

サンチェコ

1つのデータベースで完結
品質管理



ペイシエント

- Plan Quality Checks
- Secondary Dose Calculations
- Pre-Treatment QA
- In-Vivo Monitoring



Machine

- 標準化されたルーチンQA
- ダイレクトデバイスコントロール
- 自動画像処理、MLC & VMAT QA
- プロトコルに基づくQA

太陽 ナク
レア

AIR ON MEDICA COUMP NY

テクニカルノート： SpekPy v2.0-X線管内スペクトルのモデリング用ソフトウェアツールキット

ギャビン・ボルドニウスキー^{a)}

カロリンスカ大学病院放射線物理学・核医学科（スウェーデン・ストックホルム

カロリンスカ研究所臨床科学・介入・技術部（スウェーデン・ストックホルム

アルトゥール・オマール

カロリンスカ大学病院放射線物理学・核医学科、ストックホルム、スウェーデン カロリンスカ研究所腫瘍学・病理学部門、ストックホルム、スウェーデン

ロバート・ブジラ

カロリンスカ大学病院放射線物理学・核医学科（スウェーデン・ストックホルム

GE Healthcare, Waukesha, WI 53188, USA（米国）

ペドロ・アンドレオ

カロリンスカ大学病院放射線物理学・核医学科、ストックホルム、スウェーデン カロリンスカ研究所腫瘍学・病理学部門、ストックホルム、スウェーデン

(2021年2月2日受領、2021年4月16日改訂、2021年5月7日受理、出版。

2021年6月10日発行)

目的： SpekPyは、Pythonプログラミング言語でX線管スペクトルをモデリングするための無料のツールキットである。この記事では、バージョン2.0（v2）の進化について、追加されたターゲット材料やより正確なヒール効果のモデリングについて説明する。また、ツールキットの使用法も紹介します。

方法 SpekPyの予測値を、実験的に決定されたスペクトル（3つの放射線品質基準（RQR）シリーズのタングステンスペクトルおよびモリブデンターゲットを用いた1つのマンモグラフィースペクトル）との比較で説明する。また、GE Revolution™ CT scanner (GE Healthcare, Waukesha, WI, USA)を例に、管電位による管出力の変化を正しくモデル化するソフトウェアの能力を評価し、同システムの技術参照マニュアルの仕様も紹介する。さらに、SpekPyで利用可能な物理モデルがいくつかあることにも注目しました。これらを比較すると

中心軸上と中心軸外での違いを説明します。

結果 SpekPyは、広い管電位範囲において、視覚的にも、第1および第2半値層（HVL）の点でも、実験スペクトルと密接に一致した（ここでは2%以内）。CTスキャナーのスペクトル出力（120kVの管電位に正規化）は、70～140kVの範囲で4%以内に一致しました。デフォルトの物理モデル（casim）は、ほとんどの状況で適切である。高度なオプション（*kqp*）は、制動放射異方性の影響を完全に含んでいるため、陽極ヒール効果のモデル化に高い精度が必要な場合に使用する必要があります。

結論 SpekPy v2は、タングステンおよびモリブデンターゲットの軸上および軸外のスペクトルを確実に予測することができます。SpekPyのオープンソースMITライセンスにより、ユーザーはこの強力なツールキットを自分のプロジェクトに自由に取り入れることができます。© 2021 The Authors. *Medical Physics* は、American Association of Physicists in Medicine [https://doi.org/10.1002/mp.14945] に代わってWiley Periodicals LLCから出版されています。

キーワード： ソフトウェア、X線イメージング、X線スペクトル、X線管モデリング

1. イントロダクション

X線管から放出されるX線スペクトルを予測すること

は、100年以上の歴史がある。¹しかし、パソコンが普及した現在では、経験則に基づく学術的な探求から、病院、教育、産業、研究などで日常的に使用される実用的なツールへと発展して

います。医学物理学で利用できるソフトウェアアプリケーションやツールキットは、さまざまなものがあります。²⁻⁷どのツールを選択するかはユーザーの正確な用途やニーズに合わせて、また個人的な思い入れこの記事の著者の一人は、グラフィカル・ユーザー・インターフェース（GUI）に基づく人気のアプリケーションであるSpekCalcの作成に携わっていました。³本稿の主題であるSpekPyは、そのさらなる発展形と見なすことができる。

より強力な機能を提供し、グラフィカルなインターフェースの限界を超えることができます。

SpekPyは、X線管スペクトルをモデリングするためのオープンソースのツールキットです。コードはPython言語（Python Software Foundation, DE, USA）で記述されています。SpekPyのバージョン1.0（v1）は、Bujila et al.によって導入されました。⁸は、タングステン陽極の予測に限定されていましたが、広い管電位範囲（15～1000kV）でX線管をモデル化することができました。このノートではここでは、ツールキットのコア機能を要約し、SpekPyバージョン 2.0（v2）に組み込まれた進歩について説明し、ツールキットの能力を示す例を紹介します。特に、v2では、モリブデンおよびロジウム陽極（20～50kV）のモデル化が可能になり、タングステン陽極（20～300kV）の仕様も改良されました。このことは、次のようなX線管に関連することを意味します。

© 2021 The Authors. Wiley Periodicals LLCが発行するMedical Physicsは、以下の通りです。

本論文は、Creative Commons Attribution- NonCommercial-NoDerivs Licenseの条件の下、オープンアクセス論文であり、原著が適切に引用され、その使用が非営利であれば、いかなる媒体においても使用および配布が許可されています。営利を目的としたものであり、改変や翻案が行われるものではありません。

3630 メドです。Phys. 48 (7), July 2021 0094-
2405/2021/48(7)/3630/8

3630

マンモグラフィ、レントゲン撮影、低・中エネルギーX線治療、工業試験場のシミュレーションが可能になりました。

2. 材料と方法

2.A. ツールキットについて

SpekPyツールキットは、寛容なMITソフトウェアライセンスに基づき、無償で利用できます。Python 言語バージョン 2 および 3 と互換性があります。標準的な NumPy と SciPy の Python ライブラリが必要です。^{9,10}matplotlib ライブラリも結果をプロットするのに便利です。¹¹インストール方法については、オンラインソフトウェアリポジトリ (https://bitbucket.org/spekpy/spekpy_release)を参照してください。現在、GUIやウェブアプリケーションは用意されておらず、ユーザーはコマンドを入力する必要があります。これは、PythonスクリプトまたはPythonインタプリタから行うことができます。

SpekPyは、クラスとメソッドを使用するオブジェクト指向プログラミングパラダイムで書かれています。ツールキットのメインクラスの名前はSpekです。ユーザーはそのクラスのインスタンスを作成し、各インスタンスは特定のX線管の表現となる。スペクトル・インスタンスを作成する際に利用できるキーワード引数がいくつかある。最も重要なものは、表Iに示されている。ツールキットのユーザーは、X線スペクトルのフィルタリング、さまざまなX線ビームメトリクスの計算、新しい材料の作成、SpekPy状態の保存または読み込み、テキストファイルへのスペクトルの保存または読み込みができるように、クラスメソッドと呼ばれるさまざまな追加ツールが提供されています。最も重要なクラスメソッドの概要は、表IIに示されています。

SpekPyの使用例として、以下のようなものがあります。¹²の付録です。スクリプトの例では、以下のような表現を構築します。GE Revolution™ CTスキャナ（GEヘルスケア、ウォーケシャ。WI, USA）、テクニカル・リファレンス・マニュアル（TRM）に掲載されている情報に基づき作成しました。

2.B. ツールキットの物理モデル

表II.Spekクラスで最も重要なメソッド。

方法	カテゴリー	商品説明
フィルター()	G	指定された素材と厚さのフィルターを貼る
multi_filter()	G	指定した太さのフィルターを複数かける
set()	G	スペクトルのキーワードパラメータを変更する
clone()		インスタンス
作成する get_spectrum()		Gスペクトルインスタンスのコピーをフルエンススペクトルとエネルギービンを返す get_kerma()
get_hvl1()	E最初の	半値層（材料選択可能）
get_hvl2()		ES第二半値層（材料選択可能） get_hc()
	E	均質性係数（材料選択可） get_emean()
ゲットウエフ	E	スペクトルの平均エネルギー
ゲットマットル()	E	スペクトルの有効エネルギー（素材選択可能）
ゲットフルー	E	指定減衰量に対する厚み (素材選択可)
get_eflu()		スペクトルの積分 フルエンス
		Eスペクトルの積算エネルギーフルエンス
get_std_results()		ビーム品質メトリクスなどの標準的な結果
make_matl()		MCreate new material (by formula or weight)
remove_matl()		ぶんすう) Mデータベースから素材を削除する show_matl()
		MS 利用可能な素材を表示する
load_state()	S	過去に保存した状態をロード
save_state()	S	スペクトルインスタンス状態を保存
remove_state()	S	状態を削除 show_states()
	S	利用可能な保存状態を表示
エクスポート		IOE スペクトルのテキストファイルへの書き出し
スペクトラム()		

SpekPy v2では、新しい物理モデルが導入されました。

load_from_file() IO テキストファイルからスペクトルを読み込む

メソッドは、一般 (G)、値の抽出 (E)、材料 (M)、状態 (S)、入出力 (IO) に分類される。各メソッドに渡すことは、

¹⁵SpekPy v2で利用できる物理モデルは以下の4つです。
を表IIIに示します。

表1. *Spek*クラスのインスタンスを作成する際に指定できる最も重要なキーワード。

デフォルト		
キーワード	コメント	価値
ケービー	チューブ電位 [kV]	100
くぼう	アノード角度、 θ [°]。	12
タール	対象材料 ["W"、"Mo"、"Rh"のいずれか]。	"W"
ディーケー	エネルギービンの幅 [keV]	0.5
マス	露出設定 [mAs]	1.0
物理学	物理モデル [表III参照]	「カシム
z	フォーカスから検出までの距離[cm]。	100
x / y	横位置、陽極-陰極/他方向 [cm]。	0/0
オブリー	フィルターの斜めパスについて考察【真偽のほどは？】	真
mu_data_source	光子係数のソース ["nist" または "casim"]	表III参

メディカルフィジックス、48 (7)、2021年7月号

とができる引数の詳細については、リポジトリのWiki ページ (

https://bitbucket.org/spekpy/spekpy_release/wiki/Function%20glossary) にある関数用語集を参照してください。

Omaret al.が最近発表した進歩を取り入れている。¹³⁻

spekcalc と *spekpy-v1* モデルは SpekPy v1 で利用可能でした。*spekcalc* モード (v1 では *legacy* モードと呼ばれる) は SpekCalc アプリケーションの予測値をエミュレートします。

spekpy-v1 モードは SpekPy の v1 のデフォルトモデルで、SpekCalc のアプローチに理論的・数値的な改良を取り入れたものです。実装の詳細は別の場所で公開されています。^{8,16,17} しかし、注目すべきは、どちらも制動放射の角度分布が一様であると仮定し、参照データに対して経験的な正規化を用いていることです。また、両者とも

特徴的なX線寄与 (*spekcalc* ではK殻のみ) に対して、ターゲットによる特徴的な放射のフィルタリングを適用せずに、単純な半経験的モデルを使用します。光子係数 (質量減衰と質量エネルギー吸収の両方) は、米国国立標準技術研究所 (NIST: MD, USA) の表からデフォルトで選択されたものである。^{18,19}

casim モードは SpekPy v2 の新しいデフォルトモデルです。制動放射の寄与は、以下のシミュレーションに基づくものです。

表III.SpekPy v2.0で利用可能な物理モデル。

物理学 モデル	コメント	ター ゲッ ト 種類	フォトン データセット
	SpekPy v2W	、 Mo 、 Rh におけ る casimD efault 。	ベネロペ
ケーケーピー	高精度モデル（より 低速）	W、 Mo、 アール エイチ	ベネロペ
スベックカルク	SpekCalcソフト ウェアをエミュレー ト	W アイエスティー	エヌ
spekpy-v1 スティー	SpekPy v1での以前のデフォルトw		エヌ アイ エ

モデルの選択は、*physics* キーワードを使用してプログラムで指定します。各モデルで選択可能なターゲット材料がリストアップされています。NIST は National Institute of Standards and Technology (MD, USA)、PENELOPEはPENELOPE Monte Carlo code sys-temを意味します。²¹

電子の方向とエネルギーは、ターゲットの深さによって異なる。20-300keVの入射電子に対する表組みは、Omarらの研究成果から引用した。¹⁴NISTの制動放射断面面積の表は、光子エネルギーの差分である²⁰が使用される（*spekpy-v1* ではそうだが、*spek-calc* ではそうでない）。制動放射角の簡単な近似値分布が適用される。*casim*モデルはOmar et al.に記載されている*sim*モデルと同一である。¹⁴で説明したsimモデルと同じである。しかし、軸外のスペクトルでは、陽極の可変自己濾過は考慮されているものの、制動放射角度分布の積分は、異なる放射角度で再計算されない。これにより、例えば、空気カーマのプロファイルを計算する際に、同じチューブインスタンスの複数の空間点における測定基準を迅速に計算することができます。特徴的な寄与は、Omarらによって発表されたターゲットアノードにおけるモンテカルロ計算による深さ分布に基づいている。¹³LシェルとKシェルの両方が含まれ、適切な放出角度依存のターゲットフィルトレーションが適用されています。光子係数（質量減衰と質量エネルギー吸収の両方）のデフォルト選択は、PENELOPEモンテカルロコードシステムから得られたものです。²¹

kqp モードは SpekPy v2 で導入されたもので、Omar

Omar et al.で発表された深さ方向分布データ。²⁴は、3つのターゲット材料全てに使用されている。

2.C. ツールキットのデモ

2.C.1. の出力と半値層を予測する。
管

空気中のHVLとCT線量指数フリー²⁵(CTDI_{freeair}) は、GE Revolution™ CTスキャナについて、いくつかのx-で予測された。

et al.で提案された inno-vations の完全な実装を表す、最も正確なモデルです。^{14,15}デフォルトの*casim*モードとは2つの違いがあります。まず、Kissel、Quarles、Prattによる制動放射角度分布のパラメータ化を使用しています。²²のように、簡略化された表現に頼るのではなく、そのような表現が可能である。次に、*kqp*モードでは、各発射角度についてブレムスストラルング角度分布の積分を再計算し、角度依存のターゲットセルフフィルタリングを適用する。

*casim*と*kqp*の両モデルでは、タングステンに加え、モリブデンやロジウムのターゲットもシミュレートできるようになりました。制動放射寄与については、Omar et al.²³に掲載された電子深度分布データを使用した。ロジウムの電子深度分布は、モリブデンの電子深度分布を、各材料の連続的な低速・高速・低速の比によってスケールリングすることによって推定した。ing down approximation (CSDA)の範囲です。これは合理的な原子番号が類似していることから、近似的に算出された。特徴的な寄与については、シミュレーションされた

線管電位。CT スキャナーの表現は、120kV の管電位で公称HVLを合わせることで構築された。さらに、CTDI_{freair} はアイソセンタの空気カーマに比例し、両者の変換係数は、固定ビームコリメーションでは管電圧に依存しないものとして扱えるという事実を利用した。SpekPy の空気カーマ予測に、CTDI_{freair} の公称仕様（120kV、40mmコリメーション）に基づき決定した変換係数を乗じた。次に、管電圧70、80、100、140 kV におけるSpekPy のHVL およびCTDI_{freair} の予測値を、TRM の公称仕様と比較しました。実装の詳細については、付録を参照してください。

2.C.2. 実験スペクトルとの比較

SpekPyの予測は、フルエンススペクトルやHVL（アルミニウムのmm単位）の点で、様々な公開されているスペクトルと比較されました。

ラジオグラフィーのスペクトルは、国立標準研究所が公表しているデータから選択した。²⁶X線管はタングステン陽極で、陽極の角度は20度であった。この管は、1mmのベリリウム（窓）と250 μ mのカプトン（モニターチャンバー）の内部濾過を備えていた。さらに

、2.5 mmのアルミニウムのフィルタリングが施されている。測定結果は、3つの管電位に対応する3つのスペクトルのものである。60kV（RQR4）、80kV（RQR6）、120kV（RQR9）です。測定は、中心軸上で、焦点から検出器までの距離が100cmで行われた。

モリブデン陽極を備えたHolologic Selenia DR マンモグラフィシステムで生成された、単一のマンモグラフィスペクトルを選択した。²⁷このスペクトルを0.8mmのベリリウムと25 μ mのロジウムを使用した。陽極角は22.4度、管電位は28kVであった。45cmのエアギャップと圧縮パドルのプレセンスで2.35mmのPMMAも想定しています。測定されたスペクトルには、スプリアスに高い低エネルギーのテールが存在する。¹⁵これを抑制するために、10 mmの脂肪組織²⁸を、測定と予測の両方のスペクトルに追加した。

測定した4つのスペクトルのHVLは、テキストファイルからスペクトルをインポートした後、SpekPyを用いて計算しました。

2.C.3. 物理モデルの比較

RQR6では、表IIIに示す4つのSpekPy物理モデルの予測値を比較した。また、3つのRQRスペクトルすべてについて、中心軸上と中心軸外の空気カーマの予測も計算された。

3. 結果

3.A. 真空管の出力と半値層の予測

GE Revolution™ CT スキャナーの SpekPy representation の HVL と $CTDI_{freeair}$ 予測値を表IVに示す。HVLはTRMの精度内で一致し、 $CTDI_{freeair}$ の予測値は4%以内であった。

表IV. free GE Revolution™ CT スキャナーの SpekPy モデルを使用して、5つのX線管電位について計算された1st HVL および $CTDI_{freeair}$ の値。

管電位 (kV)	HVL1 (SpekPy) (mm Al)	HVL1 (参考) (mm Al)
70	4.7	4.7
80	5.4	5.4
100	6.6	6.6
120	7.6	7.6
140	8.5	8.5

管電位 (kV)	$CTDI_{freeair}$ (SpekPy) (mGy/400 mAs)	$CTDI_{freeair}$ (参考) (mGy/400 mAs)
70	18.08	18.76
80	26.74	27.47

基準値は、「Large」コリメーターフィルターと40mmコリメーションの技術参考書から引用した。¹²HVL と $CTDI_{freeair}$ の予測値は、管電位 120 kV で基準値と一致させた。SpekPyの物理モデルがデフォルトで選択されていた (*casim*)

3.B. 実験スペクトルとの比較

マンモグラフィとラジオグラフィの4つの実験スペクトルとSpekPyの予測値を図1に示す。SpekPyの予測値は、検出器の測定値と同様のエネルギー分解能を提供するために、ガウスフィルタで畳み込まれています。視覚的に、SpekPyと実験の一致は良好である。計算された第1および第2のHVLは、表Vに示されている。すべてのケースで2%以内に一致し、優れた一致を示しています。

3.C. 物理モデルの比較

前回紹介した結果は、以下の方法で作成しました。SpekPyのデフォルトの*casim*物理モデルです。相違点には、選択可能な物理演算の選択肢が強調されています。図2.図中、RQR6スペクトルの予測値を表IIIに示す4つのモデルすべてについてプロットした。その*casim*モデルの予測値と密接に一致しています。最も正確なモデル: *kqp*。しかし、*spekcalc*モデルは、

は、高エネルギーテールでのフルエンスを過剰に予測する。この過の予測は、*spekpy-v1*モデルでさらに悪化しています。アノード・カソードに沿ったエアカーマの予測は、 $\times 1/4$ 0).中心軸の実験スペクトルから計算された値も表示されています。オフ軸の予測値には、距離の2乗、任意のフィルターを通したX線の斜めの経路、アノードヒール効果の影響が含まれています。が表示されます。

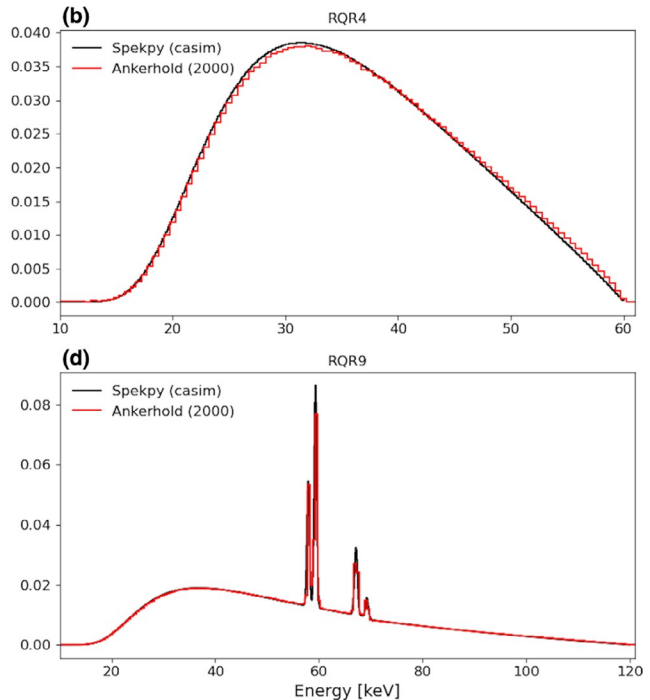
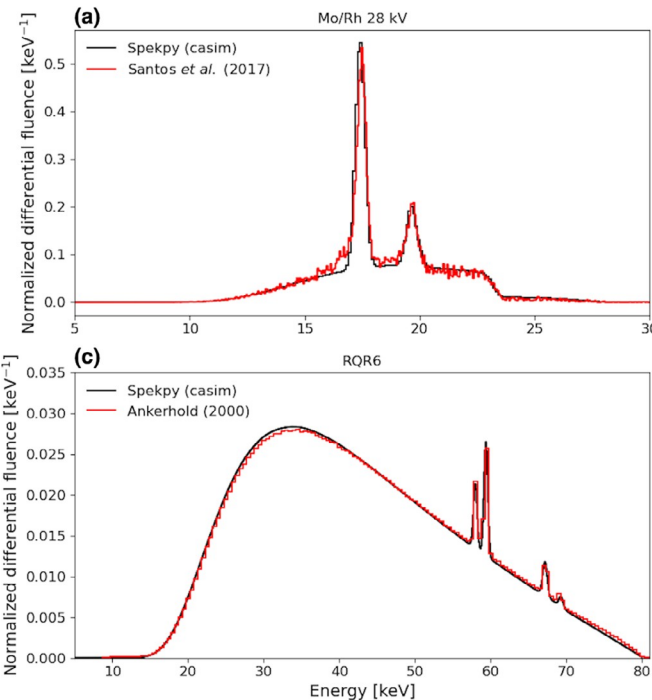


図1. SpekPy による予測値 (*casim*) と実験値との比較: (a) Mo/Rh 28 kV (Santos et al.²⁷)、(b) RQR4 (Ankerhold)²⁶)、(c) RQR6(Ankerhold)、(d) RQR9(Ankerhold)。曲線下の面積はユニティに正規化されている。SpekPy 計算のビン幅は0.1keVで、マンモグラフィとラジオグラフィのスペクトルにはそれぞれ $\sigma/40.2$ 、0.25keVのガウスフィルターを適用した。ガウシアンフィルタはSpekPyに組み込まれた機能で適用しました。[カラー図はwileyonlinelibrary.comで見ることができます]。

メディカルフィジックス、48 (7) 、2021年7月号

表V. *casim*物理モデルを用いた4つのスペクトル (Mo/Rh 28 kV、RQR4、RQR6、RQR9) の第1および第2のHVL値の計算値

スペクトラム	HVL1 (SpekPy) (mmAl)	HVL1 (参考) (mm Al)	不一致(%)
Mo/Rh 28	0.498	0.491	1.4
RQR4	2.042	2.051	-0.5
RQR6	2.631	2.637	-0.2
RQR9	3.955	3.938	0.4

スペクトラム	HVL2 (SpekPy) (mmAl)	HVL2 (参考) (mm Al)	不一致(%)
Mo/Rh 28	0.570	0.560	1.8
RQR4	2.840	2.888	-1.7
RQR6	3.951	4.012	-1.5
RQR9	6.393	6.433	-0.6

基準値は、実験的に決定されたスペクトル (Ankerhold) に基づき算出した。²⁶およびSantos et al.²⁷⁾

kqp の予測はベンチマークとみなすことができます。その結果、*spekcalc* の曲線は他の曲線より上方に配置され、*kqp* の曲線は他の曲線と異なる形状を示すことがわかりました。

4. ディスカッション

GE Revolution CT scan-nerの予測例から、単一の管電位で1回だけマッチングを行うことで、HVLとCTDI_{freeair}の異なる管電位での良い一致が期待できることがわかります (表IV参照)。このことは、Omarらの結論を支持するものです。¹⁵の結論は、SpekPy v2 の基礎となるモデルが、HVL の変化を正確に表現しているということです。

フルエンス、およびチューブポテンシャルによるスペクトル形状の変化。

図1にプロットした4つのスペクトルと、表Vに示した導出されたHVLについて、SpekPyと実験の間には良好な一致があり、HVLは2%以内で一致した。なお、新しいSpekPy v2モデルは、PENELOPEモンテカルロコードシステムから得られた光子の断面積を利用しています。²¹を使用して、スペクトルをフィルタリングし、HVLを計算しました。これらの断面積は、実験スペクトルからHVLを計算する際にも使用されました。NISTのデータセットを使って計算されたHVL値は、引用された値から最大で2%変動しましたが、両者で一貫して選択した場合、実験とSpekPyの間で同様の一致が得られました。

kVのX線の光子エネルギーにおいて、PENELOPEとNISTのデータセットは、実質的に光電気効果のデータのみが異なっており、これらはPENELOPEにおける再正規化サブシェル断面積である²⁹と、XCOMコードに基づくNISTの非正規化断面積¹⁸と、Seltzerによる質量エネルギー移動係数と質量エネルギー吸収係数に関する研究である。¹⁹ICRUレポート90では、両方のデータセットを検証していますが、レポートの他の重要なデータとは異なり、どちらか一方のデータセットについて特定の推奨はされていません。³⁰そのため、SpekPyではユーザーがどちらかを選択することができます。

図2に示した利用可能な物理選択間の違いは、基礎となる物理モデルを参照することで説明することができます。*spekcalc* オプションは、*spekpy-v1* モデルと同様に、高エネルギーテールでのフルエンスを過剰に予測する。両者とも過大評価の原因は、アノードでの電子の拡散を瞬時に仮定していることです。¹⁴しかし、*spekcalc* の場合、その誤差は制動放射断面積のシステムの誤差によって部分的に相殺されます (SpekCalcで使用されている修正Elwert-Bethe-Heitler断面は、より正確なNIST断面よりも軟らかく¹⁷)。したがって、*spekcalc* は一般に、以下のような恩恵を受けていると言えるでしょう。

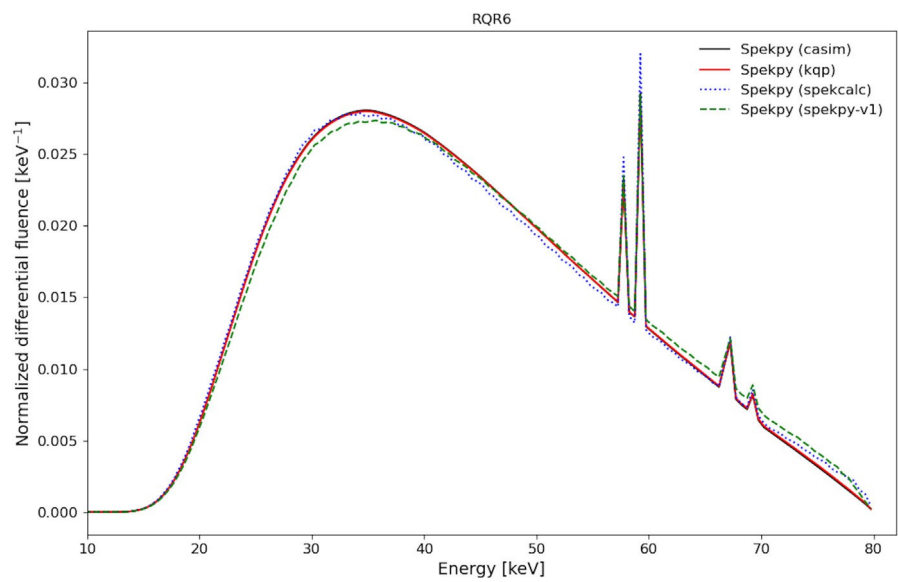


図2.様々なSpekPyモデル: *casim*、*kqp*、*spekcalc*、*spekpy-v1*に対するRQR6スペクトルの予測。曲線下の面積はユニットに正規化されている。SpekPyの計算のビン幅は0.5keVである。[カラー図はwileyonlinelibrary.comで見ることができる]。

メディカルフィジックス、48（7）、2021年7月号

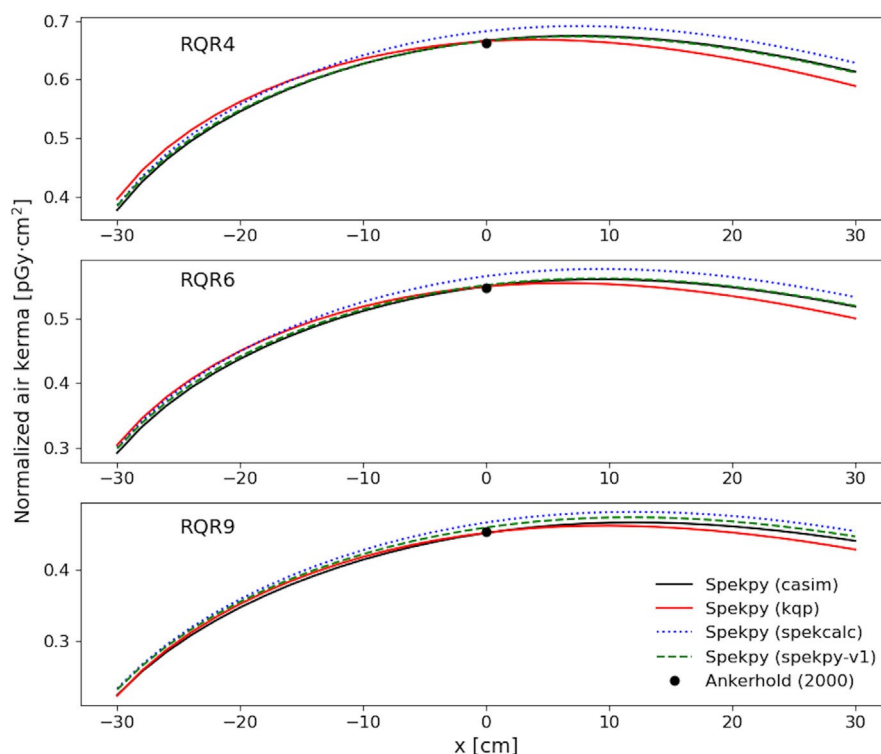


図3.RQR4、RQR6、RQR9スペクトルの様々なSpekPyモデルにおける位置（陽極-陰極方向）によって変化する正規化空気カーマ予測値。カーマ値は、中心軸（ $x \approx 0$ cm）上の全フルエンスで正規化されています。また、中心軸の実験スペクトル（PENELOPE光子係数を使用）から得られた値も示しています。[カラー図はwileyonlinelibrary.comで見ることができる]。

誤差が偶然に相殺された。高エネルギーテールでの過大評価はHVL予測に大きな影響を与えず、この点で *spekpy-v1* は測定に対してよく検証されていることに留意されたい。⁸

図3に示した空気カーマのプリディクションについて、2つの観察がなされた。*spekcalc*の曲線が上方にずれていることと、*kqp*の曲線が異なる形状をしていることである。最初の効果（上方への変位）は、PENELOPEコードシステムから得られた係数ではなく、NISTの係数を*spekcalc*モデルで使用したことが主な原因です。この不一致は、再正規化(PENELOPE)と非正規化(NIST)の光反射断面積を用いた場合の空気質量エネルギー吸収係数の違いと一致している(ICRU Report 90の図7.4参照)³⁰ここで、再正規化された係数は最大で3%低くなる。

2つ目の効果（曲線形状）は、*kqp*が各発射角度におけるターゲット内の電子方向と制動放射角度分布に関する積分を再評価する唯一のモデルであることに起因する。これは、デフォルトの*casim*モデルのアプローチよりも正確ですが、軸外メトリクス計算には、計算効率が悪いです。今回の計算に使用したデスクトップ

パソコン（Intel i7-4790 3.6 GHzプロセッサ）では、RQR6スペクトルの1つの空間位置に対して、*casim*モデルはスペクトルを生成して空気カーマ値を返すのに0.4秒かかりましたが、*kqp*では1.6秒でした。しかし、カーマプロファイルを生成するために使用した31のポジションでは、*casim*モデルは合計で0.5秒しか必要としませんでした。

*kqp*の場合は52.1秒。密にサンプリングされたラインプロファイルの場合や

2 次元画像のシミュレーションを行う場合、*casim*モデルは、ヒール効果のモデル化において最大数パーセントの不正確さを犠牲にして、劇的なスピードアップを実現します。

SpekPy v2 には、モンテカルロ法に頼るものを除き、医療用X線管のスペクトルシミュレーションソフトウェアの中で、我々が知る限り最も高度なモデルが含まれている。しかし、Omar et al. で実証されているように、よりシンプルなソフトウェアでも十分に対応できる。¹⁵しかし、Omar et al.で実証されているように、よりシンプルなソフトウェアでも、多くの状況において予測に完全に適しています。このような状況とは、ほとんどの放射線応用分野で典型的な陽極角度（タングステン陽極では10～15度）を持つ管の中心軸上でのみビーム測定が必要な場合である。どのようなソフトウェアを選択するかは、ユーザーの

タスクに依存します。
と個人の好みに合わせて携帯用アプリケーションで、シンプルな
ユーザーインターフェイスで十分かもしれません。²⁻⁴
あるいは、SpekPyのようなスクリプト可能なツールキットが望まれるかもしれません。

Python プログラミング言語で利用できるX線スペクトル計算のための代替ツールキットは、内蔵のGUIが利用可能な*xpecgen*です。⁶さらに、MATLAB プログラミング環境（MathWorks Inc.、Natwick, WY, USA）で利用できるツールキットもあります。⁵とxrTkがあります。⁷があり、前者はGUI機能も備えています。これらのツールキットにはいずれも長所がありますが、SpekPyほど軸外スペクトルの計算に適しているものはありません。

医療用X線管のモデリングのための汎用ツールキットとして、SpekPyの精度は、光子質量減衰係数とエネルギー吸収係数の不確実性、散乱と焦点外放射の存在を考えると、達成可能な限界に近いと考えられます。注意すべきは、SpekPy

データ利用可能ステートメント

本研究の成果を裏付けるデータは、SpekPy (https://bitbucket.org/spekpy/spekpy_re リース、参照番号 b5e01a8 (v2.04)) にて公開されています。

^{a)}著者名: Author to be addressed for correspondence.電子メール Gavin.Poludniowski@sl.se

参考文献

- Kramers HA.X線吸収の理論と連続X線スペクトルの理論について. *Philos Mag.*1923;46:836-871.
- Cranley K, Gilmore BJ, Fogarty GWA, Deponds L. Catalogue of diagnostic X-ray spectra. *Phys Med Biol.* 2009;54:N433-N438.
- Poludniowski G, Landry G, DeBlois F, Evans PM, Verhaegen F. SpekCalc: a program to calculate photon spectra from tungsten anode x-ray tubes. *Phys Med Biol.* 2009;54:N433-N438.
- Hernandez AM, Boone JM. タングステン陽極のスペクトルモデル (インターポーリングキュービックスブライン: 20kVから640kVまでのフィルタリングされていないX線スペクトル). *Med Phys.* 2014;41:042101.
- Punnoose J, Xu J, Sisniega A, Zbijewski W, Siewerdsen JH. Technical Note: spektr 3.0-A computational tool for x-ray spectrum modeling and analysis. *Med Phys.* 2016;43:4711.
- Hernandez G, Fernandez F. xpecgen: タングステン陽極で発生するX線スペクトラを計算するプログラム. *J Open Source Softw.*2016;00062.
- xrTk: A MATLAB toolkit for X-ray physics calculations. In: Helmenkamp J, Bujila R, Poludniowski G, eds. *MATLABによる診断放射線物理学*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2020.
- Bujila, Omar, Poludniowski G. SpekPyの検証: X線管スペクトルのモデリング用ソフトウェアツールキット. *Phys Med.*2020;75:44-54.
- Virtanen P, Gommers R, Oliphant TE, et al. SciPy 1.0: fundamental algorithmic library for scientific computing with Python. *Nat Methods.*2020;17:261-272.
- Harris CR, Millman KJ, van der Walt SJ, et al. Array programming with NumPy. *Nature.*2020;585:357-362.
- Hunter JD. Matplotlib: 2D グラフィックス環境. *Comput Sci Eng.* 2007;9:90-95.
- RevolutionTM CT, RevolutionTM CT ES テクニカルレファレンス マニュアル584888-1EN リビジョン1. Waukesha, WI: GE Healthcare; 2020.
- Omar A, Andreo P, Poludniowski G. A model for the emission of K and L x rays from an x-ray tube. *Nucl Instrum Meth B.* 2018;437:36-47.
- Omar A, Andreo P, Poludniowski G. A model for energy and angular X線管から放出されるX線の分布. 第I部 プレムストラル線の生成. *Med Phys.* 2020;47:4763-4774.
- Omar A, Andreo P, Poludniowski G. A model for energy and angular X線管から放出されるX線の分布. パートII. 20~300kVのX線スペクトルの検証. *Med Phys.* 2020;47:4005-4019.
- Poludniowski G, Landry G, DeBlois F, Evans PM, Verhaegen F. SpekCalc: a program to calculate photon spectra from tungsten anode x-ray tubes. *Phys Med Biol.* 2009;54:N433-N438.
- Berger MJ, Hubbell JH. *XCOM: 光子断面積を個人で見る* コンピュータレポート NBSIR 87-3597. Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards; 1997. オンラインで利用可能 <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>.
- Seltzer SM, Berger MJ. 光子の質量エネルギー移動係数と質量エネルギー吸収係数の計算. *Radiat Res.* 1993;136:147-170.
- Seltzer SM, Berger MJ. 電子の相互作用によるプレストラルスペクトル スクリーンされた原子核と軌道電子を持つイオン. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B.* 1985;12:95-134.
- Salvat F. PENELOPE-2018: モンテカルロ・シミュレーションのためのコード システム. *Report NEA/MBDAV/R (2019)1.* Issy-les-Moulineaux, FRA: OECD Nuclear Energy Agency; 2018.
- Kissel L, Quaresima CA, Pratt RH. 運動エネルギー1-500keVの電子が特定の中性原子Z 92に与える原子場ブレームストラングに対する形状関数. *Nucl Data Tables.*1983;28:381-460.
- Omar A, Andreo P, Poludniowski G. MATLABによる実装を行った。X線管から放出されるX線の解析モデル. *Mendeley Data, V3.*2020. <https://doi.org/10.17632/hj5sctyt8.3>
- keV電子がAu, W, Rh, Mo, Cu, Crの厚いターゲットに入射して発生するK, L蛍光X線のモンテカルロ計算による深さ方向分布. *Mendeley Data, V1.*2018. <https://doi.org/10.17632/mnr2zx92h3.1>
- 国際電気標準会議 (IEC)。医療用電気機器-第2-44版 3: コンピュータ断層撮影用X線装置の基本安全性能及び基本性能に関する特別要求事項. IEC 60601-2-44 Ed.3. IEC Geneva, 2009.
- Ankerhold U. *Catalogue of X-ray Spectra and their Characteristic Data-ISO and DIN Radiation Qualities, Therapy and Diagnostic Radiation Qualities, Unfiltered X-ray Spectra PTB Report Dos-34.* Braun-schweig, DE: Physikalisch-Technische Bundesanstalt; 2000.
- Santos JC, Tomal A, Furquim TA, Fausto AMF, Nogueira MS, Costa PR. CdTe スペクトロメーターを用いた臨床マンモグラフィーのX線スペクトルの直接測定. *Med Phys.* 2017;44:3504-3511.
- ホワイトDR, ブーズJ, グリフィスRV, スポーカスJJ, ウィルソンIJ. デジタル放射線の線量測定と計測における。放射線単位と測定に関する国際委員会の報告書44。ベセスダ、メリーランド州: ICRU; 1989.
- Sabbatucci L, Salvat F. Theory and calculation of atomic photoeffect. *Radiat Phys Chem.*2016;121:122-140.
- Seltzer SM, Fernandez-Varea JM, Andreo P, et al. *Ionizing Radiation Dosimetryのための主要データ. 測定基準と応用. 国際放射線単位・測定法委員会報告第90号.* ベセスダ、メリーランド州: ICRU; 2016.

メディカルフィジックス、48（7）、2021年7月号