

3. 考察

3.1. 実験 1

ヨーロッパではこめかみに TLD を貼り付けて水晶体線量の代用とすることがしばしば行われている。しかし本実験の結果によると、水晶体の位置の線量と比較してこめかみの線量は半分程度である。こめかみの線量を水晶体線量として代用すると、過小評価を招く恐れがある。今回の測定においては、こめかみよりも左の防護ガラス内の方が水晶体線量に近く、水晶体線量の代用に相応しいと考えられた。

右側では防護ガラス外よりむしろ防護ガラス内の方が高線量となった。術者から見て左下に散乱線の線源が位置しているため、鼻当て付近の隙間から入り込んだ散乱線が影響したのかもしれない。顔の向きを少し変えただけでも、防護ガラス内の線量は変化してしまう恐れのあることが示唆される。

水晶体表面、3mm、10mm を想定した位置での線量は、左では 3mm 線量が最大であるのに対し右では 3mm 線量が最小となり、一定の傾向を示さなかった。散乱線の入り方が影響しているのかもしれない。

3.2. 実験 2

術者左下方からの散乱線による水晶体線量が、防護メガネによってどのように低減されるかを検討する実験系であった。Fig. 1 のように、眼球表面線量は一貫して左が右より高かった。右眼球表面の線量が防護メガネの有無に関係なく概ね一定だったのは、散乱線の線源から見ると右眼球が鼻に隠れていたことが関係しているものと推察される。防護メガネの防護効果を評価するためには、左の眼球表面線量に着目するのが妥当と考えられた。

左眼球表面の線量は防護メガネ装着によって低減されたが、その効果は Fig. 2 の黒棒で示されたとおり防護メガネによって大きく異なり、低減率は 9% から 62% までばらついていた。特に低減率の小さかった PT-99AL-BK (メガネ 7) は、左下方からの写真にて眼球が見えそうになるほど隙間があいており、この隙間から散乱線が入り込んだものと考えられる。

レンズの遮蔽性能を反映するレンズ内外の比較による線量低減率は、Fig. 2 のグレーの棒で示されたとおり、0.75mmPb 相当のレンズで 70% 程度、0.07mmPb 相当のレンズで 60% 程度であった。HF-350B や FP-3 におけるレンズ中央下部の内外の比較では、これらの値を下回る効果しか得られなかったが、これはレンズ下方から入り込んだ散乱線の影響であろう。

同等レンズでフレーム形状も似ている PT-99BK (メガネ 4) と PT-99AL-BK (メガネ 7) とを比較すると、レンズ内外の線量低減率は予想通り同等だが、鼻当ての大きい PT-99AL-BK より鼻当ての小さい PT-99BK の方が顔面との距離が近いためか、メガネの有無による眼球表面線量低減率は PT-99AL-BK の 9% に対して PT-99BK が 46% と大きく異なっている。最も防護効果の高かった PT-NIKE-LAVA (メガネ 5) も同じ 0.75mmPb 相当のレンズだが、顔面との距離が更に近かったことが良い結果を招いたのであろう。

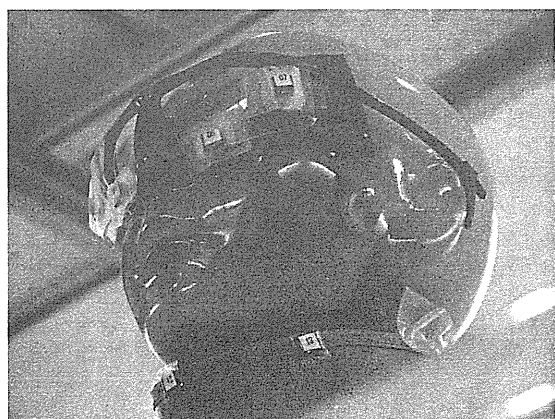
HF-350B (メガネ 1) は 0.07mmPb 相当のためレンズ内外の線量低減率は下位の成績となったが、眼球表面線量低減率は 36% で中間的な成績であった。顔面によくフィットするデザインが功を奏したものと考えられる。同じレンズを用いた HF-400S (メガネ 2) の眼球表面線量低減率 HF-350B に劣るのは、顔面との距離が離れるためとして説明可能である。

以上より、眼球表面の線量を下げするためには、遮蔽性能の高いレンズを使うことも大事だが、それ以上にレンズと顔面の隙間を減らすことの方が重要であろう事が示唆される。

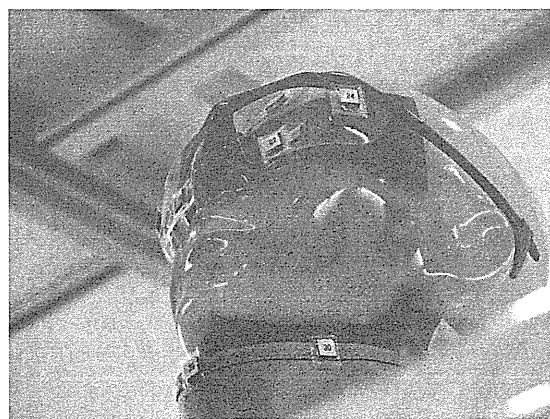
Fig. 3 で示されたとおり、防護メガネ内での線量不均一性は数倍に及び、メガネによって強弱の分布も逆転していた。防護メガネ内側の線量計が眼球表面に貼った線量計と比較的合致する位置は、HF-350B、PT-90、FP-3 では左中央下、PT-99BK では右中央下、PT-NIKE-LAVA や PT-99AL-BK では右横、と一定しない。HF-400S や PT-53 に至っては比較的合致する位置さえ無く、どの位置でも倍以上の過大評価または過小評価が生じる。防護メガネの内側に線量計を貼り付けて水晶体線量の代用とする実験は、過小評価と過大評価が混在してしまい、解釈が難しいことを意味する。

Fig. 4 に示されたとおり、頸部線量から眼球表面線量を推算するための係数はメガネによって異なり、管球に近い左側については 19%~53%であった。一方、右の係数については 556%~932%と非常に大きな値となったが、これは右頸部の線量が左の 1/35 と非常に小さいことに起因していた。実臨床で術者の頭の向きが様々に変わることを考慮すると、左右の水晶体線量のうち高い方を推算するための係数を合成し、最大値を求める必要がある。極端に成績の悪い PT-99AL-BK と FP-3 を除外すると、左側の係数は 19%~39%、右側の係数は 556%~813%となる。安全側に見積もって左を 40%、右を 800%とし、左右線量比を 35:1 とすると、今回の実験系とその鏡像の位置関係となる実験系とで同じ時間ずつ照射したならば、眼球線量 $35 \times 0.4 \times 0.5 + 1 \times 8 \times 0.5$ と頸部線量 $35 \times 0.5 + 0.5$ の比を取って、合成係数は約 60%となる。メガネ無しの場合は左 50%右 800%で、合成係数は約 70%となる。術者に線量計を付けて実測した値から係数を求める方法も考え得るが、線量計をメガネの内側に貼り付ける方法では上述の通り解釈が難しくなるので、できるだけ眼球表面に近い位置に線量計を配置することが望ましい。松原らの先行研究においては、HF-400S における左メガネ横と左頸部の線量比率が 0.803 ± 0.409 と報告されており、本研究の結果より高めであった。松原らの研究は臨床現場での測定であるため頭部の向きが様々に変わった結果、メガネと顔面の隙間から入り込む線量が増えたためと考えられる。

本検討の最大の限界は、線量測定中に頭部の向きを変更していないことである。頭部の向きによって、防護メガネ内に入り込む散乱線の量は変化する。実際、HF-350B を装着した状態で頭部ファントムの角度を 12.5 度上向きに変えてみたところ、眼球表面線量は左で 5%増加し、右では 49%減少した。臨床における防護効果は正面からの照射における防護効果よりも低いことが報告されている。³⁾



正面



12.5 度上向き

別の角度で測定すれば、頸部線量から眼球表面線量を推算するための係数は変化し、防護メガネの線量低減効果の順位も変わる可能性がある。使用した頭部ファントムは平均的日本人より鼻梁が高く、鼻梁による遮蔽やメガネ顔面距離拡大が、右眼球表面線量の過小評価や防護効果の過小評価を招いた可能性がある。

3.3. まとめ

水晶体の線量限度引き下げを法令へ取り入れるにあたっては、水晶体等価線量を簡便に推計する手法を確立することが前提となる。今回の検討結果から、防護メガネの種類による防護効果の違いや、防護メガネ内の線量計取り付け位置による測定結果の変動は、無視できないほど大きいことがわかった。すなわち、こめかみや X 線防護メガネ内側に線量計を取り付けて水晶体線量の代用とした研究の結果は、慎重に解釈する必要がある。防護メガネの防護効果を高めるには、ガラスの遮蔽を高めるだけでなく、顔面とメガネの隙間を小さくすることも重要らしい。頸部線量から眼球表面線量を推算するための係数を安全側に見積もると、約 60%であった。

4. 参考文献

1. Sturchio GM, Newcomb RD, Molella R, et al. Protective eyewear selection for interventional fluoroscopy. *Health Phys.* 2013 Feb;104(2 Suppl 1):S11-6.
2. Magee JS, Martin CJ, Sandblom V, Carter MJ, et al. Derivation and application of dose reduction factors for protective eyewear worn in interventional radiology and cardiology. *J Radiol Prot.* 2014 Dec;34(4):811-23.
3. van Rooijen BD, de Haan MW, Das M, et al. Efficacy of radiation safety glasses in interventional radiology. *Cardiovasc Intervent Radiol.* 2014 Oct;37(5):1149-55.

平成27年度厚生労働科学研究費補助金（地域医療基盤開発推進研究事業）
「医療における放射線防護と関連法令整備に関する研究」（H26-医療一般-019）
（研究代表者：細野 眞）

分担研究報告書
「水晶体線量の評価手法に関する研究」

研究協力者 坂口 健太 近畿大学高度先端総合医療センター

研究分担者 赤羽 正章 NTT 東日本関東病院放射線部

研究協力者 薬師寺 優子 近畿大学医学部附属病院 看護部
高原 尚美 近畿大学医学部附属病院 看護部
花岡 宏平 近畿大学医学部附属病院 中央放射線部

研究代表者 細野 眞 近畿大学医学部放射線医学教室

研究要旨

近年、放射線は様々な分野で利用されており、特に医療分野での利用は著しく国民生活の向上に貢献している。その一方、放射線を利用する医療従事者の放射線被ばく線量の増加とそれに伴う健康へのリスクが重要な課題となっている。2011年にICRPが白内障閾線量の引き下げを勧告したことにより、水晶体等価線量評価を取り巻く状況は大きく変化している。この状況を踏まえて水晶体等価線量評価の現状について調査した。

A 研究目的

本研究は、ICRPによる白内障閾線量引き下げ勧告による水晶体等価線量限度引き下げに向けて、現状の水晶体等価線量評価の課題について明らかにすることを目的とした。

B 研究方法

以下の5点について調査を行い、結果をまとめた。

1. ICRPによる白内障閾線量引き下げについて
2. 現状の水晶体等価線量の調査
3. 現状の水晶体等価線量評価方法と問題点 --過大評価について--
4. 現状の水晶体等価線量評価方法と問題点 --過小評価について--
5. 外眼角における3mm線量当量の実測

C 結果と考察

C-1 ICRPによる白内障閾線量引き下げについて

ICRPが2011年に韓国のソウルで開催した会議で発表した「組織反応に関する声明」と2012年に出されたICRP Publication 118¹⁾により、白内障閾線量の引き下げが示された。この声明でICRPは水晶体等価線量限度として5年間で100mSv及び1年で50mSvを勧告した。これは、最近の疫学的調査の結果から白内障の閾線量が従来の5,000mGy程度から生涯で500mGy程度であると考えられるようになったためである。

C-2 現状の水晶体等価線量の調査

個人線量測定機関協議会が発表した2014年度の業種別の実効線量の分布表²⁾によると一般医療分野の個人被ばく線量測定対象者は333,930人で、そのうち実効線量で年間20mSv以上被ばくした業務従事者は312人であり、年間50mSvを超えた業務従事者は11人であったと報告されている。また、千代田テクノル社が発表した2014年度の個人線量の実態³⁾によると、測定対象者は187,176人で、そのうち実効線量で年間20mSv以上被ばくした業務従事者は85人であり、年間50mSvを超えた業務従事者は1人であった。また、水晶体の等価線量については年間20mSv以上被ばくした業務従事者は1128人で、年間150mSvを超えた業務従事者は2人と報告されている。次に均等被ばく管理及び不均等被ばく管理の平均年間実効線量と平均年間水晶体等価線量の比較を示す。均等被ばくの年平均実効線量と年平均水晶体等価線量はそれぞれ0.13mSvと0.15mSvであり、一方不均等被ばくの年平均実効線量と年平均水晶体等価線量はそれぞれ0.59mSvと2.07mSvであった。均等被ばくと不均等被ばくにおける年平均水晶体等価線量の比は、13.8倍であった。

C-3 現状の水晶体等価線量評価方法と問題点 --過大評価について--

ICRPは1991年にICRP 1990年勧告(ICRP Publication 60)⁴⁾と、1996年にPublication 74⁵⁾を出し、従来まで水晶体の等価線量評価に用いていた3mm線量当量の測定義務をなくし、1cm線量当量または70 μ m線量当量のうち適切な方で水晶体等価線量を評価することを可能とした。また、これを受けてわが国の放射線関連法令の水晶体等価線量評価も同様に定められた。これは3mm線量当量が1cm線量当量及び70 μ m線量当量を超える恐れがないと示されたためであり、白内障リスクから見た場合の安全側の考え方となっている。しかし水晶体等価線量評価に70 μ m線量当量または1cm線量当量を用いることは過大評価を導く可能性があり、白内障閾線量が下げられた現状において、無用な混乱を引き起こす場合も考えられる。

水晶体等価線量過大評価の一例として、IAEA Global Nuclear Safety and Security Network内にてRolf Behrensが報告している資料⁶⁾の一部を示す。Rolfは光子線及び電子線において個人被ばく線量計の値と水晶体等価線量の値をモンテカルロシミュレーションで求め(Data Source : ICRP Publication 116を使用)、その比で水晶体等価線量の精度を

評価した。この研究からIVRなどの光子線を使用する業務従事者に対する水晶体等価線量評価は70 μ m線量当量または1cm線量当量のどちらか大きい値を使用することで適切な水晶体等価線量評価が行えることが確認された。しかし、核医学領域のようにベータ線及びアルファ線などの荷電粒子線を使用する領域では70 μ m線量当量を使用すると著しい過大評価の恐れがあるので、荷電粒子を対象とする場合は3mm線量当量での水晶体等価線量評価が必要であると考えられる。

C-4 現状の水晶体等価線量評価方法と問題点 --過小評価について--

現在、ICRPの1990年勧告を取り入れた我が国の法令では、均等被ばくにおける個人の水晶体等価線量の測定は基本着用部位（妊娠可能な女子は腹部、その他は胸部）における1cm線量当量及び70 μ m線量当量の適切な方の値で評価することとなっている。また、頸部を含む不均等被ばくにおける水晶体等価線量評価は、頸部における1cm線量当量及び70 μ m線量当量の適切な方の値で評価することとなっている。しかし、最も水晶体被ばくが考えられるIVR等のエックス線透視業務や核医学領域での業務について、基本着用部位の個人被ばく線量計は放射線源と水晶体間距離よりも離れている場合が多く、また個人被ばく線量計が鉛衝立や鉛プロテクターの下にあることが多いため、基本着用部位の個人被ばく線量計による水晶体等価線量評価は実際の水晶体等価線量よりも低い値が算出されている可能性がある。このような状況下の場合、頭部および頸部での被ばく線量評価を加えた不均等被ばく管理をする必要があるが、現状の医療現場において頭頸部での不均等被ばくを評価している施設はまだ少なく、これも水晶体等価線量の過小評価の原因となっている。

水晶体等価線量過小評価の一例として、全国循環器撮影研究会が発行している「循環器被ばく低減技術セミナーテキスト」⁷⁾を示す。これによるとIVR術者は0.25mmPbの鉛プロテクターを使用することによって二次エックス線透過率を10%程度に低減させることができるとされており、同様の報告は2001年に日本放射線技術学会が出した「学術調査研究班報告・血管撮影における標準的な術者防護用具検討班報告」⁸⁾をはじめ、いくつかの研究者からも報告されている^{9),10)}。これは不均等被ばく管理をしていないIVR術者についてはその水晶体等価線量の評価は鉛プロテクター下の基本着用部位で評価されるため、実際の水晶体等価線量の10%程度の過小評価となる恐れを示している。また、上記はアンダーチューブ型透視装置を想定しているが、オーバーチューブ型透視装置を対象とした場合はこれ以上の過小評価になることが考えられる。

C-3の結果と合わせて、現状の水晶体等価線量評価は過大評価と過小評価の可能性が含まれており、正しい水晶体等価線量評価が行われていない可能性が示された。

C-5 外眼角における3mm線量当量の実測

我々はPET検査での¹⁸F-FDG投与に従事する女性看護師5名を対象にTLDを用いて両外眼角部位での3mm線量当量の測定を行ったので、基本着用部位(腹部)での個人被ばく線量計の結果と比較検討する。

測定条件を以下に示す。

- 条件
 - 対象核種はF-18である。
 - FDG投与は住友重機械工業社製自動投与装置M130を使用
 - 測定期間は2015年5月1日~2015年5月31日の1ヶ月間で投与時のみ測定
 - 投与時は腹部に約4cmの鉛衝立を使用している。
 - 対象患者数は167名で平均投与量は 160.7 ± 43.4 [MBq]であった。

測定結果は以下の通りとなった。

	投与人数	右Hp(3)	左Hp(3)	基本着用部位（腹部） での水晶体等価線量
看護師1	33人	0.06[mSv]	0.06[mSv]	検出限界以下
看護師2	59人	0.09[mSv]	0.08[mSv]	検出限界以下
看護師3	26人	0.04[mSv]	0.08[mSv]	検出限界以下
看護師4	38人	0.04[mSv]	0.05[mSv]	検出限界以下
看護師5	11人	0.03[mSv]	0.04[mSv]	検出限界以下

Hp(3) 3mm線量当量

この測定の結果は、すべての看護師について基本着用部位での水晶体等価線量は検出限界以下であったが、TLDで測定した3mm線量当量は0.03~0.09mSv/月であった。これは基本着用部位での水晶体等価線量評価は実際の水晶体等価線量よりも過小評価となる恐れを示す結果となった。その理由として、FDG投与時には看護師の水晶体付近には何らの防護もなされていないが、腹部前面に約4cmの鉛衝立があるため、これが基本着用部位と外眼角付近の水晶体等価線量の差となったと考える。

D 結論

医療で用いられる光子線の領域において、基本着用部位の個人被ばく線量計が鉛プロテクターや鉛衝立等による遮蔽下におかれる場合は必ず不均等被ばく管理とし、なるべく水晶体に近い位置で水晶体等価線量を評価する事が求められる。また、荷電粒子線を扱う場合は著しい過大評価を示す場合があるので、その点に留意するか3mm線量当量で評価をすることが望ましい。

E 参考資料

- 1) ICRP; ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, ICRP Publication 118, Ann. ICRP 41(1/2), 2012
- 2) 個人線量測定機関協議会, 平成 26 年度の業種別の実効線量の分布表,
<http://www.kosenkyo.jp/siryou/gyousyu26.PDF>
- 3) 千代田テクノル, FBNews, 第 465 号,
http://www.c-technol.co.jp/cms/wp-content/uploads/2015/09/FBN465_201509web.pdf
- 4) ICRP; 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1-3), 1991
- 5) ICRP; Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26 (3-4), 1996
- 6) Rolf Behrens, IAEA Global Nuclear Safety and Security Network, 10f. Behrens - Monitoring-the-eye-lens. pdf
- 7) 全国循環器撮影研究会, 循環器被ばく低減技術セミナーテキスト(2007年版)
- 8) 日本放射線技術学会雑誌, 学術調査研究班報告・血管撮影における標準的な術者防護用具検討班報告, Vol. 57, 12, Dec 2001
- 9) 日本循環器学会他, 循環器診療における放射線被ばくに関するガイドライン, Circulation Journal Vol. 70, Suppl. IV, 2006
- 10) 堀越吉郎他, 腹部血管造影検査における X 線防護衣の遮へい評価, 日本放射線技術学会雑誌, 2005 Jul 20;61(7):989-96.

