原 著

モンテカルロ計算による非平衡電子領域の検討（水と鉛の境界）

丸 石 博 文・*砂屋敷 忠・**藤 田 實

小 寺 吉 衛・和 田 卓 郎

広島・天野医院

*広島大学歯学部附属病院

**広島大学歯学部歯科放射線学教室

(論文受理 1991年11月15日)

(最終論文受理 1992年 2 月21日)

(Code No. 711.2)

Key words: Monte Carlo calculation, Electronic unequilibrium, Fluence, Energy spectrum

STUDY OF ELECTRONIC UNEQUILIBRIUM STATUS PRODUCED BY LEAD SHIELDS IN WATER WITH USE OF THE MONTE CARLO CALCULATION

HIROFUMI MARUISHI, *TADASHI SUNAYASHIKI, **MINORU FUJITA

**YOSHIE KODERA, **TAKURO WADA

Amano Hospital, Hiroshima

*Hiroshima Univ. Dental Hospital

**Hiroshima Univ. School of Dentistry

(Article received: Nov. 15, 1991)

Summary

Electronic unequilibrium status before and after lead shields in water with use of ^{60}Co γ -ray, 4 and 10 MV X-ray beams was studied both experimentally and with the Monte Carlo calculation. A marked increase regarding relative doses was observed 2 to 10 mm before the lead shields. Characteristic fluctuations of relative doses were calculated in the area of 5 to 20 mm after the lead shields with a dependence of each photon energy. Three to five percent of the dose reduction effect per 1 mm thickness of lead was also calculated in the area of the electronic equilibrium, enough backward after lead shields. Such electronic unequilibrium status is produced by the difference of both the magnitude of initial energy and the quantity of secondary electrons, and also by the difference of stopping power between the water and lead against any secondary electrons. Due to our study, details of such status were revealed with use of the Monte Carlo calculation.

1. はじめに

組成の異なる物質の境界では二次電子平衡が崩れることが知られており、境界での2層の物質の組み合わせと同時に光子のエネルギーによっても特異的な線量の変化が生ずる。頭頸部放射線治療で口腔内に遮蔽体を挿入して、標的以外の組織線量を減少させる試み^{1,2)}が行われている。このとき遮蔽体と接する粘膜表面に、過度の粘膜炎が発生し臨床問題となる。金属の周囲の組織への影響については報告³⁾があるが、そのメカニズムは明らかにされていない。この二次電子の非平衡領域を生ずるメカニズムやその量について、組織（水）と組成が極端に異なる鉛の遮蔽体を含むモデルを代表とし、この遮蔽体と接する境界および周囲への影響の面から検討した。

2. 方 法

2.1 ^{60}Co フィルム法による実験

照射の幾何学的配置を Fig. 1 に示す。照射したフィルムは現像処理後マイクロデンシトメータ（アパーチャ $20 \cdot 1000 \mu\text{m}^2$ ）で測定した。フィルム濃度から線量に換算するための特性曲線は、 ^{60}Co 照射によるタイムスケール法（MIX-DP 深さ 4 cm）により求めた。

Fig. 1 Changes in relative doses measured by the film method with use of ^{60}Co γ -ray.

使用機器は以下の通りである。

^{60}Co 遠隔照射装置は広島大学原爆放射能医学研究所に設置されている島津製作所製の RTGS-21 型 (111 TBq) である。ファントムは三和化成社製の MIX-DP ($30 \cdot 30 \text{ cm}^2$) と市販の鉛板を用いた。フィルムは Kodak 社製 X-Omat TL を使用し、マイクロデンシトメータはコニカ社製の PDM-5 型を使用した。

2.2 モンテカルロ計算

電子平衡の問題を検討するとき、電子の振舞いについ

ての正確な計算をすることは重要である。ここではその計算の概略を示す。

2.2.1 二次電子の多重散乱

電子が物質中を進むとき、電子はエネルギーを失いながら多数回の散乱を繰り返して、その方向を曲げられるが、この過程を全て追うのは現実問題として不可能に近い。この1回1回の散乱ではなく、ある小さい距離（小区間）を進む間に起こる、多数回の散乱によって曲げられる角度の確率は、Bethe が修正した molier の多重散乱理論⁴⁾があり、本邦では斉藤⁵⁾らによってその計算方法が詳しく述べられている。ところが、これらは単一原子の物質についてののみしか示されてない。多種類の原子で構成された物質については EGS コード⁶⁾で述べられているので、電子の多重散乱は EGS コードの計算方法で行った。なお電子が進む小区間の距離は、電子の失うエネルギーと阻止能⁷⁾の比によって求まる。

2.2.2 制動放射

エネルギーが高く、物質の原子番号が高いとき、制動放射の影響は無視できない。また X 線スペクトルを求めるためにも必要である。制動放射の断面積については Koch-Motz の公式⁸⁾があり、モンテカルロ計算への応用については上原⁹⁻¹¹⁾が詳しく述べているので、これらの方法で行った。

2.2.3 X 線スペクトル

Fig. 2 にモンテカルロ計算によって得られた 4 MV、

Fig. 2 Energy spectrum of 4 and 10 MV X-ray calculated using the Monte Carlo method.

10 MV の X 線スペクトルを示す。このスペクトルで計算した $P(d, 0)$ は公表値¹²⁾と 1% 以内で一致しており、これをファントム入射 X 線スペクトルとした。なお ^{60}Co γ 線のエネルギーは 1.1728 MeV と 1.3325 MeV とし、それぞれの強度は等しいとした。

2.2.4 計算モデル

深さ 10 cm の水ファントムとし、4 cm の深さに厚さ 1, 2, 4 mm の鉛板、それぞれの面積は無限大のサンドイッチ形のモデル。ファントム面に対して放射線を垂直に入射させ、照射野は無大とした。深さ方向に 0.1 mm ごとの二次電子のフルエンスをエネルギースペクトル（0 から最大エネルギーまでを 200 等分、以後フルエンススペクトルと言う）として求めた。

なお使用した計算機は日本電気社製 PC-9800RA21 で、10 MV-X 線、鉛 4 mm の場合（光子ヒストリー数約 213 万個）の計算時間は、約 6.5 時間であった。

3. 結 果

3.1 ^{60}Co フィルム法による実験

フィルム法による実験結果を Fig. 3 に示す。フィルムに吸収された線量を、鉛のない破線と比較すると、鉛 1, 2, 4 mm とともに鉛の前方で 1% 程度の減少、前方 3 mm 位からの急激な増加、鉛後方での急激な一次的低下とその後のゆるやかなピークの形成、さらに深いところで鉛の吸収係数に応じた線量の低下が見られる。鉛の遮蔽効果は 1 mm 当り約 5% であった。

Fig. 3 Changes in relative doses measured by the film method using ^{60}Co γ -ray. Lead shields (0, 1, 2, 4 mm in thickness) were placed backward after a MIX-DP board of 4 cm in thickness.

3.2 ^{60}Co モンテカルロ計算

鉛のない場合の 4 cm 深さでの二次電子のフルエンス

Fig. 4 Energy spectrum of secondary electron fluence from primary and scattered photons in 4 cm water.

Primary radiation beam: ^{60}Co γ -ray

Radiation field: infinite

Thin line: The Monte Carlo method

Thick line: Deterministic analysis

スペクトルを Fig. 4 に示す。 ^{60}Co のエネルギー領域では、一次線光子と水との相互作用は、ほとんどがコンプトン効果である。二次電子平衡の成立した状態では、モンテカルロ計算によらなくても、コンプトン効果の反応断面積と二次電子に対する阻止能より、決定論的解析によって、一次線光子からの二次電子フルエンススペクトルを求めることができ、太い線で示した。これとの値を比較することによって、モンテカルロ計算のチェックができる。しかし散乱光子によるものは、モンテカルロ計算でしか求められない。

ある物質における吸収線量を求めるには、ここで得られた二次電子のフルエンススペクトルに電子の阻止能をエネルギーごとに掛けて積分すればよい。水のみ、または水中に置いた鉛を 1, 2, 4 mm としたときの値に、水の阻止能を掛けたものを Fig. 5 に示し、以下に検討する。

3.2.1 散乱線

散乱線を見ると、鉛の前方の比較的広い領域での 1% 程度の低下は、鉛より後方からの散乱光子が鉛によって遮蔽されたと考えられる。

3.2.2 水と鉛の境界の前方の一次線

境界前方 2 mm 程度からの急激な線量の増加が見られるが、これは二次電子の鉛からの後方散乱によるフルエンス増加と考えられる。このときの、鉛と水の境界の前方 1 mm における、一次線による二次電子フルエンススペクトルを、Fig. 6(a) に示す。このように、鉛を含む

Fig. 5 Changes in relative doses calculated using the Monte Carlo method.
Primary radiation beam: ^{60}Co γ -ray parallel beam
Radiation field: infinite
Thickness of lead shields: 0, 1, 2, 4 mm

場合は水のみと比べて、鉛による二次電子の後方散乱の分だけ低エネルギー成分が増加しており、これが線量を増加させている。

3.2.3 鉛と水の境界の後方の一次線

境界の後方 (Fig. 5) では線量の急激な一時的低下があり、その後方でピークとなっている。このピークの最大値は 1 mm 厚の鉛では鉛のない場合よりも大きい。更に後方の電子平衡の成立した領域では鉛の吸収係数に応じた遮蔽効果が見られる。この一時的低下とピークを形成するメカニズムを以下に検討する。

Fig. 6(b) に鉛との後方側の境界から 0.1 mm 後方の水中における一次線による二次電子フルエンススペクトルを示した。この図のように鉛の存在するとき二次電子のエネルギーは高い。これは鉛からの二次電子のエネルギーが高いためであるが、これについては 3.4 で述べる。この二次電子フルエンススペクトルに、水の阻止能を掛けることにより水の線量が求められる。水の阻止能は Fig. 11 のように 1.5 MeV 程度で最低になり、エネルギーが下がるにつれて大きくなるので、高エネルギー成分が最も多い鉛との境界で線量の一時的低下を形成する。この

Fig. 6 Energy spectrum of secondary electron fluence from primary ^{60}Co γ -ray with and without a 2 mm lead shield in water, calculated using the Monte Carlo method.

(a) 1 mm before a 2 mm lead shield.

(b) 0.1 mm after a 2 mm lead shield.

様子を Fig. 7(a), (b) で説明する。(a) は水中 4 cm の深さに厚さ 2 mm の鉛がある場合と、鉛のない水の場合の一次線線量を、鉛と水の後方の境界位置より前で発生した二次電子によるもの (A: 水のみ, B: 鉛あり) と、後方で発生した二次電子によるもの C に分けて計算したものである。このとき A, B は鉛と水の後方境界での一次線光子のフルエンスが同じになるように規格化した。(b) は境界の前後に分けたものをそれぞれ加えたものである。水のみ A は、鉛を含む B よりも境界では、エネルギーが低い分、阻止能が大きく線量が高い。その後深くなるにつれて B はエネルギーが高く飛程が長いので A よりも線量が高くなり、境界よりも後方で発生した二次電子による線量 C を加えると、図 (b) の A + C, B + C のようになり、一時的低下とピークが形成されることになる。

3.2 4MV-X 線モンテカルロ計算

モンテカルロ計算による二次電子フルエンススペクトルに 3.2 と同様に水の阻止能を掛けたものを Fig. 8 に示

Fig. 7 Changes in relative doses of secondary electrons from primary beams produced before and after the posterior surface of a 2 mm lead shield, calculated using the Monte Carlo method.

(a) Changes in segmentally analyzed relative doses.

(b) Sum of each relative dose.

A : Relative dose of secondary electrons produced in water from 0 to 4.2 cm depth, without lead shields.

B : Relative dose of secondary electrons produced within a 2 mm lead shields, which was placed at a 4.2 cm depth in water.

C : Relative dose of secondary electrons produced in water at a depth of more than 4.2 cm.

す、散乱線では、Fig. 5 の ^{60}Co ほどではないが鉛による後方からの散乱光子の遮蔽が見られる。一次線では鉛前方 3 mm からの急激な増加が見られるが、連続 X 線では鉛の後方で ^{60}Co のような一時的低下やその後のピークを形成する特異的な現象は見られない。しかし X 線のエネルギーを細かく分けて考えるとそれぞれのエネルギーにおいて ^{60}Co と同様の現象が起っていると推察される。ただ、それらが重畳された全体的な線量としては、特異的な現象は見られないと考えられる。現に鉛との境界において、わずかな低下と緩やかな増加を形成してい

Fig. 8 Changes in relative doses calculated using the Monte Carlo method.

Primary radiation beam : 4 MV X-ray, parallel beam,

Radiation field : infinite,

Thickness of lead shield : 0, 1, 2, 4 mm.

るのが見出される。鉛による遮蔽効果は ^{60}Co とほぼ同じ程度であった。

3.3 10MV-X 線モンテカルロ計算

4MV-X 線と同様な方法で求めたものを Fig. 9 に示し、以下に検討した。

3.3.1 散乱線

散乱線は鉛の後方で鉛の厚さとともに線量が増加しており、4MV-X 線では見られなかった現象である。これは一次線光子のエネルギーが高いため、全相互作用に対するコンプトン散乱の増加と、散乱線そのものの鉛中での吸収の低下によるものと考えられる。

3.3.2 水と鉛の境界の前方の一次線

X 線のエネルギーが高くなるに従い、鉛によって後方散乱された二次電子の飛程が大きくなり、鉛の前方における線量の増加領域が広がる。一次線では、鉛との境界前方 10 mm 程度から線量が増加し、境界点では約 70% の増加となった。

3.3.3 鉛と水の境界の後方の一次線

鉛との境界後方 15 mm 以降で電子平衡の成立が Fig. 9 より認められるが、このとき、鉛 1 mm 当り約 4.5% の

Fig. 9 Changes in relative doses calculated using the Monte Carlo method.
Primary radiation beam: 10 MV X-ray, parallel beam,
Radiation field: infinite,
Thickness of lead shield: 0, 1, 2, 4 mm.

線量低下となっている。ところが境界を見ると鉛 1 mm では、鉛のない場合より 3 % も増加しており、鉛 2 mm ではほぼ同じ程度である。この現象を考えるために鉛のない場合と鉛 1 mm を含む場合の 4.11 mm 深さ（鉛との境界の後方 0.1 mm の水中）における一次線からの二次電子フルエンススペクトル（陽電子も含む）を **Fig. 10** に示す。Fig. 6(b) の ^{60}Co のように 0.8 MeV 以上の二次電子フルエンスが増加しており、この増加分によって、阻止能との積である吸収線量が増加した。この増加のメカニズムについては 3.4 で詳しく述べる。境界から離れると鉛のない場合よりも大きく減衰し境界から 15 mm 程度で平衡状態に達している。結局総線量としては鉛との境界 15 mm 以降で鉛 1 mm 当り 3.5 % 程度の遮蔽効果が認められた。

3.4 光子エネルギーと二次電子初期エネルギー

物質中における二次電子のフルエンスは、その供給源である光子との反応断面積に比例し、飛程を決める電子の阻止能に反比例する。この供給源について考えてみる。

光子のエネルギーが増加すると物質との相互作用によって起こる二次電子の初期エネルギーは増加する。この増加の仕方は、物質を構成する原子が異なれば当然ながら異なる。これはそのエネルギーにおける全断面積に対する光電効果、コンプトン効果、電子対創生の比が異なるためである。

Fig. 10 Energy spectrum and fluence of secondary electrons from a primary 10 MV X-ray beam.
4.11 cm depth in water with and without a 1 mm lead shield calculated using the Monte Carlo method.

Fig. 11 Mass absorption coefficient (μ/ρ) and mass stopping power (S/ρ) of water and lead.

るためである。**Fig. 11** に光子のエネルギーと光電効果、コンプトン効果、電子対創生、全断面積の関係、また電子エネルギーに対する阻止能を、それぞれ水と鉛について示す。また光子のエネルギーとそのエネルギーに対する二次電子の初期平均エネルギーの比（以後二次電子エネルギー比と言う）を **Fig. 12** に示す。0.1~10 MeV では Fig. 11 のように、水はそのほとんどがコンプトン効果であり、光子エネルギーの増加とともに二次電子エネルギー比は増加する。鉛は 0.5 MeV までは光電効果、その後 5 MeV までをコンプトン効果、さらに高いと電子対創生というように主な相互作用の型が変わる。光電効果はエネルギーが高くなるに従い二次電子エネルギー比は高くなるが、0.3 MeV 程度からコンプトン効果の増加によって、コンプトン効果の二次電子エネルギー比に近

Fig. 12 Relative magnitude of mean initial energy of secondary electrons.

づく。さらに 2 MeV を越えると水よりも低くなるが、これは電子対創生のほうがコンプトン効果による二次電子の初期平均エネルギーよりも低いためである。

^{60}Co のエネルギーでは Fig. 11 のように、水と鉛の反応断面積は同じでも、鉛の二次電子初期エネルギーが高いためと、阻止能のエネルギー特性、また単色光に近いことから鉛との境界で特異的な現象 (Fig. 6, 7) が生じた。10 MV-X 線では、鉛のほうが二次電子エネルギー比が低いのに、1 MeV 以上の高いエネルギーでの二次電子フルエンスが Fig. 10 のように多い。これは光子との反応断面積が 3 MeV を越えると鉛の値が大きい (Fig. 11) ことと、電子対創生による二個の電子発生が原因であり、 ^{60}Co とは異なる現象である。

4. 考 察

以上の線量は、モンテカルロ計算で求めた各深さにおける二次電子フルエンススペクトルに、水の阻止能を掛けたものである。したがって水中における線量を直接表していることになる。ところが、水以外の物質中の二次電子フルエンススペクトルの計算結果に水の阻止能を掛けた場合は、その物質そのものの線量とはならず、その物質中での光子や電子の乱れが無視できるほどに微小な容積の水の線量に対応する。このことはフィルム法によってファントム内に組成の異なる物質を含む場合にも言えることである。

フィルム法による鉛を含むファントムの線量測定 (Fig. 3) では、Mix-DP とフィルムの光子や電子に対するエネルギーレスポンスが異なること、フィルムをはさんでいる遮光紙 (片面 20 mg/cm²) が 150 keV 以下の電子は通さないこと、フィルムを含む全体 (80 mg/cm²) が 300 keV 以下の電子は通さないことなどからも、二次電子の状態の極端に変わる鉛との境界の線量を忠実に現してい

るとは言えない。

鉛との境界の前方での急激な線量の増加は、主に一次線からの二次電子の、鉛による後方散乱である。 ^{60}Co における、その線量の増加が始まる点の実験値 (Fig. 3 の 3 mm) とモンテカルロ計算 (Fig. 5 の 2 mm) の違いは、実験が 30 度の斜入射となっているためである。境界点での線量増加の割合の実験値との違いは斜入射に加え、遮光紙による低エネルギー二次電子の吸収、またフィルムを加えたこと自体による場の乱れが考えられる。この境界での線量増加 (Fig. 5 で一次線は約 70%) は鉛の飽和後方散乱係数 (約 0.7) から考えてみてもモンテカルロ計算が信頼できる。そしてこの増加量が 4 MV X 線 (Fig. 8 より約 70%)、10 MV-X 線 (Fig. 9 より約 70%) とほぼ同じであることは、飽和後方散乱係数が電子のエネルギーに対して、あまり変化しないことから理解できる。

散乱線については、散乱光子からの二次電子はエネルギーが低く電子の飛程が短いことが、鉛との境界のごく狭い領域の水中の線量を増加させている。またエネルギーの低い 1 MeV 以下の散乱光子の、鉛での吸収係数は Fig. 11 で示したように、水よりもきわめて大きく、鉛の中で多量に発生した二次電子が後方散乱されて、増加量が大きい (Fig. 5, 8, 9) ことの原因になっている。しかし、この増加量は深さや照射野による、散乱線含有率の違いに左右されることは、言うまでもない。

5. ま と め

モンテカルロ計算により ^{60}Co から 10 MV-X 線までの光子エネルギーにおける、水と鉛の境界での現象について、光子、二次電子のエネルギースペクトルから、その量およびメカニズムについて明らかにすることができた。

5.1 鉛板との境界前方

一次線による線量の増加は、境界で約 70% となり、境界から前方に遠ざかるに従い (鉛との境界より 2~10 mm 以内) 増加量の減少が起こった。エネルギーの低い散乱線は高原子番号の物質内で特に多く吸収され、その飛程の短い二次電子は境界と接したごく狭い範囲 (数 10 μm) の線量を著しく増加させることになる。このことは、金属の前方で直接接している組織で問題となる。

5.2 境界後方

電子平衡の成立していない領域 (鉛の後方より 5~20 mm 以内) では、光子のエネルギーと金属の厚さによっては、必ずしも遮蔽効果があるとは言えず、わずかではあっても逆に線量の増加する場合もあり得る。境界から

モンテカルロ計算による非平衡電子領域の検討（水と鉛の境界）（丸石・他）

遠ざかって電子平衡が成立すると、その金属の吸収係数に応じた線量の低下（鉛 1 mm 当り 3～5 %）が起こる。

このように異なる物質との境界で起こる特異的な現象は、組織と組成の異なる検出器を用いる線量測定においても生じることが推察される。

謝 辞

稿を終えるにあたり、モンテカルロ計算について多大なる御指導をいただいた九州大学医療技術短期大学部、上原周三先生に深く感謝いたします。実験に御協力いただいた広島大学原爆放射能医学研究所放射線施設、御校閲いただいた同研究所の星 正治先生、本研究に御協力いただいた天野医院院長、天野浩子先生にお礼申し上げます。

本報告の一部は第47回日本放射線技術学会総会（京都）において発表した。

参 考 文 献

- 1) Terence J. Fleming, Steven C. Rambach: A tongue-shielding radiation stent. J. Prosthetic Dent. **49**, 389-392, (1983).
- 2) R.L. Engelmeier, G.E. King: Complications of head and neck radiation therapy and their management. J. Prosthetic Dent. **49**, 514-522, (1983).
- 3) 三村誠一, 三上泰隆, 稲村圭司, 他: 10 MV-X 線線量分布における Dental metal の影響, H放技学誌, **47**(5), 728-733, (1991).
- 4) H.A. Bethe: Moliere's Theory of Multiple Scattering. Phys. Rev. **89**, 1256-1266 (1953).
- 5) 齊藤公明, 森内 茂: モンテカルロ法を用いた NaI (Tl) 検出器応答関数の高精度計算とスペクトル形成過程の解明. JAERI-M 9741.
- 6) Richard L. Ford, Wolter R. Nelson: The EGS Code System Version 3. SLAC Report No.210 (1978).
- 7) T. Hiraoka, K. Kawashima and K. Hoshino: Stopping Power for Electrons in Various Dosimetric Materials. 日医放物理会誌, **2**, 125-138, (1989).
- 8) H.W. Koch, J.W. Motz: Bremsstrahlung Cross-Section Formulas and Related Data. Reviews of Modern Phys. **31**, 920-955, (1959).
- 9) 上原周三, Koch-Motz 微分断面積公式による制動放射スペクトル及び関連する諸量の数値計算. 放射線, **15**, 3-23 (1989).
- 10) Shuzo Uehara: The Data Preparation for Electron Discrete Processes in the Monte Carlo Transport Code. 日医放物理会誌, **6**, 173-183 (1986).
- 11) Shuzo Uehara: THE DEVELOPMENT OF A MONTE CARLO CODE SIMULATING ELECTRON-PHOTON SHOWERS AND ITS EVALUATION BY VARIOUS TRANSPORT BENCHMARKS. NORTH-HOLLAND PHYSICS PUBLISHING, Amsterdam, 559-570 (1986).
- 12) 日医放物理会編: 放射線治療における ^{60}Co ガンマ線および高エネルギー X 線の吸収線量の標準測定法, (株)通商産業研究社, 東京, (1977).