

マクベス測色計とマイクロデンシトメータを用いた

像構造解析

24 December, 1988	第 1 版
25 September, 1992	第 2 版
15 June, 1993	第 3 版
30 June, 2003	第 4 版
14 June, 2004	第 5 版

サカタインクスエンジニアリング株式会社

． 像構造とは

一般に写真像の画質(image quality)は、

{ 鮮鋭度(sharpness)
粒状性(graininess)
調子再現性(tone-reproduction)
色再現(color-reproduction)

の4つの因子によって構成されています。

この中で鮮鋭度(鮮鋭さ)と粒状性(粗さ)は、1枚の写真を見たときの画質に関する感覚的な評価用語であり、写真分野ではこの2つの因子をまとめて像構造(image structure)と呼んでいます。

像構造に関しては、約20年前から定量的な評価方法の研究が盛んに行われ、現在ではフーリエ解析(Fourier analysis)による方法が広く実用されています。その理由は、この評価方法が画像形成システムの各要素の分離や結合が容易であり、また空間周波数領域で取り扱うため、有益な情報が多く得られるためです。

特に写真業界では、営業戦略上の重要な位置付けの物として像構造解析が積極的に使われてきました。写真はその良し悪しを感覚量で評価するため、フィルムのカタログ等にはMTFとWSが必ず記載されています。近年、写真以外のグラフィックアーツ分野でもこの感覚量が重要なファクターになってきています。

本書はこれらについてできるだけ簡単な形で表現しています。

．鮮鋭度

一般に、鮮鋭度（シャープさ）に影響を及ぼす因子は、

{ 散乱(光滲:irradiation)
{ 反射(halation)

です。

これらのファクターによってボケが発生し、このボケの程度を鮮鋭度と呼んでいます。つまり、鮮鋭度とは、写真像の輪郭の明瞭さと微細な像を描写する能力をあらわす量です。

1 . 解像力 (r e s o l v i n g p o w e r)

平行な白黒の線の像を撮影し、現像処理後に生じた写真像において、解像しているとみとめられる1mm当りの線数 [l i n e / m m] で評価する方法。平行な線条としては2本以上の黒線と白線の解像力テストチャートが多く使用されています。通常、感光材料には透過型のものが、またレンズなどの場合には反射型のテストチャートが使用されています。

[特徴]

- (1) 測定器によって解像力が異なる。
- (2) 測定する人、すなわち像を観察する人の認知の仕方によって解像力が異なる。
- (3) 画像形成システムの各要因の解像力を結合したり、分離したりすることが出来ない。
- (4) 解像力がよいからと言って鮮鋭度がよいとは限らない。(鮮鋭度はむしろ解像力より特性曲線に深い関係を持っている)
- (5) マイクロデンシトメーターがいない。

2 . アキュータンス (a c u t a n c e)

エッジ像をマイクロフォトメーター（マイクロデンシトメーターは濃度測定、これは光量測定）で走査したとき得られる曲線からパラメーターを求め、鮮鋭度を評価する方法。特性曲線の（直線部の勾配）が高い物や足が短いものはアキュータンスが高い。

$$A_{JH} = \frac{DS \times \int_B^A (dD / dx)^2 dx}{(xb - xa)}$$

[特徴]

- (1) 心理的鮮鋭度との対応がよい
 - (2) 測定が面倒
 - (3) 精度がわるい
 - (4) 写真では現在あまり使われていない
 - (5) 使用できる特性曲線が限定されている
- $$\begin{cases} D = a e^{3(0 - e - e_0)} \\ D = e - (2/3) \cdot e_0(e - e_0) \\ = 3 a e^{0.2} \end{cases}$$

の条件が満たされている必要が有る。

3 . M T F (変調伝達関数 : modulation transfer function)

今日もっとも広く使用されている鮮鋭度を評価する方法として、フーリエ解析による M T F が
あります。

ほとんどおなじ意味のものとして、

名称	使用分野	取扱情報
O T F (Optical Transfer Function)	光学分野	振幅と位相
r e s p o n s e f u n c t i o n	光学分野	振幅と位相
M T F	写真関係	振幅のみ

があります。

[定義]

M T F は被測定系に入射した光強度分布が正弦的に変化する入力 A (u) を与え、その出力 A ' (u) を測定して、

$$R(u) = \frac{A'(u)}{A(u)} \quad (3.1)$$

として表すものです。ここで u は 1 mm 当りの線数 (空間周波数:spatial frequency) です。
レンズなどの光学系の場合は、入射光量 - 出力光量の関係が線型であるので式 (3 . 1) の定
義ですが、写真フィルムの場合は入射露光量 E と出力の写真透過率 T の関係が、指数関数に近い
曲線です。そのため次のような定義で M T F を求めます。

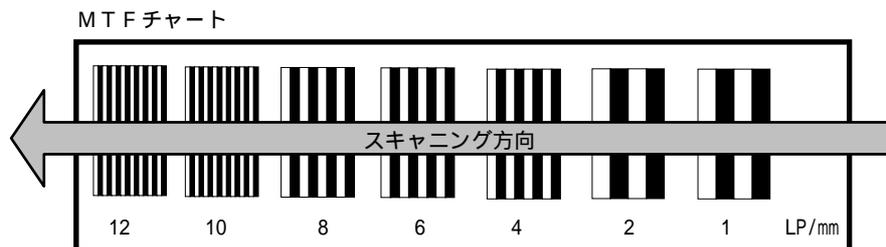
露光と現像により得られる透過率分布 T (または濃度分布 D) を、露光量 E、対透過率 T (ま
たは濃度 D) の関係曲線 (一般に特性曲線のこと) を使って、露光量分布に変換する。この変
換された露光量分布は、入射した光子 h が乳剤層中で多数の散乱を受け、ハロゲン化銀結晶
粒子に吸収された分布を表していると考えられます。
このように E - T 曲線で変換された露光量を、像を形成するのに有効に作用した露光と考え、
有効露光量 (effective exposure) と定義します。写真フィルムの M T F はこの有効露光領域
で定義し、E - T 曲線の非線型性を解決しています。

$$R(u) = \frac{E(u)_{max} - E(u)_{min}}{E(u)_{max} + E(u)_{min}} \quad (3.2)$$

[測定方法]

- 正弦波露光 - ミクロフォトメーター法
- 方形波露光 - フランホーファー干渉計法
- スリット露光 - ミクロフォトメーター法
- エッジ露光 - ミクロフォトメーター法
- 点露光 - ミクロフォトメーター法
- 方形波露光 - ミクロフォトメーター法
- その他

[方形波露光 - ミクロフォトメータ法]



- (1) M T Fチャートを撮影する。
- (2) 撮影に使用した感材の特性曲線を用意する。
- (3) マイクロデンシトメーターでスキャニングする。
- (4) C T F (contrast transfer function) を計算する。
- (5) C o l t m a n の補正式でM T Fを計算する。
- (6) グラフ化する。

[特徴]

系の分離や結合が容易：写真画像形成系の設計や改良指針を得るのに適しています。
 (従来であればコンポリューション積分で最終のボケを計算する必要があったが、M T Fでは個々のレスポンス関数の積 (並列の場合は和) で最終のボケを計算することができます。)

[解像力との比較]

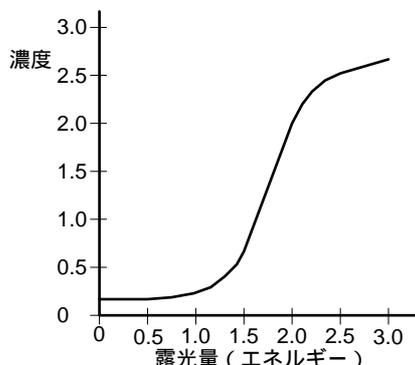
解像力は実際に写真像の鮮鋭度に関連する低い空間周波数領域に無関係で、高い空間周波数領域で決定されますがM T Fでは空間周波数領域についての情報が得られるため正しい鮮鋭度の評価解析を行うことが出来ます。

[像構造解析システムでのM T Fの測定]

画像解析システムでは、「方形波露光 - ミクロフォトメータ法」をマイクロデンシトメーターを用いる形でM T Fの測定を行っています。一般にミクロフォトメータよりもマイクロデンシトメーターの方が高価ですが、本システムでは、「 . 粒状性」でR M Sを取り扱う関係上マイクロデンシトメーターを使用します。

- (1) 特性曲線を作成します。
- 1 1 段から 2 1 段の濃度段階 (或は網点%) を持つ、当該出力機での特性曲線を作成します。

特性曲線グラフ例

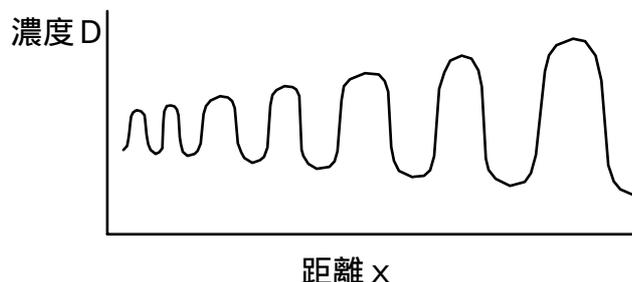
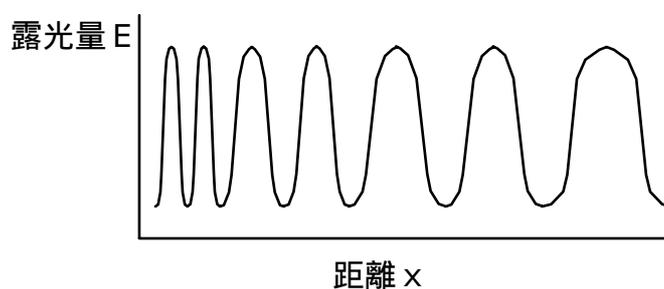


(2) 当該出力機でMTFチャートを撮影しマイクロデンシトメーターで測定します。
例えばMTFチャートとして化成オプトニクスKYOKKO type 1は、0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0 [line/mm]の空間周波数のステップです。
MTFステップデータの変更により他のチャートにも対応できます。

- (3) パソコンがMTFの計算を行います。
- 1) D_H と D_L を計算します。
 - 2) 特性曲線を参照し、 $\log E_H$ と $\log E_L$ を計算します。
 - 3) CTFを計算します。
 - 4) MTFを計算します。

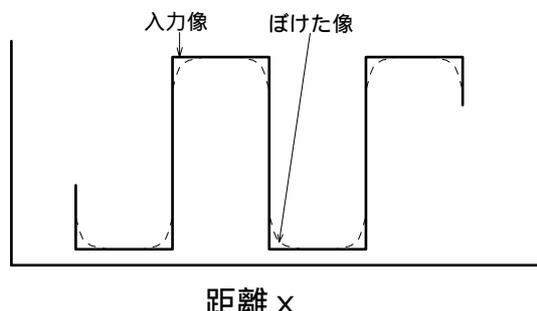
(4) MTFのグラフ出力や、データ登録を行います。

- 正弦波入力の場合の入力と出力 -



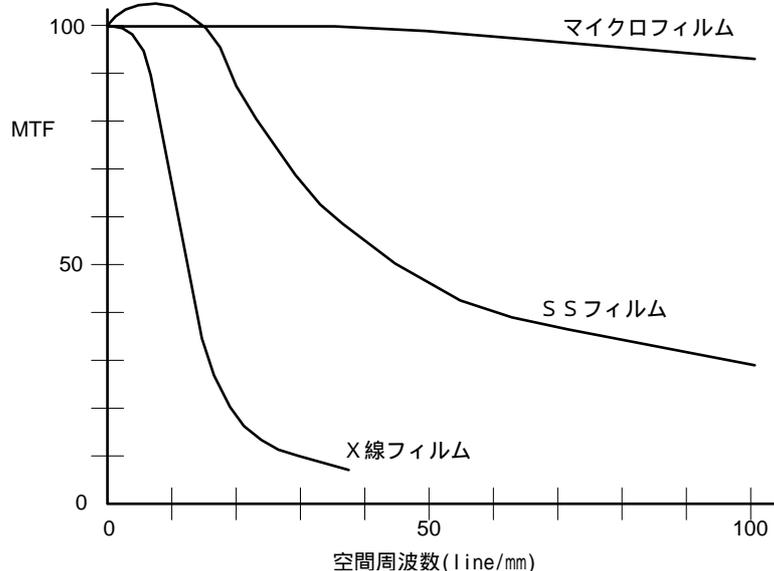
周波数の高い領域では、黒部分が白部分に被ったり、その逆によってコントラストが低化します。MTFではこの程度によって鮮鋭度を評価します。

- 方形波入力の場合の入力と出力 -



矩形波入力の場合でも正弦波入力の場合と同様に、コントラストの低下が occurs.

- MTF グラフ例 -



MTFでは上記のグラフの用に、各々の空間周波数ごとのコントラストの低下の程度を評価できます。横軸は正確には「Line pair / mm」なので、白黒の繰返しパターンの場合0.5mmの白と0.5mmの黒の繰返ししている部分の空間周波数が1Line/mmになります。同様に0.1mmの白と0.1mmの黒の場合は5Line/mmになります。300dpiのプリンタが表現できる最大の空間周波数は、

$$\frac{300(\text{dpi})}{2 \times 25.4} = 5.91(\text{Line/mm})$$

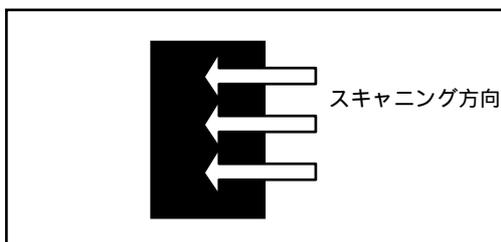
となります。

簡単なグラフの見方としては、

- { MTF=0.1の時の空間周波数解像力
- { 空間周波数=2の時のMTF手持ちの距離で人の目に最も影響を与える

などがあります。

MTFエッジ法チャート



- (1) MTFエッジ法チャートを撮影する。
- (2) エッジ部の濃度データをFFTにかける。
- (3) グラフ化する。(方形波露光 - ミクロフォトメータ法同様)

[特徴]

方形波露光 - ミクロフォトメータ法同様に系の分離や結合が容易。

方形波露光 - ミクロフォトメータ法同様に正しい鮮鋭度が得られる。

デジタル出力機(デジタルコピー、レーザプリンタ等)に用いた場合、方形波露光 - ミクロフォトメータ法では出力に再現できない空間周波数の影響を受けますが、この方法では出力の空間周波数に依存しないため、dpiの異なる出力機間に渡る評価が可能です。この方法を用いることで、より物理的な評価ができます。

[問題点]

MTFは鮮鋭度を得るのに現在最も優れた方法ですが、現在の出力機が高細線化による美麗化を著しく進めた結果、MTF測定機として使用されるマイクロデンシトメータにも高細線化が必要となっています。

従来から使用されてきた測定面積よりも非常に大きな面積を照明するタイプのマイクロデンシトメータでは、精々200dpiまでの測定しかできません。

現在の出力機が達成している300~800dpiを正確に測定するためには3,000~8,000dpiの解像力を保つマイクロデンシトメータが必要です。(また、非常に小さい面積なのでオートフォーカス無しではピントを合わせることができません。現在このスペックと機能を合わせ持つマイクロデンシトメータは当社のTMD - 2100しか有りません。)

エッジ露光 - ミクロフォトメータ法の場合はよりシビアな測定機が要求されます。サンプル自体に空間周波数を持たないために、従来型のマイクロデンシトメータの用にマイクロデンシトメータ自体が有効空間周波数内でコントラストの低下を起しているのを測定しているのか判らなくなるからです。

. 粒状性

写真フィルムの粒状性（粗さ、滑らかさ）は、

{ 心理的粒状性 (graininess) 肉眼で観察した粒状性
 { 物理的粒状性 (granularity) 光電検出機で測定した粒状性

の2つがあります。一般の写真像は肉眼で観察する機会が多いので、心理的粒状性を評価する方がよいのですが、心理的粒状性の測定は精度と迅速性の点で劣っているため、現在ではほとんど使われていません。

物理的粒状性の測定は、肉眼で観察される写真フィルムについても、粒状パターンの物理的性質を知るために常套手段として行われています。物理的粒状性を評価するためには評価は、測定された物理的粒状性に視覚のOTFを考慮して計算される心理物理的粒状性が心理的粒状性となんらかの相関性が有ることが必要です。このために現在では、

{ RMS (Selwynの粒状性)
 { 自己相関関数 (autocorrelation function)
 { ウィナースペクトラム (Wiener spectrum または power spectrum)

が用いられています。

[心理的粒状性の測定方法]

心理的粒状性の測定には試料に当てる光の条件として以下の2つがあり、

- 一定試料照明 試料の照明を一定にする（試料の濃度で視野輝度が変化する）。
これはX線フィルム、シネポジフィルムに適している。
- 一定視野輝度 試料の濃度に応じて照明を可変する（視野輝度の変化はない）。
これはネガフィルムに適している。

また、測定の方法としては、

- (1) 粒状パターンを拡大投影し粒状構造が見え無くなる時、あるいは見えはじめるときの拡大倍率の逆数や消失距離で表す方法
- (2) 規定の粒状パターンを決めておいて資料を拡大投影したときにほぼ同一に見えるときの拡大倍率の逆数で表す方法

があります。

心理的粒状性をグラフに書くときは通常縦軸に「粒状性消失距離 (mm) 」横軸に「拡散濃度」をプロットします。

[物理的粒状性]

物理的粒状性は、光の散乱や局部的透過率変化などを客観的な量で表示した粒状性構造の性質です。このような測定が行われる理由としては、

{ 再現性客観性の点で優れている
 { 適用性がよい

があげられます。

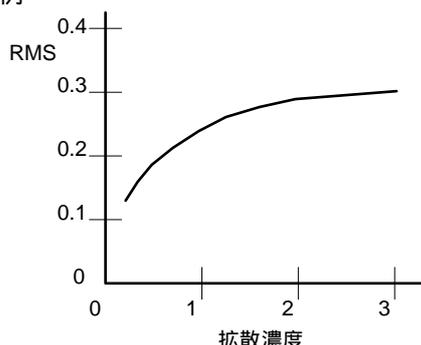
1 . R M S

[定義]

ある拡散濃度で一様に露光された感材を現像してマイクロデンシトメーターで1次元的に測定したときの標準偏差。

[測定方法]

- (1) 測定試料を作成する。
- (2) 濃度計で拡散濃度を測定する。
- (3) マイクロデンシトメーターでRMSを測定する
- (4) 数値表現には「ローカルRMS」と「トータルRMS」が使われます。また「拡散濃度」を併記する場合があります。
- (5) グラフの例



[画像解析システムでのRMSの測定]

- (1) 一様に露光された各々拡散濃度のことなる試料を作成します。
- (2) 拡散濃度を濃度計で測定します。
- (3) RMSをマイクロデンシトメーターで測定します。
- (4) (2) (3) を繰り返します。
- (5) プロッターでグラフ化します。前ページと同様のRMSグラフが得られます。

2 . 自己相関関数

[定義]

RMS測定のとくに使われた、一様に露光された試料を測定したときの投影濃度データを計算して求めます。

自己相関関数の概念は

「いま、全くでたらめな空間的に変動する曲線を考える。この曲線のごく近傍の2点間にはかなり高い相関性があるが、その間隔が大きくなるにつれて相関性を失って行く。そこで2点間の空間間隔を変数として相関が変ることからこのでたらめな曲線の性質を知ることができる。この方法は空間的に変動する1種の量が空間間隔によって隔てられた2点間で、どれほどの相関性があるかを知ろうとするものである。このような相関を自己相関と呼ぶ。」
です。

[表示方法]

縦軸に (, 0) 横軸に (μm) のグラフで表示します。

: 本システムでは自己相関関数はウィナーズスペクトラムを得るために過渡的に計算されるものなので、自己相関関数そのものを表示したりグラフ化する機能は持っていません。

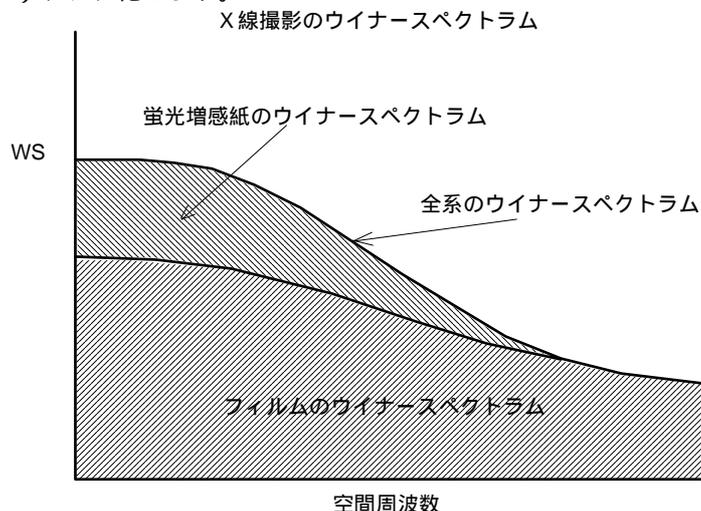
3 . ウィナーспекトラム

[定義]

自己相関関数をフーリエ変換することによって求めます。
 粒状性の分布は雑音のような不規則分布であるのでフーリエ変換も級数も使用することはできない。しかし、積分可能な領域を区切ると考えるとそのパワーが有限なので、まず統計平均としての自己相関関数を計算し、これをフーリエ変換することによって位相についての情報は無くなるが、スペクトルに相当するものを得ます。これが一般調和解析と言われる方法です。これがパワースペクトルでありウィナーспекトラムです。

[測定方法]

- (1) A C F (自己相関関数) のデータを何点か用意します。
- (2) A C F を展開します。
- (3) F F T を通します。
- (4) W S (ウィナーспекトラム) を計算します。
- (5) グラフ化します。



[特徴]

粒状性に影響する各々のファクターごとのWSを測定の組み合わせから求めることができるので、各々のWSをデータベースとして持っておけば、未知の組み合わせのときのWSを実際に組み合わせて測定しなくても、各々のWSのたし算で計算することができます。

[問題点]

WSは粒状性を得るのに現在最も優れた方法ですが、現在の出力機が高細線化による美麗化を著しく進めた結果、WS測定機として使用されるマイクロデンシトメータにも高細線化が必要となっています。

従来から使用されてきた測定面積よりも非常に大きな面積を照明するタイプのマイクロデンシトメータでは、精々200dpiまでの測定しかできません。

現在の出力機が達成している300～800dpiを正確に測定するためには3,000～8,000dpiの解像力を保つマイクロデンシトメータが必要です。(また、非常に小さい面積なのでオートフォーカス無しではピントを合わせることができません。現在このスペックと機能を合わせ持つマイクロデンシトメータは当社のTMD - 2100しか有りません。)

．調子再現性

調子再現性の解析はさまざまな方法が用いられます。当社のシステムでは例えば、

- { 特性曲線画像解析システム
- { 濃度ガンマ曲線画像解析システム
- { トーンリプロダクション曲線

などがあります。

1 ．特性曲線

[定義]

露光量（入力）に対する濃度（出力）を見ます。入力は露光量でも濃度でもかまいません。

[測定方法]

- (1) 入力の分かっている何段階かのステップについて、投影濃度か拡散濃度を測定します。
- (2) グラフ化します。（ 5 ページを参照）

[特徴]

画像の評価にもっとも使われている評価方法です。

2 ．濃度ガンマ曲線

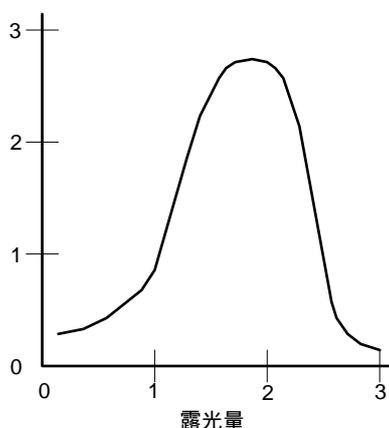
[定義]

露光量（入力）に対する濃度（出力）の変化量を見ます。入力は露光量でも濃度でもかまいません。特性曲線を微分したものです。

[測定方法]

- (1) 特性曲線とおなじデータを計算します。
- (2) グラフ化します。

濃度ガンマ曲線



[特徴]

最大感度を持つ露光量とその巾を表すので、適性露光を決定するのに有効です。

3 . トーンリプロダクション曲線

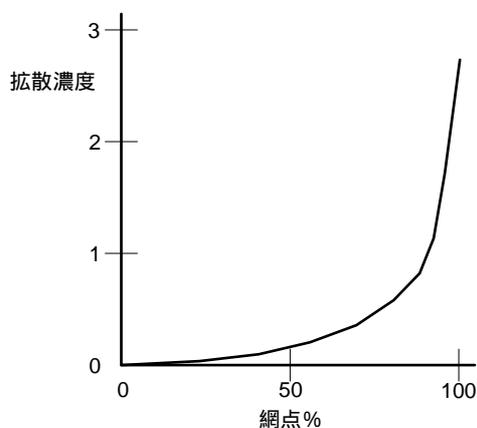
[定義]

入力した濃度に対する網点%の再現を見ます。

[測定方法]

- (1) 濃度ステップサンプルを網点化して、それを濃度計で測定します。
- (2) 測定した濃度を網点%に変換します。
- (3) グラフ化します。

トーンリプロダクション曲線



[特長]

通常カラー原稿となる写真は0から2.5程度の濃度レンジを持っていますが、印刷機はせいぜい0から2程度のレンジしかありません。この中でできるだけ正確に原稿を再現するために、濃度を網点に変換して印刷しますが、濃度と網点%の関係をつかんでおかないと品質管理に支障をきたすことがあります。これを測定するのがこのグラフです。おもに製版や印刷で使われます。

色再現

色再現の測定評価は大別すると、

- 分光光度計を用いるもの
- 色差計を用いるもの
- 濃度計を用いるもの（カラーフィルター付マイクロデンシトメーターを含む）

に分類することができます。

1. Macbeth分光光度計を用いるもの

10nm	オフライン	積分球方式	CE-7000A	QCソフトウェア 解析ソフトウェア CCM
			CE-i5	
			CE-2180UV	
			CE-XTH	
			CE-2145	
20nm	オンライン	45/0度方式	SpectroEye	QCソフトウェア プロファイラー
			SpectroLino	
		45/0°方式	ER-50	オンライン運用ソフトウェア

色の測定評価には分光光度計を用いるのが現在もっとも良いとされています。理由は、濃度計と違って、分光光度計は人間が識別する全ての領域の光を測定できるからです。人間が識別し得る光の波長は400nmから700nmですが、濃度計ではフィルター特性にもよりますがこの波長域の内の3つの領域しか捉えられないのに対して分光光度計は全ての領域を捉え、そのうえに色材に影響を与え得る紫外領域と赤外領域を捉えることができるものもあります。

分光光度計を用いて色再現の評価を行う場合もっとも一般的な方法は色差を求めることです。色差とは、標準の色（明度、色度）に対する試料の色（明度、色度）の差です。各々の分光反射率（透過率）に視野と光源で決まる3刺激値の重荷係数をかけそれを必要な色差式に通すことにより色度と色差を求めることができます。

例：視野（2°、10°）

光源（ASTM [A、C、D75、D65、D55、F2、F7、F11]、JIS [A、C、D75、D65、D55、F6、F8、F10]）

色差式（ハンターLab、CIEL*a*b*、FMC - 、CMC、BFD）

：視野と光源で3刺激値を決めます。

分光光度計を用いる色再現性の管理は色差のほかに、

- 分光反射率（透過率）カーブ - 分光データそのものを用いた色彩管理
- メタメリズム - 試料を参照する光源が変わったときの試料の色、色度、色差を求める
- K/S - 光学濃度を求めます。試料の着色力が分かれます。
- カラープロット - 色度と色差を表示するグラフ

などがあります。他に、マンセル値を求めたり、色度図上に試料の色の位置をプロットしたり、濃度を求めたりすることができます。

2 . 色彩計を用いるもの

分光光度計と同様に、色度と色差を求めて色の測定評価を行います。視野と光源が限定されるため分光反射率やメタメリズム、K / Sを求めることができません。濃度計に3色のカラーフィルター（R、G、B）があるように、色差計には3刺激値を求めるための3つのフィルター（X、Y、Z）が入っています。

色彩計では、

{ 色差
{ カラープロット

などで色再現の管理を行います。

： M a c b e t h に色彩計はありません

3 . M a c b e t h 濃度計を用いるもの

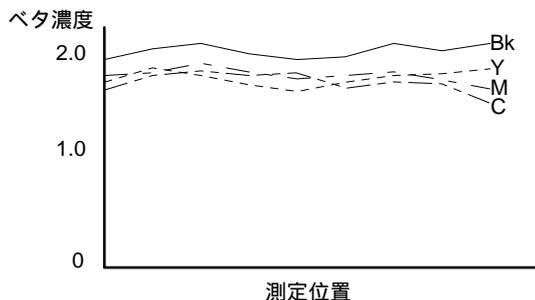
分光光度計や色差計と異なりプロセスカラーについての測定を行います。プロセスカラーとはオフセット印刷などで使われるイエロー、マゼンタ、シアン、ブラックの色のことです。印刷物では原稿の色を再現する場合に通常この4色を用います。このプロセスカラーを測定して色再現を見るために濃度計が使われます。

通常、印刷物の色再現を測定評価するためには、濃度計を使って、

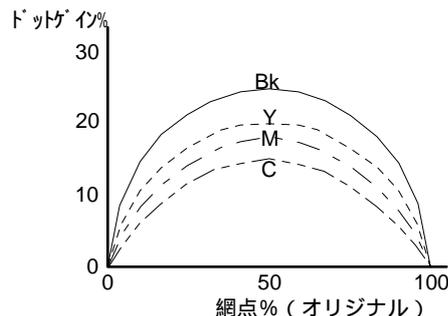
ベタ濃度	Y、M、C、Kのベタ濃度（100%網点濃度）を評価します。
ドットゲイン	Y、M、C、Kの網点%（1～25段階程度）の太り量を評価します。カラーバランスを決定する最大の要因です。
トラッピング	2次色のR、G、Bを評価します。各々の色の重なり部分のマスク効果を考慮した計算方法もあります。
カラーヘキサゴン	濃度を主体としたプロセスカラーによる印刷物の演色範囲と100%トラッピングの演色範囲と2次色のカラーバランスを評価します。
カラーサークル	濁りを主体としたプロセスカラーによる印刷物の演色範囲を評価します。
スラー・ダブリ	印刷機械の状態によるドットゲイン量とその方向を、ピュアードットゲイン（光学的ドットゲインと圧力による網点の潰れをたしたもの）から分離して評価します。

などを管理します。

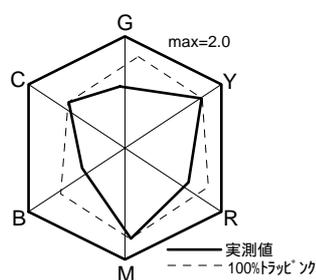
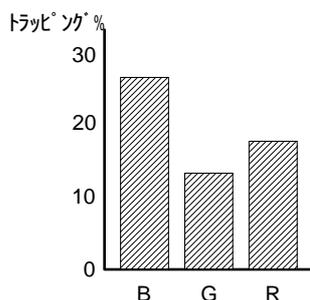
ベタ濃度グラフの例



ドットゲイングラフの例



トラッピンググラフの例



：これらのグラフは、グラフの紹介のために書いたものであり、実際の測定には基づいていません。なを、ここであげたドットゲインのグラフは理想的な形状に近いのですが、実際はドットジャンプや調子再現の不良によって波打つのが見られます。これを評価することで調子再現をも測定することができるわけです。

．最後に

濃度管理と色差管理は十分に熟成されているが、分光光度計による色管理はやっと実務ベースに乗りかけたところであり、ましてマイクロデンシトメーターを用いた管理は始まったばかりというのが、正直なところではないでしょうか。

我々サカタインクスは、15年ほど昔から分光光度計に取り組み、20数年前から始まった濃度計による管理技術を10年ほど前から次々とコンピューター化し、更に4年ほど前からマイクロデンシトメーターに取り組んできました。

本書は我々のもつ技術を紹介することで少しでもお客様の仕事のお手伝いができるならと思いつく作りました。

何か気づかれたことなどございましたら、担当営業の方に御一報下さい。心よりお待ちしております。

．参考文献

通商産業研究社 画像工学
 出版社不明 像構造解析