

デジタル画像とその再現性

東京工芸大学 工学部 画像工学科

犬井 正男

2003年11月7日

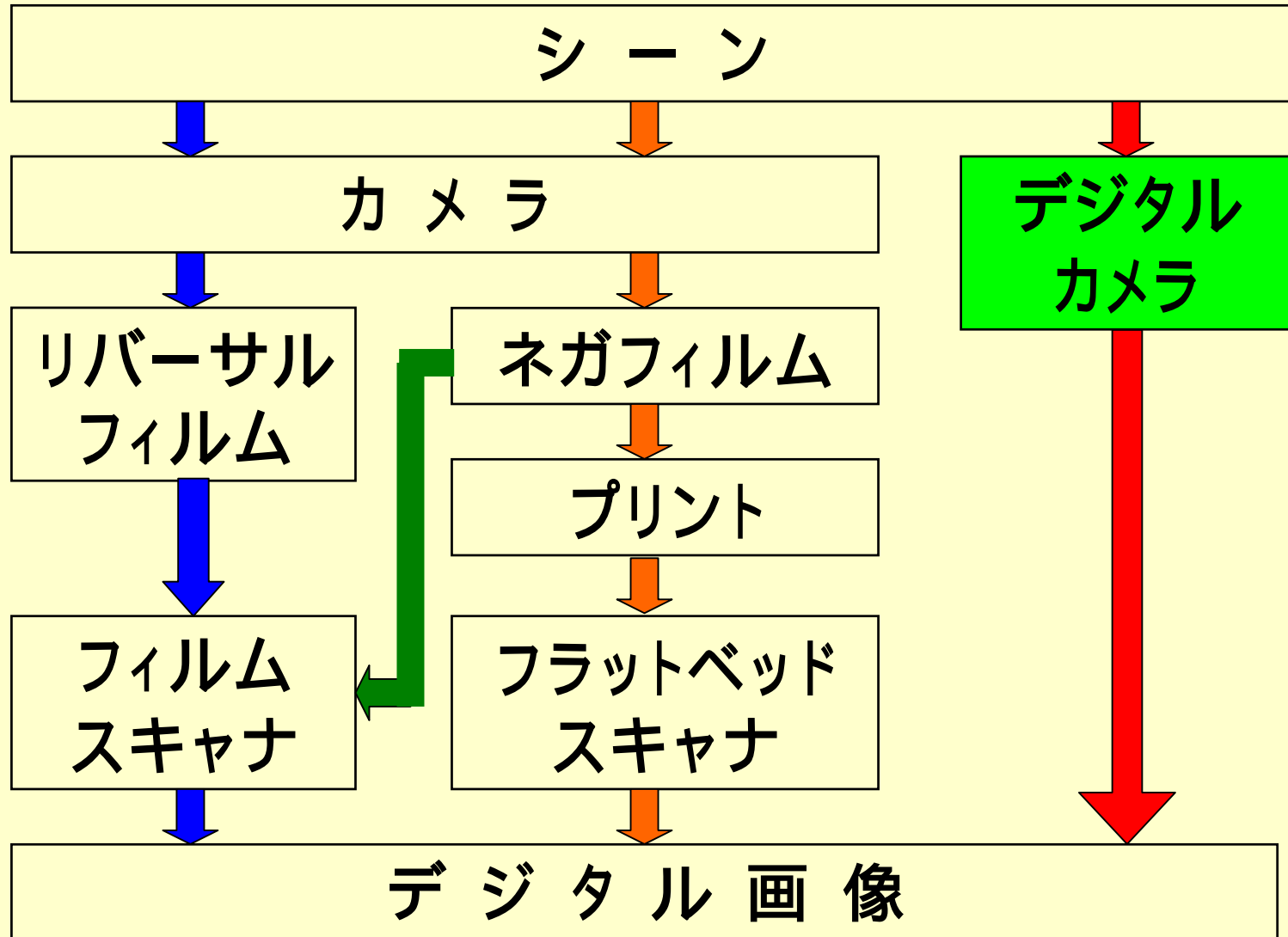
(社)日本印刷学会第111回秋期研究発表会

講演内容

- 1 . デジタル画像
- 2 . 階調の再現
- 3 . 色の再現
- 4 . 微細部の再現
- 5 . 均一性の再現
- 6 . デジタルカラープルーフ

1. デジタル画像

デジタル画像を得る方法



デジタル画像

画像は小さな点(画素)の集まり



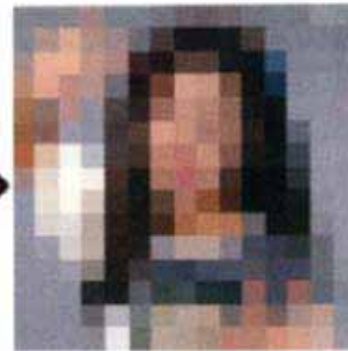
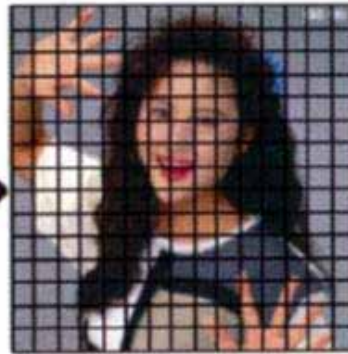
画像の各画素ごとに
赤、緑、青の明るさに
対応する値がある

画素値： 0 ~ 255
(8ビットの場合)

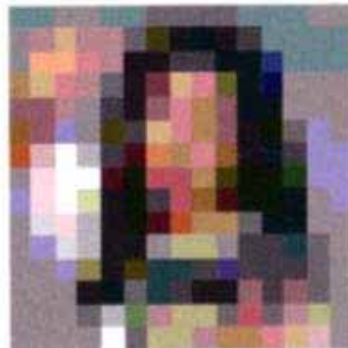
サンプリングと量子化



アナログ画像



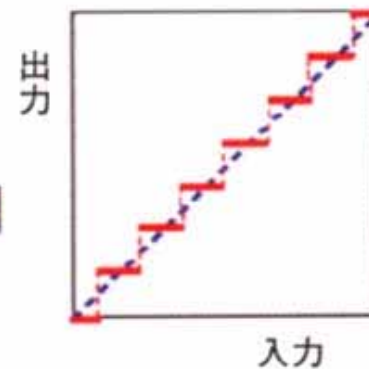
サンプリング



デジタル画像



量子化



デジタル画像の特徴と問題点

加工が自由

通信が可能

データ量膨大

画像の加工

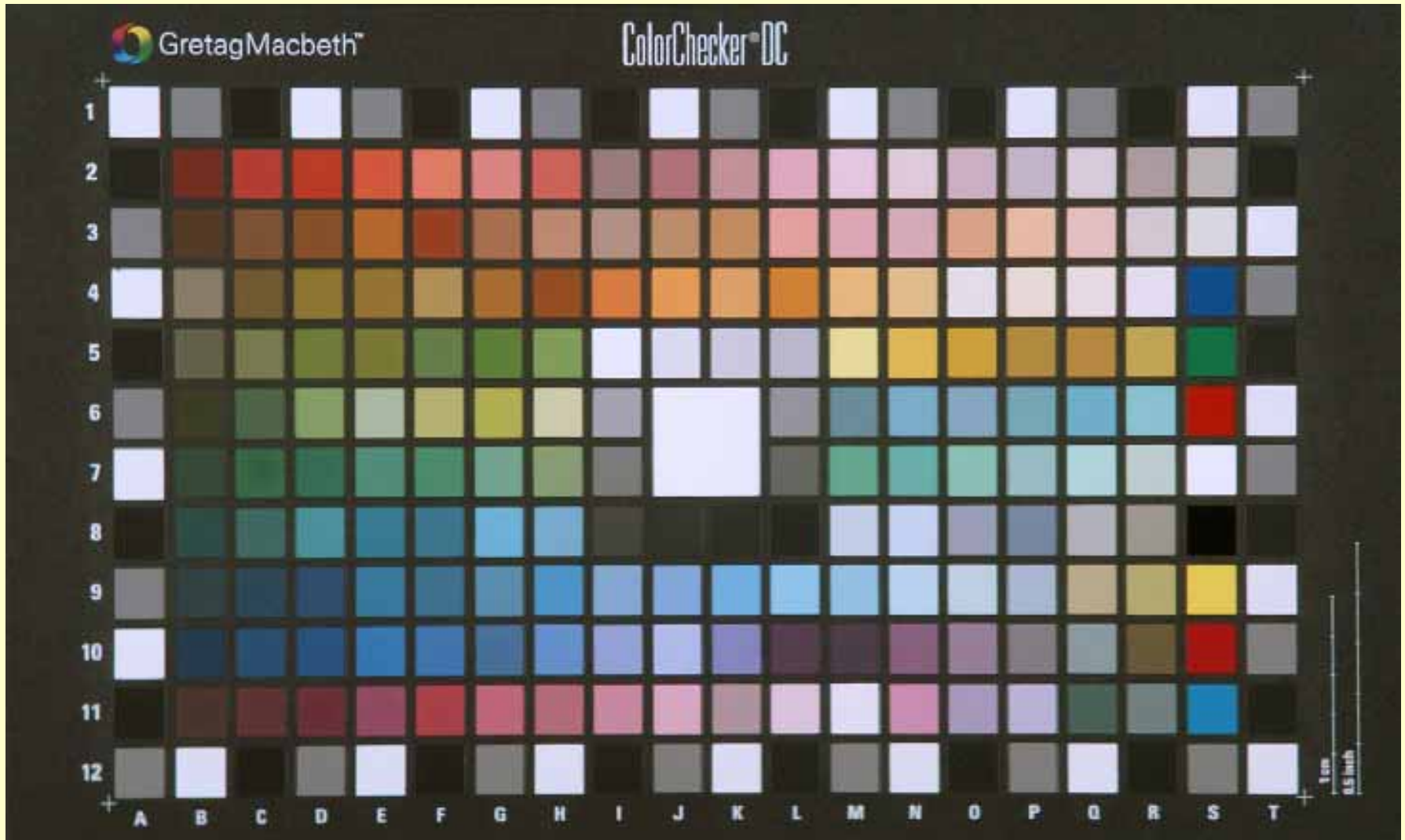
- ・画質：
階調
色
シャープネス
ノイズ
- ・作画処理
- ・文字入れ

2. 階調の再現

カラーチェッカー



カラーチェッカーDC

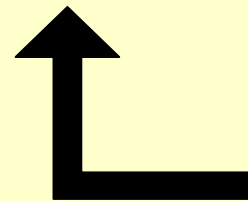
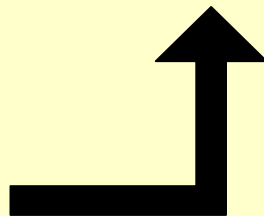


オリジナルの反射率と 画像のデジタル値

	視感反射率	デジタル値
white	90.0	214.1
N8	59.1	185.8
N6.5	36.2	148.3
N5	19.8	104.0
N3.5	9.0	53.8
black	3.1	21.0

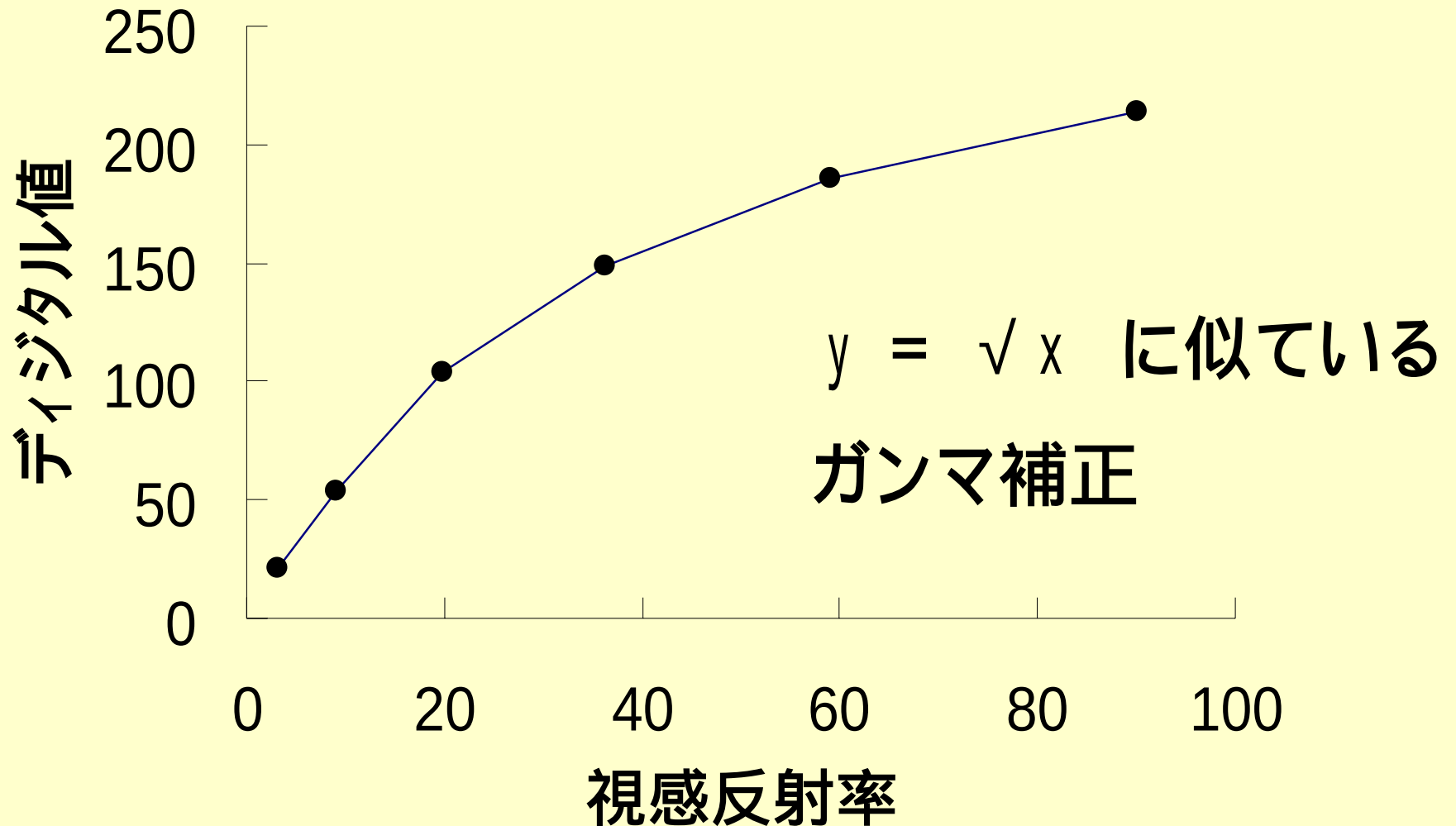


オリジナル



画像

階調変換特性



ガンマ特性

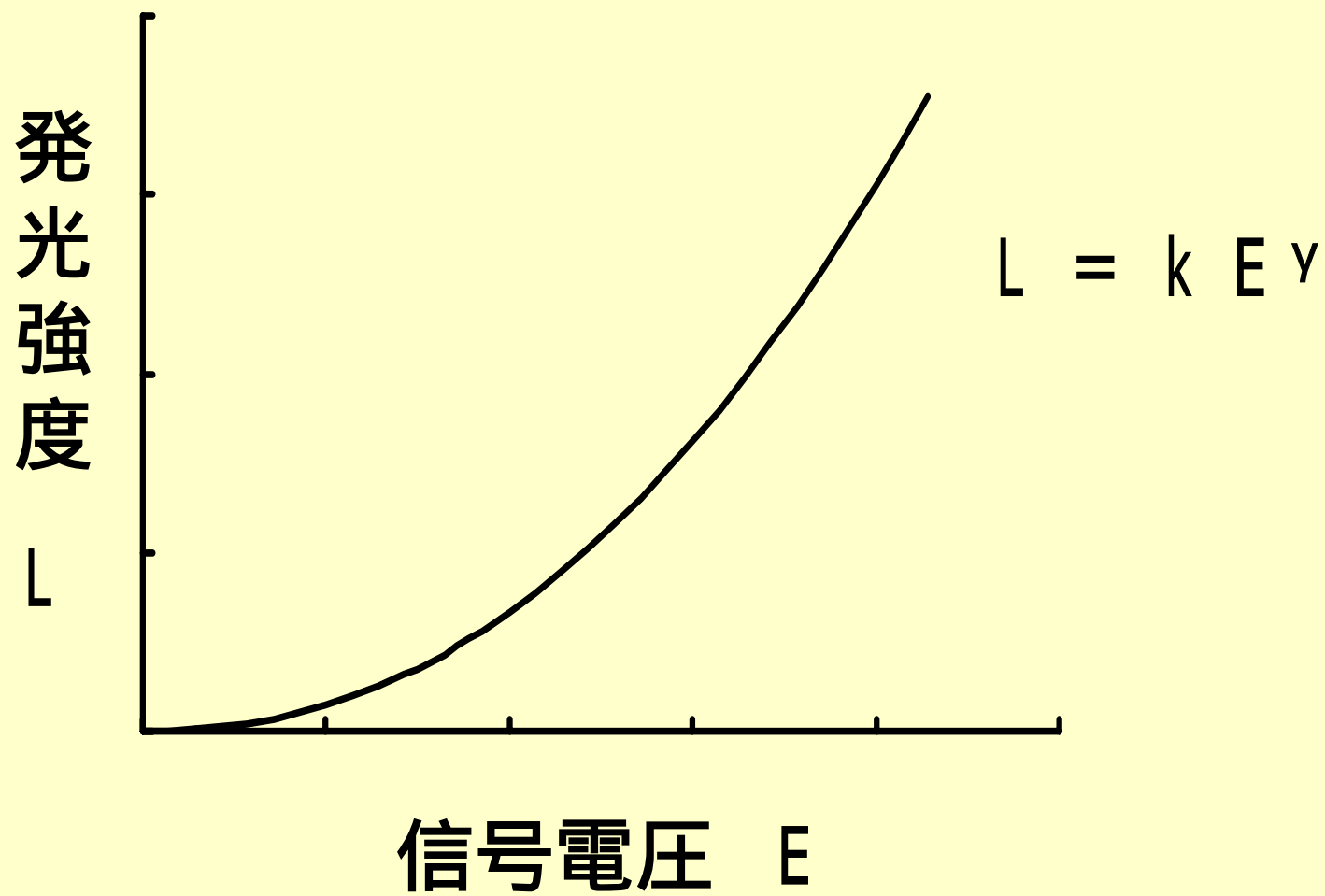
C R T (cathode ray tube, 陰極線管)
の発光特性

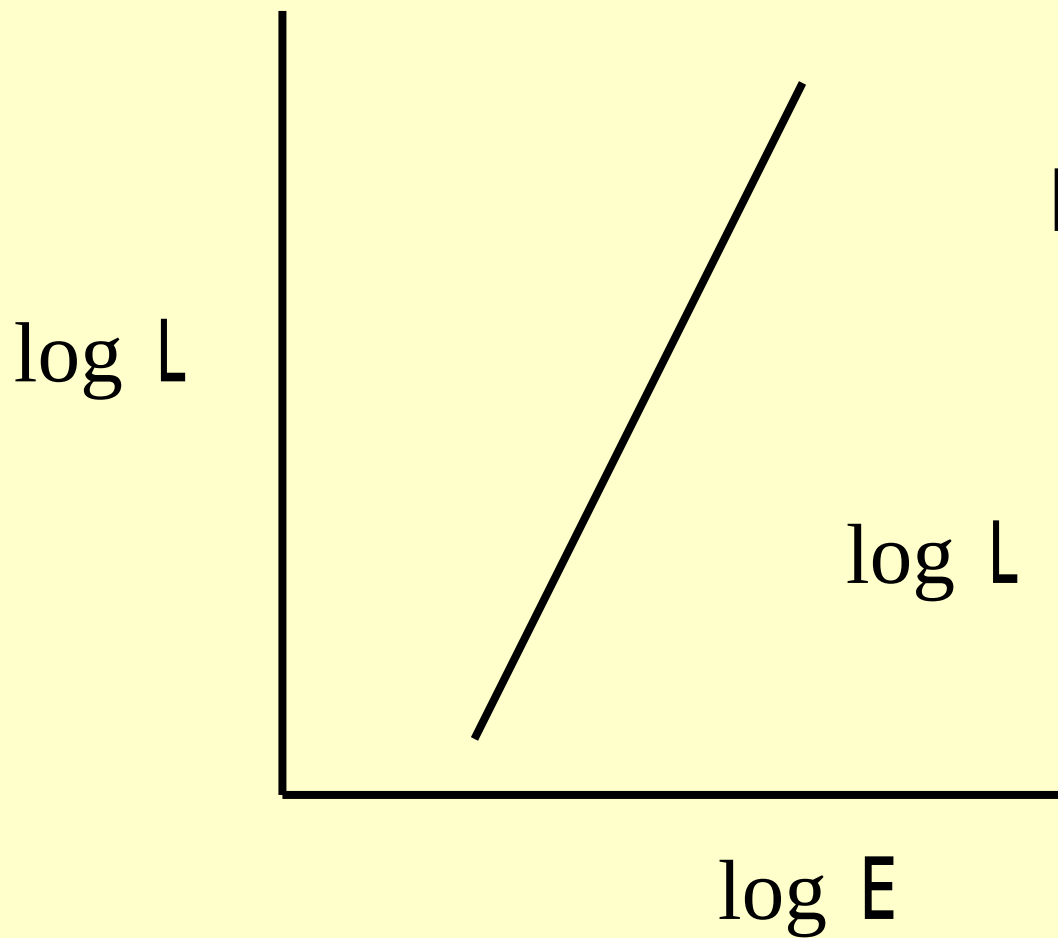
$$L = k E^\gamma$$

L : 発光強度 (輝度)

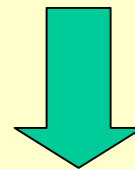
E : 信号電圧

γ : 定数 (NTSCでは2.2)





$$L = k E^{\gamma}$$



$$\log L = \gamma \log E + \log k$$

ガンマ補正

発光輝度を被写体輝度に比例した値にするには、テレビ信号を $1/\gamma$ 乗する必要がある

$$\begin{aligned} L &= k (E^{1/\gamma})^\gamma \\ &= k E \end{aligned}$$

$1/\gamma$ 乗するガンマ補正回路を送信側(テレビ局)に設置



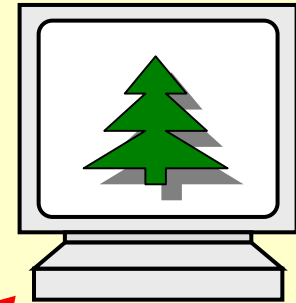
L_o



$$E_o = k_o L_o$$



$$E_t = E_o^{1/\gamma}$$



$$L_r = k_r E_t^\gamma$$

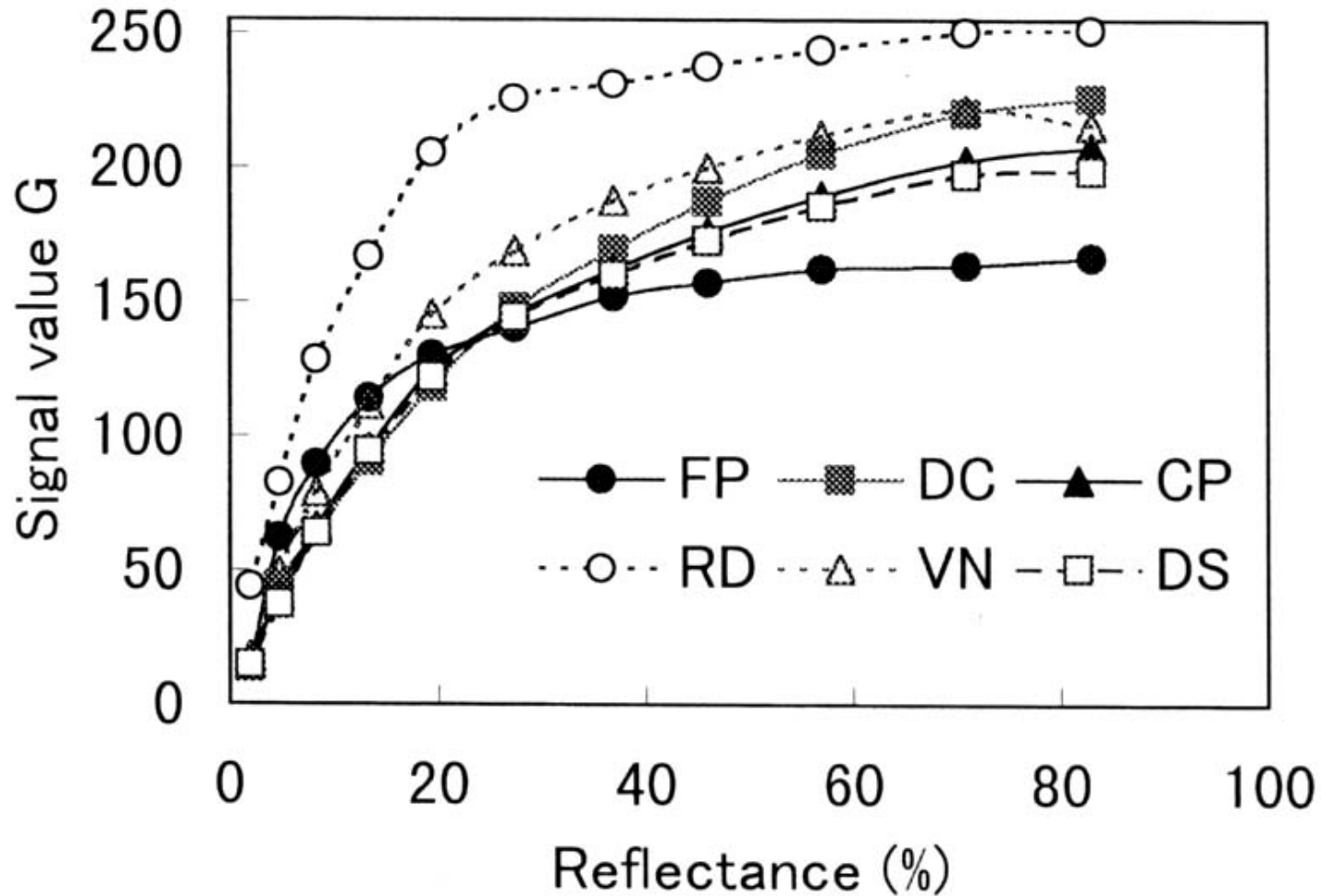
$$= k_r (E_o^{1/\gamma})^\gamma$$

$$= k_r E_o$$

$$= k_o k_r L_o$$

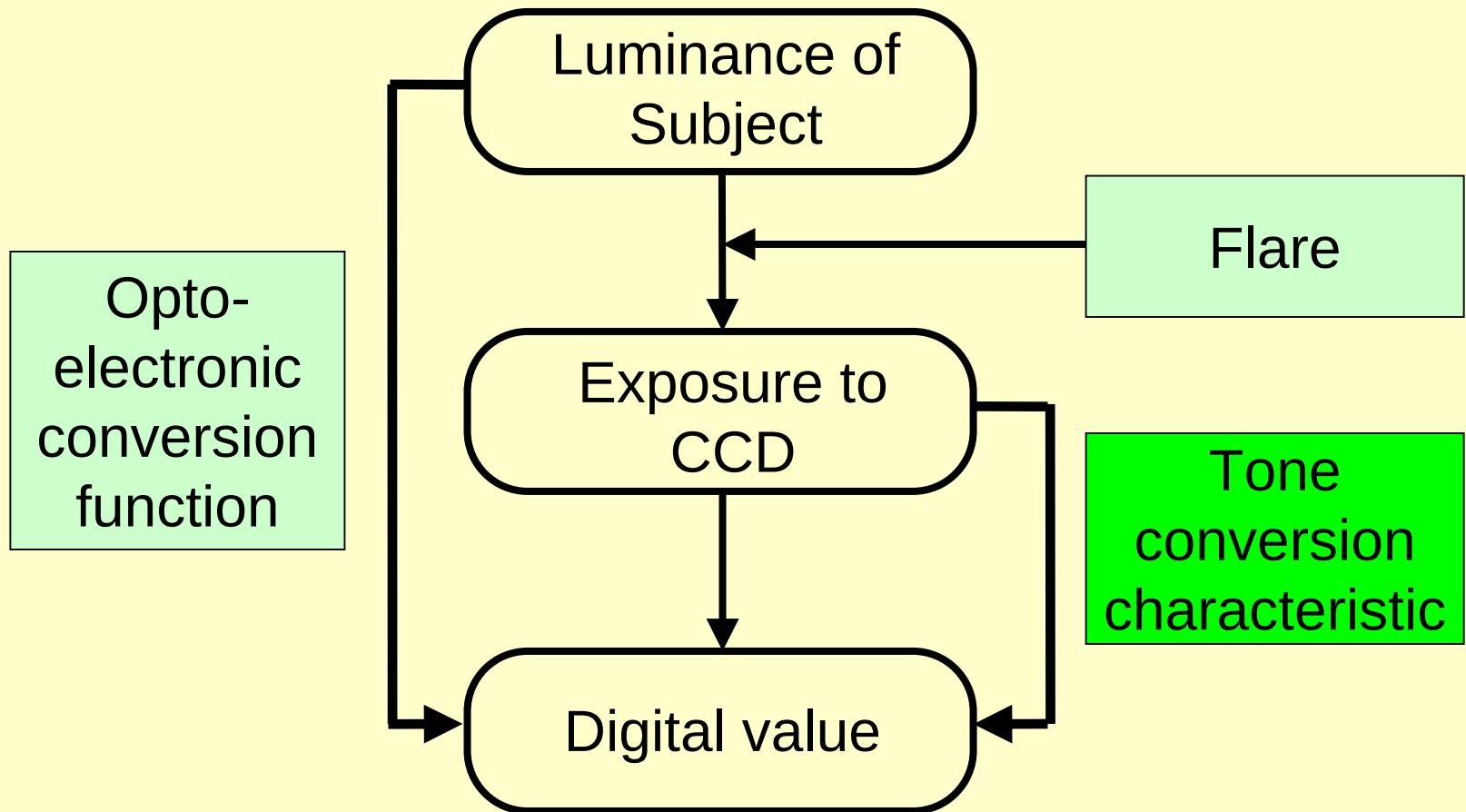
オリジナルシーンの輝度 L_o に
比例した輝度 L_r が再現

種々のデジカメの階調変換特性

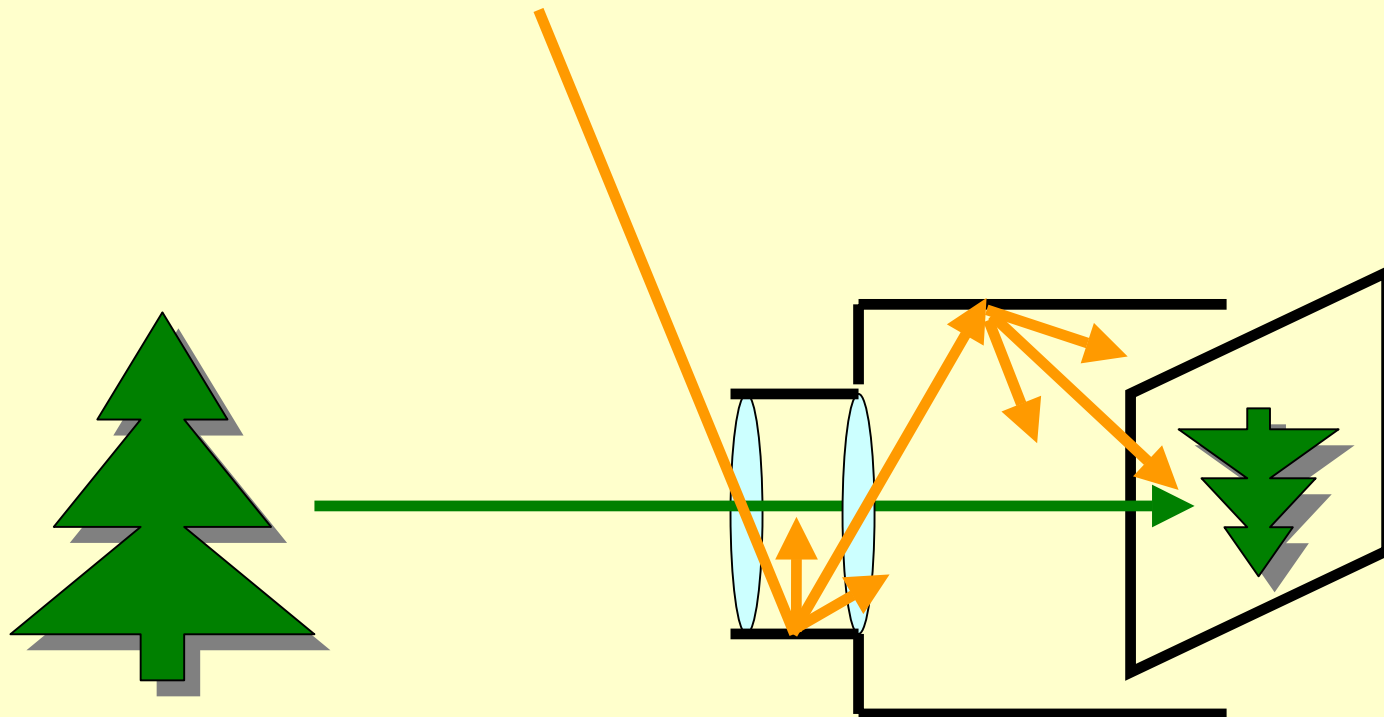


**A method determining
tone conversion characteristics
of digital still camera
from two pictorial images**

Tone conversion characteristic

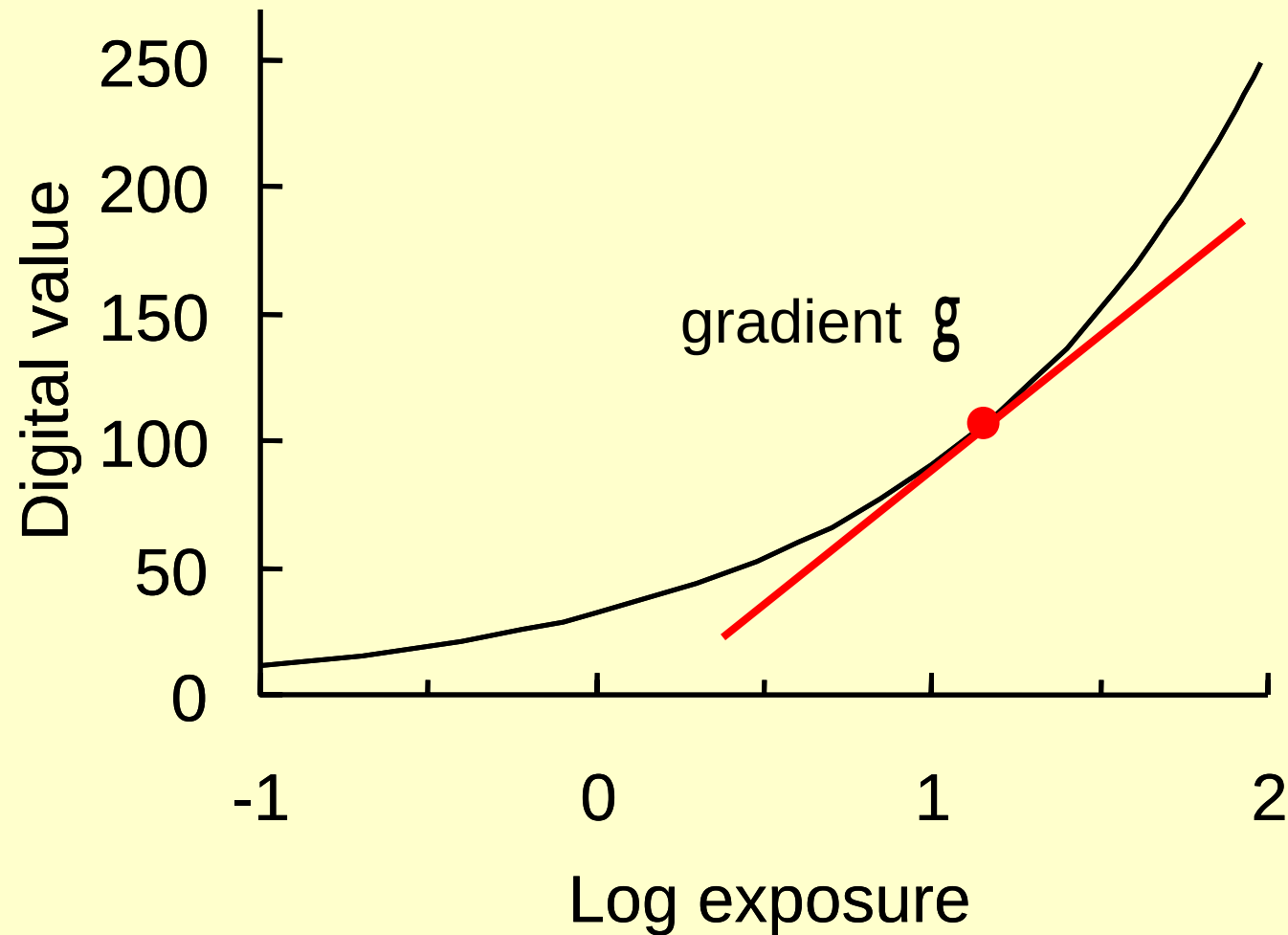


Flare



Camera

Gradient of tone conversion characteristic



Method of determining tone conversion characteristic

$$g = \frac{D}{H} \quad (1)$$

$$\log H = \int \frac{dD}{g} + C \quad (2)$$

Two images used in this study

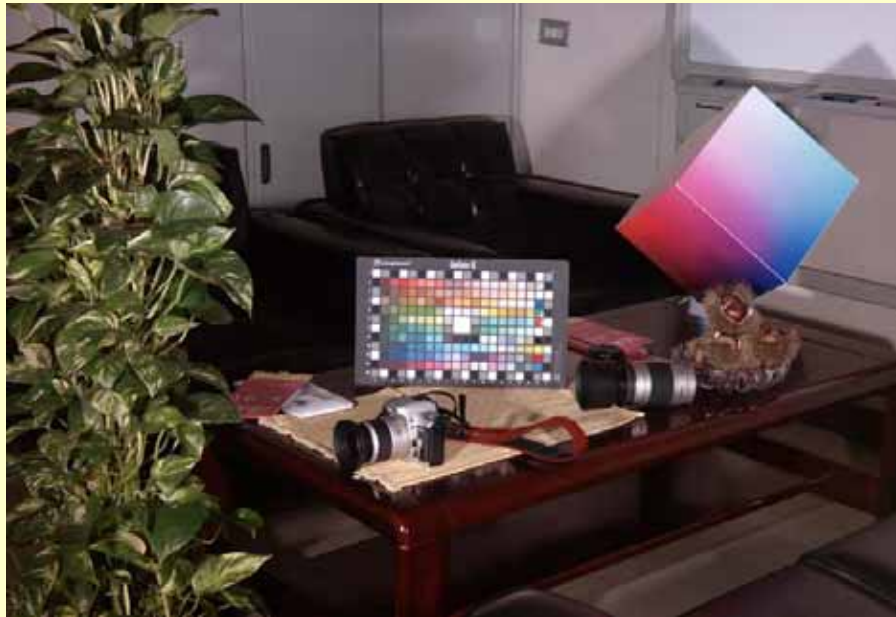
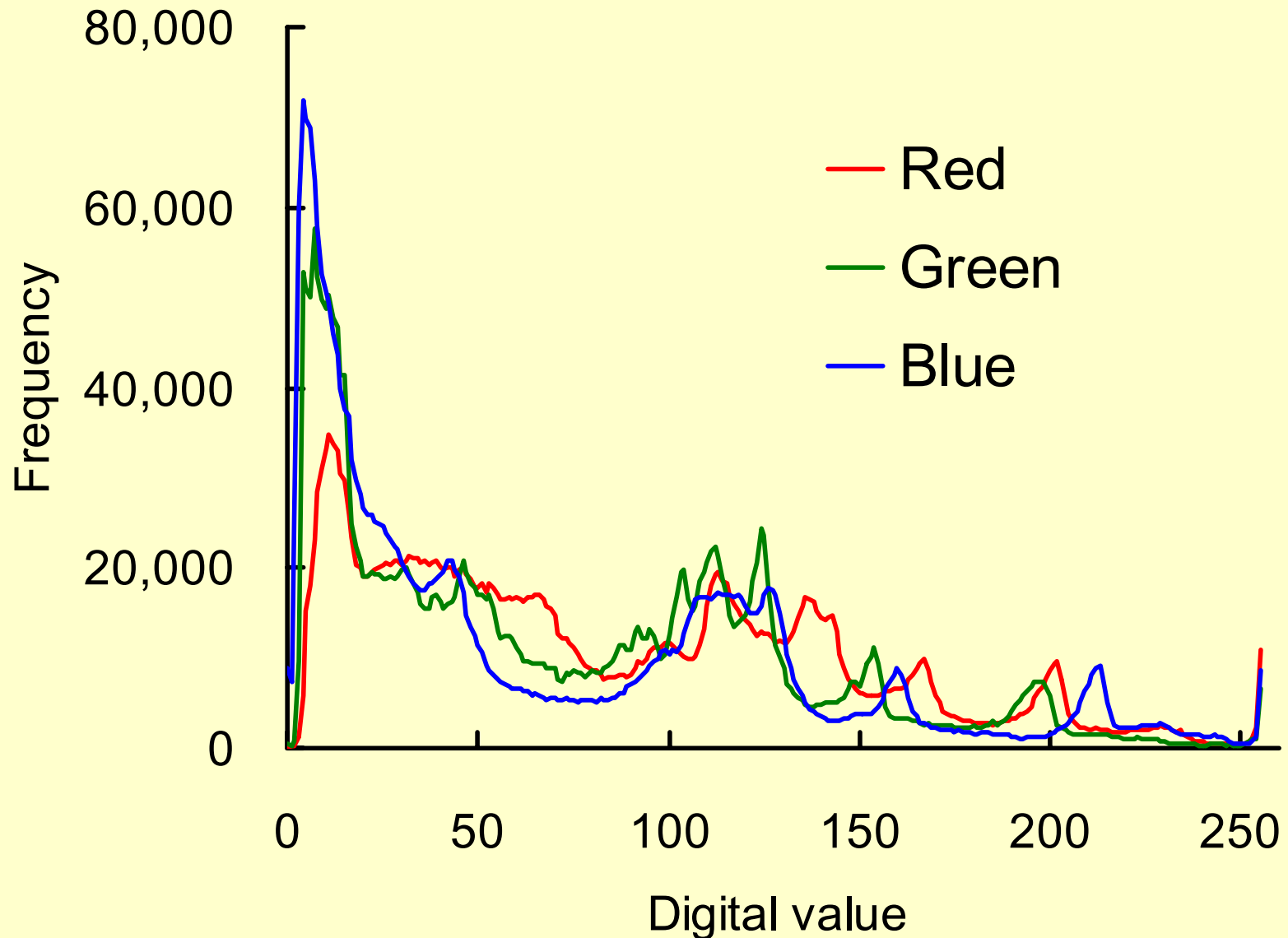


Image 1

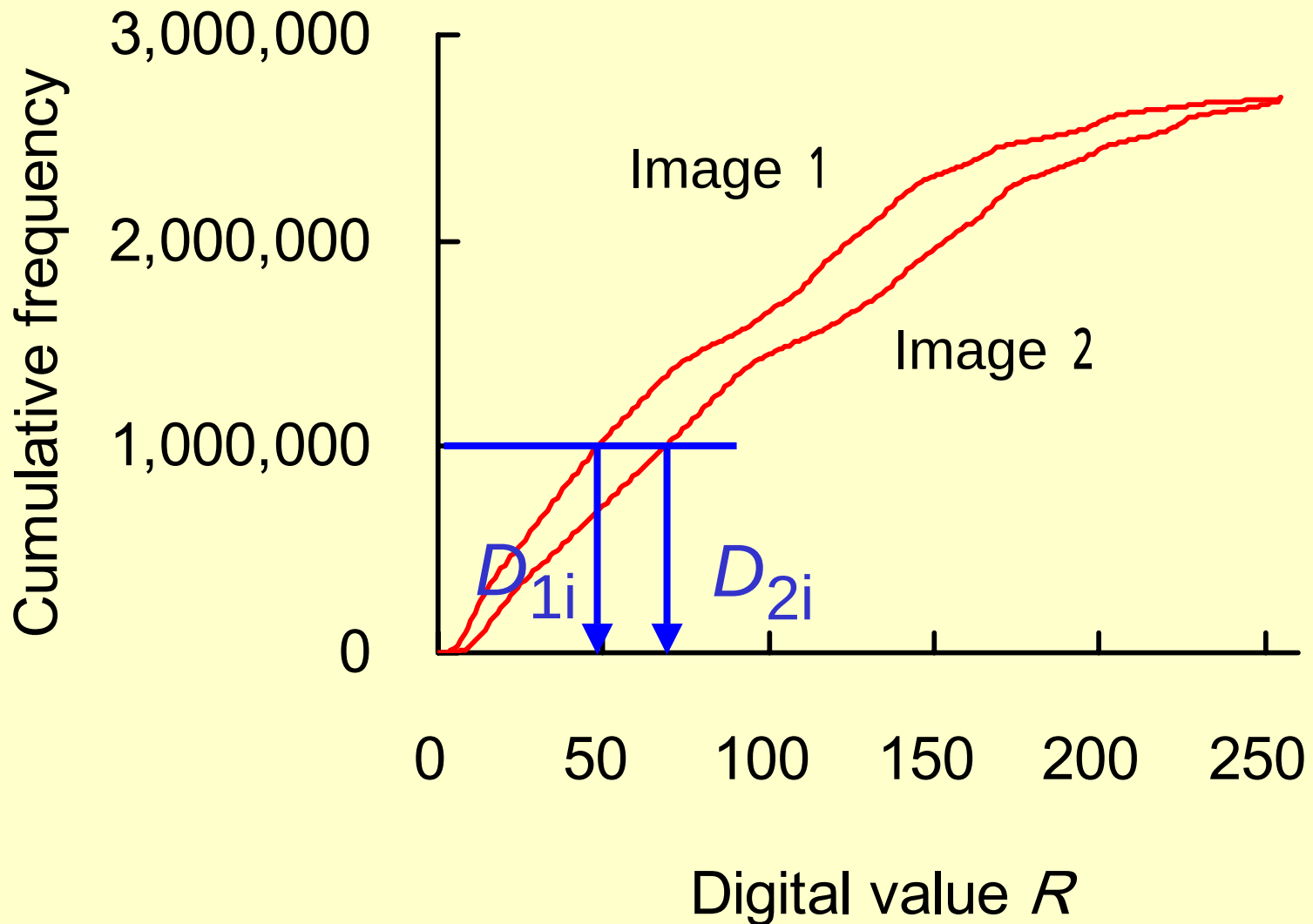


Image 2

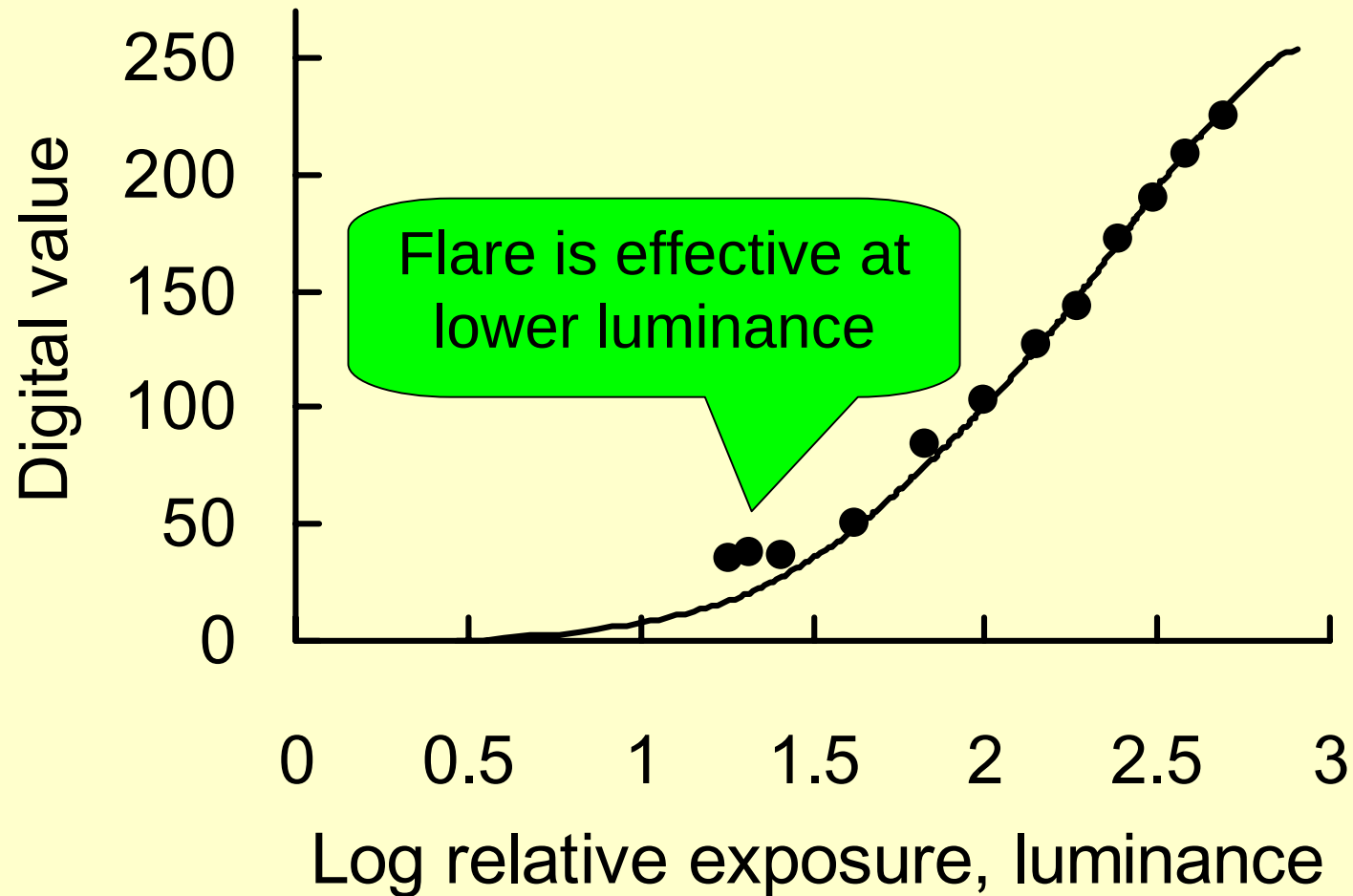
Histogram of Image 1



Determining digital value pairs from cumulative frequency



Calculated tone conversion characteristic and comparison to gray scale



3 . 色の再現

三刺激値(tristimulus value)

XYZの計算

$$X = k \int_{380}^{780} P(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int_{380}^{780} P(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int_{380}^{780} P(\lambda) R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

$$k = \frac{100}{\int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

$x\ y$ 色度座標

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

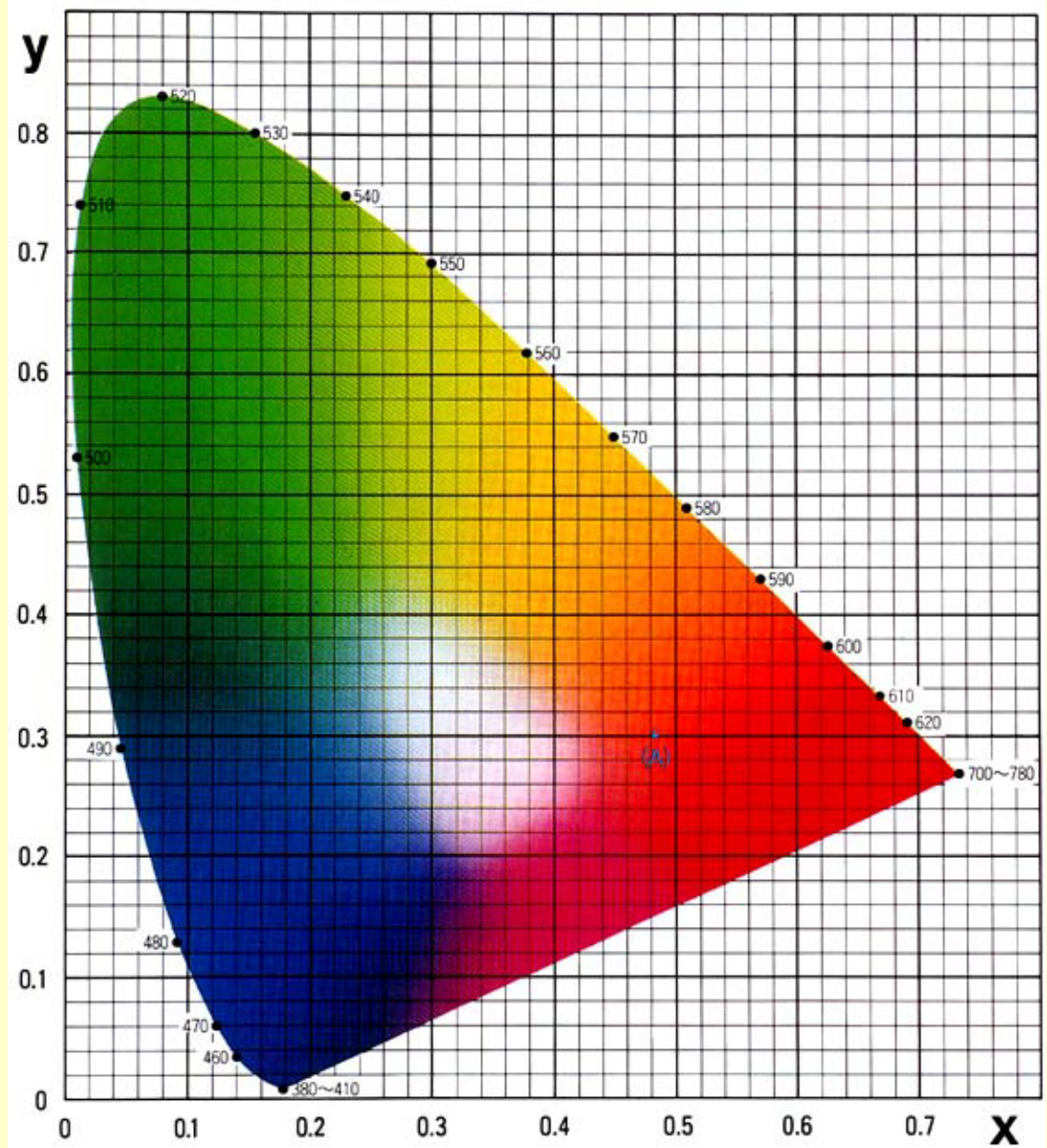
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$\left(z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad \because z = 1 - x - y \right)$$

xy色度図 xy diagram

スペクトル軌跡
(spectrum locus)

純紫軌跡
(purple boundary)



$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16$$

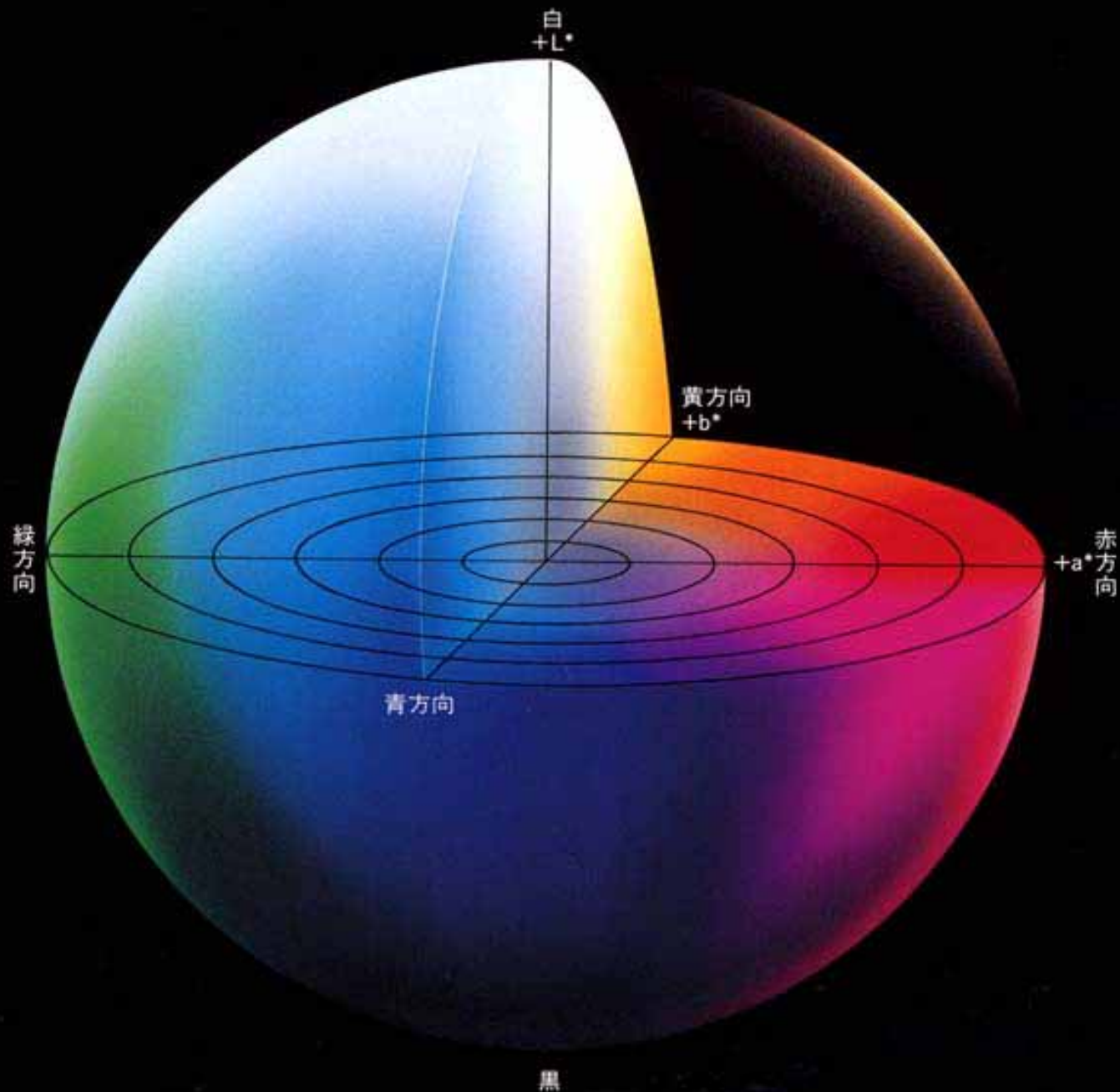
CIE 1976
L*a*b*色空間

$$a^* = 500 \left\{ \left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right\}$$

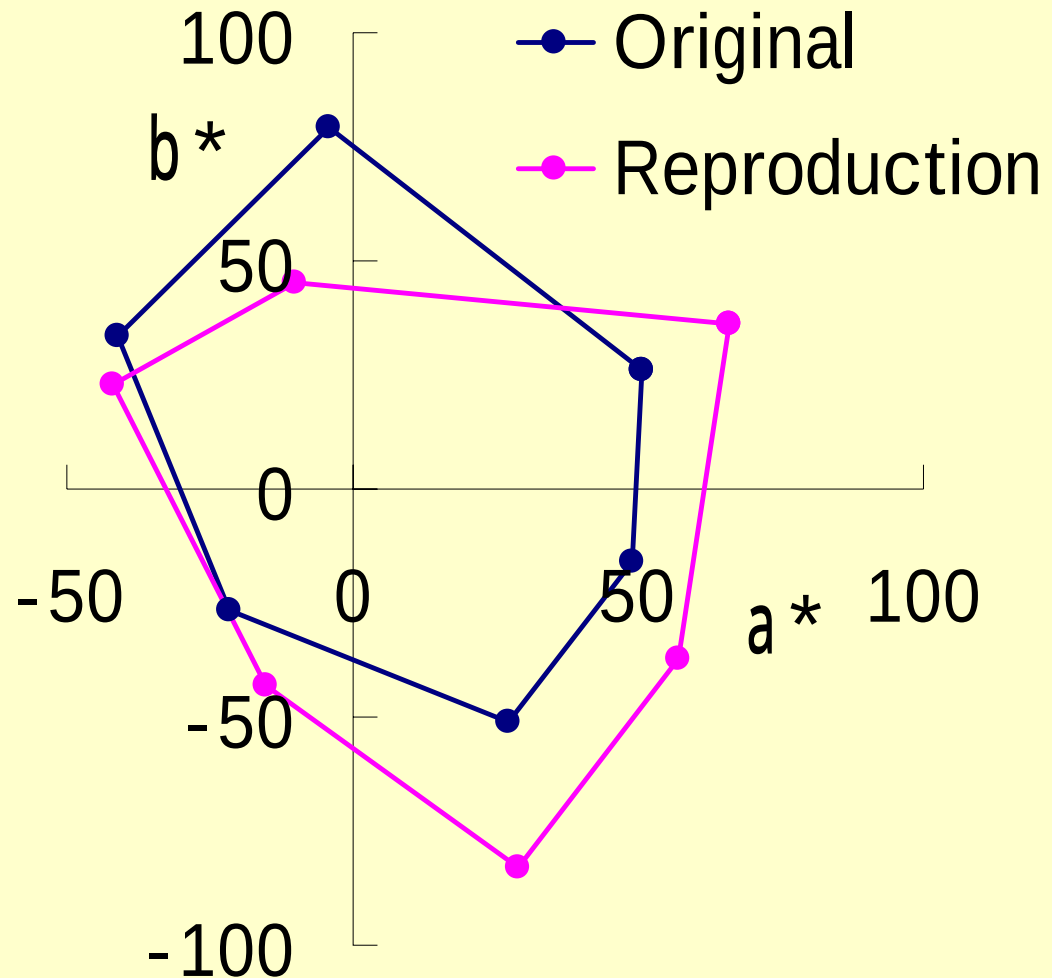
$$b^* = 200 \left\{ \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right\}$$

$$\frac{X}{X_n}, \frac{Y}{Y_n}, \frac{Z}{Z_n} \geq 0.008856$$

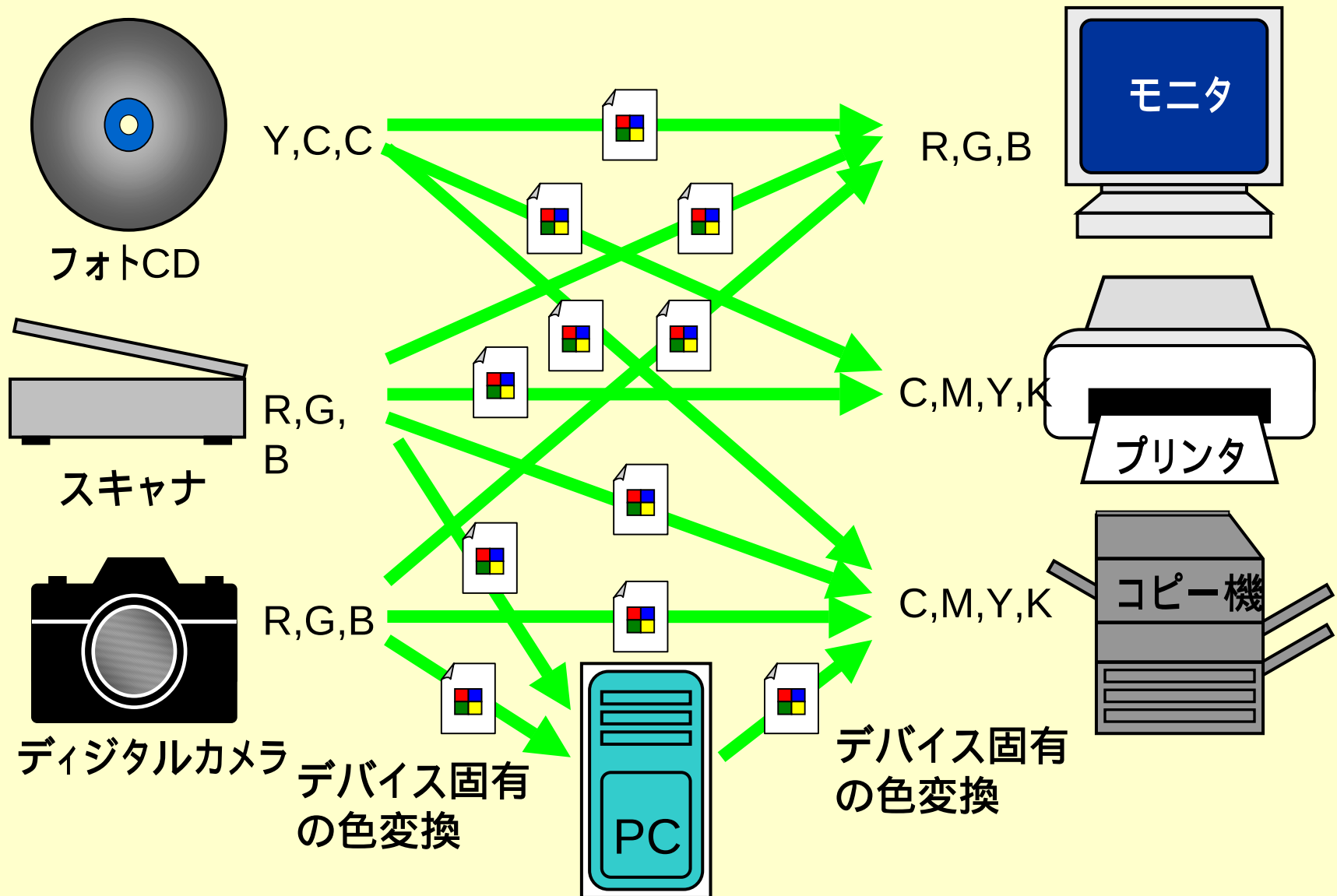
$L^*a^*b^*$ 色空間



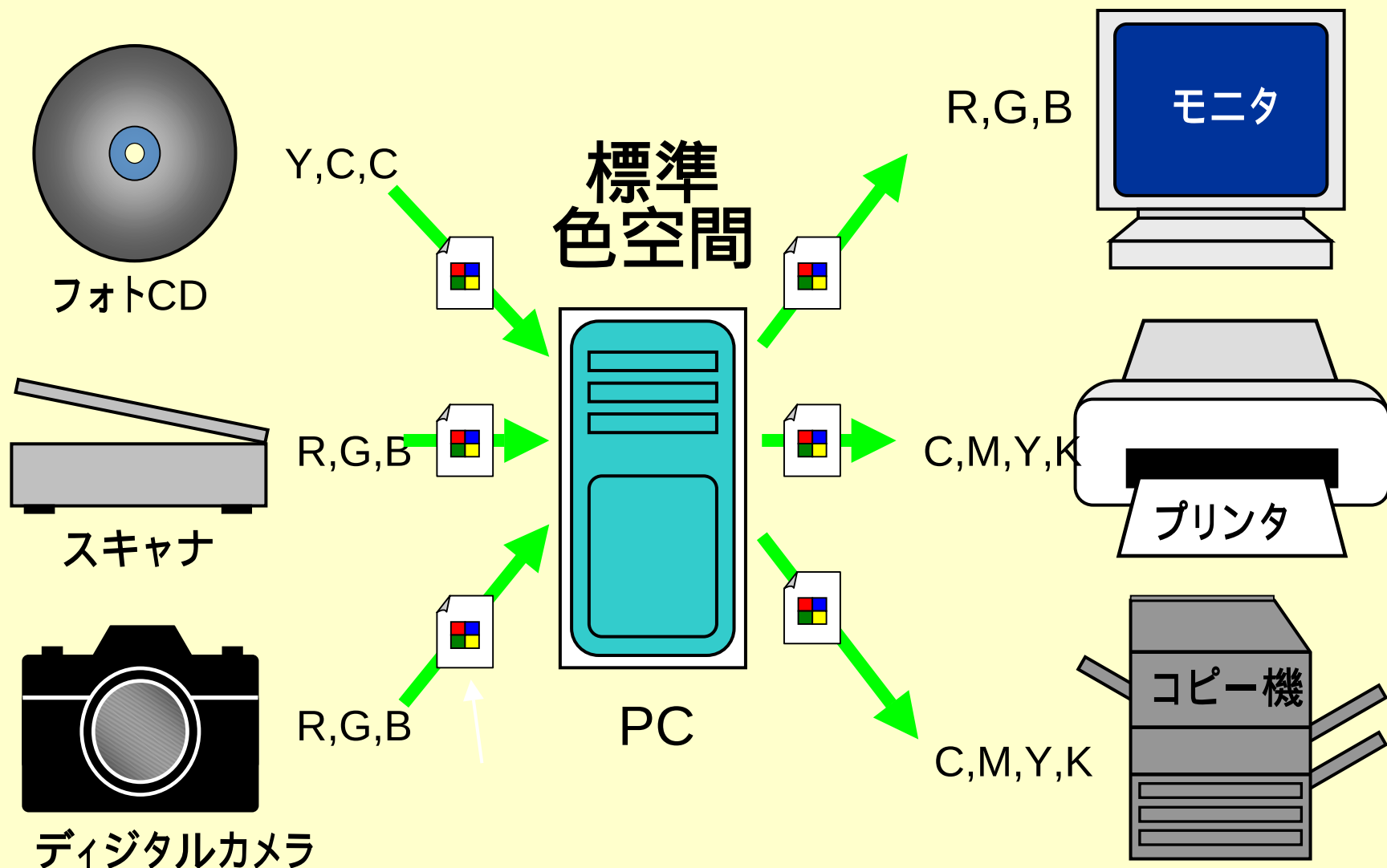
オリジナルと再現画像の測色値



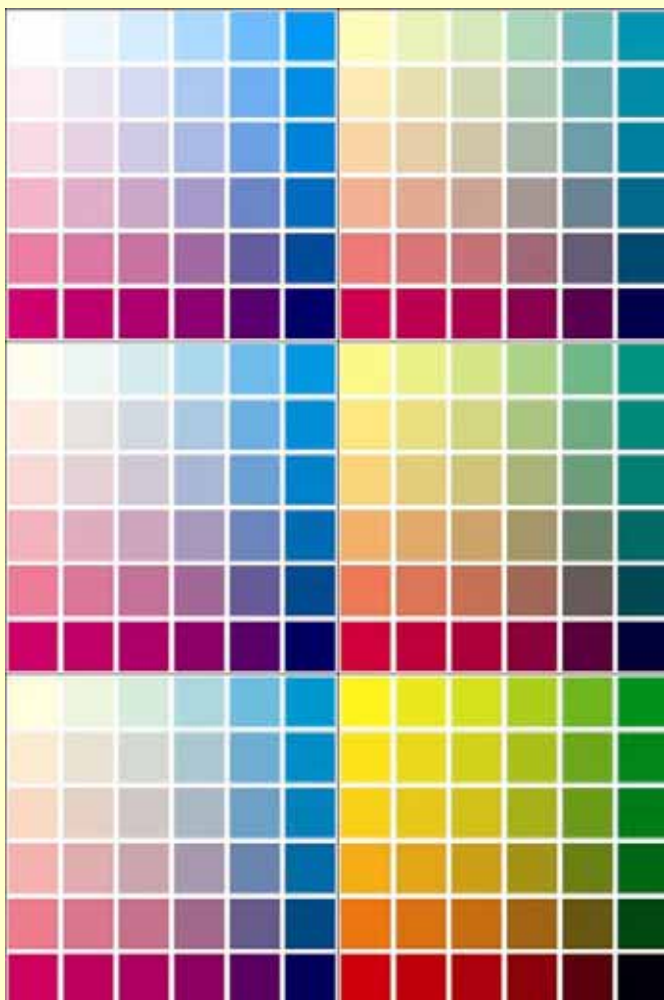
デバイスに依存する色再現



デバイスに依存しない色再現



カラーマネジメントシステム



3次元LUTと
3次元補間

フレアのため、
シーンごとに
LUTを作成する
必要がある

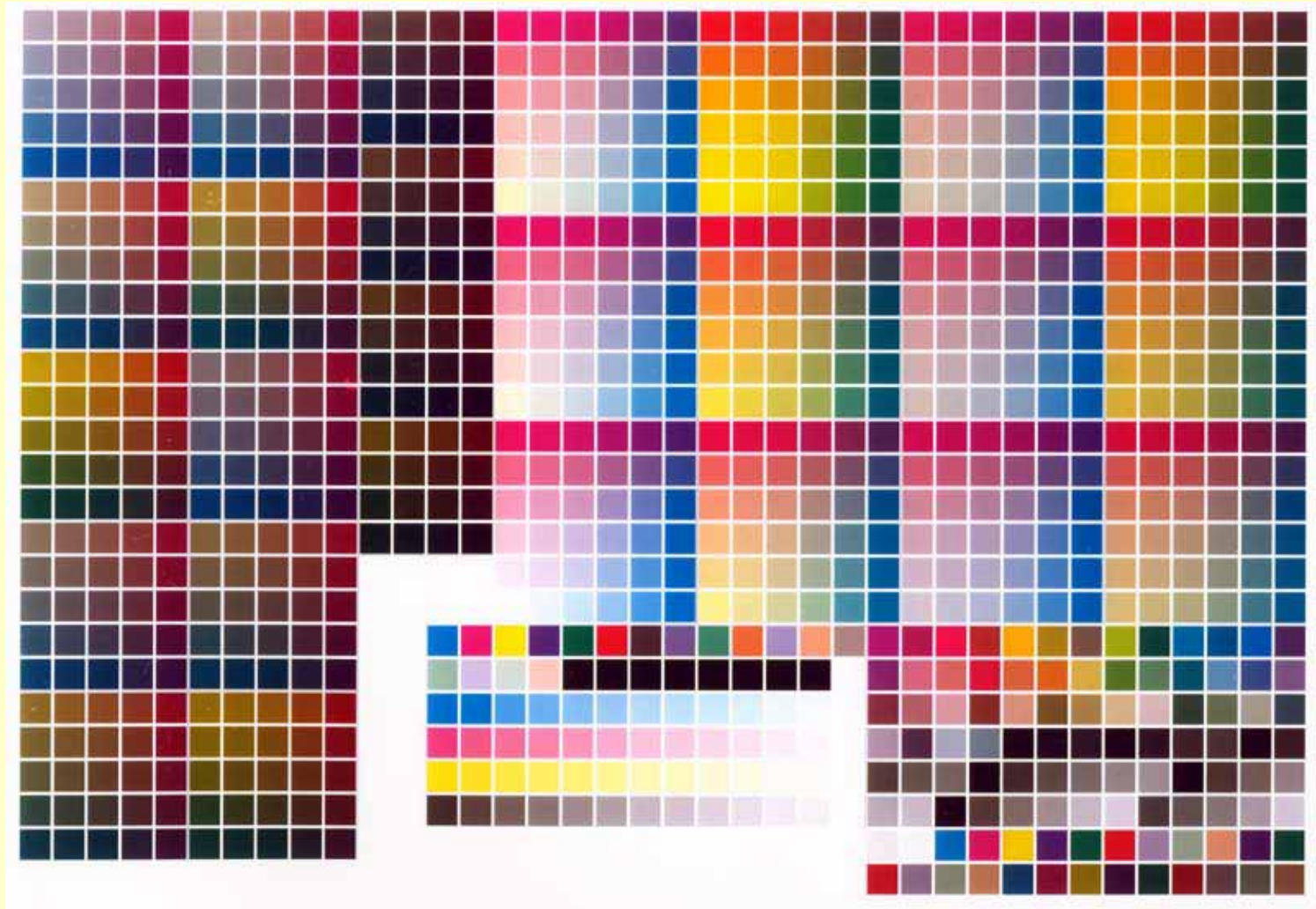
ISO 12641 トランスパレンシー



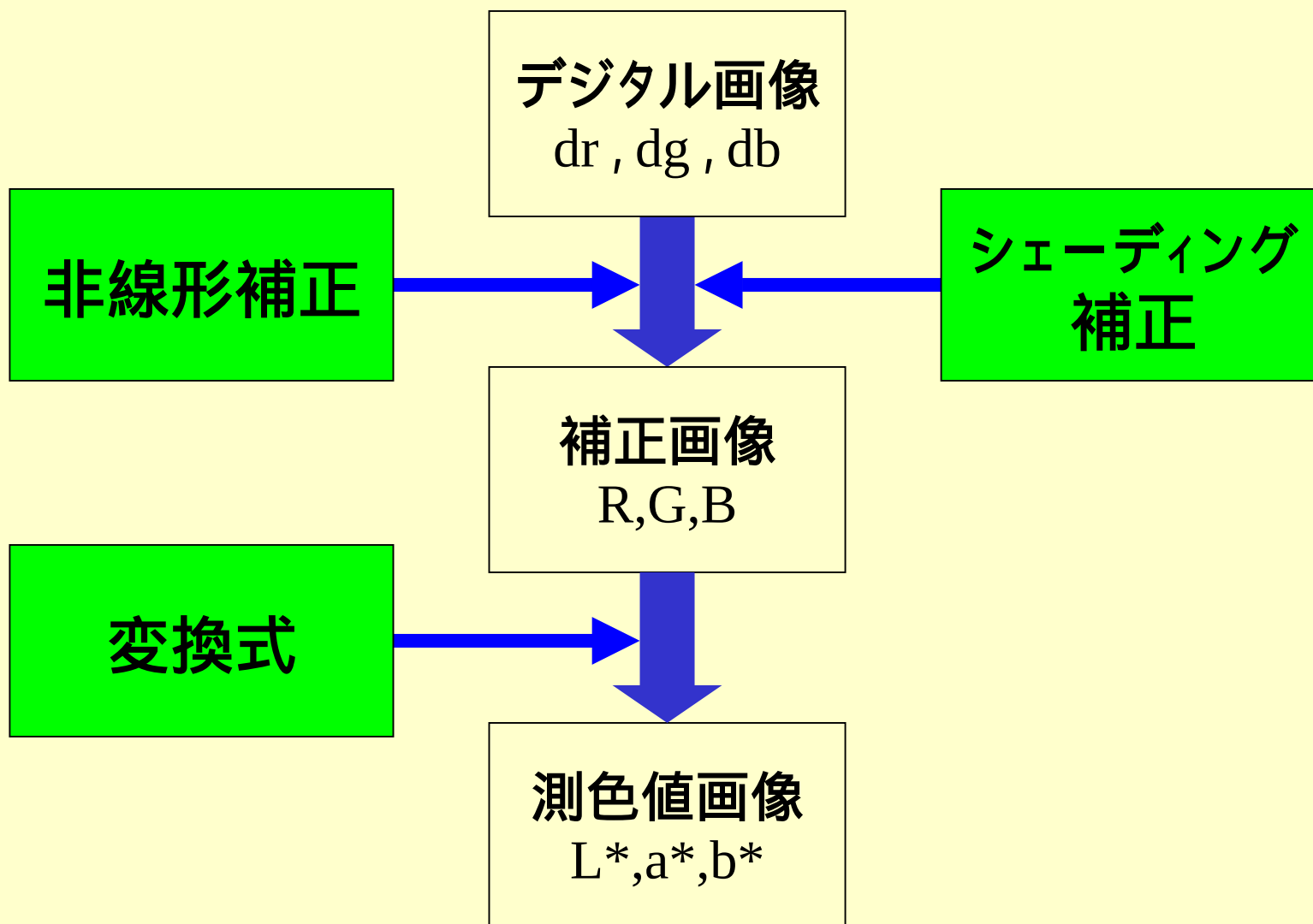
ISO 12641 反射プリント



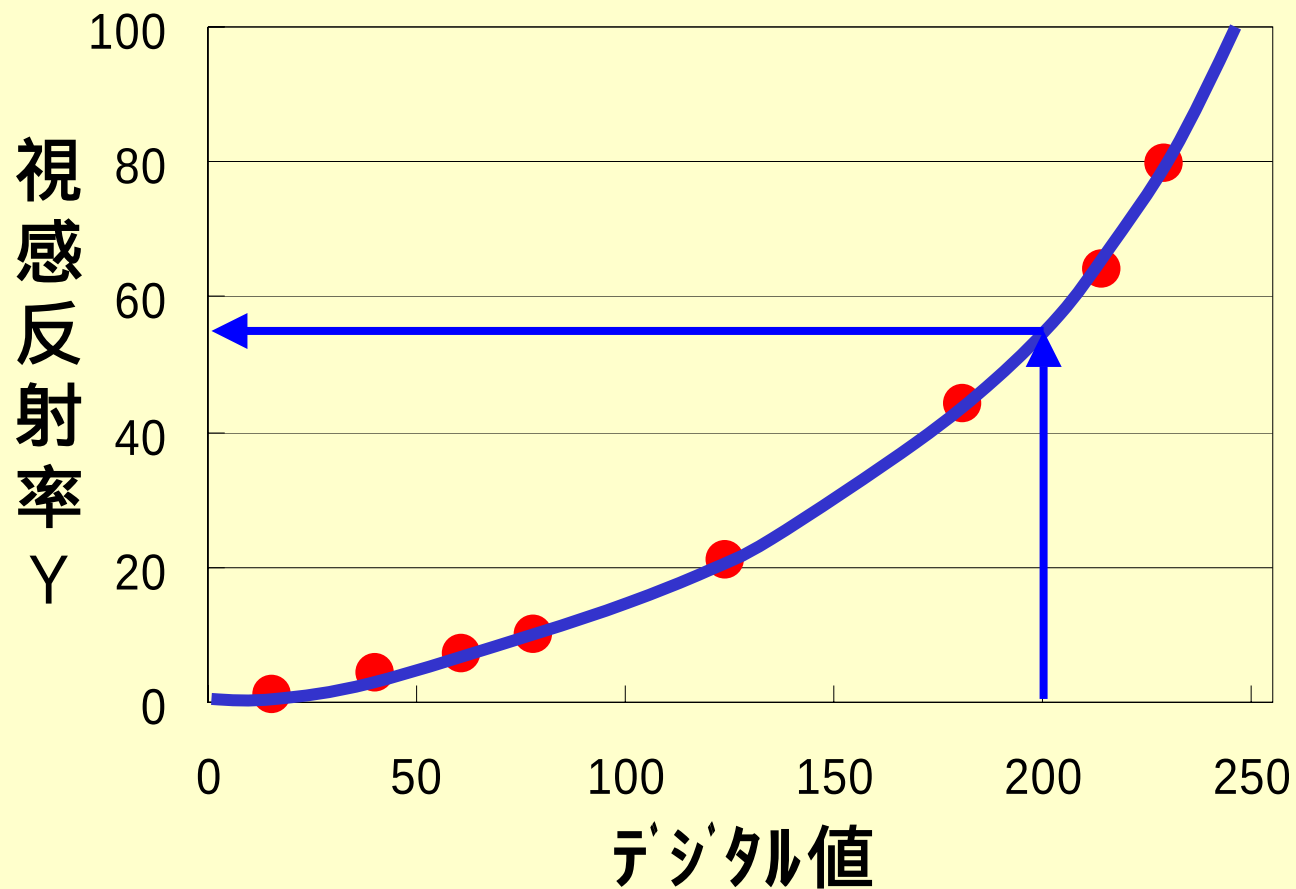
ISO 12642



デジタル値から測色値への変換



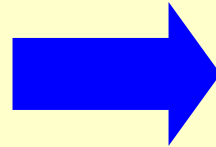
非線形補正



シェーディング

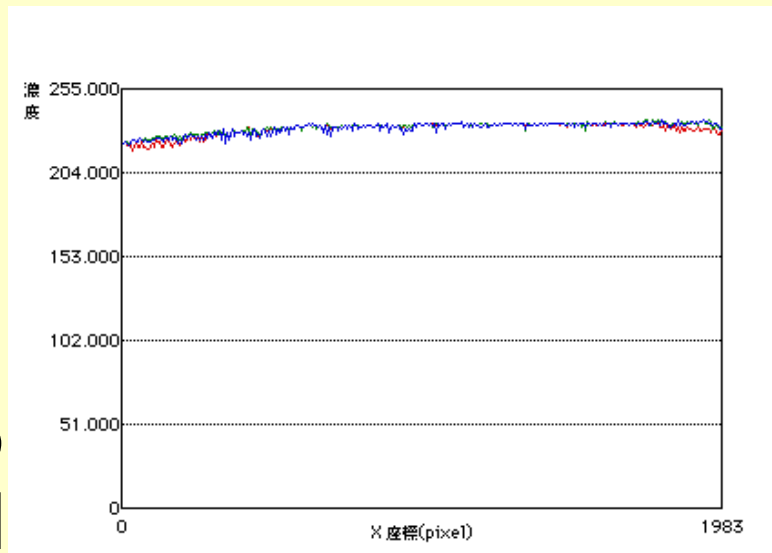


白色画像



コントラストをあげたもの

白色画像の
濃度断面図



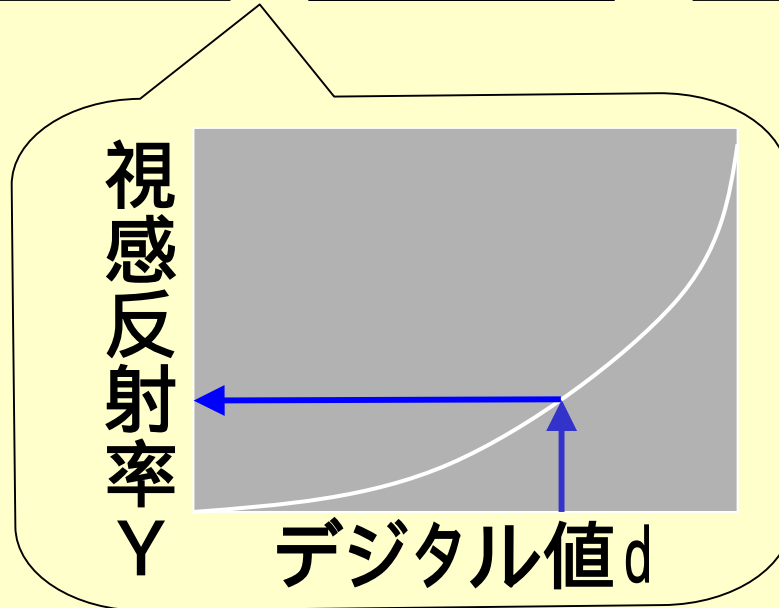
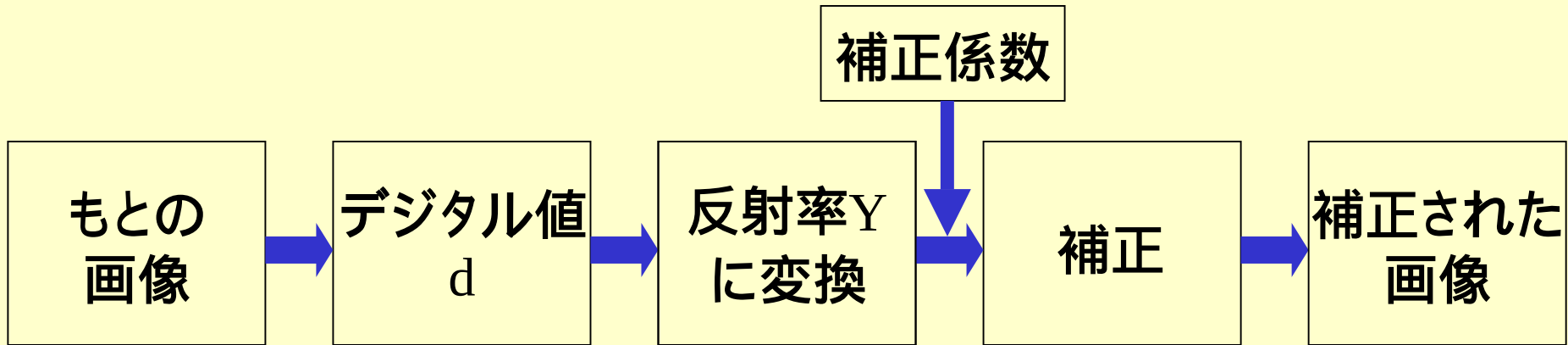


- 画素感度ムラ
- 照明ムラ
- レンズによる周辺光量の低下

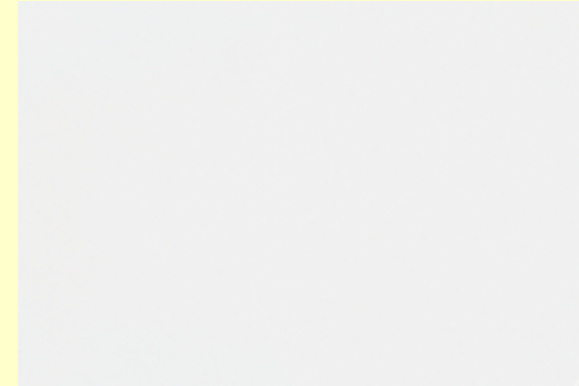


シェーディング補正

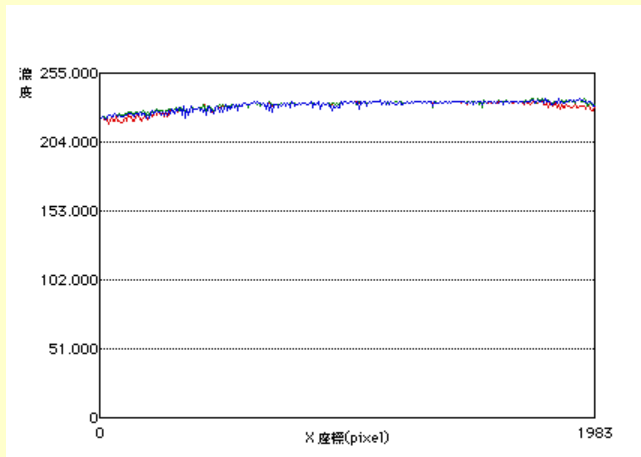
シェーディング補正



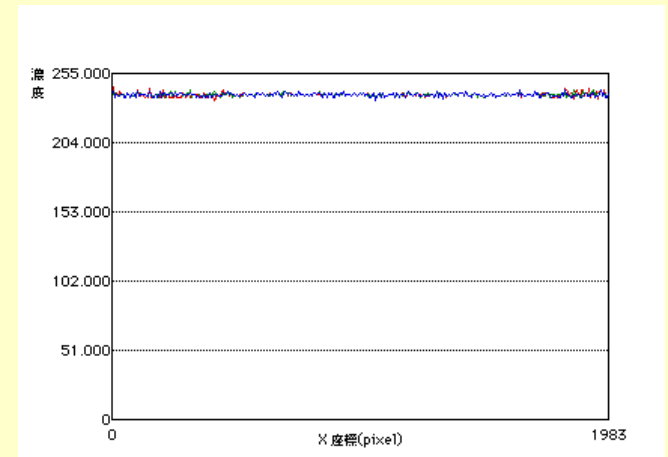
シェーディング補正



白色画像 補正前 補正後 補正後の白色画像



白色画像の濃度断面図



補正後の濃度断面図

R,G,B → X,Y,Z 変換式

$$\begin{array}{l} \text{1次} \\ \text{2次} \end{array} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_3 & r_2 & r_1 & r_0 \\ s_3 & s_2 & s_1 & s_0 \\ t_3 & t_2 & t_1 & t_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \\ 1 \end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_9 & r_8 & r_7 & r_6 & r_5 & r_4 & r_3 & r_2 & r_1 & r_0 \\ s_9 & s_8 & s_7 & s_6 & s_5 & s_4 & s_3 & s_2 & s_1 & s_0 \\ t_9 & t_8 & t_7 & t_6 & t_5 & t_4 & t_3 & t_2 & t_1 & t_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \\ R^2 \\ G^2 \\ B^2 \\ RG \\ GB \\ BR \\ 1 \end{pmatrix}$$

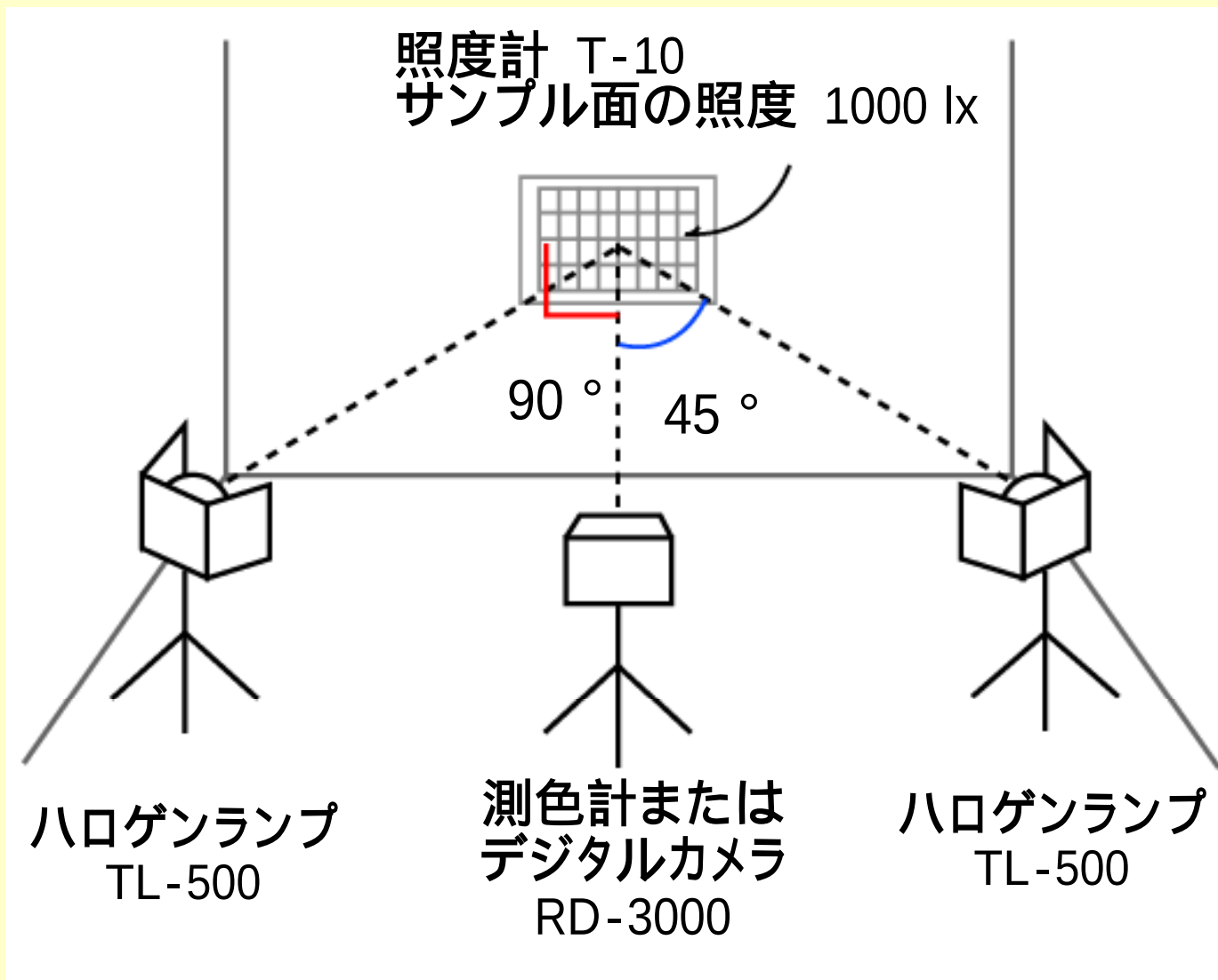
r,s,t : 変換係数
 R,G,B : 補正された画像
 X,Y,Z : 三刺激値

プロフィールの作成



画像電子学会デジタルカメラ用テストチャート

チャートの測色および撮影



測定及び計算の条件

条件	色温度変換 フィルタ	変換係数
1	あり	1次
2		2次
3	なし	1次
4		2次

色差の算出

オリジナル三刺激値とデジタル画像からの三刺激値から色差を求め、色差を最小にするような変換係数の値をExcel のソルバーを用いて導き出す。

$$L^* = 116 \left[f(Y/Y_n) \right] - 16$$

$$a^* = 500 \left[f(X/X_n) - f(Y/Y_n) \right]$$

$$b^* = 200 \left[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n) \right]$$

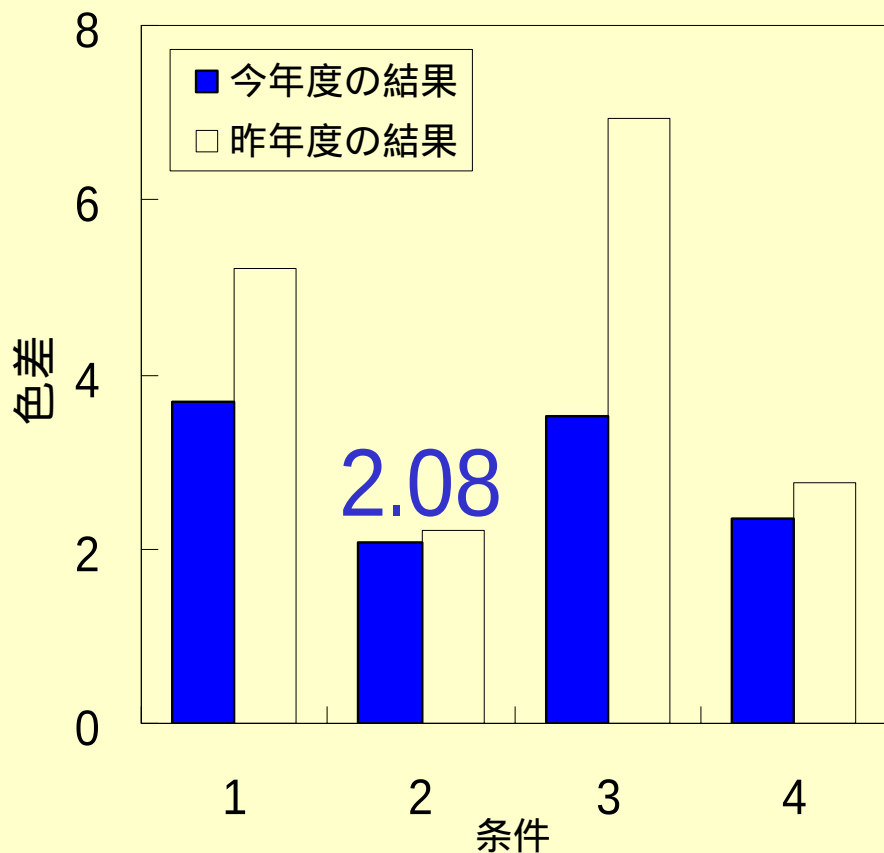
$$\Delta E^* = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2}$$

$$Y/Y_n > 0.008856 \rightarrow f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3}$$

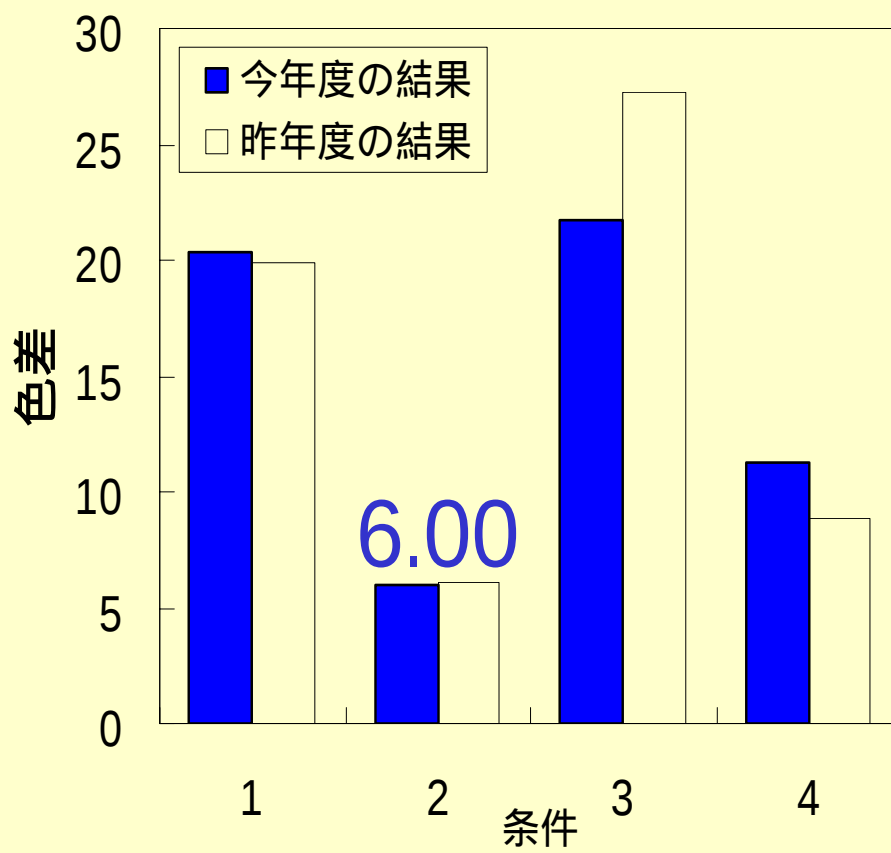
$$Y/Y_n \leq 0.008856 \rightarrow f(Y/Y_n) = 7.787(Y/Y_n) + (16/116)$$

$f(X/X_n)$ 及び $f(Z/Z_n)$ も、同様に定義する。

色差の平均と最大

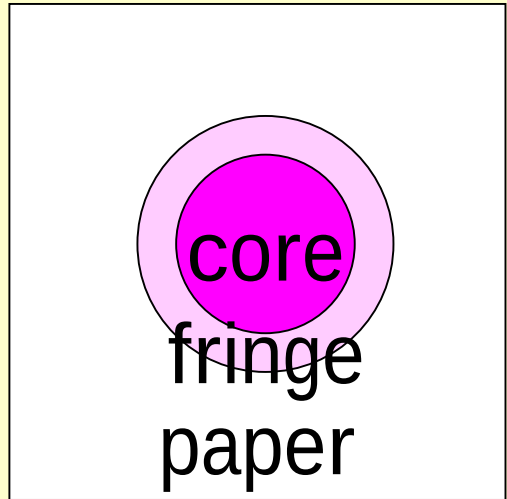


条件の違いによる色差の平均

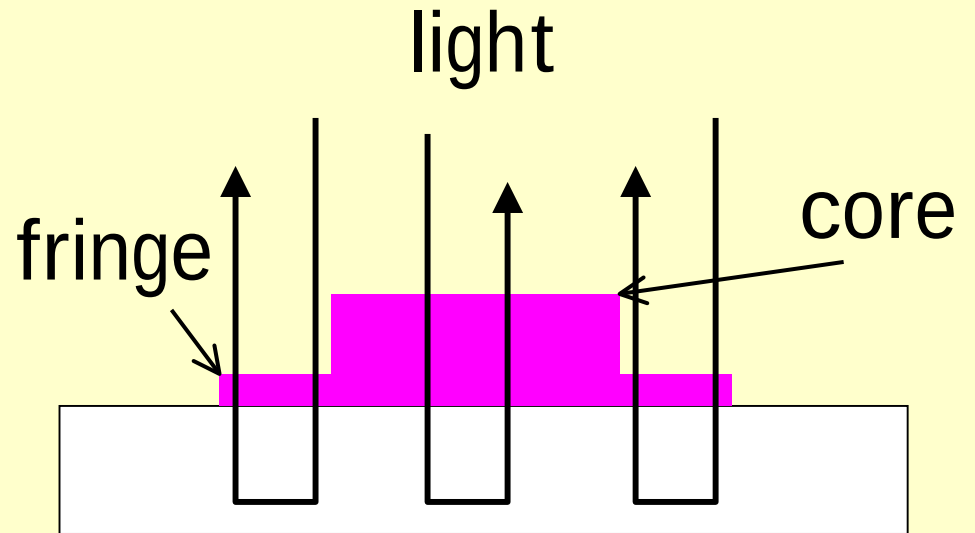


条件の違いによる最大色差

Core-fringe model



Top view



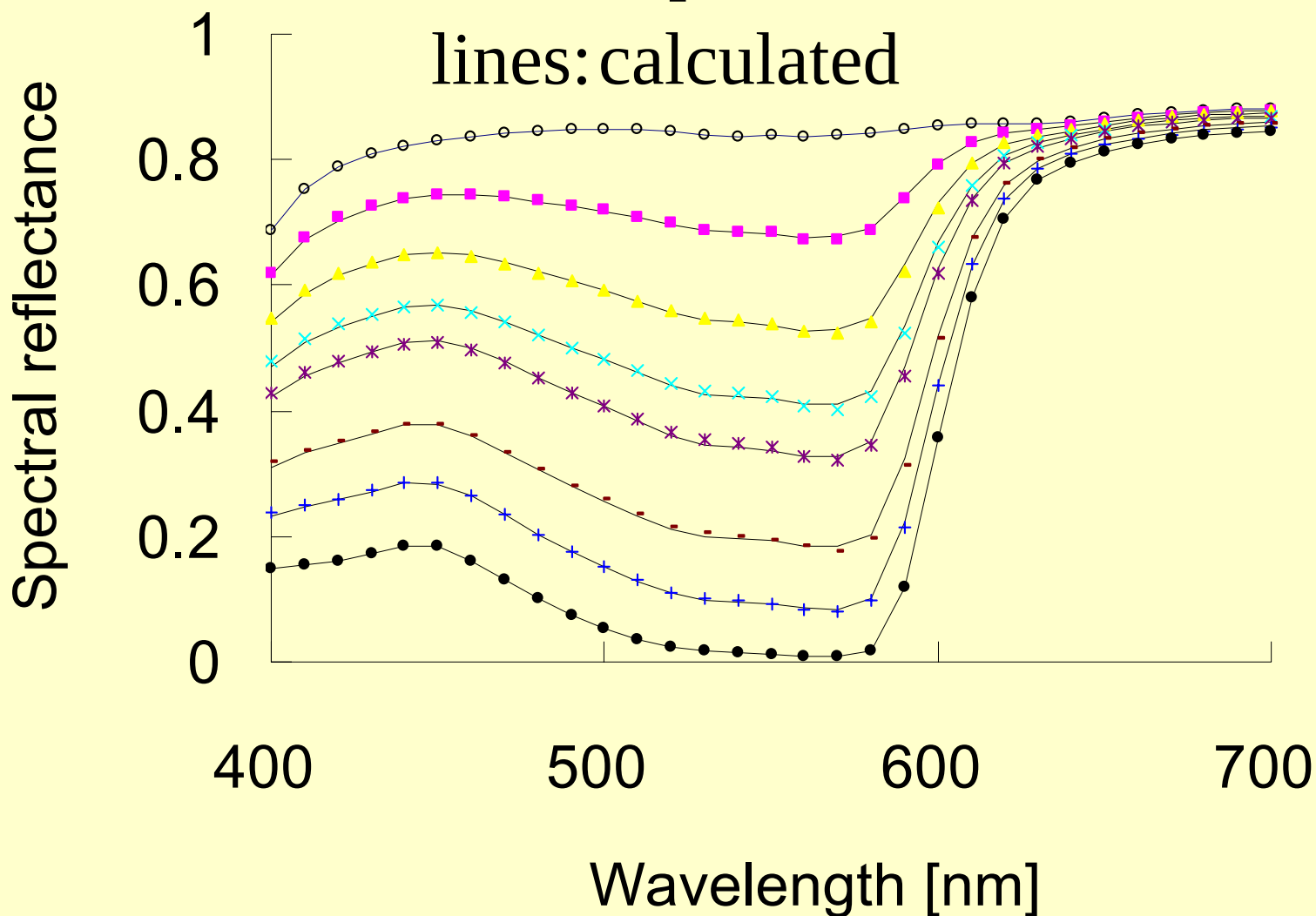
Side view

$$R = a_c R_c + a_f R_f + (1 - a_c - a_f) R_p$$

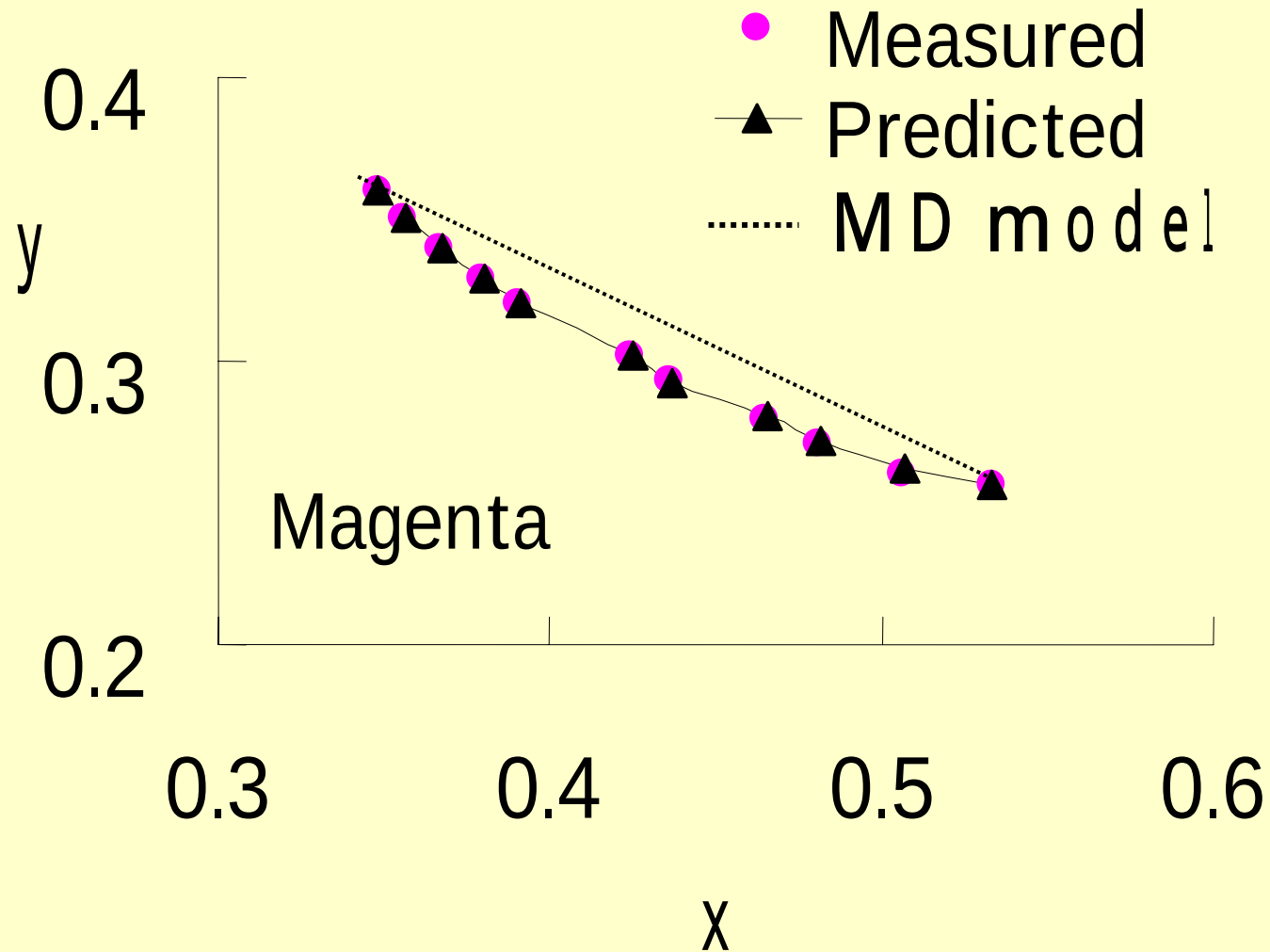
Results

dots: experimental

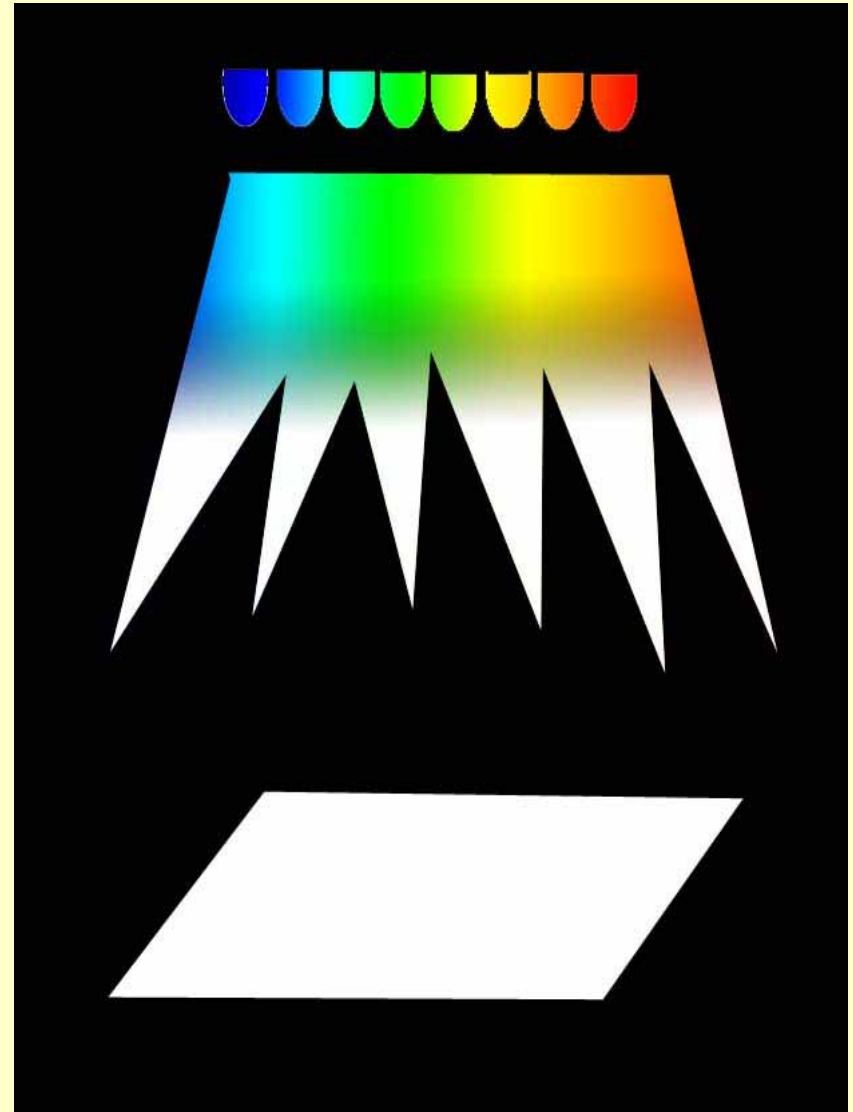
lines: calculated



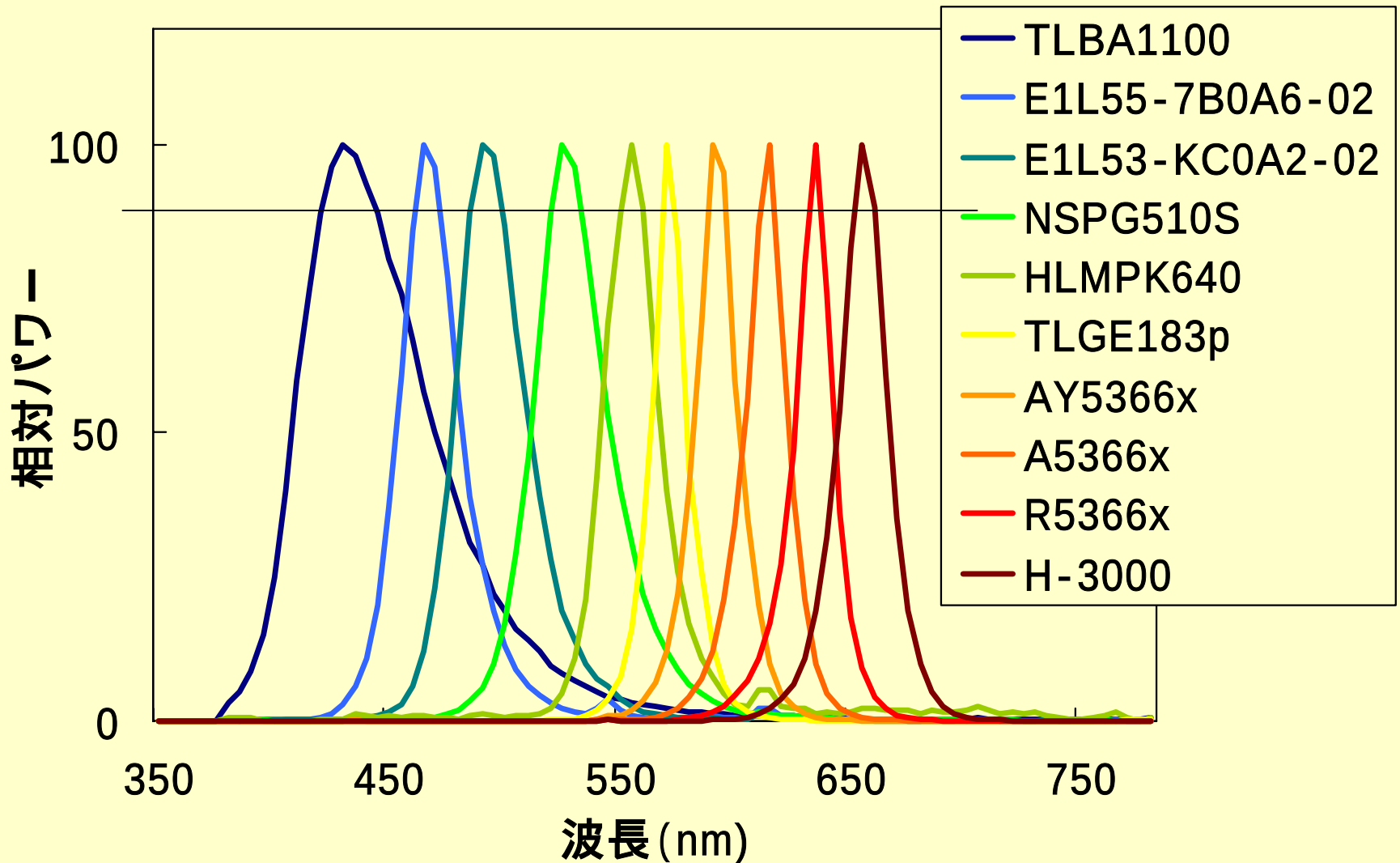
Results

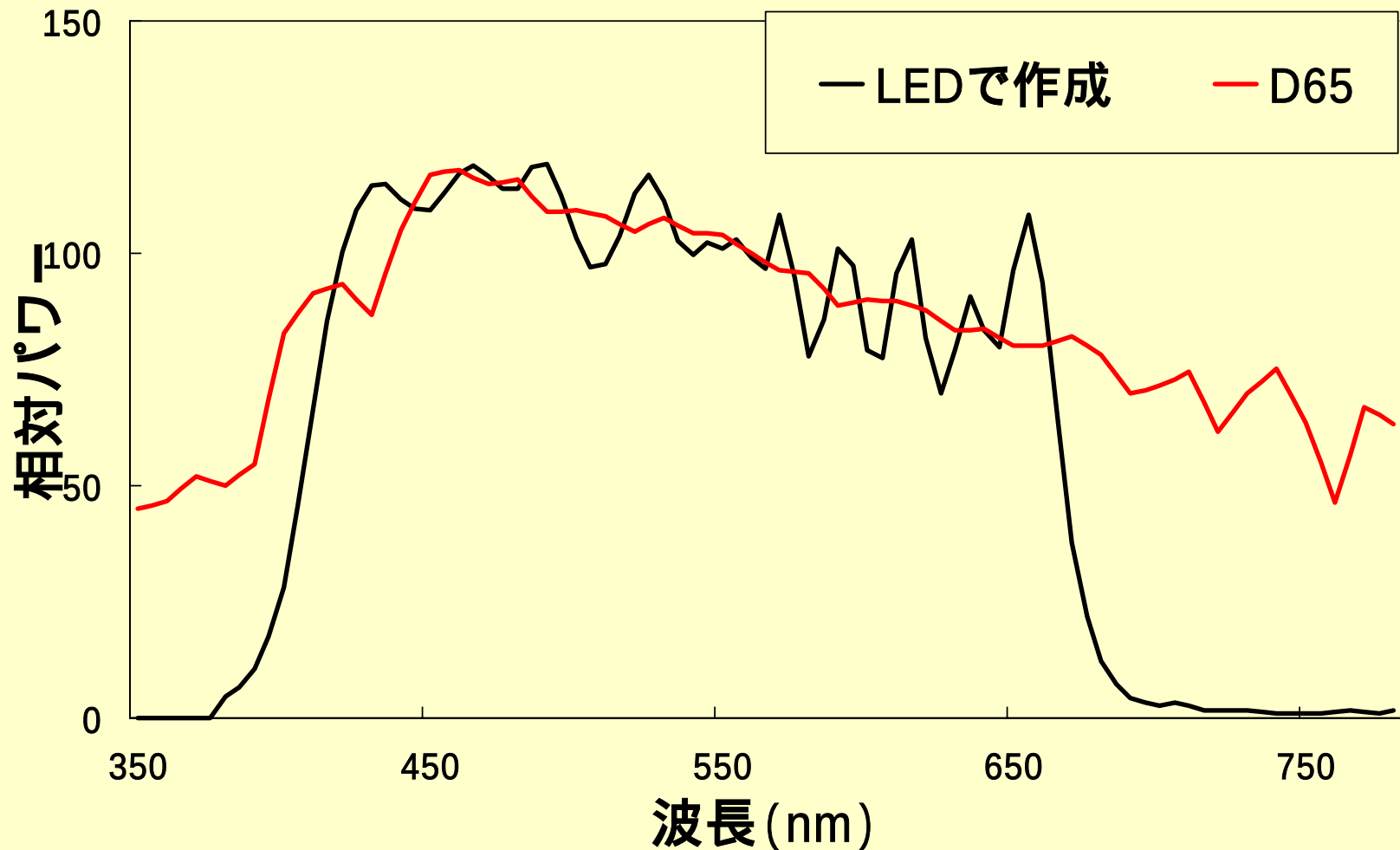


発光ダイオード (LED)を用いた 常用光源D65の 検討



63種から10種を選択





可視条件等色指数: 0.38 (目標0.5以下)

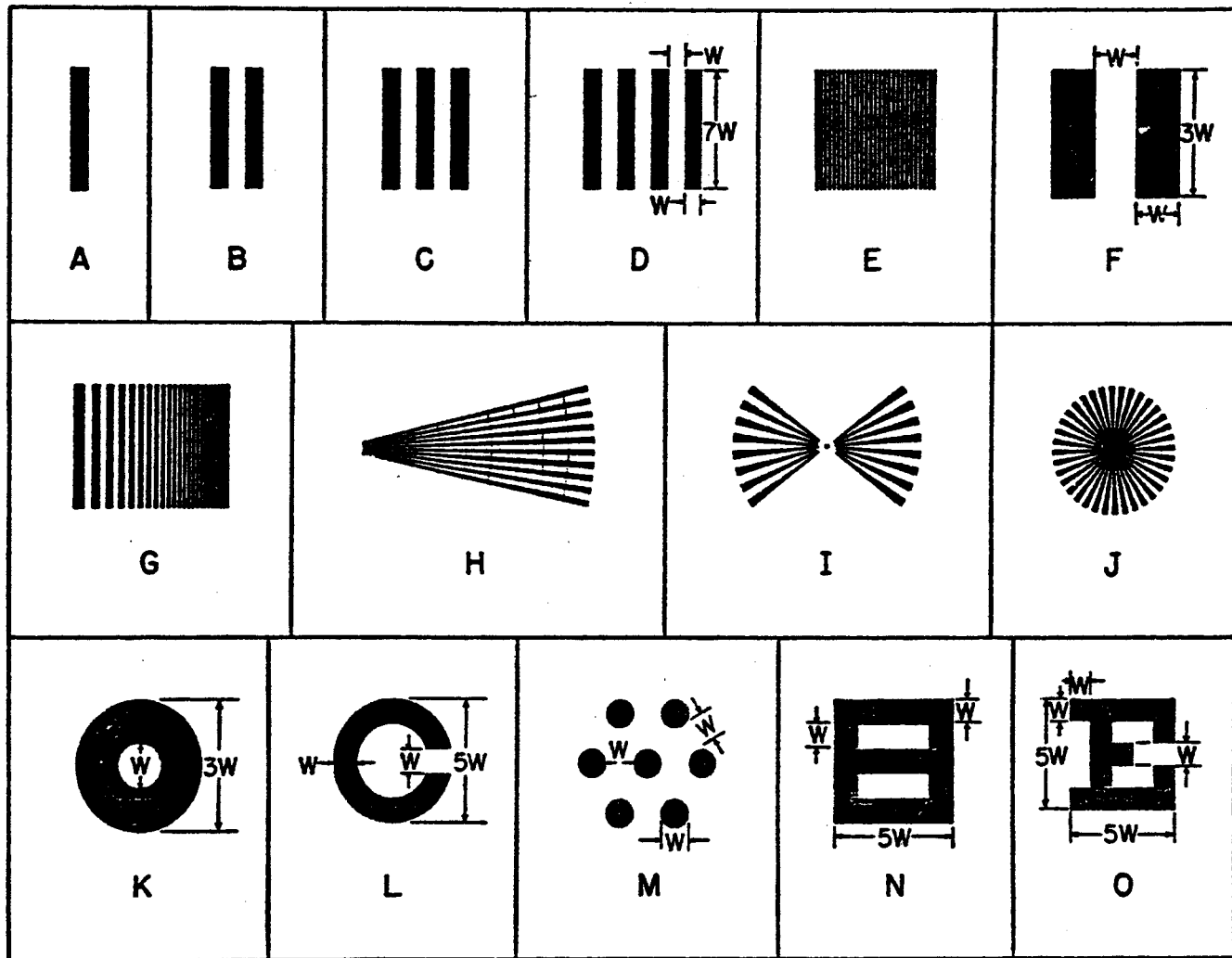
平均演色評価指数: 98.5 (目標95以上)

特殊演色評価指数: 91.3以上 (目標85以上)

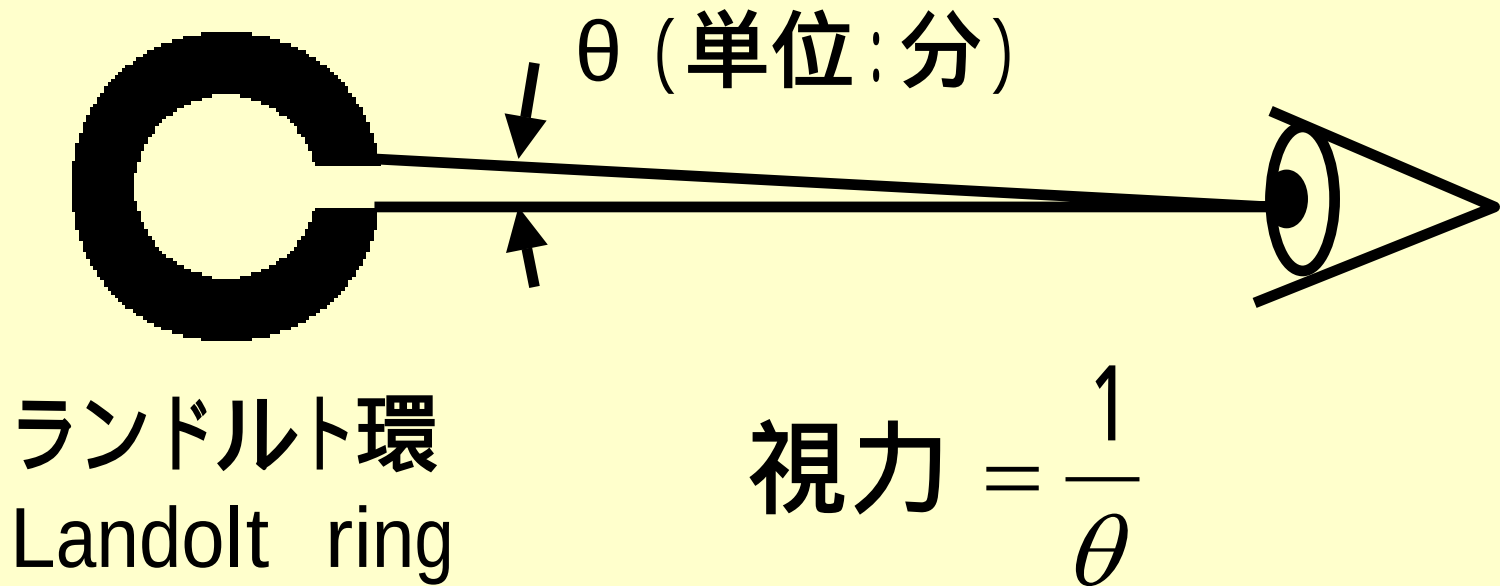
4 . 微細部の再現

シャープネス

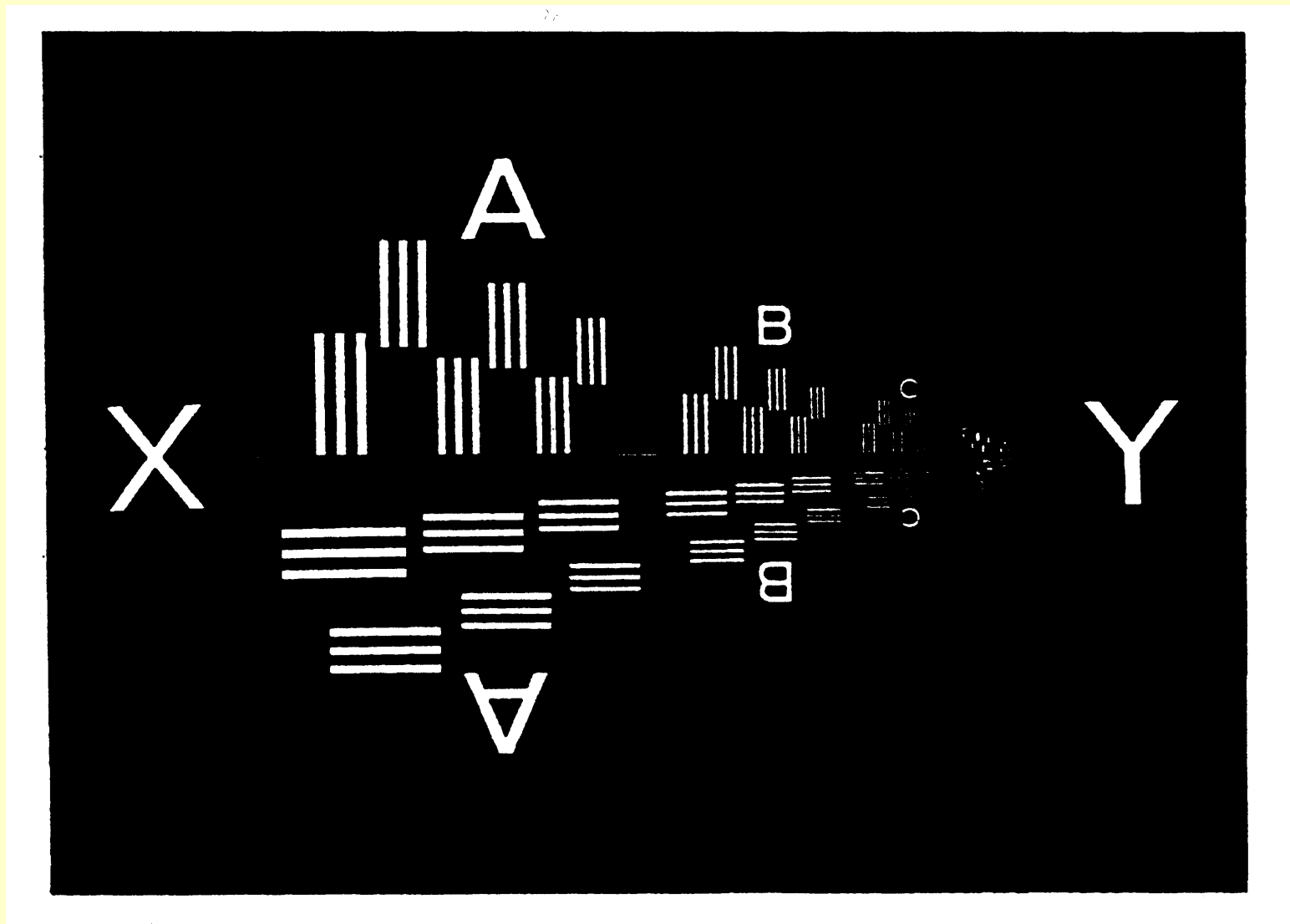
解像力チャート



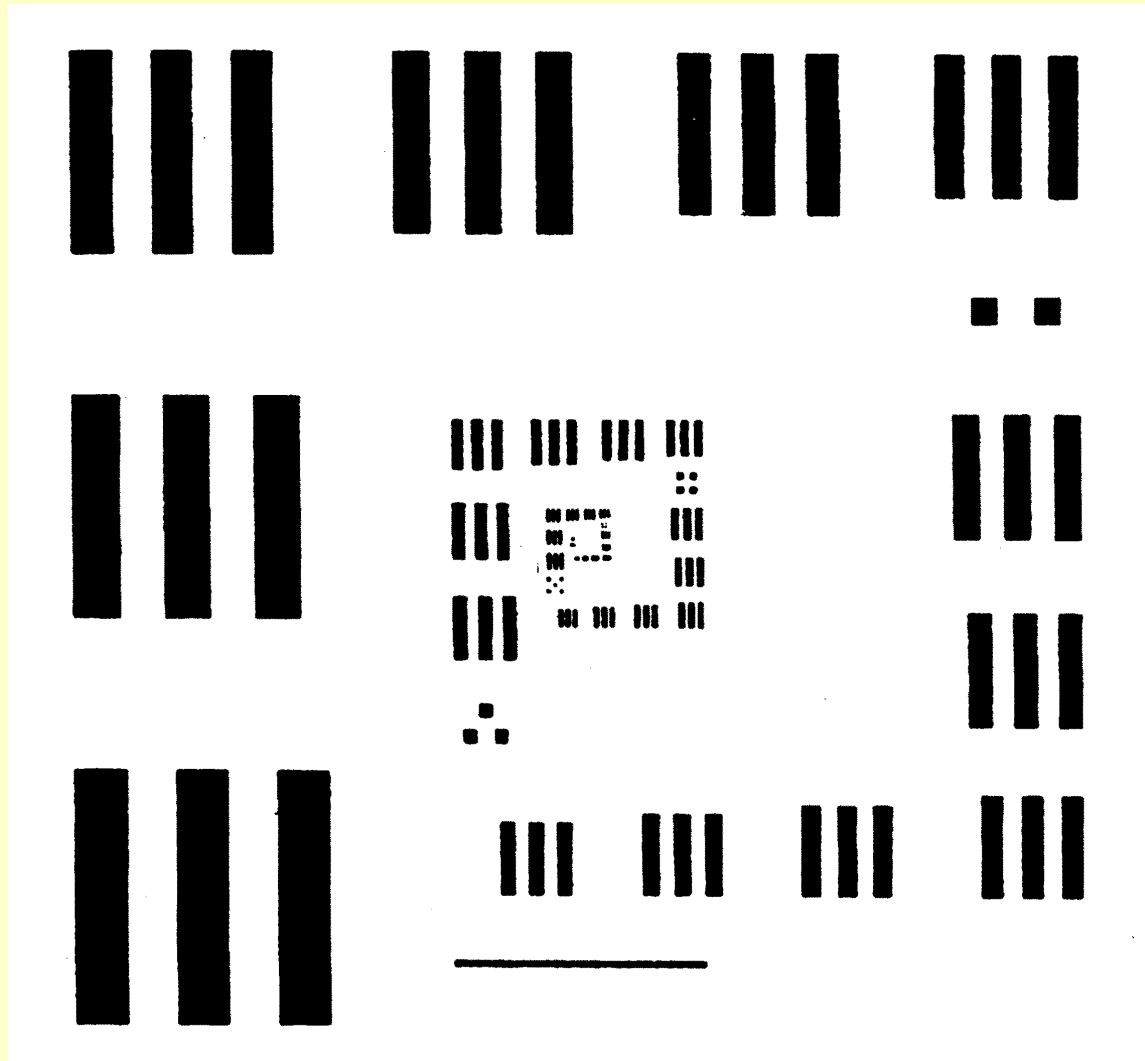
解像力 Resolving power



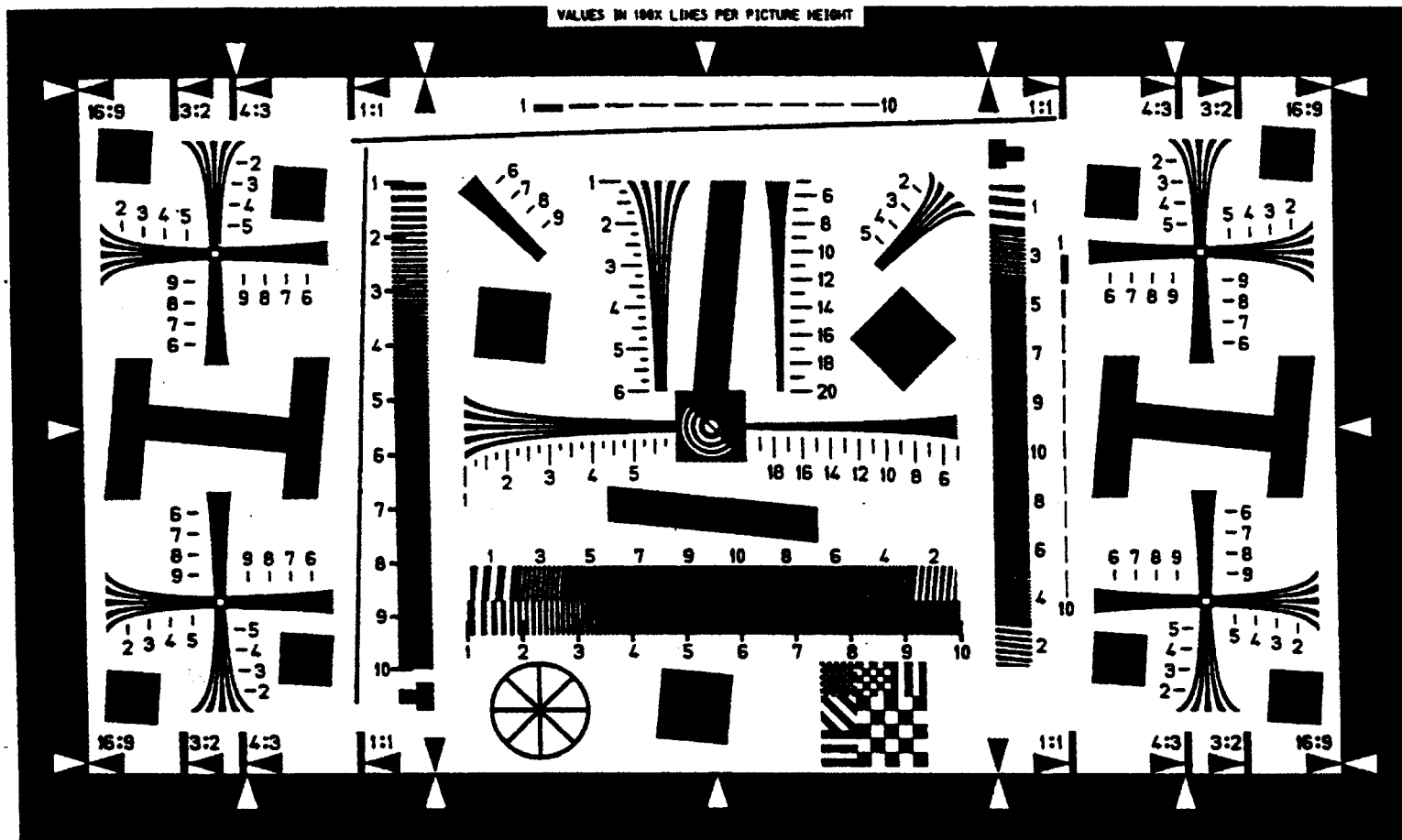
写真レンズ用解像力チャート



写真感光材料用解像力チャート



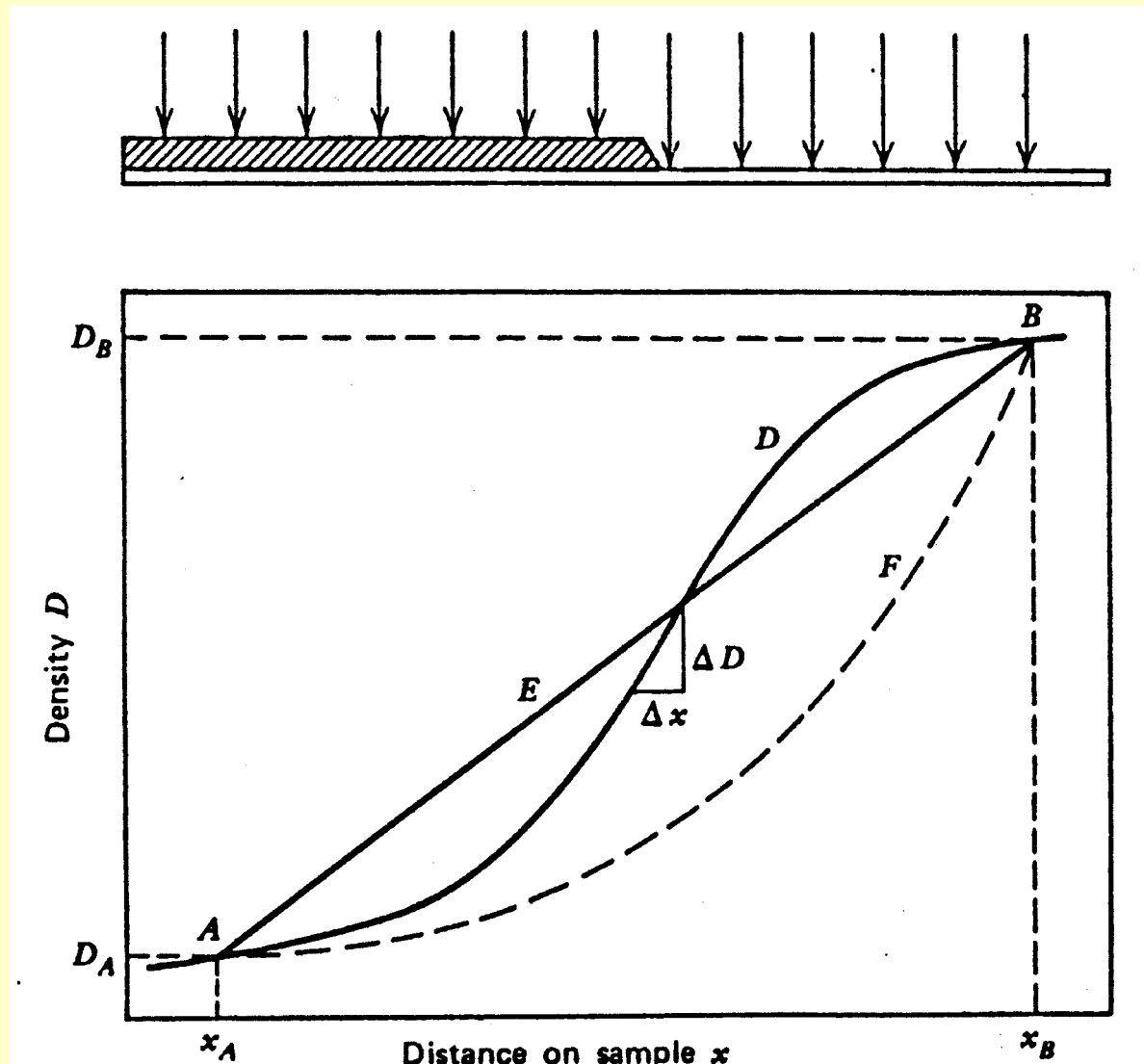
電子スチルカメラ解像性 評価用チャート



アキュータンス Acutance

デモ

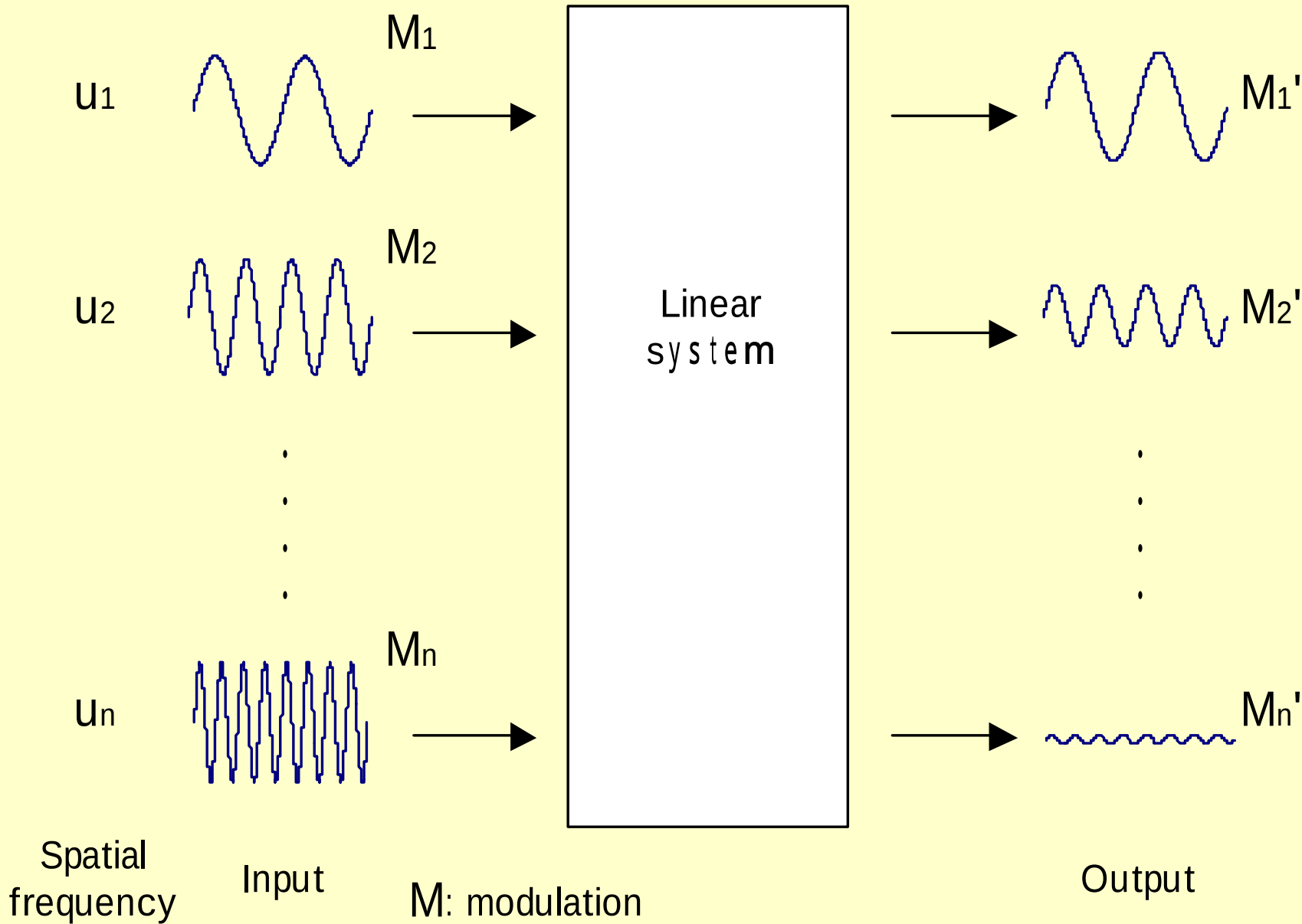
アキュータンス Acutance



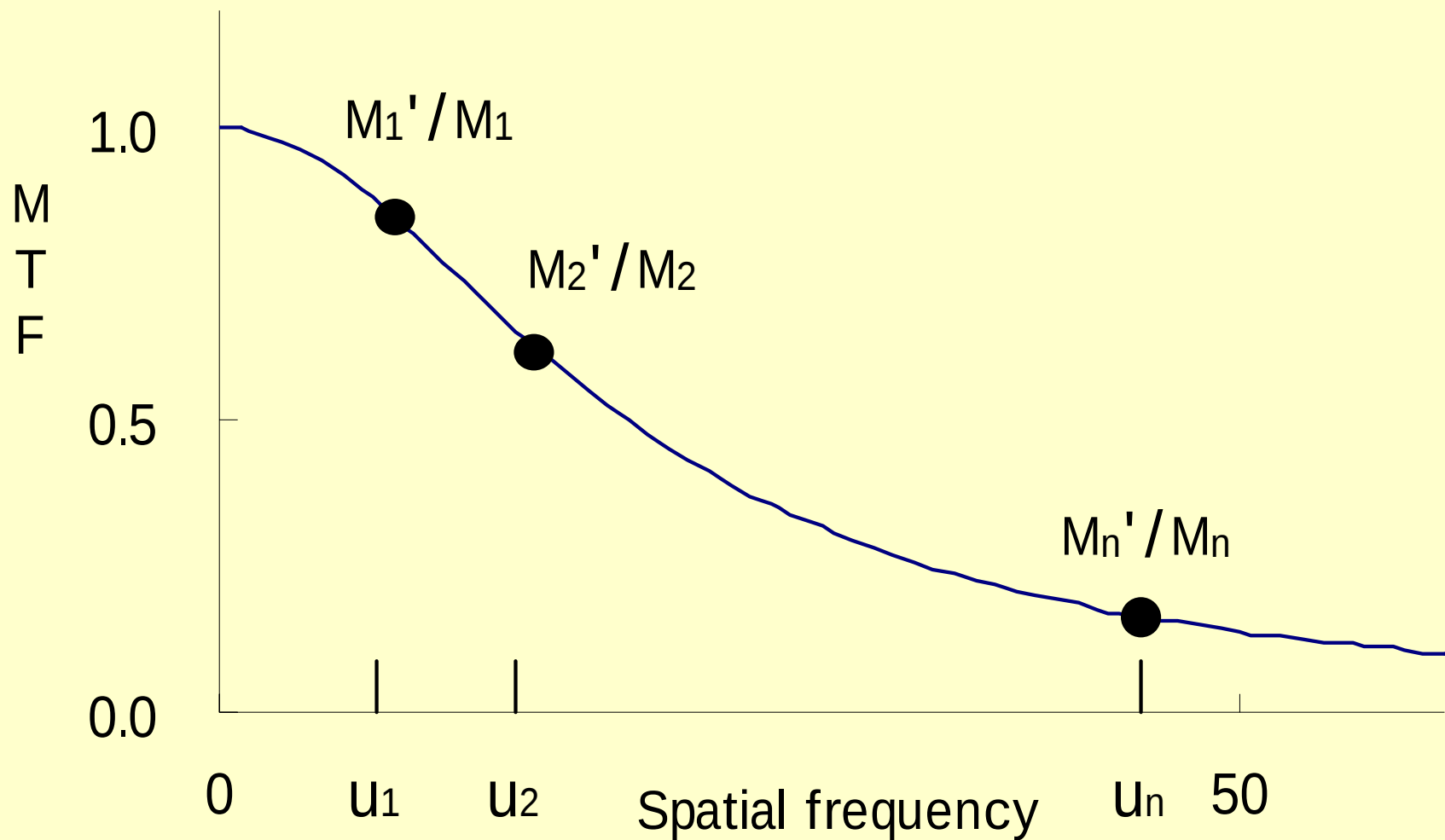
アキュータンス

$$\text{Acutance} = \frac{\sum (\Delta D_i / \Delta x_i)^2}{n (D_B - D_A)}$$

エッジの切れの評価



MTF

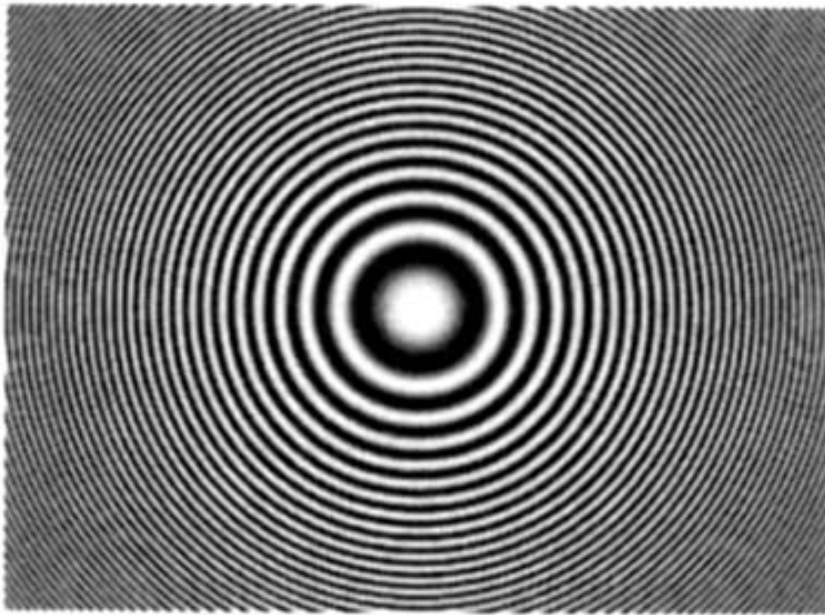


マイクロデンシトメーター

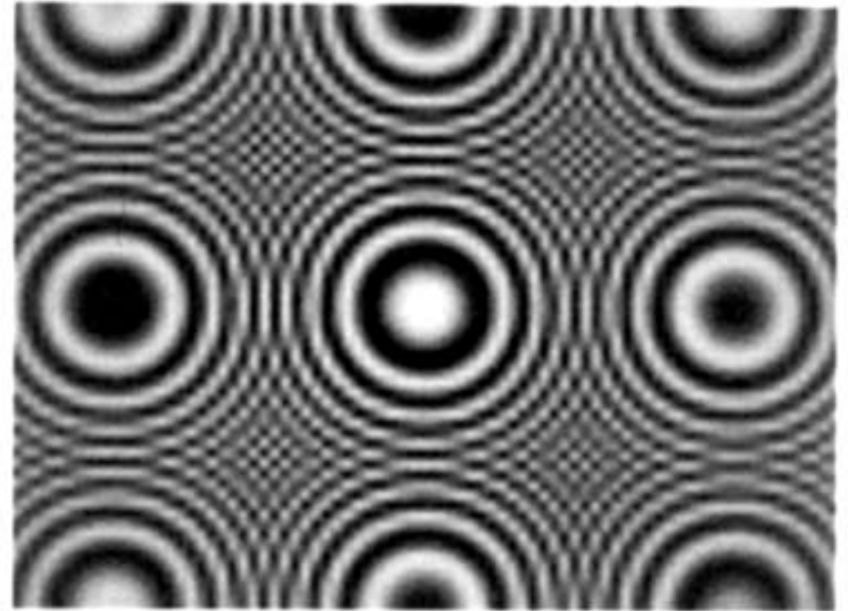


Aliasing → OHP

フレネルゾーンプレート画像



(a) 原画像



(b) 偽信号が発生した画像

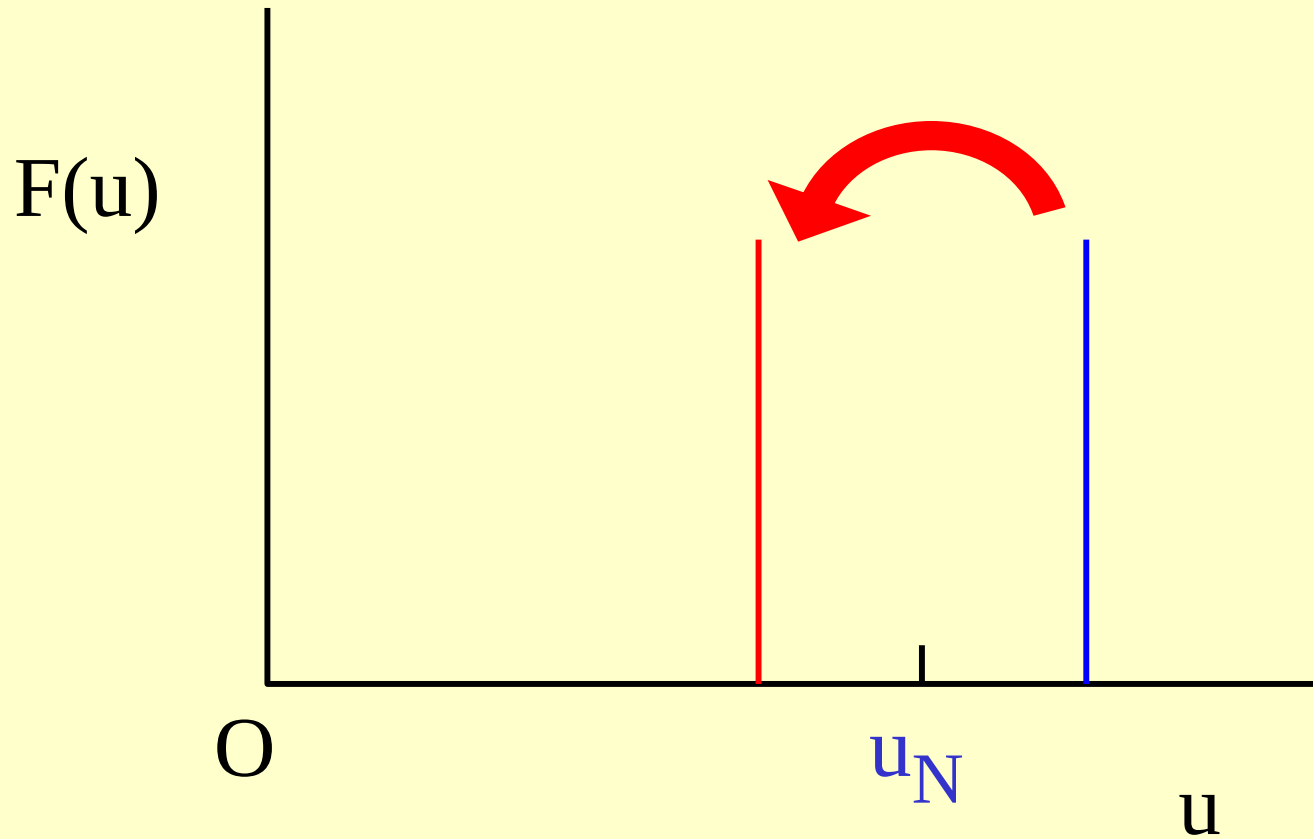
折り返しによって発生した偽信号

ナイキスト周波数 Nyquist frequency

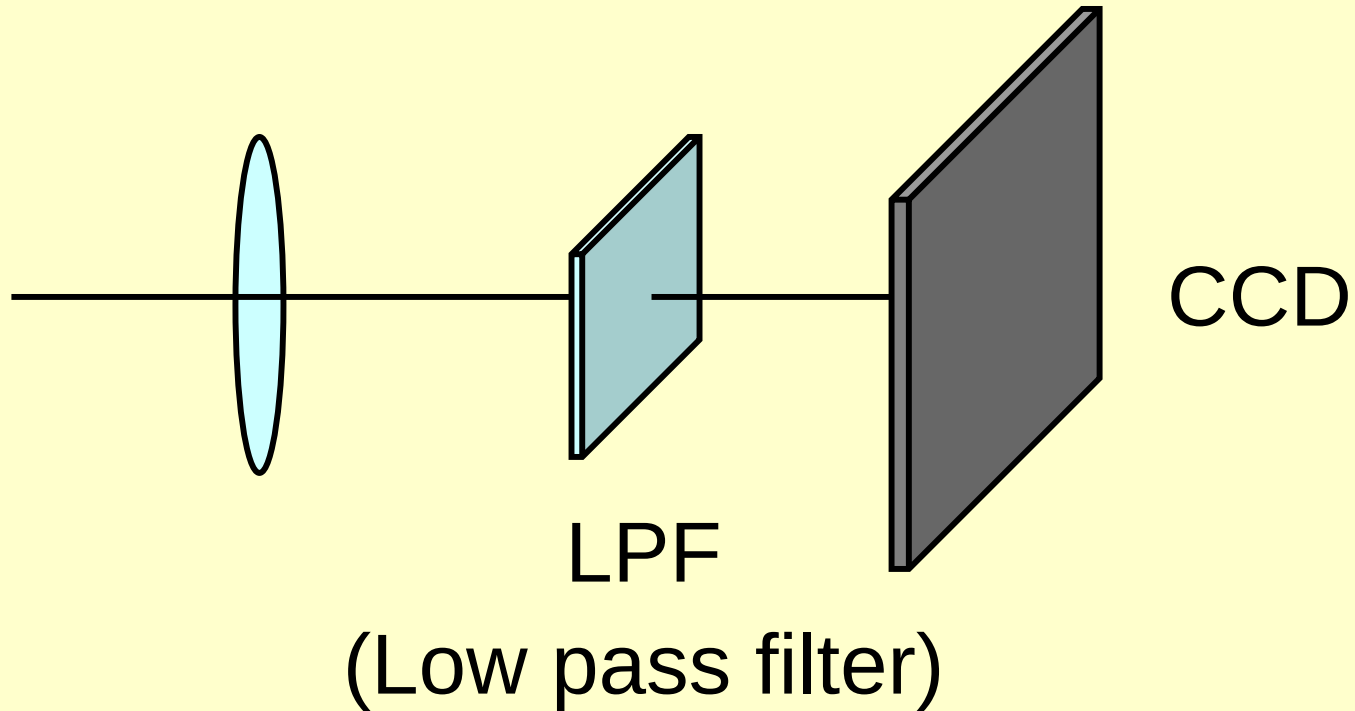
$$u_N = \frac{1}{2\Delta x} \left[\text{mm}^{-1} \right]$$

Δx : サンプリング間隔 [mm]

エイリアジング Aliasing

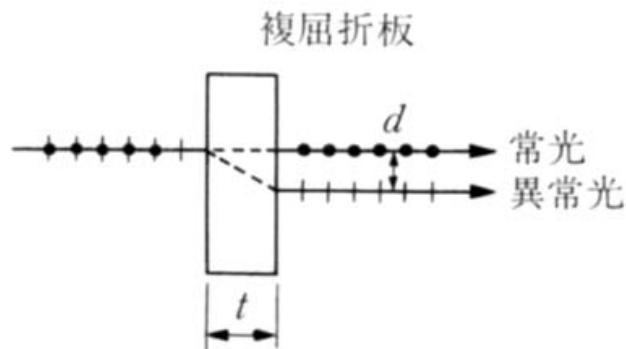


デジタルカメラのLPF



画像をぼかし、高周波成分を少なくし、
エイリアジングを低減する

複屈折板

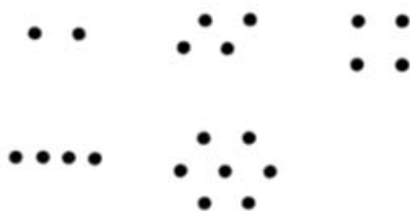


$$d = \frac{n_e^2 + n_o^2}{2 n_e \cdot n_o} \times t$$

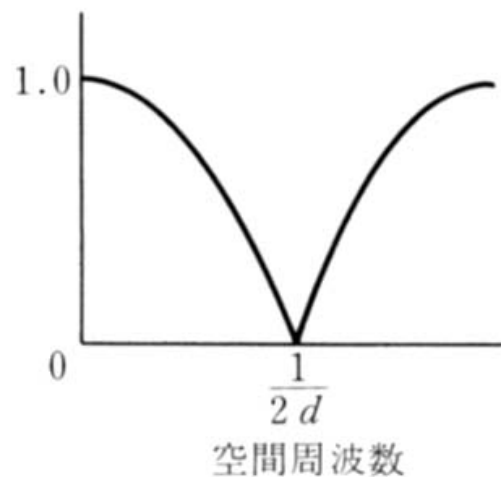
n_o : 常光線の屈折率

n_e : 異常光線の屈折率

(a) 複屈折による光線の分離



周波数応答

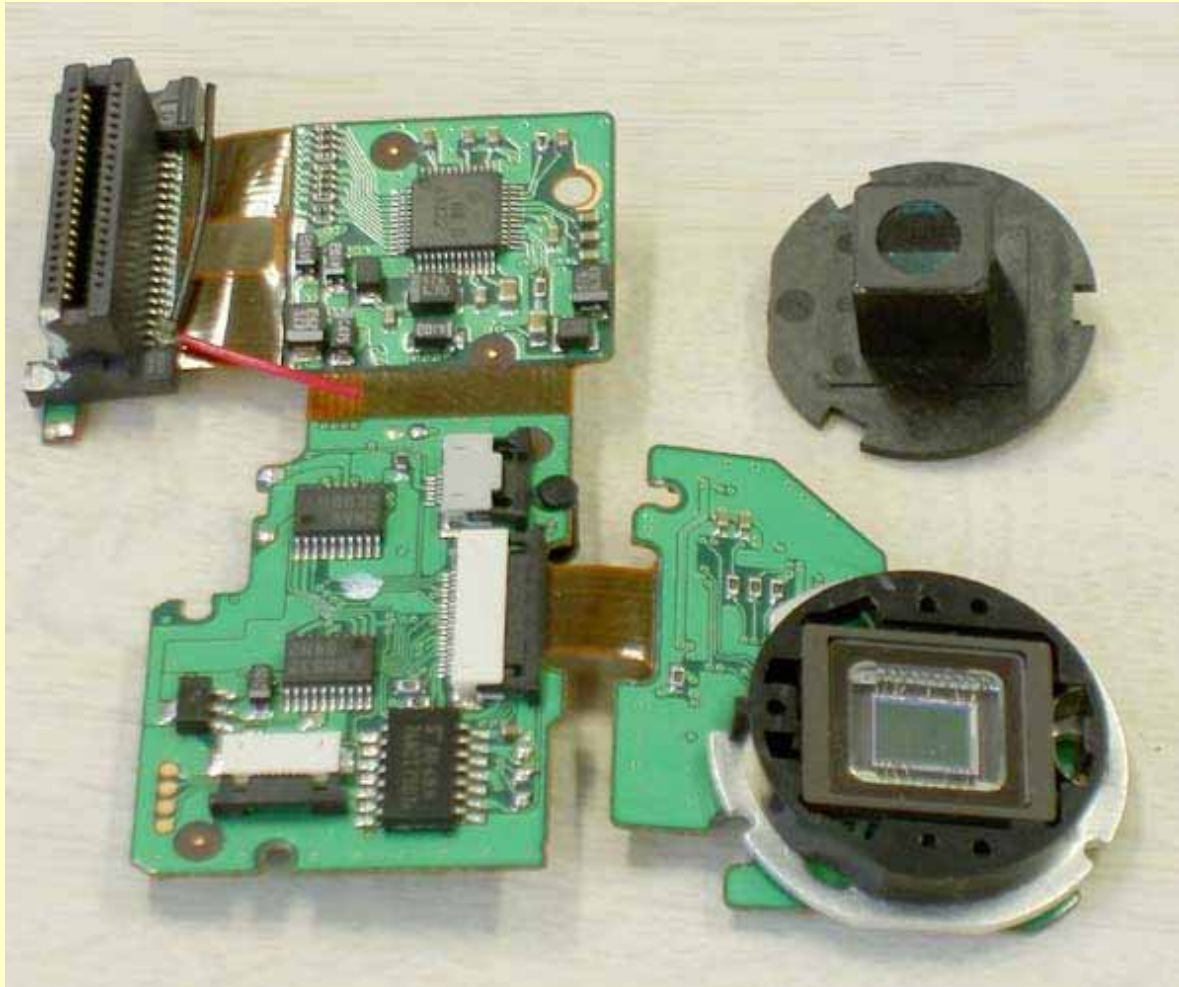


(b) スポット分離パターンの例

(c) 2点分離型フィルタの特性

複屈折板による光学ローパスフィルタ

CCDとLPF



LPF

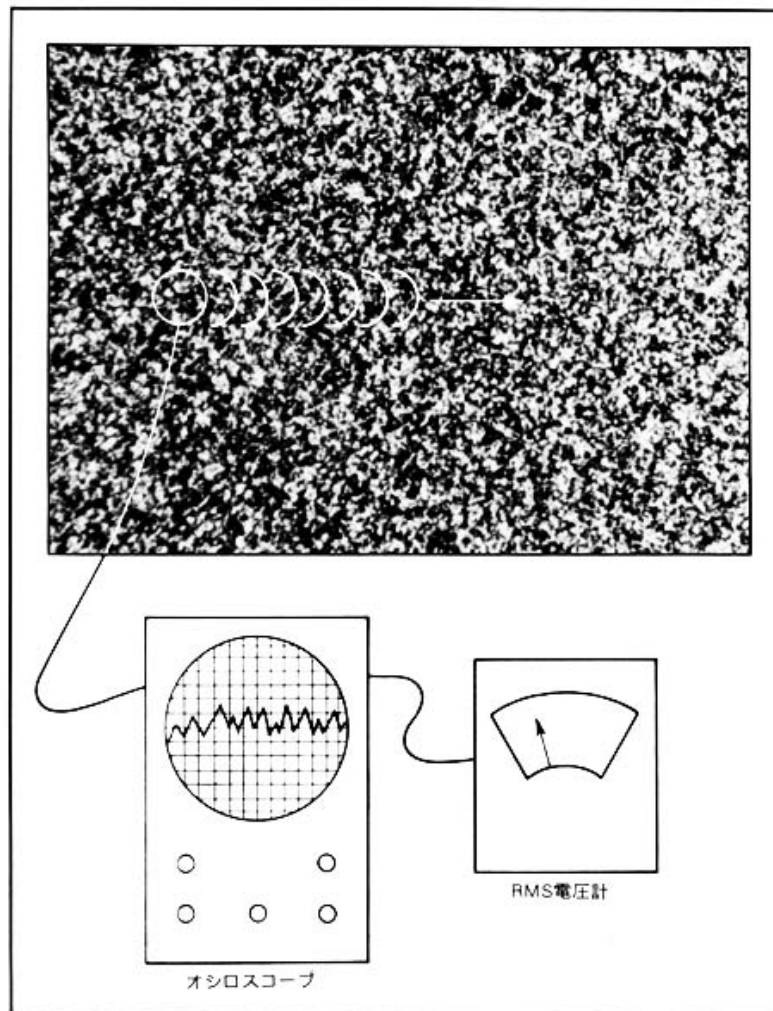
CCD

5 . 均一性の再現

ノイズ

フォトショップで ノイズのデモ

走査 scan



第10図

粗粒子乳剤を連続的に濃度走査した時の信号は、オシロスコープに表示すると、ノイズ即ち不規則な電気信号のようにみえます。RMS電圧計では、この“ノイズレベル”が直読されます。

濃度変動

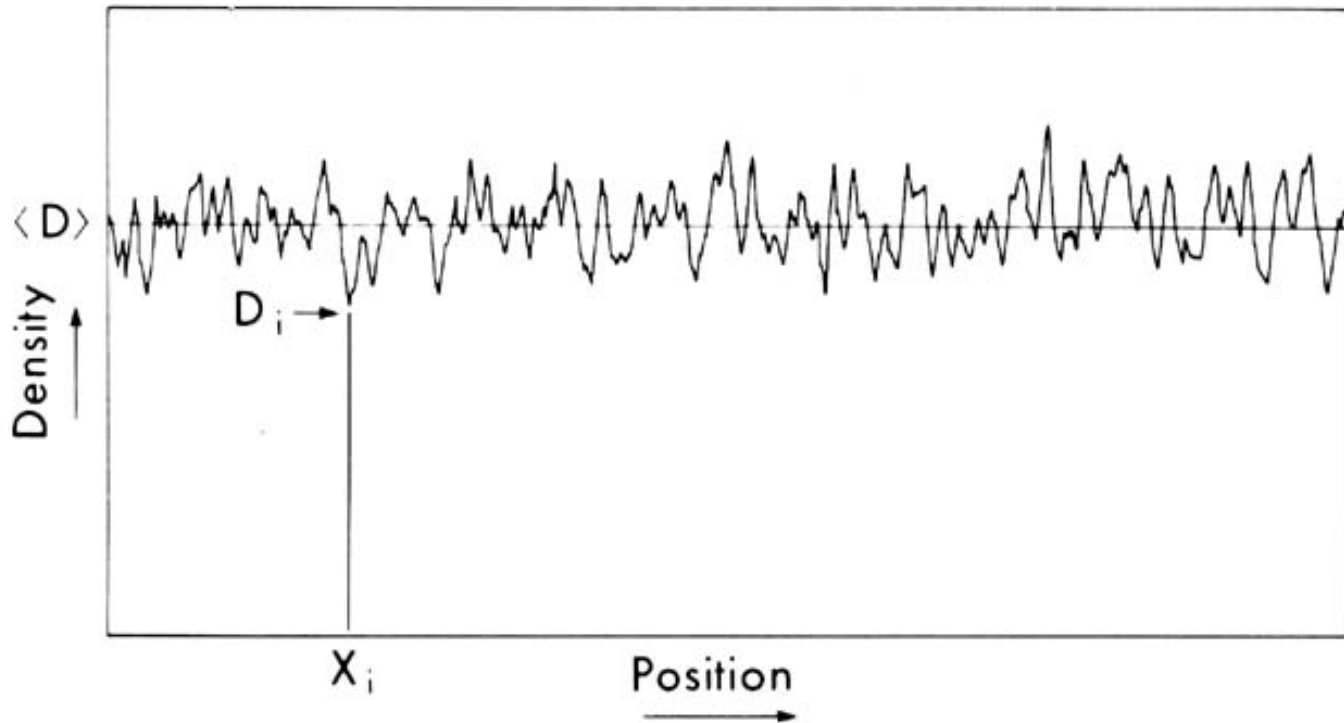


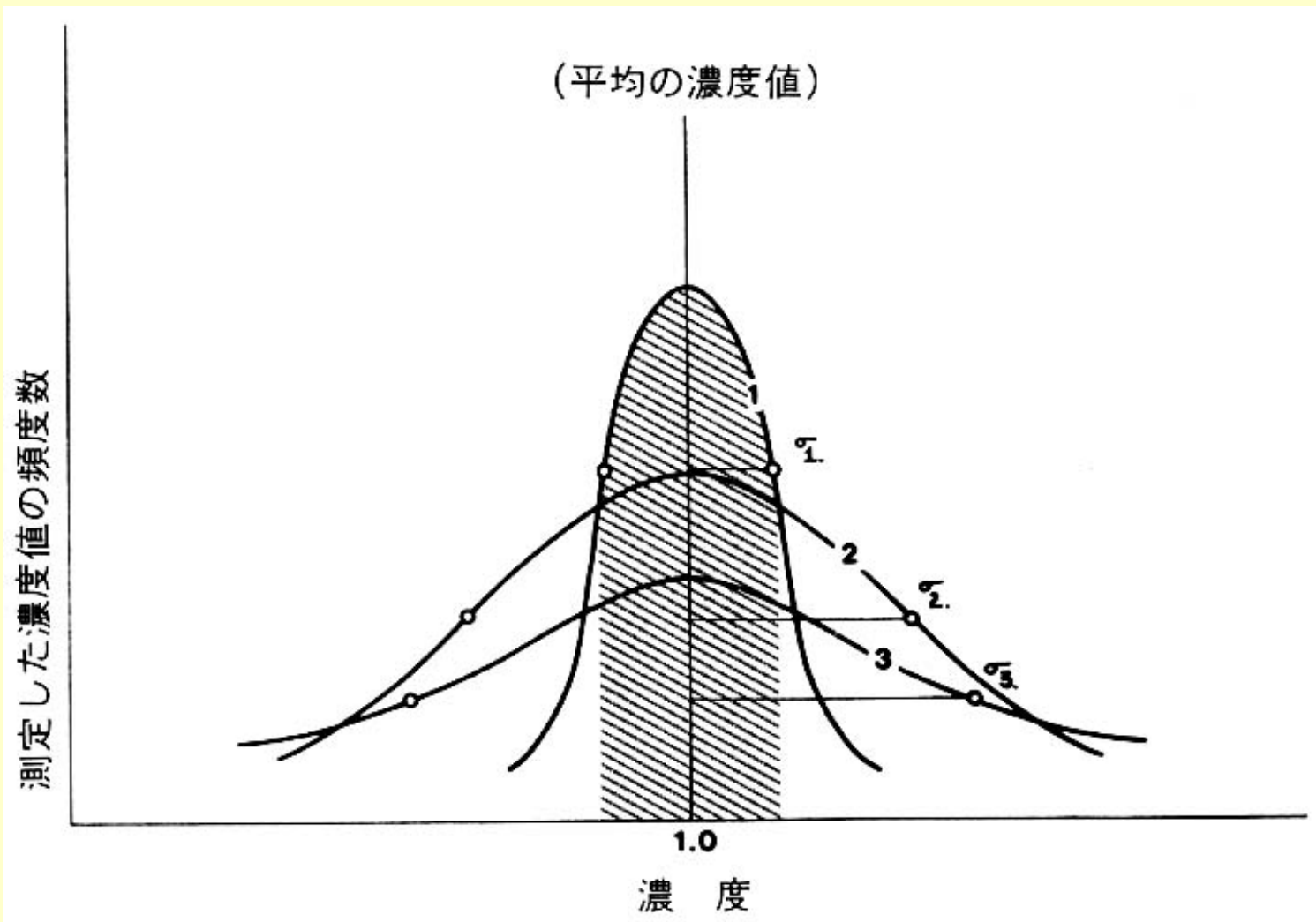
FIG. 21.62. A microdensitometer trace from a coarse grained black-and-white film.

濃度変動の評価

ノイズは均一部が目立つ

- 本来一定値であるべき濃度に変動
- バラツキを評価
- 標準偏差

標準偏差



RMS粒状度 RMS granularity (RMS: Root Mean Square)

$$\sigma = \left[\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{n} \right]^{1/2} \quad \bar{D} = \frac{\sum D_i}{n}$$

RMS粒状度は、濃度変動の標準偏差

写真フィルムは、 $48 \mu\text{m}\phi$ の
開口で測定し、1000倍

ノイズウィナーズペクトル

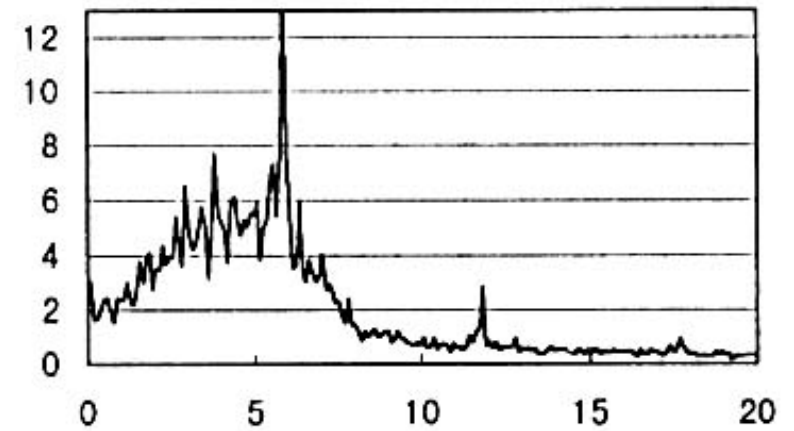
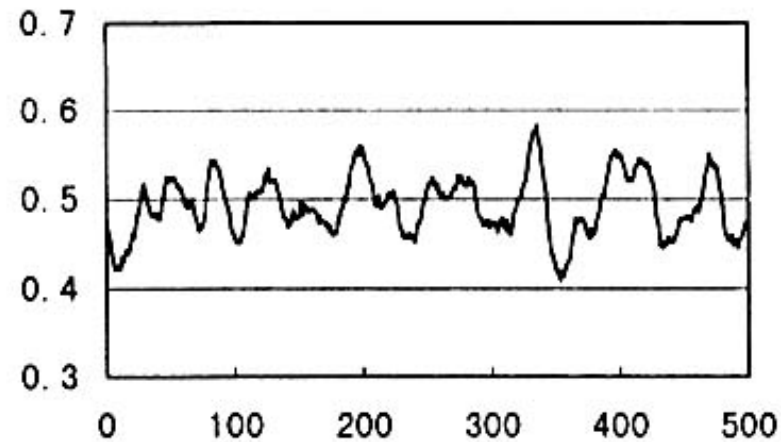
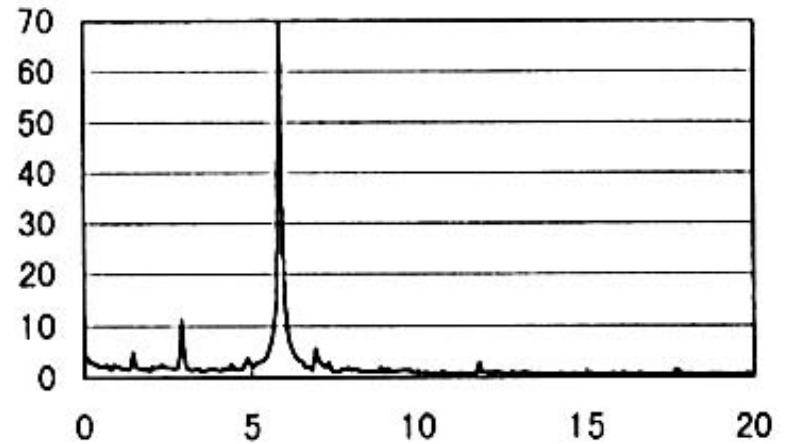
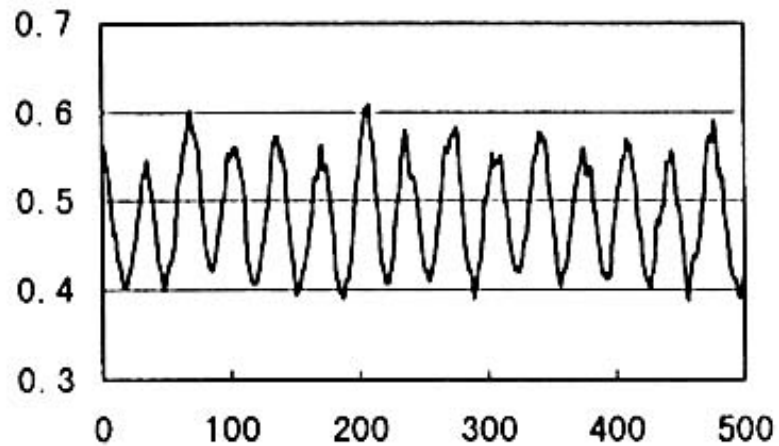
Noise Wiener spectrum

$$W(u) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-2\pi i u x) dx \right|^2$$

$f(x)$: ノイズ、濃度変動

NWSはノイズの周波数成分

カラーハードコピーのNWS

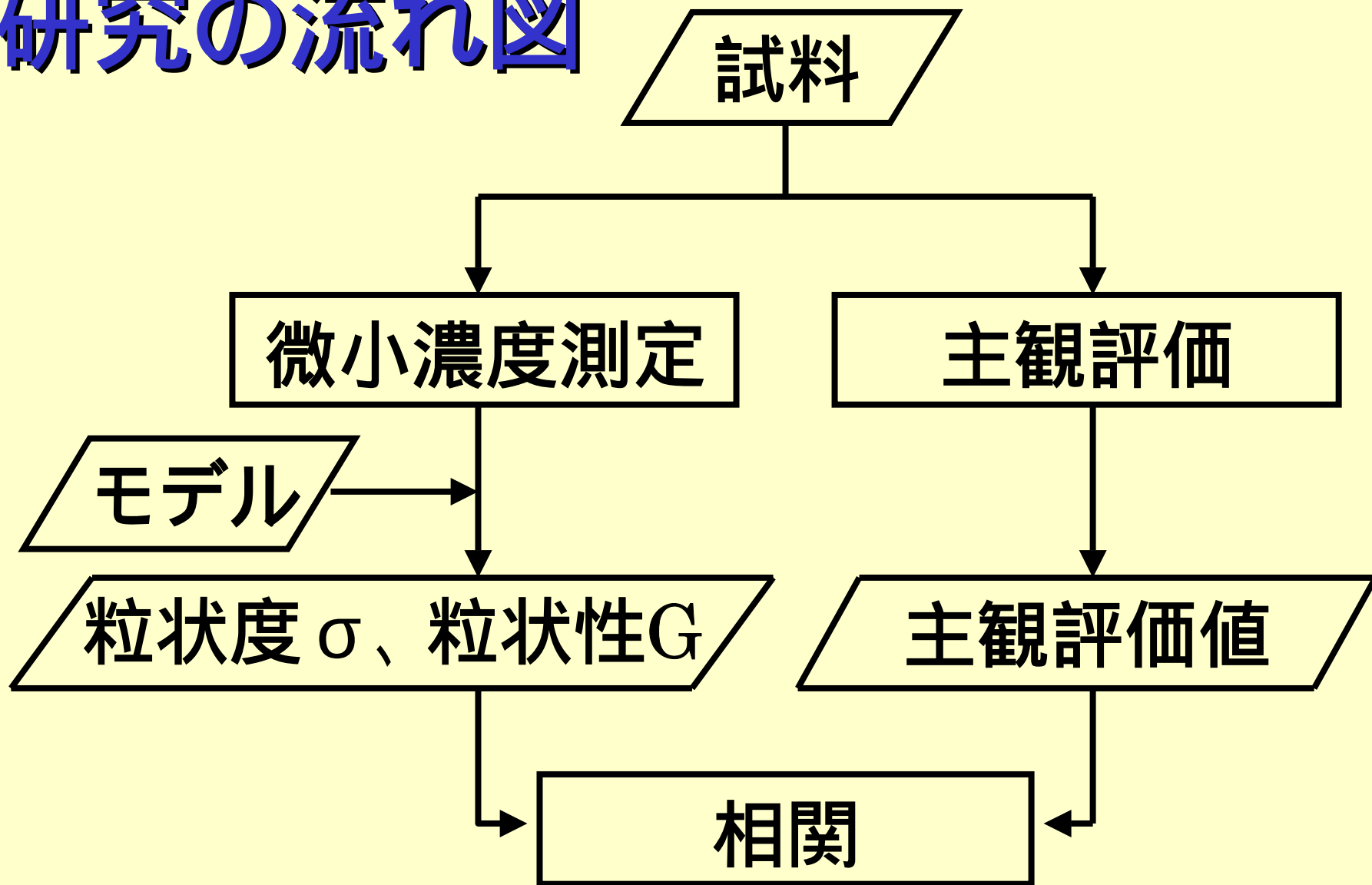


1次元ノイズ



紙送りむら
ノズルの目詰り
光源アレイのむら
走査露光の色ずれ

研究の流れ図



粒状度 σ

$$\sigma = \left[\frac{\Sigma (D_i - \bar{D})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

σ_1 : データ無加工

σ_2 : 4画素相当の開口に換算

D_i : 濃度, $\bar{D}$: 濃度の平均値,

n : データ数, i : 試料の各位置

粒状性 G_D

$$G_D = \frac{dM}{dD} \int \sqrt{NWS(u)} MTF_v(u) du$$

G_D : 粒状性, NWS : ノイズウィナーズスペクトル,

u : 空間周波数[cycle mm⁻¹], D : 濃度

MTF_v : 視覚系の MTF , M : マンセルバリュー

Ref. R.P.Dooley and R.Shaw, J. Appl. Photogr. Eng., 5,
192 (1979)

粒状性 G_E

$$G_E = \left| \frac{dL}{dD} \right| \left[\int NWS(u) \{MTF_v(u)\}^2 du \right]^{1/2}$$

G_D : 粒状性, NWS : ノイズウィナーズスペクトル,

u : 空間周波数[cycle mm⁻¹], D : 濃度

MTF_v : 視覚系の MTF , L : 明度

Ref. P.G.Engeldrum and G.E.McNeill, J. Imag. Sci., 29,
207 (1985)

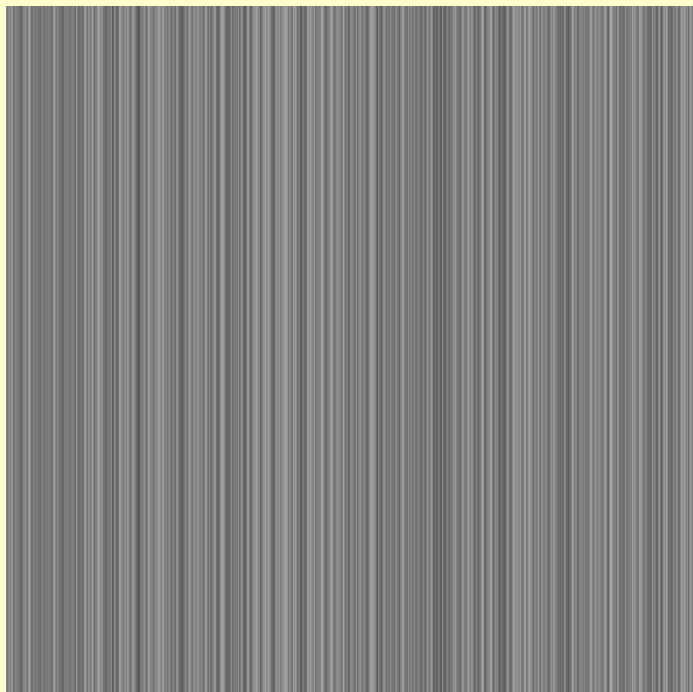
粒状性モデル

試料間の濃度を一定

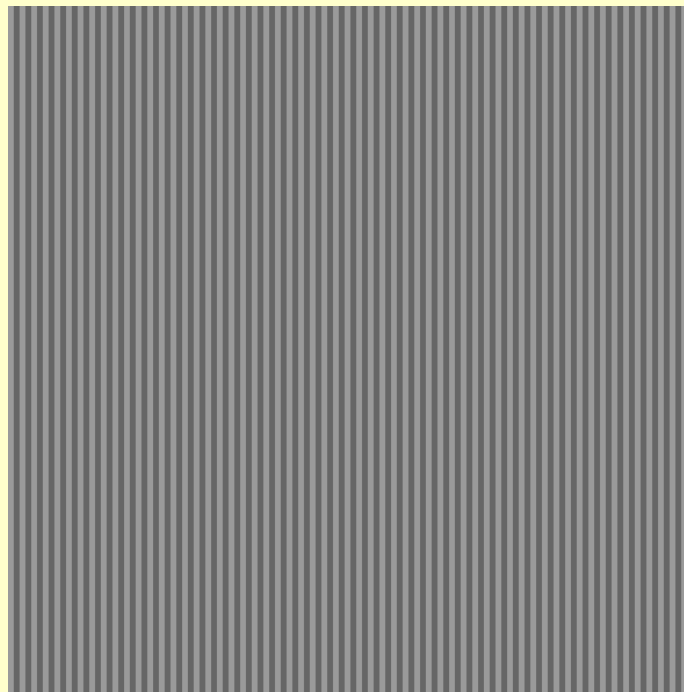
$$G_D = \int \sqrt{NWS(u)} MTF_v(u) du$$

$$G_E = \left[\int NWS(u) \{MTF_v(u)\}^2 du \right]^{1/2}$$

試料

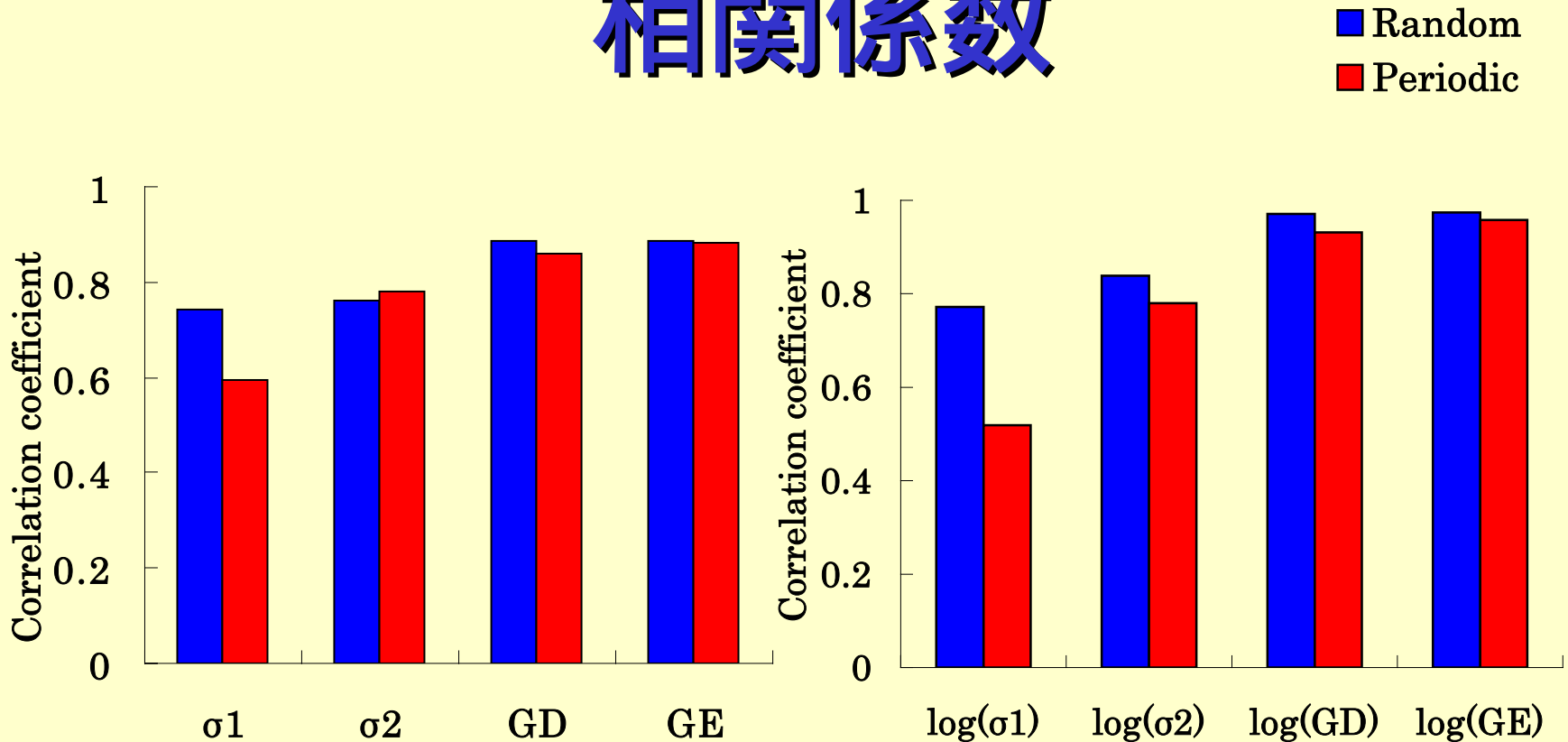


ランダムノイズ



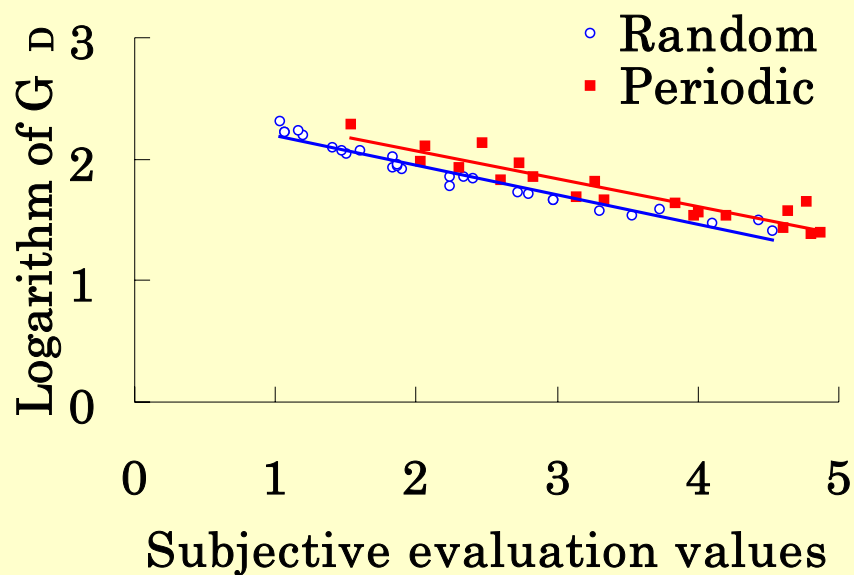
周期ノイズ

相関係数

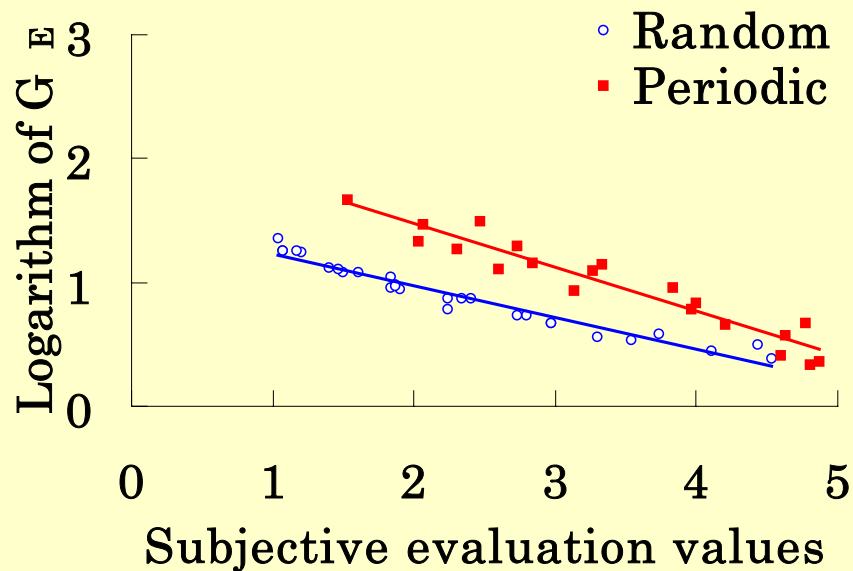


対数表示した粒状度、粒状性の方が
主観評価値と高い相関を示した。

粒状性 G_D , G_E と主観評価値との関係

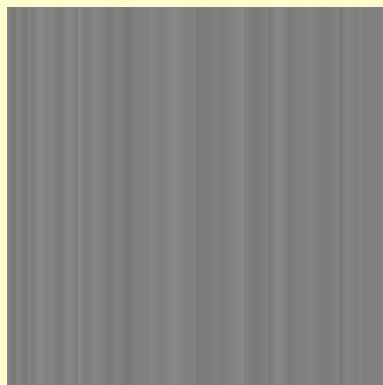


粒状性 G_D



粒状性 G_E

試料



縦



横

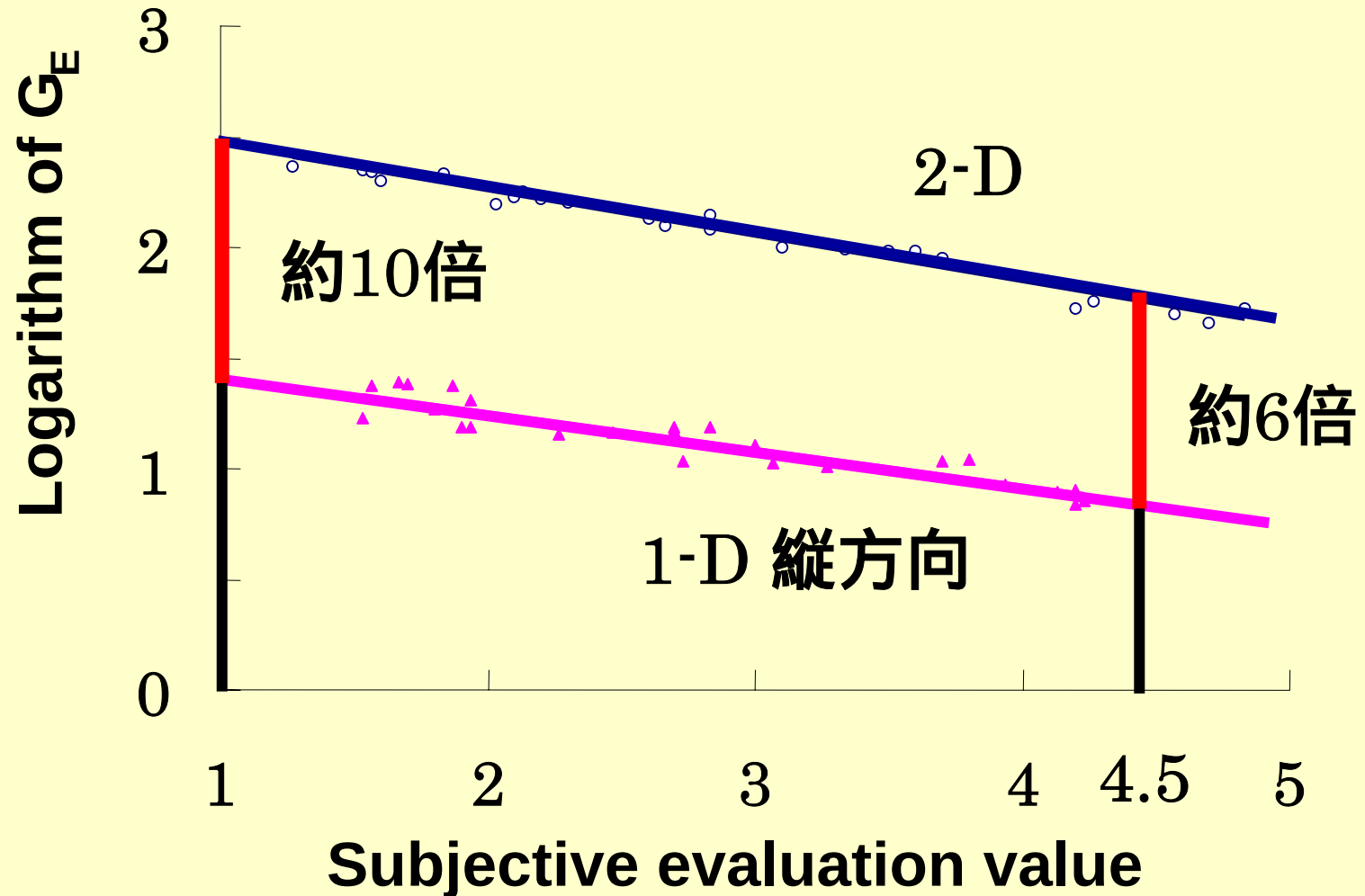


斜め



2次元ノイズ

粒状性 G_E と主観評価値との関係



ノイズによる質感向上



オリジナル



ノイズ付加画像



オリジナル



ノイズ付加画像

最下位ビットの画像



ノイズの統計的性質を
調べることによって、
画像の改ざんが検出
可能

5 . デジタルカラープルーフ

オフセット印刷用デジタルリモート プルーフシステムの開発

経済産業省プロジェクト地域創造
技術研究開発事業(水上印刷株式
会社と共同)

17種類のカラープルーフ(銀塩写
真、電子写真、熱転写プリンタ、イ
ンクジェットプリンタ)

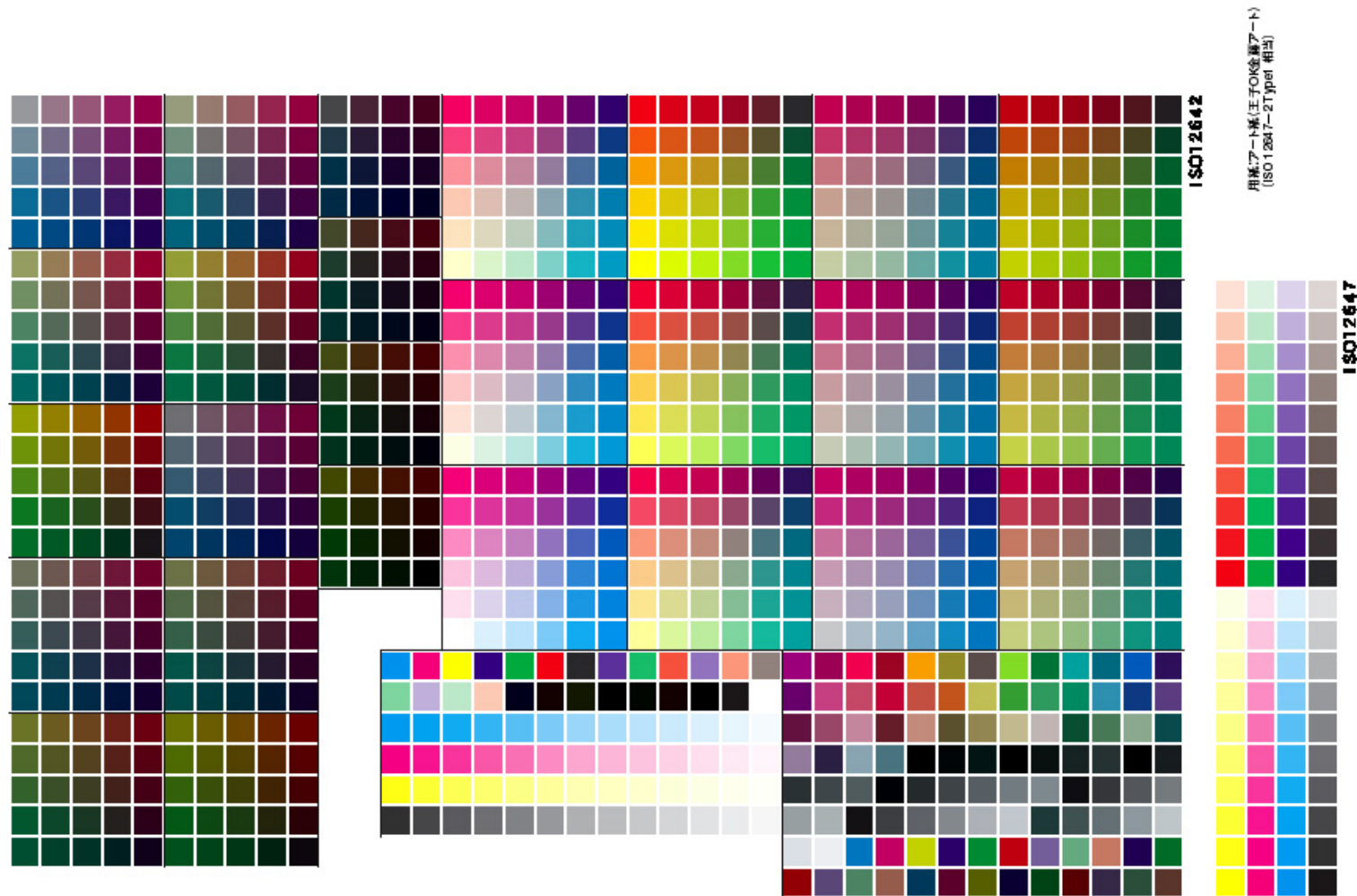
オフセット印刷用デジタルリモート プルーフシステムの開発

水上印刷株式会社が平成14年度
に行った経済産業省プロジェクトの
地域創造技術研究開発事業

当研究室が協力

発表を許可してくださった水上印刷
株式会社に感謝致します

テストチャート-1 カラーチャート



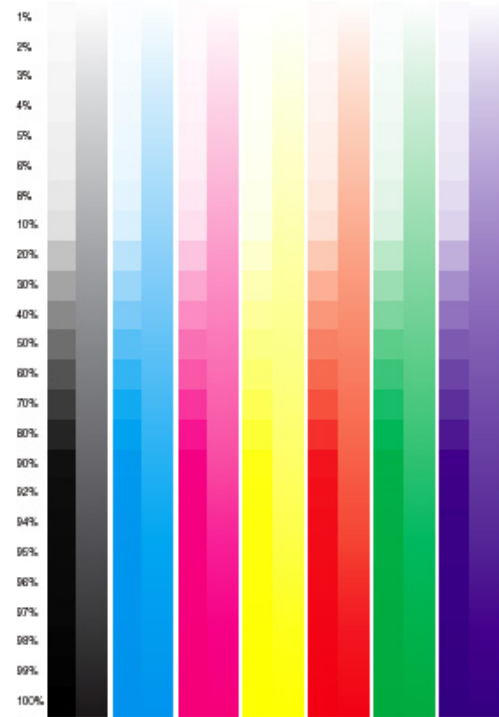
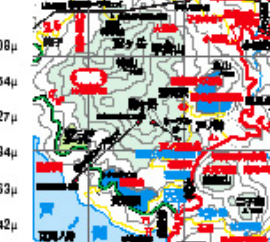
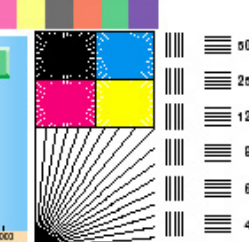
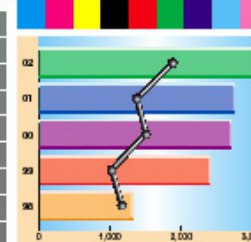
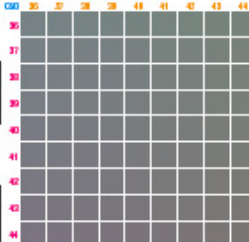
テストチャート-2 ピクトリアル



MIC TEST CHART

メーカー	
プリンタ	
コントローラー	
プロファイル	
解像度	
出力設定	
用紙	
出力日	

10P 縦線「目黒無毒」横線「三王豆」斜線「三王豆」
 10P 縦線「目黒無毒」横線「三王豆」斜線「三王豆」
 10P 縦線「目黒無毒」横線「三王豆」斜線「三王豆」
 10P 縦線「目黒無毒」横線「三王豆」斜線「三王豆」
 10P 縦線「目黒無毒」横線「三王豆」斜線「三王豆」
 10P 縦線「目黒無毒」横線「三王豆」斜線「三王豆」
 10P 縦線「目黒無毒」横線「三王豆」斜線「三王豆」
 10P 縦線「目黒無毒」横線「三王豆」斜線「三王豆」
 10P 縦線「目黒無毒」横線「三王豆」斜線「三王豆」
 10P 縦線「目黒無毒」横線「三王豆」斜線「三王豆」



デジタルカラープルーフの種類

銀塩写真

電子写真

熱転写プリンタ

インクジェットプリンタ

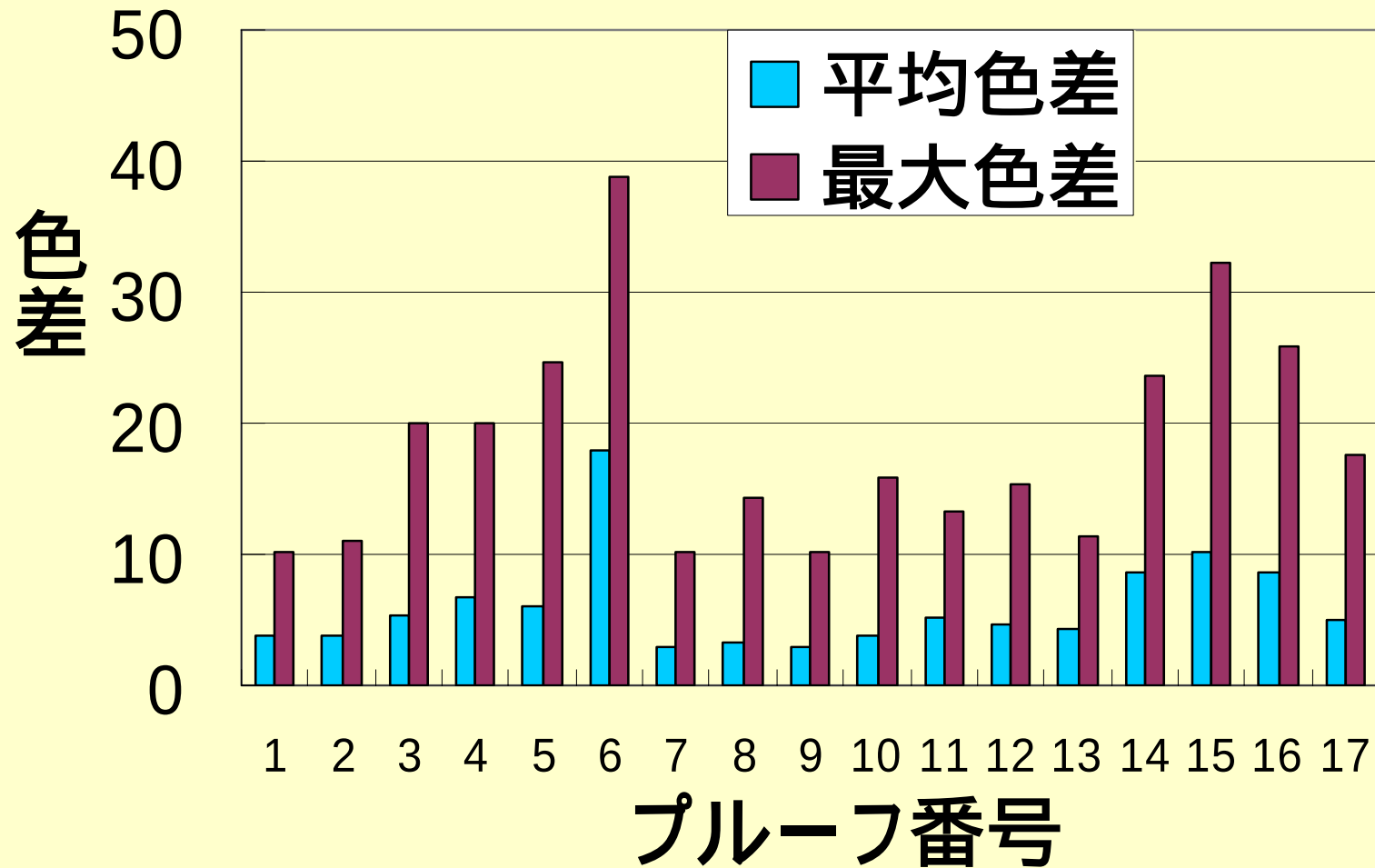
17種類

測色

各装置から出力されたプルーフの
カラーチャート部をスペクトロスキャ
ンを用いて、測色値 L^* , a^* , b^* を測定

本刷りである印刷物の測色値との
色差を算出

平均色差と最大色差



主観評価項目

1. 記入欄
2. 文字(鮮やかさ)
3. グレースケール表
4. 棒グラフ(G,B,P,O,Y,背景のグラデーション)
5. 解像力
6. 地図
7. カラーバー(K,C,M,Y,R,G,B)
8. 中央の女性の絵
9. 女性2人の絵(女性2人の絵の色とモアレ)
10. 金属と古い質感の絵

アンケートの評価基準

5： まったく同じ

4： 似ている

3： まあまあ似ている

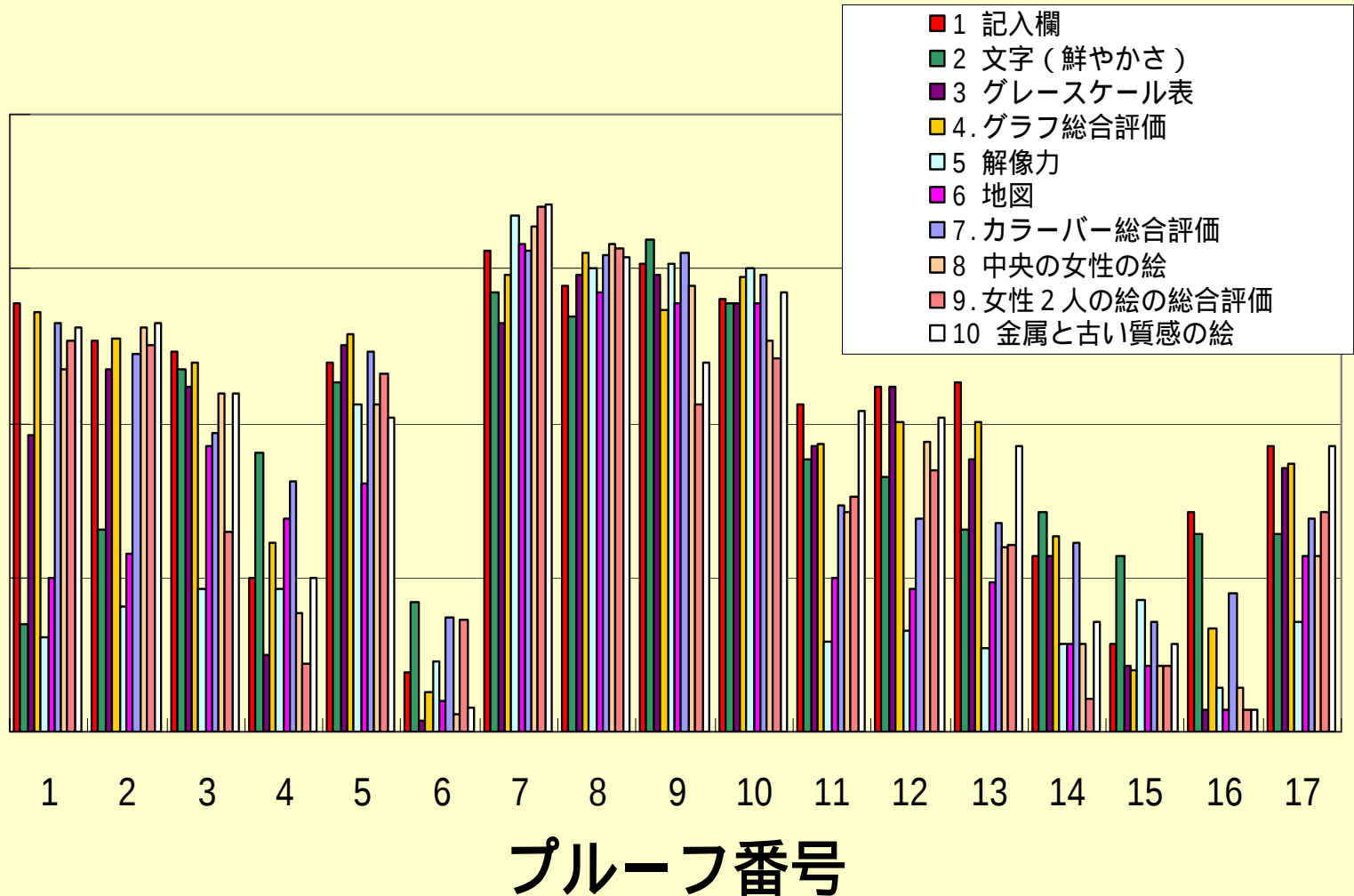
2： あまり似ていない

1： まったく似ていない

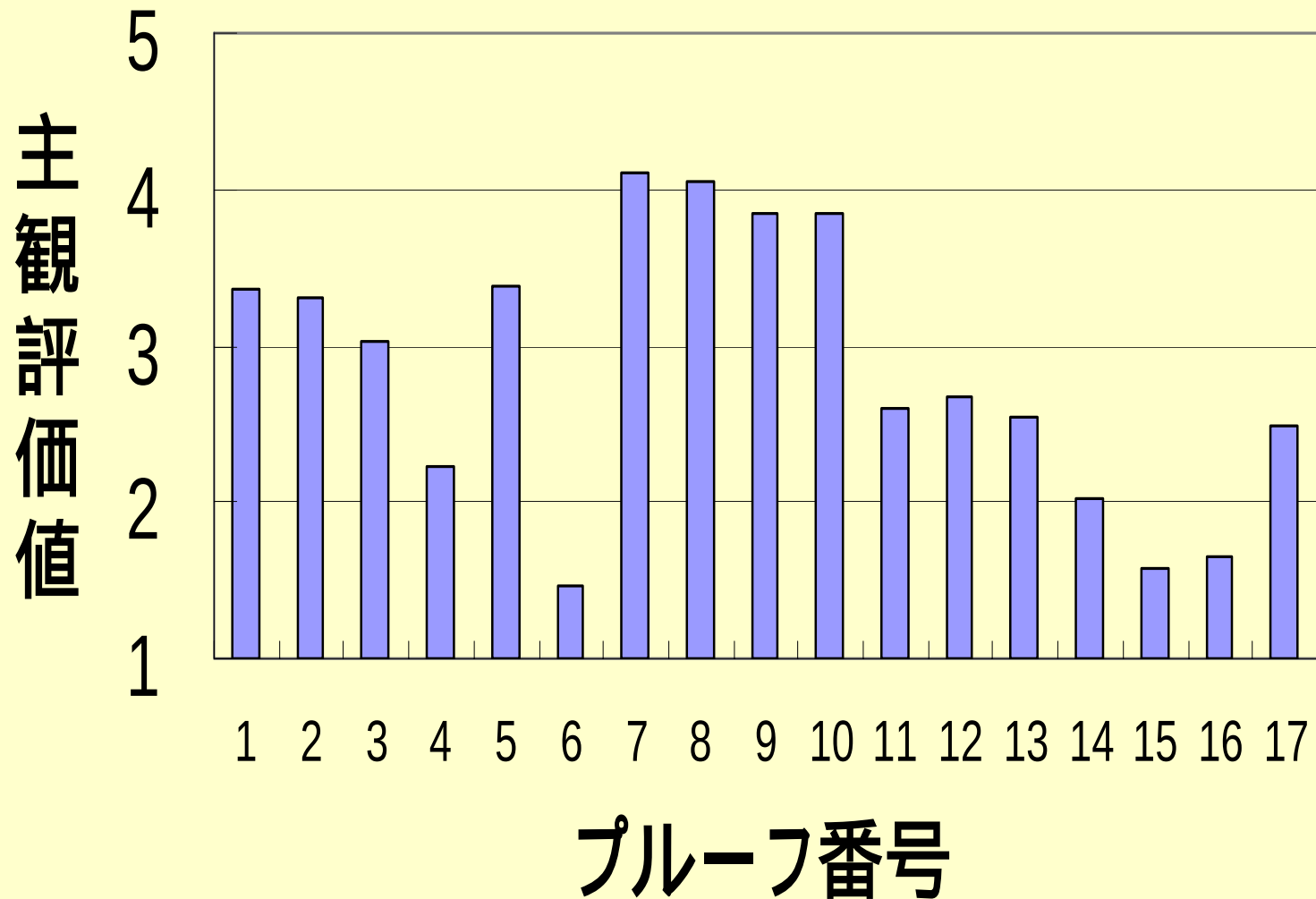
項目別主観評価値

主観評価値

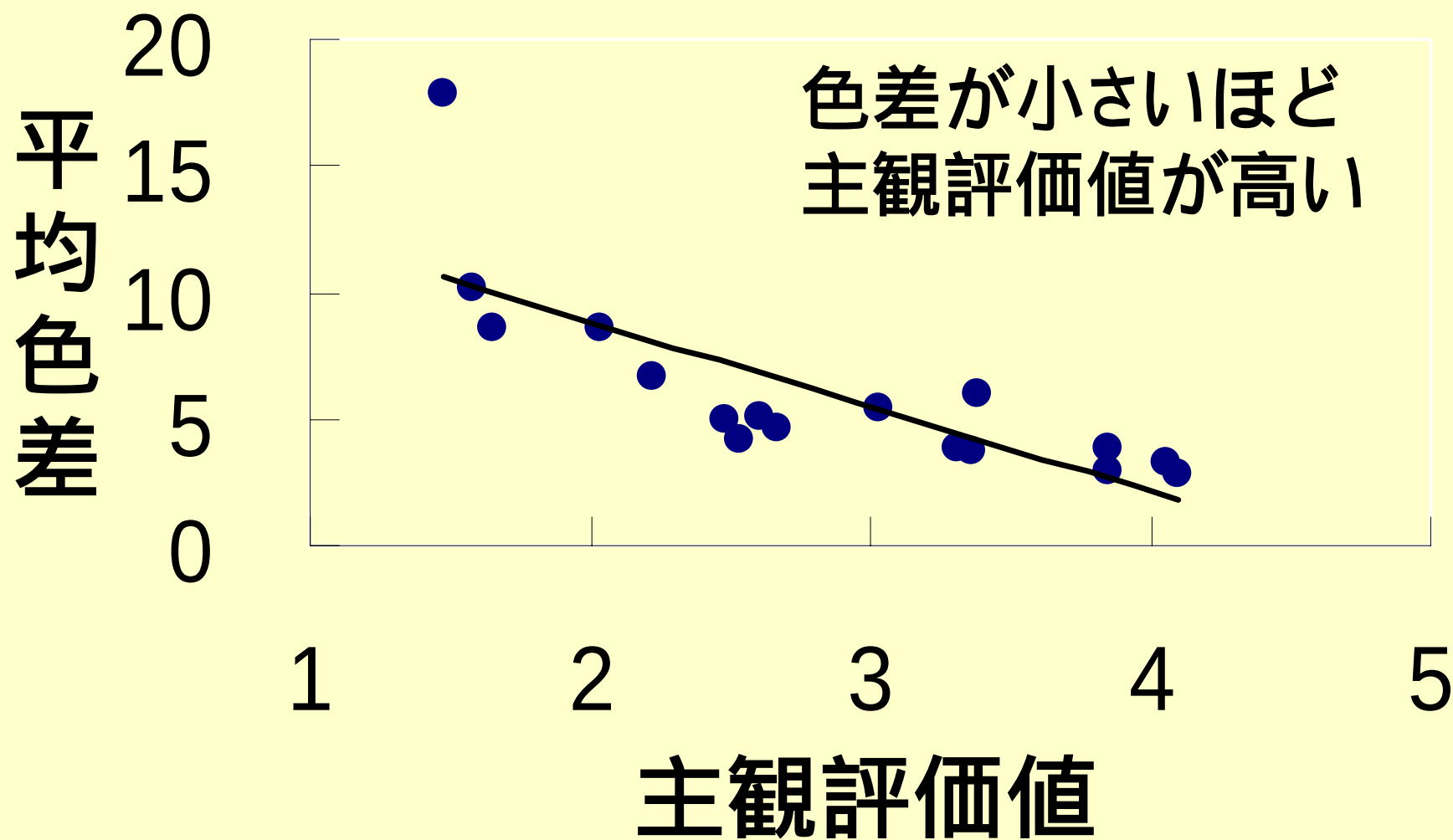
5
4
3
2
1



主観評価値の平均



主観評価と色差の関係



カラ - プルーフ むすび

主観評価値が高かった4プルーフは専用のDDCPとして販売されている装置からの出力であった。

それ以外の装置からのプル - フで色差が小さいものもあったが、主観評価値は高くなかった。

今後、この違いについて検討していく必要がある。