

## 日本人の正確な被ばく線量評価用ポリゴン型人体モデルの開発



佐藤 薫  
Sato Kaoru

### 1 はじめに

放射線被ばくによる健康リスクを評価するためには、臓器・組織に吸収された線量（以下、臓器線量）を定量的に評価することが基礎となる<sup>1)</sup>。しかし、実際に生きている人の臓器線量を直接的に測定することは極めて困難である。そのため、臓器線量は、人体を模擬した人体モデルを組み込んだ放射線輸送計算コードを用い、計算シミュレーションにより評価する。これまで国際放射線防護委員会（ICRP: the International Commission on Radiological Protection）は、ボクセル（Voxel: Volume pixel）と呼ばれる直方体要素を組み合わせることで形状を再現する手法を用い、欧米人男女の平均的な体格や臓器質量を再現した標準人ボクセル型人体モデルを開発した<sup>2)</sup>。このボクセル型人体モデルは、ICRPが公開する種々の線量換算係数のレファレンス値<sup>3,4)</sup>の評価に利用されている。

近年、ICRPは、幹細胞領域の放射線防護に関する最新の科学的知見に基づき、臓器・組織が1年間に受ける等価線量の限度（以下、等価線量限度）を変更することを提言した<sup>5)</sup>。その中で水晶体の等価線量限度については、従来の1年間150 mSvから5年間の平均として20 mSv（ただし、いずれの1年間も50 mSvを超えない）に引き下げることとした。しかし、一般的に幹細胞領域は、数十 $\mu\text{m}$ 程度のサイズでかつ複雑な構造を持つため、従来のボクセル型人体モデル中に再現し、正確な線量評価を行うこ

とは困難であった。

そこで、ICRPは、ポリゴンと呼ばれる多角形の面を組み合わせることで物体の形状を近似的に再現する手法を用い、欧米人男女の平均的な体格及び臓器質量を再現した標準人ポリゴン型人体モデル（MRCP: the adult Mesh-type Reference Computational Phantoms）を新たに開発し、幹細胞領域を含む臓器・組織の臓器線量の評価に利用した<sup>6)</sup>。

一方、体格は臓器線量に影響することから、国内における被ばく線量評価・管理においては、欧米人より小柄な成人日本人の体格特性<sup>7)</sup>を考慮することが必要となる。加えて、微小で複雑な構造を持つ幹細胞領域を体内に定義した線量評価用の成人日本人の人体モデルは、これまでに存在しなかった。そこで、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）は、数十 $\mu\text{m}$ 程度（例えば、幹細胞領域）からメートルサイズ（例えば、骨や筋肉）までの異なる大きさの臓器・組織の形状を詳細に再現した平均的成人日本人男性（JPM: the Japanese Polygon mesh-type Male phantom）及び女性（JPF: the Japanese Polygon mesh-type Female phantom）のポリゴン型人体モデルを新たに開発した<sup>8)</sup>。開発したJPM及びJPFは、今後、成人日本人の体格を考慮することが必要となる種々の被ばく線量評価において利用することが可能である。本稿では、JPM及びJPFの概要について紹介する。

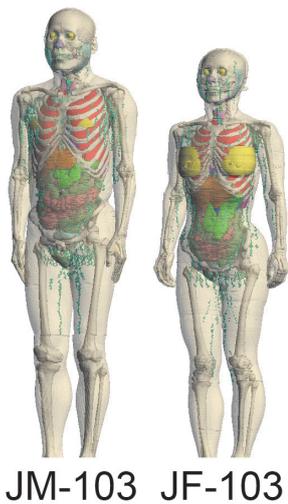


図1 成人日本人ボクセル型人体モデル

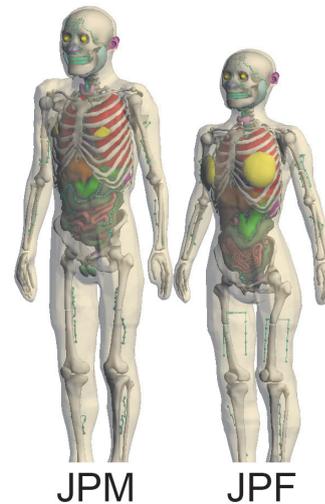


図2 成人日本人ポリゴン型人体モデル

## 2 従来の人体モデル

これまでに原子力機構では、成人日本人の平均的な体格、臓器質量等<sup>7)</sup>を有する男性(JM-103: the adult Japanese Male phantom-103)及び女性(JF-103: the adult Japanese Female phantom-103)のボクセル型人体モデルを開発した(図1)<sup>9)</sup>。JM-103及びJF-103は、健康なボランティアを全身撮影して得たCT画像上の臓器・組織領域を画像処理により抽出・加工することで構築されている。JM-103及びJF-103の身長・体重は、成人日本人平均値に一致させており、それらの臓器・組織の質量は成人日本人平均値との差が±10%以内になるように調整されている。加えて、JM-103及びJF-103は、最新の基本勧告であるICRP Publication 103において組織加重係数が割り当てられた臓器・組織がモデル化されている。そのため、JM-103及びJF-103は、同Publicationにおいて定義された線量評価方法を適用可能な唯一の日本人人体モデルであり、国内におけるCT診断による患者被ばく線量評価<sup>10)</sup>や放射線業務従事者の低線量放射線に関する疫学的調査(J-EPI-SODE)<sup>11)</sup>等において利用されている。

ボクセル型人体モデルは、同一サイズのボクセルを組み合わせて臓器・組織の形状を表現する。JM-103及びJF-103においては、約1mm角サイズのボクセルを約6000万個組み合わせることにより、比較的小さなサイズの甲状腺や副腎等を含む全身の臓器・組織の形状を十分精緻に再現している。ボクセ

ル型人体モデルにおいては、ボクセルのサイズが小さい程、形状を正確に再現することが可能であるので、極小サイズの幹細胞領域の構造も、数 $\mu\text{m}$ 程度のボクセルを用いて再現可能である。しかし線量評価を実施するうえでは、数 $\mu\text{m}$ 程度のボクセルで全身の構造が構成される人体モデルのデータ容量が膨大になりすぎるために、シミュレーション計算コードにおける取扱いが困難になるという問題があった。

## 3 ポリゴン型人体モデルJPM及びJPF

放射線防護に関する最新の科学的知見を反映するうえで必要になる、微小で複雑な構造を持つ幹細胞領域に対する正確な線量評価を実現するために、ボクセル型人体モデルJM-103及びJF-103をベースに、ポリゴン型人体モデル(JPM及びJPF)の開発に着手した。JPM及びJPFの開発は、以下の手順で行った；(1)最初にJM-103及びJF-103の横断面画像から抽出した臓器輪郭情報を三次元再構成することで臓器表面ポリゴンを作成、(2)各臓器表面ポリゴンにおけるポリゴンの重なりや穴等のエラーを修正して表面を平滑化、(3)各臓器表面ポリゴンを統合。開発した全身モデルを図2に示す。

臓器形状は、表面データのみで表現するため、拡大・縮小や変形等の画像処理が容易になった。その結果、従来のJM-103及びJF-103の臓器質量は成人日本人の平均値と最大で10%程度の差があるのに対して、

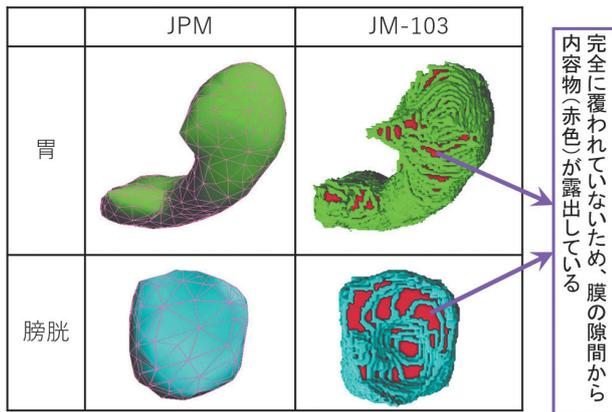


図3 男性モデルにおける胃壁と膀胱壁の構造（頭頂部方向から見た図）

JPM 及び JPF の臓器質量は、放射線感受性が低く、線量評価上重要でない硬骨と脂肪を除き、成人日本人の平均値と完全に一致させることができた。

一般的にボクセル型人体モデルは、CT や MRI 等の診断装置を用いて得られた医療画像を基に構築されている。これらの医療画像は、人体を一定の間隔で断層撮影することで得られる。そのため隣接した医療画像から抽出した臓器・組織領域であっても、不連続的に形状が表現されるという特性がある。この特性は、内部が固形組織で詰まった腎臓や肝臓等の実質臓器と比べて、消化物や尿等の内容物が内腔に詰まった胃壁や膀胱壁等の膜状臓器の形状を再現する際に大きく影響する。図3にJPM及びJM-103の胃及び膀胱を頭頂部方向から見た図を示す。JM-103は、全身を1mm間隔という高解像度で断層撮影することにより得たCT画像を基に構築されているが、その胃壁及び膀胱壁は、隙間から赤色で示す内容物が露出する穴だらけの構造となっており、本来、胃壁や膀胱壁により周囲を囲まれているべき内容物が、近傍の他の組織等と直接接触している。これに対してJPMの胃壁や膀胱壁は、その内容物を完全に囲む正確な形状が再現できている。JPM及びJM-103における胃壁及び膀胱壁の構造上の違いは、内容物中の線源から胃壁や膀胱壁を含む近傍の臓器・組織へのエネルギー付与を考慮する内部被ばく評価において重要かもしれない。特に、到達距離の短い低エネルギー光子や電子が内容物中の線源から放出される場合において、近傍の臓器・組織の線量に差が生じることが予想される。

加えて、JPM及びJPFにおいては、JM-103及び

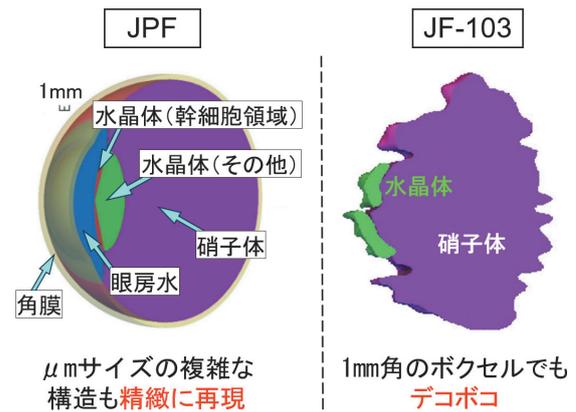


図4 女性モデルにおける眼球組織の断面図

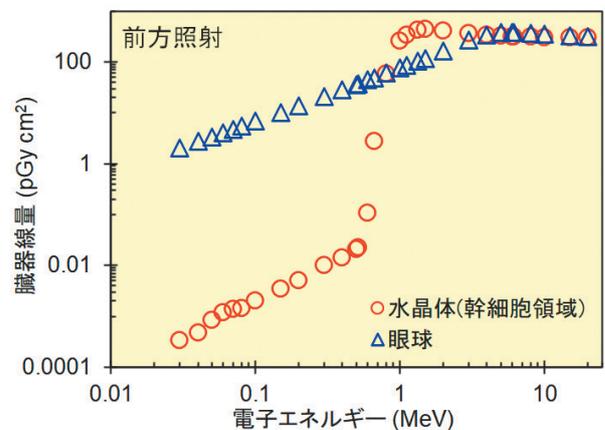


図5 電子照射を受けたJPFの眼球組織における臓器線量

JF-103を構成する約1mm角のボクセルでは再現できない数十μmサイズの幹細胞領域の構造を皮膚、膀胱、胃、小腸、結腸、水晶体の組織内部に構築している。例として図4にJPF及びJF-103における眼球組織の断面図を示す。前述のとおり、断層撮影で得られた不連続なCT画像を用いて構築したJF-103の硝子体及び水晶体の表面形状はデコボコである(図4右)。これに対して、JPFの眼球組織においては、水晶体(幹細胞領域及びその他)、眼房水、角膜、硝子体の構造も精緻に再現されている(図4左)。

電子を前方照射されたJPFの眼球及び水晶体(幹細胞領域)の線量解析結果を例として図5に示す。飛程が極めて短い0.5MeV未満の照射では、電子が水晶体に到達しないことから線量をほとんど与えられていない。これに対して、0.6~1.5MeVの範囲では、照射エネルギーが高くなる程、水晶体(幹細胞領域)に到達する電子の数が増加するので、線量の著しい上昇が見られた。また、4MeV以上に

おいては、電子は眼球の大きさを超える飛程を持つことから、眼球線量は水晶体（幹細胞領域）の値と同様になっている。以上のように、JPM 及び JPF を用いることで、成人日本人の体格特性を考慮しつつ、ICRP が提言する数十  $\mu\text{m}$  サイズで複雑な構造を持つ水晶体（幹細胞領域）の正確な被ばく線量を評価することが可能になった。

## 4 今後の展望

現在、筆者らは、物体の形状を容易に変化させることが可能なポリゴンの特性を活用した人体モデル変形技術の開発を進めている。開発中の人体モデル変形技術を JPM 及び JPF に適用することにより、個々人の姿勢や体格に合わせた被ばく線量評価が可能となり、特に放射線治療における患者及び施術者の被ばく防護の最適化が可能である。

なお、JPM 及び JPF の人体モデルデータは、ソースコード管理サイト GitHub の Web ページ<sup>12)</sup> 上で 2024 年 10 月 24 日より無償公開されており<sup>13)</sup>、同 Web ページへアクセスすることにより、登録手続きなしダウンロードして入手することが可能である。

## 謝辞

本稿は、原子力機構の古田琢哉氏、佐藤大樹氏、

津田修一氏との共同研究内容の解説です。共同研究者の協力を深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) ICRP., *Ann ICRP*, **37** (2-4) (2007)
- 2) ICRP., *Ann ICRP*, **39** (2) (2009)
- 3) ICRP., *Ann ICRP*, **40** (2-5) (2010)
- 4) ICRP., *Ann ICRP*, **45** (2) (2016)
- 5) ICRP., *Ann ICRP*, **41** (1-2) (2012)
- 6) ICRP., *Ann ICRP*, **49** (3) (2020)
- 7) Tanaka, G., *et al.*, *NIRS-M-115* (1996)
- 8) Sato, K., *et al.*, *PLoS One*, **19** (10), e0309753 (2024)
- 9) Sato, K., *et al.*, *JAEA-Data/Code2011-013* (2010)
- 10) Takahashi, F., *et al.*, *Health Phys*, **109** (2), 104-112 (2015)
- 11) Furuta, H., *et al.*, *Health Phys*, **121** (2), 471-483 (2021)
- 12) JPM 及び JPF データ公開用 GitHub Web page, <https://github.com/JapanesePolygonPhantom/JPM-JPF-Phantom>
- 13) (国研)日本原子力研究開発機構プレスリリース, 線量評価がより正確に！日本人のポリゴン型詳細人体モデルを開発—人体モデルのデータを無償公開—, 2025 年 10 月 25 日, <https://www.jaea.go.jp/02/press2024/p24102502/>

((国研)日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 放射線挙動解析研究グループ)