

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25340029

研究課題名(和文) ラドン222壊変生成物による肺線量計算ソフトウェアの開発

研究課題名(英文) Development of software for calculating lung dose for inhaled radon 222 progeny

研究代表者

石樽 信人 (Ishigure, Nobuhito)

名古屋大学・医学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70159713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、環境によって幅広く変動する様々なエアロゾルパラメータや、呼吸する個人によって変動する様々な解剖学的・呼吸生理学的パラメータに対して、ラドン222壊変生成物による肺の線量を呼吸気道モデルにより計算できるコンピューターコードを試作した。本コードを用い、エアロゾルパラメータによる感度解析を実施し、その結果、環境に固有の線量換算係数を求めるためには、非付着成分比の評価が重要であることが示された。さらに、本コードを用い、日本人の解剖学的・呼吸生理学的パラメータ、日本の生活環境におけるラドン濃度、並びに日本人の平均的な生活時間を考慮し、日本の生活環境における年間実効線量を計算評価した。

研究成果の概要(英文)：Lung dose for inhaled radon-222 progeny varies with aerosol parameters in the environment and with subject related parameters such as breathing rate and airway dimension. The purpose of this study is to develop a computer code used for calculating the lung dose per unit exposure to radon-222 progeny in the home and the work places. An updated ICRP human respiratory tract model was incorporated in the present computer code. By using this code, sensitivity analysis in the calculation of lung dose was performed with aerosol parameters. This analysis made clear that evaluation of an unattached fraction of radon progeny plays an important role to determine a dose conversion coefficient inherent to a specific environment. Furthermore, an annual effective dose attributable to the inhalation of radon progeny in Japan was estimated by taking account of the indoor and outdoor radon concentrations in Japan and the physical characteristics and the living hours of the Japanese people.

研究分野：放射線防護線量評価

キーワード：ラドン 線量評価 呼吸気道モデル 計算コード

1. 研究開始当初の背景

我々の周辺環境は、さまざまな起源をもつ放射線や放射性物質で満ち溢れている。地球誕生とともに取り込まれ、半減期が非常に長いため現在も地殻中に存在している ^{238}U およびその壊変系列に属する核種は環境中の代表的な放射性物質である。中でも放射性気体である ^{222}Rn およびその壊変生成物である ^{218}Po (RaA)、 ^{214}Pb (RaB)、 ^{214}Bi (RaC) は大気中の至るところに浮遊しており、それらを吸入することによる被ばくは、自然放射線による被ばく線量の半分程度を占めているといわれており、場所によっては現存被ばく状況としての対応が求められる。

吸入された ^{222}Rn およびその壊変生成物の線量評価方法について、これまでに国連科学委員会 (UNSCEAR)、国際放射線防護委員会 (ICRP) 等により提案されてきたが、疫学調査に基づく線量と呼吸気道モデルを用いた計算による線量とでは、3 倍程度の開きが生じていた。こうした状況の中で、実効線量を求めるために国際的に用いられてきた換算係数は、UNSCEAR の提案した値か、ICRP の疫学的アプローチから導き出された値 (線量換算規約) かのどちらかである。

空気中に浮遊している ^{222}Rn 壊変生成物のエアロゾル性状は環境により広範囲に変動する。そして、同じ放射能濃度の環境に曝されていても、その性状の違いにより実効線量は変化する。前述の UNSCEAR の換算係数も ICRP の線量換算規約も、ともにこうした線量の性状依存性に対応してはいない。

2009 年の秋に ICRP は、 ^{222}Rn 壊変生成物による線量も、 ^{137}Cs 等他の放射性物質と同じように、呼吸気道モデルを用いて計算により評価されるべきであるとの声明を出した。その後、国際機関、国際学術団体等での検討を経て、この声明は国際的にも受け入れられつつある。今後、線量評価方法は、呼吸気道モデルを用いる方法に統一され、この方法で計算された値が ^{222}Rn 壊変生成物による被ばくの防護に用いられるものと推察される。

このモデルは、解剖学、呼吸生理学、放射線生物学といった関連する諸分野の学問的到達段階を踏まえた上で大変精密に作られており、前述のエアロゾル性状の広範囲な変動にも対応することができる。一方で、多様な被ばくの条件にも対応できるモデルを目指したがために、それと引き換えにモデルの構造は極めて複雑なものとならざるを得ず、全体像の理解とその適用はたいへん難しいものとなっている。 ^{222}Rn 壊変生成物の線量計算にも呼吸気道モデルを用いることが国際的に合意されつつあることを受け、環境条件によって広範囲に変動する様々なエアロゾルパラメータに対して、 ^{222}Rn 壊変生成物による線量を計算できるコードの開発は、喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

大気中で ^{222}Rn 壊変生成物は、図 1 に示すように、エアロゾルに付着していない直径 1 nm 程度の成分 (非付着成分)、50 nm 程度の凝結核形成モード、250 nm 程度の蓄積モード、2500 nm 程度の粗粒子成分といった異なる群に分けられる。

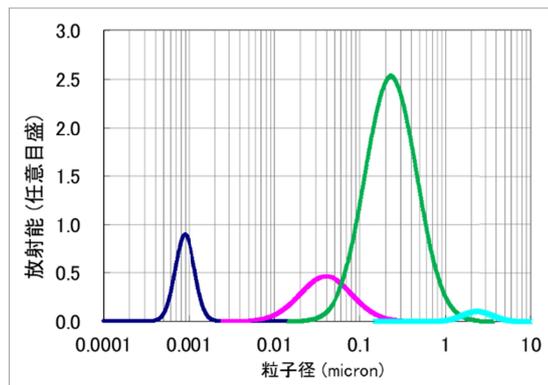


図 1 ^{222}Rn 壊変生成物の粒子径分布の例。粒子径の小さい方から、非付着成分、凝結核形成モード、蓄積モード、粗粒子成分。

これらの群は固有の密度、形状、呼吸気道内での吸湿による成長係数などを示す。これら粒子径等のパラメータにより、呼吸気道内の沈着率や沈着部位は大きく変化する。また、呼吸する個人の年齢、その個人が睡眠中か座っているかあるいは運動中かといった身体活動状況もまた沈着率や沈着部位に大きく影響する。本研究では、前述した ICRP の呼吸気道モデルによってこれらのパラメータを任意に変更しながら線量を計算することのできる計算コードの開発を目的とする。さらに、このコードを用い、時間的空間的に変動し得るエアロゾルパラメータによる感度解析を実施すると共に、日本人の成人及び子供の体格にあった気道の形態計量学的パラメータや呼吸生理学的パラメータ、日本の生活環境におけるラドン濃度、並びに日本人の平均的な生活時間を考慮し、日本の生活環境における年間実効線量を評価する。

3. 研究の方法

本研究は、次の段階を踏んで実施する。

ICRP の呼吸気道モデルは 1994 年に最初に公開された。その後どのように改訂されてきたかを追跡調査し、最新の呼吸気道モデルを入手し、その内容を明らかにする。

^{222}Rn 壊変生成物 RaA、B、C について、粒子径等の種々エアロゾルパラメータ、および呼吸パターン等の種々生理学的パラメータを変えて、各壊変生成物 1 Bq 摂取当たりの肺線量を計算する計算コードを作成する。

このコードにより、各パラメータを広範囲に変えて線量を計算し、その結果からデータベースを構築する。

データベースから必要なデータを検索・抽出し、実環境で測定される平衡ファクターなどに合わせて実効線量を計算するプログ

ラムを作成する。

以上で開発されたプログラムを日本の生活環境における日本人の年間実効線量の評価に適用する。

4. 研究成果

英国放射線防護局 (NRPB、現在は Public Health England) で行われたボランティア実験の結果を、NRPB の実験担当者とともに数理解析し、胸郭外領域 (ET₁, ET₂) における粒子の沈着率、及び ET₁ から ET₂ への粒子移行の可能性とその移行速度定数について、1994 年に ICRP が公開したヒト呼吸気道モデルの改良を提案し (5. 主な発表論文等の雑誌論文 1 参照) ICRP による呼吸気道モデルの改定に反映することができた。その他、文献調査、及び諸外国の呼吸気道モデルの専門家への問い合わせや議論を通じて、最新の呼吸気道モデルの内容を明らかにした。図 2 に計算コードに組み込んだ気道沈着粒子の最新のクリアランスモデルを示す。

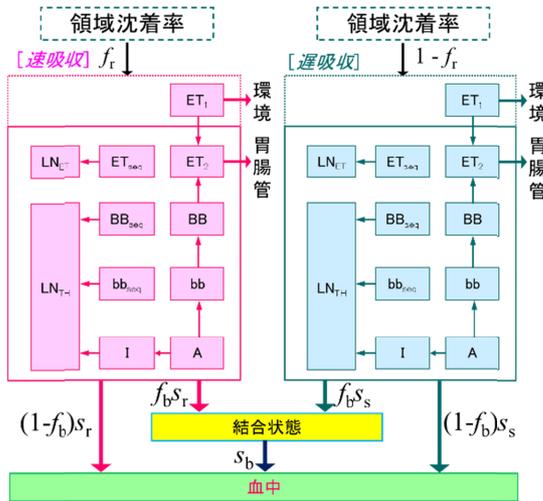


図 2 沈着粒子の気道クリアランスに関する最新モデル。ET: 胸郭外領域、BB: 気管・気管支領域、bb: 細気管支領域、AI: 肺泡間質領域、LN: リンパ節。f_r: 速吸収成分の割合、f_b: 組織と結合する成分の割合、s_r: 速吸収成分の血中吸収係数、s_s: 遅吸収成分の血中吸収係数、s_b: 組織結合成分の血中吸収係数。

上図に示した全てのコンパートメントについて、放射能収支に関する連立微分方程式を立て、その解析解を求め、これらを計算コードに組み込むことにより、各コンパートメントにおける各壊変生成物の任意の時間での放射能を、ほぼ瞬時に計算することができるようになった。本研究で作成した計算コードの流れ図を図 3 に示す。

まず、気道領域ごとの沈着率と気道領域ごとの残留率の時間変化を計算し、それらの結果から、気道領域ごとの総壊変数を求める。この値に、標的組織による線の吸収エネルギーと気道領域への損害の分配係数およ

び組織加重係数を乗じ、RaA、B、C 各成分の、1 Bq 摂取あたりの実効線量を計算する。

一方で、平衡ファクター (F) と非付着成分比 (f_p) とから RaA、B、C 各成分の濃度の代表例を算出する。これらの壊変生成物の濃度と活動レベルごとの消費時間の割り振り、および活動レベルごとの呼吸率から RaA、B、C の各成分の摂取量を算出する。この摂取量に RaA、B、C 各成分の、1 Bq 摂取あたりの実効線量を乗じ、平衡ファクターと消費時間で除することにより実効線量換算係数が得られる。

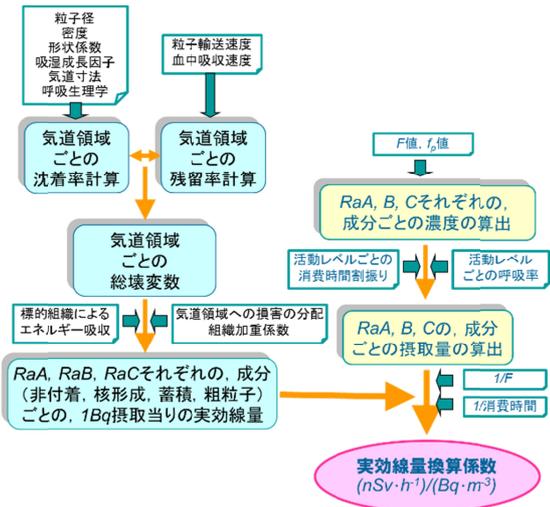


図 3 作成した計算コードの流れ図

本コードを用いて計算したエアロゾル粒子の領域沈着率を図 4 に示す。

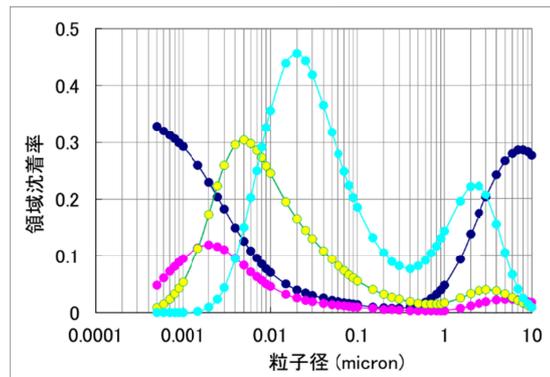


図 4 領域沈着率の粒子径依存性。ICRP が推奨する標準作業者 (着座 2.5h + 軽活動 5.5h) を仮定。粒子の密度を 1 g/cm³、形状係数を 1 と仮定。紺色: ET₂ 領域、ピンク: BB 領域、黄色: bb 領域、青色: AI 領域。

肺線量への寄与が大きい沈着粒子は、ピンク色で示した気管・気管支領域へ沈着した壊変生成物と黄色の細気管支領域へ沈着した壊変生成物であるため、この図と、図 1 に示した粒子径分布とを重ねて考察することにより、単位放射能当りの線量は、非付着成分と凝結核形成モードの壊変生成物において大きくなるのが推察される。

表1に示したエアロゾルパラメータを本コードに入力し、ICRPの標準成人男性の睡眠時、着座時、軽運動時及び強運動時における各壊変生成物の成分(非付着、凝結核形成、蓄積)ごとの1 Bq 摂取当たりの実効線量を計算した。図5に睡眠時と強運動時の結果を例として示す。

表1 壊変生成物のエアロゾルパラメータ

| パラメータ | 非付着成分 | エアロゾル付着成分 | |
|--|-------|-----------------------|-----------------------|
| | | 核形成モード | 蓄積モード |
| *PAEC割合 | 0.03 | $(1-0.03) \times 0.2$ | $(1-0.03) \times 0.8$ |
| **AMTD (μm) | 0.001 | 0.030 | 0.25 |
| 粒子径分散 | 1.3 | 2.0 | 2.0 |
| 密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 1.0 | 1.4 | 1.4 |
| 形状係数 | 1.0 | 1.1 | 1.1 |
| 吸湿成長因子 | 1.0 | 2.0 | 2.0 |

*) ポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度の割合
**) 熱力学的放射能中央径

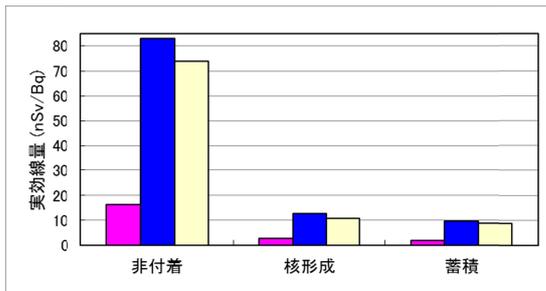
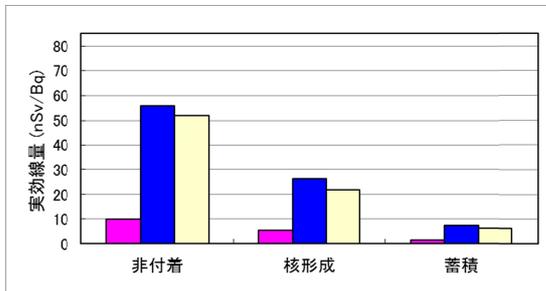


図5 各壊変生成物の成分(非付着、凝結核形成、蓄積)ごとの1 Bq 摂取に対する実効線量。上の図は睡眠時、下の図は強活動時。ピンク： ^{218}Po (RaA)、紺色： ^{214}Pb (RaB)、黄色： ^{214}Bi (RaC)。

壊変生成物の種類により単位摂取量当たりの実効線量は大きく異なり、RaBはRaAの5倍程度、RaCはRaAの4倍程度となる。エアロゾルの成分については、非付着成分による線量が最も大きく、次いで凝結核形成モード、蓄積モードの順に小さくなる。また、身体活動レベルの違いによる変動も無視できない。本コードでは、任意の平衡ファクターと任意の非付着成分比とを仮定し、これらから決定される各壊変生成物の成分ごとの濃度を入力し、実効線量を計算することが可能である。

図6に、平衡ファクターを0.4、また蓄積モードと凝結核形成モードの比を4対1と固

定し、非付着成分比のみを0.01から0.2まで変化させたときの実効線量換算係数を示す。

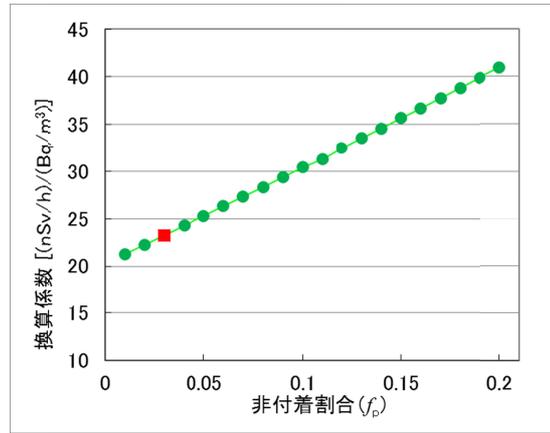


図6 ^{222}Rn 濃度 $1 \text{ Bq}/\text{m}^3$ の環境における実効線量率換算係数の非付着成分比(割合)依存性。赤い四角は日本での代表値とされている $f_p = 0.03$ の値。

この図より、非付着成分比の増加に伴い換算係数はほぼ直線的な増加を示し、非付着成分比の0.01の増加により、実効線量率換算係数は、 ^{222}Rn 濃度 $1 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 当たり $1 \text{ nSv}/\text{h}$ 増加すると推定される。それぞれの環境において非付着成分比を精度よく評価することが、信頼性の高い線量評価を行うにあたって大変重要であることが定量的に示された。

本コードを用い、日本人の成人男女及び子供の体格にあった気道の形態計量学的パラメータや呼吸生理学的パラメータ、日本の生活環境におけるラドン濃度、エアロゾルパラメータ、並びに日本人の平均的な生活時間を考慮し、日本の生活環境における年間実効線量を評価した。図7に成人男女の場合を示した。同図には比較の対象として、形態計量学的パラメータと呼吸生理学的パラメータのみをコーカシアン値に変えた計算結果も付加した。

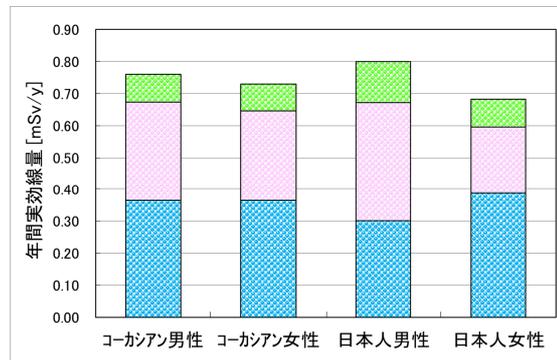


図7 日本の生活環境における ^{222}Rn 壊変生成物の吸入による年間実効線量。青色：住居、ピンク：他の屋内、緑色：屋外。

体格のみによる線量換算係数の差異については、日本人/コーカシアン比は0.9~1.2であり、その差は大きくはなく、コーカ

シアンに対する値を日本人に適用しても実際上は大きな問題ないと考えられる。日本の生活環境における年間実効線量は、成人女性 0.68 mSv、成人男性 0.80 mSv となり、一般的に考えられている値の 2 倍を示した。前掲の図 6 から推察されるように、線量の非付着成分比依存性は大きく、図 7 の年間実効線量は、非付着成分比として 0.03 を仮定した値であるが、ICRP の推奨する標準値 0.1 を仮定した場合には 1 mSv を超えることになる。

以上、本研究により線量に影響する種々のパラメータを任意に変更しながら線量を計算することのできる計算コードが作成され、日本の生活環境における年間実効線量の評価に適用されたが、今後、本コードの有用性を検証するため、他の機関や研究者の研究成果と相互比較を行うことが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

1. J. Smith, A. Birchall, G. Etherington, N. Ishigure, M. Bailey: A revised model for the deposition and clearance of inhaled particles in human extra-thoracic airways. Radiat. Prot. Dosim., **158**, 135-147, 2014. 査読有

2. 石樽信人: 内部被ばくの防護に用いられる線量. RADIOISOTOPES, 62, 465-492, 2013. 査読無

[学会発表](計 7 件)

1. 石樽信人, 浮須夢, 野々垣遥, 福岡将太郎: ラドンによる被ばく線量の評価における ICRP ヒト呼吸気道モデルの日本人への適用. 日本放射線安全管理学会第 14 回学術大会, つくば, 2015 年 12 月.

2. 石樽信人, 野々垣遥: 日本の生活環境におけるラドン濃度を実効線量へ変換する係数. 日本保健物理学会第 48 回研究発表会, 東京, 2015 年 7 月.

3. 石樽信人: 内部被ばくの線量換算係数(実効線量係数)の成り立ち. 第 43 回原研研究集会, 長崎, 2015 年 7 月.

4. 石樽信人, 野々垣遥, 岩井勇磨, 福岡将太郎: 屋内作業場内のラドン濃度を実効線量へ変換する係数. 日本放射線安全管理学会第 13 回学術大会, 徳島, 2014 年 12 月.

5. 石樽信人, 岩井勇磨, 福岡将太郎: 呼吸気道モデルによるラドンの線量換算係数の導出. 日本保健物理学会第 47 回研究発表会, 鏡野町, 2014 年 6 月.

6. 石樽信人, 岩井勇磨: ラドン 222 壊変生成物に対する線量評価支援ソフトウェアの開発. 日本放射線安全管理学会第 12 回学術大会, 札幌, 2013 年 12 月.

7. 石樽信人: 内部被ばくの防護に用いられる線量の特徴とその評価法. 第 41 回日本放射線技術学会秋季学術大会, 福岡, 2013 年

10 月.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

石樽 信人 (ISHIGURE NOBUHITO)

名古屋大学・医学系研究科・教授

研究者番号: 70159713

(2)研究分担者

()

研究者番号:

(3)連携研究者

()

研究者番号: