

解説**直視型、投写型テレビの画像品質評価**

三橋 哲雄・倉重 光宏

NHK 放送技術研究所 〒157 東京都世田谷区砧 1-10-11

(1993年10月21日受理)

Picture Quality Assessment of Direct-Viewing and Projection TV

Tetsuo MITSUHASHI and Mitsuhiro KURASHIGE

NHK Science & Technical Research Laboratories, 1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157

1. ま え が き

本年(1993)はわが国のテレビ放送開始 40 周年にあたる。現在、受像器は一家に2台を越えるまでに普及し、画質も著しく向上した。

画質とは画像の品質である。画質はテレビ系を構成するすべての要素の総合として定まる。中でもディスプレイは、系の出力装置として画質に最も大きく影響する。最近では、CG のように直接電気信号として生成した画像も多く用いられるようになってきており、ディスプレイの画質に対する重要性はますます大きくなってきている。

テレビは自然画像を中心とする。したがって、テレビディスプレイは、解像度や明るさに加えて、色も含めた中間調の正しい再現が重要となる。

本稿では、テレビ画質の主要な要因と現在用いられている評価法について、ディスプレイの物理的特性との関わりを直視型と投写型テレビに重きをおいて述べる。

2. 画質とその要因

画質には多くの要因のあることが知られており、図1に示す階層構造で表される¹⁾。心理要因は美しさや見やすさと言った心理反応に対応し、量的測定には心理学的測定法が用いられる。物理要因は周波数特性や輝度等のような物理特性であり、電気的あるいは測光・測色等の物理的手段により量的測定が可能である。

画質改善を効率的に行うためには図1の階層構造の解明が必要であり、より高度な心理効果を目指す画像システムの開発やデバイス開発のためには特に重要である。

しかし、図1の関係はまだ不明な点が多く、工学的には、物理要因の効果を知ることが重要であるので、個々の要因ごとに総合画質との関係を求めることが多く行われている。

一部の心理要因については物理要因との関係が明らかになったものもある。このような心理要因は心理物理要因と呼ばれる。シャープネスや色再現等、ディスプレイの画質にとって重要な心理要因が心理物理要因化されている。これらの心理物理要因は、総合画質に大きく寄与することが経験的に知られているところから、評価の重要な項目となっている。総合画質に対する定量的な関係は今後の課題である。

表1にテレビ画像の主な画質要因を示す。

3. 評 価 法

心理学測定法による評価は主観評価と呼ばれる。主観評価は、総合画質や妨害の評価のほか、物理要因と画質との関係や心理要因の検討に用いられる唯一の方法である。テレビの最終的な受け手は人間であるので、画質の評価にあたっては、人間による主観評価は重要である。HDTV 等、新しい高画質、高臨場感テレビシステムにおいては、主観評価はより一層重要となる。

一方、物理要因による画質評価は客観評価と呼ばれる。これに対し、系の物理的パラメーターの改善、研究の指針を具体的に得るためには、客観評価が再現性や費用の点で優れている。標準化された物理的測定法²⁾はこれにあたる。

心理物理要因は、主観評価によって画質との関係が知られているだけでなく、実施にあたっては対応する物理

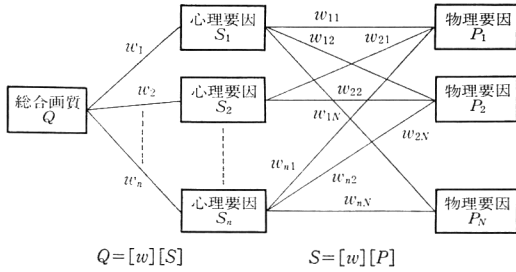


図1 画質とその要因¹⁾
心理要因のうちで物理的測度を持つものは心理物理要因とも呼ばれる。

表1 テレビ画像の主な画質要因

心理要因	心理物理要因	物理要因
美しさ	各種妨害	γ 特性, MTF, 雑音, Dレンジ, 残像, 感度, 周波数特性, 遅延特性, 幾何学歪, 原色点, 基準白色, 分光感度
質感	コントラスト	
疲労	シャープネス	
キメの細かさ	階調 (調子)	
迫力	明るさ	
立像感	チラツキ	
臨場感	色再現	

量の測定だけを行えば良いので、見かけ上客観評価とみなせる。したがって、系の有効な評価要因であるので多くの研究があり、画質評価に広く用いられている。

客観評価法については詳細な規定があり、主観評価法については HDTV の場合が既に本誌で解説されている⁹⁾。そこで、以下では、画質の主要な心理物理要因とその視覚的性質について紹介することとする。なお、原理的な測定法については既に良く知られているので、TV 系での留意点についてのみ触れることとする。また、主観評価法の詳細については文献⁹⁾を参照されたい。

(1) シャープネス

シャープネスは総合画質に対する寄与が非常に大きく⁵⁾、次式で示される MTFA (modulation transfer function area) で系の MTF と関係づけられる⁶⁾ (図2)。

$$MTFA = \int_0^{\nu_m} \{MTF(\nu) - CTF(\nu)\} d\nu$$

ただし、CTF はコントラスト弁別閾特性 (contrast threshold function), ν は空間周波数 (cycles/degree), ν_m は限界解像空間周波数。

最近では SQRI (square root integral) と呼ばれる値がよりよい関係を与えている⁷⁾。

(2) 階調, コントラスト

階調は画像の各部分の輝度が見やすい範囲に納まるようにすることが必要である。主観的に望ましい特性は、

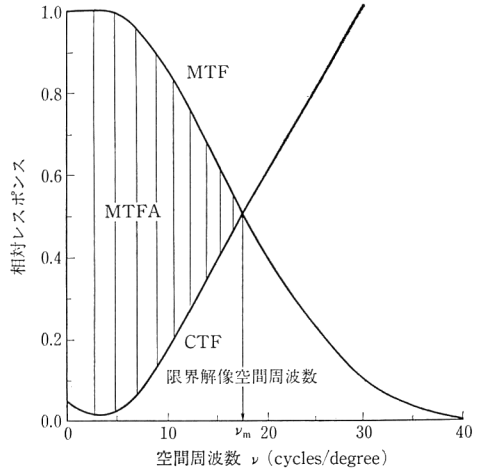


図2 MTFA の概念図⁶⁾

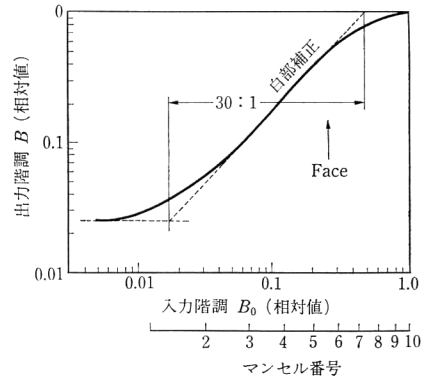


図3 最適調子再現特性⁹⁾

図3に示すように、白と黒を圧縮したS字型となる。

テレビではコントラストを最低輝度 B_{min} と最高輝度 B_{max} の比, B_{max}/B_{min} で表す。図3から所要コントラストは30となる。

テレビの信号レベルは $1/\gamma$ 乗に比例するようあらかじめ補正されている。 γ は光電変換特性のベキ値で、規格に規定されており⁹⁾、表2に示すように2.2または2.8である。正しい階調再現のためには、光電変換を規定値にあわせることが重要となる。

ハイビジョンでは、より高画質をめざし所要コントラストを50、また γ 値は種々の応用を考慮しより厳密に決められている。

(3) 輝度

人間の明るさに対する感覚は周囲光に依存する¹⁰⁾。したがって、所要輝度は必要なコントラストによって異なる。

最高輝度については、TV 系での実験結果^{11,12)}や映画

表 2 テレビの三原色と基準白色

方式		NTSC		PAL/SECAM		HDTV	
走査線数		525		625		1125	
毎秒像数		30		25		30	
アスペクト		3 : 4				9 : 16	
三原色	色度	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
	R	0.67	0.33	0.64	0.33	0.640	0.330
	G	0.21	0.71	0.29	0.60	0.300	0.600
	B	0.14	0.08	0.15	0.06	0.150	0.06
基準白色		0.310	0.316	0.313	0.329	0.3127	0.3290
輝度信号方程式		$0.229E_R + 0.587E_G + 0.114E_B$				$0.7154E_G + 0.0721E_B + 0.2125E_R$	
γ 値		2.2		2.8		$V = 1.099 L^{0.45} - 0.099$ $(1 \geq L \geq 0.018)$ $= 4.5 L (0.018 > L \geq 0)$	

NTSC: 米, 日, 韓他, PAL: 英, 独, 伊他, SECAM: 仏, 露他.

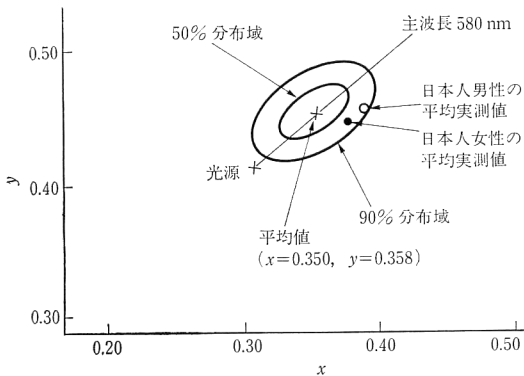


図 4 望ましい肌色の分布¹⁷⁾

の規格¹³⁾, 実態調査の結果¹⁴⁾から, 150 cd/m² が一つの目安となる. 最低輝度は, したがって, コントラストを 30 とすると 5 cd/m² となる.

最低輝度を実際に決めるのは周囲光の反射である. 通常の家庭の照明は 50 から 100 lx 程度であり, ディスプレイ表面の反射率は 20% 程度にする必要がある. なお, 完全な暗黒は心理的に好まれない.

(4) 色再現

テレビの色再現は加法混色理論に基づいて設計されている. したがって, 基本的な色再現性能は, 入出力画像間の色差を比較することにより評価され, 表 2 に示した基準の三原色および白色の色度と異なる値の機器では, 色再現に歪を生じる¹⁵⁾.

しかし, 日常見慣れている色には主観的に好ましい再現色が存在し, 忠実再現はむしろ好まれない. これらの

色は記憶色と呼ばれ¹⁶⁾, 特に肌色は重要である. 好ましい肌色の範囲を図 4 に示す¹⁷⁾. 一般的な色の場合の好ましい再現範囲は必ずしも明らかになっていないと言えないが, L*u*v* 表色系での色差を ΔE とすると, $\Delta E \leq 5$ 程度までは通常色再現は問題にならないと言われている. 測定のための標準信号や測定用パターンも用意されている. その使い方とともに詳細は文献を参照されたい¹⁸⁾.

4. ディスプレイの画質

4.1 直視型と投写型

ディスプレイは, 観察画面の構成により直視型と投写型に大別される. 投写型のうち, スクリーン面に関し, 観察者と同一側から投写する場合を前面投写型, 観察者と反対側から投写する場合を背面投写型と言う. 直視型では専ら CRT が用いられる. 投写型では CRT 式, 液晶式のほか, ライトバルブ式等も用いられる. レーザー式も最近立体ディスプレイとして再び注目されている^{19,20)}.

現在テレビディスプレイとして最も広く用いられているのは CRT ディスプレイである. また, 液晶については本誌別項に述べられているので, 以下では CRT ディスプレイを中心にディスプレイの形式と画質の関係を述べる.

4.2 ディスプレイの画質

(1) シャープネス

直視型 CRT の MTF は, 電子ビームとシャドウマ

スクあるいはアパーチャグリルの MTF の積で決まる²¹⁾。したがって、MTF を良くするには、マスクまたはグリルの開口ピッチおよびサイズを小さくするとともに、電子ビームを細くすることが必要となる。例を図 5 に示す。しかし、これらはいずれも明るさの低下要因となるため、MTF とのバランスに対する考慮が必要となる。

投写型では R, G, B 単色の小型 CRT の像をスクリーンに拡大投射するので、MTF には CRT 以外に光学系の特性が加わる。CRT にはマスクがないが、所要の拡大率に必要な高輝度を得るため大ビーム電流が必要であり、ビーム径が広がり MTF が低下しやすい²²⁾。また、コンバージェンスズレも生じやすくなる。図 6 に、背面投写型の MTF の例を示す²³⁾。光学系で生ずるフレアは、いわゆる投写型特有の画質の原因となるが、MTF 上では低域のわずかな上昇となって表れ、曲線自体は大きく変わって見えないので注意が必要である。

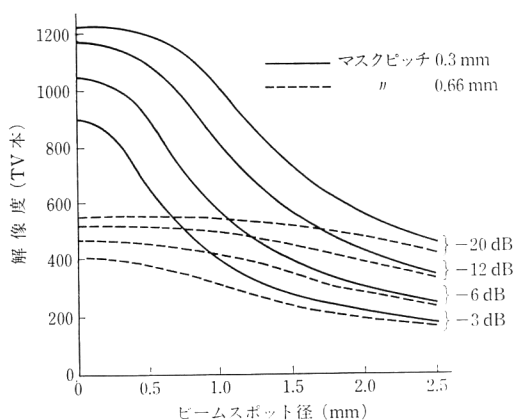


図 5 CRT の MTF 例 (計算値)²¹⁾

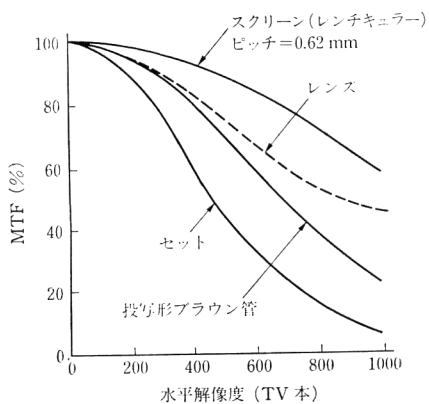


図 6 背面投写型の構成要素と MTF²³⁾

MTF の測定はインパルス法と、正弦波法がある。前者では微小レベルの測定精度が、後者では駆動回路の特性が影響するので注意が必要である。 γ 特性の影響を避けるためには小入力が見望ましい²⁴⁾。フレアに対しては、10 (サイクル/画面幅) 以下の低周波数まで十分精度良く測定する必要がある。

(2) 階調, コントラスト

CRT の γ は動作状態によって変化し、実際の使用状態では 2.4~2.7 程度と言われ、特に周囲光による影響は大きい⁸⁾。投写型ではフレアも影響する。また、液晶など γ の値が異なるだけでなく、特性そのものが CRT と異なる場合は、専用の γ 補正により階調再現を維持する必要がある。

コントラストは白地の中央に黒の矩径を埋め込んだ図形が一般に用いられるが、フレアのため黒地に白の場合よりも低くなるのが一般的である。詳細な検討が必要な場合には、埋め込まれた図形の大きさを変えたり、白黒の変化の状態を細かく測定する。特に MTF の高域に相当する小面積のコントラストはディテールコントラストと呼ばれ、シャープネスに重要である。

(3) 輝度

CRT の場合最も反射率の高いのは蛍光体で、その値は 80% 程度である²⁵⁾。直視管では、このため、パネルガラスの透過率を下げトータルの反射率を 20% 程度としている。したがって、前節で述べた望ましい条件を満たしていることがわかる。現行 TV 用ディスプレイでは、室内照明に対する余裕を見て、400 cd/m² 程度の最高輝度を得ている。

HDTV では高解像度を得るためビーム電流を多くするのが難しく、輝度は最高 200 cd/m² 程度である。したがって、十分なコントラストで本来の高品質画像を楽しむためには周囲照明に十分な注意を払う必要がある。

投写型の場合最低輝度を支配するのはスクリーンの反射率である。前面投写型では投写光と周囲光は区別できない。したがって、十分な最低輝度を得るには、可能な限り周囲光を抑える必要がある。

一方、背面投写型の場合、一般的なアクリルスクリーンの反射率は約 4% であるから 100 lx の外光に対する反射輝度は約 1 cd/m² となる。したがって、コントラスト 30、拡大率を 10、スクリーン利得を 4 とすると、投写管の所要輝度は 1250 cd/m² となる。実際には光学系の損失等も含め 5000 cd/m² を越える高輝度が必要となり、MTF の低下やフレアの増大を招き、画質の劣化の原因となる。

(4) 色再現

色再現は蛍光体で決まり、直視型、投写型とも P22 と呼ばれる、 x, y がそれぞれ $G: 0.282, 0.620, B: 0.146, 0.061, R: 0.640, 0.352$ のものが広く用いられている。これらは、表2の規定とは異なるものの、記憶色、特に肌色が望ましい値となるよう調整し、ほぼ問題のない色再現を得ている。色度を始め、発光効率、直線性等の改善の検討も進められており、特に高輝度化の必要な投写型で著しい²¹⁾。表2からわかるように、HDTVでは実用中の蛍光体を配慮して原色点を定めており、誤差が少なくなっている。

投写型では、より高輝度を必要とするため、蛍光体の発光が飽和する。B蛍光体で生じやすくしばしば白が黄色がる傾向がある。また、スクリーンには、画面輝度が一樣になるようにレンズ作用を持たせるが、実際には周辺光量の低下により輝度シェーディングを生ずる²⁶⁾。十分な画質を得るためのシェーディングは1/2以内、許容限界は1/3程度となる。シェーディングが上記の範囲に収まる観視位置の範囲を好感領域という。

図7は視距離 $3H$ (H : 画面高) での実測例である。画面全体、すなわち横軸の全範囲がピーク輝度に対して1/3以内の輝度低下に収まる観視位置は、(b)レンチキュラススクリーンの場合のAだけである。したがって、拡散スクリーンを使用する場合や、多人数での同時観視のためには、視距離を大きくしてスクリーンの見込み角および対角角を小さくし、好感領域を広げる必要がある。

さらに、三色の投写管のスクリーンへの入射光軸が異なるため、輝度シェーディングは色シェーディングとなる。これを防ぐためには、投写管の集中角を小さくするとともに、好感領域内の輝度分布ができるだけ様なスクリーンを使用することが望ましい。

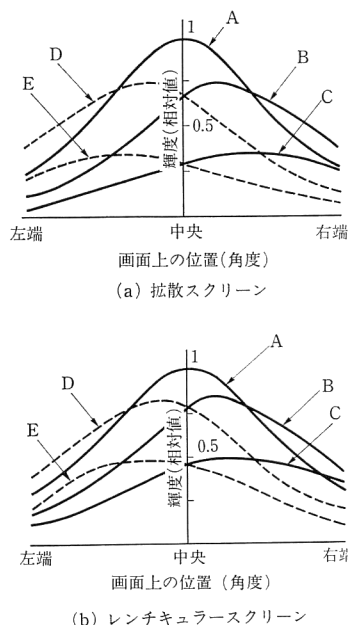


図7 スクリーンの指向特性と輝度シェーディング発生の様子²⁶⁾
 視距離 $3H$ (H : 画面高). 観視位置: 画面中央に対し、A, 正対; B, 右 14° ; C, 右 31° ; D, 左 14° ; E, 左 31° . B~E は各斜め位置。

表3 実用化されているディスプレイの特性例

方 式	現 行		HDTV			
	直 視	背面投写	直 視		前面投写	背面投写
サイ ズ (型)	37	46	36	40	200	55
解像度 (TV 本)	350/350		650/750	1000/750	800/750 以上	
画 素 サ イ ズ	0.85	—	0.75 mm	0.46	—	0.85 mm
レ ン ズ (F 値)	—	1.0	—	—	1.1	1.0
投 写 管 (型)	—	7	—	—	12	7
輝 度 (dc/mm ²)	540 ^a	1500 ^a	140 ^b	51 ^b	500 ^c	900 ^a
寸 法 (mm) w	999	1070	930	1030	1180 ^d	1290
h	732	1341	661	764	428	1470
d	594	817	617	865	1041	700
重 量 (kg)	81.5	113.5	91	185	180 ^d	149
消費電力 (W)	81.5	193	340	350	1000 ^d	460

a 解像度は方式の名目値, b 画素サイズ: 直視型は CRT マスクピッチ, 投写型はスクリーンピッチ, c 輝度: (1)ピーク輝度, (2)平均輝度, (3)光出力 (lm), d 投写器のみ。

以上のような要素を考慮して、現在種々のディスプレイが実用化されている。ディスプレイの特性例を表3に示す。

5. あとがき

近年画質に対する要求はますます高度になって来つつあり、ハイビジョンに代表されるように、ますます大型でしかも高解像度の画像ディスプレイが要求されるようになってきている。さらに、観察者と直接接するインターフェース装置としての見やすさ、快適さ等の性能もより一層求められている。これらはまた、間接的な画質要因として重要である。

一方、ハードウェアの進歩は著しく、これまでのように改善すべき物理的パラメーターを直感で容易に見出すのは難しくなっている。これからは、したがって、画質評価に基づいて改善すべき点を求めることが効率的で、必要となっていくものと考えられる。そのためにはハードウェアと併せて、評価の知見が必要となる。今後は、環境も含めて広く人間系とマッチした新しいディスプレイシステムの開発が期待される。

文 献

- 1) 三橋哲雄：“画像の評価技術の動向”，テレビ誌，**45** (1991) 287-293.
- 2) 例えば，JIS C 6101 テレビジョン受信機試験方法，日本規格協会；JIS C 7072 液晶パネルの測定方法，日本規格協会.
- 3) 金沢 勝，三橋哲雄：“ハイビジョンにおける画質評価”，光学，**21** (1992) 851-857.
- 4) 三橋哲雄：“ディスプレイの主観評価法”，ディスプレイアンドイメージング，**2** (1994) 123-130.
- 5) 中山 剛，黒須正明：“画質構造の分析”，電子情報通信学会誌，**J70-B 12** (1987) 1551-1561.
- 6) H. L. Snyder：“The ANSI/HFS standard for visual display terminals,” Information Display, **5**, 5 (1989) 20-23.
- 7) C. Infante：“Issues in standards and in measurements of CRT display quality,” Proc. of the 12th Int. Display Research Conference, Japan Display '92 (1992) pp. 265-268.
- 8) 樋渡潤二：視覚とテレビジョン（日本放送出版協会，1968）pp. 142-146.
- 9) テレビジョン学会編：テレビジョン画像情報工学データブック（オーム社，1990）pp. 74-76.
- 10) H. von Grosskopf：“Der einfluss der helligkeitsempfindung auf die bildubertragung in fernsehen,” Rundfunktechnische mitteilungen, **7** (1963) 205-223.
- 11) 宮原 誠：“テレビ画像の高品質化に重要な物理要因”，テレビ誌，**40** (1986) 1106-1112.
- 12) 長谷川 敬：“テレビ画像の好ましい色再現—照明条件を指標として—”，信学技報，**IE 79-83** (1983) 43-52.
- 13) ISO 2910 Cinematography-Screenluminance for the Projection of Motion-picture Film in Indoor Theaters.
- 14) 高野 徹：“封切映画館における映画上映の現状と問題点”，映画テレビ技術，No. 9 (1979) 23-29.
- 15) 小寺宏暉，ほか：“色再現の理論”，テレビ誌，**47** (1993) 334-344.
- 16) C. J. Bartleson：“Memory colors of familiar objects,” J. Opt. Soc. Am., **54** (1960) 529-531.
- 17) 杉本昌穂：“カラーテレビジョンにおける肌色の再現”，信学誌，**57** (1974) 1082-1089.
- 18) テレビジョン学会編：テレビジョン画像の評価技術（コロナ社，1986）.
- 19) 若月一見：“ライトバルブ”，テレビ誌，**45** (1991) 175-179.
- 20) S. A. Benton, *et al.*：“Electronic display system for computational holography,” Proc. SPIE, **1212**, Practical Holography IV (1991) 1212-1220.
- 21) 平林一昭，ほか：“高精細度カラー受像管”，テレビ誌，**30** (1976) 369-376.
- 22) 大沢通孝，ほか：“投写型テレビ”，テレビ誌，**47** (1993) 936-940.
- 23) 廣田勝己，ほか：“HDTV用16cm高解像度投写型ブラウン管”，テレビ学技報，**IDY 93-12** (1993) 67-72.
- 24) 近藤いさお，ほか：“ハイビジョンディスプレイのMTF測定とその検討”，信学技報，**IE 92-100** (1993) 9-16.
- 25) 奥田博志，ほか：“テレビにおける色再現(Ⅲ)—表示系の色設計—”，テレビ誌，**47** (1993) 1097-1109.
- 26) 金沢 勝：“高品位テレビ用背面投写型ディスプレイ”，NHK 技研月報，**27** (1984) 486-490.