〔第7回放射線技術シンポジウム勉強会〕

II. 高感度増感紙システムの特性

(一般増感紙との比較)

新小倉病院 放射線室

柴 田 清 秀

THE PROPERTIES OF HIGH SPEED SCREEN SYSTEM
(COMPARISON OF POPULER SCREEN)

By KIYOHIDE SHIBATA

Department of Radiology, Shinkokura
Hospital

1. はじめに

1910年ごろからX線撮影用増感紙の主流をしめてきたCaw O₄ 増感紙は、製造・使用両面からの研究が進み、近年はもう研究の余地はなくなったとさえいわれるまでに至っている。一方医療の高度化等に伴う医療被曝の増大の傾向に対して、1969年ICRP 16の勧告以来、診断による患者被曝の低減がとくに強く叫ばれるようになり、感光材料の面ではX線フィルムの高感度化も極めて困難な理由から、増感紙の高感度化が特に要求されるようになった。

この高感度化の要求に対しては、画質を考慮すると、CaWO₄ に変わる新しい蛍光体の開発以外に手段がないことから、希土類蛍光体の開発が始まり、カラーブラウン管での研究成果が医療分野へ導入され、1972年ごろ希土類蛍光体増感紙の登場となったのである。それ以来各社で研究開発が進み、X線フィルムの組み合わせを含めて数多くのシステムが登場してきた。

そして現在、増感紙の種類は非常に豊富となり、バラエティに富んでおり、加えてX線フィルムも各社少なくとも5～6種以上製造されるようになっており、これらを組み合わせると、実に数多くの受光系のシステムが考えられるわけで (Fig. 1 に示した中だけでの高感度系の組み合わせだけでも、国内製品で75通りとなり、外国製

品を含めると1000通り以上となる)、現実にはどのシステムを選択すべきか、使用者は迷うほどになっている。

Fig. 1 に世界の主要医療用増感紙の一覧表を示す。以下高感度増感紙システムの問題点を一般増感紙と比較しながら、話を進めたい。

さて、高感度とは何をさしているのか？ というテーマがある。低感度・高感度とは、まさに比較の問題ではあるが、一般に高鮮鋭度増感紙・中感度フィルムを使用したシステムを標準とみなすことが多いので、このシステム感度を100とした時、相対感度200までを中感度、250程度以上のものを高感度と呼ぶことにしたい。従って高感度システムの中に、CaWO₄ 系も含まれることになるが、CaWO₄ 系と希土類系の両者を比較しながら、話を進めることにする。

2. 増感紙の構成と輝度
及び鮮鋭度の関係

高感度システムの問題を論ずる前に、受光系としてのX線フィルムと増感紙のメカニズムについて少し考えてみたい。

2.1 X線フィルムの感光過程

X線フィルムの感光過程は一般感材の感光過程と比較して、複雑な要素が多い。

Fig. 2 に増感紙とX線フィルムの断面を示す。増感紙

国名	メーカー	タイプ		一般用				高感度タイプ						希土類タイプ				併用フィルム	
		感度	システム	鮮鋭度タイプ	50	100	160	200	250	300	400	600	250	400	800	1,600	レギエ	エオルソ	
日本	極光	Lシリーズ	BS	FS LF-II		MS LT-II		HS LH-II				SS					○		
	東芝	Dシリーズ Eシリーズ Lシリーズ		DD				DMI	DS ES	DU				LD	LM	LU	○	○	
	富士写真	レギュラー GREENEX					Hi-Screen							G-4	G-8		○	○	
	小西六	HI-ORTHO New-HI-OR												KS	GTS KH	GTH		○	
米国	Du PONT	CRONEX 7 CRONEX 4	Detail	Par- speed			H-Plus		Light, Plus	HI-Plus	Light, Plus		Quanta II	Quanta III			○		
	U.S. RADIUM	RAREX		UD		T-2	TA-3	TF-2	TF-3	SF-3			BG-D	BG-M	BG-H		○	○	
	E. KODAK	REGULAR LANEX		Fine			Reg.					Fine (H)	Reg. (G)	Reg. (H)			○	○	
	3-M	Trimax												Alpha-4	Alpha-8			○	
西独	SIEMENS			Rubin		Saphir		Dia.	Spe.					TITAN			○		
	CAWO	S. E.	Fine	Opti.			Universal	Rapid					SE-2	SE-4	SE-6		○	○	
独	KRUPPA WOLF			Fine			Universal Rabid	Exp. Ultra	Gen								○	○	
英国	ILFORD			High		Stan.			Fast								○		
ベルギー	A/GEVAERT	M. R.				Universal							MR-200	MR-400	MR-600		○	○	

Fig. 1. 世界の上製医療用増感紙

〔第7回放射線技術シンポジウム勉強会〕 II. 高感度増感紙システムの特性 (柴田)

Fig. 2. 増感紙・X線フィルムの断面図

は LH-II での実測値、X線フィルムは、さくらタイプ A での実測値である。

X線画像は、このような幾何学的構成の中で、光エネルギー（及びわずかのX線エネルギー）を受けたフィルム乳剤層のハロゲン化銀が、現像処理を経て黒化銀粒子と化したその粒子の集まりをみているわけであり、X線画像が一般写真に比較して極めて鮮鋭度の悪い写真システムであることの理由は、このように四重の受光による集合像であることによる。

X線フィルムの厚み測定値例を Fig. 3 に示す。平均値 190.3 μm 、測定後乳剤面をとかし去って、ベース厚を測定すると、ベース厚の平均値は 173.0 μm であった。この数値を Fig. 2 にも示している。

X線フィルムは感度をあげるために両面乳剤であるので、とくにベースの厚みが画質に大きな影響をもつことになる。さきにも触れたように、我々が観察するX線画像は、ベースの両面の乳剤層にほぼ近似して形成された像の重なりを透過光でみているわけで、画質の面からは、このベース厚は薄いほどよいことになる。しかしフィルム装てん等の作業性、自現機等による現像処理性を考慮すると、ある程度の厚みが必要で、長年の知見の積み重ねを経て、ほぼどのメーカーのX線フィルムもベース厚は 170~180 μm で一致している。これは画質を考慮して薄くしたい要求と、作業性等のための厚めがよいという要求の中間点に 170~180 μm という厚さがあるということの意味している。参考までに間接フィルムのベース厚を同じようにして測定すると、135~140 μm で直接用との差はそれほど大きくはない。

Fig. 3. X線フィルムの厚み

構成部分	物 質	厚さ (μm)
保 護 膜	酢酸セルローズ (TAC) 又は特殊プラスチック	8~18 μm
蛍光体層	蛍光体及び硝酸繊維素	100-260 ~480 μm
台 紙	紙又はプラスチック	250~ 500 μm

Fig. 4. 増感紙の構成

2.2 増感紙の構成と輝度

増感紙の構成について、各構成部分の物質及び厚みを Fig. 4 に示す。

各増感紙の構成についてくわしく知りたいと考え、一般増感紙を含めて古いものから最近のものまで、その構成要素の各厚みを測定した。その結果を Fig. 5 に示す。

保護膜の厚みは CaWO_4 系に関しては、非常に薄くする方向で製造されていることがわかる。光吸収層が橙色の製品があるが、これらはその色が蛍光体層に影響を与え、あたかも蛍光体層自体が着色されているように見える。蛍光体層は front 対 back の厚み比は、LH-II で 1 : 1.63, New SS で 1 : 1.38 であり、鮮鋭度増感紙で front 対 back は、ほぼ 1 : 1、中感度以上でその比は大きくなっており、増感紙の設計方針によると思われるが、感度と厚みの比の関係は必ずしも parallel ではない。台紙の厚みは種類によって異なり、一定していないが、蛍光体層を支持するため蛍光体層の厚い高感度のものほど厚くなっている。希土類については 3 例の測定値であるが、かなりの高感度でありながら、 CaWO_4 系 高鮮鋭度型 増

		(μm)										
		FS (1965) 206090	FS (1970) 578892	FS (1977) 968852	MS (1970) 160586	LT-II (1975) 715432	LT-II (1977) 872254	LH-II (1977) 909783	New SS (1975) 590720	G-4 (1978) 558726	New G-4 (1979) 567418	LM (1978) 8E0140
フ ロ ン ト	保護膜	18	14	14	14	8	8	10	14	17	14	10
	蛍光体層	104	124	100	96	117	117	160	346	118	121	80
	光吸収層	38(橙)	104(黒)	25(橙)	20(橙)	20(橙)	10(黒)	25(橙)	—	10(黒)	中間層 { 30 層 } (黒)	—
	台紙	325	393	371	390	420	255(Pt)	390	380	265	265	350
	total	525	635	510	520	565	390	585	740	410	430	440
バ ッ ク	保護膜	18	14	14	14	8	8	10	18	17	14	10
	蛍光体層	104	124	100	166	172	172	260	477	118	121	130
	光吸収層	38(橙)	104(黒)	25(橙)	—	20(橙)	10(黒)	25(橙)	—	10(黒)	中間層 { 30 層 } (黒)	—
	台紙	325	423	371	410	490	250(Pt)	390	355	255	265	350
	total	525	665	510	590	690	440	685	850	400	430	490

Fig. 5. 各種増感紙の構成 (測定値)

Fig. 6. 増感紙の厚さと輝度

Fig. 7. 増感紙の厚さと鮮鋭度比

感紙とはほぼ同じ程度の蛍光体層であり、このことは希土類のX線に対する発光効率が大きいことを示している。G-4の測定値で、保護膜が比較的厚いことは注目すべきであろう。

増感紙の輝度は、増感紙の構成及び使用条件によって左右されるが、輝度を大きくする構成上の因子は次の通りとされている。

- ① 蛍光体の発光効率の大きなものを選ぶ。
- ② 蛍光体粒子を大きくする。
- ③ 蛍光の吸収の少ない結合剤を少量使用する。
- ④ 蛍光体層の厚さを輝度が大きくなる適当な厚みにする。
- ⑤ 台紙の反射率を大きくする。

増感紙の厚さと輝度の関係を Fig. 6 に示す。

このことからフロント増感紙は、管電圧が決まると最

も能率のよい厚さが見出されるが、バック増感紙は厚いほど明るくなるが、ある程度以上は飽和に達するので、やはり適当な厚みがあるということになる。

2.3 増感紙の鮮鋭度

増感紙の鮮鋭度をよくする因子としては、

- ① 蛍光体層の厚みを薄くする。
- ② 蛍光体の粒子を小さくする。
- ③ 保護膜を薄くし、その透明度をよくする。
- ④ 蛍光体層を着色して、光のイラジェーションを少なくする。
- ⑤ 蛍光体層の下に光吸収層をもうけて、反射光を少なくする。

⑥ front と back の増感紙の組み合わせバランスを考える。

以上6つの因子が考えられるが、このうち③と⑥を除

く4つの因子は、いずれも増感紙の感度を低下させる因子とつながっており、鮮鋭度と感度の関係は、相反する関係にあることがわかる。Fig. 7に増感紙の厚さと鮮鋭度の関係を示す。これは蛍光体層が厚くなると急激に鮮鋭度が低下していくことを示しており、その傾向は特にフロント増感紙に著しい。

3. 増感紙の発光スペクトルと X線フィルムの感色性

3.1 増感紙の発光スペクトル

増感紙の発光スペクトルは、蛍光体の種類によってきまっており、自由に変えることはまず不可能である。

現在まで使用されてきた増感紙用蛍光体は CaWO_4 が中心であるが、他に $\text{ZnS}:\text{Ag}$ 及び $\text{BaSO}_4:\text{Pb}$ も若干使われてきているので、総称として CaWO_4 系というのも不適当かと思ひ、古典的蛍光体と呼ぶことにしたい。

この古典的蛍光体の発光スペクトルを Fig. 8 に示す。 CaWO_4 は発光スペクトルの極大値は 420~430 nm にあり、X線レギュラーフィルムの分光感度（極大値：400 nm）と少しのずれはあるが、ほとんど、その差は問題にならない程度と考えられている。 $\text{ZnS}:\text{Ag}$ の感度は CaWO_4 の2倍もあるが、鮮鋭度が劣るのが欠点で、超高感度用の蛍光体として使われてきた。発光極大は 435 nm で

Fig. 8. 古典的蛍光体の発光スペクトル

CaWO_4 より少し長短長側にずれた分布をもっているが、その分布幅はいくぶん小さい。

$\text{BaSO}_4:\text{Pb}$ は高圧での発光能率がよく、発光スペクトル極大値は 380 nm で、3者の中ではX線フィルムの分光感度に最もよく一致している。粒状性に問題があるとされているが、外国ではかなり使用され、日本では昭和30年代島津製作所より製造されたことがあるが、現在は製造されていない。この BaSO_4 を蛍光材料として用いるには精製技術に高度なものが必要とされているが、原料が胃腸検査に用いられるほど非常に豊富、かつ安価なので、資源の欠亡が云々される今日、再び増感紙材料として登場することも将来はあり得るであろう。

X線フィルムの持つ感色性（分光感度）と増感紙の発光スペクトルは完全に一致していることが理想的だと考えられる。しかし前にも述べたように、蛍光体の発光スペクトルは、その蛍光体固有のもので、発光スペクトルを変えることは、他の蛍光体の混合などの方法をとること以外に手段はない。

一方X線フィルムの感色性は、増感色素を用いることにより動かすことは可能であるが、固有感度領域が必ず減感するという現象が伴い、ただスペクトル分布が一致したことによる感度上昇分と、固有領域の減感とで差し引き感度低下になることも考えられ、また、その他の性状に与える影響・暗室光の問題等があり、いずれにしてもフィルムの分光感度は簡単には動かし得ないのである。

Fig. 9 に増感色素の例を示す。

希土類蛍光体の発光スペクトルを、Fig. 10 に示す。古典的蛍光体と異なり、線スペクトルが特定の波長領域で強くあらわれ、500~600 nm の領域までスペクトル分布がある。

したがってこの増感紙にマッチするX線フィルムは、540 nm 付近の所謂グリーン発光に対しても感度をもった、オルソタイプのフィルムになる。もちろん希土類蛍光体はレギュラー領域にもかなりの発光分布をもってい

Fig. 9. 増感色素 (感度域変換色素)

Fig. 10. 希土類蛍光体の発光スペクトル

Fig. 11. X線フィルムの分光感度 (感色性)

るので、感度は約 $\frac{1}{2}$ になるが、レギュラーフィルムの使用も可能である。

Fig. 11 にX線フィルムの分光感度を示す。オルソフィルムは、増感色素によりグリーン領域に感度をもつようになったわけで、増感色素により、レギュラー領域の感度はかなり低下していることに注目して頂きたい。

3.2 希土類蛍光体と CaWO_4 蛍光体の比較

希土類蛍光体と古典的蛍光体のうちの代表的な CaWO_4 蛍光体との比較をしてみたい。

希土類蛍光体の第一の特長は、X線に対する発光効率がよく、従って容易に高感度システムを作れることにある。Table 1 にその関係を示す。

希土類蛍光体の第二の特長は、Fig. 10 に示したように、特定の波長領域で強い線スペクトルをもち、蛍光体の種類によってかなり異なるが、500 nm 以上のグリーン領域で、とくに強いスペクトルをもっていることである。従ってX線フィルムは、レギュラータイプでも使え

Table 1. 蛍光体のX線に対する発光効率

	X線吸収率 (%) (100 nm 厚)			発光効率 (%)
	40	60	80 keV	
$\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$	37	51	28	18
$\text{La}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$	73	33	17	13
CaWO_4	33	13	27	4

Fig. 12. CaWO_4 と希土類の管電圧特性

るが、オルソタイプがより適している。

第三の特長は、管電圧特性であり、80 kVp 以下では、感度が急激に低下することであり、80 kVp 以上での使用が望ましい。

Fig. 12 に管電圧特性を示す。

4. 高感度システムの特性

4.1 特性曲線による比較

X線フィルム自体の特性は、高感度のX線フィルムほど、特性曲線の階調を示す平均グラディエント ($\bar{G}$) は小さくなる傾向をもっている。レギュラータイプの1例を Fig. 13 に示す。

これはレギュラータイプ中感度RXと高感度RX-Sの比較である。 $\bar{G}$ はRXの2.60に対し、RX-Sは2.20とかなり低くなっており、高感度化によりコントラストは

〔第7回放射線技術シンポジウム勉強会〕 II. 高感度増感紙システムの特性 (柴田)

低下していることがわかる。 $\bar{G}$ の低下は latitude の拡大を伴うものであるから、ある意味では使いやすいフィルムといえる。

一方オルソタイプではどうであろうか。

オルソタイプの特性曲線を Fig. 14A・Bに示す。レギュラータイプに比較し、大幅な感度の上昇があるにもかかわらず、むしろ $\bar{G}$ はわずかに大きくなっている。しかも特性曲線の脚部の立ち上りも顕著であり、撮影条件設

定範囲が狭いことがわかる。これらの関係をまとめたのが Table 2 である。

latitude は Net Density 0.25~2.0 の値で示しているが、FS-RXS の0.82に対し、オルソタイプは0.76ないし0.74で、かなり latitude が狭いことがわかる。

4.2 撮影条件設定上の問題点

Table 2 で示されている通り、オルソタイプは latitude が幾分狭いので、レギュラータイプに比較し、撮影条件設定の誤差が小さくなければ、黒化度のそろったX線像を得ることは出来ない。そのためにはX線装置の管理を厳しくし、とくにタイマの短時間側での誤差がより小さく、全体としての出力の安定した装置がとくに望まれる。

もちろん、latitude を広げる方法として、低ガンマ・タイプのフィルムがあれば、その使用で解決できるが、

Fig. 13. レギュラータイプ (RX, RX-S) の特性曲線

Table 2. 各システムの階調度及びラチチュード

Screen-Film	平均グレイ イェント ($\bar{G}$)	Latitude (Net D. 0.25~2.0)
FS-RX	2.60	0.78
FS-RX-S	2.20	0.82
G4-RXO	2.80	0.76
G8-RXO	2.80	0.76
GTH-QSO	3.0	0.74
GTS-QSO	3.0	0.74

(A) サクラ QSO

(B) フジ RXO

Fig. 14. オルソタイプ (QSO, RXO) の特性曲線

Screen-Film	(FS-KX) Y に対する 感度比	kV	mAs	FFD ^{filter} (cm)	Focus	粒状性	解像力 (LP/mm)	総合判定
FS-KX Y	1/1	70	80	100	2×2	±	4.6	○
	〃	80	40	〃	〃	±	4.6	○
	〃	80	54	filter Cu 0.1 100	〃	±	4.6	○
	〃	100	16	〃	1×1	±	4.6	□
	〃	120	8	〃	〃	±	4.6	△
	〃	140	4	〃	〃	±	4.3	×
LT-II ^{KX} Y	1/2	80	20	100	1×1	±	4.6	○
	〃	100	8	〃	〃	±	4.6	□
	〃	120	4	〃	〃	±	4.3	×
LH-II ^{KX} Y	1/3	80	14	100	1×1	±	4.3	○
	〃	80	20	filter Cu 0.1 100	〃	±	4.3	○
	〃	102	5	〃	〃	±	4.0	□
	〃	123	2.5	〃	〃	±	3.7	×
LH-II ^{KX} Y	1/3	80	30	140	1×1	±	4.6	○
	〃	102	10	〃	〃	±	4.3	□
	〃	123	5	〃	〃	±	4.0	×
SS-KX Y	1/5	80	8	100	1×1	±	3.1	×
	〃	100	3.5	〃	1×1	±	3.0	×
	〃	120	1.5	〃	〃	±	2.8	×
G-4-RYO	1/5	80	8	100	1×1	+	4.6	○
	〃	80	12	filter Cu 0.1 100	〃	+	4.6	○
	〃	100	3.2	〃	〃	+	4.3	□
	〃	120	1.6	〃	〃	+	4.3	△
G-8-RXO	1/10	80	4	100	1×1	+	4.3	□
	〃	80	6	filter Cu 0.1 100	〃	+	4.3	□
	〃	100	1.6	〃	〃	+	4.0	△
	〃	120	0.8	〃	〃	+	3.7	×
GTS/QSO	1/7	80	6	100	1×1	++	4.3	□
	〃	80	8	filter Cu 0.1 100	〃	++	4.3	□
	(1/8)	100	2.0	〃	〃	++	4.3	×
	(1/8)	120	1.0	〃	〃	++	4.0	×
GTS/QSO	1/7	80	12	140	1×1	++	4.6	○
	(1/8)	100	4.0	〃	〃	++	4.3	□
	(1/8)	120	2.0	〃	〃	++	4.3	×

Fig. 15. 古典的手法による画質の評価の一例
感光材料の各組み合わせ時の撮影条件・粒状性・解像力・
総合判定等 (頭部ファントムグリッド 8:1) (柴田, 1976年)

〔第7回放射線技術シンポジウム勉強会〕 II. 高感度増感紙システムの特性 (柴田)

現在の所オルソタイプには、低ガンマのものは発売されていないので、現像処理法で解決するのも一方法であろう。

4.3 高感度増感紙システムの画質

Fig. 15 は古典的手法による画質評価の一例である。頭部ファントムの実験では、診断上レギュラータイプでは LH-II まで、オルソタイプでは G-4・RXO の組み合わせまでが許容され、それ以上の高感度システムは、診断上疑問が多い、という発表がされている。

Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18 は夫々、システムの MTF、鮮鋭度と比感度の関係、RMS 粒状性とウィナー・スペ

クトルである。学会誌特集号・最近の医用映像技術より転写させて頂いた。

最後にX線写真の粒状性、X線写真モトルについて述べてみたい。K. Rossman はX線写真モトルが、Fig. 19 のような過程で構成されることを示している。

X線写真モトルのうち、量子モトルの占める割合は、最近の研究で60%程度とされており、残りが増感紙の構造モトルとフィルムの粒状性であり、増感紙よりフィルムの方の寄与率が多いことが知られている。

増感紙とフィルムの組み合わせ感度を一定にして、各因子の割合を調べた結果によると、X線写真の粒状性を

Fig. 16. 増感紙・フィルム系のレスポンス関数 ($H_s(\omega)$) (山下らによる 1978年)

- A群: FS (極光), DD (東芝)
 B群: Hi-screen (フジ), LT-II (極光), MS, DMS (東芝)
 C群: G-4 (フジ), GTS (サクラ), LM (東芝レギュラー・フィルム), LH-II (極光)
 D群: G-8 (フジ), GTH (サクラ), LM (東芝), Lanex (コダック), HS (極光)
 (RE 増感紙はオルソタイプ・フィルムを使用)

Fig. 17. 増感紙・フィルム系の鮮鋭度 (MTF 値, $\omega = 2$ 本/mm) と比感度の関係 (山下らによる, 1978年)

Fig. 18. RMS粒状性(a)とウィナー・スペクトル(b) (山下らによる, 1978年)

Fig. 19. X線写真粒状性の構成

良くするには、感度を一定とすれば高感度増感紙と低感度フィルムを組み合わせた方がよい。鮮鋭度の関係は全く逆で、低感度増感紙に高感度フィルムを組み合わせた方がよい。すなわち粒状性をよくしようとすれば鮮鋭度は悪くなり、逆に鮮鋭度をよくしようとすれば粒状性は悪くなる関係にある。

この点からも両者を総合した画像評価法の確立が待たれている。

稿を終わるに際し、増感紙・フィルムに関する資料をご提供頂いた、富士エックスレイ村井課長、小西六写真

工業軸丸課長、東芝放射線、島津放射線の方々に深謝いたします。

文 献

- 1) 滝沢達児, 他: 増感紙, 極光 X-RAY, **19**, (1962).
- 2) 山下, 若松: 最近の医用映像技術, **2**, X線画像, 日放技学誌, **33** (7), (1978).
- 3) 曹根, 藤間, 四宮, 加藤: 希土類元素蛍光体増感紙のX線写真システムについて (第33回総会シンポ), 日放技学誌, **33** (5), (1978).
- 4) 横田和人, 他: 高感度希土類Lシリーズ, 東芝レビュー, **30** (13), (1975).
- 5) 柴田清秀: RX-S の低線量撮影技術への応用, 富士Xレイ研究, **100**, (1973).
- 6) 柴田清秀: 骨撮影と感光材料, 第27回日放技学九州部会抄録集, (1976).
- 7) 菊池真一: 写真化学, 共立出版, (1968).
- 8) 日本写真学会編: 写真工学の基礎, 銀塩写真編, コロナ社, (1979).
- 9) 江頭元樹: X線写真学, 金原出版, (1978).
- 10) 内田, 山下, 稲津: 放射線技術者のための画像工学, 通商産業研究社, (1978).