

**解説****写真画像の評価**

安田 嘉純

千葉大学工学部天然色工学研究施設 〒260 千葉市弥生町 1-33

(1983年6月3日受理)

**Quality of Photographic Images**

Yoshizumi YASUDA

Faculty of Engineering, Chiba University,  
1-33, Yayoi-cho, Chiba 260**1. はじめに**

画像システムを考えるとき、まず第1に質のよい画像を得るためにはどのような物理特性が必要か、第2に必要な物理特性を実現するためにはどのように画像システムを作ればよいか、ということが問題になろう。画像評価の研究はよい画像システムに対する要求による。また、画質の良否を何らかの数値を用いて表示できることは工業的にも重要となっている。

画像の評価に関する研究は大きく二つに分けられる。一つは画像システムの光学的性質、物理的性質の解析とそのモデル表示に関するものである。たとえば、写真フィルムの粒子の光学的性質や感光層の厚さなどの物理的特徴から粒状度や MTF を予測する方法を考えるなど、写真システムの正確な記述の方法について扱ったり、シミュレーションを行なう。他の一つは、画像の物理的特性と主観的な画質との関係を明らかにするとともに、画質を数値表示するための評価方法を考えることである。質のよい画像を得るためにはどのような物理特性が必要か、また、最低限度の品質を保証するための所要物理量はどのくらいか、などについて調べる。たとえば、ある用途に対してフィルムサイズをどのくらいまで小さくできるかを知るため、鮮鋭さや粒状性に対する最低の要求限界を調べる。また鮮鋭な画像を得るためにはシステムの MTF をどのようにしたらよいかなど、画質向上、画像強調のための技術的な目標を明確にする。

画像評価の研究、とくに、画像評価の心理的な側面を調べるためには画像の物理特性を種々に変化させた試験

画像を作ったり、また、仮定の画像システムをシミュレーションすることが必要となる。このためには、従来、光学的または写真的な処理方法が利用された。たとえば、光学的なぼけを用いて MTF を変化させたり、フィルムの現像処理を用いて画像の階調度 ( $\gamma$ ) を変化させる。しかし、システムの物理特性を変化させられる範囲は限られ、また、特性を厳密に制御することは困難な仕事であった。これに対し、最近のコンピュータによるデジタル画像処理技術の進歩は、画像の物理特性の加工の範囲を飛躍的に拡大し、また、画像システムのシミュレーションを容易とし、その精度を高めることを可能としている。

また、試験画像の主観的評価の心理的な過程を解析することは多元的な判断内容を解析することであり、非常に複雑となる。これに対し、最近の心理量測定方法の進歩、および多変量解析の応用などが、コンピュータによる画像処理技術の適用とともに、画像評価の研究に対し有用な道具を与えていると考えられる。

ここでは、はじめに写真画像の評価に関する従来の研究の経過、背景について簡単に述べ、さらに、画像の評価方法や画像評価の心理的な側面、MTF による画像評価、そして、デジタル画像の画質などに関して筆者らの研究も含めて概説する。

**2. 背景**

白黒画像の質は少なくとも三つの心理的要因に関連することが知られている。すなわち、(1)調子再現、(2)鮮鋭さ、(3)粒状性である。カラー画像についてはさら

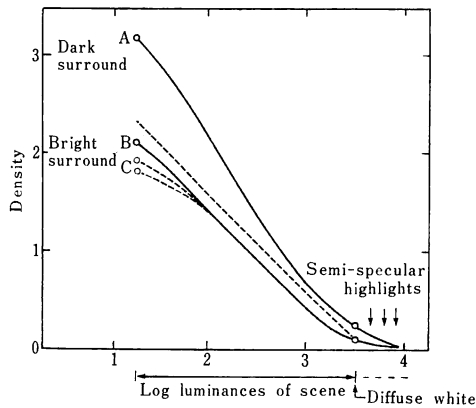


図1 好ましい調子をもつ写真画像の客観的調子再現<sup>2)</sup>

に色再現に関する画質要因が加えられる。

写真画像の解析は19世紀末にすでに行なわれ、その最初の成果はHurterとDriffieldによる露光量と画像濃度との関係を図的に示す特性曲線の概念である。続いてNuttingは画像の光学濃度が粒子数とその粒子の面積との積に常数を乗じたものにほぼ等しいことを見いだした。初期の写真では比較的大型のカメラを用いて撮影し、画像の引伸しを行なわない、密着プリントによった。したがって、いかにして美しい調子を再現するかが、画像評価のおもな問題となった。Jones<sup>1)</sup>は調子再現の客観的および主観的な面について、図的な解法を用いて詳しく調べた。客観的調子再現とは図1のような写真画像の光学濃度を被写体の輝度の対数の関数としてプロットしたものである。Jonesらは約100枚の写真画像を作り、好ましい調子再現について調べた。はじめ、最良の再現を得るために必要な客観的調子再現は画像濃度が被写体中の基準の白と、対象とする物体の輝度との比に、比例する場合であると考えられていた。しかし、実験結果は主観的調子再現が画像評価の重要な要因であることを示すものとなった。

主観的な調子再現とは原被写体の明るさの再現をいい、原被写体の明るさと対応する写真画像中の被写体像の明るさとの関係のプロットで示される<sup>2)</sup>。ここで、明るさは測定器によって直接的に測定できるものではなく、心理量の尺度によって定められる。また、明るさは輝度と直線的な関係にないことが知られ、写真画像を見るときに用いられる輝度レベルや周辺輝度が撮影時と大きく異なる場合、その非直線性は非常に大きくなる。たとえば、太陽照明下の物体の輝度は映画劇場でスクリーン上に投影された物体像の輝度にくらべ約500倍以上に

もなり、しかも、スクリーンの周辺はほぼ全暗黒となっている。また、反射プリントは室内の人工照明下で見るとのがふつうであり、その場合の照明光の照度は太陽光の照度の100分の1以下となる。したがって、写真システムの目的は原被写体を見た観察者と同一の主観的效果を、再現像を見たときに与えるような画像をつくることにあるといえる。図1は好ましい再現が得られるような客観的調子再現曲線の例である<sup>2)</sup>。

Jonesは、さらに、画像の主観的印象の判定を写真を撮影したときの露光量の関数として調べた<sup>1)</sup>。現在広く用いられている写真フィルムのASA感度の基準はこの実験から導かれた心理物理的な量である。

1935年ごろ、映画の進歩、また、映画用フィルムを利用した35ミリ・小型カメラの出現などに関連し、感光材料の物理的な構造の解析が行なわれるようになった。

Selwyn<sup>3)</sup>はマイクロ濃度計による濃度のゆらぎのRMS値は粒状性に相関をもつ値を与えることを示した。この場合、マイクロ濃度計の走査アパーチャの大きさを視覚系と等価になるように定めるのが便利で、RMS粒状度はフィルムの粒状性の評価尺度として用いられるようになった。現在では濃度のゆらぎを記述するのにウィナー・スペクトルを用いるのがふつうである。

微小部分の再現の様子は、Frieser<sup>4)</sup>による乳剤層中の光の散乱、吸収効果の解析から始まり、MTF(modulation transfer function)の概念が発展した。Schade<sup>5)</sup>による画像システムの解析に対する電子工學理論の応用についての論文により、テレビや写真、また、レンズやハロゲン化銀乳剤のような異なるタイプの画像システムやシステム要素を共通の基礎で比較するための方法も与えられた。また、以下の4章に述べるように、視覚系を含む画像システムのMTFを用いた画質の評価基準が提案されるようになった。

Depalmaら<sup>6)</sup>は粒子やゼラチンの光学的性質、および乳剤層の厚さ、粒子の大きさや数などの乳剤の物理的性質などをもとに乳剤のMTFを計算により予測する方法を示した。Trabkaら<sup>7)</sup>は粒子サイズと数とから濃度のゆらぎ(RMS)とウィナー・スペクトルの両方を予測する方法を示した。これらは質のよいフィルム設計上の物理的条件を求めるのに有力な道具となっている。

光検出器の効率に関するFellgette<sup>8)</sup>やRose<sup>9)</sup>らの研究はJones, Zweig, ShawらによってDQE(detective quantum efficiency)の概念としてまとめられている<sup>10)</sup>。DQEはフォトンカウントするシステムの効率の測度であり、検出器の感度、ノイズ、調子再現、また量子効

率と画質との関係などの理解や比較に有用と考えられている。

近年、ホログラフィなど、写真の利用分野も多様化する傾向にあり、また、画像システムはハロゲン銀に加え、磁気、電子、固体素子など目的や利用形態に合わせて選択され組み合わせられて用いられるようになってきている。それに伴って評価内容や評価基準が多様化する傾向にあり、そのため総合的な評価が求められるようになっている。

### 3. 画像の主観的評価

#### 3.1 画像評価の方法

画像評価の分析方法には二つのアプローチが用いられる。第1は個々の物理的要因に対して主観評価を行なうもので、画質に影響を及ぼす物理要因が既知である場合、または容易に類推できる場合に用いられる。ふつう、複数個の物理要因が存在するので、他の物理要因を固定化して対象となる物理要因の物理量を変化させて画像のよさ  $Q_i$  を求める。また、求められた個々の評価値から、総合評価値  $Q$  を求めることも可能となっている。

第2の方法は心理要因を抽出するもので、画質を支配する物理要因や心理要因が複雑にからみ合っている場合、また、画質に影響を及ぼす心理要因やその寄与がわかっていない場合に用いられる。第1の方法は画像評価における物理的側面を、また、第2の方法は心理的側面を明らかにするものといえる。

画質が「よい」とか「悪い」というような評価は個人の経験、利用目的、美意識などによって変化するので、技術用語で定義しにくい主観的な総合判断といえる。多元的な判断内容の解析には因子分析や主成分分析が用い

られる。図2はポートレート写真の「美しさ」の主観評価内容を解析した例で、「調子と焼度にかかわる因子」と「質感因子」の二つの因子を抽出している。図3はマイクロフィルムリーダーに用いられるスクリーンの主観評価の例である<sup>12)</sup>。対象は文字画像であるが、第1主成分に「鮮鋭さ」、「読みやすさ」、「疲労感」などが、また、第2主成分に「明るさ分布感」、「ホットスポット」などがある。

画質を支配している相互に独立な心理要因を分析する場合、SD(semantic differential)法が用いられる。「美しい」、「汚ない」のような反対の意味を持つ多数の形容詞対を用意し、試験画像について形容詞対のカテゴリーの主観評価を行なう。SD法と因子分析とを組み合わせることで用いることにより、定量的な評価を多次元空間のなかで表現できる利点がある。表1はデジタルファクシミリ画像の画像支配要因と因子負荷量の測定例<sup>13)</sup>で、因子

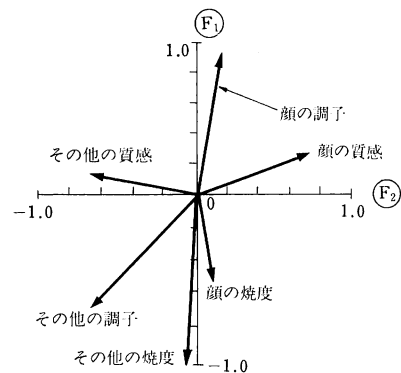


図2 因子分析によるポートレート写真の美しさの評価のテストベクトル<sup>11)</sup>

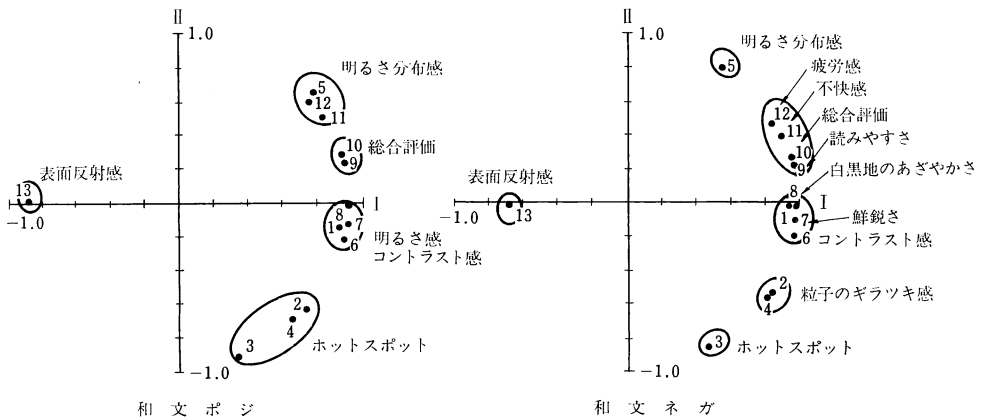


図3 マイクロフィルムリーダー用スクリーンの主観評価の主成分分析結果<sup>12)</sup>

表 1 デジタルファクシミリ画像の画質支配要因と因子負荷量<sup>13)</sup>

形 容 語	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
読みやすい	0.962	0.048	-0.239
鮮明な	0.920	0.309	-0.169
気持ちのよい	0.968	-0.001	-0.223
落ち着きのある	0.926	-0.278	-0.188
コントラストの強い	0.299	0.940	0.092
目が楽	0.925	-0.164	-0.214
直線がすっきりしている	0.906	-0.293	0.180
地肌がきれい	0.547	-0.143	0.814
濃 い	0.235	0.966	0.062
かたい	0.068	0.969	0.135
美しい	0.984	-0.128	0.007
紙が好き	0.607	-0.157	0.763
総合的に評価してよい	0.981	0.077	-0.158
寄 与 率	0.6146	0.2393	0.1193

表 2(a) 判読率関数と物理的な評価値との相関<sup>12)</sup>

物 理 量 (式の記号)	最 大 利 得 ( $P_G$ )	最大曲げ角 ( $B_A$ )	RMS 粒状性 ( $G$ )	表面反射率 ( $S_R$ )	コントラスト ( $C$ )	周辺輝度比 ( $A$ )
相 関 係 数	-0.67	0.51	-0.16	0.05	-0.47	0.71

これらをもとに重回帰式を求めると、

$$U = 3.28A - 0.98 \times 10^{-2} P_G - 0.22 \times 10^{-1} B_A - 0.85 \times 10^{-3} G + 0.22 \times 10^{-2} S_R + 0.21C + 4.07$$

(重相関係数=0.89)

ただし、 $U$  は 80% の正解率を与える文字の太さの 2 倍の逆数

表 2(b) 判読率関数と心理的な評価値との相関<sup>12)</sup>

心 理 量 (式の記号)	読みやすさ ( $Y$ )	鮮 鋭 さ ( $S$ )	疲 労 感 ( $T$ )	明 る さ 感 ( $B$ )	明 る さ 分 布 感 ( $A$ )	表面反射感 ( $R$ )	ホットスポット ( $H$ )
相 関 係 数	0.45	0.49	0.35	0.11	0.14	0.17	0.01

これらをもとに重回帰式を求めると

$$U = 1.09S - 0.51B + 0.18R + 0.13T + 4.3 - 0.31H - 0.02Y - 0.44A$$

(重相関係数=0.80)

ただし、 $U$  は 80% の正解率を与える文字の太さの 2 倍の逆数

負荷量は各形容詞対の抽出された因子軸に対する重み係数を、寄与率は全評価に対する因子の寄与している割合を意味している。

文字画像を扱うような画像システムでは主観的な印象よりも、より具体的に文字が読めなかったり、また、誤読することが問題となる。表 2(a) はマイクロフィルムリーダーに用いられるスクリーンに投影される文字の太さの変化と判読率との関係から、80% の正解率を与える文字の太さの逆数  $U$  とその説明因子としての物理要因との相関を求めた例である<sup>12)</sup>。 $U$  は各物理要因の物理量から表 2(a) の式の重回帰モデルによって与えられ、その

場合の重相関係数は 0.89 である。他方、図 3 に示された心理的要因と判読率との関係を求めたのが表 2(b) であり、その重回帰式の重相関は 0.80 と比較的高い。これらの結果は、SD 法や主成分分析を用いて画質を支配する心理的要因を適切に分析し選ぶことによって、文字画像を対象とするような画像システムの場合に対しても、主観評価を有効に利用できることを示しているといえよう。

### 3.2 総合画質の評価に対する調子のよさ、鮮鋭さなどの寄与

写真画像の MTF や調子再現の階調度 ( $\gamma$ ) を種々変化させた試験画像を多数製作し、「主観的な総合画質」

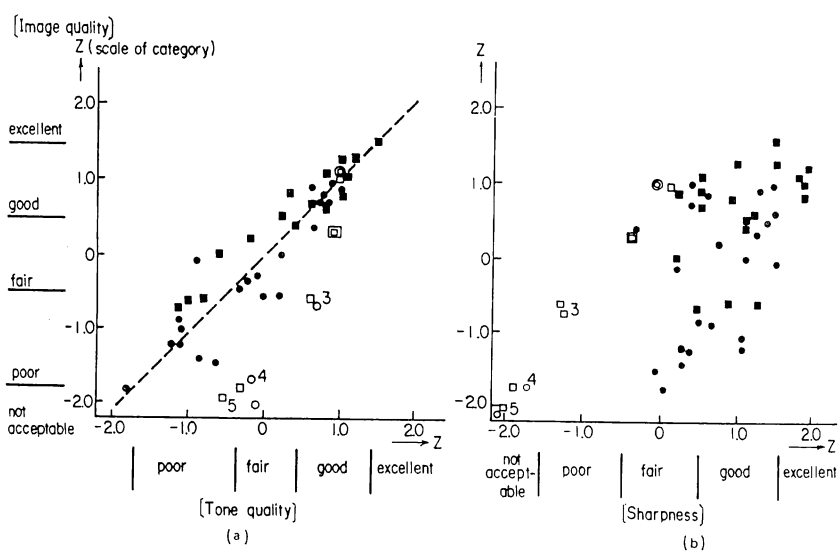


図4 「主観的な総合画質」と「調子のよさ」および「鮮鋭さ」の関係<sup>34)</sup>

とその説明因子と考えられる「調子のよさ」、「鮮鋭さ」の評価を行ない、総合画質に対する調子のよさ、鮮鋭さとの関係について調べることができる<sup>14)</sup>。

図4(a)は調子の良さと総合画質、図4(b)は、鮮鋭さと総合画質との関係を示したもので、●印は人物、■印は機械の画像に対するものである。一般に、ぼけの大きい画像の場合を除き「調子がよい」と評価された画像は総合画質もよいと判断される傾向にある(相関係数0.81)。しかし、被写体が人物の場合、鮮鋭さがよくても画質がよいと評価されるとは限らない。機械の画像では総合画質と鮮鋭さとの相関は0.72であるのに対し、人物では0.33と低く、風景は人物と機械の中間に位置している。

相関係数は、二つの変量間の関係の程度を示す指標として用いられる。二つ以上の因子間の相互関連を把握するためには、各評価に重みづけをすると便利である。総合画質とそれを与える説明因子の重みを求める目的には表2の式の例のように、重回帰分析が適している。主観的な総合画質  $Q$  に対する調子のよさ  $Q_t$  と鮮鋭さ  $Q_s$  の評価値の重みは

$$Q = 1.22Q_t + 0.65Q_s - 0.32 \quad (1)$$

となった。調子のよさと鮮鋭さの心理評価値に対する重みの比は1:0.54(または0.65:0.35)となっている。画質評価における鮮鋭さとノイズの評価に対する重みは1:1であるというNelson<sup>15)</sup>の報告を適用すると総合画質に対する調子、シャープネス、そして、粒状性の評価の重みは1.054:0.54(または、0.48:0.26:0.26)

となる。Nelson はまた、画像の鮮鋭さの評価に対するノイズ(粒状性)の効果は主観的な総合画質に対するノイズの負の効果にくらべ、比較的小さいと述べている<sup>15)</sup>。

### 3.3 画像の空間周波数のもつ心理的な効果

デジタル画像処理技術を応用して、画像上の0.25, 0.5, 1.0, 2, 3, 4, 5, ... line/mm というような特定の空間周波数部分を強調したり、逆に抑制したり、また、特定の空間周波数で高域を急激にカット(帯域制限)した試験画像をつくり、それらを主観評価することにより、画像の空間周波数のもつ心理的な効果を知ることができる。表3は画像の空間周波数と調子再現の階調度( $\gamma$ )との関係を調べた例<sup>14)</sup>で、視覚系のMTFのピーク周波数に近い(図6参照)0.5 line/mmを強調した画像では、階調度( $\gamma$ )が0.86と低くても「硬調である」、「コントラストが大きい」というような印象を与えるとともに、「エッジ効果」、「輪郭線の不快さ、不自然さ」が指摘される。エッジ効果による輪郭線の不快さや不自然な印象は0.5 line/mmのレスポンスを1よりも下げても、逆に高めても与えられる<sup>16)</sup>。したがって、自然な印象を与える画像を得るためには、画像上で0.5 line/mm付近のレスポンスをなるべく1に近く保つことが重要となる。

1.5 line/mm以上の空間周波数は「質感」とか「細部がよく出ている」というような鮮鋭さの評価に関係している。高域を急激にカットした画像ではエッジ部分に振動が生じ、一種のエッジ効果を与える。2 line/mm以上をカットした画像では、それより低い空間周波数で高域

表 3 画像の空間周波数および階調度 ( $\gamma$ ) の変化と主観的な印象

階調度 ( $\gamma$ )	0.56	0.86	1.28	1.54
ピーク周波数				
ピークなし	—	「コントラスト不足」 「調子がねむい」 「フラット」	「階調がきれい」 「トーンが自然」	「かたい」 「コントラスト」
デフォーカス	—	—	「ぼけている」 「びんぼけ」	
0.5 line/mm (画像上)	「何か変な感じ」 「輪郭が見にくい」 「エッジ効果」	「コントラストつきすぎ」 「見て不快」 「不自然」	「かたい」 「エッジが不快」	「コントラストつきすぎ」 「レリーフ効果」
1 line/mm ( " )	「コントラスト・シャープネス悪い」 「黒のしまりが悪い」	「コントラスティー」 「エッジ効果」	「像のネガ・ポジが逆転している感じ」	「コントラストつきすぎ」 「ハイライトがとんでいる」
2 line/mm ( " )	「コントラスト不足」 「フラット」 「調子がねむい」 「シャドウ濃度不足」	「コントラスト不足」 「かたい」	「はっきりしすぎ目が痛くなる」	「はっきりしすぎ」
3 line/mm ( " )	「フラット」 「全体に灰色っぽい」	「調子がフラット」 「フラットのように硬い」	「荒れている」	「ちょっと硬い」 「粒状性悪い」
4 line/mm ( " )	—	—	「ざらざらしている」 「粒子が荒い」	「質感よし」 「粒状性悪い」 「かたい」
5 line/mm ( " )	—	—	「すごくシャープ」 「髪の毛のコントラストよい」	「ざらざらしていやな感じ」 「ディテールがよく出ている」

カットした画像よりも原画像にほぼ類似した画像と見られ、4 line/mm までレスポンスが1であれば、それ以上を急激にカットしても、原画像とほとんど変わらない画像として見られる<sup>16)</sup>。

#### 3.4 画質評価と視覚の注視点

「調子がよいか」とか「シャープであるか」というような命題で画像の評価を行なうとき、眼がどのような動きをするかということは興味あることである。さらに、それらを注視点の光学濃度、パターンなどの物理的な特徴を調べることで、主観的評価の過程における物理的な特徴の比較、あるいは組立てについて客観的に知ることができるようになる。

眼球運動の分析には、次のような項目が問題となる<sup>17,18)</sup>。

- (1) 注視点が固定する場所 (固定点)
  - (2) 固定点の滞留時間
  - (3) 固定点の移動の道程
  - (4) 固定点の移動の道程の周期性または、規則性
- (1), (2) から主観評価を与えるときに選ばれる固定

点とその物理特性が示され、評価の内容、被写体と観察者などが異なった場合の相違を知ることができる。(3), (4) からは、主観的な評価がどのような物理特性の比較、あるいは組立てから決められるかを知ることができる。

図5は画質評価における固定点の動きの道程を示したものである<sup>19)</sup>。人物の場合、固定点は、髪の毛のハイライトおよびシャドウ部、顔のほほやおでこなどの肌、そして、顔や頭の輪郭などである。総合画質の評価では〔目→ほほ→犬のおでこ〕あるいは〔目→髪の毛のハイライト部〕というような走査路が構成される。調子の評価では〔目→おでこ (肌)→髪の毛のシャドウ部〕あるいは〔目→ほほ (肌)→犬のおでこ (毛)〕となる。鮮鋭さの評価では〔目→髪の毛のハイライト→顔と髪の毛の境界〕となり、人物に対しては一般に「目」を基本として他の部位を比較参照することにより、評価を与えていると思われる。また、同一被写体の画像を連続的に呈示した場合、これら走査線は一定化する傾向があり、短時間に評価が完了するようになる。表4は主観的評価における固定点、およびそ

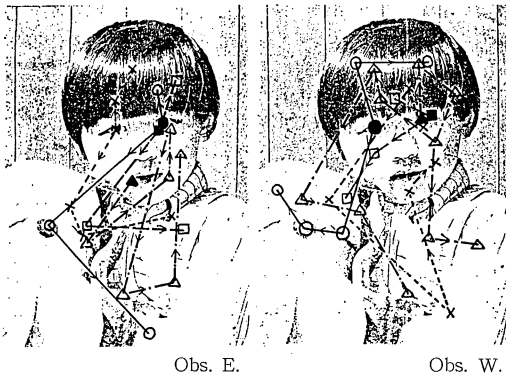


図5 画質評価における注視点の固定点の移動の道程<sup>19)</sup>

○: 画質, □: 調子(階調のよさ), ×: 調子(コントラスト), △: 鮮鋭さ

表4 画質の主観評価において視点が固定する対象<sup>19)</sup>

固 定 点	画質	鮮鋭さ	調子	コントラスト	光 学 濃 度
目	○	○	○	○	1.17
髪(ハイライト)	○	○			0.76
髪(シャドウ)			○	○	1.34
肌	○			○	0.39
洋 服	○	○			0.21
犬 の 額			○		0.30

の点の光学濃度(2°視野)を示したもので、調子の評価では肌(濃度0.3)および髪のシャドウ(濃度1.2)などのような明部と暗部の比較が行なわれ、また、鮮鋭さの評価は、髪の毛や布、犬の毛などのテクスチャ部および輪郭などのエッジ部の印象にもとづいていると考えられる。

#### 4. MTF による画像の評価

##### 4.1 MTF による画像の評価関数

MTF を用いた画像システム、またはシステムの構成要素の物理的な評価尺度について多くの提案がなされている。それらは次の四つの方法にまとめられる。

- (1) MTF を数式表示した場合の係数を用いる<sup>20,21)</sup>。
- (2) MTF が 0.8(-3 dB), または 0.5(-6 dB, 半値) というような特定の値となる空間周波数を用いる<sup>22)</sup>。
- (3) 特定の空間周波数における MTF 値を用いる<sup>23-27)</sup>。
- (4) MTF の積分量によって与えられる評価値を用いる<sup>25-34)</sup>。

画像は最終的には目によって観察され、利用される。したがって、物理的な評価尺度に対して視覚系の特性を考慮することによって、心理物理的な評価尺度を考案することができるようになる。

MTF は画像のパワースペクトルの伝達の様子を記述するものであることから、一般に、MTF による心理物理的な評価尺度  $G_s$  は鮮鋭さの印象  $Q_s$  に関係すると考えられており、評価尺度として MTF の積分量を用いる方法が多く提案されている。

鮮鋭さ  $Q_s$  の心理物理的な評価尺度  $G_s$  は

$$G_s = \int [D(u) \cdot B(u)]^H du \quad (2)$$

ここで、 $D(u)$  は画像の MTF,  $B(u)$  は視覚系の MTF である。 $H=1$  のとき  $G_s$  は強度に対する心理物理量であり、視覚の MTF を除くと Strehl の提案による definition に対応する。 $H=2$  のとき  $G_s$  はパワーに対する心理物理量であり、視覚の MTF を除くと Schade の提案<sup>5)</sup> による等価帯域幅に相当する。

大上<sup>28)</sup> は式(2)から導かれる八つの心理物理的な評価尺度を考え、4種の被写体像について MTF を変化させた透過の試験画像を用いてシャープネスの心理評価を行なった結果、次式が最もよい相関を与えたとしている。 $C$  は階調度( $\gamma$ )で、 $u, v$  は空間周波数である。

$$G_s = C \iint [D(u, v) \cdot B(u, v)]^2 du dv \quad (3)$$

Crane<sup>29)</sup> は画像や視覚系の MTF をガウス分布に近似して、鮮鋭度評価のための SMT acutance (system modulation transfer acutance) を実験的に定義した。Granger ら<sup>30)</sup> は Schade による目→脳の組合せがバンドパスフィルタとして働くという性質を利用して、画像のシャープネスの評価を導くために網膜上で 10~40 line/mm (観察距離を 40 cm としたとき、画像上で 0.38~1.5 line/mm) の等価視覚帯域を規定し、さらに、視覚系が空間周波数に対して対数的な効果を有することを利用して SQF (subjective quality factor) を定義し、実際の画像の心理評価との対応について検討している。SQF では視覚系の MTF 曲線のかわりに積分限界を用いているので計算が簡単であり、工業的に便利であるといえる。

式(2)のような心理物理量の絶対値表示に対して、正規化して表示する方法でも提案されている。佐柳<sup>27)</sup> は画像伝達系の MTF と受光系の MTF との積の積分量を受光系の MTF の積分量で正規化して得られる量を情報容量として提案している。ここで、受光系を視覚系と

考えると

$$G_s = \int D(u) \cdot B(u) du / \int B(u) du \quad (4)$$

式(4)は視覚系の MTF の何割が画像伝達に用いられるかを示す尺度とすることができる。Biedermann<sup>31)</sup>は視覚系が対数的な応答特性をもつということから式(4)を変形して次のような心理物理的評価尺度値を定義した。

$$G_s = \log \left[ \frac{\int D(u) \cdot B(u) du}{\int B(u) du} \right] \quad (5)$$

式(5)はシャープネスだけでなく、画質の総合的評価をも導くものであること、また、心理物理的評価尺度  $G_s$  と心理評価  $Q_s$  との間に直線的な関係が成立することを実験的に示している。Gendron ら<sup>32)</sup>は式(5)と類似の CMT acutance (cascaded modulation transfer acutance) を提案している。

Nelson ら<sup>33)</sup>は SMT acutance, CMT acutance, SQF などの評価式の比較について報告している。

#### 4.2 MTF による画像の鮮鋭さの評価と問題

もし、再現がよい調子再現によってなされ、粒状性が問題でないような場合には、4.1 節で述べた種々提案されているどの評価方法も鮮鋭さや、さらに主観的な総合画質とすべてよく対応する。しかし、それらの試験に用いられた画像の MTF は空間周波数が高くなるに従い単調に減少するような場合を対象としている。帯域制限させた画像や、特定の空間周波数部分を強調した画像で

は、それらの評価関数は主観評価と対応しにくい<sup>34)</sup>。したがって、特定の空間周波数のレスポンスを高めて、みかけの鮮鋭さを強調した画像や、帯域制限画像の評価には、それら評価関数は利用できにくいという欠点がある。

さらに、評価式に用いる視覚系の MTF の選定の問題および、鮮鋭さの評価に対し視覚系を含む画像システムの MTF の積分量を用いることが妥当かの問題があげられる。

視覚系の MTF は一般に一つの単一的な曲線で表わされているが、視覚系自体の非線形性および測定条件、測定方法によって異なった曲線が発表されている。図6の実線は視覚系の MTF の測定例<sup>35)</sup>であり、通常画像を観察する場合に近い明るさでの測定による。画像システムの MTF による評価に対して視覚系のレスポンス関数を用いることは、視覚系の最大応答の空間周波数領域に対してとくに大きな重みづけをすることである。しかし、最大応答を与える空間周波数は約 40 cm の観察距離のとき、画像上で 0.4 line/mm 程度と意外に低く、3.3 節で述べたような鮮鋭さの評価に関係する 1.5 line/mm 以上の高い空間周波数領域に対する視覚系の重みはわずかである。

Rosenfeld<sup>36)</sup>はよい画像システムでは高周波における視覚系の応答の低下に対する補償が望ましいとしている。Cornsweet<sup>37)</sup>は人間の視覚系の高空間周波数における知覚能力は低くなっているにもかかわらず、文字や画線における直線でない、あいまいなエッジ、段階状のエッジは不愉快な、好ましくない印象を与えると述べている。

Kriss ら<sup>38)</sup>は鮮鋭さの評価に対する高空間周波数の重要性を説明するような視覚系の特性についてよくわかっていないことから、とりあえず図6の点線のような、視覚系のレスポンス関数の逆数を考え、それを用いた reciprocal CMT acutance が CMT acutance<sup>32)</sup>よりも鮮鋭さの主観評価値とよく対応する結果を与たと報告

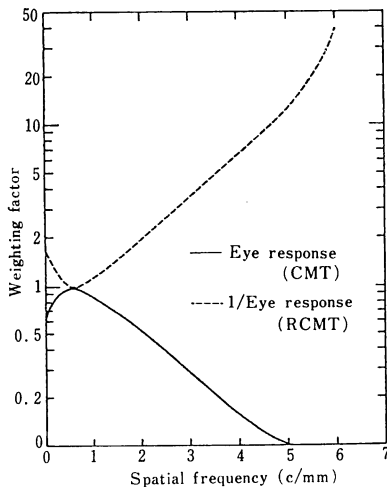


図6 視覚系の MTF (実線)<sup>35)</sup>とその逆関数(点線)  
横軸は観察距離 1 フィートの場合の画像上の空間周波数

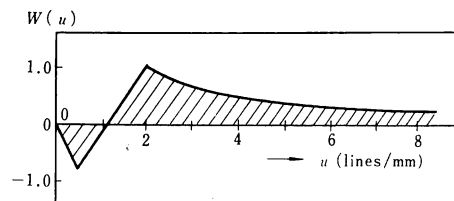


図7 鮮鋭さの評価のための重み関数<sup>16)</sup> (観察距離 = 40cm)



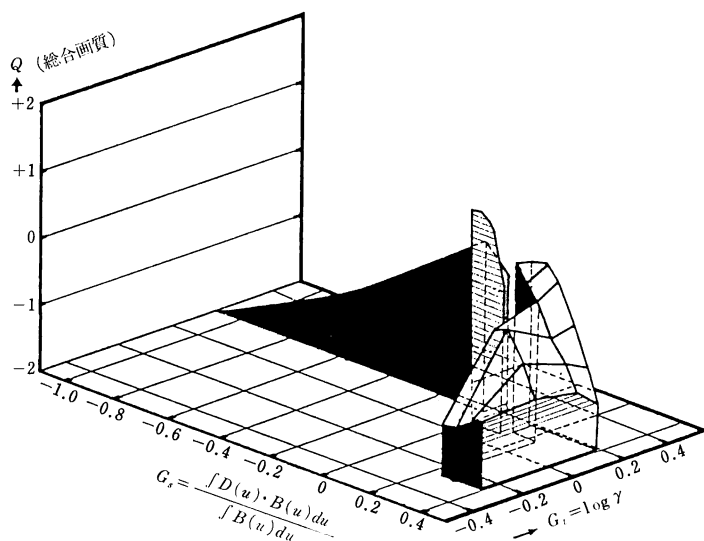


図8 階調度 ( $\gamma$ ) と MTF による評価尺度 ( $G_1, G_2$ ) と主観的な総合画質 ( $Q$ ) との関係の三次元表示

している。このことは鮮鋭さの評価関数として視覚系の MTF を用いる方法について、さらに検討すべきことを示すといえる。

筆者らは 3.3 節に示した実験結果にもとづき、図 7 に示すような、0.5 line/mm で極小値をもち、2 line/mm で極大となり、2.0 line/mm 以上では  $1/u$  ( $u$  は空間周波数) の重みをもつような鮮鋭さの評価関数  $W_s(u)$  を用いた次式のような鮮鋭さの評価式を提案し、MTF にピーキングを与えたような画像の評価もよく適用できることを実験的に確かめている<sup>16)</sup>。

$$G_s = \log \left[ \gamma \int D(u) \cdot W_s(u) du / \int W_s(u) du \right] \quad (6)$$

鮮鋭さの評価に対しては  $W_s$  のかわりに、SQF の場合と同じような鮮鋭さの評価のためのパスバンドを考慮することができ、その場合の帯域幅は 1.5~4 line/mm 程度が適当と思われる。

#### 4.3 主観的な総合画質の評価

MTF は本来パワースペクトルの情報の伝達に関する特性であることを考えると、MTF の積分量は鮮鋭さよりも、むしろ画像のコントラストの印象、いかえれば輝度情報量に強く関連していると考えたほうがよい。

式(5)について、式(3)のように調子再現の階調度 ( $\gamma$ ) を考えると次式のようなになる<sup>34)</sup>。

$$G = \log \left[ \gamma \int D(u) \cdot B(u) du / \int B(u) du \right] \quad (7)$$

式(7)と画質の関係を調べると、 $G$  には最適値が存在する。階調度や MTF を種々に変化させた画像の主観評

価実験では、階調度の変化に伴う画質の変化と、式(5)の変化に伴う画質の変化の程度は異なることを示す。両者に重みを考えると、式(6)は次のようになる。

$$G = W_1 \log \gamma + W_2 \log \left[ \int D(u) \cdot B(u) du / \int B(u) du \right] \quad (8)$$

階調度 ( $\gamma$ ) による左項 ( $\log \gamma$ ) および視覚系の MTF を含む右項 (式(5)と同一) の変化に伴う主観的画質  $Q$  の変化を測定した結果を三次元的に示すと図 8 のようになる。ここで、階調度 ( $\gamma$ ) の変化に伴う主観的画質の変化の勾配と、視覚系の MTF を含む右項の変化に伴う画質の変化の勾配との比を求めると、1 対 0.54 となる。式(8)にこの勾配比を重みとして用いると、

$$G = \log \gamma + 0.54 \log \left[ \int D(u) B(u) du / \int B(u) du \right] \quad (9)$$

$G$  と主観的画質  $Q$  との関係は

$$\left. \begin{aligned} Q &= 5.5G - 0.15 \quad (G \leq 0.18) \\ Q &= -11.3G + 2.87 \quad (G > 0.18) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

で与えられる。式(10)において、 $G=0.18$  のとき  $Q$  は最大となる。また、 $Q > -0.5$  のときふつう以上の画質の像であり、 $Q > 0.5$  のとき「よい画質」、また  $Q < -1.8$  では「非常に悪い画質」と評価される。また、主観的画質が  $Q=0$  でなく  $Q=0.18$  付近で最大となる理由として、原被写体と写真画像との観察条件が異なるために必要となる視覚系への補償によるものと考えられる。

#### 4.4 写真システムの情報容量と画質

一つのチャンネル (たとえば伝送ケーブルのような通信チャンネル) が誤差なく伝送できる最大情報容量は次のように与えられている<sup>39)</sup>.

$$H = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \ln_2 \left[ 1 + \frac{P_S(u)}{P_N(u)} \right] du \quad (11)$$

ここで、 $P_S(u)$  は信号のパワー、 $P_N(u)$  はチャンネル中でノイズのパワー、そして、 $u$  は周波数である。写真のような二次元の画像に対して式(11)は次のように近似される。

$$H = \pi \int_0^{\infty} \ln_2 \left[ 1 + \frac{P_S(u)}{P_N(u)} \right] u du \quad (12)$$

ここで、 $u$  は空間周波数であり、システムは均質で等方的とする。

写真システムの信号のパワー、およびノイズのパワーから、式(12)は次のように表わされる<sup>39)</sup>.

$$H = \pi \int_0^{\infty} \ln_2 \left[ 1 + \frac{0.00059 \gamma^2 MTF^2(u)}{u_0^2 \Phi_D(u)} \right] u du \quad (13)$$

ここで、 $u_0$  はカットオフ周波数、 $\gamma$  はフィルムのガンマ、 $MTF(u)$  はフィルムの MTF、 $\Phi_D(u)$  はフィルム粒子のパワースペクトルである。

フィルムと視覚系と組み合わせたときの情報容量は

$$H = \pi \int_0^{\infty} \ln_2 \left[ 1 + \frac{0.00059 \gamma^2 MTF^2(u) \cdot R_1^2(u)}{u_0^2 \{ \Phi_D(u) R_2^2(u) + \Phi_E \}} \right] u du \quad (14)$$

式(14)において、信号およびノイズに対して視覚系が異なる応答を示すと仮定している。 $R_1(u)$  は信号に対して用いられる視覚系のレスポンス関数、 $R_2(u)$  はノイズに対して用いられる視覚系のレスポンス関数、そして $\Phi_E$  は視覚系のノイズのパワースペクトルで、通常一定の値をとると仮定され、十分明るい照明条件下ではゼロとみなせる。Kriss らは視覚系がノイズを強調しないと仮定し、式(14)の  $R_2(u)$  には視覚系の MTF (図6の実線)、 $R_1(u)$  に MTF の逆関数 (図6の点線) を用いて得た情報容量が主観的画質の評価とよく合うと報告している<sup>38)</sup>.

#### 5. デジタルシステムの利用と画質

ハロゲン化銀に加えて、磁気、電子そして固体素子の利用が増加し、また、画像システムの一部または全部をデジタル化する傾向がある。デジタル化することにより伝送の誤差が少なくできるだけでなく、コンピュータによる画像処理を応用した画像情報の加工能力、情報システムとの整合性などが従来の画像システムにない利

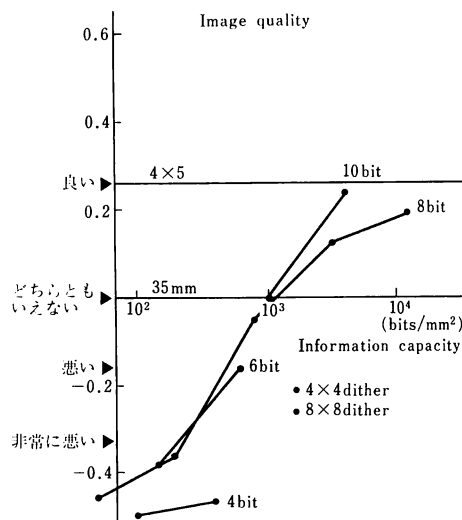


図9 デジタル画像の情報容量と総合画質との関係<sup>43)</sup>

点といえよう。そのため、デジタル画像の画質の評価や従来の写真との比較がされるようになってきている<sup>40-42)</sup>.

デジタル画像では画像を  $M \times N$  点の画素の配列に標本化し、また各画素のグレイレベルは量子化される。そのときの全情報量 ( $H_{tot}$ ) は

$$H_{tot} (\text{bits}) = M \cdot N \cdot \log_2 K \quad (15)$$

ここで、 $M, N$  は、標本化の画素数、 $K$  はグレイレベル数である。デジタル画像が原画像の「よい記録」、「よい再現である」ためには、 $M, N, K$  は大きいほうがよい。しかし、 $H_{tot}$  が大きいと伝送や記録に困難が伴うので、画像システム的设计において、なるべく少ない情報量で目的を満足させるよう工夫が必要とされる。 $M, N, K$  と主観的な画質との関係は意外と調べられていない。デジタル画像の出力を通常の写真画像と同一材料で行ない、デジタル化の比較を行なった例を図9に示す<sup>43)</sup>。横軸は情報容量 ( $\text{bit}/\text{mm}^2$ )、縦軸は主観的な総合画質で、通常の35ミリカメラを用いた、 $20 \times 25 \text{ cm}$  の拡大した画像を基準に示してある。35ミリカメラ画像と同じ画質を得るためには  $10^3 \text{ bit}/\text{mm}^2$ 、 $4 \times 5$  インチカメラと同等の画像とするためには1桁多く、 $10^4 \text{ bit}/\text{mm}^2$  必要となる。

#### 6. あとがき

この20~30年の間に MTF やノイズのパワースペクトルなど写真画像の評価や解析のための有用な手段が開発された。また、主観的な評価や尺度化に対する研究も進展している。デジタル画像処理技術の進歩は仮想の

画像システムのシミュレーションを可能にしている。一方、最近の写真システムではハロゲン化銀だけでなく、磁気、電子的な記録、種々の固体素子の利用も考えられるようになってきている。これから開発されるであろう新しい画像システムに対しても、従来の写真画像の評価や解析手段は有効に役立てられるであろう。また、画像評価についての主観的な側面のよい理解は画像システムの改良や開発に寄与するものと思われる。

画像は最終的には目で見て利用されるものであるから、画像の質は視覚の諸特性と密接な関係があるといえよう。この両者の関係が明確になれば、視覚の効果がより有効に作用されるようにシステムを改良して、画質を向上させることも可能となると考えられる。ここに、視覚に関する研究のいっそうの進展、および、視覚に関する心理物理的分野での多くの事実が画像の評価や、画像表示システムの設計に役立てられるようになることを期待したい。

## 文 献

- 1) L. A. Jones: J. Franklin Inst., **190**(1920) 39.
- 2) T. H. James: *The Theory of the Photographic Process* (Macmillan, New York, 1977) 4th ed., p. 536.
- 3) E. W. H. Selwyn: Photogr. J., **75**(1935) 571; **79**(1939) 513.
- 4) H. Frieser: Photogr. Korresp., **91**(1955) 69; **92**(1956) 52, 183; **94**(1958) 115, 131, 147; Photogr. Sci. Eng., **4**(1960) 324.
- 5) O. H. Shade: J. Soc. Motion Pict. Telev. Eng., **64**(1955) 593.
- 6) J. J. Depalma and J. Gasper: Photogr. Sci. Eng., **16**(1972) 181.
- 7) E. A. Trabka and E. C. Doerner: J. Appl. Photogr. Eng., **2**(1976) 1.
- 8) P. B. Fellgette: J. Opt. Soc. Am., **39**(1949) 970.
- 9) A. Rose: J. Opt. Soc. Am., **43**(1953) 715.
- 10) J. C. Dainty and R. Shaw: *Image Science* (Academic Press, New York, 1974) p. 28.
- 11) 藤村郁夫, 山本勝昭: 日本写真学会講演会要旨 (1964) p. 60.
- 12) リヤ・プロジェクトン・スクリーン研究会: リアスクリーンの評価のための研究 (光学工業技術研究組合, 1975).
- 13) 香場信夫, 早川誠二, 加納敏夫, 河津元昭: 第9回画像工学コンファレンス (1978) p. 1.
- 14) 安田嘉純: 日本写真学会 12回シンポジウム (1982) p. 25.
- 15) C. N. Nelson: J. Opt. Soc. Am., **63**(1973) 1289.
- 16) 安田嘉純, 江森康文: 日本写真学会誌, **44**(1981) 406.
- 17) 池田光男: 光学技術コンタクト, **8**(1970) 45.
- 18) 渡辺 叙: 応用物理, **40**(1971) 330.
- 19) 安田嘉純, 江森康文: 日本写真学会秋季講演会 (1972) p. 86.
- 20) H. Frieser: Photogr. Korresp., **91**(1955) 69.
- 21) D. P. Paris: J. Opt. Soc. Am., **51**(1961) 988.
- 22) H. H. Hopkins: Proc. Phys. Soc., London, Sect. B, **70**(1957) 449.
- 23) C. H. Cook: J. Telev. Soc., **9**(1959) 61.
- 24) 木下幸次郎, 龍岡静夫: 応用物理, **29**(1960) 195.
- 25) E. H. Linfoot: J. Opt. Soc. Am., **46**(1956) 740.
- 26) O. H. Shade: Appl. Opt., **3**(1964) 17.
- 27) 佐柳和男: 応用物理, **25**(1956) 449.
- 28) 大上進吾: 応用物理, **31**(1962) 178.
- 29) E. M. Crane: J. Soc. Motion Pict. Telev. Eng., **73**(1964) 643.
- 30) E. M. Granger and K. N. Cupery: Photogr. Sci. Eng., **16**(1972) 221.
- 31) V. K. Biedermann: Photogr. Korresp., **103**(1967) 5, 25, 41.
- 32) R. G. Gendron: J. Soc. Motion Pict. Telev. Eng., **82**(1973) 1009.
- 33) F. N. Nelson, *et al.*: *SPSE Conf. Proc.* (1977) p. 81.
- 34) 安田嘉純, 江森康文: 応用物理, **41**(1972) 27.
- 35) H. Watanabe, *et al.*: Vision Res., **8**(1968) 1245.
- 36) A. Rosenfeld and A. C. Kak: *Digital Picture Processing* (Academic Press, New York, 1976) p. 184.
- 37) T. N. Cornsweet: *Visual Perception* (Academic Press, New York, 1979) p. 268.
- 38) M. Kriss, J. O' Toole and J. Kinard: *SPSE Conf. Proc.* (1976) p. 122.
- 39) C. E. Shannon: Bell Syst. Tech. J., **27**(1948) 379, 623.
- 40) P. N. Slater: *SPSE Conf. Proc.* (1976) p. 84.
- 41) H. L. Snyder, *et al.*: Opt. Eng., **21**(1982) 14.
- 42) R. J. Arguello, *et al.*: Opt. Eng., **21**(1982) 23.
- 43) 安田嘉純, 江森康文: 日本写真学会春季講演会 (1982) p. 133.