

解説

銀塩カラー写真の画質

久保 走一

千葉大学工学部画像工学科 〒260 千葉市弥生町 1-33

(1988年4月30日受理)

Image Quality of Silver Halide Color Photography

Souichi KUBO

Department of Image Science and Engineering, Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi-cho, Chiba 260

1. ま え が き

銀塩写真(以下、写真と略記)では、黑白写真は金属銀粒子が、カラー写真では色素のモトルが、それぞれきわめて薄いゼラチン層内に分散して光学濃度を形成し画像となる。これらの銀粒子あるいは色素モトルの大きさは数 μm から数十 μm の間に分布している。

このような写真画像の階調、色、粒状、鮮鋭さ等画質に関する評価尺度については従来から多くの記述がある^{1,2)}。これらの記述は主として客観的評価尺度に関するものであるが、写真画像の画質評価は最終的に主観評価に委ねられるべきもので、客観評価と主観評価との対応を常に注目する必要がある³⁾。

本稿では、カラー写真の画質について客観評価と主観評価の関係、カラー写真をデジタル画像として取り扱うことによるカラースチルビデオ画像との比較、等に関して記述する。

2. カラー写真の画質要因

2.1 濃度、色濃度などの定義

写真画像の画質に関する客観的評価パラメーターを表1に示した。表に示されたパラメーターは全て濃度を基礎としている。写真感光材料に光(放射)が入力し、出力としての濃度を測定する場合、濃度(D)の定義は次式による。

$$D = -\log T, \quad T = I/I_0 \quad (1)$$

ここに、 T は透過率(または反射率 R を用いる)、 I_0 および I はそれぞれ試料に入射する光強度、試料を透過

あるいは反射した光強度である。

カラー写真像の色濃度は(1)式に関し分光条件を加え次式で定義される。

$$D_i = -\log \left\{ \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} P(\lambda) T(\lambda) T_{i_i}(\lambda) \bar{S}(\lambda) d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} P(\lambda) T_{i_i}(\lambda) \bar{S}(\lambda) d\lambda} \right\} \quad (2)$$

ここに、 i : 赤、緑、青のいずれか、 $P(\lambda)$: 濃度計の照明に関する分光分布、 $T(\lambda)$: 試料の分光透過率(または反射率 R)、 $T_{i_i}(\lambda)$: 濃度計に装着されたフィルターの分光透過率、 $\bar{S}(\lambda)$: 濃度計の受光器に関する分光感度分布である。(2)式からわかるように、カラー画像の濃度測定では分光条件が測定結果に影響する。カラー写真では感光乳剤層が3色(赤感光層→シアン発色、緑感光層→マゼンタ発色、青感光層→イエロー発色)に関する重層構造であることから、3層について総合的に測定される濃度すなわち積算濃度と各層について個々に測定される濃度すなわち解析濃度に分類される。(2)式で定義する濃度は積算濃度のうち3色フィルターを用いて測定する場合で、これを任意3色フィルター濃度と呼びカラー写真の濃度測定では最も一般的である。実用的には、評価の目的によりステータス A あるいは M などの分光条件が選択される⁴⁾。

2.2 入出力特性の評価

写真感光材料に対する入力を露光量 H ($\text{lx}\cdot\text{s}$)、出力を濃度とし、両者の関係すなわち入出力特性を直交座標上に表わしたものを D - $\log H$ 曲線と呼んでいる。図1(a)にカラーリバーサルフィルム、(b)にカラーネガフ

表 1 画質評価の客観的パラメーター

パラメーター	具体的な内容
階調度, 濃度, 輝度域など	$D\text{-log } H$ 曲線, 客観的調子再現曲線, 濃度ヒストグラムなど
鮮 鋭 度	解像力, アクュータンス, 広がり関数, 変調伝達関数, システム画質関数 (たとえば SQF など), 情報容量など
粒 状 度	RMS 粒状度, セルヴィン粒状度, カリエ係数, 自己相関関数, ウィナースペクトラムなど
再 現 色	色度座標 (CIE $x, y, z, u, v, w, u', v', w'$ など), 色差, 色濃度
そ の 他	検知量子効率, 情報感度, エントロピーなど

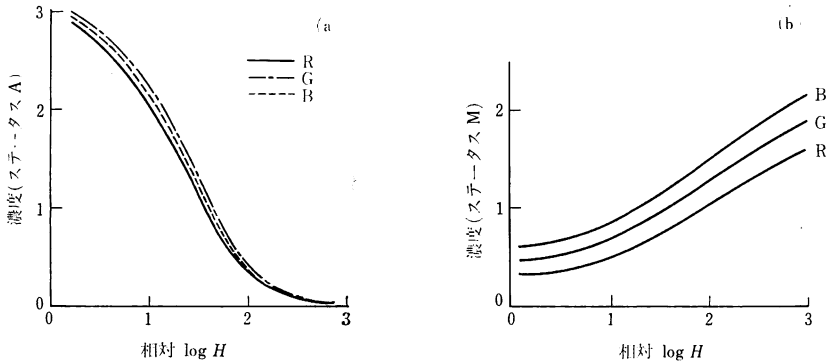


図 1 (a)典型的なカラーリバーサルフィルムの $D\text{-log } H$ 曲線, (b)典型的なカラーネガフィルムの $D\text{-log } H$ 曲線

フィルムの $D\text{-log } H$ 曲線を示した。縦軸の色濃度は、(a)ではステータスA, (b)ではステータスMを用いている。

図 1(a) では曲線の平均傾斜で示される γ 値 (階調度の値) が 1.6 程度である。(b) の場合はカラー印画紙に対して適切な γ 値が選ばれているが、印画紙との総合 γ 値は(a)に比較して少し低い。この違いは、階調変換に関する主観評価が画像の観察条件によって異なることに対する補正の結果生じたものである。

2.3 鮮鋭度の評価

画像の鮮鋭さの程度を表す客観的パラメーターには解像力, アクュータンス, MTF (modulation transfer function, 変調伝達関数) などが用いられる⁵⁾。MTF はそのなかでも最も多く用いられ, また MTF 曲線の囲む面積など鮮鋭度を表す単一評価尺度の提案が多くみられる。

MTF は光強度が空間的に正弦波分布をもつとき, その振幅 $A(u)$ を感光材料に入力として与え, 現像後の濃度振幅から導かれる有効露光の振幅 $A'(u)$ を出力として計算される変調度 M ,

$$M(u) = A'(u)/A(u) \quad (3)$$

から得られる。ここに u は空間周波数である。写真感光

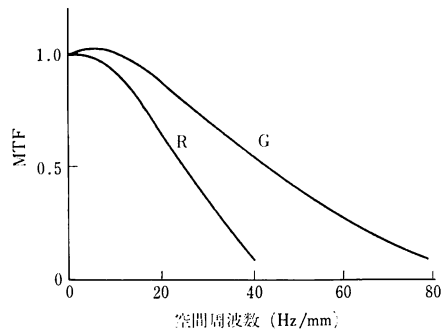


図 2 典型的なカラーフィルムの MTF 曲線

材料の MTF 曲線を図 2 に示した。

MTF 曲線から写真システムの鮮鋭度を求めるために, MTF 曲線が囲む面積 (S) を用いる提案がある。たとえば,

$$S = \int_0^{\infty} \text{MTF}^2(u) du \quad (4)$$

$$S = \int_0^{\infty} \text{MTF}(\log u) d(\log u) \quad (5)$$

$$S = \int_0^{\infty} \text{MTF}(u) \text{MTF}_v(u) du / \int_0^{\infty} \text{MTF}_v(u) du \quad (6)$$

MTF_v: 視覚系の MTF

などがある⁶⁾。

また、画像システムの各段階（レンズ、フィルム、印画紙など） i ごとに S_i を計算し、次式によりシステムの評価関数 CMT アキュタンス (cascaded modulation transfer acutance) を定義する提案⁷⁾、

$$\text{CMT} = 125 - 20 \log(200/S_i)^2 \quad (7)$$

あるいは Weber の法則から視覚系が空間周波数に関して対数的な効果を示すことに基づいて、画像システムの画像評価係数 SQF (subjective quality factor あるいは optical merit function) を次式で定義する提案⁸⁾、

$$\text{SQF} = k \int_0^{40} |\tau(u)| d(\log u) \quad (8)$$

at retina

τ : 網膜における光学伝達関数 (optical transfer function)

などがある。

2.4 粒状の評価

写真画像では銀粒子、色素モトルの粒状がノイズとなる。粒状を表わす客観的パラメータには RMS 粒状度 (root mean square granularity), 自己相関関数およびそのフーリエ変換であるウィナースペクトル (Wiener spectrum) などが用いられる⁹⁾。

RMS 粒状度は、均一露光で得られた濃度 D を微小開口の濃度計で走査し、その濃度変動の標準偏差 $\sigma(D)$ をもって定義する。カラー画像の粒状度は次式、

$$\sigma_v = a_1\sigma_r + a_2\sigma_g + a_3\sigma_b, \quad a_1 + a_2 + a_3 = 1 \quad (9)$$

のように定義される¹⁰⁾。ここに、 $\sigma_r, \sigma_g, \sigma_b$ はそれぞれカラー画像を構成する色素シアン、マゼンタ、イエローに関する RMS 粒状度、 a_1, a_2, a_3 は各色素の CIE-Y の値により定まる係数である。

3. 写真画像のデジタル的取扱い

3.1 点広がり関数の定義と画素

写真感光材料に点光を入力したと仮定し、感光乳剤層中に拡散した光によって生じた写真像が隣り合う入力と相互に情報をクロストークすることなく独立した存在と

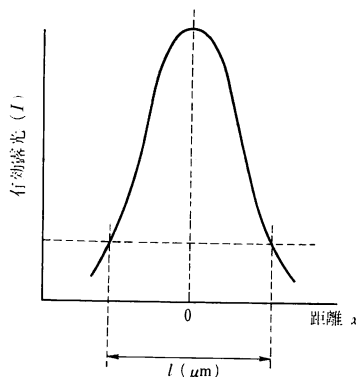


図3 線広がり関数に基づいて画素の一边 l を求める一例

なりうる最小面積を考えれば、それを画素に対応させることができる。写真感光材料に対してエッチ露光を与え、平面上の位置 x について測定される濃度 $D(x)$ から有効露光量の分布 $I(x)$ を求めるとエッチ広がり関数となる。この $I(x)$ は、線広がり関数 $A(x)$ の積分であるから、次式、

$$I(x) = \int_{-\infty}^x A(x_1) dx_1, \quad A(x) = dI(x)/dx \quad (10)$$

により計算することができる。画素に対応する最小面積を決定する一つの方法として、線広がり関数の広がり l から l^2 を用いる方法がある。 l は線広がり関数のプロファイルの最大値に対して適切な割合を定め、その実寸から決定される。図3に線広がり関数から l を求める一例を示した。

写真画像の画素数は、上述の手続によって l^2 を決定すれば容易に計算することができる。Altman らは線広がり関数の最大値の10%のレベルを l とし、写真感光材料の単位面積当りの画素数を計算した¹¹⁾。表2にその画素数および135フォーマット(24mm×36mm)当りの画素数を示した。

カラー写真画像の画素数は、多層構造の下の層ほど l の値が増し、最下層では最上層に比して著しく増大す

表2 写真フィルムの画素数

フィルムの名称	1 cm ² 当り画素数	135判当り画素数
Kodak Fine grain cine posi film	0.11×10 ⁶	0.95×10 ⁶
Kodak Royal-X Pan film	0.14×10 ⁶	1.20×10 ⁶
Kodak Plus-X Pan film	0.21×10 ⁶	1.81×10 ⁶
Kodak Panatomic X film	0.44×10 ⁶	3.80×10 ⁶
Kodak Recordak fine grain, 7456	0.44×10 ⁶	3.80×10 ⁶
Kodak Recordak micro-file, 5454	0.64×10 ⁶	5.33×10 ⁶
Kodak High resolution, 649 F	160×10 ⁶	1.38×10 ⁹

る。その結果、3感乳剤層における画素の総数は、ほぼ黑白感光材料と等しい。しかし、色情報は単に画素数と対応させられない意味をもつことに留意する必要がある。

通常のサイズのカラープリント (74 mm×108 mm) を明視の距離から観察するとき、約 300 万画素ないと視覚系の特性から考えて満足できない。写真画像は表 2 に示されるようにこの要求を満たすことができる。

一方、最近のビデオスチルカメラの撮像素子は 38 万画素 (780H, 490V) である¹²⁾。1 素子で 3 色分解を行なう場合、写真画像に対して 1/10 の画素数となる。

3.2 写真画像の階調数

写真画像を構成する画素に表わすことのできる濃度レベル数は RMS 粒状度を考慮すると決定される。すなわち、写真感光材料の濃度域を、それぞれの平均濃度レベル (\bar{D}) ごとに標準偏差を考慮した区分を考えることにより、分割することができる。図 4 にその例を示した。

図は D -log H 曲線を次式、

$$\bar{D}_{i+1} = \bar{D}_i + \sigma(\bar{D}_i) + \sigma(\bar{D}_{i+1}), \quad i=0, 1, 2, 3 \quad (11)$$

の間隔で分割したものである。この処理により DDL (識別可能濃度レベル, distinguishable density level) の数が求まる。また、DDL に対応する DEL (識別可能露光レベル, distinguishable exposure level) の数を定めることができる。

黑白フィルムに関する DEL の数を Lehmbeck は表 3 のように示した¹³⁾。

カラーフィルムの DEL の数は、イエロー発色層 13~15、マゼンタ発色層 18~20、シアン発色層 20~22 程度と考えてよい。

3.3 写真感光材料の情報容量

写真感光材料の情報容量を計算することは Jones¹⁴⁾, Shaw¹⁵⁾, McCamy¹⁶⁾, Altman¹¹⁾, Lehmbeck¹³⁾ らの報告がある。写真画像の情報量をデジタル的に取り扱って計算する場合、前項で記述した画素 (線広がり関数) および DEL が用いられる。

写真感光材料の感光乳剤面上における均一な大きさの配列である線広がり関数の単位面積当りの個数 N , DEL の数 M を基礎に情報容量 H は次式

$$H = N \log_2 M \quad (12)$$

により表わすことができる。これは通信系における情報容量、

$$H = N \log_2 (P_s/n^{-1}) \quad (13)$$

に対応する。ここに、 N : 発信されるメッセージの数、 P_s : 系の信頼度、 n : 通信可能なメッセージの数である。

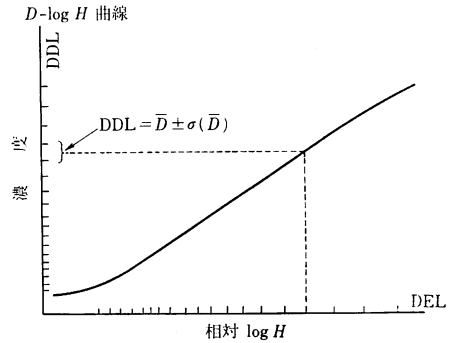


図 4 識別可能濃度レベル (DDL) と識別可能露光レベルとの関係

表 3 写真フィルムの DEL (識別可能露光レベル) 数

フィルムの名称	DEL の数
Kodak Royal-X Pan film	14
Kodak Plus-X Pan film	37
Kodak Fine grain posi film	80

(13)式を写真感光材料の測定尺度に置き換えると、次式のように書き換えられる。

$$H = S^{-1} \log_2 (r/Q^{-1}) \quad (14)$$

ここに、 $S: l^2$ (画素の面積)、 $Q: S$ を測定開口として走査した結果得られた RMS 粒状度を基に分割された DDL に対応する DEL の数、 r : DEL の各段階における中心値が、それに対応する DDL の段階に収まる信頼度、RMS 粒状度の定義に標準偏差 1σ を用いた場合 $r = 0.68$ となる。

筆者の計算による情報容量を表 4 に示した。

表からわかるように、カラーフィルムの情報容量は 3 発色層を合計して黑白フィルムとほぼ等しくなる。ごく最近のカラーフィルムでは、情報容量の数値は表 4 よりも高いものとなる。

上述の情報容量の計算は、たとえばディザ法を用いたハードコピーの情報容量に直ちに应用できるので、写真画像とハードコピー画像の比較が容易である。

3.4 画素数, 階調数, 画質

次田¹⁷⁾は、画素数および階調数が主観的画質に及ぼす影響について興味ある記述をしている。すなわち、カラースライドの画像をカラースキャナーによりデジタル化し、透過型のシミュレーション画像を作成、階調数を 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 画素数を $32^2, 64^2, 128^2, 256^2, 512^2, 1024^2$ となる組合せを行なった。これらの画像の画質を主観評価した結果、階調数に関してロ

表4 写真感光材料の情報容量

フィルムの名称	S^{-1} (画素/cm ²)	Q	H (bits/cm ²)
Kodak Tri-X film	2.99×10^5	20	1.16×10^6
Kodak Plus-X film	2.27×10^5	26	1.36×10^6
Kodak Panatomic-X film	3.82×10^5	25	1.57×10^6
Kodak Kodacolor II	{ イエロー層	13	1.09×10^6
	{ マゼンタ層	19	4.10×10^5
	{ シアン層	21	1.71×10^5

ング撮影のシーンでは約 16, クローズアップでは約 64 で画質が飽和した。また、画素数では両方のシーンに関して多いほど画質の向上が認められ、視覚系の解像力から予測される必要画素数よりも多い領域でなお画質の向上が認められたという。

写真画像の画質評価において、前述の DEL の数がふつう考えられるほど多くないにもかかわらず、鮮鋭な画像の主観的画質が高い値となることと関連させると、今後の画質設計の方向を示唆するものである。

4. ま と め

銀塩写真画像の画質評価に関する客観的パラメータは多く研究され、それらの主観評価との相関についても多くの報告がある。最近では、電子的に撮像素子を通して形成されるハードコピー画像が広く使用されようとしている。ハードコピーの材料も多く研究され、ステルピデオでは銀塩カラーペーパーまでが使用されるようになった。この時期において、銀塩写真画像をデジタル画像として取り扱い、他のシステムによる画像と比較することは新しいシステムの画質設計に対しても有用な知見を与えるものとなる。

文 献

- 1) T. H. James, ed.: *The Theory of the Photographic Process*, 4th ed. (Macmillan, New York, 1977) pp. 481, 517, 536, 592, 636.
- 2) 日本写真学会編: 写真工学の基礎 (銀塩写真編) (コロナ社, 東京, 1979) pp. 375-445.
- 3) R. W. G. Hunt: *The Reproduction of Colour*, 3rd ed. (Fountain Press, England, 1975) pp. 48, 165.
- 4) ISO 5/3: *Photography—Density Measurement—Part 3, Spectral Conditions* (1984); R. W. G. Hunt: *The Reproduction of Colour*, 3rd ed. (Fountain Press, England, 1975) pp. 240-246.
- 5) 日本写真学会編: 写真工学の基礎 (銀塩写真編) (コロナ社, 東京, 1979) pp. 416-418.
- 6) 佐柳和男: 応用物理, **25** (1956) 449-453.
- 7) R. G. Gendron: J. SMPTE, **82** (1973) 1009-1102.
- 8) E. M. Granger and K. N. Cupery: Photogr. Sci. Eng., **16** (1972) 221.
- 9) 日本写真学会編: 写真工学の基礎 (銀塩写真編) (コロナ社, 東京, 1979) pp. 425-430.
- 10) 三宅洋一: 画質の評価, 新映像システム懇談会報告 (光学工業技術協会 (現: 日本オプトメカトロニクス協会), 1985) pp. 50-51.
- 11) J. H. Altman and H. J. Zweig: Photogr. Sci. Eng., **7** (1963) 173-177.
- 12) 橋口住久: 日写誌, **51** (1988) 30-35.
- 13) D. R. Lehmbeck: Photogr. Sci. Eng., **11** (1967) 270-278.
- 14) R. C. Jones: J. Opt. Soc. Am., **51** (1961) 1159.
- 15) R. Shaw: Photogr. Sci. Eng., **6** (1962) 281.
- 16) C. S. McCamy: Appl. Opt., **4** (1955) 405.
- 17) 次田 誠: 階調段数・解像度と画質の関係, 電子写真学会編, 写真工業別冊 (写真工業出版社, 1988) pp. 86-89.