2-2 螢 光 材 料

東芝総合研究所 成 田 一 夫

1. ま え が き

現在、約 50 種類の螢光体が日常的に用いられている。これらは無数の既知の螢光体の中から、それぞれの用途に応じて選びぬかれてきたものばかりである。そこでまず螢光体を選択する基準となるいろいろな特性をあげ、つぎにそれらの特性が各応用面でのどのように考慮されているかを概観してみる。

2. 螢光体の選択にあたり考慮すべき特性

2.1 刺激の吸収

実用上、螢光体に加えられる刺激エネルギーの形としては α 線、 β 線などの粒子線、 γ 線から赤外線に及ぶ電磁波、陰極線、電場などがある。強い発光を得るには螢光体に入射する刺激エネルギーができるだけ効率良く吸収されなければならない。しかし、強い吸収が起るための条件は刺激の種類により大きく異なる。

2.2 効 率

一定の入射エネルギーに対し発光エネルギーが大きいほど良いことはいうまでもない。発光エネルギーの入射エネルギーに対する比をエネルギー効率と呼ぶ。エネルギー効率は螢光体の選択によりかなり左右されるが、原理的にはある値を越えられないことがある。たとえば螢光ランプの場合、刺激光は 253.7 nm の Hg 共鳴線である。これを 500 nm の可視光に変換するとき、約 50% のエネルギー損失は避けられない。このときは発光光子数と吸収された刺激光子数の比である量子効率（紫外光による刺激ではふつう 1 を越えない）が効率の上限と考えられる。

照明用ランプでは発光効率 (luminous efficacy) という量を用いる。これは電気入力 1 W あたりのルーメン出力 (lm/W) を単位とする。ルーメンは目で見た明るさに比例する量である。

2.3 発光色

螢光エネルギーを受取るものは人間の眼、光電面、光導電体、写真フィルムなどさまざまである。効率だけが問題となるときは、発光スペクトルが受光器の分光感度

となるべく一致していることが望ましい。しかし照明用光源では演色性（照明により物体色を再現する能力）が不充分だと物体色が不自然に見えて不快感を与えるし、またカラーブラウン管では定められた領域内の色を再現できなければならない。これらの要求を優先させると効率はかなり犠牲になる。

2.4 螢光の減衰

刺激を停止したあと螢光が減衰する時間* は多くの場合 μs ~ ms の範囲にあり、実用上これで差支えないことが多い。しかしフライングスポット管やシンチレータのように極度に特定数が短いことが必要な場合、また逆にレーダー管、蓄光塗料のように秒~時間単位の残光が要求されるとき、用い得る螢光体はきわめて限定される。

2.5 飽和特性

刺激の強度が非常に大きくなると発光強度が飽和することがある。この現象はとくに高電流密度の陰極線刺激で現われやすい。飽和特性の異なる 2 種以上の螢光体の混合で色を表示するとき、低電流密度と高電流密度とで色が違ってくる、いわゆる“色ずれ”を生ずる。

2.6 温度特性

温度が上昇すれば螢光強度は減少するのが一般的傾向である。しかし何度まで実用に耐え得るかは螢光体により大きく異なる。螢光体の温度が約 400°C に上昇する高圧水銀灯では、とくにこの点での配慮が必要である。

2.7 安定性

多くの螢光体は管球内に封じて用いられる。管球の製作工程中で、たとえば螢光体の粒径を適当な大きさにするためのミリングや、塗膜生成後有機物バインダーを揮散させるためのベーキング工程などでかなり大きな輝度劣化が起る。また管球使用時にも螢光体にとっていろいろな有害な因子が存在する。

ランプの場合、紫外線（とくに 185 nm Hg 線）による色中心の生成、ガラスとの反応、水銀の吸着、微量不純ガス（とくに水素）の作用などにより輝度が低下する。ブラウン管の場合は電子銃の劣化の方が激しく、螢

* 螢光が初期値の $1/e$ に減衰する時間、または初期値の $1/10$ に減衰する時間。螢光が指数関数的に減少するときは、後者は前者の 2.3 倍である。

“2-2 Luminescent Materials” by Kazuo Narita (Toshiba Research and Development Center, Kawasaki)

表 1 実 用 螢 光 体

刺激の形態	物 質 名	発光ピーク (nm) と発光色	用 途
放 射 線	NaI: Tl	410 (青紫)	シンチレーター
X 線	CsI: Na	420 (青)	X線螢光増倍管
	(Zn, Cd)S: Cu, Al	527 (緑)	X線螢光板
	CaWO ₄	410 (青)	X線増感紙
	Y ₂ O ₃ : Tb	415 (青)	"
	Gd ₂ O ₃ : Tb	545 (緑)	"
	BaFCl: Eu ²⁺	388 (青紫)	"
紫 外 線	(Ca, Zn) ₃ (PO ₄) ₂ : Tl	304 (紫外)	健康線ランプ
	BaSi ₂ O ₅ : Pb	351 (紫外)	ブラックライト
	CaWO ₄	410 (青紫)	カラー螢光ランプ, 高演色螢光ランプ
	Sr ₂ P ₂ O ₇ : Eu ²⁺	420 (青紫)	ジアゾ複写機用ランプ
	Sr ₂ P ₂ O ₇ : Sn	455 (青)	高演色螢光ランプ
	BaMg ₂ Al ₁₃ O ₂₇ : Eu ²⁺	453 (青)	"
	MgWO ₄	463 (青白)	"
	3Ca ₃ (PO ₄) ₂ ·Ca(F, Cl) ₂ : Sb	483 (青白)	"
	3Ca ₃ (PO ₄) ₂ ·Ca(F, Cl) ₂ : Sb, Mn	480, 570 (白)	一般照明用螢光ランプ (温白色, 白色, 昼光色)
	MgGa ₂ O ₄ : Mn	503 (青緑)	ゼロックス用ランプ
	Zn ₂ SiO ₄ : Mn	525 (緑)	カラー螢光ランプ, 高演色螢光ランプ
	(Ce, Tb)MgAl ₁₁ O ₁₉	544 (緑)	高演色螢光ランプ
	3Sr ₃ (PO ₄) ₂ SrF ₂ : Sn, Mn	570 (黄)	カラー螢光ランプ
	Y(P, V)O ₄ : Eu	619 (赤)	高圧水銀灯
	Y ₂ O ₃ : Eu	611 (赤)	高演色螢光ランプ
	(Sr, Mg, Ba) ₃ (PO ₄) ₂ : Sn	625 (赤)	"
	3.5MgO·0.5MgF ₂ ·GeO ₂ : Mn ⁴⁺	657 (赤)	"
赤 外 線	LaF ₃ : Yb, Er	540 (緑)	発光ダイオード
	NaYF ₄ : Yb, Er	540 (緑)	"
陰 極 線	cub. ZnS: Ag	450 (青)	白黒テレビブラウン管 } (P 4)
	cub. (Zn, Cd)S: Cu, Al	550~560 (黄緑)	"
	cub. ZnS: Ag	450 (青)	カラーテレビブラウン管 } (P 22)
	cub. ZnS: Cu, Al	530 (緑)	"
	Y ₂ O ₃ : Eu	611 (赤)	"
	Y ₂ O ₂ S: Eu	625 (赤)	"
	Zn ₂ S: O ₄ : Mn	525 (緑)	ディスプレイ管 (P 1) [25ms]*
	CaSiO ₃ : Pb, Mn	610 (橙)	" (P 25) [60ms]
	cub. ZnS: Cu	530 (緑)	" (P 31) [90μs]
	Zn ₂ S: O ₄ : Mn, As	525 (緑)	" (P 39) [125ms]
	ZnSiAg+(Zn, Cd)S: Cu, Cl	550 (黄)	レーダー用ブラウン管 (P 7) [400ms]
	ZnF ₂ : Mn	593 (橙)	" (P 26) [18sec]
	MgF ₂ : Mn	605 (橙)	" (P 33) [きわめて長い]
	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ : Ce	370 (紫外)	フライングスポット管 (P 16) [0.1μs]
	Y ₃ Al ₅ O ₁₂ : Ce	542 (黄)	" (P 46) [0.2μs]
	Y ₂ SiO ₅ : Ce	398 (青紫)	" (P 47) [0.1μs]
	ZnO: Zn	502 (緑)	螢光表示管
電 場	ZnS: Cu, I	450 (青)	電場発光板
	ZnS: Cu, Al	525 (緑)	"
	ZnS: Cu, Mn	640 (橙)	"

* [] 内の数値は 10% 残光時間

光体の寿命が問題にされることはあまりないが、螢光体によってはいわゆる焼付きが生ずることがある。

螢光体を大気中で用いる場合 (X線用増感紙, シンチレーターなど) では湿気に対する保護を充分考慮しなければならない。

3. 種々の用途に用いられる代表的螢光体

表 1 に実用螢光体の一覧表を示す。以下にそれぞれの刺激源について個々の螢光体を解説する。

3.1 放射線用螢光体(シンチレーター)¹⁾

シンチレーターは放射線により効率良く発光する螢光体である。個々の放射線粒子により生ずる螢光パルス(シンチレーション)が光電子増倍管によって計数されるので、対象となる放射線に対し螢光効率が高いこと、速い計数を可能とするため螢光の減衰が早いこと、入射粒子エネルギーと発光強度の比例性が良いこと、などの性質が要求される。

α 線, β 線などの荷電粒子は物質との相互作用が大きい

いので、薄いシンチレーター層に強く吸収される。 α 線の検出には ZnS:Ag (銀で付活された硫化亜鉛) または ZnS:Cu のうち、なるべく残光性の少ないものを光電子増倍管の表面に 10 mg/cm^2 程度塗布すればよい。高エネルギーの β 線は原子番号の大きい元素により散乱されて結晶外に飛出しやすいため NaI:Tl (後述) など是不適当で、アントラセン結晶がよく用いられている。

γ 線、X線のような高エネルギーフォトン、主として光電子放出、コンプトン散乱、電子対生成のいずれかの過程により吸収され、これらの過程で発生した高速電子がシンチレーター内で失うエネルギーに比例したシンチレーションが観測される。透過力の大きい γ 線を充分吸収させ、それによる発光を損失なく取出すためには、大きくて透明な単結晶が必要である。ヨウ化ナトリウム NaI:Tl は透明な大結晶が得られ、しかも γ 線に対する吸収係数の大きい原子(ヨウ素)を含むので、最良のシンチレーターといえる。蛍光の減衰も約 250 ns と短く、早い計数が可能である。

3.2 X線用蛍光体

医療用に用いられるX線のエネルギーは $80\sim 90 \text{ kV}$ 程度である。この範囲では、X線の吸収は3.1節に述べた3つの吸収過程のうち、主として光電子放出によりおこる。X線に対する質量吸収係数(吸収係数と密度の比)は原子番号の大きい原子ほど大きいので、重い原子を多く含む蛍光体ほどX線に対する感度を大きくすることが容易である。

X線像を直接撮影するとき、写真フィルムはX線をあまり吸収せずわめて感度が悪いので、X線をよく吸収する蛍光体を塗布したプラスチック板一増感紙—でフィルムをはさみ、X線により刺激された蛍光でフィルムを感光させる。蛍光体としては、これまでタングステン酸カルシウムが使われてきた。これはタングステンを含むためX線を吸収すること、発光色が青でフィルムの分光感度に一致することなどの理由による。しかし最近にはさらにX線に対する感度が高い希土類付活蛍光体($\text{Y}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$, $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$, BaFCl:Eu^{2+} など)も使われるようになり、患者のX線被ばく量を少なくできると期待されている。

間接撮影にはX線蛍光増倍管が使われる。蛍光増倍管ではX線はまず CsI:Na 蛍光体蒸着膜に吸収され、その青い蛍光によりS11 光電面から光電子が放出される。この電子は強い電場で加速されて出力蛍光面を刺激する。 CsI:Na の利点はその発光がS11 光電面の分光感度によく一致していること、原子番号の大きなヨウ素を含むこと、密度の大きな蒸着膜にできることなどであ

図 1 主な紫外線用蛍光体の発光スペクトル

- (1) $(\text{Ca}, \text{Zn})_3(\text{PO}_4)_2\text{:Tl}$, (2) CaWO_4 , (3) $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7\text{:Eu}^{2+}$,
(4) $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7\text{:Sn}$, (5) $\text{MgGa}_2\text{O}_4\text{:Mn}$ (6) $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}$,
(7) $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca(F, Cl)}_2\text{:Sb, Mn}$, (8) $\text{Y(P, V)O}_4\text{:Eu}$,
(9) $3.5\text{MgO}\cdot 0.5\text{MgF}_2\cdot \text{GeO}_2\text{:Mn}^{4+}$

る。

3.3 紫外線

主な紫外線用蛍光体のスペクトルを図1に示す。紫外線による主な刺激の方法は2種類ある。第1は低圧水銀蒸気中の放電により発生する水銀原子の 253.7 nm 共鳴線によるもので、蛍光ランプがその代表的な例である。第2は高圧水銀蒸気中の放電により得られる 365 nmHg 線によるもので、高圧水銀灯がその例である。

蛍光ランプ用蛍光体で問題になるのは 253.7 nm 紫外線刺激による発光効率、発光色、ランプ製作時および長時間点灯時の安定性などである。一般照明用には演色性が良く、しかも発光効率 (lm/W) の高いものが選ばれる。この目的にはハロリン酸カルシウム [$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\cdot \text{Ca(F, Cl)}_2\text{:Sb, Mn}$] がほとんど独占的に用いられる。

さらに高い演色性が要求されるときには、これにタングステン酸カルシウム (CaWO_4)、ケイ酸亜鉛 ($\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}$)、フロロゲルマン酸マグネシウム ($3.5\text{MgO}\cdot 0.5\text{MgF}_2\cdot \text{GeO}_2\text{:Mn}^{4+}$) などを加えた混合蛍光体を用いる。

演色性と発光効率は相反する関係にあるので、演色性を高めると明るさは減少する。しかし最近アルミン酸バリウム ($\text{BaMg}_2\text{Al}_{16}\text{O}_{27}\text{:Eu}^{2+}$)、アルミン酸セリウム [(Ce, Tb) $\text{MgAl}_{11}\text{O}_{19}$] および酸化イットリウム ($\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$) の3蛍光体の組合せにより高演色性と高い発光効率を兼備したランプも出現している²⁾。

ジアゾコピー用にはピロリン酸ストロンチウム ($\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7\text{:Eu}^{2+}$)、ゼロックスコピー用にはガリウム酸マグネシウム (青緑色) 蛍光体が使われるが、これらはいずれもジアゾコピー紙、ゼロックス光電面(セレン蒸着膜)の分光感度に適合するように選ばれている。

高圧水銀ランプの光は青白く、不快感を与えるので、表面に赤色蛍光体を塗布して演色性を高めている。このランプは強い 365 nm 紫外線を放射し、また動作時には

管壁温度は約 400°C に達する。したがって 365 nm の光で刺激され、しかも高温で発光効率が低下しない蛍光体が要求されるが、リンバナジン酸イットリウム蛍光体 $[(Y(P, V)O_4)_2Eu]$ はこの要求を充分満足させるものである。

3.4 赤外線

最近、赤外発光ダイオードの発光を可視光に変換する目的で赤外-可視変換蛍光体がくわしく研究された³⁾。代表的蛍光体として $LaF_3: Yb, Er$ や $NaYF_4: Yb, Er$ などがある。この蛍光体では 2 個の赤外フォトンが吸収されて 1 個の可視フォトンに変換される。励起過程から推察されるように、発光強度は電流の 2 乗に比例する。

3.5 陰極線

高速の電子が蛍光体に入射すると高エネルギーの電子や正孔が作られる。これらは、なだれ的にさらに多数の低エネルギー電子-正孔対を作り、この過程は作られる電子-正孔対のエネルギーがその蛍光体のバンドギャップエネルギー (E_g) 程度になるまで続く。この最後の電子と正孔が発光中心を励起する。

いま入射電子のうち蛍光体表面で反射される割合を r 、 E_g なるエネルギーの電子-正孔対を作るのに必要なエネルギーを E_x 、蛍光スペクトルのピーク波長のフォトンエネルギーを E_m とすると、発光過程のエネルギー効率 (蛍光エネルギーの入射電子線エネルギーに対する比) η は、

$$\eta = (1-r)(E_g/E_x)(E_m/E_g)$$

で与えられる。 r は一般に 0.1 程度の値をとり、また E_x はほぼ $3E_g$ 程度と考えられる⁴⁾ ので、 η は $E_m/3E_g$ に比例することになり、同じ E_m (発光色) に対しては E_g が小さい蛍光体のほうが有利であることがわかる。陰極線管に用いられる蛍光体にバンドギャップの小さな硫化亜鉛を母体とするものが多いのは、このような理由に基づいている。

JEDEC に登録されているすべての蛍光体の特性の詳細な表が大石により作られている⁵⁾。以下にいくつかの代表的蛍光体について述べる。

図 2 にテレビ用蛍光体の発光スペクトルを示す。白黒テレビには青色発光蛍光体 $ZnS: Ag$ と黄色発光蛍光体 $(Zn, Cd)S: Cu, Al$ がほぼ 13,000°K の白色になるように混合されて用いられている。一方、カラーテレビでは色の再現のために加法混色の 3 原色である青、緑、赤が必要である。青色には $ZnS: Ag$ が用いられる。緑色としては国外では $(Zn, Cd)S: Cu, Al$ が用いられているが、国内ではカドミウムが公害源として嫌われていることから、 $ZnS: Cu, Al$ に切換えられた (カドミウムを除くと発光がやや短波長に移動して視感度曲線との一致

図 2 テレビ用蛍光体の発光スペクトル

(1) $ZnS: Ag, Cl$, (2) $ZnS: Cu, Al$,
(3) $(Zn, Cd)S: Cu, Al$, (4) $Y_2O_3S: Eu$

が悪くなるため輝度的には不利になるが、色の再現には支障がない)。赤色にはオキシ硫化イットリウム ($Y_2O_2S: Eu$) または酸化イットリウム ($Y_2O_3: Eu$) が使われている。色の再現域は前者のほうが広いが、輝度は後者のほうが高い。

シンクロスコープや CRT ディスプレイ用ブラウン管には主として見やすい緑色蛍光体が使われるが、用途により適当な残光時間のものを選ぶ必要がある。オシロスコープ用には P 1, またシンクロスコープ用にはこれより短残光の P 31 蛍光面が用いられる。CRT ディスプレイの場合は、テレビ走査のフレーム周波数 60 Hz 程度の場合は P 4 (白黒テレビ蛍光面) や P 31 など、またフレーム周波数 40 Hz 程度の低速の場合は P 25, P 39 が適当である。またグラフィックディスプレイには残光の長い P 7 蛍光面が用いられる。

フライングスポット管では蛍光の立上りと減衰がきわめて早いことが要求される。1 秒間に 30 コマの画像を 525 本の走査線で伝送するときの絵素の数は $10^7/sec$ の桁である。したがって蛍光の減衰時間は $10^{-7} sec$ 以下でなければならない。発光中心内での遷移確率についての考察から、この要求を満たすことができるのはセリウムイオン (Ce^{3+}) で付活された蛍光体だけであることが結論される。受光器 (フォトマル) の分光感度を考慮して、青色発光のケイ酸イットリウム ($Y_2SiO_5: Ce$) (P47) が用いられる。天然色画像の再生には可視部全域にわたる発光が必要なので、 $Y_2SiO_5: Ce$ と黄色発光のイットリウムアルミニウムガーネット (YAG) ($Y_3Al_5O_{12}: Ce$) (P 46) との混合物 (P 48) が用いられる。これらの蛍光体の残光時間は $10^{-7} \sim 10^{-8} sec$ 程度である。なお、古くから用いられているケイ酸カルシウムマグネシウム ($Ca_2MgSi_2O_7: Ce$) (P 16) は P 47 にくらべ効率が低く劣化が大きい。

逆にレーダーでは長い残光が必要である。一般に用い

られるのは ZnS: Ag と (Zn, Cd)S: Cu, Al を 2 層にわけて塗布したもの (P 7 蛍光面) で、まず ZnS: Ag が電子線により励起され、その青発光が長い黄色リン光を示す (Zn, Cd)S: Cu, Al を励起する。蛍光が初期値の 1/10 に減衰する時間は約 400 ms である。このほかフッ化物蛍光体 $\text{ZnF}_2: \text{Mn}$ (P 26), $\text{MgF}_2: \text{Mn}$ (P 33) もあるが、これらはまた焼付きを起しやすいので、いまはあまり用いられない。

蛍光表示管では、数 10 V 程度の電場で加速された低速電子により刺激が行われる。このような条件で効率良く発光する蛍光体としては ZnO: Zn がある。他の陰極線管用蛍光体は、ある閾値 (一般に約 2 kV 以下) の加速電圧では発光しない。

3.6 エレクトロルミネッセンス

エレクトロルミネッセンス (EL, 電場発光ともいう) は電場の印加により観測されるルミネッセンスで、固体の場合には 2 種類のものがある。第 1 は硫化亜鉛蛍光体の粉末を有機バインダーに分散させたものを 2 枚の板状電極で挟んで一種のコンデンサーを形成した素子を用いるもので、交流電場を印加する。これを真性 EL (intrinsic EL) という。第 2 はリン化ガリウム (GaP) やヒ化ガリウムの p - n 接合に電流を注入して得られるもの

で、直流で動作させる。これを注入型 EL (injection EL) と呼ぶ。後者が発光ダイオードとして広く利用されていることは周知の通りである。前者は大面積にすることができ、安全灯や数字表示素子のほか平面テレビも試作されている⁶⁾⁷⁾。

真性 EL 蛍光体として用いられるのは ZnS: Cu, I (青), ZnS: Cu, Al (緑), ZnS: Cu, Mn (橙色) など硫化亜鉛系に限られ、しかも銅を陰極線管用蛍光体にくらべ 1~2 桁多く含んでいる。これは ZnS 結晶中に入りきれずに析出した硫化銅 Cu_2S が EL 発光を得るのに不可欠であるためである。

(昭和 50 年 12 月 3 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 山崎文男編: 放射線 (実験物理講座 26), 共立出版 (1973)
- 2) J. M. P. J. Versteegen, D. Radjelovic, L. E. Vrenken: A New Generation of "Deluxe" Fluorescent Lamps, Combining an efficacy of 80 Lumens/W or More with a Color Rendering Index of Approximately 85, J. Electrochem. Soc., **121**, 12 (1974) 1627
- 3) 前田敬二, 玉谷正昭: 赤外発光ダイオードと赤外励起蛍光体, 画像技術, **2** (1972) 35
- 4) W. Lehman: On the Optimum Efficiency of Cathodo-Luminescence of Inorganic Phosphors, J. Electrochem. Soc., **118**, 7 (1971) 1164
- 5) 大石蔵: 受像管特性一覧表, テレビ誌, **27**, 5 (1973) 410
- 6) M. Yoshiyama: Electronics, **42**, 6 (1969) 114
- 7) 猪口敏夫, 鈴木忠二: 高輝度・長寿命を達成した薄膜 EL パネルの構造と特性, 日経エレクトロニクス, No. 95 (1974. 11. 18) 84

特集 □ 不可視情報の画像化技術

2-3 光学部品と材料

東京光学機械株式会社 油 大 作

1. ま え が き

画像装置の眼としての光学部品のその装置に占める役割の大きいことは従来、繰返しいわれてきたが、2 次元画像のトランスミッターとして光学部品を見た場合、特に情報量に対するコストパフォーマンスの優位性は当分くずれそうにもない。光学部品や材料に関してはすでに多くの教科書もあり報告も多いが、最近急速に発展してきたこの不可視光領域では、同じ電磁波とはいっても可視光領域とは異なり種々問題もあり、まだ報告も少ない。

本稿ではこの不可視光領域の中でも、特に画像装置として多く用いられる中赤外領域に重点を置いて紹介する。また、超音波領域のものに関しては、その周波数が

高くなれば光学系に類似の取扱いも可能となり、また超音波レンズという名称も存在するが、筆者の専門外でもあり本稿では取り上げない。文献の一部¹⁾を紹介しておくに止める。

2. 結 像 光 学 系

被写体の放射振幅分布を 2 次元画像に変換する要素として、結像光学系は文字どおり装置の眼であり重要であるが、従来からの微小検出器と走査鏡との組合せによる方式の他に、最近パロビジコンのように大面積検出器の開発が進み²⁾、大面角結像光学系が要求されるようになってきた。検出器の結像面積によって光学系を分類することも行われているが³⁾、本項では従来のように反射屈折方式によって分類する。

2.1 反射系

"2-3 Optical Elements and Materials" by Daisaku Abura (Tokyo Optical Co., Ltd., Tokyo)