

# 解説

## 最近のカラーリバーサルフィルムの高画質化について

石丸 信吾・宮崎 桂一・本庄 知

富士写真フィルム(株)足柄研究所 〒250-01 南足柄市中沼 210

(1992年8月6日受理)

### On the Image Quality of Recent Color Reversal Films

Shingo ISHIMARU, Keiichi MIYAZAKI and Satoru HONJO

Ashigara Research Laboratories, Fuji Photo Film Co., Ltd.,  
210, Nakanuma, Minamiashigara 250-01

#### 1. はじめに

1935年に登場した一般用コダクロームは、発色用カプラーを現像液から供給するいわゆる「外型」フィルムである。その後、発色用カプラーを乳剤中に含むいわゆる「内型」フィルムが開発され、カラーリバーサルフィルム分野では「内型」「外型」フィルムが共存しつつ進歩してきた。

外型フィルムは乳剤膜中にカプラーを含まないため乳剤膜が内型フィルムの1/2以下で設計でき、シャープネスが良いのはもちろんのこと、シャープネスという性能上の原資を一部粒状性に振り向けること等により、粒状性においても内型に優る性能を有していた。反面、現像処理が複雑でありラボ数が少ないという弱点を有していた。

内型カラーリバーサルフィルムは画質においては外型に一步譲るものの色再現の鮮やかさと現像処理の容易さ、そして豊富なラボ網によりカラーリバーサルフィルムの主流となっている。

近年、多くのユーザーの声を調査したところ、プロユーザーを中心としてさらに高品質のカラーリバーサルフィルムを求める声があることが次第に明らかとなってきた。それは一言でいえば「内型・外型を含めたあらゆるカラーリバーサルフィルムの中で最高画質を有する内型カラーリバーサルフィルム」であった。

1990年2月、市場に導入されたフジクローム「ベルビア」は、富士写真フィルムがこのような市場の声に応えて品質の高度化を実現したものである。本稿ではベルビ

アの技術と性能を紹介することによって最近のカラーリバーサルフィルムの高画質化の状況を解説したい。

#### 2. ベルビアの品質目標

ベルビアのコンセプトを実現するために以下の品質目標が設定された。

- (1) 35mm フォーマットのフィルムから満足できる大判(B-0判)の印刷物が作成可能な粒状性、シャープネスを有すること。
- (2) 鮮やかでかつコクのある色再現が可能なこと。
- (3) ハイライトからシャドウまでニュートラルグレーを再現すること。
- (4) ハイライトのヌケを良くすると同時に最高濃度が十分高く、かつてない広い濃度レンジを有すること。
- (5) CR-56/E-6 処理可能なこと。
- (6) +1 絞りまでの増感処理が可能なこと。
- (7) 各種サイズとフォーマットがフルラインアップされていること。

なお感度は ISO-50 と設定した。

#### 3. ベルビア開発のための新技術

上記の目標の中で、(1)と(2)を実現するための、粒状性、シャープネス、色再現の改良技術が最も重点化され、そのために新型シグマクリスタル技術、DIR 化合物技術、新薄層化技術が開発された。

##### 3.1 シグマクリスタル技術

シグマクリスタル技術は、1983年に発売されたカラー

ネガフィルム HR シリーズに用いられた二重構造粒子から発展してきたものである<sup>1)</sup>。ペルビアには従来のシグマクリスタル技術をさらに乳剤粒子の光散乱特性と感度について発展させた新型シグマクリスタル技術が開発導入されている。

3.1.1 ハロゲン化銀粒子の光散乱減少によるシャープネスの向上

1) 背景

乳剤層中でのハロゲン化銀粒子による光散乱は、入射した光の横方向への広がりを引き起こし、写真画像のシャープネスを悪化させる原因となる。ゼラチン中のハロゲン化粒子の光散乱特性については、Berry<sup>2)</sup> が立方体粒子の稜長と散乱効率の関係を求めており、波長 546 nm の光の場合、立方体の稜長が 0.4 μm 近傍で散乱効率が最大になることを示している。

ISO-50~100 の感度のフィルムには、上記の散乱効率のピーク前後の大きさの粒子が数多く使われている。それ故、特に多層構成のカラーフィルムの場合、光散乱を最小にするために粒子の大きさや形状を最適化する必要がある。最適化には、上記の単一粒子による単一の散乱特性の解析だけでなく、多数粒子による多重散乱を考慮する必要がある。しかし、現状では、単一の粒子の光散乱特性についても十分に解析されておらず、特に図 1 に示した平板型粒子については、立方体などの等方的な粒子と比較して光散乱が少ないと言われているが、その原因については十分に解析されていなかった。

そこで、まず、立方体および平板単一粒子の光散乱特性の違いを解析することによって、光散乱を最小にするためのハロゲン化銀粒子の大きさや形状に関する知見が得られないかと考え、以下の解析を行った。

2) 解析の手法

現在、立方体粒子と平板粒子の光散乱特性を計算する

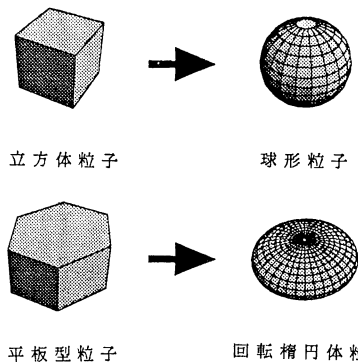


図 1 ハロゲン化銀粒子の形状とその近似例

理論は確立されていない。そこで、それぞれの粒子に近い形状の球形および回転楕円体粒子に対して確立されている光散乱の理論式を使って、立方体粒子と平板粒子の光散乱特性を近似的に計算することにした。球形粒子と回転楕円体粒子の光散乱特性の計算には、それぞれ Mie の理論<sup>3)</sup> と浅野の方式<sup>4)</sup> を用いた(図 2)。近似の妥当性については、粒子の光散乱特性を表すために必要な散乱断面積と散乱角度分布について、図 2 の手段で計算値と実測値との対応関係を調べたが、よい一致が得られている<sup>6)</sup>。ここで、散乱断面積とは、粒子の幾何学的断面積に散乱効率を乗算した実効的な散乱量を表す値で、散乱角度分布は、散乱光の角度依存性を表す値である。

3) 計算結果

550 nm の光の回転楕円体粒子による散乱断面積の代表的な計算結果を図 3 に示す。縦軸の散乱断面積は、乳剤膜単位体積あたりの銀量で正規化してある。この図は、球形粒子と、球相当径  $D$  (体積が等しい球の直径) が、0.1 μm から 1.0 μm、アスペクト比  $A/B$  ( $A$  と  $B$  はそれぞれ回転楕円体粒子の直径と厚み) が 1.5, 3.0, 5.0 の回転楕円体粒子の場合の、垂直入射 ( $\theta=0^\circ$ ) する光と斜め入射する光 ( $\theta=60^\circ$ ) に対する散乱断面積を表

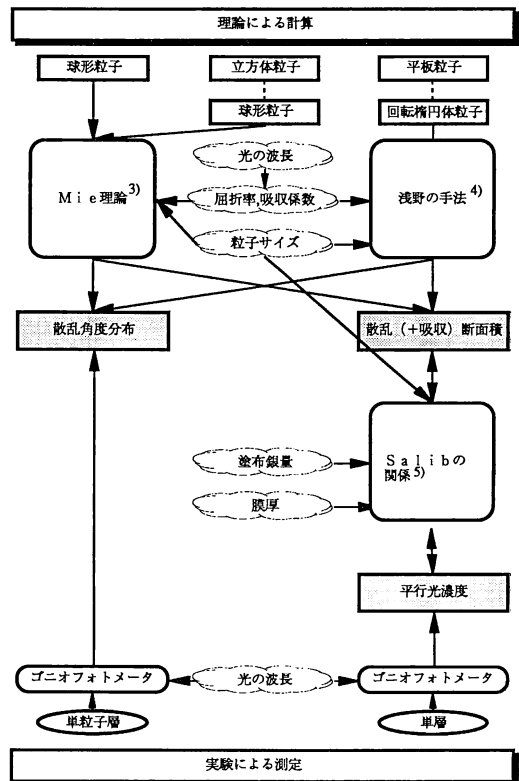


図 2 光散乱の近似計算

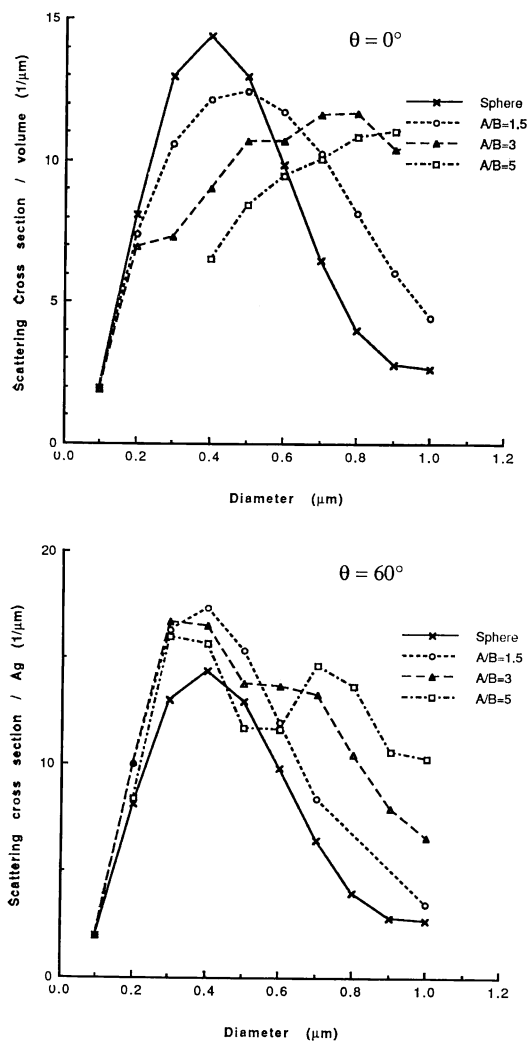


図3 同体積の球および回転楕円体粒子による散乱断面積の計算結果 (波長=550 nm, 球の直径=0.5  $\mu\text{m}$ )

している。垂直光に対しては、球相当性が約 0.6  $\mu\text{m}$  までの粒子では、回転楕円体粒子の散乱断面積が小さく、その傾向はアスペクト比が大きいほど強くなっているが、約 0.6  $\mu\text{m}$  以上の粒子については、逆に回転楕円体粒子の散乱断面積の方が大きくなっている。また、斜め光に対しては、すべての粒子の大きさで回転楕円体粒子の散乱断面積の方が大きくなっている。

次に、波長 550 nm の光の散乱角度分布について得られた代表的な結果を図 4 に示す。この図は、直径が 0.5  $\mu\text{m}$  の球形粒子と、球相当径が 0.5  $\mu\text{m}$  で、アスペクト比が 1.5, 3.0, 5.0 の回転楕円体粒子の場合の、垂直光 ( $\theta=0^\circ$ ) と斜め光 ( $\theta=60^\circ$ ) に対する散乱角度分布を

示している。垂直光に対しては、アスペクト比が高くなるに従って散乱角度分布が狭くなっている。一方、斜め光に対しては、回転楕円体粒子の方が広がっており、反射成分も多く含まれるようになっている。

#### 4) 考察

これらの計算結果から、波長 550 nm の光に対して、球相当径が 0.1  $\mu\text{m}$  から 1.0  $\mu\text{m}$  の平板粒子の光散乱特性には、立方体粒子と比較して、以下の特徴があることがわかった。

- (1) 平板粒子と立方体粒子の散乱断面積の大小関係は、球相当径が 0.6  $\mu\text{m}$  以下では平板粒子の方が小さく、約 0.6  $\mu\text{m}$  から約 1.0  $\mu\text{m}$  では立方体粒子の方が小さい。
- (2) 平板粒子の散乱角度分布は、立方体粒子と比較して、垂直光に対する広がりには小さいが、斜め光に対する広がりが大きい。

ここで、これらの特徴を図 5 の多層構成の乳剤層中での光散乱と結び付けて考察してみる。図 5 (1) は、入射光側に置かれた粒子による散乱の様子を模式的に表したものである。この場合、垂直光が多いことから、球相当径が小さい場合 (波長 550 nm の光で 0.6  $\mu\text{m}$  以下) には平板粒子の散乱が小さいが、球相当径が大きい場合 (波長 550 nm の光で 0.6  $\mu\text{m}$  以上) には逆に平板粒子の散乱が大きいと考えられる。また、図 5 (2) は、下層に置かれた粒子による散乱の様子を模式的に表したものである。この場合は、上層で散乱した斜め光が多いことから、平板粒子の方がハレーションのような反射型散乱が多いと考えられる。これらの現象は、われわれの実験でも確認しており<sup>6)</sup>、光散乱を最小にする上で、平板粒子が立方体粒子と比較して必ずしも有利ではないことを表している。ベルビアの開発に当たっては、本手法を利用して、最適なハロゲン化銀粒子の大きさと形状を選択し、光散乱を最小にした。

#### 3.1.2 乳剤粒子の感度向上による粒状性の改良

上述のように形状選択された乳剤粒子は新規の高感化技術によりそれぞれ微粒子化され、その結果、全粒子の平均体積を従来の ISO-50 のカラーリバーサルフィルム RFP に比べ 1/3 強にまで微粒子化でき、粒状性を改良することができた。

#### 3.2 DIR (development inhibitor releasing) 化合物技術

ベルビアは第一現象 (= 黒白現象) で現像抑制物を放出する DIR 化合物を使用した最初のカラーリバーサルフィルムである。

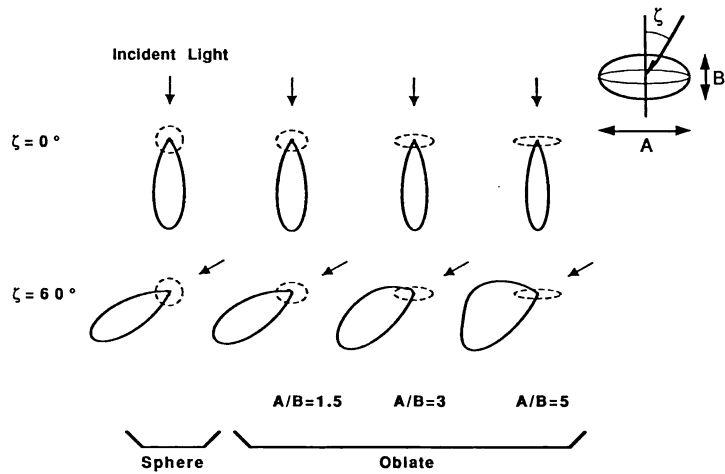


図 4 同体積の球および回転楕円体粒子による散乱角度分布の計算結果 (波長 = 550 nm, 球の直径 = 0.5 μm)

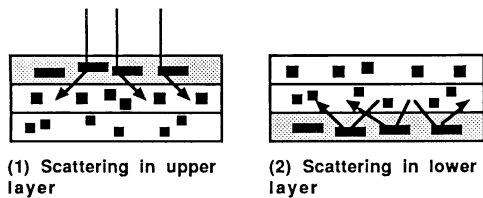


図 5 多層構成の乳剤中での光散乱例

DIR カプラーは、カラーネガフィルムにおいてシャープネスと色彩度を有効に改良するために使用されてきた。しかしながら、この技術をそのままカラーリバーサルフィルムに応用することはできなかった。というのは、カラーリバーサル処理は第一現像がエッジ効果と重層効果を発現させる主要工程となるように設計されており、DIR カプラーが作用する後続の第二現像（カラー現像）工程では、第一現像での残存ハロゲン化銀がすべて発色に寄与するため現像効果を発現させることが困難であったからである。

このような背景のもとに第一現像で機能する DIR-redox 化合物が検討された。広範囲な化合物が検討された結果、エッジ効果と重層効果を目ざましく良化させる DIR 化合物が見いだされた。

図 6 にはベルビアに導入された DIR 化合物により発現したエッジ効果を示した。このように DIR 化合物の導入によりエッジ効果および重層効果が向上し、シャープネスと色彩度が改良された。

### 3.3 新薄層化技術

イメージシャープネスを増大させるための最も確かな方法の一つは、乳剤膜厚を減少させることである。ベル

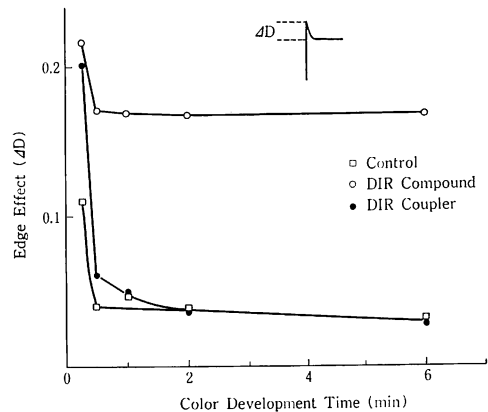


図 6 DIR 化合物により発現するエッジ効果発色現象の標準時間は 6 分であるが DIR カプラーを使用した場合は 2 分で効果は消滅する。第一現像で発現した DIR 化合物のエッジ効果は当然ながら発色現像時間にほとんど依存せず、しかも効果が大きい。

ビアの開発では乳剤膜厚を減少させるため、

- ① 発色用カプラーの体積減少
- ② カプラー分散用高沸点有機溶媒（オイル）の減少が徹底的に追求された。その結果、

- ① 乳剤膜中の全高沸点有機溶媒量を 73% 減少させ
- ② カプラーの充填密度を 25% 高める

ことに成功し、同等感度の当社の従来フィルム RFP に対し

- ① 感光性乳剤層の厚みを 15% 減少させイメージシャープネスを改善し
- ② シアン、マゼンタ、イエロー各層の最大発色濃度

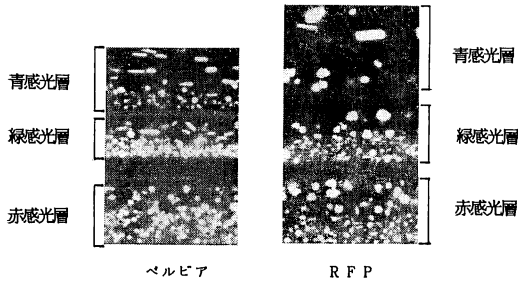


図7 ベルビアと従来フィルム (RFP) の断面写真

を、それぞれ 6, 10, 5% 高めることができた。  
 図7にベルビアと RFP の断面写真を示す。

#### 4. ベルビアの到達性能

##### 4.1 粒状性とシャープネス

図8にベルビアと RFP の RMS 粒状性を比較した。ベルビアの粒状性は、あらゆるカラーリバーサルフィルムの中でも最も細かいものの一つである。特に青感光層 (B) の粒状が大幅に向上したことで、肌のなめらかさが良化し、大型印刷物における空のざらつきが軽減された。緑感光層 (G)、赤感光層 (R) でも粒状性が改良されている。

図9にベルビアと RFP の MTF を比較した。ベルビアの MTF は内型・外型を問わず ISO-50~64 クラスのフィルムとしては最高のレベルにある。これにより製版の際のセットアップ条件設定で、シャープネスを高め、コントロールし粒状性を損なう代償が軽減されるであろう。

##### 4.2 色再現

ベルビアの色の飽和度は、RFP より増大している。それにもかかわらず淡い色の再現や色の階調は損なわれていない。また肌色は自然な赤みのある健康的な再現となっている。

##### 4.3 特性曲線

図10にベルビアの特性曲線を示す。従来の特性曲線に比べ足部のコントラストがより高くなっていることにより、ハイライトの抜けと立ち上がりの良いメリハリのある画像が得られる。また高い最高濃度とシャドー側の調子再現域の長さによってディープシャドーのディテール再現力が向上した。

##### 4.4 情報記録密度について

カラーフィルム類は絶えず、その単位面積上に記録可能な情報量を増やしてきたが、その傾向は DIR カプラー技術の進歩の恩恵を受けてきたカラーネガフィルム

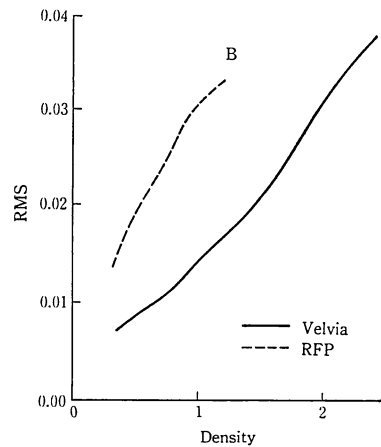
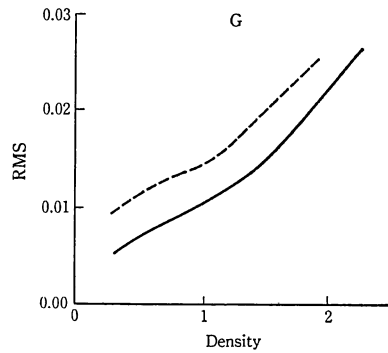
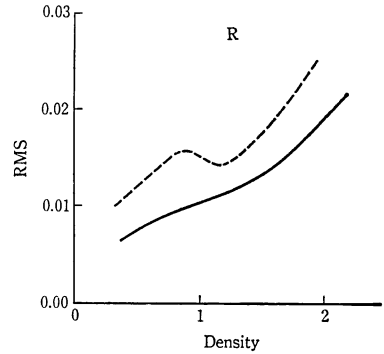


図8 粒状性

ムにおいて特に顕著で、第一 (白黒) 現像で像構造が支配されるカラー反転フィルムでは、変化は比較的少なかった。

ベルビアは全く新しい技術で、反転フィルムにも化学的画像処理をより自由に行わせることに成功し、鮮鋭度の向上を達成した。ここでは、このフィルムの記録密度面の特徴を採り上げる。

##### 4.4.1 評価尺度

従来、アナログ系の写真フィルムの記録密度は、それをデジタル系に準えた情報容量で評価されることが多か

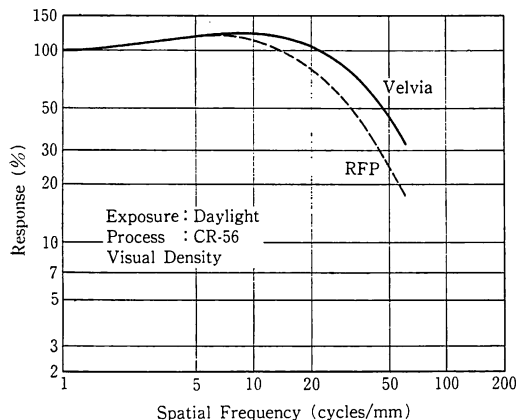


図 9 MTF

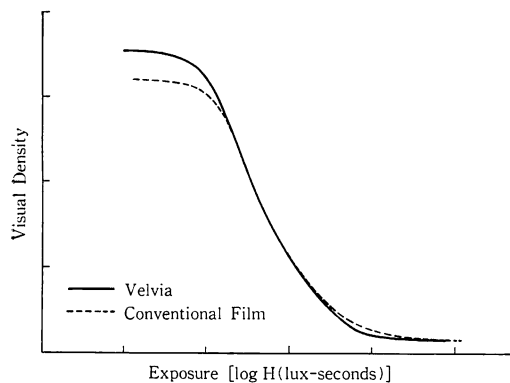


図 10 特性曲線

った<sup>7)</sup>が、ここでは鮮鋭度と粒状度を総合した別の尺度、negative scale を用いることにする。この尺度は Per-rin によって提唱され<sup>8)</sup>、以下のような内容を持つ。

フィルムの光拡がり関数で決まる最小画素  $s$  を MTF 特性から決め、その画素上での RMS 粒状度を  $\sigma_s$  とすると、negative scale (NS) は次式で定義される。

$$NS = s\sigma_s \quad (1)$$

物理的意味は、二次元の空間座標と濃度軸からなる三次元の画像空間を埋める building block の体積であり、単位は [濃度×面積] である。よりわかりやすくいえば、系が制御し得る画像形成物質 (下の場合はマゼンタ色素) の最小量を表す。この尺度は色再現特性を含まないこと、調子再現特性がほぼ等しいフィルム同士の比較にしか使えないことに注意せねばならない。

#### 4.4.2 緑感層の特性比較

ここでは比較の目的なので、緑感層の特性のみを扱うこととし、 $s$  を MTF が 50% となる時の空間周波数  $\nu$  (c/mm) から  $(1000/2\nu)^2$  ( $\mu\text{m}^2$ ) とし、その開口での G

濃度の RMS 粒状度をノイズが白色と仮定して、 $48 \mu\text{m}$  径の円形開口からの値を換算してしまう。粒状度はもちろん濃度に依存するが、MTF 特性も現像効果により濃度依存性を示す (図 11)。比較した製品は外型の Kodachrome 64, 当社の Fujichrome RFP (ISO 感度 50) である。化学的な画像処理の強さは、現像の進むほど大きいので、最終像の濃度の低い方で現像抑制が強くなるはずだが、外型の Kodachrome は中濃度域で現像抑制が弱くなっている。

なお、このデータはグレー露光に対する場合であり、より興味ある結果は単色露光の場合に得られると思われるが、今回は割愛する。

この  $s$  の値を用いて得た NS は図 12 のようになる。外型に比べて露光時の感光層の厚味が大きい Velvia が全濃度域で圧倒的に小さな NS を示している。鮮鋭度と粒状度は背反的に動き、前者を良くすれば後者は必然

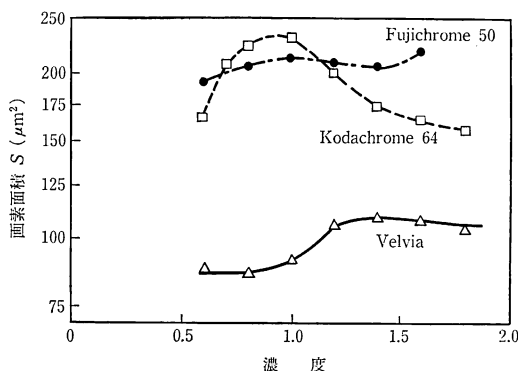


図 11 三種のカラーリバーサルフィルムの緑感層のグレー露光に対する最小画素  $s$  の値 ( $\mu\text{m}^2$ )

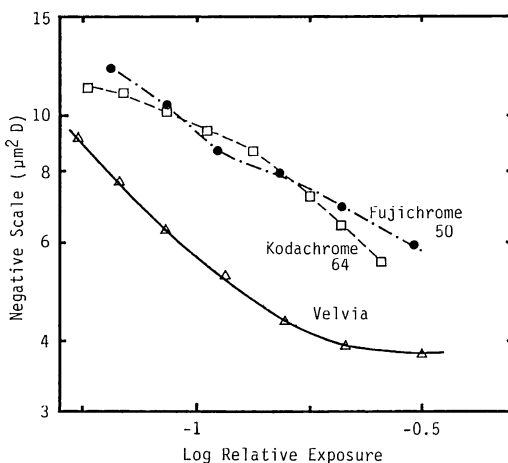


図 12 三種のカラーリバーサルフィルムの緑感層のグレー露光に対する NS の値 ( $\mu\text{m}^2 \cdot D$ )

的に大きくなるのが通例であったが、NS が小さいことは、この両面での改良を意味している。

### 5. おわりに

以上、最近のカラーリバーサルフィルムの高画質化というテーマで解説を行ったが、あらゆる分野において銀塩感材は刻々と進歩しており本稿で取り上げたカラーリバーサルフィルムはその一例であるご理解いただければ幸いである。

### 文 献

- 1) S. Bando, Y. Shibahara and S. Ishimaru: "Photographic silver halide emulsion containing double structure grains," *J. Imag. Sci.*, **29** (1985) 193.
- 2) C. R. Berry: "On the need to apply electromagnetic theory to optical behavior of photographic emulsions," *Photo. Sci. Eng.*, **17** (1973) 394.
- 3) G. Mie: *Ann. Phys.*, **25** (1908) 377.
- 4) S. Asano and G. Yamamoto: "Light scattering by a spheroidal particle," *Appl. Opt.*, **16** (1977) 2979.
- 5) S. K. Salib, J. J. Depalma and J. Gasper: "Specular optical density of diffusing media," *Photo. Sci. Eng.*, **18** (1974) 145.
- 6) 石丸信吾, 池田秀夫, 坂上 恵, 宮崎桂一, 平野茂夫, 玉野順一: "超高画質カラーリバーサルフィルム「ベルビア」の技術と性能について", *日本写真学会誌*, **55** (1992) 174.
- 7) T. H. James: *The Theory of the Photographic Process*, 4th ed. (Macmillan Publ. Co., Inc.) Chap. 21, p. 630.
- 8) F. H. Perrin: "What is the sensitivity of a photographic system?" *J. SMPTE*, **70** (1961) 515.