

連載

SPECTにおける 画質劣化とその補正

Ⅲ γ 線の散乱

法政大学工学部

尾川浩一

γ 線の計測と散乱線

体内を構成する原子と線がコンプトン散乱、または干渉性散乱をすることにより発生した散乱光子がコリメータの孔を通過し、ガンマカメラで検出されてしまうことによってコントラスト分解能が低下することについて、「Ⅰ 総論」において述べた。この散乱の問題は、ガンマカメラを構成するシンチレータと光電子増倍管(photo-multiplier tube ; PMT)による光子の検出機構と密接な関連がある。物理学の授業で学んだように、コンプトン散乱というのは光子(線)と電子が弾性衝突して、線の最初のエネルギーが電子の運動エネルギーと散乱光子のエネルギーに分配される現象である。したがって、散乱後の光子エネルギー

は必ず、当初のエネルギーよりも低いことになる。ところが、ガンマカメラで計測される光子のエネルギースペクトルを見た人は驚くだろう。たとえば140keVの光子を放出するTc-99mのエネルギースペクトルをガンマカメラで観測すると図1のように140keV以上のエネルギーを持つ光子が存在している(ように見える)。これは何か?このような素朴な疑問を持った人が少なからずいると思う(私も含めて)。この原因はガンマカメラにおける線の計測機構にあり、以下のように説明できる。コリメータを通過した線(プライマリ光子あるいは散乱光子)は、NaI(Tl)シンチレータ内で光電吸収やコンプトン散乱を起こす。光電吸収が起きたときは、入射した線は消滅し光電子が発生する。この時、励起状態の原子が残り、この原子は蛍光X線(波長: 410nm)を発生し安定状態に戻る。コンプトン散乱が起きた場合は1~3回の散乱の後、光電吸収によって光電子が発生し、同様の蛍光X線が発生する。この蛍光が線の計測において重要な役割を担うが、蛍光の発生そのものがシンチレータ内の結晶の不均一性や相互作用の影響を受けることになる。すなわち、1個の線の入射により常に一定量の蛍光が観測されるわけではないために、観測エネルギー値の揺らぎが発生する。この蛍光がPMTの光陰極(感光性の陰極[カソード])に到達すると、そこで光電子を放出させ、この光電子が複数の2次電子増倍電極(ダイノード)で増幅されて大きな電

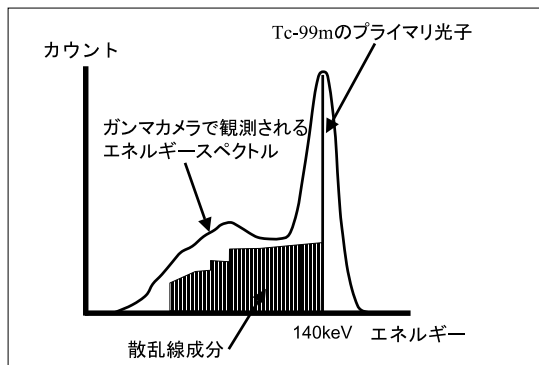


図1 シンチレータに入射した直後の光子のエネルギースペクトルとガンマカメラから出力されるエネルギースペクトル

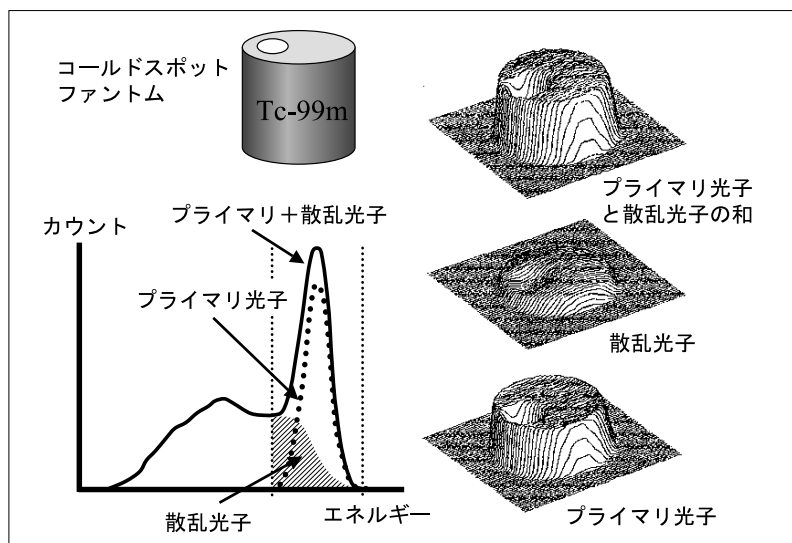


図2 エネルギーウィンドウ内の散乱線が再構成画像に与える影響

流が得られる。この増幅機構においてダイノードに到達する光電子の数が有限であり、統計的に揺らぐことで最終的に得られる電流値が変動する。これらの2段階のエネルギー変換(線蛍光、蛍光電流)によって、エネルギースペクトル上では、本来1本となるはずの線のスペクトルが、このエネルギーを中心に正規分布に似た広がり(エネルギー分解能の低下)を持つことになる。これが光電ピークと呼ばれるものである。図1の縦線で示されたエネルギースペクトルはシンチレータに入射した時点の光子のエネルギーを示し、PMTを経た後(光子エネルギーの電流値への変換後)ではそのスペクトルは滑らかな連続スペクトルとして観測される。このようにガンマカメラでは線をいったん蛍光に置き換え、それをさらに電子に置き換え増幅するというプロセスを取るためエネルギー分解能の低下が起きるが、半導体検出器では線が検出器内で相互作用を起こした際に発生する電荷を直接計測するため、エネルギー分解能は非常に高い。核医学ではこのようにエネルギー分解能の低い検出器で線を計測するために、本来除外したいところのコンプトン散乱線をプライマリ光子とともに計測することとなり、散乱光子の問題が発生するのである。

散乱線の影響

散乱線によってSPECT画像の画質がどのように変わるかをTc-99mの例で示す。図2のエネルギースペクトルは上部のコールドスポットファントム(円柱内部はすべて水)に関してモンテカルロシミュレーションで計算されたものである。SPECTでは一般に光電ピークを中心に $\pm 10\%$ 程度の幅のエネルギーウィンドウを設定し、これを用いたデータ収集が行われる。これは、光子を検出するNaIシンチレータのエネルギー分解能が10%程度であることに起因している。すなわち、140keVのエネルギーでシンチレータに入射した光子は、140keVを中心としたFWHM10%の正規分布(ガウス分布)のエネルギー揺らぎを持つことになり、このような光子をすべて計測するために、FWHMの倍程度の幅を持ったエネルギーウィンドウが用いられる。ところが、コンプトン散乱を起こした光子は、シンチレータに入射する時点では140keVのプライマリ光子のエネルギーよりは低いものの、140keVに近いエネルギーを持っているものがある。光子のエネルギーが140keVに近いのは、コンプトン散乱角が小さい場合、すなわちもともとの光子(プライマリ光子)と散乱光子の

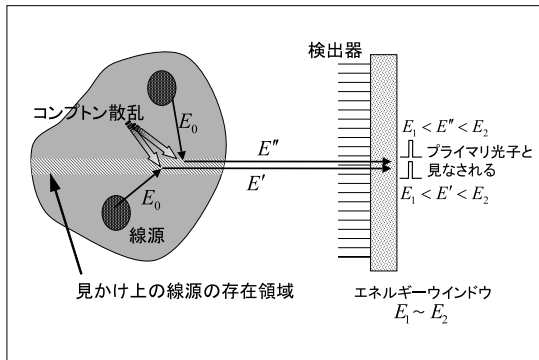


図3 コンプトン散乱線によって見かけ上の線源分布が生まれる理由

進行方向が似ている場合である。このような光子(図2の斜線部)のエネルギーは、プライマリ光子を計測するために設置されたエネルギーウィンドウと重なってしまうため、散乱線が必然的に混入することになる。この量は位置によってあるいは線のエネルギーなどによって変わるが、Tc-99mで測定カウントの2~3割程度、Tl-201で4~5割程度である。ここで驚くべきことは、心筋SPECT検査で得られたカウントの半分はプライマリ光子でない、すなわち光子が発生した位置の情報を持っていないことである。かつて、臨床に携わる医師や放射線技師の一部の人々は、散乱線成分を測定データから除去することはカウントを減らすので問題があると主張していたが、これは大きな誤りである。このような散乱線を計測しても、もとの線源分布(放射性医薬品の集積)の情報を保持せず、また後述する画像の濃度コントラストを低下させるので、その除去は不可欠である。ただし、このような散乱線を除去することはカウント値の低下を意味し、統計変動による画質劣化が顕著になるので、これを補正するための平滑化(スムージング)処理を同時に施行しなければならない。図2右の再構成画像は、これらの成分ごとの光子から計算したSPECT画像である。

図3は散乱線の存在により低周波歪み(ここでは一定のSPECT値のかさ上げ)が生ずる理由を示したものである。観測された線のエネルギーがエネルギーウィンドウ内の値となっていれば計数が行われ、画像再構成において、その光子の発生場所は逆投影する直線上にあると見なされてしま

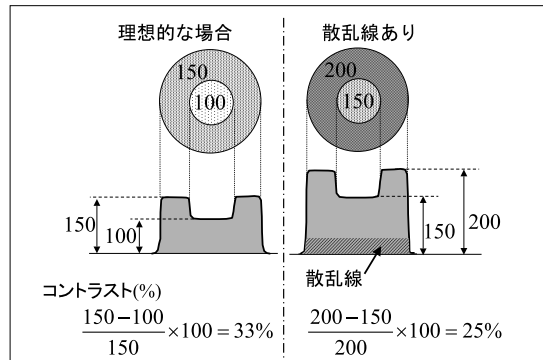


図4 散乱線によるコールドスポット部のコントラスト低下

うために、散乱成分は画像上のいたる場所で再構成値を増加させることになる。

散乱線とコントラスト低下

図4はコンプトン散乱線がコントラストの低下を引き起こすことを概念的に示したものである。左側が散乱線のない理想的な場合の再構成画像、右は散乱線が混入した場合の再構成画像である。前述のように散乱線は再構成画像に対してSPECT値のかさ上げ(バイアス)になるので、中央部の濃度値(コールドスポット部)のコントラストは33%から25%へと低下する。このようにコントラスト値が低下すると、検出能の低下が起きる。図5は4つの大きさの異なるホットスポット部(信号10カウント)をバイアスの値を100、50、20カウントと3種類変えて表示したものである。実際に近くするためにガウス雑音も付加してある。このようにバイアスの成分が大きくなるに従いホットスポット部が見えにくくなっていることがわかる。特にその面積が小さい場合は影響が大きくなっている。このようなコントラスト低下を防ぐためには、バイアス成分となっている散乱線の除去が重要である。

散乱線除去法

投影データに混入する散乱線の特徴は、その画素ごとに散乱線の混入量が異なり、同時に光子のエネルギーや使用するコリメータによってもその

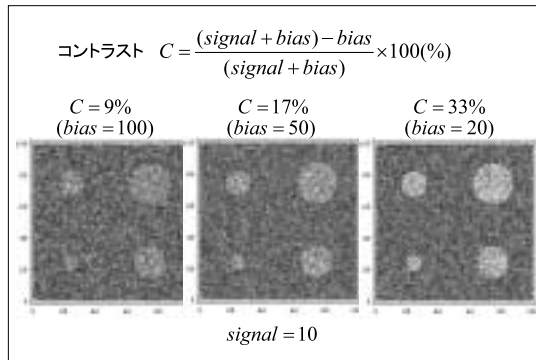


図5 散乱線によるホットスポット部のコントラスト低下

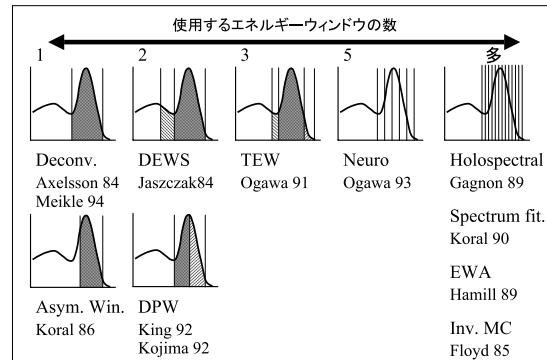


図6 使用するエネルギーウィンドウの数で分類した散乱線補正法

混入割合が大きく変化することである。この散乱線を除去するために提案された方法について、データ収集に使用するエネルギーウィンドウ数から解説する。以下、()内の表記は図6と一致させるためにつけてある。1つのエネルギーウィンドウを用いた方法にはデコンボリューション法(Deconv.)¹⁾がある。これは点線源に対する点広が関数(散乱線部)を指数関数で近似し、これを用いてプレーン画像上、あるいは再構成画像上でデコンボリューションし、散乱線を除去するというものである。この方法では散乱線によるボケ(点広が関数)が位置に依存しないと仮定しているが、この仮定は実際には成立しないため、補正不足や過剰補正の部分が生ずる。また、エネルギーウィンドウの位置を高エネルギー方向へずらして散乱光子の含有割合を低くする方法(Asym. Win.)も提案されているが、プライマリ光子の数も同時に減少し、また原理的にいくら高エネルギー側にシフトしても必ず散乱線が含まれてしまい(図2を参照)現実的でない。エネルギーウィンドウを2個用いたものには、デュアルエネルギーウィンドウサブトラクション法(DEWS)²⁾がある。これは第1のウィンドウを光電ピーク部に、第2のウィンドウを散乱線だけを収集する低エネルギー部に置き、この散乱線ウィンドウのカウントを用いて光電ピークエネルギーウィンドウ内に含まれる散乱線を推定し差し引くというものである。この方法は簡単かつ平均的な散乱線の除去が可能であるという利点があるが、光電ピークウィンドウでは1~2次のコンプトン散乱線が、散乱線

ウィンドウでは高次の散乱線が計測され、これらの散乱線の分布は一致しないので、均一に放射線源が分布している場合を除いて精度の高い補正は期待できない。また、光電ピークを左右に2分してデータ収集を行い散乱線を補正する方法(DPW)³⁾も提案されているが、光電ピークを2分することはピークエネルギーがわずかにずれたときに左右のカウントバランスが崩れ、大きな誤差が生じるという実用面での問題がある。エネルギーウィンドウを3個用いるものには、Triple Energy Window法(TEW)⁴⁾がある。これはプレーン画像上の画素ごとに、3つのエネルギーウィンドウを用いてデータ収集を行い、中央のウィンドウ内のプライマリ光子のカウント数を推定するものである。TEW法は簡単かつ効果的な補正法であるが、さらに補正精度を向上させるためには、中央のウィンドウの幅を線源分布ごとに微妙に変化させればよい。これは光電ピーク部における散乱光子のエネルギースペクトル形状を直線に近似して散乱線成分を推定しているからである。5つのエネルギーウィンドウを用いたものにはニューラルネットを用いた散乱線補正法(Neuro)⁵⁾がある。この方法ではあらかじめモンテカルロ法によってプライマリ光子と散乱光子の割合をエネルギースペクトルの形とともに学習しておき、このネットワークに実際に測定されたデータ(5つのエネルギーウィンドウで粗く測定されたスペクトル)を入力し、プライマリ光子を推定するというものである。この方法は、パターン認識の方法で散乱線の推定を行っているため雑音

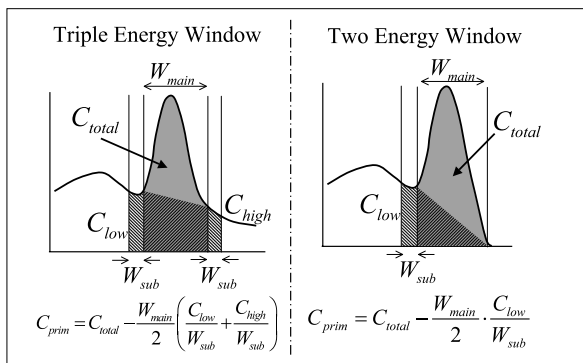


図7 2つのTEW法によるプライマリ光子数 (Cprim) の推定

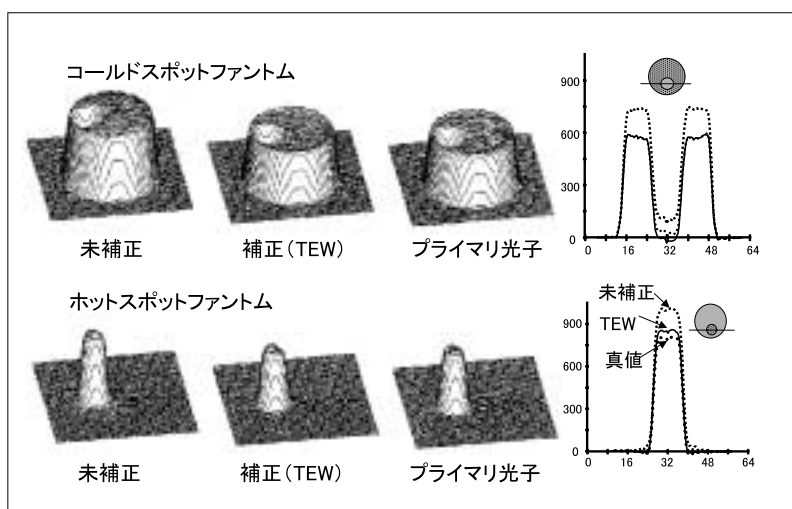


図8 TEW法による散乱線除去効果 (シミュレーション結果)

に対して強いという利点がある。一方、さらに多くの狭いエネルギーウィンドウを用いるものもある。2keVのエネルギーウィンドウで収集したデータを用いて主成分分析によって散乱成分を求める方法 (Holospectral)⁶⁾ は固有値を計算する必要があり、収集カウントがかなり多くないと雑音の影響が大きく、正しく計算することができない。また、光子データを空間的、エネルギー的に荷重をつけてデータを収集する方法 (EWA)⁷⁾ もあるが、散乱線の空間分布は物体の形状などに影響されるのでこれらの荷重は本来前もって決められないはずである。さらに、エネルギースペクトルのフィッティングを利用する方法 (Spectrum fit)⁸⁾ もあるが、逐次的なカーブフィッティングの操作が必要になるので統計変動が大きい場合には補正が困難

となる。また、モンテカルロ計算の逆を行い、観測された光子のエネルギーと位置から、光子の元々の発生位置を割り出す方法 (Inv. MC) もあるが、計算量が多く現実的な方法とはいえない。このように、エネルギーウィンドウの数が少ないと統計精度はいいが、スペクトルの近似精度に欠け、逆にエネルギーウィンドウの数を多くすると統計変動が無視できなくなることがわかる。

これらの方法を別の観点から総括すると、80年代の方法の多くは散乱線の混入割合が位置に依存するということを考慮していないものであり、このため顕著な補正効果が見られない。これに対して、90年代に提案された方法はこの点を考慮したものが多く、なかでもTEW法は、複数核種の同時使用あるいは複数の光電ピークエネルギーを有

する放射性核種に対しては3ウィンドウ設定、単一の光電ピークを持つ核種に対しては2ウィンドウ設定と切り替えて使用することで高い精度の補正を実現でき、多くの商用機で実用化されている(図7参照)。図8にはコールドスポットファントムとホットスポットファントムに関するTEW法の補正効果をシミュレーション結果で示した。この他、関連する話題としては、鉛のコリメータで光電吸収が起きた際に発生する特性X線の問題がある。このエネルギーは72、74、84、87keV(L殻~K殻)などであるが、TI-201などのデータ収集を行う上でこれらの光子はプライマリ光子計測

のためのエネルギーウィンドウで観測されてしまう。この成分の除去は心筋SPECTなどでの定量的画像再構成を行う上で不可欠である⁹⁾。

まとめ

SPECTにおける散乱線の問題に関して、検出器の観点からその発生原因を示し、散乱線が画像に与える影響を解説した。さらに、さまざまな補正方法の長所、短所を、計測に用いるエネルギーウィンドウの数と散乱光子の位置依存性の観点から述べた。

<文献>

- 1) Axelsson B et al : Subtraction of Compton - scattered photons in single - photon emission computerized tomography. J Nucl Med 25 : 490-494, 1984
- 2) Jaszczak RJ et al : Improved SPECT quantification using compensation for scattered photons. J Nucl Med 25 : 893-900, 1984
- 3) King MA et al : A Dual - photopeak window method for scatter correction. J Nucl Med 33 : 605-612, 1992
- 4) Ogawa K et al : A practical method for position - dependent Compton - scatter correction in single photon emission CT. IEEE Trans Med Imag 10(3) : 408-412, 1991
- 5) Ogawa K et al : Accurate scatter compensation using neural networks in radionuclide imaging. IEEE Trans Nucl Sci 40(4) : 1020-1024, 1993
- 6) Gagnon D et al : Introduction to holospectral imaging in nuclear medicine for scatter subtraction. IEEE Trans Med Imag 8 : 245-250, 1989
- 7) Hamill JJ et al : Scatter reduction with energy - weighted acquisition. IEEE Trans Nucl Sci 36 : 1334-1339, 1989
- 8) Koral KF et al : SPECT Compton - scattering correction by analysis of energy spectra. J Nucl Med 29 : 195-202, 1988
- 9) Motomura N et al : Development of a lead x - ray compensation method in simultaneous TI-201 SPECT & Tc-99m TCT using a flood source. IEEE Conf Rec of NSS/MIC 1996 vol.2 : 1416-1420, 1997