宿題報告

増感紙の X 線エネルギー有効利用に関する研究

四 宮 恵 次

化成オプトニクス株式会社

Key words : Intensifying screen, X-ray spectrum, X-ray absorption spectrum, X-ray absorption.

**STUDIES ON EFFECTIVE UTILIZATION OF X-RAY ENERGY
USING INTENSIFYING SCREENS**

KEIJI SHIMIYA

Kasei Optonix, Ltd.

Summary

In the process of producing x-ray images, intensifying screens obviously play a major role in determining the image quality and the X-ray dose received by the patient. Unfortunately, however, no obtained quantitative study has been done to determine whether X-rays radiated from an X-ray tube are effectively utilized.

In the present study, from the viewpoint that the X-ray utilization efficiency of intensifying screens is identical with that of the radiography system used, the X-ray absorption and transmission of phantoms, contrast media and intensifying screens at different X-ray tube voltages with various additional filters were investigated. Also, a systematic analysis of the process by which X-rays radiate from an X-ray tube and become useless after passing through each type of absorbing material was conducted using X-ray spectra, and the importance of intensifying screens as a radiography system was described.

It was found that in screen-film systems, which have recently become very diverse, the K absorption edge of the phosphor used in intensifying screens is quite important as a factor affecting the radiographic contrast because of its combined effect with the contrast medium, and that the application of intensifying screens should be selected by considering the tube voltage, the part of the body examined and the contrast medium used.

Furthermore, as a method for decreasing the X-ray dose, which is as important as the image quality, the X-ray absorption of intensifying screens must be considered. Thus, by using the most suitable tube voltage and additional filter by analysis of X-ray absorption, not as a single value but as an X-ray spectrum, a greater effect can be expected.

1. はじめに

放射線診断技術の発展は目覚ましいものがあるが、その中であって『X線写真の画質向上と放射線被曝の低減』

は、これに関与しているわれわれ技術者に与えられた永遠の課題といえる。

最近における先端技術とえば、デジタル画像処理技術に集約される感じを受けるが、その技術を支え、育て

てきたのが、現在まだ診断の主流となっている伝統的な増感紙-X線フィルムシステムである。したがって、“X線診断の限界をさぐる”と言う永遠の課題である内容は、正に写真画質と被曝の限界を追究することにあると思われる。

私に与えられた宿題報告のテーマを選択するにあたって、技術的に何が未解決か、何が整理されていないかを、増感紙-フィルムシステム関連で考えてみると、

- ブルー発光が有利か、グリーン発光が有利か、
- 画質か、被曝か、その兼ね合いは、
- シングル増感紙か、現在のような両面増感紙システムか、

○増感紙の限界は、——等、数々あるが、その中においてX線写真を構成する因子、すなわちX線像生成の過程において、増感紙の特性はX線写真の画質と、患者に対する被曝に極めて支配的に働いていることは明らかであり、X線管から照射されたX線が果たして有効に、無駄なく利用されているかという点になると、残念ながら余り定量的に把握されていないのではないかと考える。

ここに増感紙のX線利用率が、撮影系のX線利用率であることを原点とし、その基幹をなす各種のX線用蛍光体、増感紙によるX線利用率について、管電圧、造影剤、フィルタ効果の関連を含め、X線吸収スペクトル解析を中心に検討したので報告する。

1.1 X線像生成のための増感紙機能

一般論からすれば、X線エネルギーの有効利用のためには、X線吸収の大きい増感紙を使用することに尽きるが、画質と被曝の両面からその機能を Fig. 1 により再確認すると、

Fig. 1 Function of intensifying screens for the production of X-ray images

- ①増感紙（蛍光体）がX線エネルギーを吸収する。
- ②蛍光体が吸収したX線エネルギーを光エネルギーに変換する。
- ③増感紙から放射される光エネルギーをX線フィルム（写真乳剤）が吸収する。

④写真乳剤（ハロゲン化銀）は吸収した光エネルギーにより潜像を形成する。

⑤以下一略

この機能の中で、概括的には①でX線の利用率が決まり、②で写真画質を支配することになる。すなわち、如何に優れたX線発生装置を持って撮影しても、如何に高性能のX線フィルムを用いても、X線エネルギー、X線像を光エネルギー、光学像に変換するのは増感紙であり、増感紙の性能如何では、装置、フィルムの特性を無能力化する可能性すら秘めている。

本来被写体を透過したX線エネルギーは、増感紙により100%吸収することが理想であるが、診断面よりその撮影管電圧を決めざるを得ないのが実情であり、ある程度の不利用X線は覚悟しなければならない。

1.2 増感紙、フィルムシステムの歴史と変遷

増感紙・フィルムシステムの歴史は、X線を用いた診断技術そのものの歴史と言っても過言ではない。X線の発見(1895年)直後に開発された CaWO_4 増感紙による直接撮影技術は今日まで連綿と続いており、X線装置を初めとする関連機器の改良と合俟って、写真画質の向上に寄与している。

一方、1970年代に至り放射線診断上、欠くべからざる課題となったのが患者に対する被曝の低減である。被曝低減と写真の画質向上とを両立させる手法として期待されたのが増感紙、フィルムの特性改良であり、システムとしてのレベルアップがその期待に応え、さらに今後の

Table 1 History of X-ray phosphors and intensifying screens

年	蛍光体	増感紙(KYOKKO)
(西暦) 1895	30 X線の発見	
(明治) 1900	$\text{BaPt(CN)}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ CaWO_4	
10		
(大正) 20		
30	ZnCdS:Ag ZnS:Ag	
40	$\text{BaSO}_4:\text{Pb}$	
1950		Sシリーズ
60	LaOBr:Tb	
70	$\text{RE}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$ BaFCl:Eu	Lシリーズ
80	LaOBr:Tm $\text{YTaO}_4:\text{Tm}$ $\text{YTbO}_4:\text{Nb}$	GRENEXシリーズ REシリーズ
90		Bシリーズ

可能性を充分秘めている。

Table 1 は直接撮影に係わる蛍光体、増感紙の歴史を整理したものであるが、90年にも及ぶ放射線診断の歴史の中で、やはり特筆されるのは1972年 R.A. Buchanann 等による希土類蛍光体を増感紙に応用し、従来全く利用されなかったオルソフィルムとの組合せを直接撮影に実用化させたことにある。

基本的な CaWO_4 増感紙を中心としたレギュラーシステムにおいても使用増感紙の変遷は著しく (**Fig. 2**)、その年代年代における要求度である画質か、被曝低減かに若干の影響を受けるものの、1950年代の FS 級の鮮鋭度を持つ増感紙、すなわちその後の改良により画質を向上させた LT-II $\rightarrow$ BM-III 増感紙の品質レベル (**Fig. 3**) が、最高の使用量を示す所以とも考えられる。

一般に増感紙は半消耗品、フィルムは完全なる消耗品と言われ、その使用経緯を解析することは困難であるが、

Fig. 2 Historical transition of the proportion of CaWO_4 screens used

Fig. 3 History of the improvement of CaWO_4 screens

Fig. 4 Historical transition of the relative ratio of regular and ortho systems

従来からのレギュラーシステムに対するオルソシステムの変化を、増感紙については一定の使用年数と仮定した累積保有率から求めて見ると **Fig. 4** の如くなるが、最近の急激なフィルムのオルソ化傾向 (約33%) に対し、増感紙の希土類化率が10%前後であるのは、希土類増感紙がやはり高価であることと、高感度特性を生かし、かつフィルム使用数の極めて多い高速連続撮影やカセットレスに重点的に採用されている過程とも考えられる。

1.3 増感紙、フィルムシステムの技術的課題

振り返ってみると、1975年に発売された希土類オルソシステムの特長は、高感度オルソフィルム RXO を擁し、超高感度、患者被曝の低減にあった。しかし一部の診断目的に使用することを除いて、高感度なるが故に発生するX線量子のユラギによる粒状性の悪化は、X線写真の基本である事項だけに如何とも致し難く、低感度フィルム (Gタイプ) との組合せの中で希土類増感紙の高感度特性を生かす方向に変化しつつあった。

1979年、3M 社のクロスオーバー光を改良する、新しいタイプのオルソフィルム技術に端を発し、1983年末、Kodak 社の TMG の発売が契機となり、最近ではオルソシステムの使用感度域がレギュラーシステムの使用感度域と殆ど変わらなくなった感じが強い (**Fig. 5**)。

したがって、その技術改善ポイントもフィルム乳剤技術を駆使したクロスオーバー効果の低減にあり、その過程は、Fuji 社を初め各社のオルソフィルムの改良経緯からも明らかである。さらに、フィルムの種類によってクロスオーバーの影響が異なるものの、蛍光体の発光スペクトル分布によっても、その程度は違ってくる。例えば、レギュラーフィルム乳剤の分光透過率分布と分光感度分布から、増感紙の蛍光体層に着色剤を添加した CaWO_4 増

Table 2 Main types of intensifying screens

	ブルー発光増感紙	グリーン発光増感紙
KYOKKO	BF-III FS BM-III MS BH-III HS BX-III RE-SPECIAL RE-SUPER	
Fuji	Hi-Screen B-2 B-3	Grenex G-3 G-4 G-6 G-8 G-12
Tosiba	E-10 D-10 E-15 E-20 D-20 E-23 E-27 E-28 E-32 D-32 E-34 E-40 E-44	L-100 L-160 L-220 L-270 L-330 L-440
Sakura	NR-100 SR-100 NR-160 SR-160 NR-200 NR-250 SR-250 NR-320	KO-125 KO-180 KO-250 KO-380 KO-500 KO-750
Kodak	X-Omatic Fine Regular Rapid Super Rapid	Lanex Fine Medium Regular Fast
Du pont	Detail Fast Detail Hi-Plus Lightning Plus Quanta III Detail Medium Detail Fast Detail	Quanta V
Agfa	Fin Universal Special MR-50 MR-200 MR-400 MR-800	Fine Medium Regular

Fig. 5 Speed range covered by the regular and ortho systems**Table 3** Phosphors used for the main types of intensifying screens

	ブルー発光	グリーン発光
KYOKKO	CaWO ₄ BaFCl: Eu LaOBr: Tm	
Fuji	CaWO ₄	Gd ₂ O ₂ S: Tb
Tosiba	CaWO ₄	(Gd, Y) ₂ O ₂ S: Tb
Sakura	CaWO ₄	(Gd, Y) ₂ O ₂ S: Tb Gd ₂ O ₂ S: Tb
Kodak	(Ba, Sr)SO ₄ : Eu LaOBr: Tm	Gd ₂ O ₂ S: Tb
Du pont	CaWO ₄ LaOBr: Tm YT ₂ O ₄ : Tm YT ₂ O ₄ : Nb	Gd ₂ O ₂ S: Tb LaOBr: Tb
Agfa	CaWO ₄ LaOBr: Tb	Gd ₂ O ₂ S: Tb

感紙の長波長側の発光カット技術を中心として、一段と鮮鋭度向上を計ったBシリーズ増感紙がある。

増感紙、フィルムの組合せは年々変化し、その数も増加の一途を辿っているが、Table 2は特殊用途のものを除いた、主要メーカー別増感紙の最新品種情報である。特にオルソシステムに関連した商品の急増は、整理と標準化の段階になったものと判断され、IECでの検討も開始された模様である。本稿のX線吸収に関連する意味で、これら主要増感紙に使われている蛍光体を集約、列挙するとTable 3の如くなる。

2. 増感紙（蛍光体）のX線エネルギー利用

増感紙の重要な役目は、その名の示すように増感にあるが、増感紙のX線利用率 η は概念的に

$$\eta = \eta_a \cdot \eta_c \cdot \eta_l$$

〔 η_a : X線吸収, η_c : 発光効率, η_l : 光回収率〕で示される。

ここに、X線利用率の第1因子である、増感紙のX線吸収は、増感紙を構成している物質の原子番号とK吸収端に左右されることは明らかであるが、X線管から放出されたX線エネルギーが、被写体の組織（脂肪、骨、空気、水）とその厚さ、造影剤の種類（Ba, I 他）とその厚さ、さらに撮影条件（管電圧、付加フィルタ、およびグリッド等に関連する散乱線）等により吸収、漏過されたX線エネルギーを照射することにより大きく変化する。

2.1 X線用蛍光体（増感紙）のX線吸収

最近の増感紙用蛍光体は非常に多種、多様であるが、現在、何等かの形で用いられている10種の蛍光体を用いた、X線用増感紙（蛍光板）について、80 kV の連続X線による基本的なX線の減弱を見ると、Fig. 6 の如くなる。

一般に増感紙の厚さは、フロント、バック合計で、高鮮鋭度タイプで50 mg/cm²、高感度タイプは150 mg/cm²の範囲にあるが、増感紙構成として標準的な、蛍光体100 mg/cm²における、管電圧変化による増感紙のX線吸収を見ると、Fig. 7 の如く増感紙を構成している蛍光体種別により大きく変化している。

この原因としては、蛍光体を構成している物質の原子

Fig. 6 X-ray absorption by X-ray phosphors (intensifying screens)

Fig. 7 Tube voltage dependence of X-ray absorption by X-ray phosphors (intensifying screens)

番号に係わるX線吸収係数以外に、その蛍光体の構成原子固有のK吸収端が影響していることが良く知られていることである。

2.2 増感紙のX線吸収スペクトルの測定

増感紙の吸収に関する基本物性を理解するため、X線吸収スペクトルを測定し、X線エネルギーの有効利用に対する施策の基礎とした。

測定は、名古屋大学医療短期大学部の全面的な協力によるが、ゲルマニウム半導体検出器を用いた測定配置はFig. 8に示す通りである。ここには後述の実験に関する、付加フィルタ、ファントム、造影剤および増感紙の配置も合わせ記載してある。また1年以上に及ぶ実験過程の中でX線管の破損があり、2種のX線管を使うこととなったが、X線管の違いにより、同じ管電圧でも相当X線スペクトル、X線強度が異なることも確認され、同系の実験ごとにデータを整理するよう努めた。また、測定条件は、いずれの実験も1 mA, 1,000 secとしたが、リップルは4%以下に抑えてある。

前越等の報告によれば、レーザを使い、如何に正確な実験を行っても、同一条件で実験を繰返して行くにつれて、X線強度 (photon count) が減少傾向を示し、途中2時間程度の休みを置くと元に戻ることがあるが、平均

〔宿題報告〕 増感紙のX線エネルギー有効利用に関する研究 (四宮)

Fig. 8 Configuration for measurement of the X-ray spectrum

X線エネルギー(keV)については、十数回の連続実験でも殆ど変化しないと報告している。さらに、繰返し実験におけるX線強度の減少対策として、その原因がX線管ターゲットの表面温度の上昇によることを確認し、管球冷却による安定化の成果についても報告した。しかし、本報告に関する実験開始当初は、X線強度のバラツキ原因が掴めず、X線強度の測定は、止む得ず電離箱式線量計による測定値を用いることとした。80 kV、8 cm アクリルファントム透過後の平均X線エネルギー、50.26 keVを入力X線(Fig. 9)としたとき、各増感紙の吸収スペクトルは Fig. 10 の如くなり、同一入力X線でも平均

Fig. 9 X-ray absorption spectra of intensifying screens (incident X-ray)

Fig. 10 X-ray absorption spectra of intensifying screens

吸収エネルギーは、42.26 keV～50.16 keV の広い範囲にあることが確認された。

10種の蛍光体を用いた増感紙のX線吸収スペクトルの

中で CaWO_4 増感紙および $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ 増感紙のスペクトルは、現在の主流であるだけに注目される。また、最近話題となっている $\text{YTbO}_4:\text{Tm}$ 増感紙の Ta の吸収端が W に近いことから、吸収スペクトル分布も余り違わないことがよく理解される。さらに、平均 X 線エネルギーが近似していても、Ba, La, Gd と K 吸収端の位置が異なることにより、吸収の状態が大きく異なることに留意しなければならない。

2.3 増感紙の X 線利用率と線コントラスト

吸収された X 線エネルギーを光に変換する効率、すなわち、蛍光体エネルギー変換効率（発光効率）は、蛍光体固有のものと、蛍光体製造技術に依存するものがあるが、いずれにしてもその効率の大きいほど増感紙としての評価は高い。さらに、蛍光体の改良、開発と並行して、蛍光体からの発光を効果的に利用する蛍光体の粉体特性に関連したスクリーン化技術も、鮮鋭度、粒状性の画質面を含めて重要であり、増感紙構造の改良も急速に進んでいる（Table 4）。

Table 4 X-ray efficiency factors of phosphor for intensifying screens

蛍 光 体	X 線 吸 収		発光エネルギー効率 (%)	粉 体 特 性	
	実効原子番号	K 吸収端 (keV)		比重	結晶形
CaWO_4	61.8	69.48	5	6.1	正方晶形
$\text{ZnS}:\text{Ag}$	26.7	9.66	17	3.9	六方晶形
$\text{BaSO}_4:\text{Eu}^{2+}$	45.5	37.38	6	4.5	斜方晶形
$\text{BaFCl}:\text{Eu}^{2+}$	49.3	37.38	13	4.7	正方晶形
$\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}^{3+}$	34.9	17.04	18	4.9	六方晶形
$\text{LaOBr}:\text{Tb}^{3+}$	49.3	38.92	20	6.3	正方晶形
$\text{LaOBr}:\text{Tm}^{3+}$	49.3	38.92	14	6.3	正方晶形
$\text{YTbO}_4:\text{Tm}^{3+}$	59.8	67.42	8	7.5	単斜晶形
$\text{YTbO}_4:\text{Nb}$	59.8	67.42	11	7.5	単斜晶形
$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}^{3+}$	59.5	50.22	13	7.3	六方晶形
$\text{La}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}^{3+}$	52.6	38.92	12.5	6.5	六方晶形

増感紙の断面モデルからいえば、基本パターンの均一層構造、1972年 LT-II に応用された多重層構造（その改良としての BM-III）、異種蛍光体を夫々の特性を画質面に生かした二層構造等がある（本稿では、蛍光体の発光効率およびスクリーン化技術についての詳述を略す）。

以上の各因子から、増感紙の X 線利用率を、80 kV、アクリル 8 cm ファントム（胸部）を被写体と仮定して試算すると、

増感紙 X 線吸収	30~60%
蛍光体のエネルギー変換効率	5~20%
増感紙表面への光回収率	50~90%

となり、増感紙の X 線エネルギートータル利用率は、良い増感紙で 10% 強、悪いものでは 1% 以下となり、この試算は増感紙の X 線エネルギー利用の今後の可能性を示唆しているものと考えられる。

増感紙の X 線エネルギー吸収が X 線画質に直接効いてくる性能として、線コントラストがある。増感紙（蛍光体）が入射 X 線エネルギーのどこを吸収しているか、写真法で求めた各増感紙のコントラストは Fig. 11 の如く、その吸収度合いによって異なるのは当然である。この詳細については次項に述べる。

Fig. 11 Tube voltage-contrast properties of various phosphors

3. 線質の変化による造影剤、増感紙の X 線吸収と線コントラスト

X 線診断の基本は周知の如く、被写体の X 線吸収差を増感紙で光の強弱に変換して、X 線フィルムにプリントし、写真濃度差として識別することにある。

しかし、この系の中で増感紙（蛍光体）の X 線吸収の

〔宿題報告〕 増感紙のX線エネルギー有効利用に関する研究 (四宮)

違いによるエネルギー利用については余り追究されておらず、沉んや造影剤、増感紙および撮影管電圧の組合せ吸収については、近年研究が開始されたレベルと考えられる。

X線の減弱係数が、物質のK吸収端に大きく支配されることから、通常の診断領域で使われるX線エネルギー範囲で関連する、被写体、造影剤および増感紙物質の原子についてみると、Ca, I, Ba (被写体, 造影剤), Ca, Zn, Y, Ba, La, Gd, Ta およびW (増感紙) が挙げられる。

3.1 X線写真の階調物理評価法

X線写真上での識別の基本が、写真の濃度差すなわち、階調 (コントラスト) にあるが、一般に階調の物理評価には、水、アクリル、ミックスD等の組織等価に近いもの、あるいはアルミニウム、銅等のステップを撮影する方法が採られている。

しかし、胃二重造影など、実際の造影撮影では、使われる造影剤物質のK吸収端が吸収に関係することから、その物質を使つての階調評価が必要ではないかと考える。

ここに、増感紙、フィルムシステムの、大きな流れである CaWO_4 (RX) および $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ (HR-S) 増感紙システムについて、アルミニウムおよびバリウムステップを使って写真コントラストを測定すると、Fig. 12, 13 に示すように、アルミステップによるコントラスト値には、管電圧の変化にたいして増感紙相互間の差は殆どないが、胃の造影撮影を対象としたバリウムステップによる測定では、明らかに50.22 keV にGdのK吸収端のある $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ 増感紙は、37.40 keV にK吸収端があるBa造影剤のX線吸収が関連して、2種の増感紙間のコントラストは大きく違ってくる。したがって、胃、血管等の造影撮影の物理的階調評価には、造影剤と同質の物質を使う必要が明確となった。

3.2 造影剤吸収と増感紙吸収の関連

上述の考え方の模索として、撮影電圧80 kVにおける約20%吸収に相当する、骨としてはカルシウム系 (CaCO_3 , 400 mg/cm²)、造影物質としてはヨード系 (イオタラム酸, 45 mg/cm²) およびバリウム系としては (BaSO_4 , 40 mg/cm²) を選び、シート化するとともに、増感紙を CaWO_4 , $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$, 2種類に限定して、Fig. 8 に示す測定配置によってX線スペクトル等の測定を行った。

測定結果は、X線管から放出されたX線①が被写体 (ファントム) にて吸収②され、残りの透過X線③の一部を造影剤が吸収④し、その透過X線⑤を増感紙が吸収⑥す

Fig. 12 X-ray attenuation by materials used for measurement

Fig. 13 Change of contrast value by materials used for measurement

ることとなる。したがって、増感紙を透過したX線⑦は全く不要のX線と言うことができる。このようにX線の履歴を系として整理することは、X線管から放出されたX線エネルギー有効利用のためには極めて重要である。

X線エネルギーの動向を、吸収と透過の面から捉え、まず、平均エネルギー (keV) について図示すると、Fig. 14 の如くなり、X線管からの出力エネルギーに対して、増感紙吸収は、Gdの吸収端により、明らかに $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ 増感紙の方が、 CaWO_4 増感紙より高エネルギーのX線を吸収している。また、造影剤の有無についてみると、I および Ba のように、撮影電圧のエネルギー範囲 (80

Fig. 14 Trends of absorptive and transmissive X-ray energy by contrast media and intensifying screens

Fig. 15 Trends of absorptive and transmissive X-ray spectra by contrast medium and intensifying screens

kV) の中に、吸収端 (33.16 keV, 37.40 keV) がある
と、増感紙の吸収エネルギーは微妙に違ってくる。増感
紙の X 線エネルギーの吸収、透過をさらに正確に把握す
るため、X 線スペクトル分布の動向を図示すると、Fig.
15 の如く提示され、X 線エネルギーを単に平均エネルギ

ーとして捉えるのではなく、X 線スペクトルとして分析
することによって、エネルギー動向とその影響を、正し
く把握することができる。

X 線量の動向は、線量計による mR 比として表した
が、Fig. 16 に見られる如く、X 線管からの出力 X 線量に

〔宿題報告〕 増感紙のX線エネルギー有効利用に関する研究 (四宮)

Fig. 16 Trends in the amounts of absorptive and transmissive X-rays using contrast medium and intensifying screens

対して、8 cm アクリルファントムで約90%を吸収し、残りの10%に対して、造影剤、増感紙の吸収と不要である透過X線が夫々1/3を占めていることとなる。しかし、これを詳細に分析すると、ここでもX線エネルギーの動向と同じく、Gd₂O₂S:Tb増感紙の方が、CaWO₄増感紙より吸収は高く、また、IおよびBa造影剤の有無によっても、増感紙の吸収量は微妙に変化してくる。

3.3 管電圧変化による造影剤、増感紙の吸収

管電圧を、60 kV, 80 kV, 100 kV と変化させたときのBa造影剤のコントラストを、増感紙の吸収面から検討してみた。実験結果は、Fig. 17, 18 および 19 にX線エネルギー、X線スペクトル、およびX線量の動向として夫々に示したが、造影剤と増感紙の組合せによる吸収は60 kV では殆ど影響せず、2種の増感紙の差は殆どないが、80 kV 以上では明らかにGd₂O₂S:Tb増感紙の方が、CaWO₄増感紙よりX線利用率は高い、これは出力X線が高エネルギーになるにつれて、GdのK吸収端を有利に利用している証拠とも考えられる。

管電圧の変化による増感紙のX線吸収を、ファントムなし、アクリル8 cm 透過後、さらにバリウム40 mg/cm²透過後の夫々の透過線量から求めると、Fig. 20, 21 の如くなり、CaWO₄とGd₂O₂S:Tb両増感紙の吸収は、高電圧になるほどGd₂O₂S:Tb増感紙が高く、その差はファントムおよび造影剤が付加されるにつれて大きくなる傾向を示している。

ファントム、造影剤の有無における各電圧の増感紙吸

Fig. 17 Trends in absorptive and transmissive X-ray energy using Ba contrast medium and intensifying screens due to changes in tube voltage

収量から、60 kV を基準とした相対コントラストを、K吸収端が関係しないアクリル被写体と、関係するバリウム被写体について求めると、Fig. 22 の如く、アクリル被写

Fig. 18 Trends in absorptive and transmissive X-ray spectra using Ba contrast medium and intensifying screens due to changes in tube voltage

体のコントラストは、一般に言われている如く管電圧の上昇に伴い低下傾向にあるが、その度合は $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ 増感紙ほど著しい。しかし、バリウム被写体の場合は管電圧の上昇に対し、むしろコントラストは上昇傾向にある。したがって、一般撮影には CaWO_4 増感紙が有利であるのに対し、胃造影撮影には $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ 増感紙の方がむしろ有利と言うことができる。

4. 増感紙のX線吸収スペクトル解析による被曝低減策

高圧撮影の目的が、骨の障害陰影の除去、短時間撮影等のほか、患者への被曝低減にあるが、最近ではそれにフィルタ効果を加味する研究が行われている。今まで述べてきたように、2種類の増感紙について80 kVのX線

吸収を見ると、 CaWO_4 増感紙のWのK吸収端は69.48 keVにあるため、この電圧では殆ど吸収に影響していないが、 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ 増感紙のGdは50.22 keVにK吸収端があるため、効率が良いことは明らかである。この場合、もし仮りに50 keV以下のX線エネルギーはX線管側で除いても、増感紙の吸収（感度）には大きな影響をもたらさないと考え次の検討を行った。

4.1 出力X線の線室変化による増感紙のX線利用率

入力X線スペクトル、被写体透過後のX線スペクトルおよび増感紙透過後のX線スペクトルを測定することにより、被写体吸収（被曝）、増感紙吸収（感度）および透過X線（不要X線）を求めることができるし、被曝低減のための被写体吸収と増感紙吸収との関連を追究することの重要性が示される。

〔宿題報告〕 増感紙のX線エネルギー有効利用に関する研究 (四宮)

Fig. 19 Trends in the amounts of absorptive and transmissive X-rays using Ba contrast medium and intensifying screens due to changes in tube voltage

Fig. 20 Dependence on tube voltage of the X-ray absorption of intensifying screens with or without a phantom and Ba contrast medium

ここに、被写体を透過したX線エネルギーを有効に利用する方法として、管電圧の変化に対応した、増感紙のK吸収端とフィルタ効果の関連についても検討した。すなわち、被曝低減策として、入力X線スペクトルをコン

Fig. 21 Dependence on tube voltage of amount of X-ray absorption shown by intensifying screens

Fig. 22 Dependence on tube voltage of the relative contrast of the phantom and contrast medium

トロールする必要があるが、その方式として、①管電圧による線質変化、②金属付加フィルタ (Cu) による線質変化 (軟線カット)、③K吸収端を利用した付加フィルタ (Gd) による線質変化 (K吸収端以上カット) が考えられ

Fig. 23 Change of X-ray spectra by tube voltage and additional filter

るが、管電圧変化と、Cu 付加フィルタによりX線スペクトルの変化を見ると Fig. 23 の如くなる。

ここでは、60～100 kV まで管電圧変化と、80 kV で銅のフィルタを0.4 mm まで付加して線質を変化させたときの、 CaWO_4 増感紙と $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ 増感紙の吸収を中心とした、X線エネルギーおよびX線量の動向を見ると、Fig. 24, 25 の如くなる。

管電圧の上昇、付加フィルタの増加は、何れも出力X線の平均エネルギーを大きくするが、付加フィルタの場

Fig. 24 Trends in X-ray energy due to changes in radiation quality

Fig. 25 Trends in amount of X-rays due to changes in radiation quality

合、入力X線の変化度合に較べて、増感紙の吸収エネルギーが高くなっていないところに特徴がある。

被曝に関係する、ファントム（被写体）透過後の、増感紙のX線吸収量と透過量の関係から、増感紙のX線利用率を見ると Fig. 26 の如くなり、傾向としては管電圧、付加フィルタに関係なく、平均X線エネルギーに依存している。すなわち、 CaWO_4 増感紙の場合は、高エネルギー

Fig. 26 Trends of X-ray utilization due to changes in radiation quality

〔宿題報告〕 増感紙のX線エネルギー有効利用に関する研究 (四宮)

一になるに従ってX線利用率は低下傾向にあるが、 $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:Tb}$ 増感紙の場合は、エネルギーの変化にたいして殆どX線利用率が変わらない傾向を持っている。

4.2 増感紙のX線吸収と感度の関連

蛍光体のエネルギー吸収と発光に関し、古くから「入射したエネルギーの中で、吸収されたものだけが反応に関与する」と言う、光化学のグロトウス・ドレーパーの法則と、蛍光体の発光機構から考えると、15~100 keV 程度の入射X線エネルギー範囲では、そのエネルギーに関係なく、増感紙の吸収線量と感度の間に相関関係があるのではないかと考え、ここに実験的な検証を試みた。

実験としては、60~100 kV まで管電圧変化と、80 kV で銅を付加フィルタとして線質を変化させたときの、増感紙の吸収線量と感度の関係について求めたが、管電圧変化と、銅フィルタを付加して線質を変化させたときでは、明らかな違いが認められた (Fig. 27)。この結果、吸収と発光 (感度) の関係は、線質 (X線スペクトル) に依存していることとなる。また、 CaWO_4 増感紙と $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:Tb}$ 増感紙の違いは、同じ100 mg/cm² の蛍光体を使っているにもかかわらず、その時の使用フィルムの感度を除外して考えると、 CaWO_4 増感紙の方が効率が良いと言うこともできる。

Fig. 27 Amount of X-ray absorption and speed of intensifying screens

4.3 X線エネルギーの変化に伴う被曝と画質

写真濃度を一定 (増感紙感度を一定) としたとき、ファントムのX線吸収量を被写体の被曝線量とすると、銅フィルタの付加は被曝の低減に繋がるが (Fig. 28)、これを、管電圧、付加フィルタに関係なく、平均X線エネルギーとして捉えたと、線量の変化手法に関係なく、エネルギーが高くなるにつれて、被曝線量は低減できる (Fig. 29)。さらに、被曝低減に関するX線線質の変化は、低エネルギーでは CaWO_4 増感紙が有利であり、高エネルギー範囲では $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:Tb}$ 増感紙が有利と言うことができる。

X線スペクトルの変化を基盤とした、被曝低減策を評

Fig. 28 Dose reduction using additional filters

Fig. 29 Relationship between changes in radiation quality and dose

価するには、被曝の対比因子である画質についても検討する必要がある。すなわち、画質の物理評価項目としては、鮮鋭度、コントラスト、粒状性があり、さらにそれ等を含めた心理的画像評価法が広く用いられているが、増感紙のX線吸収に係わる、鮮鋭度、コントラスト、粒状性およびバーガーファントムによる識別について測定した。しかし、X線エネルギーの変化と粒状性、バーガーファントムの識別では、精度ある測定値が得られなかったもので、ここでは省略した。

管電圧変化と入力平均X線エネルギーが100 kVに近い、80 kV, Cu 0.1 mmの鮮鋭度を、各エネルギーにおける入力コントラストを加味したCTFで表すと、Fig. 30の如くなり、入力平均X線エネルギー値が100 kVに近い、80 kV, Cu 0.1 mmの鮮鋭度が、80 kVと100 kVの中間に位置していることが判る。これは、入力平均エネルギーが同じでも、増感紙の吸収エネルギーは80 kVと100 kVの中間〔例えば、入力平均エネルギー、40.38 keV—(46.81 keV)—47.10 keV に対して、CaWO₄ 増感紙の場合の吸収エネルギーは47.49 keV—(50.96 keV)—53.50 keV〕に位置していることから理解できる。

Fig. 30 Relationship between dose and image quality using an additional filter

4.4 X線エネルギーの有効利用を中心とした新しい増感紙構成

既に述べたように、一般に増感紙の効率は、X線吸収—発光—光回収率のトータル効率（感度）で評価されているが、X線スペクトル解析を基本とした考え方からすれば、被曝低減のための新しい増感紙構成も考えられる。

すなわち、増感紙のX線エネルギーの有効利用から見て、X線吸収率をどう増加させるか、そのためには増感紙を構成する蛍光体のK吸収端を如何に利用するかにより、むしろ、撮影電圧に合わせて使用蛍光体を選ぶ考え方も重要である。

この際、蛍光体の発光効率や、増感紙としての画質特性に影響をもたらす粉体特性については、ここでは評価しないことと仮定し、X線吸収のみに重点を置いて検討すると、Fig. 31のように、従来とかく高エネルギー側に吸収のあった、CaWO₄ 増感紙、Gd₂O₂S: Tb 増感紙に対して、例えば、K吸収端が37.40 keV, 27.92 keV, のBa, In, 等を含む蛍光体とGd₂O₂S: Tb 蛍光体 (50.22 keV)を混合使用した増感紙、あるいはフロント、バックに異種蛍光体を使った増感紙も、考え方からすれば、X線エネルギーの有効利用の面から、被曝低減の増感紙としても有望とも考えられる。

Fig. 31 New screen structure depending on effective X-ray utilization

5. む す び

本報告では、ファントム、造影剤、増感紙のX線吸収、透過を管電圧変化をおりまぜて検討し、X線管から放出される出力X線から各吸収体を透過した不要X線に至る顛末を、X線スペクトルの系統的に解析し、撮影系としての増感紙の重要性について報告した。

すなわち、著しく多様化して行く増感紙フィルムシステムにあって、X線写真の階調を決める因子として、増感紙に用いられる蛍光体のK吸収端は、造影剤のK吸収端との複合効果があるだけに重要であり、増感紙の適性も使用管電圧と撮影部位、使用造影剤を対象として選択する必要がある。

さらに、画質と同格に重要なX線被曝の低減手法として、増感紙のX線吸収が挙げられ、このX線吸収も単一値として取り扱うのではなく、X線スペクトル分布として解析することによって、管電圧、フィルタ技術の運用がより効果を挙げるものと理解される。

さらに、これらの考え方は増感紙関連に留まらず、X線を利用するあらゆる診断分野に共通する思想ではないかとも考える。

謝 辞

本報告の終わりに当り、伝統ある当技術学会宿題報告の機会を与えて戴いた小川学会長をはじめ、先輩ならびに学会役員諸氏に厚く御礼申し上げるとともに、個人的に感じますことは、宿題報告の機会を与えて頂いたばかりか、X線技術を育むメーカーの一技術屋であるにもかかわらず、一会員として全く分け隔てなき、お付合を頂いております事を心から感謝致しております。

本稿を纏めるに当り、その核となる増感紙に係わるX線スペクトルの実験に関し、名古屋大学医療短期大学部、前越助教授には、全面的なご指導、ご協力を賜り、さらに、忌憚のない技術的な討論の場において、熊本医療短期大学部の東田先生、山

口大の大塚先生、国立循環器病センターの若松先生、日本医大の川村先生を始め、まだまだ多くの学兄諸氏には、お礼を含め今後益々のご厚誼の程お願い申し上げます。

最後に、実務面で協力頂いた、弊社技術本部、三浦部長、鈴木副部長、青木、鈴木、梅本技術員諸氏に感謝致します。

文 献

- 1) R A Buchanan, et al.: X-ray Exposure Reduction Using Rare-Earth Oxysulfide Intensifying Screens. *Radiology*, **105**, 185-190, (1972).
- 2) 四宮恵次, 三浦典夫, 他: 希土類元素増感紙のX線写真システムについて. *日放技学誌*, **33**(5), 620-629, (1978).
- 3) 四宮恵次: 高感度増感紙システムの基本特性. *日放技学誌*, **36**(3), 355-367, (1980).
- 4) Kunihide Nishizawa, Hisashi Maekoshi, et al.: Alignment of X-ray tube focus spots for spectral measurement. *Med, Phys*, **9**(2), 284-287, (1982).
- 5) 高村吉彦, 他: 富士メディカルフォーラム, 149, (1985).
- 6) 三浦典夫, 清水悦雄, 他: 極光 X-Ray 第24号, (1985).
- 7) 四宮恵次: X線フィルムと増感紙について, *日医放物理部会誌*, Supplement No. 23, 19-47, (1986).
- 8) 鈴木尚生, 清水悦雄, 他: 極光 X-Ray 第25号, (1986).
- 9) 小寺吉衛, 土井邦雄, 陳 衛萍: シカゴ大学における医用画像研究について, *日放技学誌*, **41**(3), 516-531, (1985).
- 10) 山本 登, 下司博之, 他: 血管造影に使用する増感紙・フィルムの組合せとコントラスト, *日放技学誌*, **42**(7), 962-972, (1986).
- 11) 津坂昌利, 前腰 久, 他: 診断用X線管の出力変動の解析, *日放技学誌*, **43**(4), 514, (1987).