

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

## 主論文の要旨

論文題目 モンテカルロシミュレーションを用いた  
X線CT検査における被ばく線量評価に関する研究

氏名 羽場 友信

## 論文内容の要旨

### [背景・目的]

X線 Computed Tomography (CT)検査における被ばく線量評価の指標として、volume CT dose index (CTDI<sub>vol</sub>)が一般的に用いられている。CTDI<sub>vol</sub>は、長さ15cmのアクリル樹脂製円柱型ファントム(以下、CTDIファントム)内に有効電離長10cmのCT用電離箱を挿入し、ファントム中心部にてシングルアキシアルスキャンを施行するCTDI<sub>100</sub>測定法に基づき算出される。CTDIファントムの直径は頭部用で16cm、及び体幹部用で32cmである。しかしながら、患者の体幹部径は個々で異なるため、体幹部径を一律32cmで評価するCTDI<sub>vol</sub>では患者被ばく線量を適切に評価できないという論議がされてきた。これを受けて American Association of Physicists in Medicine (AAPM)は2011年にSize-Specific Dose Estimate (SSDE)と称する新たな規格を提唱した。SSDEは、直径32cmのCTDIファントムで測定されたCTDI<sub>vol</sub>値に患者体型の関数である換算係数 $g(x)$ を乗じた値で、次式で定義される。

$$SSDE = g(x) \times CTDI_{vol(32cm)} \dots (1)$$

$x$ は患者体型の実効径である。換算係数 $g(x)$ はAAPM Task Group 204 Report内に表として公開されている。SSDEは従来用いられているCTDI<sub>vol</sub>値から簡便に算出でき、患者体型を考慮した線量評価を行うことができるため今後広く普及すると思われる。

しかしながら、AAPM Task Group 204 Reportで提唱された換算係数は、近年臨床現場で広く用いられている”ボリュウムスキャン”、及び、新しいCT線量評価法である”AAPM Task Group 111測定法”による影響を考慮していない。本研究の目的は、ボリュウムスキャン及びAAPM Task Group 111測定法がSSDE算出時の換算係数に与える影響についてモンテカルロシミュレーションを用いて検討することである。

モンテカルロシミュレーションにてCT検査を模擬するには、ボウタイフィルタ透過後のファンビーム方向の各角度の実効エネルギー情報を組み込む必要がある。本研究では種々の管電圧での実効エネルギー情報が必要となるため、従来のアルミニウム(Al)半価層測定法では膨大な時間がかかり現実的ではない。当研究室には2層の半導体素子で構成された実効エネルギー測定が可能な検出器がある。本検出器は一般撮影装置領域での使用を想定し

て作成されたものであるため、本研究では CT 装置においても本検出器を使用可能とする為に改良した。

以上より、本研究は「CT 装置の実効エネルギー測定」と「ボリュームスキャン及び AAPM Task Group 111 測定法が SSDE 算出時の換算係数に与える影響」の 2 項目で構成されている。

## [方法]

### 1. CT 装置の実効エネルギー測定

実効エネルギー測定器のセンサー部には、浜松ホトニクス社製のシリコン PIN フォトダイオード(S2506-04)を使用した。本フォトダイオードは、厚さ 0.1mm の鉄板の上に配置されている。本測定器は、フォトダイオードを 2 層に重ねた構造となっている。X 線を上段のフォトダイオードの受光面へ垂直に入射すると、X 線は鉄板によって減衰し、下段のフォトダイオードの出力電流は減少する。各フォトダイオードの出力電流を X 線照射時間中積分し、電圧値に変換した後に各フォトダイオードの出力電圧比を求める。電離箱と Al 板を用いて算出した実効エネルギーと本測定器の出力電圧比との関係を示すエネルギー校正曲線を予め求めておけば、出力電圧比から実効エネルギーを即座に求めることができる。また、本測定器は上段のフォトダイオードの出力電圧から照射線量も同時に測定することができる。CT 装置で回転照射を施行した際においても本測定器を使用可能とするために、センサー部に厚さ 2mm の鉛コリメータを施した。鉛コリメータは高さ 65mm、幅 25mm、開口幅 3mm である。また、1 回の X 線照射でファンビーム方向の各角度の実効エネルギー情報を網羅するために、同様の測定器及び鉛コリメータを 8 個作製した。

エネルギー校正曲線は一般撮影装置を用いて、管電圧 80, 100, 120, 135kV 毎に作製した。次に、本測定器と電離箱で測定した CT 装置の実効エネルギーを比較し、本測定器の実効エネルギー測定の精度を検証した。また、後述するモンテカルロシミュレーションで使用するため、Toshiba 社製の 320 列 CT 装置 AquilionONE のファンビーム内の各角度方向 X 線束の実効エネルギー及び照射線量を本測定器で測定した。測定条件として、管電圧は 80, 100, 120, 135kV、ボウタイフィルタ形状は頭部用、体幹部用と設定した。

### 2. ボリュームスキャン及び AAPM Task Group 111 測定法が SSDE 算出時の換算係数に与える影響

モンテカルロシミュレーションコードは Electron Gamma Shower version 5(EGS5)を使用した。モンテカルロシミュレーションにて模擬した CT 装置は Toshiba 社製の AquilionONE である。

本研究では 2 種類のファントム形状を模擬した。1 つは CTDI<sub>100</sub>測定法に基づくファントム (以下、CTDI<sub>100</sub>ファントム) であり、長さ 15cm の円柱形状である。もう 1 つは、AAPM Task Group 111 測定法に基づくファントム (以下、TG111 ファントム) であり、長さ 45cm の円柱形状である。両ファントムとも組成は水で構成されており、直径は 8~40cm まで 2cm 間隔で変化させた。線量取得領域は直径 1cm の円柱形状であり、ファントム中心部とファントム辺縁から深さ 1cm の 2 か所とした。線量取得領域の長さは、CTDI<sub>100</sub>ファントムでは 10cm、TG111 ファントムでは 23mm とした。これらは各 CT 線量測定法で使用する電離箱の長さに等しい。シミュレーションを行う CT 線量評価法として以下の 4 種類を設定し

た：(1)CTDI<sub>100</sub>測定法に基づくシングルアキシヤルスキャン、(2) CTDI<sub>100</sub>測定法に基づくボリュームスキャン、(3) AAPM Task Group 111 測定法に基づくヘリカルスキャン、(4) AAPM Task Group 111 測定法に基づくボリュームスキャン。CTDI<sub>100</sub>測定法ではCTDI<sub>100</sub>ファントムを用い、AAPM Task Group 111 測定法ではTG111ファントムを用いた。体軸方向ビーム幅は、シングルアキシヤルスキャン及びヘリカルスキャンでは4cm、ボリュームスキャンでは16cmとした。

上述の4種のCT線量評価法にて、ファントム直径を8~40cmまで2cm間隔で変化させた際の線量をシミュレーションにて取得した。シミュレーションは各管電圧(80, 100, 120, 135kV)、ボウタイフィルタ形状(頭部用、体幹部用)毎に行った。式(1)より、得られた任意のファントム径の線量をファントム径32cmの線量で除した値がSSDE算出時の換算係数となる。この様にして4種のCT線量評価法毎に換算係数を算出し、AAPM Task Group 204 Reportで提示されている現行の換算係数と比較した。

**[結果]**

実効エネルギーと出力電圧比との関係を表すエネルギー校正曲線を Fig. 1 に示した。本測定器と電離箱で測定したCT装置の実効エネルギーの差異は2.8%以内であった。AquilionONEのファンビーム内の各角度方向X線束の実効エネルギー及び照射線量を Fig. 2 及び Fig. 3 に示した。

シミュレーションにて算出した各CT線量評価法のSSDE算出時の換算係数を Fig. 4 に示した。Fig. 4には、AAPM Task Group 204 Reportで提示されている現行の換算係数も併せて示した。結果より、いずれのCT線量評価法で算出した換算係数は、現行の換算係数に対して差異14.2%以内で一致した。

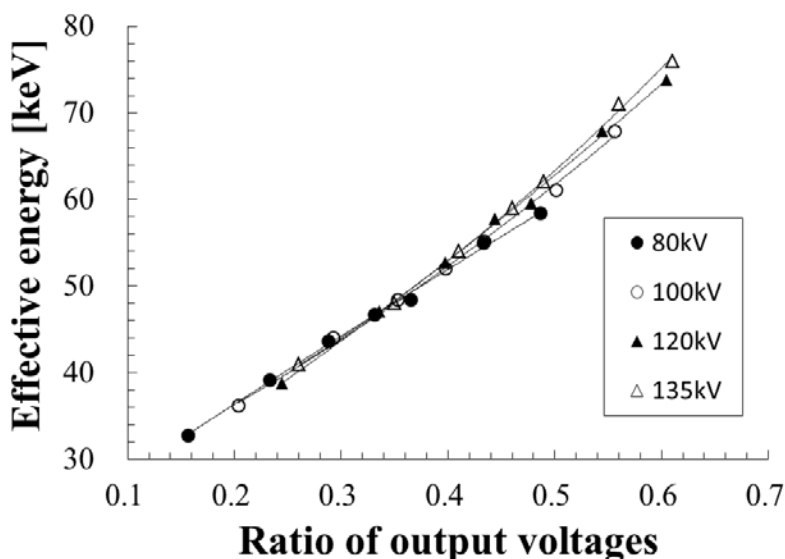


Fig. 1 エネルギー校正曲線

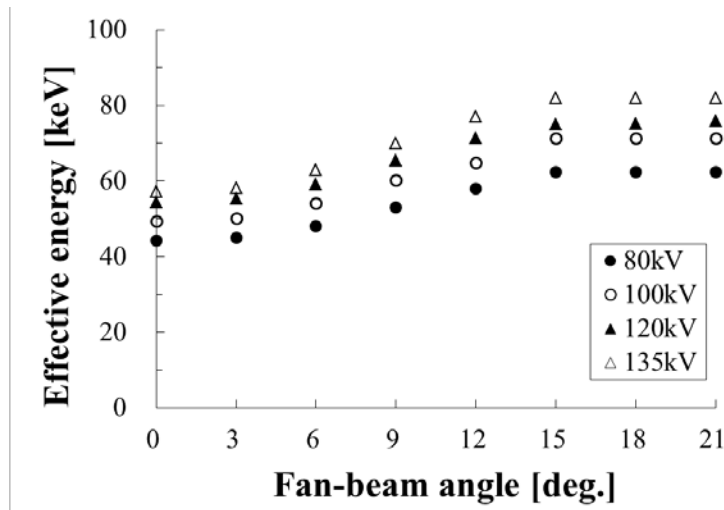


Fig. 2 AquilionONE の実効エネルギー

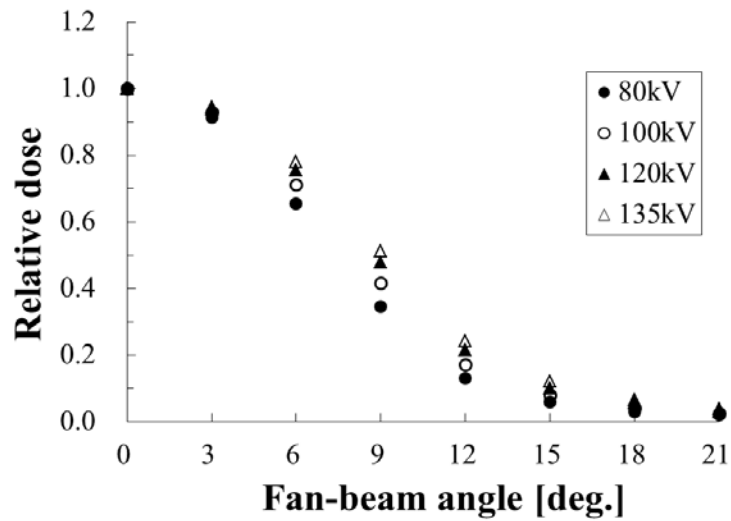


Fig. 3 AquilionONE の相対照射線量

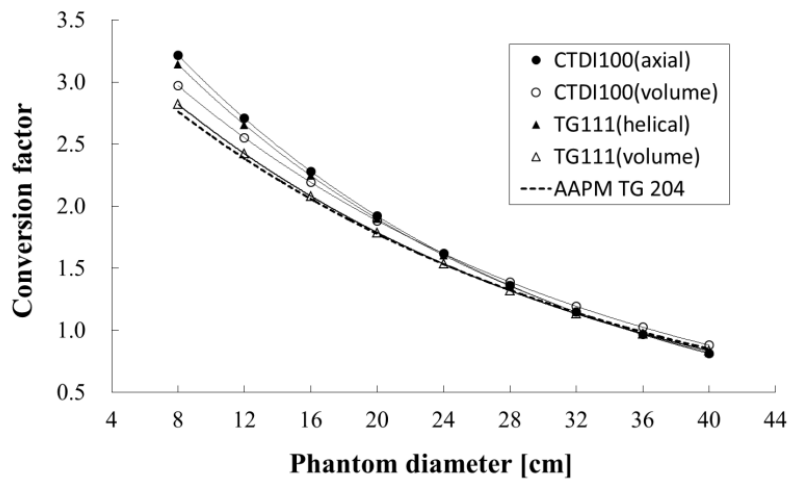


Fig. 4 各 CT 線量評価法の SSDE 算出時の換算係数

**【考察・結論】**

本研究で作製した鉛コリメータで覆われた測定器を使用すれば、CT装置のファンビーム方向の各角度の実効エネルギー及び照射線量を簡便に測定することができる。

Fig. 4より、各CT線量評価法から算出した換算係数は、いずれも現行の換算係数に対して差異14.2%以内で一致した。AAPM Task Group 204 Reportによると、現行の換算係数を使用する際には16%程度の誤差は容認すると記載されている。これより、本結果の差異14.2%も十分に許容できる範囲であると考えられる。以上より、現在使用されているSSDE算出時の換算係数は、ボリュームスキャン及びAAPM Task Group 111測定法に対しても適応可能であるという結果が本研究より得られた。