



複写機における画像の評価

稲垣 敏彦

富士ゼロックス(株)品質保証部 〒243-04 海老名市本郷 2274

(1983年4月7日受理)

Image Evaluation for Plain Paper Copiers

Toshihiko INAGAKI

Quality Assurance Department, Fuji Xerox Co., Ltd.,
2274, Hongo, Ebina 243-04

1. はじめに

普通紙複写機 (PPC) は原稿を二次元静止画像としてとらえ普通紙に複写するもので、複写画像の評価は、通常、最終受取人である人間の主観的な判断によってなされる。ところが人間の判断は人によって判断基準が異なったり、同一人物でも画像の使用目的、使用条件、過去の経験などにより変動するので評価は安定しないし、再現性も低い。そこで、同一の画像を多数の人に主観評価してもらい平均的あるいは共通する判断 (数値化されたものを心理量と呼ぶ) を抽出したり、画像を客観的に表示する特性値と心理量の対応づけをして、客観的に評価できるようにする研究がなされてきた。このような心理空間と物理空間を関係づける数学モデルを構成することは TV とか写真では数多くなされてきた¹⁻⁶⁾ が、ここでは PPC による複写画像に絞って解説する。

本稿では、まず複写画像の主観の評価を決定づけている心理的要因について紹介し、次いでそれらの要因と画像の光学的構造を物理的に測定して得られた特性値とを関連づけるアルゴリズムおよび、特徴的な複写機の測定データを紹介し、最後に複写画像の総合的な評価について述べる。

2. 複写画像評価における心理要因

画像を人間が評価する場合どのような心理要因で判断しているのかを探る方法として Fig. 1 に手順を示す SD (semantic differential) 法が適用でき、複写画像に対する適用例も報告されている⁷⁻¹⁰⁾。SD 法はまず複写

画像を評価するのに使われる“明るい-暗い”とか“濃い-薄い”というような形容語対よりなる SD 尺度 (Fig. 2) を多数 (網羅的に) 用意し、種々の複写画像に対して多数の被験者に SD 尺度上の位置を主観的に判断してもらい SD 尺度間の相関関係を求める。

SD 尺度間の相関関係より各尺度間に共通する互いに独立な要因を因子分析法により抽出する。こうして複写画像に対する主観的な判断に内在する心理要因が抽出される。8ポイントの明朝体活字で印刷された無意味な漢字仮名文字パターンを原稿として種々の複写機で複写された画像を SD 法により分析した結果、Fig. 3 に示すような三つの互いに独立な要因が抽出され、それぞれの要因は次のように解釈されている。

第1要因 直観的な良さ/画像の明瞭さ

第2要因 濃さ/コントラストの強さ

第3要因 下地のきれいさ/明るさ

黒ベタ (ソリッドエリア) パターンを原稿として SD 法で分析した結果以下の3要因が抽出されたことが報告されている¹⁰⁾。

第1要因 はっきりさ…情報部分の印象

第2要因 コントラストの強さ…全体的強さ

第3要因 下地のよさ…情報部分以外の印象

このことから複写画像評価における心理要因は三つ存在することが確認され、いずれの要因も似通っていることから、この3要因を客観的に表示できる量 (心理物理量) の探索が必要となる。以下では、これらについて述べる。

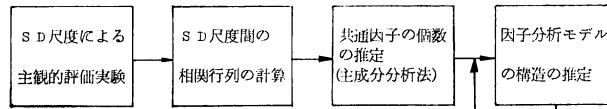


Fig. 1 心理要因抽出法

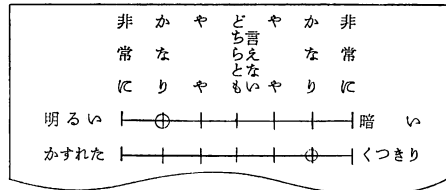


Fig. 2 SD 尺度の例

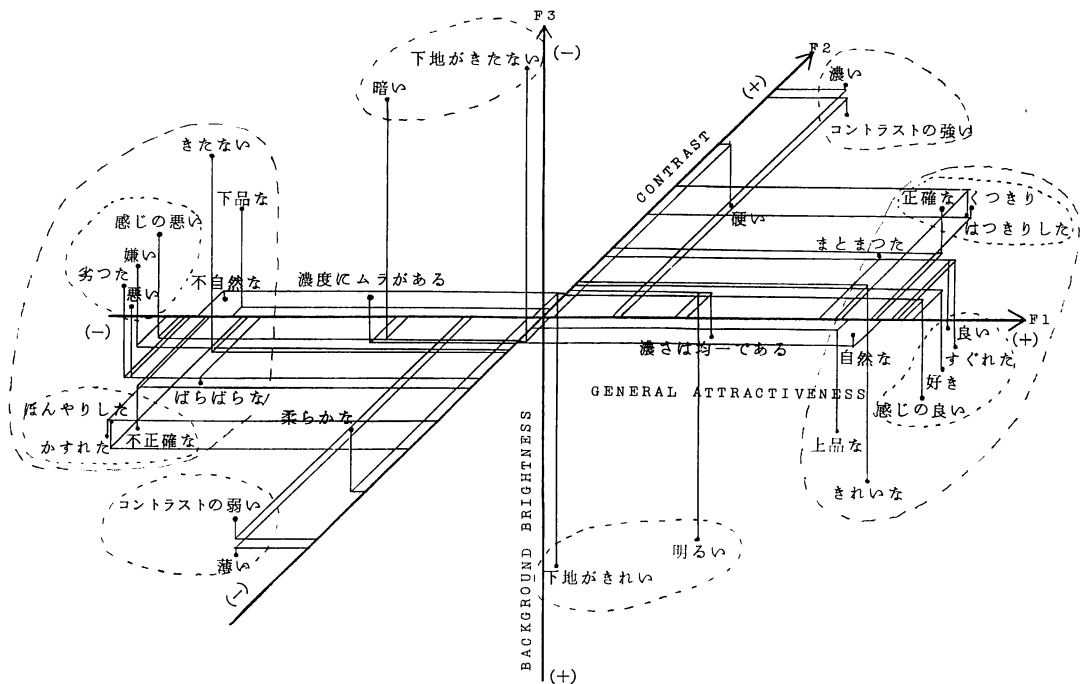


Fig. 3 複写文字画像評価における互いに独立な三つの心理要因 (F1~F3) とSD 尺度の相関図

3. 複写画像評価のための心理物理量

3.1 線画像の濃さ

濃さあるいはコントラストの強さを表す客観的な表示法として光学濃度がある。光学濃度(D)は次式で定義されている。

$$D = \log_{10}(1/R) \quad (1)$$

ここで、Rはエネルギー反射率(以下、たんに反射率

と略記)であり、画像に入射した光の強度に対する反射された光の強度の比を示す物理量である。

式(1)の意味するところは、物理濃度(1/R)を Weber-Fechner の法則に従ってその対数を取り感覚量に変換していることである。したがって、光学濃度は心理物理量であるといえる。ところが、複写された線画像に対しては人間の感じる濃さは同じでも光学濃度を測定すると同じ値を示さない。そこで、線画像の濃さの心理量(line

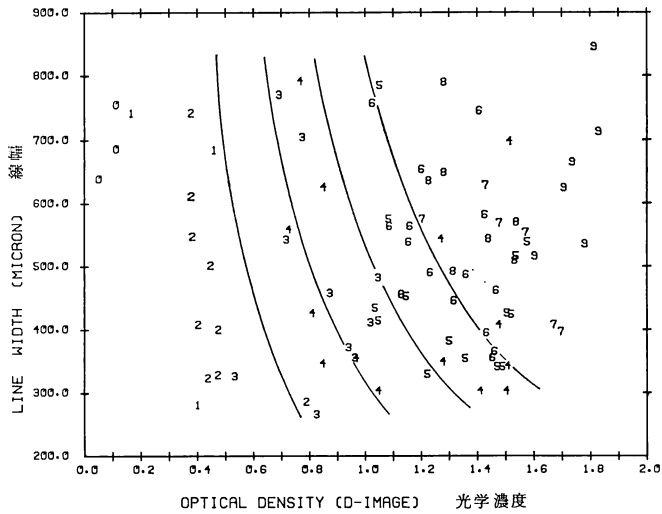


Fig. 4 線画像の濃さ (0~9 で濃さの強さを示す) に対する光学濃度および線幅の関係
 光学濃度 $\times\sqrt{\text{線幅}}$ が濃さとの相関が高かった。
 なお、濃さの強さは0~100のスケールで表示され、図中の数字は10で割って
 切り捨てにしたものである。

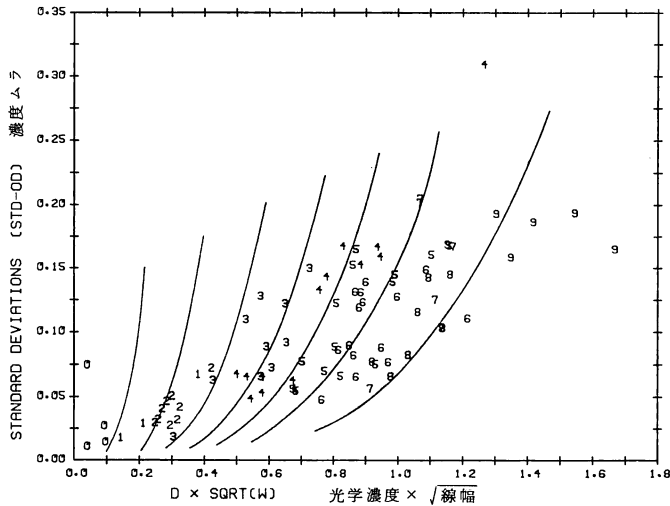


Fig. 5 線画像の濃さに対する光学濃度 $\times\sqrt{\text{線幅}}$ と画像内部の濃度ムラ (標準偏差) の関係

darkness) に対する光学濃度 (\bar{D}), 線幅 (W)¹¹⁾, 画像内部の濃度ムラ (σ), および空間積分濃度 (SID)¹²⁾ の対応関係を各種複写画像を使った実験より求めた。この実験における濃さの心理量に対して光学濃度, 線幅, 画像内部の濃度ムラがどう影響していたかを示すのが **Fig. 4**, **Fig. 5** であり, 心理量との相関が最も高かったものが次式である。

$$\text{Line darkness} = 5.62 + 126 \cdot SID / \sqrt{W} \cdot V^{-0.2} \quad (2)$$

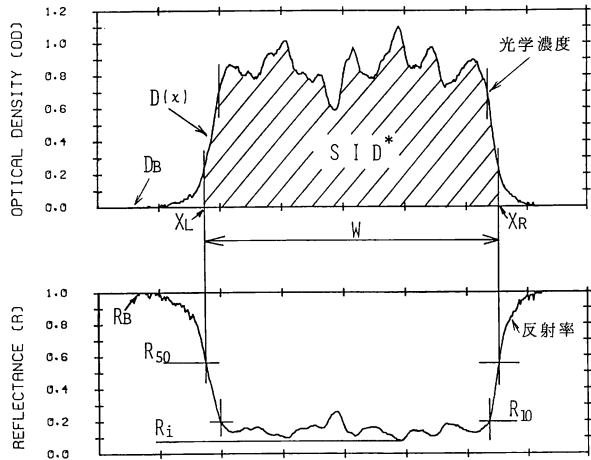
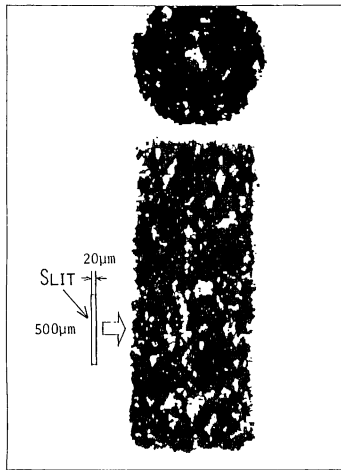
ただし,

$$SID \equiv \int_{X_L}^{X_R} \{D(x) - D_B\} dx \quad (3)$$

$$V \equiv 100 \cdot \sigma / \bar{D} \quad (4)$$

ここで, $D(x)$ は **Fig. 6** に示すように画像をマイクロ濃度計で走査したときの位置 x における光学濃度を示し, D_B はベース紙の光学濃度を示す。 X_L および X_R はベース紙の最大反射率 R_B と画像内部の最小反射率 R_i の和の50%, すなわち

$$R_{50} = 0.5(R_i + R_B) \quad (5)$$



* SIDは Spatial Integrated Density の略である。

Fig. 6 線画像の拡大図とマイクロ濃度計により画像を走査して読み取った光学濃度および反射率トレースと線幅, SID 等の特性値

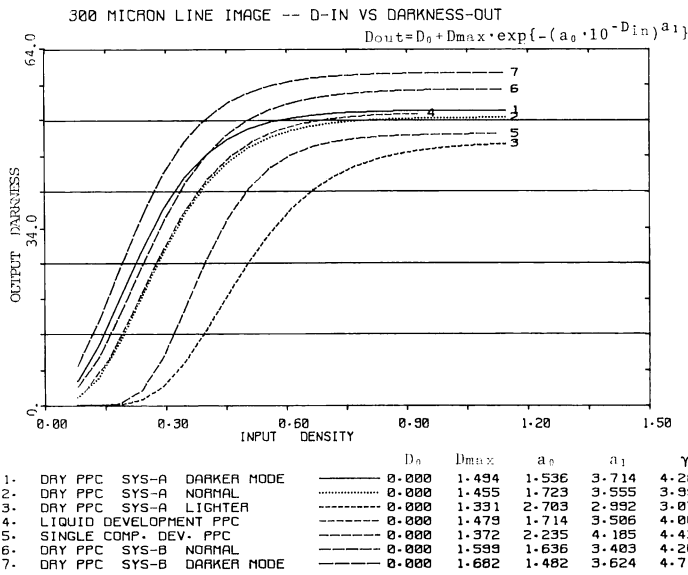


Fig. 7 線画像 (線幅=300 µm) における原稿濃度と複写画像の濃さの関係

となる位置で画像の両端を示す。XL と XR 間の距離が線幅である。

線画像およびソリッドエリア画像に対する複写機の濃さ再現性の測定例を Fig. 7, Fig. 8 に示す。

3.2 画像のシャープさ

画像の明瞭さとかはっきりさをまとめてシャープさとしたが、客観的な表示法としては、画像エッジ部のシャープさを表わすものと、微細部の明瞭さを表わすものに分けられる。

3.2.1 画像エッジ部のシャープさ

複写画像の画像エッジ部のシャープさは写真で論議されている方法では表現できないという観点から raggedness および blur によるシャープさの表示法が研究されてきた¹³⁻¹⁵⁾。写真における sharpness と複写画像における raggedness, blur の違いを概念的に示したものが Fig. 9 である¹⁶⁾。

raggedness および blur は濃度計のスリットを Fig. 9 に示すようにエッジ線に垂直に置き、エッジ線と平行

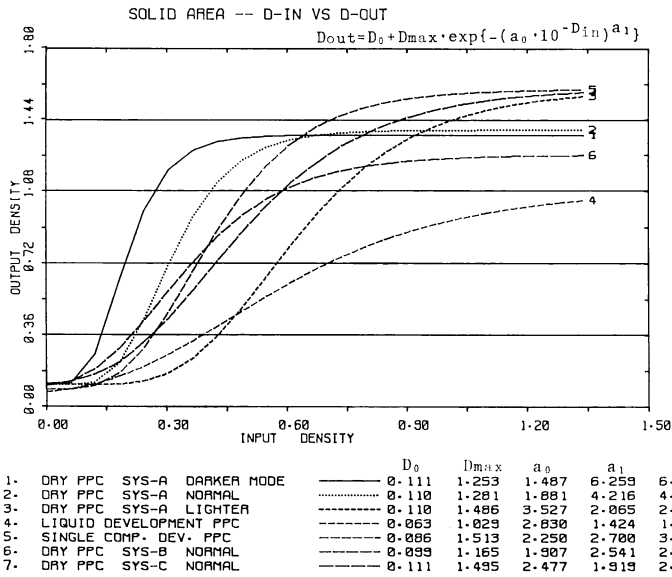


Fig. 8 ソリッドエリア画像における原稿濃度と複写画像の平均濃度の関係

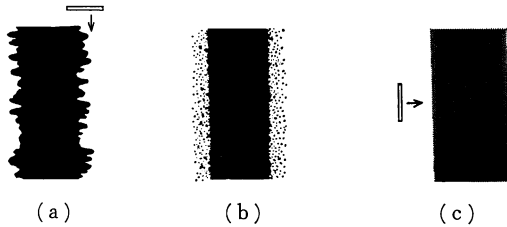


Fig. 9 画像エッジ部の画像構造の相違
(a) raggedness, (b) blur, (c) sharpness in photography

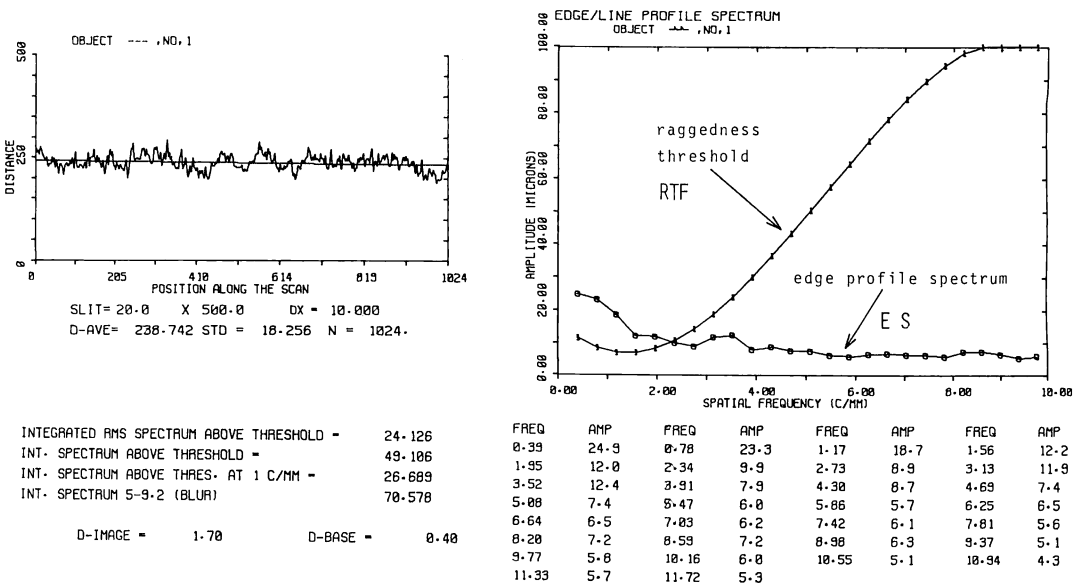


Fig. 10 raggedness の閾値 (RTF) とエッジスペクトル (ES) の測定例

に走査して測定される。走査により得られる反射率分布からエッジの高さ (h) を次式

$$h(x) = l_s(R_B - R(x)) / (R_B - R_i) \quad (6)$$

ここで、 l_s はスリットの長さ、 R_B はベース紙の反射率、 R_i は画像部の反射率、 $R(x)$ は位置 x における反射率、

より求め、高さの傾向線を最小二乗法で推定し、傾向線からの偏差をもってエッジ部の輪郭を表わすデータとし、そのデータをフーリエ変換してエッジスペクトル (ES) が求められる。 ES の測定例を Fig. 10 に示す。

raggedness は各空間周波数 (u) における閾値 (Fig. 10) を RTF とすると次式より求められる。

$$\text{raggedness} = \left\{ \sum_u |\Delta ES(u)|^k \right\}^{1/k} \quad (2 \leq k \leq 3) \quad (7)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \Delta ES &= 0 && (ES \leq RTF) \\ &= ES - RTF && (ES > RTF) \end{aligned} \quad (8)$$

blur は周波数が 5 cycle/mm 以上の ES を積分して求められる。

3.2.2 画像細部の明瞭さ

微細部の明瞭さは、写真とか TV では画像伝送系の MTF とか OTF のような空間周波数特性との対応づけが研究されてきたが、複写機においては MTF の測定法が論議されている段階である¹⁷⁾。

ここでは、NBS 解像力ターゲット (Fig. 11) のそれぞれの周波数における濃度差 (ΔD) より、次式で定義されるコントラスト (C)、すなわち

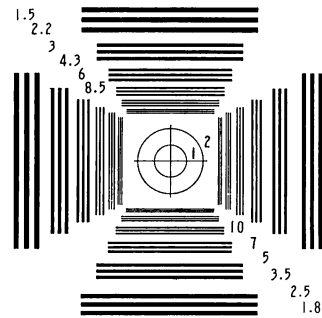


Fig. 11 NBS 解像力ターゲット

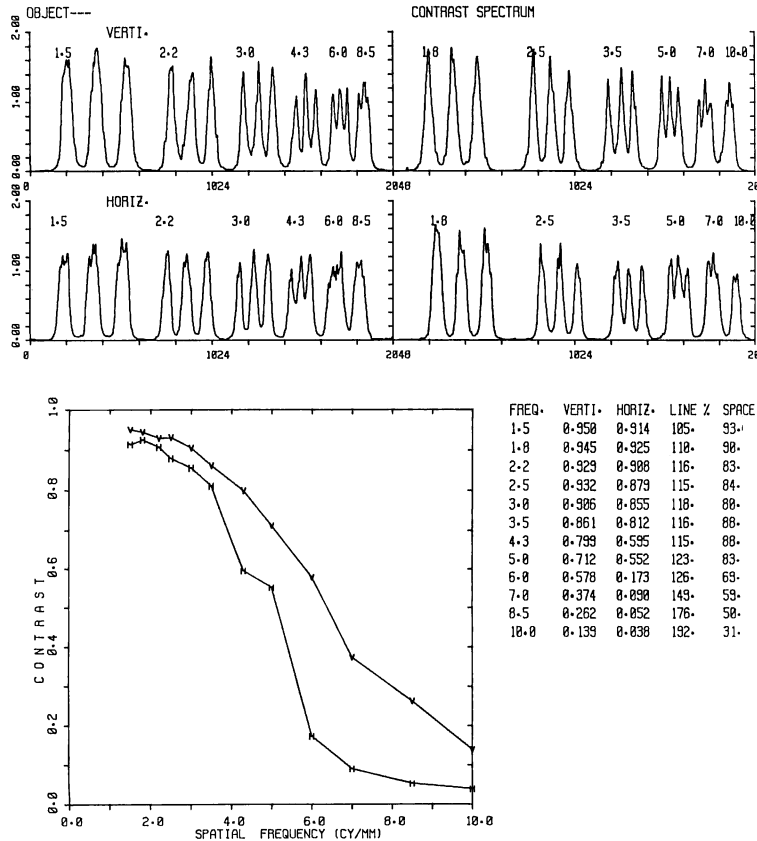


Fig. 12 NBS 解像力ターゲットを原稿とする複写画像をマイクロ濃度計で走査してコントラストスペクトルを測定した例

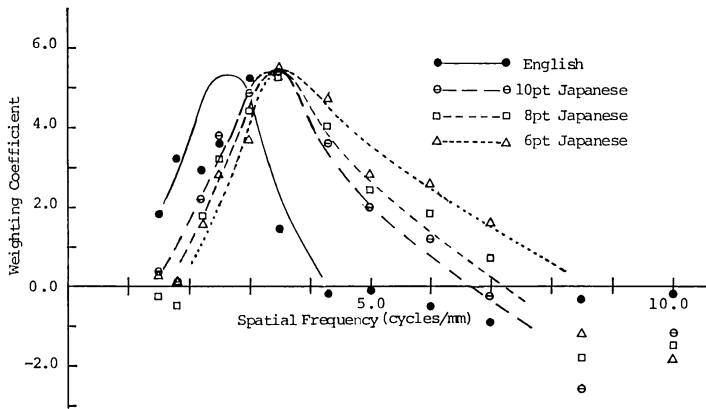


Fig. 13 主観的な文字画質に対する各空間周波数の影響度

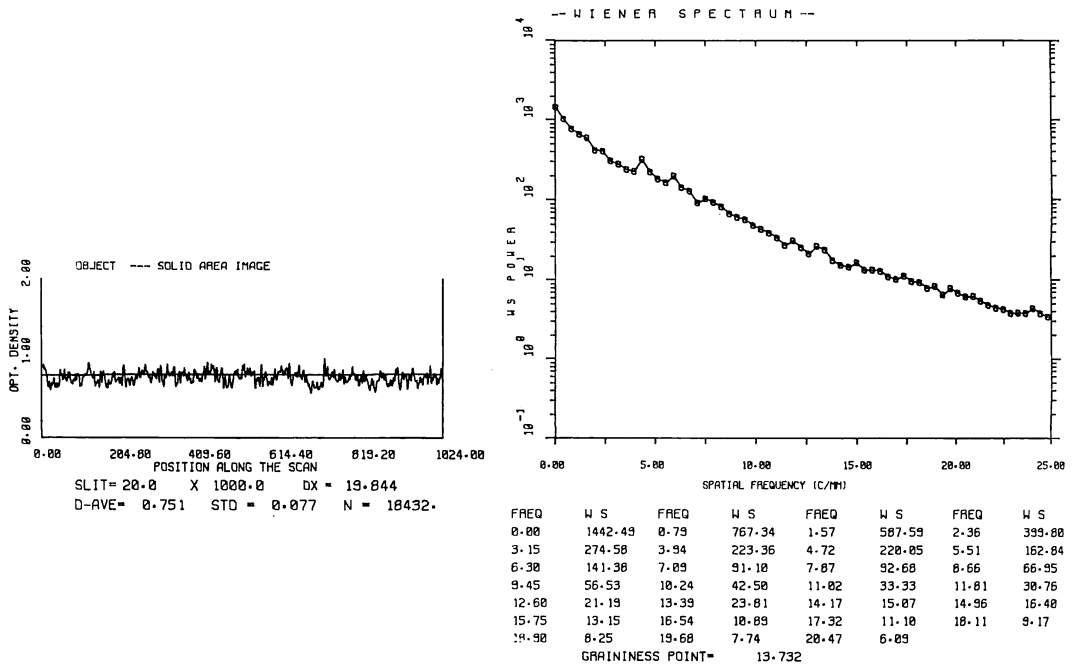


Fig. 14 ソリッドエリア画像の Wiener スペクトル/粒状さの測定例

$$C = (10^{4D} - 1) / (10^{4D} + 1) \quad (9)$$

を求め、文字画質との対応関係を求めた結果を説明する。コントラストスペクトルの測定例を Fig. 12 に示す。そして、これが英文、和文（文字の大きさが 6, 8, 10 ポイント）を原稿としたときの複写画像の主観的な良さにどう寄与しているかを重回帰分析により求めた結果を Fig. 13 に示す。Fig. 13 の縦軸は各周波数におけるコントラストが主観的な良さにどう影響しているかを示す重み係数で、画像が細くなるにつれて高周波の分解能が要求されることを示している。

3.3 下地のきれいさ

複写画像の下地のきれいさとか良さに影響を及ぼす最もたるものはベース紙とその上にランダムに散在しているトナー粒子である。下地のきれいさを表示する客観量としては、非画像部の未使用の白紙に対する相対的な光学濃度が使われてきたが、トナー粒子が明確に識別でき下地が白紙より濃く感じられてもせいぜい 0.05 程度の微小なレベルであり、さらに粒子サイズが異なると同じ濃度であっても下地に対する心理反応が異なる。下地に対する心理反応と粒子分布の関係からは、粒子があるレベ

ルより細かければ粒子の密度により白か灰色に見えるが、あるレベルを越えると粒状さあるいはノイズを感じることが報告されている¹⁸⁾。

このことから、下地のきれいさは粒状さと下地の明るさにより表示できるといえる。

3.3.1 画像の粒状さ¹⁹⁻²²⁾

濃さが一様な面積像(ソリッドエリア画像)を原稿として採られた複写画像はトナー粒子によって構成されているため粒状構造を成している。このような粒状構造は濃さのランダムなパターンと考えられることから統計的な確率過程として取り扱われ、フーリエスペクトルの自乗値の集合平均で定義される Wiener スペクトルで表わされる。

ミクロ濃度計により画像を走査してそれぞれ距離 Δx だけ離れて等間隔にサンプリングされた濃度変動データを $\Delta D(x)$ としたときの Wiener スペクトル (WS) は次式で求められる。

$$WS(u) = \frac{q \cdot \Delta x \cdot (\pi p u)^2}{N \cdot \sin^2(\pi p u)} \times \left\langle \left| \sum_{x=0}^{(N-1)\Delta x} \Delta D(x) \exp(-2\pi i u x) \right|^2 \right\rangle \quad (10)$$

ここで、 p , q はスリットの幅および長さであり、 N はデータの数、 x はサンプリングの位置、 u は空間周波数である。括弧 $\langle \rangle$ は集合平均を表わし、 $i = \sqrt{-1}$ である。

ソリッドエリア画像の粒状さは Wiener スペクトルの 1 cycle/mm 近傍の値と非常に高い相関を示すといわれてきたが²⁰⁾、その後粒状さの心理物理量 (G) として次式が提案されている²²⁾。

$$G = \Delta u \cdot \exp(-1.8 \bar{D}) \sum_u \sqrt{WS(u)} \cdot VTF(u) \quad (11)$$

ここで VTF は視覚系の空間周波数特性である。

Wiener スペクトルおよび粒状さの測定例を **Fig. 14** に示す。また、種々の複写機のソリッドエリア画像の平均濃度と粒状さの関係を **Fig. 15** に示す。この粒状さは

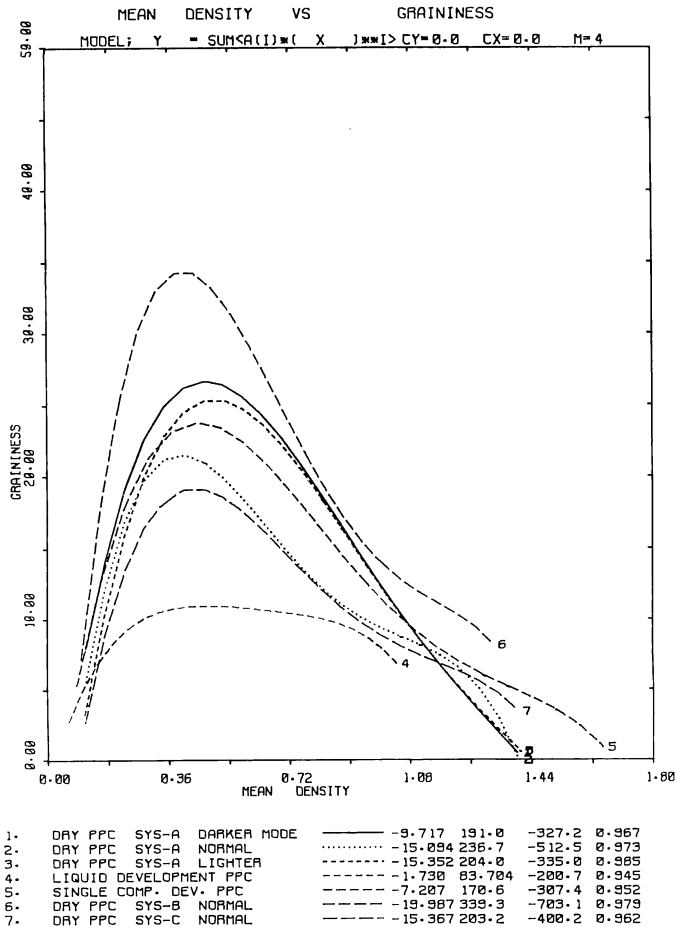


Fig. 15 ソリッドエリア画像における複写画像の平均濃度と粒状さの関係

次に述べるバックグラウンドに適用できると報告されている。

3.3.2 バックグラウンド

複写画像の下地に対する主観的な反応を“きれい-汚ない”という尺度を用いて数量化して求めた心理量 (background) に対して Wiener スペクトルおよび下地の平均濃度との対応関係を各種複写画像を用いた実験より求めた結果 (Fig. 16), 次式が最も相関が高かった。

$$\text{Background} = 8.75 + 41.5 \cdot WS(0.78)^{0.313} \cdot \bar{D}^{0.422} \quad (12)$$

ただし、 \bar{D} は下地の平均光学濃度で、 $WS(0.78)$ は空間周波数 0.78 cycle/mm における Wiener スペクトルの値である。

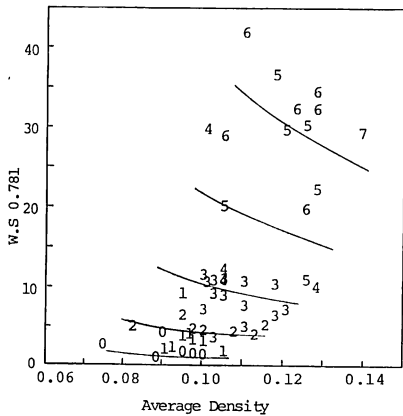


Fig. 16 バックグラウンド (図中の0~7の数字で心理量の程度を示す) に対する下地の平均光学濃度と 0.78 cycle/mm の Wiener スペクトル値の関係 (ただし心理量は 1/10 されている)

4. 複写画像の総合評価

画像の主観評価においては原稿のパターン (被写体) による評価レベルの相違も重要なポイントになる。たとえば人物とか風景のような写実的なパターンの場合には感情/情緒のレベルでの評価に主点が置かれるが、文字とかグラフのように抽象的なシンボリックなパターンに対しては認識のレベルでの評価に主点が置かれるといわれている²⁾。ここでは、複写機の前稿を構成する画像要素を Fig. 17 に示す 4 種に分類し、それぞれの要素を含むパターンを 16 種選び各種の複写システムを用いてサンプルを作成した。

16 種のパターンからの複写サンプルを、英文、和文、英文ネガ、ソリッドエリア、人物、風景の 6 群に分割し、各群ごとに Fig. 18 に示す 8 段階の順序づけられたカテゴリーよりなる心理尺度を用いて、尺度上の平均位置 (主観的な良さのスコア) を求めた。

複写システムごとに 16 種のサンプルの主観的な良さのスコアを原点からの距離で図示した例を Fig. 19 に示す。この図からパターン間に相関関係があることがわかる。そこで、16 種のパターン間に共通する独立な因子を因子分析により抽出した結果、約 90% の変動が三つの因子で説明された。その三つの因子と 16 種のパターンとの相関の強さにより三次元直交因子空間上に各パターンを布置したものが Fig. 20 である。

それぞれの因子において関係の強いパターンに注目し、因子の持つ意味を解釈すると以下ようになる。

- 第1因子 ソリッドと低ライン網点パターン
- 第2因子 文字パターン

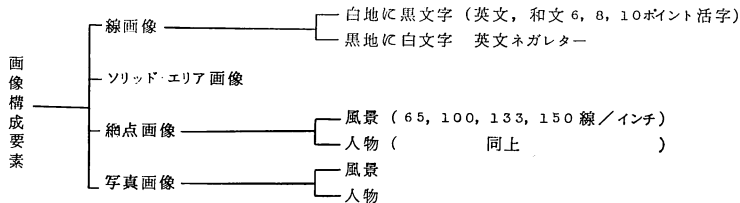


Fig. 17 複写原稿を構成する画像要素と 16 種の代表的なパターン

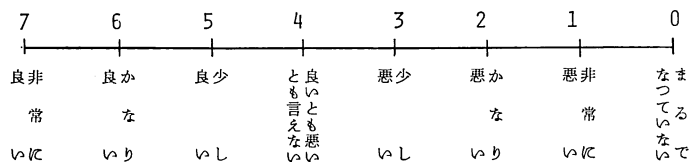
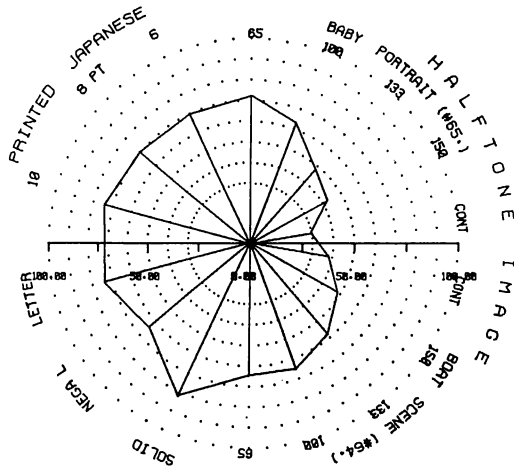


Fig. 18 主観的な良さ測定のためのカテゴリー尺度

OBJECT



OBJECT

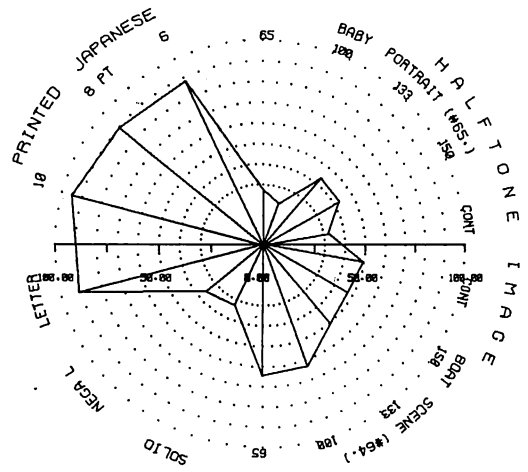


Fig. 19 16種のパターンからの複写画像の主観的な良さのスコア

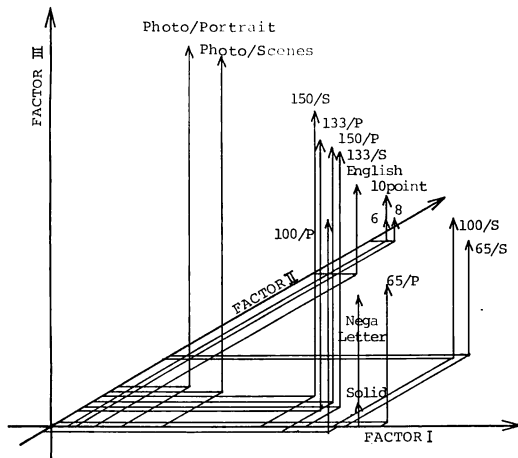


Fig. 20 16種のパターンの三次元因子空間への布置

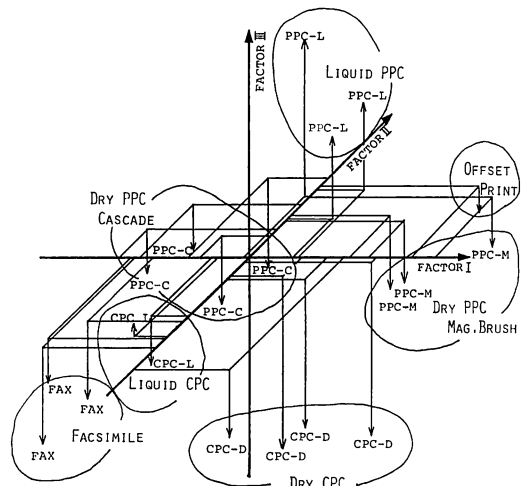


Fig. 21 各種複写システムの三次元因子空間への布置

第3因子 写真と高ライン網点パターン

このことから、複写画像評価用パターンとしては、「ソリッドエリア」、「文字」、「写真あるいは網点」の3種のパターンで十分であるといえる。

次に、各種複写システムが16種のパターンの画像再現性からどのように位置づけられるかを示したものが Fig. 21 である。Fig. 21 における各複写システムの位置は、各システムの16種の主観的な良さのスコアより Fig. 20 に示した三次元因子空間上の位置（因子得点）を求めたものである。この結果より、PPCの画像再現システムにおける位置づけが明らかになったが、総合的

に評価するにはそれぞれの因子がどのような重みかを明らかにしなければならない。

原稿として、文字（8ポイント）、ソリッドエリア画像、網点風景（100 line/inch）の3種を用いた場合、それぞれの主観的な良さのスコア S_L , S_S , S_H が総合的な良さに対してどのような寄与をするかを求めた結果、7:5:8の比率であった。そのときの関係式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{総合値} = & 0.38 \cdot S_L + 0.7 \cdot S_H - 0.0031 \cdot S_H \\ & + S_S \cdot (0.47 - 0.0024 \cdot S_S) \end{aligned} \quad (13)$$

5. 結 び

PPC により複写された画像の主観評価を決定づける三つの心理要因とそれぞれの心理要因の客観的な表示法および総合評価に関して包括的に概説したが、複写画像を客観的に総合評価できるようにするには、よりいっその研究の積重ねが必要である。

TV とか写真においては、通信系における時間周波数の概念が空間周波数として記録系に展開されてから画像の評価という面では共通の基盤で議論されるようになっていたことから、複写機においても今後共通の基盤で議論できる研究が望まれる。

最後に、本稿の執筆にあたり協力して下さった当社品質保証部内各位に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 樋渡涓二：視覚とテレビジョン(日本放送出版協会, 1969).
- 2) 滝 保夫, 青木昌治, 樋渡涓二編：画像工学 (コロナ社, 1975) p. 15.
- 3) 宮川 洋, 渡部 毅編：画像エレクトロニクスの基礎(コロナ社, 1975) p. 295.
- 4) 樋渡涓二：テレビジョン, **26**(1972) 885.
- 5) 中山 剛：テレビジョン, **28**(1974) 796.
- 6) 安田嘉純：画像技術, **6**(1973) 33.
- 7) 稲垣敏彦：昭和 46 年電気四学会連大講演論文集, **5**(1971) 535.
- 8) 酒井慎二：電子写真学会研究会資料, 71-5(1971).
- 9) 番場信夫, 早川誠二, 加納敏夫, 河津元昭：画像工学コンファレンス(1978) 17.
- 10) 加納敏夫, 早川誠二：Engineers(1979.11) 10.
- 11) C. A. Dvorak, R. M. Springer and J. R. Hamerly: J. Opt. Soc. Am., **70**(1980) 1563.
- 12) F. R. Ruckdeschel and C. H. Stephan: Appl. Opt., **17**(1978) 2043.
- 13) R. M. Springer and J. R. Hamerly: J. Opt. Soc. Am., **69**(1979) 1454.
- 14) J. R. Hamerly and R. M. Springer: J. Opt. Soc. Am., **71**(1981) 285.
- 15) J. R. Hamerly and C. A. Dvorak: J. Opt. Soc. Am., **71**(1981) 448.
- 16) R. M. Springer: Private communication.
- 17) J. R. Hamerly: J. Opt. Soc. Am., **69**(1979) 1450.
- 18) G. T. Bauer: J. Appl. Opt., **13**(1974) 1053.
- 19) 大上進吾, 坪井当昌, 長尾夫美子：印刷雑誌, **53**(1970) 55.
- 20) R. N. Goren and J. F. Szcepanik: Photogr. Sci Eng., **22**(1978) 235.
- 21) J. C. Dainty and R. Shaw: *Image Science* (Academic Press, 1974) p. 276.
- 22) R. P. Dooley and R. Shaw: J. Appl. Photogr. Eng., **5** (1979) 190.