VDT の表示特性に及ぼす照度の影響

正会員 松川文雄* 大内田裕史* 布下正宏*

Effects of Illumination on the Display Quality of VDT

Fumio Matsukawa (Member), Hirofumi Ouchida, and Masahiro Nunoshita

(Materials & Electronic Devices Laboratory

Mitsubishi Electric Corporation)

ABSTRACT

Legibility of VDT using LCD was evaluated compared with the VDT using CRT. The display luminance, contrast and chromaticity of the color LCD and CRT were examined under the different illumination. The LCD with back lighting system, which was used in emissive mode like CRT, showed less washedout and better legibility than the CRT under high lighting condition. The LCD with the display luminance of only 120cd/m² in white was readable under high lighting condition of 100000 lx. The variation of the display contrast and chromaticity was less than CRT, when the luminous intensity was changed. These were due to the lower diffusive reflectance of LCD compared with CRT. The variation of the display contrast was dependent on the diffusive reflectance of light shield mask, which was formed in the color filter of the LCD panel. It was concluded that the variation of the contrast was expected to be more improved using the mask with lower diffusive reflectance, which was made of zelanin insted of chromium. It was declared that the LCD was suitable for the use under the bad lighting environment, i.e. for outdoor use.

1. ま え が き

従来, VDT (Visual Display Terminal) の様々な照度下での表示特性(視認性)変化は, 主として CRT (Cathode Ray Tube) に対して検討されてきた. LCD (Liquid Crystal Display) のカラー化が進み, その用途が電卓, 腕時計から室内使用の OA 端末や屋外使用の情報システム端末に拡大するにつれ, LCD に対しても視認性が重要な検討課題となってきた。

LCD は原理的に非発光表示であるが, 表示を見やすくするためにバックライトを装着し, CRT と同じ発光表示の形態をとることが多い. しかし, CRT と LCD とでは表示方式が根本的に異なるので, 従来 CRT を基準に決められてきた表示輝度, コントラスト等に対する考え方をそのまま LCD にあてはめることはできない. つまり, CRT に要求される性能は必ずしも LCD に要求される性能とは一致しないと考えられる。

本研究では, 様々な明るさの環境下における CRT と LCD の視認性を左右する表示輝度, コントラスト, 色度の諸要因を比較することによって VDT の視認性を検討した。

2. CRT と LCD の外光による視認性の違い

周囲の明るさが異なる環境に VDT を置いた場合, すなわち, 表

示面照度が異なる場合の視認性の違いを示したものが図 1, 2 である. 図 1 は CRT, 図 2 は LCD の場合であり, これより LCD は CRT に比べ, 高い照度に曝露された場合でもウォッシュアウトが少なく, 表示面照度が 10000lx に達しても, 表示内容の視認が可能なのがわかる。

3. 視認性の評価

CRT の視認性を評価する指標としてはコントラストが広く用いられており, 以下にその定義を示す。

コントラスト C は一般に文字輝度と背景輝度の比で表され, いずれか高い方の輝度を L_H , 低い方の輝度を L_L とすると (1) 式で表される¹⁾。

$$C = L_H / L_L \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

しかし, 実際に VDT を使用する環境では, 表示面には照明などによる外光があたっているのが普通であり, 表示面上での外光による反射光が, 文字と背景の両者に重畳する. そこで, 外光があたっている場合のコントラスト C は (2) 式のように表現できる。

$$C = (L_H + L_r) / (L_L + L_r) \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここで L_H は発光輝度, L_L は暗地発光輝度, L_r は外光が表示面にあたったときに生じる反射輝度である。

また, 反射輝度 L_r は, 拡散反射輝度 L_d と鏡面反射輝度 L_m とで構成され, それぞれが表示面照度 E, 拡散反射率 ρ_d および映り込み対象物の輝度 L_u , 鏡面反射率 ρ_m で与えられるため, (3) 式のよ

*三菱電気株式会社材料研究所

表示面照度 0lx

表示面照度 1万lx

図1 外光による表示の見え方の違い—CRT—

表示面照度 0lx

表示面照度 1万lx

図2 外光による表示の見え方の違い—LCD—

表1 CRTとLCDの一般仕様

	CTR(三菱MT-1430A)	TFT-LCD(試作品)
分解能	640(H)×400(V)×RGB	640(H)×480(V)×RGB
画素配列	RGBストライプ	RGBストライプ
画面サイズ	対角14インチ	対角10インチ
表示色	16色	8色
最大輝度	140cd/m ²	140cd/m ²
表示面	ノングレア処理	ノングレア処理

図3 測定方法

うに表すことができる。

$$L_r = L_d + L_m$$

$$= 1/\pi \times E \times \rho_d + L_u \times \rho_m \dots\dots\dots (3)$$

なお、拡散反射輝度 L_r は指向性がないと考える。

また、映り込みのない条件では、 $L_m = 0$ となるので $L_r = L_d$ の関係が成立する。

4. 測定

表1は本実験での測定対象としたCRTとLCDの仕様を示したものであり、CRTは一般に用いられているパソコン用モニターであり、一方LCDは当社で試作したTN(Twisted Nematic)モードのTFT(Thin Film Transistor)-LCDである。

図3は測定装置の位置関係の概略を示したものであり、ランプの映り込みがなく、 $L_r = L_d$ の関係が成立する条件を実現するため、暗室内に設置したVDT表示面の法線方向から上方45度の位置に白色ランプ(PRF-100V500W)を設置して表示面を照明し、その時の表示面照度を照度計で、また、表示面の法線方向の輝度、色度を測色輝度計(株)トプコン製、BM-5)で測定した。照度計は表示面に密着させて測定を行い、輝度計は表示面から50cmの距離に設置した。

測定は、CRT、LCDともに表示開始後30分以上経過した後に、照明光源の光量を調節し、VDTの表示面照度が100、300、1000、5000、10000、50000lxとなる条件で行った。表示面全体を白あるいは黒表示として輝度の測定を行い、色度は赤、緑、青の3原色を全面に表示した条件で測定した。

5. 測定結果と考察

5.1 外光によるコントラストの変化

(a) CRTの場合^{2),3)}

CRTの発光輝度を140cd/m²に固定して、外光による表示面照度を変化させた場合の白色輝度と黒色輝度の測定値と、それから求めたコントラストを示したものが表2である。また、この結果を表示面照度とコントラストの関係として示したのが図4であり、測定値を○印で示してある。これより表示面照度100lxの時の

表2 CRTの表示輝度とコントラスト

表示面照度 (lx)	白色輝度 (cd/m ²)	黒色輝度 (cd/m ²)	コントラスト	ρ_{dc}
100	144	3.5	41	0.1
300	150	9.7	15	0.1
1000	166	31.0	5	0.08
5000	268	142.0	1.9	0.08
10000	421	289.0	1.5	0.09
50000	1650	1588.0	1.0	0.09

コントラストが41、1000lxの時5、10000lxの時1.5で、照度の増加にともないコントラストが急激に低下することがわかる。

車載用カラーCRT(画面サイズ113×83mm)を用いた視認性評価試験では、コントラストが2程度あれば画面上の交通情報や地図などの文字が読み取れるとの報告がある⁴⁾。そこで表示内容を視認できる限界のコントラストを2とすれば、今回測定したCRTは概ね5000lxを越える表示面照度下では表示内容を視認できないことになる。

外光を受けるCRT表示面の外光、発光、反射光の様子を模式的

図4 表示面照度によるコントラストの変化(計算値と実測値)-CRT-

図5 コントラスト算出のためのモデル-CRT-

に表したものが図5であり、(2)式で与えられるCRTのコントラスト C_{CRT} は(4)式のように表される。

$$C_{CRT} = (L_{hc} + L_{rc}) / (L_{lc} + L_{rc}) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 L_{hc} はCRTの発光輝度、 L_{lc} はCRTの暗地発光輝度、 L_{rc} は外光によりCRT表示面で生じる反射輝度である。

また、本実験においては、(3)式における鏡面反射輝度は0と考えることができるので、外光の反射輝度 L_{rc} は(5)式のように表される。

$$L_{rc} = \rho_{dc} \times E / \pi$$

$$= (R_f + k_c \times (TM)^2) \times E / \pi \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 ρ_{dc} はCRTの拡散反射率、 R_f はパネルガラスの表面反射率、 k_c は蛍光面の構造による反射係数、 TM はパネルガラスの透過率である。

表2に示した白色輝度 L_{hc} は、発光輝度 $L_{hc} = 140 \text{ cd/m}^2$ と外光により生じた反射輝度 L_{rc} の和であり、 L_{rc} が(5)式で与えられるので拡散反射率 ρ_{dc} は $\rho_{dc} = (L_{hc} - 140) \times \pi / E$ で算定することができる。このようにして測定結果から推定した ρ_{dc} を表2に示してあ

るが、これよりここで用いた CRT の ρ_{dc} はほぼ 0.1 であることがわかる。CRT に強い外光があたっても表示内容が認識可能なコントラストを得るには、拡散反射率 ρ_{dc} を小さくして L_{rc} を小さくすればよいことが (4)、(5) 式より明らかであり、そのためには R_t 、 k_c 、 TM を小さくすればよいことがわかる。しかし、これらのパラメータは CRT の構造に強く依存するので、単純に小さくするのは難しいのが現状である。

(b) LCD の場合

CRT の場合と同様にして、LCD の発光輝度を $140\text{cd}/\text{m}^2$ に固定して、外光による表示面照度を変化させた場合の白色及び黒色輝度の測定値と、それから求めたコントラストを示したものが表 3 である。また、この結果を表示面照度とコントラストの関係として示したのが図 6 であり、測定値を○印で示してある。これより表示面照度 100l x の時のコントラストは 19、 1000l x の時 17、 10000l x の時 8 で、低照度下でのコントラストは CRT に劣るものの、CRT のように急激に低下しないことがわかる。そこで、コントラストが 2 以上あれば表示内容を視認できるとすれば、LCD は 5000l x を越える高照度下でも表示内容を認識できることになる。

LCD 表示面の外光、発光、反射光の様子を模式的に表したものが図 7 であり、CRT の場合と同様に LCD のコントラスト C_{LCD} は (6) 式のように表される。

$$C_{LCD} = (L_{hl} + L_{rl}) / (L_{ll} + L_{rl}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 L_{hl} は LCD の発光輝度、 L_{ll} は LCD の暗地発光輝度、 L_{rl} は外光により LCD の表示面に生じる反射輝度である。また、

$$L_{rl} = \rho_{dl} \times E / \pi \quad \dots\dots\dots (7)$$

である。ここで、 ρ_{dl} は LCD の拡散反射率である。

表 3 LCD の表示輝度とコントラスト

表示面照度 (l x)	白色輝度 (cd/m^2)	黒色輝度 (cd/m^2)	コントラスト	ρ_{dl}
100	141	7.3	19	—
300	140	7.5	19	—
1000	141	8.5	17	—
5000	144	12	12	0.0025
10000	151	19	8	0.0035
50000	189	55	3	0.003

図 6 表示面照度によるコントラストの変化 (計算値と実測値) —LCD—

図 7 コントラスト算出のためのモデル—LCD—

外光が存在しないときの白色輝度 L_{hl} が $140\text{cd}/\text{m}^2$ 、黒色輝度 L_{ll} が $7\text{cd}/\text{m}^2$ であるので、これらの値を用いて (6)、(7) 式から推定した ρ_{dc} の値を表 3 に示してある。 5000l x 以上の高照度下で LCD の拡散反射率 ρ_{dl} を算定すると、CRT の約 $1/30$ の値 0.003 であることがわかる。これは CRT に比べ LCD が外光によるウォッシュアウトが少なく、表示輝度 $140\text{cd}/\text{m}^2$ で 5000l x を越える高照度下でも視認に必要な 2 以上のコントラストが得られる理由である。

なお、 1000l x 以下の低照度下では、外光による反射輝度が LCD の発光輝度に比べ極端に小さいため、正確な拡散反射率を算定できない。

照度に対するコントラスト変化を、拡散反射率 ρ_{dl} を変えて計算した結果を図 8 に示す。 ρ_{dl} を小さくできれば、高照度下でのコントラスト低下をより少なくできることがわかった。

図 8 表示面照度によるコントラストの変化 (拡散反射率による変化) —LCD—

今回測定に用いた TFT-LCD は図 7 に示すように液晶パネル、拡散板、バックライトで構成してある。そこで、バックライトを外した状態、液晶パネル単体の状態各々について、LCD の拡散反射率を図 3 に示した方法で求めた。さらに、カラーフィルタを形成してあるガラス基板については液晶パネルを作製する前の単体部品で拡散反射率を求めた。

表 4 拡散反射率測定結果(TFT-LCD)

項 目	拡散反射率
モジュール ¹⁾	0.0033
液晶パネル ²⁾ +拡散板	0.0027
液晶パネル ²⁾	0.0026
カラーフィルタ ³⁾	0.0022

- 1) 液晶パネル、拡散板、バックライト
2) 偏光板 2 枚を含む
3) 偏光板 1 枚を含む

測定結果から算定した拡散反射率を示したのが表 4 である。液晶パネルの反射率は LCD モジュール全体の 80% 程度であり、また、液晶パネルの反射率はカラーフィルタの部分でほぼ決まることがわかった。これは、液晶パネルの透過率が数%程度と低いため、拡散板やバックライトに到達して反射する光が、カラーフィルタ部で反射する光に比べ少ないためと思われる。

通常、カラーフィルタは、図 7 に示したように、画素単位で赤、緑、青に着色した透光部とその周辺を覆う遮光部とで構成されており、その着色透光部はゼラチン染色や顔料分散法で形成されている。一方、遮光部は黒染色ゼラチンやクロム (Cr) により形成される。今回用いた LCD の遮光部の材料は、クロムであったが、これを拡散反射率の低い黒染色ゼラチンにすれば、カラーフィルタ全体の反射率を小さくすることができ、ひいては LCD 表示面全体の拡散反射率を低下させることが可能となるので、強い外光下での LCD の視認性の向上を図ることができる。実測結果によれば黒染色ゼラチンの反射率はクロムの約 1/3 であり、遮光部でカラーフィルタの拡散反射率がほぼ決まるとすると、 ρ_{d1} が 0.001 程度になり、図 8 に示したように、外光の照射によって引き起こされるコントラストの低下がより緩和され、100000lx を越える外光下でも視認できる LCD が得られる可能性のあることがわかる。

以上の結果から、カラーフィルタ部の反射率を小さくすることが、強い外光下でもコントラストの低下が小さく、良好な視認性を有する LCD の開発の要点であることが明らかとなった。

5.2 外光による色度の変化

VDT の表示面照度が外光により様々に変化する条件下で、3 原色の色度を測定した。その結果を示したものが図 9、10 であり、図 9 は CRT、図 10 は LCD についてのものである。これらの図から、3 原色の色度点を結ぶ三角形の面積 (色域) は、低照度下では CRT の方が広いことがわかる。これは CRT が今回試作した LCD に比べ、暗地発光輝度が低いためである。また、いずれの場合も表示面照度の増加に伴い色域が狭くなり、色合いがあせることがわかる。この色あせの程度を量的に把握するために、表示面照度が 100lx の時の CRT の 3 原色の色度点によって色度図上に描かれる三角形の面積を 1 とし、他の条件における同様の三角形の面積を比率で表示することにした。図 11 は表示面照度と色域の関係を、CRT と LCD のそれぞれについて示したものである。

図 9 表示面照度による色度範囲の変化—CRT—

図 10 表示面照度による色度範囲の変化—LCD—

これより、表示面照度の増大に伴う色のあせかたは CRT の方が大きく、照度が 700lx を越えると LCD の方が色再現範囲が広がることがわかる。

5.3 屋外、高照度下における VDT に要求される表示輝度

近年、VDT はワープロなど室内で用いられるだけでなく、自動車、航空機搭載用の情報システム端末表示など屋外で用いられるものも多くなっており、その表示面照度が非常に高い状況での使用が増大してきている。例えば、晴天時の自動車室内の表示面照度は 5000lx に達し、また、航空機コックピット内は 100000lx の表示面照度を想定する必要がある⁹⁾とされている。そこで、これまでに述べてきた CRT と LCD の表示面照度と表示輝度についての測定結果に基づいて、画面情報の視認に必要な最低コントラストを 2 と仮定して、それを確保する上で必要な表示輝度の算定を試みることにした。すなわち、(2) 式において $C = 2$ としてそれを

図11 表示面照度による色度図上の相対面積の変化

変形すると、VDTの白色の所要表示輝度 L_n が次式で与えられることになる。

$$L_n = 2 \times (L_r + L_l) - L_r \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで反射輝度 L_r は、上述したように VDT 表示面の拡散反射率 ρ_d と表示面照度 E によって支配されるものであり、その拡散反射率が CRT で 0.1、LCD で 0.003 であるとの結果が得られたので、それらの数値を用いて種々の表示面照度に対する L_n を算定した結果をまとめたものが表 5 である。これより表示面照度が 5000 lx の時、CRT では 160 cd/m²、LCD では 20 cd/m²、表示面照度が 100000 lx の時 CRT では 3200 cd/m²、LCD では 120 cd/m² 程度の表示輝度を実現する必要があることがわかる。

いずれにしても、LCD、CRT とも外光が強いほど、高い表示輝度を必要とするが、LCD は CRT に比べはるかに低い表示輝度で表示内容を認識できることがわかる。

以上の結果で明らかなように、LCD は暗い場所での使用から 100000 lx の外光が表示面にあたる場所での使用まで、外光の強さが大きく変化する屋外での使用に適した VDT と言える。

5. む す び

VDT に用いる CRT と LCD の、外光が表示面にあたったときの視認性の変化を比較検討した。LCD は表示輝度が 120 cd/m² 程度あれば、表示面照度が 100000 lx にもなる強い外光のあたる環境下でも表示内容を視認できる。一方、CRT は表示輝度が 3200 cd/m² 程度でないと認識できないこと、また、表示色のあせ方も大きいことなどから、LCD が CRT に比べ外光が表示面にあたったときの視認性変化の小さい VDT であることが明確となった。

さらに、LCD の外光による視認性の変化は、カラーフィルタを構成する遮光部の影響が大きく、遮光部の材質をクロムから拡散反射率の小さい黒染色ゼラチンにすれば、LCD の外光に対するコントラスト変化をより一層改善できる可能性のあることを明らかにした。

また、CRT に比べ LCD の方が外光による表示色のあせ方が少なく、10000 lx の照度下でもマルチカラー表示の識別は可能である。しかし、今回測定に使用した光源は色温度が約 6000 K で白色に近く、夕日や電灯等を想定した色温度の低い条件下での色のあせ方についてはさらに検討が必要である。

表 5 VDT の所要表示輝度

表示面照度 (lx)	CRT (cd/m ²)	TFT-LCD (cd/m ²)
1000	32	15
5000	159	19
10000	318	25
50000	1591	67
100000	3183	119

今回は CRT や LCD の外光に対する視認性を拡散反射に限定して検討した。しかし、VDT を実際に使用する場合には鏡面反射の影響⁶⁾も無視することはできないので、これについては今後の検討課題の一つである。

最後に、以上の報告内容から明らかなように、外光条件の悪い屋外では CRT に代わり、LCD が視認性の優れた VDT として普及していくものと思われる。

参 考 文 献

- 1) JIS X6041-1987
- 2) 平林他：National Technical Report, 28(1), 94(1982)
- 3) 宮原他：テレビジョン学会誌, 40(11), 1106(1986)
- 4) 山中他：電子通信学会研究会資料, ED85-25(1985)
- 5) 近藤他：東芝レビュー, 44(9), 761(1989)
- 6) 窪田：平成 4 年度照明学会全国大会, 93(1992)

(受付 1992 年 8 月 20 日 / 採録 1993 年 1 月 20 日)

まつかわ ふみお
松川 文雄君 (正会員)

昭和 23 年 11 月 26 日生まれ。昭和 48 年 3 月電気通信大学大学院電気通信学研究科通信材料工学修士課程終了。同年 4 月三菱電機㈱に入社。現在、同社材料デバイス研究所表示・電子デバイス開発部で液晶表示デバイスの開発に従事。応用物理学会所属。

おおうち ひろゆき
大内田裕史君 (非会員)

昭和 37 年 10 月 20 日生まれ。昭和 62 年 3 月富山大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程終了。同年 4 月三菱電機㈱に入社。現在、同社材料デバイス研究所表示・電子デバイス開発部で液晶表示デバイスの開発に従事。電子情報通信学会所属。

ふのした まさひろ
布下 正宏君 (非会員)

昭和 17 年 4 月 21 日生まれ。昭和 42 年 3 月大阪大学大学院基礎工学研究科物理系電気工学専攻修士課程終了。同年 4 月三菱電機㈱に入社。同社京都製作所、中央研究所、本社開発部を経て、現在材料デバイス研究所表示・電子デバイス開発部長として液晶表示デバイス、超 LSI 等の開発を推進中。電子情報通信学会、応用物理学会所属。