

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：27501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23591825

研究課題名(和文)人の体型を考慮したCT診断時臓器線量の個人差を評価できるWEBシステムの開発

研究課題名(英文)Development of web-based CT dose calculator for patient-specific organ doses depending on age and physical size

研究代表者

甲斐 倫明(Kai, Michiaki)

大分県立看護科学大学・看護学部・教授

研究者番号：10185697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：CT診断からの臓器線量計算を行うWebシステムWAZA-ARIにおいて、年齢と体型の個人差を考慮できるシステムに拡張したWAZA-ARI 2を開発した。未成年はフロリダ大学で開発した年齢別ファントムを用いた。成人体型の違いを計算するために、日本人の標準体型からBMIで2倍の標準偏差だけ外れるやせ型、2倍と5倍の標準偏差だけ外れる肥満型のファントムを皮下軟組織のみを変形することでファントムを構築した。また、実際の臨床で得られたCT画像をもとにボクセルファントムを構築し、臓器線量の個人差を実際の体型ごとに計算し、体型と臓器線量の関係を導いた。有効直径が体格の指数として利用できることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The WAZA-ARI calculator was developed to estimate organ doses from CT scans by utilizing the voxel phantoms as the standard Japanese physical size. This study aimed to determine correction coefficients to estimate organ doses to patients of any size attended to in daily clinical practice including children. Florida University phantoms were used for the dose to children. Different size phantoms were developed by modifying the volume of soft tissues where the deviation of physical sizes in BMI was 2 times lower for thin patients and 2 or 5 times higher for fat patients than the standard. Furthermore, we constructed voxel phantoms based on the CT images of patients of different size and simulated radiation transport in CT examinations to obtain organ doses using Monte Carlo simulation. The results show the linear relationship between effective diameter and organ dose can predict patient-specific organ doses. We completed the WAZA-ARI 2 that can take any sizes and age into account.

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：CT診断 臓器線量 ボクセルファントム モンテカルロ

1. 研究開始当初の背景

我が国の医療被ばくは、CT 診断の登場とその利用の増加によって増加傾向にある。そこで、我々は 2008 年～2010 年度の科研費研究「日本人ボクセルファントムによる CT 診断時の臓器線量計算と WEB システムの開発（課題番号：20591484）」で、国内での CT 診断による線量計算に用いる web ベースの線量計算システム WAZA-ARI を開発した。WAZA-ARI は、身長、体重、臓器質量について成人日本人の平均的特性を持たせた男性（JM-103）及び女性（JF-103）の患者モデル（ボクセルファントム）を基に計算した線量データを用いて、CT 診断に伴う臓器線量を計算する等の特徴を有する。

一方で、CT 診断に伴う被ばく線量は、個人の体型により大きく変化する。しかし、医療被ばくに対しては、世界的に見ても、体型等が標準的な物理ファントムやボクセルファントムを利用して線量を測定あるいは計算することが主流であった。そのため、個人特性に注目した線量評価について、個別の研究は実施されていたが、システムとして開発されたものはなかった。また、CT 診断に対して、特に放射線感受性の高い小児に対する線量低減は国際的にも重要視されているが、WAZA-ARI では様々な年齢群の小児に対する線量計算を行う機能を有していなかった。

2. 研究の目的

CT 診断による被ばく線量を正確に評価するには、想定される患者の体型範囲を包含して再現した患者モデルを用いた臓器線量データが必要となる。そこで、国内で実際に CT 診断を受けた成人患者の体型を調査し、その結果に基づき、JM-103 及び JF-103 の体型を変形させて、平均的体型と異なる複数の成人の患者モデルを整備する。また、実際の患者の CT 画像データからボクセルファントムを作成し、個人ごとの線量評価を行い、体型による個人差を分析する。

小児については、精密な人体モデルの作成に利用する医用画像の入手が困難なこと等を鑑みて、使用するモデルを検討する。

その後、新たに整備した患者モデルについて、各 CT 装置の機種に応じて放出 X 線の特性を再現した線源モデルを組み込んだ放射線輸送計算コード（PHITS）を用いて、CT 診断により受ける臓器線量を系統的に解析する。以上の手法により、成人の体型及び年齢の違いを考慮した CT 診断による臓器線量計算法を開発し、個々の患者の体型や年齢の違いに着目した被ばく評価法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 体型や年齢の異なる患者の臓器線量計算

データの解析

CT 診断を受けた成人患者の体型調査

平均的体型と異なる成人患者モデルを整備するため、診療放射線技師の協力の基に CT 診断を受けた成人患者（男性：2080 名、女性：1798 名）の体型（身長及び体重）の調査を行った。この調査結果に基づき、線量解析の対象とする成人モデルの体型を決定することとした。

平均的体型と異なる成人患者モデル構築

CT 診断による被ばく線量は、X 線が透過する人体組織の厚さが影響するため、患者の胴体周囲長が最も重要なパラメータとなる。そこで、身長は成人日本人の平均値に一致させた条件で JM-103 または JF-103 の体表面形状を変形させて、体型の異なる複数の成人男女のモデルを構築した。また、成人の体型と臓器組織質量の間には相関が見られないという報告もあったため、体内における臓器の配置は、体表面とは独立して決定した。

体表面形状の変形においては、最初に胸囲、腹囲、臀囲等の胴体周囲長が成人日本人の平均値に対して 1 標準偏差（ ）ずつ増減した値（男性：- 4 ～+6 の計 10 体、女性：- 3 ～+5 の計 8 体）を持つように、画像処理ソフトウェアを用いて JM-103 及び JF-103 の各スライス断面を拡大または縮小させた。続いて、各スライス断面を画像処理により統合し、全身の体表面形状を変形した（図 1）。なお、本課題では JM-103 または JF-103 より、大柄に変形させたモデルは平均値 + 1 、小柄に変形させたモデルは平均値 - 1 のように呼称する。

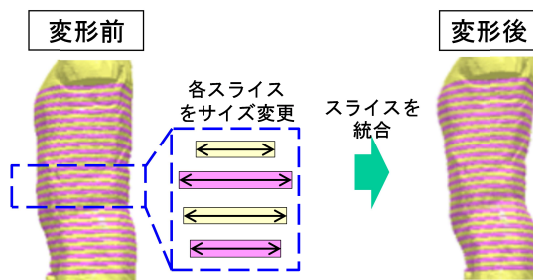


図 1 体型が異なる患者モデルの体表面形状の変形

JM-103 及び JF-103 より大柄な患者モデルの作成では、画像処理により皮下軟組織のみを肥大させた（図 2）。一方、小柄な患者モデルの作成においては、変形後に体表面が一部の臓器よりも内側に定義されることが確認されたため、画像処理により解剖学的に適切な位置に配置した。また、各スライス断面の皮膚組織は、変形後の体表面に一致させた。変形させた各体型のモデルと「3. (1) CT 診断を受けた成人患者の体型調査」の結果を照合し、解析に用いる平均的体型と異なる成人モデルを選定した。

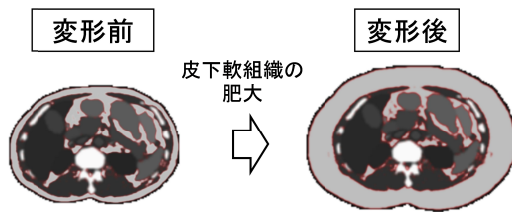


図2 画像処理による皮下軟組織の肥大

#### 線量解析に利用した未成年患者モデル

未成年においては、人体モデルを作成するために用いる医用画像の入手が困難であり、成人と比較して、日本人と欧米人の中で体型の差が小さい。そこで、フロリダ大学で開発された年齢別（0才、1才、5才、10才、15才）の患者モデルを入手し、被ばく線量の解析に用いることとした。

#### 臓器線量データの解析、整備

選定した平均的体型と異なる成人及び未成年の男女の患者モデルを PHITS に組み込んで、CT 診断に伴う被ばく線量を解析した。ここでは、既に関連していた CT 装置（4メーカー、7機種）における放出 X 線の特徴を PHITS 上に再現した線源モデルを利用し、5mm の照射幅を持つ線源を患者モデルの頭脚軸上で 5mm 毎に移動させた条件で臓器線量を計算した。この解析結果に基づき各モデルに対する臓器線量データを整備した。

#### 患者の CT 画像から分析した個人差

体型がやせ型、標準型、肥満型に分類できる患者を抽出し、CT 画像をボクセル化した。PHITS による被ばく線量を計算し、臓器線量の体型による違いを分析した。

### 4. 研究成果

#### (1) 体型や年齢の異なる患者の臓器線量計算データの解析

##### 開発した平均的体型と異なる成人患者モデルの体型特性

調査した CT 診断を受けた成人患者の体型データに基づいて評価したボディマス指数（BMI）の分布を図 3 に示す。BMI の分布範囲は男女間でほぼ等しく、それぞれ 12.8～39.3、12.6～39.1 であった。一方、平成 22 年度国民健康・栄養調査報告では、BMI は男女とも 15.0～35.0 の範囲にある。このことから、CT 診断を受けた患者の体型分布は、疾病や高齢等理由によって日本人全体の体型分布と比較するとより細身の体型（BMI が小さい体型）にシフトしていることが明らかになった。

表 1 に JM-103 または JF-103 を変形して構築した成人患者モデルの BMI を示す。男性については 14.6～40.4、女性については 15.9～37.3 の範囲となった。本研究では、図 4 に示す体型調査結果から得た BMI の分布傾向に基づき、患者の 90% が含まれる BMI

範囲（男性：18.5-28.1、女性：17.9-27.8）の体型について臓器線量データを解析、整備することとした。この BMI 範囲は、男女とも平均値 - 2、平均値 + 2 の体型の患者モデル体型に相当する（表 1）。そこで、本課題では、CT 診断を受ける多くの患者の体型を包含することを目的として、小柄の平均値 - 2 及び大柄の平均値 + 2 の体型を線量解析の対象とすることとした。

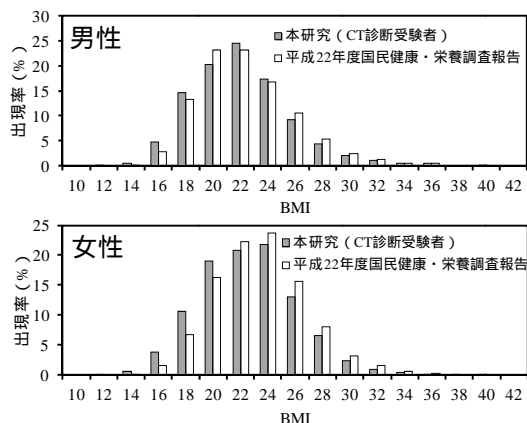


図3 CT 診断を受けた成人患者の体型調査より評価した BMI 分布

表1 日本人の平均的体型と異なる成人患者モデルの BMI

性	BMI									
	胸体周囲長の日本人平均値との差（単位）									
	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4	5	6
男	14.6	16.4	18.5	20.7	25.4	28.1	30.9	33.9	37.1	40.4
女	-	15.9	17.9	20.2	25.1	27.8	30.8	33.9	37.3	-

選定した平均値 + 2 の体型よりも大きな体型を有する患者が CT 診断を受ける可能性は低いが、このような大柄な患者については診断に適切な画質を得るための CT 撮影時の管電流は高く設定する傾向がある。一方で、体表面の皮下軟組織の遮蔽効果により、管電流あたりの臓器線量は大きく低下することが予想される。そこで、このような大柄な患者の被ばく線量計算に用いる線量データの整備が必要であると判断した。平成 22 年度国民健康・栄養調査報告にある日本人全体の BMI 分布によると（図 3）、男女とも平均値 + 5 の体型の患者モデルの BMI（表 1）に相当する 37 を超える体型を有する者はほとんどいないことが分かった。そこで、極端に大柄な患者の線量評価への適用を想定し、平均値 + 5 の体型の患者モデルについても臓器線量データの解析、整備の対象とすることとした。

#### 体型の異なる成人患者モデルを用いた線量解析データ

図 4 に異なる体型の成人患者モデルを用いて評価した管電流あたりの臓器線量を示す。平均値 - 2 の体型の男性患者モデルにおける膀胱線量は JM-103 と比較して約 9% 高く、

平均値+5 の体型では、JM-103 と比較して約 33%低いという、体型との相関関係が確認された。女性モデルを用いた計算においても、体型に依存した膀胱線量の変動が見られた。この結果は、体型の違いを決定する皮下軟組織の厚さが異なるため、人体に入射した CT 装置放出 X 線が標的臓器に到達するまでに受ける遮蔽効果が変化することが原因であり、妥当なものである。

生殖腺については、女性の卵巣は体内の比較的深い位置にあるため、その線量は膀胱のケースと同様に体型に依存した変動が確認され、JF-103 による解析値と比較して、平

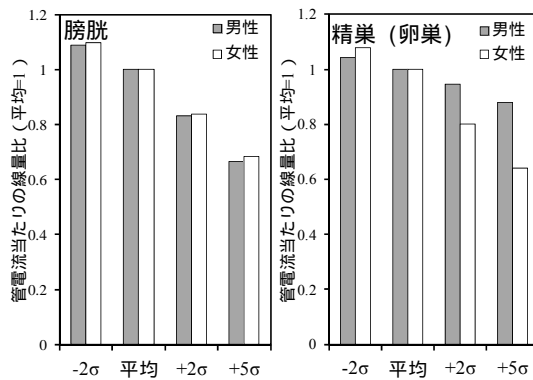


図4 種々の体型の成人患者モデルを用いて評価した CT 診断からの臓器線量比較 (平均 = JM-103 及び JF-103)

均値 - 2 の体型の患者モデルでは約 8%高く、平均値+5 の患者モデルでは約 36%低くなった。一方、男性の生殖腺である精巣は、体表面に存在するため、体型による線量の変動は小さく、JM-103 と比較しても平均値+5 の患者モデルでは約 12%の減少であった。

未成年患者モデルを用いた線量解析

図5に管電流当たりの肝臓線量の比較を示す。肝臓線量は、最も若くて小柄な0才児が最も高く、年齢が高くなるにしたがって、減少する傾向が確認された。これは、異なる体型の成人に対する解析でも確認されたのと同様に、年齢が高くなるに従い体型が大きくなり、体表面と標的臓器の間に存在する皮下軟組織の厚さが増加し、その遮蔽効果が増大するためである。

臓器線量データの解析、整備

以上のように、本研究により、患者の年齢や体型の違いに応じて臓器線量を解析する手法を確立し、WAZA-ARIでCT診断による被ばく線量を個々の患者に着目して計算するために必要な臓器線量データを整備した。また、整備した臓器線量データについては、WAZA-ARIに格納するとともに、CT診断に伴う被ばく線量を適切に評価することができることを確認した。

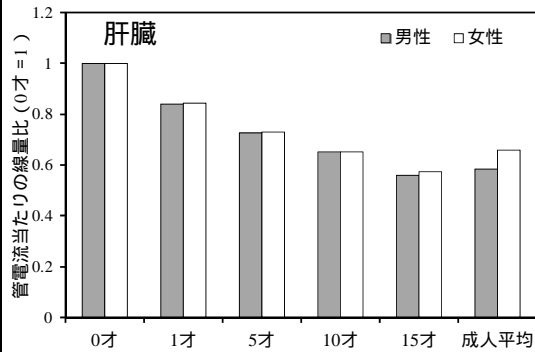


図5 種々の年齢の患者モデルを用いて評価した CT 診断からの臓器線量比較 (成人平均 = JM-103 及び JF-103)

患者の CT 画像から分析した個人差

臓器の体積は、身長体重などの体型の大きさと、臓器の体積の間に一定の関係性は見当たらなかった(図6)。この結果から成人の臓器の体積は体型に関係なく、ある範囲で分散していることが推定される。Gallbladder において標準偏差が 51.2%で大きな個人差を示した。その他の臓器は約 30%以下であった。

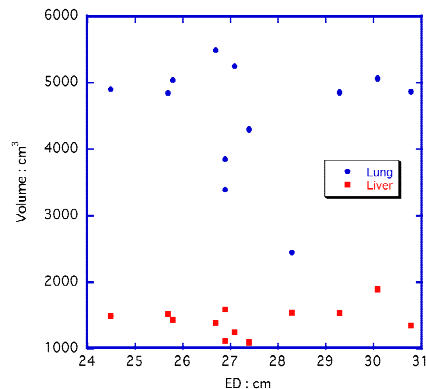


図6 胸部の有効直径と臓器体積との関係

体型の指標として、BMI、体重、AP、LAT、ED (有効直径) の中では、ED が臓器線量との良い関係を示した。

$$ED = \sqrt{AP \times LAT}$$

図7は、男性の肺の線量と胸部 ED との関係を示す。図8は、男性の胃の線量と腹部 ED との関係を示す。標準ファントムの線量を基本として、ED と線量との関係を直線モデル (図 7,8) で表すならば、患者から測定した ED を用いて推定される臓器線量は、シミュ

レーションによる実際の線量との誤差が約10%以内で推定可能であることがわかった。しかし、肝臓と膀胱に限って、20%を超える患者もいた。

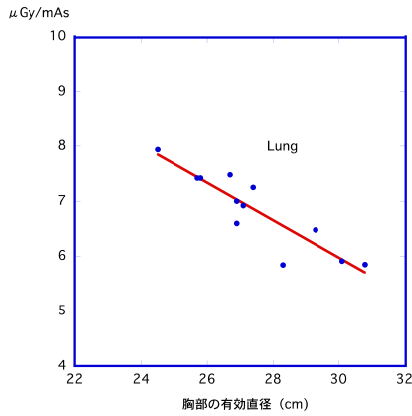


図7 男性患者の胸部直径と肺の線量との関係

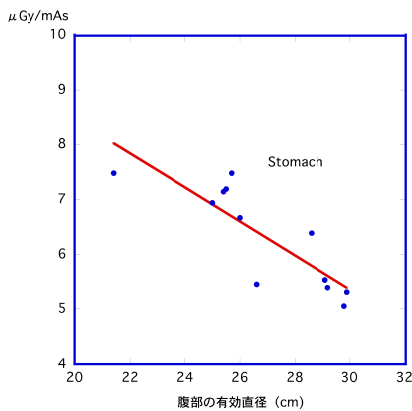


図8 男性患者の腹部直径と胃の線量との関係

体型による個人差はEDを用いて体型と臓器線量との関係を利用するならば、ある誤差内で推定できることがわかったが、EDと臓器線量との直線関係から大きく外れるケースがいくつか見られた。それは、特に心臓と胃でみられた。これらのケースのほとんどが、肺の体積が、通常の肺より小さいことが分かった。肺は密度において、他の臓器の1/3程度しかなく、その大小が、X線の透過性に大きく影響を与える。肺の体積の違い(2,918cm<sup>3</sup>/3,518cm<sup>3</sup>)がもたらす各臓器線量の影響をMIRDファントムで定量的に調べた。この結果、肝臓で4.9%、胃で19%、膵臓で16%、脾臓で6.4%、腎臓で2.7%であった。

本研究で対象とした患者は、やせ型から肥満型までの幅広い体型をカバーする

ようにサンプリングした結果であり、分析対象数は多くはないが、体型による個人差の影響の傾向を統計的に捉えることができた。CT検査による臓器線量は体型によって大きく影響を受けるが、体型の指標として有効直径を用いることで、一定の誤差以内で推定することが可能であることを本研究は示した。

#### WAZA-ARI に体型と年齢を組み込んだ Web システムの構築

患者の年齢や体型の違いに応じて臓器線量を計算できる Web システムに拡張した。年齢別(0才、1才、5才、10才、15才)、および体型は、標準型、やせ型(-2)、太り型(+2)、肥満型(+5)を男女別を選択できる。本システムは、放射線医学総合研究所のサイトで公開予定である。

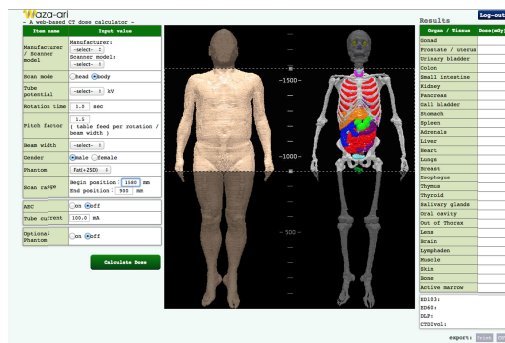


図9 WAZA-ARIシステムの入出力画面の構成

#### 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)

K.Sato, F.Takahashi, D.Satoh, A.Endo, "Construction of average adult Japanese voxel phantoms for dose assessment," JAEA-Data/Code 2011-013 (2011).

O.Kamei, T.Yoshitake, K.Nishijima, K. Ono, M.Ojima, M.Kai, Calculating patient-specific organ doses from adult body CT scans by Monte Carlo analysis male-individual voxel phantoms, Health Physics (in press)

〔学会発表〕(計10件)

高橋史明他8名, "日本人成人の男女ファントムを用いたマルチスキャナーCT撮影における臓器線量の数値解析", 日本保健物理学会第44回研究発表会, 平成23年10月17日-18日(水戸市)

佐藤薫他8名, "CT診断からの臓器線量評

価に用いる日本人女性ボクセルファントムの構築”,日本保健物理学会第44回研究発表会,平成23年10月17日-18日(水戸市)

佐藤 薫他8名,“CT診断からの臓器線量評価に用いる成人日本人ファントムの体型変形手法の構築,日本保健物理学会第46回研究発表会,平成25年6月24日-25日(千葉市)

佐藤 薫他8名,CT診断に伴う臓器線量の年齢別・体型別の線量係数データベースの構築,日本保健物理学会第47回研究発表会,平成26年6月19日-20日(岡山県苫田郡鏡野町)

小野孝二、甲斐倫明他7名,CT診断からの臓器線量評価システム WAZA-ARI の実験的検証、日本保健物理学会第44回研究発表会,平成23年10月17日-18日(水戸市)

亀井修、甲斐倫明他3名, X線 CTからの臓器線量に与える体型の影響に関するモンテカルロ解析、日本保健物理学会第45回研究発表会,平成24年6月16日-17日(名古屋市)

亀井修、甲斐倫明他4名, X線 CT検査時に伴う臓器線量の体型による影響 –臨床データを用いた体型の異なるボクセルファントムによるシミュレーション、日本保健物理学会第46回研究発表会,平成25年6月24日-25日(千葉市)

亀井修、甲斐倫明他4名,日本人女性におけるX線CT検査時の臓器線量の体型の違いによる影響のMC法による検討、日本保健物理学会第47回研究発表会,平成26年6月19日-20日(岡山県苫田郡鏡野町)

小野孝二、甲斐倫明他7名,CT検査に伴う臓器線量の年齢および体型による違いを考慮できる WAZA-ARI の線量計算、日本保健物理学会第47回研究発表会,平成26年6月19日-20日(岡山県苫田郡鏡野町)

K.Ono, K.Sato, F.Takahashi, T.Yoshitake, O.Kamei, T.Hasegawa, Y.Katsunua, N.Ban, A.Endo, C.Lee, WE.Bolch, M.Kai, WAZA-ARI II : Web-based CT dose calculator for Asian physiques, IRPA Regional Congress, The 4<sup>th</sup> Asian and Oceanic Congress on Radiation Protection, Kuala Lumpur, 12-16 May, 2014.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

甲斐 倫明 (KAI MICHIAKI)  
大分県立看護科学大学看護学部・教授  
研究者番号：1018597

### (2)研究分担者

遠藤 章 (ENDO AKIRA)  
日本原子力研究開発機構・研究員  
研究者番号：10354705

高橋 史明 (TAKAHASHI FUMIAKI)  
日本原子力研究開発機構・研究員  
研究者番号：20354706

佐藤 薫 (SATO KAORU)  
日本原子力研究開発機構・研究員  
研究者番号：80354702

伴 信彦 (BAN NOBUHIKO)  
東京医療保健大学看護学部・教授  
研究者番号：70251220