに反映させる。これにより、放出源情報及び拡散解析結果のさらなる精緻化を行い、 住民の行動パターンや移行モデルと組み合わせた被ばく線量の推計の高精度化に資す る。

本年度は、先行研究におけるデータベース構築の際に利用可能となっていなかった 新規測定データや放出源に関する情報について文献調査を行い、環境省 SPM フィル ターの I-129 濃度の時系列データ、大気拡散解析、炉内の事故進展解析等の情報を収集 し整理した。また、これまでに構築した「放射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分 布データベース」の維持管理と機能拡張を行い、解析機能を強化し利便性を向上した。 さらに、放出源情報の最適化手法と気象場の再現性を向上するための計算手法として、 ベイズ推計による最適化と不確実性を評価する手法と気象モデル WRF によるアンサ ンブル計算手法を開発し、これらの解析結果の妥当性を確認した。

キーワード

放出源情報、大気拡散シミュレーション、福島第一原発事故、線量再構築、放射性 物質の時間空間分布データベース

研究協力者

山澤弘実(名古屋大学 大学院工学研究科 エネルギー理工学専攻 教授) Matthew Hort(UK Met Office, Head)

研究参加者

寺田宏明(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究セン

ター 環境・放射線科学ディビジョン 環境動態研究グループ 研究副主幹) 都築克紀(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究セン ター 環境・放射線科学ディビジョン 環境動態研究グループ 技術副主幹)

古野朗子(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究セン ター 環境・放射線科学ディビジョン 環境動態研究グループ 研究副主幹)

門脇正尚(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究セン ター 環境・放射線科学ディビジョン 環境動態研究グループ 研究員)

掛札豊和(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究セン ター 環境・放射線科学ディビジョン 環境動態研究グループ 派遣労働者)

I. 研究目的

東京電力福島第一原子力発電所(以降、福島第一原発と称す)の事故時に放出された放 射性物質による住民の被ばく線量の把握において、ヨウ素 131 等の短半減期核種による事 故初期段階における内部被ばく線量については、現時点では実測に基づく評価が困難であ る。また、外部被ばく線量についても、実測データがない地点でのプルーム通過時の直接 線量と地表汚染からの線量の積算を評価することはできない。そこで、放射性物質の空間 分布及び時間変化を再現可能な大気拡散シミュレーションを活用し、実測データと整合す るように拡散状況を再現することにより、実測データを時間空間的に補完した線量推計が 可能となる。本研究では、上記目的で実施した先行研究において作成した「放射性物質大 気濃度・沈着量の時間空間分布データベース」について、新規実測データ、解析手法等を 反映することによりさらに精緻化することを目的とする。

このデータベースと他の研究項目で実施する住民の行動パターン及び陸上の核種移行モ デルを組み合わせることで、実態に近い被ばく線量評価が可能となる。また、データベー スの公開により、事故による環境影響の把握と将来予測にも有効な基礎・基盤的な技術及 び知見としての活用が期待される。

II. 研究方法

本研究では、先行研究において大気拡散シミュレーションにより事故時の放射性物質の 拡散状況を再現することで構築した「放射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布データ ベース」(図 II-1)について、新規測定データや放出源に関する情報を反映させることで、 放出源情報及び拡散解析結果のさらなる精緻化を行う。



図 II-1 放射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布データベースの概念図

この目的を達成するために、具体的に以下の課題を実施する。 実測データや解析に関する文献調査:

先行研究におけるデータベース構築の際に利用可能となっていなかった新規測定データ や放出源に関する情報について文献調査を行う。具体的には、環境省の SPM 捕集用ろ紙に 付着した放射性核種分析による大気中の放射性核種濃度の多地点・連続データについては、 Cs-134、Cs-137 だけでなく、I-129 の分析が進められており、データがまとまりつつある。 また、炉内の事故進展解析と環境測定データに基づく拡散解析の融合により、放出源情報 や拡散挙動のさらなる精緻化を目指す取り組みが行われている。これらの情報を収集・整 理する。

放出源情報と大気拡散シミュレーションの精緻化:

収集・整理した新規測定データや放出源に関する解析結果を「放射性物質大気濃度・沈 着量の時間空間分布データベース」に導入し、データベースの解析機能を用いて放出源情 報及び拡散過程の再解析を実施する。また、放出源情報の最適化手法や気象場の再現性を 向上するための計算手法の検討を行う。さらに、他の研究項目によるデータベースを用い た被ばく線量評価研究からのフィードバックを反映させることにより、放出源情報及び拡 散計算の精緻化を行う。

平成 29 年度は、1. 実測データや解析に関する文献調査、2. データベースの機能拡張、 3. 放出源情報の最適化手法の検討、及び 4. 気象場の再現性向上の検討を進める。各研究 項目の実施方法を、以下に記述する。 1. 実測データや解析に関する文献調査

福島第一原子力発電所事故に関する環境モニタリングデータ、放出源推定、大気拡散解 析、炉内事象進展解析等の情報について調査を行う。調査は、科学論文、関係機関の報告 書、ウェブサイト上公開情報等を対象として実施する。

2. データベースの機能拡張

先行研究で開発した「放射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布データベース」について、解析作業の流れに合わせて画面構成の全体的な見直しを実施し、解析機能と作図機 能を分離するなどの操作性を向上させて高効率化を図る。また、「放出源設定」や「放出源 適用」機能に対して機能拡張を行い、解析機能を強化し利便性を向上する。

3. 放出源情報の最適化手法の検討

放出源情報の最適化手法として、ベイズ推計による最適化と不確実性を評価する手法を 開発し、解析結果の妥当性を確認する。解析手法としては、Bayesian synthesis method

(Enting, 2002)¹⁾を用いた CO₂放出量推定手法(Gurney et al. 2003)²⁾を参考にした。 各測定地点、時刻の測定値(測定数分の要素からなるベクトル)**d**と対応する大気拡散計算 値は、放出率時系列(放出期間分割数分の要素からなるベクトル)**s**と拡散解析によるソー ス・レセプター・マトリックス(SRマトリックス)**M**の積として表され、放出率時系列と 大気拡散計算が完全に正しい場合次式が成り立つ。

d = Ms

変数の定義は以下のとおり。

- ・放出区分:t_s=1 to N_s(2011年3月12日0時~4月1日0時、1時間間隔、480)
- ・測定要素: r = 1 to Nr・・・任意の時刻と地点のデータ(並び順は任意)
- ・測定値: **d**・・・測定要素 r の列ベクトル
- ・SRマトリックス: \mathbf{M} ・・・測定要素 r と放出区分 t_s の $N_r \times N_s$ 行列
- ・放出率: s・・・放出区分 t_s の列ベクトル

実際には、測定値及び計算値には誤差があるため、これらの誤差を考慮して上記関係を 最もよく再現する放出率の最適値を求めることになる。そのため、ベイズ推計では以下の 変数を導入する。

放出率の先験情報:s0

・不確実性の共分散行列: $C(x) = \sigma x(i)^2 \delta(i,j) \cdot \cdot C(x)^{-1} = \sigma x(i)^{-2} \delta(i,j)$ これらを用いた以下のコスト関数 J を最小にする放出率 s を求める。

 $\mathbf{J} = [(\mathbf{M}\mathbf{s} - \mathbf{d})^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{d})^{-1}(\mathbf{M}\mathbf{s} - \mathbf{d}) + (\mathbf{s} - \mathbf{s}_0)^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{s}_0)^{-1}(\mathbf{s} - \mathbf{s}_0)]/2$

J が最小となる放出率 s は、以下のようになる(Tarantola, 1987)³⁾。

 $\mathbf{s} = \mathbf{s}_0 + [\mathbf{M}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{d})^{\cdot 1}\mathbf{M} + \mathbf{C}(\mathbf{s}_0)^{\cdot 1}]^{\cdot 1}\mathbf{M}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{d})^{\cdot 1}(\mathbf{d} - \mathbf{M}\mathbf{s}_0)$

また、この放出率sに対する不確実性の共分散行列は、以下のようになる。

 $\mathbf{C}(\mathbf{s}) = [\mathbf{M}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{d})^{\cdot 1}\mathbf{M} + \mathbf{C}(\mathbf{s}_{0})^{\cdot 1}]^{\cdot 1}$

この解析手法による結果の妥当性を以下の条件の試験解析により確認した。放出率の先 験情報 so としては、原子力機構の放出量推定結果(Katata et al., 2015⁴⁾を Chino et al., 20165の結果に基づき改訂)を、1時間間隔に設定しなおした放出率を用いた。この放出率 についての不確実性の共分散行列 C(so)の値としては、各時刻の放出率の 100%を与えた。 測定データ **d** としては、¹³⁷Cs についての SPM 濃度時系列データ(Oura et al., 2015⁶⁾、99 地点、有効データ総数 14331)、航空機モニタリングの沈着量分布 ワ(データ格子数 3523)、 日降下量測定データ⁸⁰(13地点、有効データ総数260)、福島県内⁹⁰、原子力機構¹⁰⁻¹²⁾、日 本分析センター13)、高エネルギー加速器研究機構 14)等で行われたダストサンプリングによ る濃度データ(47 地点、有効データ総数 382)を用いた。測定値の不確実性の共分散行列 C(d)の値としては、各データの全測定値に対する標準偏差を基に一定の不確実性(SPM 時 系列データの濃度 : 20 Bq m^{.3}、航空機モニタリングの沈着量 : 300000 Bq m^{.2}、日降下量 : 1000 Bq m⁻² day-1、ダストサンプリングによる濃度: 70 Bq m⁻³)を与えるとともに、それ らの測定地点と時刻における計算値の不確実性として、その格子点と周辺格子点(東、南、 西、北の 4 点)との差異を用いて求めた地点及び時刻ごとに変化する不確実性を加えた。 具体的には、測定点の格子点値と周辺の 4 格子点値との差の絶対値の合計をこれら 5 格子 点値の平均で割った値を、各測定値の不確実性の値にかけることで測定地点における計算 値の不確実性とした。これは、測定地点での計算による水平分布の勾配が大きいほど、計 算が時間、空間的にずれた際の計算値の変化が大きくなることから、計算結果の不確実性 が大きくなることを表している。また、最適化した放出率が負の値になることもあるが、 その場合は放出率の最小値(1×10¹⁰ Bq h⁻¹)を与えた。

4. 気象場の再現性向上の検討

先行研究において、放射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布データベースによる¹³⁷Cs 大気中濃度を SPM フィルター観測値(Oura et al., 2015)⁶⁰と比較したところ、濃度の時 間・空間分布に観測値との差異が見られた。この要因としては、放出源情報以外に気象場 の再現性が指摘されている(平成 28 年度研究報告書)。また、その後の解析により、計算 領域外の太平洋上に輸送されたプルームの再流入を考慮できていないことによる過小評価 も示唆された。そこで、本年度は、太平洋上に輸送されたプルームの再流入を考慮するた め、拡散計算の対象領域のうち広域を東方へ拡大した(図 II-2)。さらに、気象場の再現性 を向上するための計算手法として、気象モデル WRF によるアンサンブル計算手法を開発し た。本アンサンブル計算では、初期値誤差に起因する気象場の不確定性を考慮するため、 複数のアンサンブル初期値を用いて気象場を複数ケース計算し、各ケースの気象場に基づ く放射性物質の大気拡散シミュレーションを実施した。気象場の計算に用いたモデルおよ びシステムを以下に示す。



図 II-2 計算領域の変更

① 気象モデル

気象場の計算には、米国大気研究センターNational Center for Atmospheric Research (NCAR)を中心に現在開発が進められており、気象学と計算科学の最新の知見が導入され ている Weather Research and Forecasting model (WRF Version 3.6.1、以下「WRF」と いう)(Skamarock et al., 2008)¹⁵⁾を用いた。WRF は、標高、土地利用等の地形データや 数値気象予報値や客観解析値等の気象格子点データを入力として、運動量 3 成分、熱エネ ルギー、水蒸気量、雲水量等についての保存式を解くことにより、対応する風速や気温、 降水量等の気象要素を計算する三次元非静力学気象予測モデルである。大気放射、地表面 熱収支、大気境界層乱流、雲・降水などの物理過程を考慮することが可能である。

② データ同化解析システム

本研究では、四次元変分法(Talagrand and Courtier, 1987)¹⁶⁾を用いて、WRF による 気象場の計算への気象観測値のデータ同化を実施した。四次元変分法は、気象モデルの計 算値と観測値との差異を定量的に表す評価関数を設定し、計算値を修正することにより観 測値に最も整合する最適値を探索する手法であり、先行研究で福島第一原子力発電所事故 の大気拡散計算に対してその有効性が示された(平成 28 年度研究報告書)。本研究では、 NCAR で開発されたデータ同化解析システム WRFDA Version 3.6.1 (Huang et al., 2009¹⁷⁾; Barker et al., 2012¹⁸⁾、以下「WRFDA」という)を用いた。

本研究では、アンサンブル計算手法による大気拡散計算の再現性向上の確認のため、3月 12日夜から13日未明にかけて浜通り北部のSPM 観測地点(原町、相馬、新地)で¹³⁷Cs 大気中濃度の上昇が測定されたケースを対象として、アンサンブル気象場を用いた大気拡散シミュレーションを実施した。本ケースは、先行研究において、¹³⁷Cs 大気中濃度の時間 空間分布に観測値との乖離が見られ、気象場の再現性が要因として指摘されている期間で ある(平成 28 年度研究報告書)。

気象場アンサンブル計算のためのアンサンブル初期値は、WRF 及び WRFDA によって計算されたコントロール実験の結果から作成した。コントロール実験の計算期間は2011年3月11日9時~3月14日0時(日本時間)とした。WRFの計算条件について表 II-1に示す。WRFDAを用いたデータ同化解析は Domain 1(図 II-2)を対象領域とし、先行研究と同じ観測値を同化データとして使用した(平成28年度研究報告書)。このデータ同化解析によって修正された初期値及び境界値を用いて、WRFのネスティング計算により子領域(Domain 2及び Domain 3)の気象場を計算した。

計算領域		Domain 1	Domain 2	Domain 3	
時間ステップ		60秒	20秒	6秒	
格子数		100×100×31	190×190×31	190×190×31	
水平格子幅		9 km	3 km	1 km	
	雲微物理	WSM6			
	積雲対流	Betts-Miller-Ja	なし		
物理と言い	接地境界層	MYNN			
初理モノル	地表面過程	5-layer therma	l diffusion		
	大気境界層	MYNN Level	2.5		
	大気放射	RRTM(長波)	放射)及びDudhia	(短波放射)	
解析値ナッジング		不使用			

表 II-1 WRF の計算条件

Domain1~3は図 II-2を参照

コントロール実験からアンサンブル初期値を作成する手法を示す。本研究では、3月11日21時を中心として、前後約1時間にアンサンブル初期値作成期間を設け、その期間内のコントロール実験の12分ごとの出力(リスタート用ファイル)をアンサンブル初期値とした(図II-3、表II-2)。このアンサンブル初期値とコントロール実験で用いた境界値を入力として、2011年3月11日21時~3月14日0時のWRFネスティング計算を実施することで、コントロール実験を含む合計10メンバー(コントロール実験及びメンバー実験A~I)の気象場を計算した。

上記の手法で得られた10メンバーの気象場を入力とした大気拡散シミュレーションを実施した。大気拡散モデルは先行研究で改良した GEARN を用いて、先述の計算領域のうち Domain 2 と Domain 3 のネスティング計算を行った。放出源情報には、先行研究でも使用

した最新のデータ(Katata et al., 2015) 4を1時間間隔に整理したものを使用した。その他の大気拡散計算の計算条件を表 II-3 に示す。この計算条件による大気拡散計算結果をSPMフィルター¹³⁷Cs 濃度観測値と比較することにより、¹³⁷Cs 大気中濃度の再現性を検証した。



図 II-3 コントロール実験とアンサンブル初期値

表 II-2 アンサンブル初期値作成時刻とアンサンブルメンバー実験名

		00	12	24	36	48
叱	20	А	В	С	D	Е
н4	21	コントロール実験(CTRL)	F	G	Н	Ι

表 II-3 GEARN の計算条件

計算領域	Domain 2	Domain 3
計算期間	2011年3月12日0時~3月	14日0時(日本時間)
時間ステップ	12秒	4秒
格子数	188×188×29	188×188×29
水平格子幅	3 km	1 km

(倫理面への配慮)

本研究は、放射性物質の大気拡散シミュレーションが実施内容であり、倫理面への配慮が必要な状況は発生しないと考えられる。

III. 研究結果

1. 実測データや解析に関する文献調査

調査により得られた情報の内訳を、公開年順、アルファベット順に整理し、付録に記載 した。環境データによる放出源推定の情報が23件、炉内データによる放出源推定の情報が8 件、環境データ情報が49件、炉内データが5件、拡散解析が33件得られた。以下に各情報の 概略を記載する。

① 環境データによる放出源推定

このカテゴリに分類した放出源推定情報は、大気拡散シミュレーションと環境データを 組み合わせた逆推定法によって得られたものである。逆推定法は、環境中の放射性核種濃 度の測定値または線量率と大気拡散シミュレーションから導いた推定値を比較して放出量 を評価するリバース法と、リバース法に似ているが数学的により洗練されたアプローチで あるインバース法の二つがある。事故からこれまでの推定の進展としては、事故直後の限 られた情報のもとで 2011 年 3 月中に公開されたもの(ZAMG, 2011)、事故後数ヶ月の間に 国内の機関により推定されたもの(Chino et al., 2011)、その後、新たな環境データや事故 情報の追加、進展等に伴い国内外の機関が推定したもの(Stohl et al., 2012、Winiarek et al., 2012、TEPCO, 2012 など)、既報値を改訂したもの(Katata et al., 2012、Terada et al., 2012、 Kobayashi et al., 2013、Saunier et al., 2013、Winiarek et al., 2014、Katata et al., 2015)が挙げら れる。得られている測定値の大半が日本国内の陸上に偏っていることから、リバース法或 いはインバース法による放出源推定の大半はプルームが陸上に存在した期間を主な対象と しているが、大気モデルと海洋モデルの結合シミュレーション及び海洋モニタリングデー タの利用によりプルームが洋上に存在したと思われる期間の推定を実施したものもある (Kobayashi et al., 2013、Katata et al., 2015)。

放出時の核種組成としては、大気中の濃度に代表される環境データから推定されたもの (Chino et al., 2011、Katata et al., 2012) 、炉内インベントリと環境データの双方を用いて推 定されたもの(Sugiyama et al., 2012、Saunier et al., 2013、Katata et al., 2015)が存在した。

2015年になって、大気汚染モニタリングポストの SPM 計ろ紙テープに捕獲されていた放 射性核種の分析結果が発表され(後述)、そのデータを用いた推定放出量の改良も実施さ れた(Yumimoto et al., 2016)。また、環境中¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 比の分析値を用いて事故当初の放出 量の大きかった期間ごとに 1~3 号機のうちどの原子炉が主要な放出源であったかの推定も 試みられた(Chino et al., 2016)。大気汚染モニタリングポストのデータは時間の経過とと もに拡充されており、これまでデータが希少であった福島第一原発の近傍を含めた地点の データも出てきているため、推定放出量の更なる精緻化が期待される。

② 炉内データによる放出源推定

このカテゴリに分類した放出源推定情報は、炉内の物理化学現象を炉内物理モデルに よって解析した事故進展解析によるものである。事故からこれまでの進展としては、限ら れた情報のもとで 2011 年 3 月中に公開されたもの(IRSN, 2011)、事故後数ヶ月の間に国 内の機関が推定したもの(NISA, 2011)、核種の炉内インベントリから推定されたもの(NISA, 2011b、Mathieu et al., 2012、Hoshi and Hirano, 2012、Hoshi et al., 2013)が挙げられる。

③ 環境データ情報

得られた 49 件の文献情報のうち、比較的事故から間もない時期に発表されたものを大別 すると、日本国内で取得されたデータについて発表したもの(Furuta et al., 2011、Fukushima Pref., 2011、Amano et al., 2012、Haba et al., 2012、Kanai, 2012、Momoshima et al., 2012、Nagaoka et al., 2012、Okura et al., 2012、Adachi et al., 2013、Doi et al., 2013、Komori et al., 2013、Nagakawa et al., 2014、Nitta et al., 2012、Adachi et al., 2013、Doi et al., 2013、Komori et al., 2013、Nagakawa et al., 2014、Nitta et al., 2014)、国外で取得されたデータについて述べたもの(CTBTO, 2011、 Hsu et al., 2011、Masson et al., 2012)、文科省の大規模広域測定プロジェクトについて述べ たもの(Sanada et al., 2014、Mikami et al., 2014、Saito et al., 2015)、比較的広域で線量率を 測定したもの(Hososhima et al., 2015、Nishizawa et al., 2015)に分けられる。その中でもFuruta et al., 2011、Okura et al., 2012、Nagaoka et al., 2012、Doi et al., 2013 は、化学形についても言 及しており、初期の頃の貴重な測定データとして拡散解析にも頻繁に引用されている。ま た、Kaneyasu et al., 2012、Doi et al., 2014 は、粒径分布を与えた拡散解 析の基礎となっている。

事故初期に日本原子力研究開発機構で暫定的に取得されたデータは、利用価値は高いも のの、測定地点が1地点だけであり、広域拡散解析の検証目的に対してはやや不足であっ た。しかし、事故から時間が経過するにつれ、エアロゾルとしての放射性核種の挙動解明 を試みたもの(Abe et al., 2014、Miyamoto et al., 2014、Xu et al., 2014、Igarashi et al., 2015、 Kaneko et al., 2015、Kaneyasu et al., 2017) 、NaI シンチレーションカウンタの波高分布を解 析したもの(Hirayama et al., 2013, 2015, 2017、Terasaka et al., 2016)、長半減期核種から短半 減期核種の分布を推定したもの (Tagami et al., 2013、Torii et al., 2013、Muramatsu et al., 2015) 等、1 点のみの環境中資料の測定結果について示すだけでなく、既存の複数地点のモニタリ ングデータを解析した論文が発表されはじめた。中でも大気中汚染物質測定モニタリング ポストで利用されている SPM 計のフィルターテープを分析したもの(Tsuruta et al., 2014, 2018、Oura et al., 2015a, 2015b)は、福島原発近傍を含め、これまでデータ分布が疎だった 地域をもカバーしており、今後の放出量推定に際して非常に貴重なデータである。また、 ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 比の測定により放出号機推定を試みたもの(Jackel et al., 2016)、高線量区域内で Cs を再測定したもの (Ochiai et al., 2016、Yamaguchi et al., 2016、Furuki et al., 2017、Higaki et al., 2017、 Imoto et al., 2017、Satou et al., 2018) 、ヨウ素の化学形による大気中での拡散プ ロセスを解析したもの(Lebel et al., 2016)等も出てきており、放出号機の特定や詳細な沈着

量解析などに有用となる可能性がある。

④ 炉内データ情報

炉内インベントリの情報としては、Nishihara et al., 2012 が事故後7年を経た現在でもスタ ンダードとなっている。Tanabe, 2012a, 2012b は炉心溶融シナリオを提供しており、今後、 各号機の放出量推定に利用できる可能性がある。Hidaka et al., 2014 は、福島事故の炉心冷却 過程で蓄積した汚染水中の¹³¹I、¹³⁷Cs の量を推定した。Hidaka et al., 2017 は、3 月下旬の¹³¹I 放出が2号機および3号機原子炉建屋の地下に蓄積された汚染水の表面上の¹³¹I気液分離に よることを確認したうえ、3 号機サプレッションプール通気中の有機ヨウ素放出を Katata et al. 2015 による¹³¹I/¹³⁷Cs 比を用いて推定した。

⑤ 拡散解析

得られた 33 件の情報のうち、事故から比較的間もない時期に東日本領域での暫定的な拡 散解析を実施したものとしては、Morino et al., 2011、Srinivas et al., 2012 が挙げられる。Masson et al., 2011、Takemura et al., 2011、Yasunari et al., 2011、Draxler et al., 2012、Mathieu et al., 2012、 Fei et al., 2014、Marzo, 2014 は全球を対象に暫定的な拡散計算を実施し、欧州等遠方の領域 で人体に影響を及ぼすほどの内部被ばくが起こりえないことを早期のうちに確認した。

自国の大気拡散システムの性能を確認したものとしては、Dvorzhak et al., 2012 、Chanpion et al., 2013、Korsakissok et al., 2013、Meszaros et al., 2015 が挙げられる。

2013 年に入ると、アンサンブル予報等の手段を導入したもの(Haszpra et al., 2013、 Nakajima et al., 2017)、沈着や大気拡散の詳細メカニズム解析や感度解析を実施したもの (Morino et al., 2013、Hu et al., 2014、Arnold et al., 2015、Leadbetter et al., 2015、Kajino et al., 2016、Yoshikane et al., 2016、Lee et al., 2017、Sarkar et al., 2017、Sanada et al., 2018)、緊急 時後期、二次汚染について解析したもの(Steinhauser et al., 2015)、分解能依存性について 調査したもの(Evangeliou et al., 2015、Sekiyama et al., 2015)等の報告が出されるようになっ た。¹³¹I、¹³⁷Cs に関しては、湿性沈着が拡散計算の精度に大きく影響することが確認された。 さらにヨウ素に関しては化学形態の影響も大きい。水平分解能に関しては、Sekiyama et al., 2015 が 15km、3km、500m の 3 通りで福島県内の拡散の再現性を調査した。15km では福島 県東部の山岳による複雑な風の構造を再現できないが、3km と 500m では地形の効果を再現 した類似性が結果となることを示した。計算コストを考慮すると 3 km程度が妥当であるこ とが示された。

またモデル間の相互比較試験も実施され、Draxler et al., 2015、Saito et al., 2015 で報告され ている。ワークショップ報告としては Hanna et al., 2016、Kajino et al., 2018 がある。Kajino et al., 2018 の報告によると、拡散予測精度の向上に際しては湿性沈着スキームの改良が重要だ が、現時点ではまだスキーム間の優劣について結論に至っていない。エアロゾルの特性に ついての理解も不十分であり、湿性沈着と合わせて今後の重要な課題である。大気汚染モ ニタリングポストに設置された SPM 計のフィルターテープ上から採取された放射性セシウムの分析データや、セシウムボールを含むエアロゾル粒子の測定等は、拡散解析の検証用 データとして非常に重要であり、近い将来それらが揃ってパラダイムシフトが起こること が期待される。

2. データベースの機能拡張

先行研究で開発した「放射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布データベース」について、機能拡張を行い、解析機能を強化し利便性を向上した。

① データベース解析機能の改良

解析作業の流れに合わせて画面構成の全体的な見直しを実施し、解析機能と作図機能を 分離するなどの操作性を向上させて高効率化を図った。

a) 「放出源設定」機能の機能拡張

対象核種の選択画面に核種が全て一律に表示されていた。これを、希ガス系核種 15 種、 ヨウ素系核種 7 種 3 形態(ガス状 2 種(化学形: I₂及び CH₃I)及び粒子状)、その他の粒 子状核種 37 種及び非放射性物質ガス 1 種にグループ分けして表示するように修正した(図 III-1)。

b) 「放出源適用」機能の機能拡張

放出源設定機能で設定した核種に対し、放出源適用機能の画面上で核種や出力変数を選択した後に放出率適用データベースを作成するようになっていた。これを、放出源設定機能で設定した核種すべてを一括で処理する機能に変更した(図 III-2)。また、放出率適用データベース作成時にしか作図が出来なかったが、作図機能を分離することにより、作成した放出率適用データベースに対して、いつでも作図できるようにし利便性を向上した。

c) 「分布図・時系列作成」機能の機能拡張

「放出源適用」画面内で分布図作成と時系列グラフ作成を行っていた。これを、個別に 作業出来るように処理を分割し、それぞれ別機能とした(図 III-3、図 III-4)。また、これ まで分布図作成時に使用する描画色設定ファイルは固定としていたが、描画色設定ファイ ルの作成・保存・呼び出し機能を新たに追加し(図 III-5)、任意の描画色設定ファイルで 作図可能とした。さらに、時系列グラフを作成する地点をグラフ作成時に毎回選択する形 式としていたが、事前にグラフ作成地点をリスト化し(図 III-6)、グラフ作成時には、地 点リストを選択する形式に変更した。

d) 「システム設定」機能の追加

単位放出データベースの選択、作業ディレクトリ、分布図作成における描画色設定の初期値を画面上で設定する機能を新たに追加した(図 III-7)。

② データベース動作確認試験

開発したデータベースの動作確認試験を実施し、本データベースが正常に動作し、それ により得られる結果が妥当であることを確認した。



図 III-1 対象核種選択機能画面



図 III-2 放出源適用機能画面

WSPEEDI-II DataBase System × 図い ファイル(F) 編集(E) 表示(V) お気に入り	VSPEEDI データベース計算機能((A) ツール(T) ヘルプ(H)						
		,	WSPEEDI-II Da	taBase System			Logout
対象	RDB: Fukushima(2011) 対象期間:201	1/03/12 00:00(JST) ~	- 2011/03/31 00:00(JST)	放出地点	a:緯度37.4217度、経度141.0356度	
拡散分布解析 分	布図作成 時系	列グラフ作成	図形表示	ダウンロード		ファイルマネージャ	システム設定
図形作成 <u>Co</u>	dor Map						
作回Script Open Save	Save as						
拡散分布解析済みファイル	訳			拡散分布劇	¥析済みファ	イル (確認用の解析結果を選択)	
表示变数	: CONC ¥			GEARN	d2 20110	312030000.nc [2011/03/12 12:00:00JST]	
表示核種	: Cs137 🗸			GEARN	d2 20110	312150000.nc [2011/03/13 00:00:00JST]	
表示高度	:0 🗸			GEARN	d2_20110	\$13030000.nc [2011/03/13 12:00:00JST]	
				GEARN	d2 20110	313150000.nc [2011/03/14 00:00:00JST] 314030000 nc [2011/03/14 12:00:00IST]	
Color Map 選択	: /ssd_work/wspee	di/hdd/kakefuda/te	st_rrate-Cs137.cpt	GEARN	d2 20110	314150000.nc [2011/03/15 00:00:00JST]	
通択則に"Color Map"メノビ作	- RX			GEARN	d2_20110	315030000.nc [2011/03/15 12:00:00JST]	
「「「「」「「」」」「「」」」」」」」」」」」」」」」」」」「「「」」」」」」	: O off @ on			GEARN	d2 20110	315150000.nc [2011/03/16 00:00:00JST] 316030000 nc [2011/03/16 12:00:00JST]	
1 4/1				GEARN	d2 20110	316150000.nc [2011/03/17 00:00:00JST]	
海岸線	: O off 🖲 on Hi	gh resolution 🗸					
都道府県境界	: off on						
標高コンターライン	: • off O on Ir	aterval: 100m 🗸					
風速ベクトル	: ${}^{\mbox{\scriptsize off}} \odot$ on						
風速ベクトルの間引き	: X:5 mesh, 1	Y:5 mesh					
風速ベクトルのサイズ	: 40 [(m/s)/cr	n]					
放出地点表示	: • off • on •	~					
画像出力先:/ssd_work/wspeed	i/hdd/kakefuda/dist_im	age_d2/dist_CON	C_Cs137				
man 1 march 1							

図 III-3 分布図作成機能画面

-							- 🗆 X
(-) 🖉 http://133.53.28.2	206:8180/wspeedi_db/time-v	viz.jsp			- C active	X adobe	P - 💮 🌣 😊
WSPEEDI-II DataBase System	× 🗷 WSPEEDI データベース	計算機能 (📑					
ファイル(F) 編集(E) 表示(V) (お気に入り(A) ツール(T) ^	ルブ(H)					
			WSPEEDI-II D	ataBase System			Logout
	対象DB: Fukushi	ma(2011) 対象期間:20	11/03/12 00:00(JST)	~ 2011/03/31 00:00(JST)	放出地点:緯月	度37.4217度、 経度141.0356度	
拡散分布解析	分布図作成	時系列グラフ作成	図形表示	ダウンロード		ファイルマネージャ	システム設定
図形作成	地点設定						
				領域(▲: カ	(出地点)と時系列	间グラフ表示地点(o)	
地点設定ファイル 選択	: /ssd_wor	rk/wspeedi/hdd/kakefuda/	test_rrate-point_list.dat				
拡散分布解析済みファイ	ル 選択 :/ssd_wor	rk/wspeedi/hdd/kakefuda/	result_d2				
表示变数	: CONC N						
表示核種	: Cs137 N						
表示高度	: 0	~					
表示範囲[Bq/m3]	: 最小:	, 最大:					
日盛間隔		[hr]					
補助目盛間隔	:	[目盛間隔の分割数]					
※表示範囲と目盛間隔	動空白の場合は、種	1認時に自動設定					
画像出力先:/ssd_work/v	wspeedi/hdd/kakefuda	/time_image_d2/time_C0	DNC_C8137				
確認							

図 III-4 時系列作成機能画面

C () 📓 http://133.53.28.206/8180/waneer/i db//ijst-z	man.ion		* C activeX winhe	X
Splitch-II DataBase System X WSPITCH 7-9/0-2	計算機器 (1)			
ファイル(F) 編集(E) 表示(V) お気に入り(A) ツール(T) ^	Jレブ(H)			
	WSPEEDI-II I	DataBase System		Logout
Honn rotation			林山地上, ** 広って ノンマウ ** (** (**)、)、 ** **	
xj mDB: FuKushi	ma(2011) 对家列向:2011/03/12 00:00(JST)	~ 2011/03/31 00:00(JST)	放出地点:緯度37.4217度、桂度141.0356度	
<u>拡散分布解析</u> 分布図作成	時系列グラフ作成 図形表示	ダウンロード	ファイルマネージャ	システム設定
図形作成 Color Map)			
GMT Color Map Open Save Save a Open : /ssd_work/wspeedi/hdd/kakefuda/test_m	rate-Cs137.cpt			
Fixed at "Create"	Changeable			
Scale : O Linear Log10	Continuity : O On Off			
Maximum	Value Color			
Value : 1.00e+6	Foreground			
Color :	1.00e+6			
Minimum				
Color :	1.00e+5			
Order : 8				
Foreground Color :	1.00e+4			
Background Color :	1.000+2			
NaN Color :	1.00043			
Create	1.00e+2			
Cicate				
	1.00e+1			
	I			
	1.00e+0			
	1.008-1			
	1.00e-2			
	Background			
	NaN			

図 III-5 色設定ファイル作成機能画面

				-					– – –
								_	
http://133.53.28.206:8180/wsp	beedi_db/time-setting.j	sp				▼ ℃ 検索		۽ ر	ी T 🗙 😪 🤇
😹 WSPEEDI-II DataBase System 🛛 🚺									
		WS	PEED	I-II DataE	Base Syst	em			Logou
対象DB:Fuku	shima(2011) 対望	象期間:2011/03	12 00:0)(JST) ~ 20	11/03/31 00	:00(JST) 放出地点:緯	度37.4217度、経度14	41.0356度	
拡散分布解析 分布図	作成 時系	列グラフ作成		形表示	ダウ	シロード	ファイルマネージ	ャシス	テム設定
El maldente de la Leg									
凶力が下すな 地点の	Ø.E								
新規名称(空白文字は使用できませ	(ん) 緯度	経度							
			地点一	覧に追加	登録済み	地点一覧に 🜆			
					760				
地点一覧 Open Save Sav	e as Clear				宣邦	R済み地点一覧:選択し	に地点を地点一覧に		
名称	緯度	経度		1		名称	緯度	経度]
Shichigo	38.2400017	140.9400024	削除	.		Shichigo	38.2400017	140.9400024	
Vamada	38 2200012	140 8300018	制版	^		Yamada	38.2200012	140.8300018	
Shinoishi	38.0000000	140.6100051	NOLEA MILEA	-		Shiroishi	38.000000	140.6199951	
Shiroishi	38.000000	140.0199951	削陈	~		Natori-jihai	38.1699982	140.8899994	
Natori-jihai	38.1699982	140.88999994	削除			Iwanuma	38.1100006	140.8699951	
						Shibata	38.0600014	140.7700043	
×1家頂曳【広域[d2] ♥ 催認						Marumori	37.8600006	140.8200073	
						Matsushima	38.3899994	141.0700073	
	1	é				Kokusetsu-nonodake	38.5499992	141.1699982	
· · /.						Tsukidate	38.7400017	141.0200043	4
	The set					Yamagata-tokamachi	38.2500000	140.3399963	4
38'42	3 245	_				Yonezawa-kanaike	37.9199982	140.1100006	4
, A						Furukawa	37.7799988	140.4900055	_
	Contraction of the second					Minamimachi	37.7400017	140.4600067	_
69	Ko]					Moriai	37.7700005	140.4499969	-
37'48	<u>ب</u> مبر	++				Sugitsumacho	37.7500000	140.4700012	_
0 2-5 0						Aizuwakamatsu	37.4900017	139.9199982	-
	T					Asahi	37.4099998	140.3600006	-
						Daishin	37.3899994	140.3399963	-
and the former and the					닏	Atagoshita	36.9500008	140.8999939	-
						Ohara	36.9599991	140.88999994	4
	21					Shirakawa	37.1199989	140.2200012	~
36'00	211	11				Haramachi	37.6399994	140.9499969	
- Suprand	->rH								
A Dar									
14 miles	{								
35.06		++							
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~									

 図 III-6 時系列グラフ作成地点選択画面

R WSPEEDI-II DataBase System ファイル(F) 編集(E) 表示(V)	<ul> <li>A X WSPEEDI データペー</li> <li>お気に入り(A) ジール(T)</li> </ul>	ス計算機能 ( ♪ ヘルプ(H)	WSPEEDL II D	ataRase System			Logout
			wsreedi-ii d	атабазе зузтеш			<u>1000</u> 00
	対象DB:Fukusl	nima(2011) 対象期間:20	11/03/12 00:00(JST) /	~ 2011/03/31 00:00(JST)	) 放出地点:緯度37.4	217度、経度141.0356度	
拡散分布解析	分布図作成	時系列グラフ作成	図形表示	ダウンロード		ファイルマネージャ	システム設定
WSPEEDI DataBase Sy	stem Version : 1.0.0						
対象データベース変更	(現在のデータベース	: Fukushima(2011))					
Fukushima(2011) V	更						
Default Working Root I	Directory						
Present : /ssd_work/	wspeedi						
Change to : /ssd_work/	wspeedi Select						
Change Working Root E	irectory						
Default Color (For GM	[ Color Map)						
Maximum Color :							
Minimum Color :							
Foreground Color :							
	1						
Background Color :							

図 III-7 システム設定機能画面

### 3. 放出源情報の最適化手法の検討

開発したベイズ推計による最適化手法の試験解析として、まず 4 種類の測定データをそ れぞれ単独で使用した解析を行った。先験情報の放出率と最適化された¹³⁷Cs 放出率の時系 列、これらの放出率を用いた際の計算値と測定値を比較する散布図を、SPM 濃度時系列デー タについて図 III-8 と図 III-9 に、航空機モニタリングの沈着量データについて図 III-10 と図 III-11 に、日降下量測定データについて図 III-12 と図 III-13 に、ダストサンプリン グデータについて図 III-14 と図 III-15 に示す。それぞれの解析による放出率の最適化は、 存在する測定値の時刻の計算に影響する放出期間のみ放出率が変更され、それ以外の期間 は先験情報の放出率のままとなっている。また、この最適化により得られた放出率を用い ることで、拡散計算結果と測定値を比較した散布図は1対1の線に集まる傾向が認められ、 再現性が向上していることが分かる。次に、4 種類の測定データをすべて使用した解析結果 について、¹³⁷Cs 放出率の時系列を図 III-16 に計算値と測定値の比較を図 III-17 に示す。 それぞれのデータの寄与により、放出率が変更される期間が増えるとともに、同一期間に 多数のデータの寄与がある場合には、個々のデータのみでは増加あるいは減少するように 変更されたものが、それらを平均化するように変更され、測定値と計算値の比較では、拡 散計算結果の再現性が全体的に向上している。

この最適化手法による結果と平成28年度に実施した試行錯誤的な手法による放出率の最 適化結果を比較した結果を図 III-18 に示す。平成28年度の最適化では、SPM 濃度時系列 データのみ用いたため、ここではSPM 濃度時系列データのみ用いた結果(図 III-8 と同じ) を用いた。ここでは、平成28年度の最適化で放出率を大きく変更した2期間(図 III-18 中の Case1:3月12~13日とCase4:3月18~19日)に着目した。最適化手法を適用し た結果と平成28年度の最適化の結果ともに、放出率を大きく低下させる修正となっている。 これは、SPM 濃度データと計算値で、プルームのピーク時刻がずれているため、測定値で ピークがないところに計算値のピークがあると、放出率を低減する修正として反映される。 最適化の処理としては正しいが、これは気象計算の誤差に起因するもので、それを考慮可 能な空間分布を持つ測定データがない状況で、機械的に適用することに問題がある。

この問題を解決するには気象場計算の再現性向上が必要となるが、これまでに実施した 気象観測データを気象計算に同化する手法では、今回の解析で問題となる地点が震災の影響で気象観測データが得られていないため、データ同化手法によるこれ以上の改善の可能 性は低い。そこで、環境モニタリングデータから気象場の修正も含めた放出源情報と拡散 計算の最適化を行う手法を検討する必要がある。この手法開発に適用可能な気象シミュ レーション技術として、アンサンブル計算の有効性を次節で確認している。アンサンブル 気象計算のそれぞれの気象場を用いて大気拡散計算を実施し、放射性物質や放射線の環境 モニタリングデータを最も再現する気象場を特定することで、気象場と拡散計算を同時に 最適化することが可能になると考えられる。



 図 III-8 先験情報の放出率(青線、Katata et al. 2015 を Chino et al. 2016 で修正)と SPM 濃度時系列データを用いて最適化した¹³⁷Cs 放出率(赤丸)の時間変化



図 III-9 SPM 濃度時系列データの¹³⁷Cs 濃度測定値と(a)先験情報の放出率を用いた計算値、 (b)SPM 濃度時系列データを用いて最適化した放出率を用いた計算値との比較



図 III-10 先験情報の放出率(青線、Katata et al. 2015 を Chino et al. 2016 で修正)と航
 空機モニタリングの沈着量データを用いて最適化した¹³⁷Cs 放出率(赤丸)の時間
 変化



図 III-11 航空機モニタリングの¹³⁷Cs 沈着量測定値と(a)先験情報の放出率を用いた計算値、 (b)航空機モニタリングデータを用いて最適化した放出率を用いた計算値との比較


図 III-12 先験情報の放出率(青線、Katata et al. 2015 を Chino et al. 2016 で修正)と日 降下量データを用いて最適化した¹³⁷Cs 放出率(赤丸)の時間変化



図 III-13 日降下量データの¹³⁷Cs 沈着量測定値と(a)先験情報の放出率を用いた計算値、(b) 日降下量データを用いて最適化した放出率を用いた計算値との比較



図 III-14 先験情報の放出率(青線、Katata et al. 2015 を Chino et al. 2016 で修正)とダ ストサンプリングデータを用いて最適化した¹³⁷Cs 放出率(赤丸)の時間変化



図 III-15 ダストサンプリングの ¹³⁷Cs 濃度測定値と(a)先験情報の放出率を用いた計算値、 (b)ダスト散布チングデータを用いて最適化した放出率を用いた計算値との比較



図 III-16 先験情報の放出率(青線、Katata et al. 2015 を Chino et al. 2016 で修正)とす べての測定データを用いて最適化した¹³⁷Cs 放出率(赤丸)の時間変化



図 III-17 SPM 濃度時系列データとダストサンプリングの¹³⁷Cs 濃度測定値及び航空機モニ タリングと日降下量データの¹³⁷Cs 沈着量測定値と(a)先験情報の放出率を用いた 計算値、(b)すべてのデータを用いて最適化した放出率を用いた計算値との比較



図 III-18 SPM 濃度時系列データを用いた最適化手法と平成 28 年度に実施した試行錯誤的 な手法による ¹³⁷Cs 放出率の最適化結果の比較

4. 気象場の再現性向上の検討

2011 年 3 月 12 日~13 日の福島県浜通り北部の 3 地点 (原町、相馬、新地) における ¹³⁷Cs 大気中濃度の時間変化について、アンサンブル計算手法による 10 メンバーのうちコント ロールケースの計算結果と、先行研究の放射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布デー タベースによる結果を比較した(図 III-19)。計算領域を拡大したコントロールケースの結 果(図中の"H29")では、特に相馬、原町において先行研究の結果(ケース H28;図中の"H28") では見られなかった 3 月 12 日夜間の ¹³⁷Cs 大気中濃度の上昇が計算されている。ただし、 本試験対象期間においては ¹³⁷Cs プルームが太平洋上から再流入する拡散状況ではなかっ たため、この再現性の向上は計算領域の変更による気象場の改善によるものと考えられる。

次に図 III-20 に、アンサンブル計算による全 10 ケースの計算結果を示す。図からわか るように、3 地点における ¹³⁷Cs 大気中濃度は大まかには同様の傾向を維持しながらも、詳 細な時間変化及び絶対値においては個々に差異が見られる結果となった。この 10 メンバー の結果の中から最も再現性が高かったケース Fとケース H28 との比較を図 III-21 に示す。 測定値では、3 月 12 日 21 時頃から 13 日 3 時くらいまで 3 地点ともに濃度上昇がみられる が、ケース H28 の結果では、3 月 12 日午後から夜にかけてと 3 月 13 日 3 時から 9 時にか けて 2 つの濃度上昇が計算されており、濃度値も過大になっていた。これに対して、ケー ス F では、はじめの濃度上昇期間が 3 時間程度遅くなるとともに濃度値も低下して、測定 値との濃度上昇期間の重なり度及び絶対値の一致度が高くなっており、再現性の向上が見 られる。しかし、プルームの到達時刻が依然として早いとともに、2つ目の濃度上昇期間が 存在しており、測定値の時間変化を完全に再現することはできなかった。福島第一原子力 発電所敷地内での地上風の測定データから、この時間帯は弱風で風向変動が大きくなって いたため、プルームの動きは遅く蛇行する状況であったと考えられる。気象場計算は、一 般的に弱風場の再現性が低くこの状況を再現できないため、プルームの到達が早いととも に、2度の蛇行により2つの濃度上昇期間を生成していた。ただし、2つ目の濃度上昇につ いては、放出率が過大評価になっている可能性も考えられる。この放出期間について、福 島第一原子力発電所敷地内のモニタリングポストでは、原子炉からモニタリングポストに 向かう風向の時間帯に空間線量率の上昇が見られないことから、放出は少なかったと考え られる。このことは、今後実施する放出源情報の最適化において検討する必要がある。



Cs-137大気中濃度の時間変化

図 III-19 計算領域の変更による ¹³⁷Cs 大気中濃度の変化("OBS"は SPM 観測値)

76



図 III-20 アンサンブル計算による大気拡散計算結果



図 III-21 アンサンブル計算による大気拡散計算の再現性向上

## IV. 考察

放出源情報及び拡散計算の最適化について、先行研究では試行錯誤的な手法により SPM 濃度時系列データを再現するように放出源情報を修正したが、最終的な計算結果を年度前 半で作成する必要があったこと、データベースの解析機能が開発途上で利用できなかった ことなど、時間的及び技術的な制約から解析が限定的であった。本研究においては、開発 したデータベースの解析機能を活用するとともに、客観的な最適化手法を開発し、放出源 情報と拡散計算の最適化をより多くの測定データを用いて総合的に実施することを目標と している。客観的な解析手法として、ベイズ推計に基づく最適化手法を開発し、SPM 濃度 時系列データを用いた試験解析で、先行研究の試行錯誤的な時間を要する手法による結果 と同様な結果が労力と時間をかけずに得られることを確認した。これにより、SPM 濃度時 系列データ以外にも多くの測定データを利用した解析を、多くの拡散計算ケースについて 効率的に実施できるようになった。ただし、気象場の再現性に問題があり放出率の修正だ けでは測定値を再現できない事例もあることから、客観的な手法により放出率の修正を行 うと非現実的な修正結果となる場合もあった。

気象場計算の再現性向上のために、これまでは気象観測データを気象計算に同化する手 法を高度化することで対応してきたが、今回の解析で問題となった地点は震災の影響で気 象観測データが得られていないため、データ同化手法によるこれ以上の改善の可能性は低 い。そこで、様々な環境モニタリングデータから気象場の修正も含めた放出源情報と拡散 計算の最適化を行う手法についても検討した。この手法開発に適用可能な気象シミュレー ション技術として、アンサンブル気象計算を適用し、その有効性を検証した。試験計算と して、アンサンブル気象計算のそれぞれの気象場を用いて大気拡散計算を実施し、放射性 物質や放射線の環境モニタリングデータを最も再現する気象場を特定することで、気象場 と拡散計算を同時に最適化することが可能であることが確認できた。これにより、アンサ ンブル気象計算とベイズ推計に基づく最適化手法の組合せにより、本研究の目標とする放 出源情報と拡散計算の精緻化に目途が付いた。

しかしながら、この手法を適用して有効な結果を得るためには、アンサンブル気象計算 で生成される多数の気象場の中に実際の気象場を再現するようなケースが含まれているこ とが必要である。今回の試験計算では、2日間の計算期間について、メンバー数 10のアン サンブル計算を実行し、実際の気象場に近い結果を得ることができたが、全体の解析期間 である 2011 年 3 月 12 日から 31 日までの 20 日間の気象場変動を全て再現するようなケー スを得るには、膨大な数のアンサンブル計算が必要になると考えられる。また、今回用い た初期値にだけ変動を与えるアンサンブル計算手法では、長期間にわたり様々なパターン の気象場を生成することは難しいと思われる。そこで、長期間にわたり様々な気象パター ンを効率的に生成するための解析手順を考案した。まず、20 日間の解析期間を 3 日程度の 区間に分割し、1 区間目のアンサンブル気象計算と拡散計算を実行し、最適化手法により最 適なケースを探索する。次に、ここで選定した最適気象ケースから次の区間のアンサンブ ルを生成し、最適ケースを探索する。これを繰り返すことで、最適気象場の連続データを 作成する。これにより、1 区間のアンサンブル計算のメンバー数を 10 とし、6 区間に分割 した場合は、10 の 6 乗つまり 100 万の多様なパターンの気象場を生成し、その中から最適 なケースを探索したのと同等な結果となる。また、各区間の初期場に変動を与えるため、 より効率的に多様なパターンを生成できると考えられる。次年度は、この解析手法により、 放出源情報と拡散計算の最適化を進める計画である。

## V. 結論

東京電力福島第一原子力発電所の事故時に放出された放射性物質による住民の被ばく線 量推計に必要となる、放射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布データベースの精緻化 において、以下の成果を得た。

- 1)新規データの調査では、環境省 SPM フィルターの I-129 濃度の時系列データ、大気 拡散解析、炉内の事故進展解析等の情報を収集し整理した。SPM フィルターデータにつ いては、環境研究総合推進費「原発事故により放出された大気中微粒子等のばく露 評 価とリスク評価のための学際研究」の研究チームとの連携協議により、平成 30 年度の 第1四半期にデータ入手できる予定である。
- 2) これまでに構築した「放射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布データベース」の 維持管理と機能拡張を行い、解析機能を強化し利便性を向上した。
- 3) 放出源情報最適化手法として、ベイズ推計による最適化と不確実性を評価する手法を 開発し、データベースに適用して解析結果の妥当性を確認した。ただし、この手法を 有効活用するためには、気象場の再現性向上も合わせて行う必要がある。
- 4)気象場の再現性向上として、気象モデルWRFによるアンサンブル計算手法を開発し、 その計算結果を用いた拡散計算がSPM濃度時系列データの測定値を良好に再現可能で あることから、解析手法の妥当性を確認した。

以上により、放出源情報最適化と気象場再現性向上のための解析手法を開発しその有効 性を確認したことで、本研究で目標とする「放射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布 データベース」の精緻化に目途がついた。

### VI. 次年度以降の計画

平成 30 年度は、環境省 SPM フィルターの I-129 濃度の時系列データ等の新規データ及 び他の分担研究の成果をデータベースに取り込む。また、気象場のアンサンブル計算手法 を用いてデータベースの再構築を行うとともに、ベイズ推計による放出源情報最適化手法 を用いた解析により、放出源情報の最適化と拡散過程の再解析を行う。最適化した拡散計 算による大気濃度・沈着量の時間空間分布データを年度前半までに作成し、他の分担研究 による最終的な線量評価の基礎データとして提供する。その後、これらの成果を反映し「放 射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布データベース」を完成するとともに、公開版を 構築する。

- VII. 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
  - <u>H. Nagai, H. Terada, K. Tsuduki</u>, G. Katata, M. Ota, <u>A. Furuno</u>, S. Akari, "Updating source term and atmospheric dispersion simulations for the dose reconstruction in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident", EPJ Web of Conferences, 2017; 153: 08012_1-7.
  - 2) <u>M. Kadowaki, H. Nagai, H. Terada</u>, G. Katata, S. Akari, "Improvement of atmospheric dispersion simulation using an advanced meteorological data assimilation method to reconstruct the spatiotemporal distribution of radioactive materials released during the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident", Energy Procedia, 2017; 131: 208-215.
  - B. 論文: 査読なし なし
  - C. 国内学会発表
  - 〇<u>寺田宏明, 永井晴康</u>, "福島第一原子力発電所事故の放出量推定と被ばく評価における大気拡散シミュレーションの活用",日本気象学会 2017 年度春季大会, 2017.05.25-28 (東京)
  - 2) 〇岩崎俊樹,中島映至,渡邉明,鈴木靖,近藤裕昭,森野悠,<u>寺田宏明</u>,<u>永井晴康</u>, 滝川雅之,関山剛, "数値モデルによる移流拡散予測の相互比較実験",日本気象学 会 2017 年度春季大会, 2017.05.25-28 (東京)
  - 〇森野悠,北山響,滝川雅之,中島映至,速水洋,<u>永井晴康</u>,<u>寺田宏明</u>,他,"大気モデル相互比較に基づく福島原発事故起源の¹³⁷Csの動態解析",日本気象学会2017 年度春季大会,2017.05.25-28(東京)
  - 4) ○<u>寺田宏明</u>, <u>永井晴康</u>, "大気拡散シミュレーションによる放射性物質の放出量推定 と環境中分布の再構築", 日本放射線影響学会第60回大会, 2017.10.25-28(千葉)
  - 5) ○<u>永井晴康, 寺田宏明</u>, "福島第一原子力発電所事故による放射性物質の大気放出量の推定", 第 58 回大気環境学会年会, 2017.09.06-08(神戸)

- D. 国際学会発表
- OH. Kitayama, Y. Morino, M. Takigawa, T. Nakajima, H. Hayami, <u>H. Nagai</u>, <u>H. Terada</u>, et al., "Model inter-comparison of atmospheric Cs-137 from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017.05.20-24 (Chiba, Japan)
- 2) ○<u>H. Terada, H. Nagai</u>, "Uncertainty analysis of spatiotemporal distribution of the radioactive materials released during the Fukushima Daiichi nuclear power station accident in the environment reconstructed by atmospheric dispersion simulation", 4th International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity, 2017.09.03-08 (Berlin, Germany)
- 3) OY. Sato, M. Takikawa, G. Sekiyama, Z. Kajino, H. Grahn, N. Brannstrom, P. Schoenberg, Y. Kondo, <u>H. Terada</u>, <u>H. Nagai</u>, et al., "2nd Atmospheric Model Intercomparison Project for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident on March 2011 2nd FDNPP-MIP", 20th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the A&WMA, 2018.01.07-11 (Austin, USA)
- 4) ○<u>H. Nagai</u>, <u>H. Terada</u>, "Source Term Estimation for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident by Comparing Environmental Monitoring and Atmospheric Dispersion Simulation" (招待講演), 2nd International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (ISRD 2018), 2018.01.23-26 (Tsukuba, Japan)
- E. 著書

なし

- F. 講演 なし
- G. 主催した研究集会 なし
- H. 特許出願・取得 なし
- I. その他 なし

## VIII. 参考文献

- 1) I. G. Enting, "Inverse Problems in Atmospheric Constituent Transport", Cambridge University Press, Cambridge, U. K, 2002, 392pp.
- K. R. Gurney, R. M. Law, A. S. Denning, et al., "TransCom 3 CO₂ inversion intercomparison: 1. Annual mean control results and sensitivity to transport and prior flux information", Tellus 2003; 55B: 555-579.
- 3) A. Tarantola, "Inverse Problem Theory", Elsevier, Amsterdam, 1987, 600pp.
- 4) G. Katata, M. Chino, T. Kobayashi, et al., "Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model", Atmospheric Chemistry and Physics 2015; 15: 1029-1070.
- 5) M. Chino, H. Terada, H. Nagai, et al., "Utilization of ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs in the environment to identify the reactor units that caused atmospheric releases during the Fukushima Daiichi accident, Scientific Reports, 2016; 6:31376, DOI: 10.1038/srep31376.
- 6) Y. Oura, M. Ebihara, H. Tsuruta, et al., "Database of Hourly Atmospheric Concentrations of Radiocesium (¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs) in Suspended Particulate Matter Collected in March 2011 at 99 Air Pollution Monitoring Stations in Eastern Japan", J. Nucl. Radiochem. Sci. 2015; 15: 15-26.
- 原子力規制委員会, "平成 24 年 7 月までの福島第一原子力発電所から 80km 圏外の 航空機モニタリング", available from http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/258/list-1.html, 2012.
- 8) 原子力規制委員会, "放射線モニタリング情報:提示降下物のモニタリング", available from http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/195/list-1.html, 2011.
- 9) 文部科学省、"文部科学省によるダストサンプリングの測定結果", available from http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/8000/7572/24/dust%20sampling_All%2 0Results%20for%20May%202011.pdf, 2011.
- 10) T. Okura, T. Oishi, M. Taki, et al., "Emergency Monitoring of Environmental Radiation and Atmospheric Radionuclides at Nuclear Science Research Institute, JAEA Following the Accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant", JAEA-Data/Code 2012-010, Japan Atomic Energy Agency.
- 11) 古田定昭, 住谷秀一, 渡辺均, 他, "福島第一原子力発電所事故にかかわる特別環境 放射線モニタリング結果; 中間報告(空間線量率,空気中放射性物質濃度,降下じん 中放射性物質濃度)", JAEA-Review 2011-035, Japan Atomic Energy Agency.
- 12) 山田純也, 瀬谷夏美, 羽場梨沙, 他, "福島第一原子力発電所事故に係る JAEA 大洗

における環境放射線モニタリング;空間線線量率,大気中放射性物質,気象観測の結果", JAEA-Data/Code 2013-006, Japan Atomic Energy Agency.

- H. Amano, M. Akiyama, B. Chunlei, et al., "Radiation measurements in the Chiba Metropolitan Area and radiological aspects of fallout from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants accident", J. Environ. Radioact. 2012; 111: 42-52.
- 14) 高エネルギー加速器研究機構, "環境放射線の測定結果", available from http://www.kek.jp/ja/Research/ARL/RSC/Radmonitor/, 2011.
- 15) W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, et al., "A description of the Advanced Research WRF Version 3", NCAR Tech. Note NCAR/TN - 475+STR., National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, Colorado 2008, 125pp.
- 16) O. Talagrand, P. Courtier, "Variational Assimilation of Meteorological Observations With the Adjoint Vorticity Equation. I: Theory", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 1987; 113: 1311-1328.
- X. Y. Huang, Q. Xiao, D. M. Barker, et al., "Four-Dimensional Variational Data Assimilation for WRF: Formulation and Preliminary Results", Monthly Weather Review 2009; 137: 299-314.
- 18) D. Barker, X-Y. Huang, Z. Liu, et al., "The Weather Research and Forecasting Model's Community Variational/Ensemble Data Assimilation System: WRFDA", Bulletin of American Meteorological Society 2012; 93: 831-843.

Comprehensive studies on the refinement of internal dose estimates for residents during the early phase in Fukushima Nuclear Accident: Refinement of source term and atmospheric transport dispersion simulations

Haruyasu Nagai¹, Hiromi Yamazawa², Matthew Hort³, Hiroaki Terada¹, Katsunori Tsuduki¹, Akiko Furuno¹, Masanao Kadowaki¹, Toyokazu Kakefuda¹

¹Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency ²Department of Energy Engineering and Science, Nagoya University ³Atmospheric Dispersion and Air Quality Team, UK Met Office

### Abstract

In order to assess the radiological dose to the public resulting from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident in Japan, further refinement of dose estimation is carried out, based on the previous study "Comprehensive studies on the dose reconstruction for residents in Fukushima Nuclear Accident". In this study, by refining the source term of radioactive materials discharged into the atmosphere and modifying the atmospheric dispersion simulation using new data released after the previous study, "database of spatiotemporal distribution of radioactive materials in the air and on the ground" is improved. This database is used for the dose assessment by coupling with the behavioral pattern of evacuees from the nuclear accident.

In this year, new monitoring data and useful information such as hourly air concentration of I-129 by SPM filter analysis, atmospheric dispersion analysis, reactor analysis, etc., which were not available at the time of the previous study, were investigated and collected. The improvement of "database of spatiotemporal distribution of radioactive materials in the air and on the ground" was also carried out by enhancing analysis functions and user-friendliness. Moreover, to optimize the source term and improve the reproducibility of meteorological field, an optimization method of source term based on Bayesian analysis and ensemble calculation method using WRF model were developed and validated.

# Keywords

Source term; Atmospheric dispersion simulation; Fukushima nuclear accident; Dose reconstruction; Database for spatiotemporal distribution of radionuclide