Dosimetric verification of modulated photon fields by means of compensators for a kernel model

カーネル・モデル用の補償フィルターを用いる

モジュール化光子照射野の線量的検証

Lars Weber, Finn Laursen

抜 粋

補償フィルター - 導入による深部硬質化効果をモデル化するためにビーム 品質補正係数を適用するという治療計画における研究を調査し、ここに述べる 作業は通常の補償フィルター材料に関してそのモデルを線量測定的に検証する ものである。4 種類のファントム形状のための鉛シート・モジュレータをそのモ デルに基づく治療計画システムを使って設計した。そのモジュレータは平面に おいて均質な線量を生み出すように設計した。鉛シートによって作成された計 算によるモジュール化が治療計画システムに再度インポートされ、検証目的の ために水ファントム・ジオメトリーに適用された。測定値を比較しながら、全 部で 31 個の種々なジオメトリーが測定され、このジオメトリーにおける諸計算 は、周辺領域及び鉛シートの縁辺部に近い局部的な場合を除き、最大偏差4% の値を以って深部線量、線量プロファイル、及び出力データに関して良好な一 致を示した。

© 2002 Elsevier Science Ireland Ltd. 全権留保済み。

キーワード: **Convolution, Compensator, Modulation, Dosimetry** (回旋) (補償フィルター)(モジュール化)(線量測定)

1. 導入

高エネルギー遠隔治療の導入に伴い実感されたことは、多くの状況におい て標的体積全体に対して更に均質な線量とするために照射野をモジュール化す る必要があったということである。機械的なウェッジに加えて、補償フィルタ ーの使用によってビームのモジュール化を行ったが、それには3つの主な方法、 即ち喪失組織補償、出口線量補償或いは平面において均質な線量を生み出す補 償、の内の1つによるものであった。後者の2方法は大抵、補償フィルターの ための計算ベースとして計算による断層写真(CT)の使用を含む。

高エネルギー光子放射線治療において補償フィルターを構築するための第 一原則は、高さの異なる正方形のブロック或いは確定された形状[9]になる ようカットされた高密度材料の金属片(フォイル)を使用することを基本とし た。以上については希望する形状にカットされた薄い鉛シートを利用すること で更に改良された。しかしながら、これらの技法では、ある一定の減弱レベル しか確保できないので、自由度においていささか欠けるところがある。発泡ス チロールを削り取りそこに適当な材料を埋め込むことにより、任意の3次元形 状が導入された。これらの材料には、鉛のような低融点合金、Rose's and Lipowitz メタル、鋼または錫の小粒ショット、或いはある物質例えば石膏やワ ックスの中に埋め込んだ高密度材料の混合物などがあり、補償フィルターを硬 化する。近年になってコンピュータ制御切削マシンの出現により、'柔らかい' 材料、例えば鉛ーポリエチレン、から直接最終形状を削りだす方法が可能にな った。

線状減弱係数のみを考慮する補償フィルター並びにその補償フィルターの 局部的な厚さを対象として包含する線量計算は大きなエラー [9] を生む可能性 がある。一次要素及び散乱要素に対して計算を分けて行うという更なる進歩に よって線量計算の正確性 [16] が格段に増加した。分析モデル [5, 10] 及び'拡 大ファントム'モデル [13] の統合が一方では公になった。モジュール化され た光子ビーム用に最近の治療計画システム(TPS)で使用されるカーネル・ ベースのモデルについては、今日までに検証データが文献に載ったことは余り ない。

ここでの作業の目的は、高密度補償フィルターに関連して市販のTPSに おいて使用されるペンシル・カーネル・ベースのアルゴリズムに対して線量計 算の有効性を確認することである。

2. 方法と材料

2.1. アルゴリズムの概要

線量計算を行った対象は市販のTPS、Helax-TMSバージョン 5.1 (MDS Nordion 社、Uppsala, Sweden) である。アルゴリズムとその正確性について はこれまでに多くの公刊物に述べられてきた〔2、3,11〕。便宜上、その主な特 質とモジュレータ特性をここに述べる。

TPS における線量計算は Ahnesjö [3] が述べた如く回旋法に基づいており、下記により与えられるパラメータ化ペンシル・ビーム・カーネルによる半

分析的アプローチを利用するものである:

ここで、r はペンシル・ビームの軸からの半径であり、 A_z 、 a_z 、 B_z 、及び b_z は深部従属のフィッティング・パラメータである。ペンシル・ビーム・カーネ ルは入射エネルギー・フルエンス分布と共に回旋して線量を生み出す。

TPSにおいては、治療ヘッドから放射する総エネルギー・フルエンス Ψ_{tot} は下記で与えられる:

$\Psi_{\text{tot}} = \Psi_{\text{prim}} + \Psi_{\text{f}} + \Psi_{\text{c}} + \Psi_{\text{m}}$ (2)

ここで、 Ψ_{prim} は一次エネルギー・フルエンスであり、 Ψ_{f} は平坦化フィルター 散乱〔4〕、 Ψ_{c} はコリメータ生成の散乱〔6〕、そして Ψ_{m} は照射野〔5〕例えば ブロック・トレー、ウェッジまたは補償フィルター、に導入されたモジュレー タによって作り出される散乱である。

補償フィルターに関しては、実行に移されたモデルは、フルエンスの一次分割及び散乱分割の補正に基づくモジュール化が与えるビーム品質効果を考慮する Ahnesjö et al [5] の作業を基本としている。当モデルの仮定するところによれば、第一順位散乱が支配部分であり、フィルター域ごとに発生する散乱が計算により補正される、それらの補正は断面積における変化(k_{σ})、コンプトン・エネルギー損失(k_{c})、散乱光子の減弱係数における変化に対する補正(k_{s})、並びに第二の制動放射線(阻止 X線)生成のための補正(k_{b})である。よって、

はフルエンス Ψ A に露出されるモジュレータの散乱エレメントdAから立体角 と面積で散乱させられるフルエンスをモデル化する、ここで n は古典的な光子 半径であり、 $NA \cdot Z/A$ は光子密度である。補償フィルターにおける局部的なモ ジュール化は η で与えられ、 $\mu I \rho$ は使用中のモジュレータの平均質量減弱率を 表す。モジュレータで導入されるビーム品質における転換の取り扱いは、2つ の補正係数、kPQ 及びkSQ、を導入することにより一次と散乱の線量要素を 補正することで行う、ここで kpg は下記で定義される:

____ 式 ____ (4)

また、*ksq* は似たような方法で定義される、参照〔5〕を見よ。gは制動放射線に対する二次荷電粒子のエネルギー損失であり、KERMA は物質中に放出される運動エネルギーである。その補正因数は、フィルター材料に関係なく、作動中は水に関して依存し常時評価されるファントム深度とフィルター厚さである。これらの値は密度の異なる場合に均質な媒体において使用するため放射線深度に応じて増減される。

一次フルエンスの有効モジュール化、^ήは下記により与えられる:

ここで μ はモジュレータ材料に関する線状減弱係数、 t はモジュレータ厚さ、 $k_{\Delta\mu coh}$ は減弱因数テーブルに含まれる凝集性散乱がその性質のためにビーム を減弱させるよりもむしろ線源を不鮮明にするが故に除外すべきであることを 考慮する1つの因数であり、 k_{μ} は減弱係数に適用する経験的に決定される因数

であり、主に軸外れによって生じる照射野全体において変化する減弱性状を取 り扱う。

ビーム品質のための特性化データの標準セットに加えて、**Kn**öös et al. [11] に見るとおり、モジュレータ特有の測定値が必要とされるが、これらはテーブ ル1に載っている。凡そ HVL1つに等しい厚さを有する単一スラブが特性化測 定値には必要である。モジュレータ材料(ρ、Z、Z/A)の物理的性状に関する データもまた必要である。

補償について2つの標準モードが得られる; 喪失組織補償並びに平面に おける均質線量である。喪失組織補償に対するアルゴリズムはビーム孔内部の 線源にもっとも近い外形ポイントを検索する。ビーム軸に垂直な仮想平面はそ の距離で位置決めされ、患者外形と仮想平面との間の体積は水相当の材料であ ると考える。喪失組織から決定されるモジュール化が構築され、そのモジュー ル化マトリックスが計算されビームに適用される。

平面における均質な線量に対しては、ビーム軸に垂直な平面が、その線量 が均質でなければならない平面として選択される。指定された線量グリッドに おける各線量ポイントは全体線量計算を使って計算し、均質な線量に至るよう モジュール化で局部的に修正する。モジュール化における変更は反復繰り返し で行い、通常4-5回の反復で収束する。その繰り返しは全ての線量ポイント が1%以下のモジュール化における変更を受けると停止される。外形に近接す る平面におけるポイントは除外される。

テーブル1

補償フィルター材料ごとに特有な特性化データの概要

 測定の種類	目的
5x5、10x10、15x15、20x20 cm x cm 照射野	増感スペクトルの抽出、電荷粒子汚染パ
に対する非モジュール化ビーム及びモジュー	ラメータ及び検証データのモデル化
ル化ビームに関する中心軸深部線量	
5x5、10x10、15x15、20x20 cm x cm 照射野	深部線量データ及び検証データのファン
に対する非モジュール化ビーム及びモジュー	トム散乱正規化
ル化ビームに関する水中及び空中における出力	
因数	
水中における最大正方形照射野に対するマトリ	k _μ - データ及び検証データ
ックス・パターンでのポイント線量測定	

2.2 線量計算

線量計算は4種類のファントム形状について行う:図1に示すように、 斜面、階段状溝、及び内部に空気またはアルミニウムを持つ小型のシリンダー を有する大型のシリンダー2本、である。これらのファントム形状は臨床上普通 に遭遇する状況のいくつかを反映するように選ばれるが、主目的が線量計算を 確認することであることからどの形状が適しているかは自ずと決まる。各々の ケースにおいて、ファントム形状に関係なく、ファントムの中心にあるアイソ センターで 30x30cm 照射野が中心になるよう位置決めされた。平面方式での均 質な線量はアイソセンター平面に適用され、モジュール化反復から得られるモ ジュール化マトリックスを全体組み立て用にエクスポートした。モジュレータ に相応する計算モジュール化マトリックスもまたエクスポートされて、TPS に 再インポートされ、従来からの水タンクと同じ寸法と性状でファントムに適用 される。意図するところは全ての照射野サイズに対して均質な線量を得ること



図1. 4種類のファントム形状、**A**-**D**、モジュール化マトリックス 作成に使用される。

線量 / MU

線量 / 校正ジオメトリー用 MU

深部 (cm)

 図2.標準照射野サイズ 5x5、10x10, 15x15、及び 20x20 cm x cm に対する 深部線量、そのモジュール化ビームは1 HVL の均質鉛スラブを使用。
 実線は測定値、点線は計算値。 エネルギー=4 MV; SSD=90cm.

ではなく、むしろ線量計算アルゴリズムを評価することにあるので、このアプ ローチはそのように正すべきかもしれない。更に云えば、それはここでの作業 のための補償フィルターの数を最小に抑えることになる。同じモジュール化マ トリックスはまた、長方形及び非対称照射野を含む1 セットの照射野ジオメト リーに対する線量計算においても使用される(適用される照射野ジオメトリー の完全な一覧表が対応する著者から要求に応じ入手可能)。

計算データ及び測定データは正規化された出力因数である、即ちそのデー タは、絶対線量特性を維持するため、**TPS**(**SSD=95cm**、*d*=**5cm**、**10x10 cm x cm**)の校正状況に関連して正規化される。

線量計算偏差は局部的なパーセンテージ偏差として提示される。

2.3 フィルター製作

計算フィルターに関する TPS からのエクスポート・データは、0.5mm ごと に等厚テンプレートをプロットする院内構築プログラムにインポートされる。 同じ厚さの鉛シートを、ソフトウェアからのテンプレートに合わせて鋏を使っ て切る。全ての重層材を粘着テープで束ねる。トレー上の中心の位置決めは真 っ直ぐである、というのは各トレーの製作は中心に刻まれた十字に合わせて行 われ、その中心がテンプレートの中心十字に合うようにするからである。トレ ー上の方向付けはテンプレート上のオフセットにマーカーを描くことで処理す る。このマーカーは常にテンプレート上の同じ位置に設置する。製作工程は Laursen et al. [12] により詳細に提示されている。

2.4 測 定

測定は4 MV線形加速器 (Philips, SL 75/5, Crawley, UK) 上で標準放射ビ ーム分析器 (Scanditronix RFA-300, Uppsala, Sweden) で実施した。その内容 はセクション 2.2 で述べたのと同じ設定における出力因数、深部線量及びプロフ ァイルの事前設定セットである。深部線量は小体積の電離箱で測定したが、プ ロファイルは標準水ファントムにおいて光子ダイオードで得られた。

出力因数測定は小体積、0.1cm³、電離箱(深部線量測定用と同じ)で行い、 これらの読み値からの結果を平均した。一定期間で基準照射野を測定して加速 器の出力バラつきをモニターした。

3. 結 果

TPS に対する特性化測定中に使用された鉛モジュレータの厚さは 1.1cm、

即ち約1HVLであった。特性化測定から得られた結果並びにそれに対応する計算は図2に示す、ここでは最大で-2.9%の局部的偏差が線量最大値を超えて到達された。

A-D と記された補償フィルター形状が持つ鉛厚さは変更可能でありその 範囲は0から 7.5mm である。図3-6は補償フィルターA-C に関して得られ る線量プロファイルである。補償フィルターD に関して得られた結果は C に同 じであったが、補償フィルターC では空気への対向として空洞部がアルミニウ ムから成るので反対になっているだけであった。

出力の測定は、標準の臨床照射野サイズから不整形性の高いビームにわた る種々な形状のビーム 31 本についてアイソセンター平面において行った。モジ ュレータ形状ごとに少なくとも 4 回の出力測定を行い、その結果が図7に描か れた。平均して、その計算値には1%の線量過大見積りがあることが分かった。 そして測定値からの最大偏差が4%あることが TPS 計算値に関して明らかにな った。単一因数、例えば偏差を生じさせる非対称ビームまたはモジュレータ厚 さ、などへ向かう性向は見出せなかった。

<u>線量 / MU</u> 線量 / 校正ジオメトリー用 **MU**

偏差(%)

距離 (cm)

図3.(上)モジュレータA、30x30 cm x cm 非平面線量プロファイル。
 SSD=90cm;線量プロファイル深度は1.0、5.0、10.0 及び20.0cm である。実線は測定値であり、点線は計算値である。
 (下) TPS 計算による値の測定値からの偏差。

線量 / MU

線量 / 校正ジオメトリー用 **MU**

偏差(%)

距離 (cm)

- 図4.(上) モジュレータ B、30x30 cm x cm 交差平面線量プロファイル。 SSD=90cm;線量プロファイル深度は1.0、5.0、10.0 及び20.0 である。 実線は測定値であり、点線は計算値である。
 - (下) TPS 計算による値の測定値からの偏差。

4. 検 討

多くの著者が〔13,14〕、外照射治療における計算精度の向上のためには正 確なヘッド散乱モデルを合体する必要性があることを指摘してきた。モジュレ ータ、例えば補償フィルター、が表すのは正確にモデル化する必要のある構成 要素の中の唯1つだけである。正確なモデル化をしないことは、物理療法のた めの線量計算の精度を減ずるエラーを導き出すということであり、最高6%の 偏差出現が報告されている〔8、15〕。Ahnes jö と Aspradakis〔7〕が結論づけた ところによれば、全体精度目標 5.1%を達成するには現在の技術に対して線量計 算精度3%が必要となるだろう。現在の計算がその基礎にしている散乱とビー ム品質の変化(主に、ビーム中にモジュレータを導入することによる低エネル ギー光子の減弱)をモデル化することが、実施された測定の大部分においてこ の限界内にあることを示している。最大の偏差は周辺部領域に見出された、そ してこれらの原因は主に、TPS 定義の照射野サイズに対するジョー設定の整理誤 謬に帰せられる。小さな偏差が見られる計算値もいくつかあるが、周辺部が測 定よりも僅かに広い場合であり、設定値外にジョーを位置決めすることでこの エラーを増加させた図5の場合を除き最大偏差は<3mm である、1つの影響と してはそのモデルにおいて使用された円形線源サイズに帰せられる。 ビーム

線量 / MU

線量 / 校正ジオメトリー用 MU

偏差(%)

距離 (cm)

図5.(上)モジュレータB, 照射野サイズ 10x18 cm x cm 非対称。
 SSD=90cm; 線量プロファイル深度は10.0cm。実線は測定値であり、
 点線は計算値である。

(下) TPS 計算による値の測定値からの偏差。

 線量 / MU

 線量 / 校正ジオメトリー用 MU

偏差(%)

距離 (cm)

図6.(上)モジュレータC, 照射野サイズ 30x30 cm x cm 交差平面線量プロファイル 軸外れ。SSD=90cm; 線量プロファイル深度は1.0、5.0、10.0及び20.0である。実線は測定値であり、点線は計算値である。
 (下) TPS 計算による値の測定値からの偏差。

線源分布の評価は1方向に関してのみ与えられ、Gaussian [3] によってモデル 化されると想定される。第二軸を考え楕円形を許容すれば周辺部領域における 計算が改良できたであろう。しかしながら、照射野境界線の外側ではより大き な矛盾も見られることがある、現在のところその理由は明らかではないが。こ の領域内の線量計算にはコリメータによる誘導ビーム品質変化の影響は含まれ ず、また製作がそのようにされている場合ビームの外側に伸びるモジュレータ の影響も同様である。

照射野の内部では、更に大きな偏差がカットされた鉛シートの縁辺部に主 に見られる。ここで導き出されるエラーは製作工程によるものであり、シート は全て手でカットされ、接着剤方式でシートを張り付けることで最終形状に仕 上げるからである。小さなエラーがこの領域で起こりがちなのは、1枚の鉛シー ト(0.5mm)がこのエネルギーで3%の線量差異をもたらすからである。

Ψ _Ε /Ψ(I	MeV-1)	 標準スペク 増強スペク	トル E _{avg} = 1.44 トル E avg = 1.46	MeV MeV

エネルギー (MeV)

図8.4 MV Philips SL75/5 加速器に関する標準及び増強 実効スペクトル

オープン・ビームを実行することにより、4種類のオープン・ビーム照射野 サイズに基づく実効スペクトル〔1〕が検証される、テーブル1参照。モジュ レータに対して標準スペクトルから置き換えられる増強スペクトルは上記のオ ープン・ビーム、更には同じ照射野サイズの4種類のモジュール化ビーム(テ ーブル1)を基にしている。図8は測定された深部線量から引き出された2種 類のスペクトルを示す。その平均エネルギーは期待どおり増加したが、ぎりぎ りの線にすぎない。標準スペクトルを持つ計算上のオープン・ビーム深部線量 (*k*PQ 及び *k*SQ なしで)は、測定による場合と較べると、線量最大値を超える 深度でオープン正方形特性照射野に対し±1.6%の全体偏差を与える。増強スペ クトルに関するデータを適用することにより、品質因数はないが、この値が同 じオープン・ビームに対し±2.6%に増加する。エネルギー・スペクトルにおけ る変化は大きな差異を導き出すことはないので、スペクトル変動は許容され大 きなエラーを導き出すことがない多少の変動は許される。この事は Zhu 及び Van Dyk [18] による発見事項とも一致する。より大きなスペクトル変動でさ えもその示すところによれば、測定深部線量データとの乖離は3%という結果 である [17]。

スペクトル上のモジュレータ誘導の変化は既述のとおり増強スペクトルを 使って説明される。しかしながら、そのスペクトルはある一定の厚さに対して 有効であるにすぎない。厚さが変化すれば、例えば臨床での補償フィルターの 場合、モジュール化ビームの線量計算精度に対する影響は、モジュレータが使 用されるときにビーム品質における変化をモデル化するために使われる2つの ビーム品質依存因数、*k*PQ及び*k*SQ、に帰せられることが多い。図9が示すの は、モジュレータ A に関する計算に因数*k*PQ及び*k*SQ が含まれる場合または 含まれない場合の計算深部線量に対する影響である。そこに現れる影響とは、 相互作用係数における変化の説明を合理的にしないことで透過能力が過小評価 される、ということである。

モジュレータのための実行についての第二の特性は k_{μ} ーマトリックスを 使用することである。図 10 は、この作業において使用される 4 MV ビームに対 して引き出されたマトリックスを示している。 k_{μ} ーマトリックスの主な目的は、 減弱係数に不確実性があるために生じる説明不可能なエラーに注意して、一次 照射の軸外れ効果に対する補正を行うことである(計算値と、ビーム・モデル 構築に使用される多分に誤りのある測定値との間の相違もまたこの手順によっ て最少化される)。Knöös et al. [11] は、大型の照射野サイズに対して、計算 出力データが示した偏差が大きいのは変化しないペンシル・ビーム・カーネル の所為である、と言っている。 k_{μ} ー修正因数の導入が精度を増大させたのは、 軸外れ位置で透過性状を変動させることを考慮に入れ、そのことによってより 大型の照射野に対するエラーを減少させることによるものである。テーブル1 に挙げた如く正常な特性化領域外の照射野に関するデータ集合における偏差、 全部で 8 個、は1つの単一測定ポイントの場合を除き、±3%以内であった。

5. 結 論

検証した **TPS** において実行されたアルゴリズムは一般に、検証した鉛シート・モジュレータに関する測定データとの一致が3%以上であることを示す。 出力、深部線量及び線量プロファイルにおける更に大きな偏差が主に鉛重層部の縁辺並びに周辺部領域で見られ、その位置偏差は通常4%以下または**2mm**以下である。所謂 k_{μ} -マトリックスの導入が、経験的な不確実性及び軸外れ透過効果を考慮に入れることで更に大きな照射野サイズに対する出力計算を改善した。

モジュレータによって導入された物理的な性状を考慮するモデルの実行に よって、検証される TPS に対する線量計算の精度が増大した。このアルゴリズ ムで到達された精度レベルにより、補償フィルターを従来どおり使用すること が可能となると共に、補償フィルターを使って実現されるモジュール化を含む 治療計画の最適化が可能になる。

	線量 / MU
線量 /	校正ジオメトリー用 MU
7	
Kμ	
Κ _μ	

深度 (cm)

 図9.(上)一次及び散乱エネルギー堆積に対する修正因数の効果を示す測定及び計算深度線量データ。実線が測定値であり、破線は kpQ 及び kSQ を含む完全な計算に相当し、点線が kpQ 及び kSQ を除外した計算に相当する、 SSD=90cm。

(下) 6mm 鉛を採用した場合中心軸に沿ってモジュレータ A に適用される 10 x10 cm x cm の照射野に対する一次(実線)と散乱(破線)エネル ギー堆積に関するビーム品質補正因数。 Y

Χ

図 10. 4 MV Philips SL75/5 加速器用の k_{μ} -マトリックス。そのピクセル・ サイズはアイソセンター平面で y-及び x-方向に 4.44cm である。

ご協力頂いた方々

Anders Ahnesjö、Mikael Saxner (MDS Nordion) 並びに Per Nilsson (Lund University Hospital)の諸氏から頂いた貴重なコメントに深甚なる感謝 の意を表する。Hugo Ekström(Helax AB)氏にはファントム形状製作における同 氏の図形作成技術に対し深甚なる感謝の意を表する。

参考文献

— 省略 ——

以上

14pages x ¥3,500.- = ¥49,000.- Jan. 14, 2003 by S.I.