〔第7回放射線技術シンポジウム勉強会〕

高感度増感紙システムの基本特性

化成オプトニクス株式会社

四 宮 恵 次

FUNDAMENTAL PROPERTIES OF HIGH SPEED
SCREEN-FILM COMBINATIONS

By KEIJI SHIMIYA

Kasei Optonix, Ltd.

1. はじめに

医療被曝低減の最大の手段である高感度増感紙システムが、第7回シンポジウムのテーマに選択されたが、高感度増感紙システムが関係者から注目されだしたのは1972年 R. A. Buchanan 等が希土類蛍光体を増感紙に応用した論文発表を行ったことに端を発している¹⁾。しかしそれ以前にも超高感度増感紙として、ZnS: Ag 蛍光体(1933年)を用いた Super Speed 増感紙(1953年)が開発され、小児股関節や胎児の撮影に使用され、生殖腺被曝を主眼とした撮影が行われていたが、それはあくまで特殊撮影の領域に留まっていた。

1975年 Grenex System の商品化と期を同じくして感光材料を含めた希土類増感紙システムが世界各社より続続発表され、被曝低減の最大の手法として関係機関において活発な討議が繰返されて来た。当学会でも例えば1976年総会の関連演題が20数題にも及んでいることはX線撮影技術史上特筆すべき事柄であろう。

希土類増感紙システム発表当時は、その高感度を生かす撮影法、CaWO₄系増感紙では見られなかったX線量子のユラギによるモトルを中心としたX線写真の粒状、粒状を中心とした鮮鋭度、コントラストに関連する新しい画像評価法への展開等が重要課題として取り上げられて来たが、これらは今日でも尚、引続き研究、討議が継続している。従って高感度システムの代名詞ですらあった希土類増感紙システムも、4年間に及ぶ実用経験と技

術改良、技術蓄積により広く高感度増感紙システムの一環として画像評価を含めた検討が重要となって来た。

今回の勉強会には高感度増感紙システムの基本特性として、その原点であるX線用蛍光材料の基本特性に関連するX線吸収とシステム性能、即ち管電圧の変化に対応した感度特性、希土類増感紙システムのコントラストは高いのか、低いのか等に焦点を当て、問題点を整理し、併せて高感度増感紙システムの今後の動向について概説する。

2. 高感度増感紙システムの現況

高感度増感紙システムと言えども、従来の増感紙システムと同様に、増感紙が被写体を透過したX線エネルギーを吸収して光エネルギーに変換し、その光エネルギーをもってX線フィルムを露光することから、一種のエネルギー変換システムであり、高感度である特長はX線エネルギーの吸収及びエネルギー変換効率に特長があると言っても過言ではない²⁾。

2.1 世界各社の現況

高感度増感紙システムの流れを見ると、その1つは希土類増感紙システムの1975年以降4年間の変化であり、その1つはX線の発見以来80年の歴史を持つCaWO₄系増感紙システムの高感度化(感度250以上、対FS)への拡大であろう。ここではCaWO₄系は後述することとして主要希土類増感紙システムの変遷について見ると表1の如くなる。

〔第7回放射線技術シンポジウム勉強会〕 高感度増感紙システムの基本特性 (四宮)

表1 主要希土類増感紙システム

	Maker	System	Screen		Film	
			Phosphor	Type	Regular	Ortho
U. S. A.	Kodak	LANEX	GOS+LOS	Regular, <u>Fine.</u>	—	G·H
	3 M	TRIMAX	GOS+LOS	ALPHA 4, 8.	—	XD, XM.
	(U. S. Radium)	RAREX	GOS+YOS	BGD, BGM, BGH.	—	○
	GAF		YOS	BM	○	—
	Du Pont	CRONEX	BaFCI:Eu	Quanta II	Cronex 7	—
			LaOBr:Tb	Quanta III		—
	GE	BLUE MAX	LaOBr:Tb	BLUE MAX 1, 2.	○	—
W. GERMANY	CAWO	SE	LaOBr:Tb	SE-2, 4, 6.	○	—
	KRUPPA	TR	LaOBr:Tb	TR-2, 4, 6.	○	—
	Siemens	TITAN	LaOBr:Tb		○	—
BELGIUM	Agfa	MR	LaOBr:Tb	MR-50, 200, 400, 600	CURIX RP	—
HOLLAND	Philips		BaFCI:Eu		○	—
ENGLAND	ILFORD	RAPID	LaOBr:Tb (Tm)	RAPID E	○	—
JAPAN	Fuji-KOX	GRENEX	GOS	(G-4) G-8, <u>New Type G-4</u>	—	RXO
	Toshiba	L-Series	(G, Y) OS	LD, LM, LU.	○	—
	Sakura	Hi-Ortho	GOS	(GTS, GTH) <u>KS, KH</u>	—	(QSO) <u>AO</u>

— 追加商品, () 旧名称, 旧タイプ

4年間の一般的な傾向と言え、螢光体として Green 系螢光体では粒状性その他の基本的性能から $\text{La}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ が衰退し、 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ 中心となって来たこと。Blue 系螢光体の中心であった LaOBr:Tb がハロゲン化物特有の耐湿性が悪い点を改良すべく、螢光体並びにスクリーン化技術に様々な工夫がなされつつある。

システムとしては一般的に個々の性能アップと品種拡大による組合せが中心であり、増感紙の粒状レベル改良 (Fuji-KOX), 高鮮鋭度増感紙と高感度フィルムの追加 (Kodak), 高感度増感紙の追加 (Du Pont), 増感紙全般高感度化とフィルム全般低感度微粒子化 (Sakura) 等が最近の変化として注目されている。

2.2 希土類高感度システムの一般的利用法

世界各社の動向は、希土類増感紙システムの欠点を夫夫に補う方法を端的に表している。表2の分類は基本的な考えとして現在でも何等変更する必要はない。性能中心の分類に於いて、鮮鋭度重点指向は従来からの基本的基盤の上にたったものであり、胸部及び消化器等の造影撮影等にはやはり鮮鋭度は重要であり、高鮮鋭度を保持した上での粒状改良が望まれている。一方粒状性中心指

表2 希土類高感度システムの分類

	増 感 紙	フ ィ ル ム
組成中心	BLUE 発光 $\{\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ LaOBr:Tb BaFCI:Eu^{+2}	REGULAR 乳剤
	GREEN 発光 $\{\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ $\text{La}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$	ORTHO 乳剤
性能中心	(鮮鋭度重点) 高 鮮 鋭 度	高 感 度
	(粒状性重点) 高 感 度	低感度微粒子

向は ROC 画像評価で話題の如く高感度領域の各種モトルの影響バランスを考え、例えば胆石等の微弱信号描出のためにはノイズを下げるために、高感度増感紙を用いて鮮鋭度は下るが螢光体単位吸収当りの効率を下げて量子モトルを低下させ低感度微粒子フィルムとの組合せで粒状レベルを保持している。

CaWO_4 系を含めて高感度領域即ち X 線エネルギー利用率の高い領域では総べてが万能ではない。診断と被曝最低の原点に立って最適のシステム特性を選択すること

表3 X線用蛍光体の諸特性

蛍光体	X線吸収		発光効率 (%)	発光スペクトル		粉体特性	
	原子番号	K吸収端 (keV)		発光色	主波長 (nm)	比重	結晶形
ZnCdS:Ag	30/48	9.66/26.70	19	Green	530	4.8	hex,
ZnS:Ag	30	9.66	17	Blue	450	3.9	hex,
CsI:Na	55/53	35.95/33.16	10*	Blue	420	4.5	cub,
CsI:Tl	55/53	35.95/33.16	10	Green	540	4.5	cub,
CaWO ₄	74	69.48	6.5-8	Blue	420	6.1	tetra,
BaSO ₄ :Eu ⁺²	56	37.38	6*	Violet	375	4.5	rhombic
Gd ₂ O ₂ S:Tb	64	50.22	13	Green	545	7.3	hex,
La ₂ O ₂ S:Tb	57	38.92	12.5	Green	545	6.5	hex,
Y ₂ O ₂ S:Tb	39	17.03	18*	White	380, 415, 440, 545	4.9	hex,
LaOBr:Tb	57	38.92	20*	White	380, 415, 440, 545	6.3	tetra,
LaOBr:Tm	57	38.92	13	Blue	460	6.3	tetra,
BaFCl:Eu ⁺²	56	37.38	13*	Violet	380	4.7	tetra,
BaFBr:Eu ⁺²	56	37.38	16*	Violet	390	5.0	tetra,
HfP ₂ O ₇	72	65.29	11	U. Violet	300	4.3	cub,

* Cathode-ray

は必須の事柄であり、そのためにも蛍光材料のX線吸収に関する諸特性は重要である。

3. 各種蛍光材料の基本特性

3.1 X線用蛍光体の基本条件と諸特性

無機蛍光体の工学的応用の中でX線用蛍光体ほど、その歴史及び基本的な条件で明確なものは少ない。X線用蛍光体の基本条件としては次のものがある。

発光特性 X線吸収係数

発光スペクトル

発光効率

残光

粉体特性 粒子形状

粒子径

粒度分布

分散性

耐久性 X線、光

温度、湿度

図1 主要X線用蛍光体の発光スペクトル

X線用蛍光体の歴史をふり返って見ると、BaPt(CN)₄・4H₂O (1895年、効率低く不安定)、Zn₂SiO₄:Mn (1919

年、効率低く吸収低い)、ZnS:Ag (1933年、効率高く吸収低い)、BaSO₄:Pb (1940年、効率低く吸収高い) が挙

図2 主要X線用蛍光体のX線吸収

げられるが、これらの中で現在でも中心的に利用されている CaWO_4 (1897年) はX線吸収も高く、発光効率も適度にあること及び蛍光体結晶形が極めて優れていることが最も長く使用されている理由であろう。

表3は現在何等かの形で利用されているX線用蛍光体の諸特性である³⁾。この中で $\text{CsI}:\text{Na}$ 、 $\text{CsI}:\text{Tl}$ はI.I. 用一次蛍光面に用いられる蛍光体であり、 HfP_2O_7 は研究中の蛍光体である。X線用蛍光体として重要なX線吸収に関して、原子番号が高いことは勿論のこと、K吸収端が何れにあるかによって、増感紙の管電圧-感度特性並びに増感紙コントラストに大きく影響を及ぼしてくる。発光効率に関してはやはり高いことは必要であるが、この効率はX線吸収にからむX線利用率と関連して現在論議の中心となっている写真粒状性にも関与する。更に今迄余り関心を払われなかったのが粉体特性である。蛍光体の比重は増感紙の特性として重要な鮮鋭度に関係し薄

い蛍光体層を作るために極めて重要な因子であり、その結晶形も鮮鋭度、増感紙構造モトルに關係する写真粒状性を左右する因子として重視されている。

3.2 主要蛍光体の発光スペクトルとX線吸収

希土類増感紙システムが発表された1972年当時の最も大きな変革は、被曝低減のためならば従来のBlue発光増感紙とRegularフィルムの組合せを打破して、Green発光とQrthoフィルムの組合せを採用したことであろう。勿論これにはX線撮影の自動化、省力化のための明室システムの発展も見逃すことは出来ない。その意味で増感紙の発光スペクトルとフィルムの分光感度の組合せ制限は一つの壁を破られたことは事実である。しかしX線エネルギーを最大に利用するためには蛍光体の発光を100%利用する分光感度をもったX線フィルムが必要であることは当然である。図1は主要X線用蛍光体の発光スペクトルとX線フィルムの分光感度の概要を示す。

蛍光体を構成する物質の原子番号と共に重要なものは、X線吸収に対して主要原子のK吸収端が如何なるエネルギー域に存在するかである。すでに表3にそのエネルギーを記載したが、X線エネルギーに対する吸収係数は図2の如くなる。

3.3 主要蛍光体の粉体特性その他の性質

X線用蛍光体の諸特性でも述べたが、蛍光体の粉体特性、特に結晶の形は増感紙の鮮鋭度、粒状性に大きく影響を及ぼす。蛍光体の基本結晶形は表3の通りであるが、増感紙蛍光体層の空隙率を小さくするためには球形が最良であり、 CaWO_4 蛍光体が伝統的に評価されて来たのはこの意味が極めて大きい。結晶形に関して言えば、 CaWO_4 系に近いのが $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ であり、La系、Y系の順に悪くなる。LaOBr:Tb及びBaFCl:Eu等のBlue系蛍光体は結晶成長の過程において、板状結晶に成長し易く、増感紙化した場合、蛍光面に対して平行に羅列されることが多く、粒状性に関し問題も多い。この傾向はBaFClよりもLaOBrが強く、又これらの板状結晶を球状結晶にする研究も行われている⁴⁾。

ハロゲン化物、特にLaOBr蛍光体は吸湿性があり、湿度が特に高くなる我が国に於いては、耐久性の点で問題がある。この蛍光体が比較的多く使用されている欧州を中心として、その対策が活発である。例えば蛍光体に0.5~4.0%のMg, Znの硫酸塩を添加したり⁵⁾、スクリーン化技術の中にハロゲン安定剤として有機金属を添加したり⁶⁾、高度の架橋樹脂を用いて湿度の影響を防御する手法⁷⁾が採用されているが、基本的には安定な蛍光体であることが重要である

う。

4. 蛍光材料の異なる増感紙の基本特性

一般に増感紙の発光効率 η は次式で与えられる。

$$\eta = \eta_a \cdot \eta_c \cdot \eta_t$$

η_a : X線吸収率

η_c : X線—光変換効率

図3 主要蛍光体を用いた増感紙のX線吸収

ηt : 増感紙中の光伝達係数

ηa は使用する蛍光体と増感紙の厚さで, ηc は蛍光体及びその製造技術で決まるが, ηt は蛍光体の粒子径, 分布等の粉体特性のほか, 増感紙を構成する結合剤及びスクリーン化技術が大きく影響する. 更にシステムとしての感度 S を考えると,

$$S = \eta \cdot F$$

となり, 増感紙の発光スペクトル ($E\lambda$) とフィルムの分光感度 ($F\lambda$) を考慮したものとなる ($F = \int E\lambda F\lambda d\lambda$).

これらの中からX線の線質によって相互に変化する因子即ち管電圧の変化に伴うX線吸収因子を中心に考察して見よう.

4.1 X線吸収

R. A. Buchanan は希土類増感紙システムの特性を説明するため, 60, 90, 110 kVp の入力X線スペクトルに対する CaWO_4 , $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$, $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$, $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}$ 増感紙の吸収スペクトルを発表している (図3)⁸⁾. 図2に関連してX線管から放出される白色X線に対して, $W = 69.48 \text{ keV}$, $Gd = 50.22$, $La = 38.92$, 等に吸収端が効いていることは明らかである. この意味において如何なる蛍光体が増感紙に使用されているかによって, 増感紙に吸収されないX線エネルギーは無用のエネルギーであるとも言えるが造影剤の吸収を考慮した被写体の吸収をも含めて, 被曝低減のための新しい展開が期待出来る.

理論的な吸収分布とは別に現実に使用されているX線装置を用い, 連続X線による吸収について, 主要X線用蛍光体9種類を選びX線吸収を測定してみた. 図4はそ

の中より更に夫々に特長のある蛍光体の増感紙の厚みに対するX線減弱の変化を管電圧をパラメータとして求めたものである. 条件としてはファントム無しであり, ZnS:Ag が吸収が小さいこと, $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ が管電圧の変化に対して吸収が余り変わらないこと等に特長がある.

80 kVp における各種 蛍光体のX線 減弱をファントム無しと, ファントム水 10 cm について集約すると図5の如くなる. X線吸収の低いものの代表的なものは ZnS:Ag であり逆に高いものは La , Ba 系に多い. Gd 系は CaWO_4 よりX線吸収は高いが, ファントムの有無に対しては比較的近似した性質を示している. 一方ファントムの有無によって大きく変化するものとしては, ZnS:Ag , $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$, ZnCdS:Ag があり, 何れも蛍光体構成原子番号及びK吸収端が低エネルギーにあることに特長がある. 一般に希土類蛍光体はX線吸収が高いとの誤った解釈も一部にはあったが, 希土類と言う一般論でなく, その構成物質独自のX線吸収として理解すべきである.

4.2 管電圧—感度特性

吸収したX線エネルギーを光エネルギーに変換する効率, 製造された蛍光体に固有である. 管電圧, 被写体即ち線質に変化がなければ増感紙—X線フィルムの特性曲線は, 原則として同一となる.

フィルムの分光感度と増感紙の発光スペクトルの組合せによる写真コントラストの微細な変化と増感紙のフロント, バック両面からの発光量比が両面乳剤の黒化度差となり, 何れも写真コントラストの変化となって現れることは明らかであるが, 測定精度とクロスオーバー効果

図4 主要蛍光体のX線減弱 (I)

図5 主要蛍光体のX線減弱(II)

の関係から、蛍光体、増感紙間で特性曲線の形に大きな差が現われず、9種類の蛍光体を用いた増感紙について、

図6 各種増感紙の特性曲線

RX, RXO フィルムの 80 kVp の特性曲線は図6の如くなる。

60~120 kVp の管電圧変化に対応して、各増感紙の感度を同一濃度を得るに要する mAs 値から求めると、図7の如くなる。

Blue 発光蛍光体には Regular 乳剤の RX フィルム、Green 発光蛍光体には Ortho 乳剤の RXO フィルムを用いたものを抜粋し、現在X線撮影の中心として用いられる CaWO₄ 増感紙に対する各管電圧に於ける相対感度を求めると図8の如くなる。

この測定に用いた9種類の蛍光体よりなる増感紙の厚みは 100 mg/cm² のもので、一般的に言えば中感度領域に属する構成の増感紙である。BaSO₄:Pb を除き発光効率が低い7種類の増感紙は 80 kVp 以下では、何れも CaWO₄ 増感紙より2倍以上の高感度を示している。

管電圧の上昇に伴う CaWO₄ 増感紙に対する変化率を見ると、明らかに各蛍光体のK吸収端がどのエネルギー領域にあるかによって異なり、ZnS:Ag, (Zn Cd) S:Ag は高圧領域に於いて急激に感度が低下する。これは明らかにX線吸収率の低下によるものである。

管電圧一感度特性を更に明確にするため図8から、60 kVp に対する感度の変化を整理して相対比較すると、図9の如くなり、CaWO₄ より管電圧の上昇に伴って、高感度となるのは BaSO₄:Pb (PbSO₄10%含有)のみで、こ

〔第7回放射線技術シンポジウム勉強会〕 高感度増感紙システムの基本特性 (四宮)

図7 各種増感紙の管電圧—感度特性(I)

図8 各種増感紙の管電圧—感度特性(II)

図9 各種増感紙の管電圧—感度特性(III)

図10 各種増感紙の管電圧-コントラスト特性(I)

図11 各種増感紙の管電圧-コントラスト特性(II)

図12 各種増感紙の管電圧-コントラスト特性(III)

〔第7回放射線技術シンポジウム勉強会〕 高感度増感紙システムの基本特性 (四宮)

これは感度に関しては低感度に属する蛍光体であるので除外して考えると、 $Gd_2O_3:S:Tb$ 、 $La_2O_3:S:Tb$ 2種の蛍光体のみが、 $CaWO_4$ と類似の管電圧—感度特性を持つのみであって、その他の蛍光体は何れも $CaWO_4$ 蛍光体に及ばない。従って希土類増感紙は高圧特性が良いと言う一般的な評価に対し、同一増感紙構成で比較するとそれ程、顕著な高圧感度特性をもつものではなく、 $Gd_2O_3:S:Tb$ のみが $CaWO_4$ より微かに良いか又は同等の性能をもっているに過ぎない。

4.2 管電圧—コントラスト特性

吸収されたX線エネルギーが光エネルギーに変換される効率、即ち発光効率は管電圧に影響されない。従って管電圧—コントラスト特性は各管電圧によって異なる蛍光体のX線吸収に支配される。

伝統的に $CaWO_4$ 蛍光体が増感紙の主流を占めていた頃は、“増感紙によってコントラストは殆んど左右されない。”との定説があり、フロント、バック増感紙相互のX線吸収とフィルムに対する光利用率の関係で微かのコントラストの変化は論じてはいたが、管電圧変化に伴う被写体コントラスト（線コントラスト）と写真コントラスト（フィルム γ ）が最重要と考えられていた。

希土類蛍光体を中心とした最近の高感度増感紙システムの特性を正しく把握するための第1の要因はX線の線質変化に伴う吸収とその増感紙の発光比率（濃度差）即ちコントラストであろう。

感度と同様9種類の蛍光体による増感紙について管電圧を変化した時のX線吸収率が被写体無しと被写体として水ファントム 10 cm について求め（図10）、被写体無し、有のX線吸収量の比をX線々質に伴うコントラストと仮定すると図11の如き変化を示す。

図11は吸収線量を用いて管電圧の変化によるコントラストを推定したもので、被写体として低原子番号の水を用いているので、脂肪に近い部位のコントラストと言えるであろう。逆に高原子番号の被写体として0.03 mmの

鉛箔を用い、その有無のコントラストを写真法によって測定した（図12）。

この2つの管電圧—コントラスト特性に於いて、相互変化に大きな差異は無いが、管電圧の上昇に伴い、相対的にコントラストが著しく変化するのは $CaWO_4$ 、及び、 $Gd_2O_3:S:Tb$ 蛍光体を用いた増感紙であり、X線吸収が小さく、K吸収端が 20 keV 以下の $ZnS:Ag$ 、 $Y_2O_3:S:Tb$ 蛍光体を用いた増感紙は高電圧においてもコントラストは高い。

4.3 コントラストと識別度

入力に対する出力の応答特性として広く用いられている MTF は鮮鋭度の代表的評価法であるが、増感紙の蛍光体が異なる場合、その MTF 特性が全く同一でも、蛍光体の吸収比率、即ち入力コントラストが違った時は像識別は当然の如く変ってくる。

ここに感度を除外し、 $CaWO_4$ 、 $Y_2O_3:S:Tb$ 、 $Gd_2O_3:S:Tb$ の3種類の蛍光体よりなる増感紙について、その粉体特性、スクリーン構造を全く同一と仮定すると、3種の増感紙の MTF は蛍光体の比重（6.1, 4.9, 7.3）分に応じた蛍光体層の不鋭が加味され、図13の如くなる。しかしこの時の3種増感紙の 80 kVp のコントラストは図12から0.51, 0.47, 0.43となり、このコントラスト相対値から $Y_2O_3:S:Tb$ 、 $Gd_2O_3:S:Tb$ の入力コントラストを補正したモデルを想定すると、図中の CTF の如く表現することが可能である。

5. 高感度増感紙システムの動向

5.1 高感度増感紙の基本性能

希土類蛍光体を中心とした高効率蛍光体の出現によって、高感度増感紙の基本性能に大きな変化をもたらせている。即ち単純に増感紙の性能として考えるのではなく、蛍光体の性能とスクリーン構成に分離して考えることが望ましい。表4は高感度増感紙の基本性能を定性的にまとめたもので、◎印が強く影響するもの、○印は一般的に影響するもの、—印は殆んど影響すると思われないも

図13 コントラストと識別度

表4 高感度増感紙の基本性能

	蛍 光 体	スクリーン構成
感 度	◎	○
鮮 鋭 度	◎	◎
コントラスト	◎	—
粒 状 性	◎	○
散乱線除去	◎	—
耐 久 性	◎	○

図14 X線写真の画質—特性要因図

のであり、あくまで高感度と言う範囲のみにについて考えたい。

感度については蛍光体のX線吸収と発光効率が重要であり、台紙の反射、蛍光体粒子の配列等スクリーン構成でも変化するが主体は蛍光体であろう。鮮鋭度は蛍光体の効率が上げれば、薄い蛍光膜を作ることが出来るのは当然であり、蛍光体の粉体特性(結晶の形)とスクリーン化技術によって蛍光体層内での発光の拡散を如何に押えるかが重要である。コントラストについては、線質に伴うX線吸収比をそのまま重視したい。粒状性については増感紙の構造モトルと言われるスクリーン構成も大事であるが、それ以上に単位エネルギー吸収当りの発光に基く量子ノイズに重点を置きたい。更に散乱線除去、耐久性に関して、前者はX線吸収に関係し、後者はスクリーン構成によって多少の変動はあるものの、吸湿性を有するLaOBr系の蛍光体を主体に置いたものである。

次にX線写真の画質に及ぼす因子の中で増感紙の影響力について考えて見た。図14はX線写真の画質に及ぼす特性要因図である。従来のCaWO₄増感紙中心に考えると、鮮鋭度は増感紙、粒状性はX線フィルムが支配的であるが、高感度領域においては蛍光体のX線利用率が大きくなったこと、発光効率の高いことにより、コントラスト、散乱線及び粒状性(X線量子のユラギ)にも影響力を及ぼすようになって来た。

5.2 高感度領域における鮮鋭度

希土類蛍光体の特長は再参述

べて来たようにX線吸収の大きいことと発光効率の高いことであるが、鮮鋭度に関してはGd₂O₂S:Tbのように蛍光体の比重が大きいため、単位重量当りの蛍光体層を薄くすることが可能となり、より鮮鋭度向上につながっているものもある。図15はCaWO₄及びGd₂O₂S:Tb蛍光体について、同一スクリーン構成(A:A'),(E:E')の感度と鮮鋭度の関係を示した

もので、明らかにCaWO₄系よりGd₂O₂S:Tbはトータル効率が低い分だけ高感度側に平行移動することが判る。

同一種類の蛍光体によってもスクリーンの内部構造によって鮮鋭度を低下することなく感度を上昇させること

図15 蛍光体の発光効率とMTF

図16 増感紙構造とLSF

が最近の技術によって可能となった。

従来の CaWO_4 の蛍光体を用いた増感紙では鮮鋭度を別としても最高感度は300 (対 FS) 位が限度と言われて来たが、最近では HS 級の鮮鋭度を保持して感度を上げる技術として多重層構造スクリーンがある⁹⁾。

図16は一般的スクリーンの均一分散構造(A)と多重層構造(B)の断面モデル及びその線像強度分布をモデル化したものである¹⁰⁾。増感紙支持層の反射、吸収及び蛍光

図17 多重層構造による性能向上

$$G_x(u) \doteq k \gamma^2 \{ MTF_s(u)^2 \cdot [G_x(u) + G_s(u)] + G_F(u) \}$$

図18 X線写真の粒状モデル

体粒子の大小によって変化する感度、鮮鋭度に関して、均一分散構造から多重層構造にすることによって感度は大粒子蛍光体、反射構造に近い動向を示し、鮮鋭度は小粒子から大粒子に至る広い範囲の吸収構造に近い動向を示してくれる。感度、鮮鋭度の相関図において明らかな如く、その感度域に必要な蛍光体粒径を選択することにより HS 鮮鋭度で350或いはそれ以上の高感度 CaWO_4 増感紙も期待出来る (図17)。

5.3 高感度領域における粒状性

高感度領域と鮮鋭度の項で述べた如く、希土類を中心とした高感度システムは何れも蛍光体の吸収効率、発光効率を上昇させているので蛍光体の結晶形が CaWO_4 より劣る点と比重を加味すれば、鮮鋭度を悪化させる因子は少ない。換言すれば蛍光体層を厚くすることなく、鮮鋭度を悪くしないで感度を上げ得るところに特長がある。高感度化によってX線量子のユラギによる粒状パターンが発生することは明かであるが、図18のX線写真の粒状モデルの如く、増感紙に対応してX線量子のユラギによる粒状パターンは写真上に忠実に現出される。 CaWO_4

図19 蛍光体の発光効率と粒状性

図20 G-4増感紙の粒状性改良

系中心の粒状については、増感紙の影響力は極めて低く CaWO_4 系高感度増感紙で粒状が問題にならなかったのは、感度と鮮鋭度の逆相関の事実と、高感度化のために蛍光体塗布量を増大させているため、単位蛍光体当りのX線利用率は殆んど変わっていないことによる。図15の鮮鋭度測定に使用した増感紙で粒状性の測定を行うと図19の如くなり、鮮鋭度の同一なA、A'において単位蛍光体当りの効率が高い $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ の方が明らかに粒状性は低下してくる。

単位X線エネルギー当りの利用効率が高く増感紙の鮮鋭度が優れている場合、X線写真の画質向上のためには本質的なマイナス因子を高感度増感紙システムは負うことになるが、この粒状改良のための研究開発は極めて活発である。その1つは表2の分類にある如く鮮鋭度を犠牲にしても高感度増感紙と微粒子低感度フィルムの組合せである。撮影部位、診断目的のための暫定的手法としては容認されても、本来の希土類蛍光体の特長である、鮮鋭度を落さずに感度を上げるシステムの総合画質向上の基本的解決とはならないものと思われる。感度、鮮鋭

度を低下することなく粒状性を明らかに改良したのが図20のGrenex G-4である。微粒子蛍光体と保護膜に特殊設計したフィルターを用いたスクリーン構造の採用によって粒状性を改良しているが、基本的には増感紙内での単位吸収エネルギーの発光バランスをとってX線量子モトルを含めた粒状改良を行っている所に意義がある¹¹⁾。

6. む す び

高感度増感紙システムの基本特性について述べて来た。希土類高感度システム発表より4年間の累積技術を基として考えた時、一般的に希土類或いは高感度システムの特性を安易に評価されることの危険性を痛感した。

ここに多品種の蛍光体に対してのX線特性を同一条件のもとで増感紙化し比較した結果、従来の CaWO_4 系増感紙のみでは考えられない管電圧—感度特性をはじめ、X線写真として基本的にも重要であるにも拘らず比較的軽視されがちなコントラストに蛍光体の基本性質が関与していることは明らかである。

X線写真の画質向上と被曝軽減のためには増感紙に吸収されないX線エネルギーは無用であることから考察すると、増感紙を構成する蛍光体の性質とX線管から放出されるX線の性質を知ることが大きな意義をもつこととなる。高感度増感紙も技術の発展、進歩に伴い、実際の商品は複合蛍光体、多重層構造等ますます複雑多岐に変化して行くことが予想されるが、その基本はX線エネルギーの利用と言う点に関して明確である。ここに述べた定性的な諸データがX線画質の向上と被曝軽減の一助となれば幸である。

文 献

- 1) R. A. Buchanan: IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-19, 81 (1972).
- 2) 四宮恵次, 他: 日放技学誌. 33(5), 620-629(1978).
- 3) 森 悦雄: 第168回蛍光体同学会. 発表予稿 (1977).
- 4) E. Mori, et al.: U. S. Patent-4138592 (1979).
- 5) ヤコブ・ジョウジ・ラバチン: 特許公報: 特開昭53-75185.
- 6) アンドレ・ロジェ・スユイ, 他: 特許公報, 特開昭52-114483.
- 7) ヴィリ・カレル・ランドガン, 他: 特許公報. 特開昭52-138691.
- 8) A. F. Sklensky et al.: IEEE Trans on Nucl. Sci. NS-21, 685 (1974).
- 9) 四宮恵次, 他: 特許公報. 特開昭51-79593.
- 10) 三浦典夫, 他: 第33回日放技学会抄録 222 (1978).
- 11) 鈴木優二郎, 他: 特許公報. 特開昭54-107692.