

平行平板形イオンチェンバーによる臨床電子線測定における補正係数の モンテカルロ推定法

近年の標準の線量測定プロトコルでは深部線量分布の測定や $R_{50} < 4g/cm^2$ の低エネルギー電子線のキャリブレーションに平行平板形イオンチェンバーを用いることを推奨している。平行平板形イオンチェンバーを用いた電子線量測定プロトコルでは、すべての測定深において壁材質補正係数、 P_{wall} は水中では unity と想定され、replacement 補正係数、 P_{repl} は完全に遮蔽された平行平板形イオンチェンバーにおいて unity とされる。本研究では EGSnrc モンテカルロコードシステムを用いた NACP-02, Markus, Roos 平行平板型イオンチェンバーによる臨床電子線量測定における P_{wall} , P_{repl} を推定した。平行平板形イオンチェンバーの P_{wall} の値は特に低エネルギーにおいて水深に相関して急激に上昇した。4MeVにおける NACP-02 の R_{50} のあたりの値は unity よりもおおよそ 10%高かった。この影響は高いエネルギーになると小さくなった。同様に、 P_{repl} の値も低エネルギーの、急激に線量が増加する範囲で水深に伴い劇的に増大した。Markus では R_{50} の近くで狭いガードリング幅のために P_{repl} は unity よりも 10%以上増大した。NACP-02 と Roos では P_{repl} の値は基準深 d_{ref} を含む深部線量曲線のプラトーの部分において unity に近くなる。また、 d_{ref} での水への線量と平行平板形チェンバーの空洞内の感受性のある体積に対する線量の比、 $D_w/[D_{air}]_{pp}$ は電子線量測定プロトコルから推測されるものと大きく異なる。

I. はじめに

近年の標準の線量測定プロトコルでは高エネルギー電子線の深部線量測定に平行平板形イオンチェンバーを用いることを推奨している。これは円筒形のイオンチェンバーの replacement 補正係数、 P_{repl} は水深との相関関係があるとはあまり考えられていないためである。平行平板形イオンチェンバーを用いた電子線量測定プロトコルでは、すべての測定深において P_{wall} は水中で unity と想定され、 P_{repl} は完全に遮蔽された平行平板形イオンチェンバーにおいて unity とされる。測定深はより明確に定義されるため、平行平板形イオンチェンバーは、 $R_{50} < 4g/cm^2$ あるいは $\bar{E}_0 = 10MeV$ 以下となる低エネルギー電子線のキャリブレーションにも推奨されている。

モンテカルロ推定法は P_{wall} と P_{repl} を求めるのに良い方法である。Sempau らが PENELOPE system を用いて平行平板形イオンチェンバーの線質係数を求めた。その結果は、NACP-02 と PPC-40 の基準深 d_{ref} における全擾乱係数(P_{wall} と P_{repl} の積)は $R_{50} = 8.75cm$ で unity となる TRS-398 のプロトコルのそれと比較して低電子エネルギー ($R_{50} = 1.4cm$) についておおよそ 0.5%異なることを示している。最近、Buckley と Rogers は水ファントムと平行平板形チェンバー (NACP-02, Markus, Roos など) の壁の材質の組み合わせでの P_{wall} を EGSnrc モンテカルロユーザーコード CSnrc を用いて計算した。電子線については P_{wall} を unity として扱う、標準の線量測定プロトコルで推定したものと比較すると、 P_{wall}

の計算値はNACP-02チェンバーでは通常のエネルギの範囲である5MeV($R_{50} = 2.08\text{cm}$)から21MeV ($R_{50} = 8.3\text{cm}$)、深さ d_{ref} において1.7%-0.8%となっていた。同様に、 P_{wall} の値はそれぞれRoosチェンバーで1.25-0.4%、Markusチェンバーで1.2-0.5%となる。 P_{wall} はまた6MeVにおいて測定深の増加につれて6%以上大きくなる。Verhaegenらはまた P_{wall} は水ファントム内でNACP-02チェンバーの測定深と相関関係があると報告している。さらに最近では、ZinkとWulffはRoosチェンバーの水中での深さ d_{ref} における P_{wall} を計算した。VerhaegenらとZinkとWulffの研究では同じEGSnrcモンテカルロコードシステムの異なるユーザーコードを用いて算出されており、BuckleyとRogersのものと近い結果となっている。McEwenらはNACP-02チェンバーの P_{wall} の決定に経験に基づく方法を用いた。その影響は $R_{50} = 1.2\text{cm}$ で1.4%以内でモンテカルロ法よりもわずかに小さい変動を示した。これらの結果は、平行平板型チェンバーの P_{wall} は電子線量測定プロトコルで適切に推定されるべきだということを示している。

対照的に、モンテカルロ推定法を用いた平行平板形チェンバーの P_{repl} 補正は水中の d_{ref} におけるNACP-02とRoosチェンバーの値のみに限られており、また水中の測定深と相関関係があるのはNACP-02のみである。BuckleyとRogers、Verhaegenらの最近の研究では、 d_{ref} より深い部分でのreplacement補正の必要性を示唆している。さらに最近では、WangとRogersがNACP-02の P_{repl} と水中の測定深との関連をより詳細に調べた。補正係数は測定深に依存し、深さ0.5cmから6MeV($R_{50}=2.63\text{cm}$)ビームの R_{50} の間で0.992から1.035まで変化した。NACP-02の P_{repl} は d_{ref} においてさえ0.9964で、電子線量測定プロトコルで推定されるunityとは異なる。

本研究の目的はNACP-02、Markus、Roosの表面近くから R_{50} までの P_{wall} と P_{repl} の値を求めることであった。非常に狭いガードリング幅のMarkusチェンバーは古いデザインで、それゆえ近年の実際のコードには推奨されない。しかし、Markusチェンバーの変動の影響の評価をしたことはそれまでの実験的データに有用な貢献をした。どちらの補正係数もEGSnrcモンテカルロコードシステムを用いて4MeV($R_{50}=1.31\text{cm}$)から18MeV($R_{50}=7.6\text{cm}$)の電子線で求められた。また、水への線量と平行平板形チェンバー内の空洞の感受性のある容積への線量の比が水-空気阻止能比と比較し、全擾乱係数を求めた。さらに、 d_{ref} での線量比とTG-51とTRS-398プロトコルから推定されるものと比較した。

II. 理論

Spencer-Attix cavity理論によるとdose to water D_w とdose to air in water D_{air} の関係は以下のように示される。

$$D_w = D_{air} \left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{air}^w \quad (1)$$

$(\bar{L}/\rho)_{air}^w$ は水から空気に対する平均の制限質量衝突阻止能比である。この式はイオンチェンバーの壁と空気が電子線に影響しないという理想的な条件のもとで成り立つ。

実際の測定では、チェンバーの壁と空洞の存在が電子線に影響を及ぼすため、Spencer-Attix cavity 理論には補正が必要となる。平行平板型チェンバーの水吸収線量は二つの補正係数を用いて次式のように表される。

$$D_{air} = [D_{air}]_{pp} \left(\frac{L}{\rho}\right)_{air}^w P_{wall} P_{repl} \quad (2)$$

$[D_{air}]_{pp}$ はチェンバーの空洞内での感受性のある体積に対する線量である。 P_{wall} はファントムでないものをチェンバーの壁材と等価にする。 P_{repl} は二つの要素、 P_{fl} と P_{gr} から成る。 P_{fl} はフルエンス補正係数で、空洞の存在による電子フルエンススペクトルの変化、空洞内の電子フルエンスを空洞のない中心部のそれと違わせる電子の内散乱を主に補正する。多くの平行平板形チェンバーでは、 P_{fl} は unity とされるが、十分に遮蔽されていないチェンバーでは unity ではないとされる。 P_{gr} は gradient correction factor で、空洞による実際の測定深の上昇を補正する。平行平板形チェンバーでは、 P_{gr} は測定位置が空洞の前にあるとき unity とされる。

III. 方法と使用機器

III.A. モンテカルロシミュレーション

EGSnrc/BEAMnrc code は Varian Clinac 直線加速器から放出される電子線のシミュレートに用いられた。電子線のモンテカルロシミュレーションのモデルはそれまでの論文で述べられている。全ての電子線のエネルギーについて、位相空間のデータはアプリケーションの下で $15 \times 15 \text{cm}^2$ のサイズで得た。電子線の水中線量分布は位相空間のデータをインプットとして EGSnrc/DOSXYZnrc コードを用いて計算した。SSD は 100cm であった。シミュレーションに用いたパラメータは以下の通りである: AE=0.521MeV、ECUT=0.700MeV、AP=PCUT=0.01MeV。使用した CPU は 3.2GHz のプロセッサを備えた PentiumIV である。水ファントム内において incident electron energy は、モンテカルロ法によるものと実測した線量分布によるもの（中心軸深部線量曲線と最大線量となる水深での軸外線量プロファイル）差が 2% 以内に収まるように調整した。表 1 に研究で用いられた Varian Clinac 直線加速器の電子線の特徴を示す。

得られた位相空間のデータは平行平板型チェンバーの壁材質補正係数と replacement 補正係数、Spencer-Attix 水一空気阻止能比を計算するのにも用いられた。両補正係数と阻止能比は EGSnrc user-code の CAVRZnrc、DOSRZnrc、SPRRnrc を用いて計算された。空洞内とファントム内の計算された線量は光子と電子の運搬の閾エネルギー、AE と ECUT に影響する。Wang と Rogers は 6MeV の電子線で R_{50} の深さにおいて AE=0.512MeV で計算した空洞内ファントムの線量は AE=0.521MeV で計算したものよりおよそ 0.5% 低いが、ファントム/空洞線量比は 1~20keV で ECUT と AE の値に依存しない (0.1% レベルで)。また、水一空気阻止能比は ECUT の値への感度はあまり高くなく、6MeV のビームで 0.5~3cm の深さで ECUT が 5~20keV に変化するとき 0.3% 以下で変化する。ゆえに、本

研究では user-code の閾エネルギーを $AE=ECUT=0.521\text{MeV}$ 、 $AP=PCUT=0.01\text{MeV}$ とする。

III.B. 壁材質補正係数 P_{wall} と replacement 補正係数 P_{repl} の算出

平行平板形チェンバーの P_{wall} と P_{repl} の値はモンテカルロ法を用いて表面近くと R_{50} の間の深さで計算された。図1は P_{wall} 補正係数を算出するための幾何的な配置の概略図を示す。 P_{wall} は CAVRZ コードを用いて $[D_{air}]_w/[D_{air}]_{pp}$ という線量の比から算出された。 $[D_{air}]_w$ は壁材質がすべて水でできたチェンバーの感受性のある容積への線量である。容積は電極の直径と距離によって定義される。 $[D_{air}]_{pp}$ は式(2)に示した実際のチェンバーの構造での線量である。図1では単純なチェンバーの構造を示しているが、仕様書によると、CAVRZnrc では詳細なチェンバーの構造が用いられている。

P_{repl} 補正係数は図2に示される構造における線量比 $D_w/[D_{air}]_w$ と水から空中への阻止能比との関係から求められる。 D_w は水への線量で、チェンバーの測定点と同じ深さに表面がある 0.1mm 厚のスラブで DOSRZnrc コードを用いて計算された。 $[D_{air}]_w$ は先に述べた P_{wall} から求めたチェンバーの感受性のある領域における線量である。図2より P_{wall} は unity と等しくなるため P_{repl} は式(2)より次のように与えられる。

$$P_{repl} = \frac{D_w/[D_{air}]_w}{(\bar{L}/\rho)_{air}^w} \quad (3)$$

$(\bar{L}/\rho)_{air}^w$ は SPRRZnrc コードを用いて算出された。最近の研究で、Wang と Rogers は本研究で用いた間接 SPR 法[式(3)]に対して P_{repl} を“高密度空気(HDA)”法と“低密度水(LDW)”法から直接求めた。その結果、SPR 法は HDA(0.001mm 厚)法と LDW 法とよく合致することが示された。本研究で用いた平行平板形チェンバーの構造と材質は TRS-398 プロトコルの表IVに詳しく記載されている。Markus チェンバーでは、水中での線量測定に 0.87mm のポリメタクリル酸メチル樹脂(PMMA)の防水性キャップを用いた。

III.C. 線量計測量の比較

NACP-02、Markus、Roos チェンバーの線量比 $D_w/[D_{air}]_{pp}$ は式(2)で示される全擾乱補正係数 (P_{wall} と P_{repl} の積) を評価するために水-空気阻止能比と比較された。 D_w と $[D_{air}]_{pp}$ は III.B. で算出した。さらに、 d_{ref} での線量比は TG-51 と TRS-398 で推定されたそれと比較された。

IV. 結果と考察

IV.A. 算出された P_{wall} と P_{repl}

図3~5は TG-51 の dosimetry formalism に関わる要素のうちのいくつかを示したものである。線量計測量は NACP-02、Markus、Roos チェンバーについて $4,6,9,18\text{MeV}$ のビームで水ファントム内の深さの関数として算出される。それぞれのビームについて表面近く

から R_{50} まで深さを変化させた。すべてのチェンバーにおいて低エネルギーでは P_{wall} は深さに相関して急激に増大した。NACP-02の P_{wall} は4MeVの場合深さ0.2cmでの1.004から変化し1.4cmで1.136となる。Markusでは1.004から1.079、Roosでは1.001から1.079と変化する。材質としてグラファイトとrexoliteが合成されたNACP-02はその大きな原子番号のため、PMMAでできたMarkus、Roosより大きい P_{wall} の値を示した。近年、ChinらはNACP-02の端窓のmass thicknessはTRS-398プロトコルに記載されているものより35%大きいと報告した。このことは P_{wall} も大きくさせるかもしれない。平行平板形チェンバー P_{wall} の変化量は電子のエネルギーが増大するにつれて小さくなる。18MeVで、NACP-02の P_{wall} は深さ1cmでの1.007から7.45cmでの1.023に変化し、Markusで1.002から1.023に、Roosで1.004から1.023に変化する。CAVRZnrcで計算した結果の統計的不確定性はNACP-02、Markus、Roosについてそれぞれ0.3-0.5%、0.4-0.6%、0.25-0.4%となる、それらは表1に示す二つの構造における線量の標準偏差(1σ)の二次的な総計によって見積もられた。NACP-02の深さによる P_{wall} の変化の大きさはBuckleyとRogersの結果とよく一致する。平行平板形チェンバーのunityと異なる P_{wall} の値は特に低いエネルギーにおいて標準線量測定理論から大きく逸脱している。

P_{repl} の変化も、すべてのチェンバーについて低いエネルギーで深さに相関して急激に増大する。NACP-02の P_{repl} は4MeVで深さ0.2cmでの0.973から1.4cmでの1.079まで変化し、Markusでは0.938から1.172、Roosでは0.982から1.055に変化する。Markusの P_{repl} の変化はガードリング幅が狭いためNACP-02とRoosに比べ非常に大きい。平行平板形チェンバーの P_{repl} の変化は電子エネルギーが大きくなるにつれ小さくなる。18MeVでは、NACP-02の P_{repl} は深さ1cmでの0.996から7.45cmでの1.017に、Markusでは0.992から1.022に、Roosでは1.000から1.010に変化する。DOSRZnrc、CAVRZnrc、SPRRZnrcコードを用いて算出した P_{repl} の不確定性はNACP-02、Markus、Roosチェンバーでそれぞれ0.3-0.4%、0.4-0.5%、0.25-0.35%であった。NACP-02の深さに対する P_{repl} の変化の大きさはWangとRogersの結果とよく一致する。標準線量測定プロトコルはよく遮蔽された平行平板形チェンバーの P_{repl} は全ての測定深においてunityと等しくなるとしている。 P_{repl} の値は低エネルギーの、急激に線量が増加する範囲で水深に伴い劇的に増大する。Markusでは R_{50} の近くでunityより10%以上増大する。NACP-02とRoosチェンバーでは深部線量曲線のプラトーの部分でunityに近くなる。

図6に R_{50} とそれぞれのチェンバーの基準深での算出された P_{wall} の関係を示しており、その値はそれまでの論文の値とよく一致している。4MeV($R_{50}=1.31\text{cm}$)から18MeV($R_{50}=7.6\text{cm}$)の範囲で P_{wall} の値はNACP-02で1.019から1.008に、Markusで1.019から1.005に、Roosで1.015から1.006に減少している。線質による P_{wall} の変化はおおよそ1%となっている。

図7は R_{50} とそれぞれのチェンバーの基準深での算出された P_{repl} との関係を示す。電子エネルギーが12MeV($R_{50}=5.06\text{cm}$)以上で標準線量測定プロトコルに忠実であれば、よく遮蔽

されたチェンバーの P_{repl} は unity に近くなる。変動は低いエネルギーの時により大きくなり、NACP-02 で $\pm 0.4\%$ 、Roos で $\pm 0.5\%$ となる。それぞれのチェンバーの結果は Wang と Rogers のもの、Zink と Wulff のものとそれぞれよく一致している。Markus では P_{repl} は 4MeV での 0.987 から 18MeV での 0.995 まで変化する。算出された P_{repl} の値は 4MeV の場合を除き、実験的データに基づいた TG-39 と TRS-398 の推奨する値と 0.5%以内で一致する。4MeV の計算値は測定値である 0.983 に近いが、プロトコルよりもおよそ 1%大きい。4MeV の測定を正確に行うことは難しい。急峻な線量の勾配のため測定はより大きな不確定性を含む。TG-39 と TRS-398 の P_{repl} は regression formula より外挿される。

IV.B. 線量計測量の比較

線量測定プロトコルでは、NACP-02 チェンバーについて線量比 $D_w/[D_{air}]_{pp}$ は水一空気阻止能比と等しくなるとしているが、図 3 に示すように線量比は P_{wall} と P_{repl} の値の水深による変化に比例して依存する。言い換えれば、線量比と阻止能比の比の曲線は全擾乱補正係数(P_{wall} と P_{repl} の積)に一致する。線量比はより深い部分を除いてエネルギーの増加に伴い $(\bar{L}/\rho)_{air}^w P_{wall}$ にほぼ一致する。基準深での線量比もすべての電子線エネルギーについて $(\bar{L}/\rho)_{air}^w P_{wall}$ に一致する。

図 4 の Markus チェンバーでは、深さに伴う P_{repl} の変化の量がより大きいいため線量曲線と阻止能比曲線の差が NACP-02 よりもかなり大きくなっている。 P_{wall} の影響が P_{repl} に相殺されるため、基準深での線量比は阻止能比により良く一致する。図 5 に示す Roos チェンバーの線量比と阻止能比の関係は NACP-02 のそれと似ている。すべての電子線エネルギーについて基準深での線量比は阻止能比よりも $(\bar{L}/\rho)_{air}^w P_{wall}$ によく一致する。

全擾乱補正係数は低いエネルギーにおける平行平板形チェンバーを用いた深部線量測定に大きく影響する。NACP-02 の R_{50} における線量は 4MeV で 18%まで、18MeV で 4%まで増加する。このことは Verhaegen らの結果と似ている。同様に、Roos の R_{50} における線量は 4MeV で 11%、18MeV で 3.5%まで増加する。Markus では 4MeV で 21%、18MeV で 5%まで増加する。しかし、NACP-02 の 4MeV における R_{50} での 18%の線量の増加は R_{50} の深さを 0.5mm しか増加させない。その影響は電子エネルギーが大きくなるにつれ小さくなる。

図 8 に NACP-02、Markus、Roos チェンバーの電子線室と基準深での線量比 $D_w/[D_{air}]_{pp}$ との関係を示す。NACP-02 と Roos の線量比は TG-51 と TRS-398 による水一空気阻止能比と比較して示す。Burns らが TG-51 と TRS-398 から当てはめた d_{ref} での阻止能比は SPRRZnrc コードから算出したものと 0.2%以内で一致する。Markus では TG-51 と TRS-398 で推奨されているように線量比を $(\bar{L}/\rho)_{air}^w$ と P_{repl} の積と比較している。NACP-02 と Roos チェンバーの線量比は水一空気阻止能比と比較して 6-18MeV の範囲では 1%、4MeV で 2%大きくなっている。NACP-02 と Roos の線量比と阻止能比の比(全体の補正係数)は $R_{50}=7.6\text{cm}$ でそれぞれ 1.0100、1.0081 であった。NACP-02 の係数は Buckley と

Rogers が EGSnrc/CSnrc コードを用いて推定した $R_{50}=8.3\text{cm}$ での1.0074 とほぼ一致するというのに妥当である。Sempau らの NACP-02 と PPC-40(Roos タイプ)の結果は $R_{50}=1.4\text{cm}$ での TRS-398 の阻止能比よりおよそ0.5%高かった。それらの全体の補正係数は $R_{50}=8.75\text{cm}$ のときに unity となると考えられる。本研究での全体の補正係数が $R_{50}=7.6\text{cm}$ で unity となると、NACP-02 と Roos の線量比は TRS-398 の $R_{50}=1.31\text{cm}$ での阻止能比よりおよそ1%高くなる。これは Sempau らの結果とほぼ一致しているといえる範囲にある。Roos の全体の補正係数も Zink と Wulff の結果とよく一致している。

Markus チェンバーの線量比は 4MeV($R_{50}=1.31\text{cm}$)から 18MeV($R_{50}=7.6\text{cm}$)の範囲で TR-51 と TRS-398 の推奨する値と比較してそれぞれ0.5 から3.3%、0.3 から2.8%増加する。図4に示すように全体の補正係数がほぼ unity に等しくなるため Markus の基準深での線量比は TG-51 と TRS-398 の阻止能比とほぼ一致する。

IV. 結語

本研究では EGSnrc モンテカルロコードシステムを用いた臨床電子線量測定における平行平板形イオンチェンバーの P_{wall} と P_{repl} を求めた。算出した NACP-02 の P_{wall} は表面近くから R_{50} の深さの間で4MeVで1.005 から1.136に、18MeVで1.007 から1.023に増加する。同様に、 P_{wall} は Markus (典型的な構造)では1.004 から1.079、1.002 から1.023に増加し、Roos では1.001 から1.079、1.004 から1.023に増加する。基準深での P_{wall} は4-18MeVの範囲で NACP-02 で1.019 から1.008に、Markus で1.019 から1.005に、Roos では1.015 から1.006に変化する。算出した P_{wall} の値は標準線量測定プロトコルから推定された unity の値とは異なっている。

また、NACP-02 の算出した P_{repl} の値は表面近くから R_{50} の深さの間で4MeVで0.973 から1.079、18MeVで0.996 から1.017に増加する。同様に、 P_{repl} の値は Markus では0.938 から1.172、0.992 から1.022、Roos では0.982 から1.055、1.000 から1.010に増加する。NACP-02 と Roos の基準深での P_{repl} の値は4-18MeVの範囲において unity に近くなる。Markus の P_{repl} の値は0.987 から0.995まで変化し、4MeVの場合を除き標準線量測定プロトコルの推奨する値に一致する。

平行平板形チェンバーを用いた深部線量測定に、低エネルギーにおいては全擾乱補正係数が大きく影響する。4MeVでの R_{50} 周辺での線量の増加は10%以上であるが、4MeVでの R_{50} の深さの増加は0.5mmしかない。NACP-02 と Roos の基準深での線量比 $D_w/[D_{air}]_{pp}$ は水-空気阻止能比よりも6-18MeVの範囲で1%、4MeVで2%大きい。Markus の線量比は水-空気阻止能比と TG-51 と TRS-398 で推奨される P_{repl} の積と比較しておよそ3%まで増加する。本研究は標準線量測定プロトコルでの平行平板形チェンバーを用いる場合の全擾乱補正係数の必要性を示している。