ビジコンの容量性残像の計算

東芝総合研究所 電子部品研究所 吉 田 興 夫
木 内 雄 二

ビジコン形撮像管の特性が向上し、放送用にも使用されるようになったが、暗い光景の撮像では残像がいまだに問題となっている。この問題の解決、検討のため残像を定量化すべく、数式計算を行なった。ターゲット表面電位とターゲット電流を指数関数表示として計算を簡単にし、容量性残像を数式による解析的な方法と図式解法とによって求めた。さらに、光導電性の遅れを考慮した総合残像についても計算した。計算の過程および結果から、ビジコンの動作中の表面電位、容量性残像に伴う信号の立上りおよび減衰の状態、さらにターゲットパラメータが与えられた場合の残像の最短限界などが明らかになった。

1. ま え が き

近年、高性能のビジコン形撮像管の出現により、この種の撮像管の欠点とされていた残像がかなり改善され、工業用ばかりでなく放送用として盛んに使用されるようになってきた。しかしながら、暗い光景を撮像する場合などには、まだ残像特性が不十分で、実際にカラー放送などで問題となることがある。

ビジコンには開発当時から残像の問題がつきまとい、それに関する文献も多く発表されているが^{1)~8)}、ここではビーム走査を考慮した容量性残像の基本式を求めた。また、実際には減衰より立上りによる残像が目立つような場合もあるので、立上りと減衰の両方の残像を求め、比較を行なった。

容量性残像は、解析的な方法と図式解法によって求めることができるが、特に図式解法は直観的に残像を知ることができる利点がある。さらに、この容量性残像の計算の中に、光導電性の遅れを適当な時間の関数として組み込むことにより、総合した残像を求めることも試みた。

2. ビジコンの等価回路

ビジコンの容量性残像の基本的な考え方や取扱い方はすでに周知のことであるが、この容量性残像には、図1に示されたビジコンの等価回路のうち、ターゲット容量

図1 ビジコンの等価回路
Equivalent circuit of vidicon.

とビームインピーダンスが大切な要素となる。

ビームインピーダンスをきめる低速度電子ビームのターゲットへのランディング特性は、普通、次のような実験式で表わされている¹⁾ほか。

$$\left. \begin{aligned} i_b &= I_b \exp(\alpha v) & v < 0 \\ i_b &= I_b & v \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、 i_b はターゲットの1画素にランディングする電流、 I_b はその最大電流 (ビーム電流)、 v はターゲットの表面電位、 α は実験で求められる定数で、3~4である¹⁾⁹⁾。

ここでは、さらに実験結果に近い式として、次のような式も使用した。

$$i_b = I_b \frac{1}{1 + \exp(-\alpha v)} \quad (2)$$

図2に(1)式および(2)式の曲線が、実際のランディング特性の一例と比較して示してある。両式とも残像に最も大きく $v < -1V$ の領域では、ほぼ等しくなるので、

"Calculations of Discharge Lag in Vidicon" by Okio Yoshida and Yuji Kiuchi (Electron Devices Laboratory, Toshiba Research and Development Center, Kawasaki)

図2 ビームランディング特性
Beam landing characteristics.

(1)式を使ったほうが計算が楽になる。 v が大きくなると i_b が I_b に近くなると、(1)式は計算につなぎが出てくるうえ、実際とも離れるので、(2)式を使ったほうが便利である。

3. 定常状態のターゲット表面電位とターゲット電流

定常状態におけるビジコンターゲットの1画素の表面電位は、ビームが当たると下降して v_s' に達し、ビームが当たらない間は上昇して v_s に達するものとする。この様子は図3で示される。図中 T_e は、単位画素にビームが当たっている単位画素時間、 T_f は1フィールド期間を示す。 T_e は T_f にくらべて非常に小さいので、以下の計算ではビームが当たっていない時間は T_f とする。また、飛越し走査を考えないことにする。これは実際のビジコンの動作ではかなり走査線の重なりがあり、むしろ飛越し走査を考えないほうが実際に即していると考えられるためである。

ターゲットの1画素の表面電荷 q の時間変化は、

$$\frac{dq}{dt} = -i_b + i_i \quad (3)$$

で表わされる。ここで i_i はターゲット中を流れている

図3 ターゲット表面電位の変化(定常状態)
Variation of potential of target surface. (steady state)

導電電流を示す。

ターゲットの1画素の等価回路を図1のように c 、 r の並列回路で表わすと、 $q=cv$ により、

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{i_b}{c} + \frac{i_i}{c} \quad (4)$$

と変形される。ここで v はターゲット表面電位、 c は単位画素の静電容量である。この(4)式と図3の関連を次のように定める。つまり、ビームが当たっていない時間は(4)式の i_b の項は0として、 i_i の項だけで計算し、ビームが当たっている時間は i_i による寄与が T_f 期間の寄与にくらべて無視できるとして i_b の項だけで計算する。

以下、ビーム電流のランディング特性を $I_b \exp(av)$ で近似した場合と、 $I_b/[1+\exp(-av)]$ で近似した場合について、表面電位の変化を調べる。

3.1 $i_b = I_b \exp(av)$ による計算

(1)式は $v=0$ で折れ曲がるので計算には不向きであり、以下のように $v=0$ の場合にも指数関数的に変化すると計算を行なう。すなわち、すべての v に対して、

$$i_b = I_b \exp(av) \quad (5)$$

これを(4)式に代入して、

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{I_b}{c} \exp(av) + \frac{i_i}{c} \quad (6)$$

が得られる。

ビームが画素に当たった場合の表面電位の時間変化は、 i_i の項を省略し、

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{I_b}{c} \exp(av) \quad (7)$$

として $t=t_0$ のとき $v=v_s$ の初期条件で解くと、

$$\exp(-av) - \exp(-av_s) = \frac{aI_b(t-t_0)}{c} \quad (8)$$

となる。(8)式は走査時の表面電位を示す一般式で、表面電位を指数関数で表示すると、時間に対して直線的な関係にあることを示している。

さらに、(8)式で $t_0=0$ 、 $v_s=0$ とおけば、

$$\exp(-av) - 1 = \frac{aI_b t}{c} \quad (8')$$

となり、任意の初期電圧に対する表面電位の時間変化を示す便利な式が得られる。

$t=t_0$ 、 $v=v_s$ でビームが当り始め $t=t_0+T_e$ 、 $v=v_s'$ に降下する図3の状態を(8')式に代入して、それぞれの差をとると、

$$\exp(-av_s) - \exp(-av_s') = -\frac{aI_b T_e}{c} \quad (9)$$

が得られる。

C をラスタ全面の静電容量とすると、 $T_e/c \equiv T_f/C$

により,

$$\exp(-av_s) - \exp(-av_s') = -\frac{aI_b T_f}{C} \quad (10)$$

となり, $aI_b T_f/C$ を B とすると,

$$\exp(-av_s) - \exp(-av_s') = -B \quad (11)$$

となる. 表面電位の最高値 v_s と最低値 v_s' とを指数関数で表示すると, その差は常に一定の B で示されることを(11)式は意味する.

ターゲットの容量やビーム電流または単位画素時間が変化したときは, この B の値を変えて計算すればよい. B をビームによる電位降下係数と呼ぶ.

残像の計算には(11)式よりも,

$$\exp(av_s') = \frac{1}{B + \exp(-av_s)} \quad (12)$$

の形が便利である.

一方, ビームの当たっていない時間の単位画素の電位上昇は(6)式の I_b を0として,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i_t}{c} \quad (13)$$

定常状態では表面電位は T_f 期間中に v_s' から v_s まで上昇するから, 上式により,

$$v_s - v_s' = \frac{i_t T_f}{c} \quad (14)$$

となる. ラスター全面でターゲット中を流れる電流を I_t とすると, $i_t/c \equiv I_t/C$ により,

$$v_s - v_s' = \frac{I_t T_f}{C} \quad (15)$$

となる. 両辺を a 倍して, $\exp$ をとり, 指数関数表示にすると,

$$\exp(av_s) \cdot \exp(-av_s') = \frac{1}{E_t} \quad (16)$$

$$\text{ここで } E_t = \exp\left(-\frac{aI_t T_f}{C}\right)$$

が得られる.

残像の計算には次式の,

$$\exp(av_s) = \frac{1}{E_t} \exp(av_s') \quad (17)$$

の形が便利である. この(17)式はターゲット電流が与えられている場合に, 表面電位の最低点から次のビーム走査時の表面電位の最高値を知るのに使える.

(11)式と(16)式または(12)式と(17)式から $\exp(av_s)$ と $\exp(av_s')$ を B と E_t で表わすと,

$$\exp(av_s) = \frac{1 - E_t}{BE_t} \quad (18)$$

$$\exp(av_s') = \frac{1 - E_t}{B} \quad (19)$$

が得られる.

したがって,

$$v_s = \frac{1}{a} \ln \frac{1 - E_t}{BE_t} \quad (20)$$

$$v_s' = \frac{1}{a} \ln \frac{1 - E_t}{B} \quad (21)$$

$$\text{ただし } E_t = \exp\left(-\frac{aI_t T_f}{C}\right), B = \frac{aI_b T_f}{C}$$

により, ターゲットの静電容量, ビーム電流, ターゲット電流が与えられたときのターゲット表面電位の最高値 v_s と最低値 v_s' がきめられる.

逆に I_t について解くと,

$$I_t = \frac{C}{aT_f} \ln \{B \exp(av_s) + 1\} \quad (22)$$

$$I_t = \frac{C}{aT_f} \ln \frac{1}{1 - B \exp(av_s')} \quad (22')$$

$$I_t = \frac{C}{aT_f} \ln \{\exp(av_s) \cdot \exp(-av_s')\} \quad (22'')$$

が得られる. これらの式は, 表面電位の最高値, 最低値あるいは両者がわかっているときにターゲット電流を計算するのに使用でき, 次節の残像の計算に特に役立つ. 特に(22)式は有用である. また(22'')式は(16)式からも直接に得られる.

3.2 $i_b = I_b / \{1 + \exp(-av)\}$ による計算

(2)式により前節と同様な式の誘導を行なう.

ビームが単位画素に当たっている間の電位降下は,

$$\exp(-av) - av - 1 = \frac{aI_b t}{c} \quad (23)$$

となり, T_f の間に v_s から v_s' に降下したとして,

$$\exp(-av_s) - \exp(-av_s') - a(v_s - v_s') = -B \quad (24)$$

が得られる.

一方, ビームが当たっていない間の電位の上昇は, 前節の(15), (16)式がそのまま使える.

これらの式から,

$$\exp(av_s) = \frac{1 - E_t}{(B + \ln E_t) E_t} \quad (25)$$

$$\exp(av_s') = \frac{1 - E_t}{B + \ln E_t} \quad (26)$$

が得られる. したがって,

$$v_s = \frac{1}{a} \ln \frac{1 - E_t}{(B + \ln E_t) E_t} \quad (27)$$

$$v_s' = \frac{1}{a} \ln \frac{1 - E_t}{B + \ln E_t} \quad (28)$$

によりターゲット電流と表面電位の関係が得られる.

前節の計算式と比較すると, B に $\ln E_t$ の補正項が加わっており, $I_t = I_b$ で v_s, v_s' とともに無限大に近づく点がより実際の動作に合っている.

図 4 ターゲット表面電位 ($C=3,000 \text{ pF}$, $I_b=2 \mu\text{A}$, $T_f=1/60 \text{ sec}$, $a=3$ の場合)
Target current versus potential of target surface.
(SB stands for scanning beam and FB stands for flood beam) ($C=3,000 \text{ pF}$, $I_b=2 \mu\text{A}$, $T_f=1/60 \text{ sec}$, $a=3$)

図 4 にはターゲット電流を変数にとった各種の計算法による表面電位が示してある。細い実線はビームの特性を $I_b \exp(av)$ とした場合、細い点線はビームの特性を $I_b / \{1 + \exp(-av)\}$ とした場合で、 $I_b=2 \mu\text{A}$, $C=3,000 \text{ pF}$, $a=3$, $T_f=1/60 \text{ sec}$ の例である。むろん上側の線が最高電位 v_s 、下側の線が最低電位 v_s' を示す。

2 種類の計算は、ターゲット電流 I_t がビーム電流 I_b の 10 分の 1 以下であればほとんど一致し、2 分の 1 になっても 20% 以下の誤差である。したがって、普通の動作状態では、ビーム電流はターゲット電流の少なくとも 2 倍以上になっていると考えられるので、ビームの特性を $I_b \exp(av)$ とした近似計算で充分間に合う (付録参照)。

参考のため図 4 にはフラッドビームによる平衡電位も太線で示してある¹⁾。太い実線はビームの特性を $I_b \exp(av)$ 、太い点線は $I_b / \{1 + \exp(-av)\}$ のときである。

4. 過渡状態のターゲット表面電位とターゲット電流

前節では、定常状態の表面電位とターゲット電流の関係を求め、表面電位曲線として表わしたが、光照射時や光遮断時における過渡状態の表面電位とターゲット電流の関係が求まれば、立上り時や減衰時の残像がわかる。

ビームランディング特性を (5) 式のように $I_b \exp(av)$ として、(12) 式と (17) 式を繰り返し使用することにより容量性の残像の計算に必要な各フィールドの出力電流が次のように得られる。特に、この両式を使うと、減衰時と立上り時とを区別して計算する必要がない。

最初の定常状態でターゲット電流 I_a が流れていて、過渡状態後の最終の定常状態ではターゲット電流 I_z が

流れているとする。暗時のターゲット電流を I_a 、光照射によって生ずる信号分のターゲット電流を I_p とすると、立上り時については $I_a=I_a$, $I_z=I_a+I_p$ 、減衰時については $I_a=I_a+I_p$, $I_z=I_a$ となる。ここで I_a と I_z を指数関数表示になおして、

$$E_a = \exp\left(-\frac{aI_a T_f}{C}\right)$$

$$E_z = \exp\left(-\frac{aI_z T_f}{C}\right)$$

とおく。

最初の定常状態を 0 フィールドとして (18) 式と (19) 式により、

$$\exp(av_0) = \frac{1-E_a}{BE_a} \quad (29)$$

$$\exp(av_0') = \frac{1-E_a}{B} \quad (30)$$

が得られる。

さて、図 5 に示すように、表面電位が v_0' になったときに、光遮断または光照射によりターゲット中を流れる電流が I_a から I_z に急に变化したとする。図 5 (a) は光照射による立上り時の表面電位の変化を示し、図 5 (b) は光遮断による減衰時の表面電位の変化を示す。

次の第 1 フィールド時の表面電位の最高値 v_1 は (17) 式から、 $E_z=E_z$ として、

$$\exp(av_1) = \frac{1}{E_z} \exp(av_0') = \frac{1-E_a}{BE_z} \quad (31)$$

図 5 ターゲット表面電位の変化 ((a) 立上り, (b) 減衰)
Variation of potential of target surface. (transient)

となり、ビーム走査を受けた最低値 v_1' は、(12)式から

$$\exp(av_1') = \frac{1}{B + \exp(-av_1)} = \frac{1 - E_a}{B(1 + E_z - E_a)} \quad (32)$$

となる。

第2フィールドについては、

$$\exp(av_2) = \frac{1}{E_z} \exp(av_1') = \frac{1 - E_a}{BE_z(1 + E_z - E_a)} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \exp(av_2') &= \frac{1}{B + \exp(-av_2)} \\ &= \frac{1 - E_a}{B(1 + E_z + E_z^2 - E_a - E_a E_z)} \end{aligned} \quad (34)$$

となる。この操作を繰り返して行なうと、 n フィールドでは、

$$\exp(av_n) = \frac{(1 - E_a)(1 - E_z)}{BE_z\{1 - E_z^n - E_a(1 - E_z^{n-1})\}} \quad (35)$$

$$\exp(av_n') = \frac{(1 - E_a)(1 - E_z)}{B\{1 - E_z^{n+1} - E_a(1 - E_z^n)\}} \quad (36)$$

が得られる。これらの式は $n=0$ のとき(29)、(30)式となり、 $n=\infty$ のときは(18)、(19)式の E_i に E_z を代入したものと一致するので、過渡状態の条件を満足して

$$I_{Rn} = \frac{C}{aT_f} \ln \left[\frac{(1 - E_a)(1 - E_d E_p)}{E_d E_p \{1 - E_d^n E_p^n - E_a(1 - E_d^{n-1} E_p^{n-1})\}} + 1 \right] = \frac{C}{aT_f} \ln \frac{1 - E_d^{n+1} E_p^{n+1} - E_d(1 - E_d^n E_p^n)}{E_d E_p \{1 - E_d^n E_p^n - E_a(1 - E_d^{n-1} E_p^{n-1})\}} \quad (38)$$

となり、減衰時の各フィールドの出力電流 I_{Dn} は、

$$I_{Dn} = \frac{C}{aT_f} \ln \left[\frac{(1 - E_d E_p)(1 - E_a)}{E_d \{1 - E_d^n - E_d E_p(1 - E_d^{n-1})\}} + 1 \right] = \frac{C}{aT_f} \ln \frac{1 - E_d^{n+1} - E_d E_p(1 - E_d^n)}{E_d \{1 - E_d^n - E_d E_p(1 - E_d^{n-1})\}} \quad (39)$$

となる。

5. 容量性残像の数式表現

立上り時の遅れと、減衰時の遅れから起こる残像を区別するために、前者を立上り率、後者を減衰率と名づける。これらの立上り率と減衰率は、光が当たっているときの光電流(信号電流) I_p に対する各フィールド時の残留信号または過渡状態の信号電流の割合(%)として次のように定義する。

$$\text{立上り率 } R_n = \frac{I_{Rn} - I_d}{I_p} \times 100 (\%) \quad (40)$$

$$\text{減衰率 } D_n = \frac{I_{Dn} - I_d}{I_p} \times 100 (\%) \quad (41)$$

I_{Rn} と I_{Dn} は(38)式と(39)式で与えられ、

$$I_d = \frac{C}{aT_f} \ln \frac{1}{E_d} \quad \text{および} \quad I_p = \frac{C}{aT_f} \ln \frac{1}{E_p}$$

として、 R_n と D_n を計算すると、

$$R_n = \frac{100 \ln \frac{1 - E_d^{n+1} E_p^{n+1} - E_d(1 - E_d^n E_p^n)}{E_p \{1 - E_d^n E_p^n - E_a(1 - E_d^{n-1} E_p^{n-1})\}}}{\ln \frac{1}{E_p}} (\%) \quad (42)$$

している。

さて、表面電位とビーム走査により流れるターゲット電流には(22)式の関係があるから、(35)式の表面電位に対して流れる各フィールドの走査時の出力電流 I_n は、

$$\begin{aligned} I_n &= \frac{C}{aT_f} \ln \{B \exp(av_n) + 1\} \\ &= \frac{C}{aT_f} \ln \left[\frac{(1 - E_a)(1 - E_z)}{E_z \{1 - E_z^n - E_a(1 - E_z^{n-1})\}} + 1 \right] \\ &= \frac{C}{aT_f} \ln \frac{1 - E_z^{n+1} - E_a(1 - E_z^n)}{E_z \{1 - E_z^n - E_a(1 - E_z^{n-1})\}} \end{aligned} \quad (37)$$

によってきめられる。最後の式は、(35)式と(36)式を(22')式に代入したものと一致する。

(37)式において、立上り時の出力電流 I_{Rn} は $E_a = E_d$ 、 $E_z = E_d E_p$ 、減衰時の出力電流 I_{Dn} は $E_a = E_d E_p$ 、 $E_z = E_d$ として得られる。ただし、

$$E_d = \exp \left(-\frac{aI_d T_f}{C} \right), \quad E_p = \exp \left(-\frac{aI_p T_f}{C} \right)$$

とする。

したがって、立上り時の各フィールドの出力電流 I_{Rn} は、

$$D_n = \frac{100 \ln \frac{1 - E_d^{n+1} - E_d E_p(1 - E_d^n)}{1 - E_d^n - E_d E_p(1 - E_d^{n-1})}}{\ln \frac{1}{E_p}} (\%) \quad (43)$$

となる。

R_n は $n=0$ のとき 0%, $n=\infty$ のとき 100% となるので、立上りの条件を満足しており、 D_n は $n=0$ のとき 100%, $n=\infty$ のとき 0% となるので、減衰の条件を満足している。

ターゲット電流と、ターゲット表面電位を指数関数表示にすることにより、残像の計算式のまとまりが良くなる。この残像の式には、ビーム電流に関係するビームによる電位降下係数 B が含まれていない。通常のビコン動作でビーム電流が十分に流れて、いわゆるビームの足りている状態ならば、ビーム電流の大小によらず残像はほとんど一定である事実と一致している。

6. 過渡状態の出力電流および残像の図式解法

3章で求めた表面電位曲線から、過渡状態のターゲット

図 6 残像(立上り)の図式解法
Schematic analysis of image lag in rise.

図 7 残像(減衰)の図式解法
Schematic analysis of image lag in decay.

ト電流の変化を図的に求めることができる。その方法を示したのが図6および図7である。

図6は立上りの場合であって、それまでは光が当たっていないから、暗電流 I_d による定常状態のA点から始まる。光が当たるとターゲット電流は暗電流に光電流を加えた電流 $I_d + I_p$ となり、電位は1フィールド間に $\Delta v_d + \Delta v_p = (I_d + I_p) T_f / C$ だけ上昇する。したがって、次のフィールドではB点まで上昇する。続いてビーム走査によりB点を平行移動した点に相当するC点からD点まで降下する。さらに次のフィールドでG点まで $\Delta v_d + \Delta v_p$ だけ上昇し、ビーム走査でE点に相当するF点からG点に降下する。

このように1フィールドずつ繰り返して、最後に上昇分と降下分が $\Delta v_d + \Delta v_p$ に等しく、ビーム走査で $I_d + I_p$ のターゲット電流の得られるH点およびI点で平衡する。

したがって、ターゲット電流としては立上りの0フィールドがA点の電流値(暗電流)、第1フィールドがD点の電流値、第2フィールドがG点の電流値、最後にI点

の電流値(暗電流+光電流)となる。

図7には減衰の場合が示してあり、最初は光が当たっている、 $I_d + I_p$ による定常状態のA点およびI点で平衡している。光が遮断されると、ターゲット電流は暗電流 I_d のみとなり、続くフィールドで、電位は $\Delta v_d = I_d T_f / C$ だけ上昇してI点からウ点に移る。次のビーム走査ではウ点に相当するエ点からオ点に降下する。このような電位変化を繰り返して、最後には I_d による定常状態のケ点およびコ点に達して平衡する。

この場合のターゲット電流は、0フィールドがI点、第2フィールドがオ点……の電流値として求められる。

このようにして、過渡状態の出力電流が各フィールドごとに求められ、さらに残像としては第3フィールド目の出力信号から I_d を引いた値の I_p に対する比として求めることができる。フィールド次数が多くなるにつれて、図的に求めた出力電流は不正確になるが、第3フィールド目の残像を求める程度であれば十分に役立つ。

なお、図を直接利用して、ビーム走査により表面電位曲線の最高電位から最低電位へ下降した図上の長さをそのまま比較しても残像の程度が知られる。

7. 容量性残像の計算例

5章で得られた式によって残像を計算した例を以下に示す。

図8は、暗電流に関するパラメーター $aI_d T_f / C = \ln(1/E_d)$ を0.05とした場合、図9は10倍の0.5とした場合の立上りおよび減衰の各フィールドごとの信号の変化を示している。

これらの図から一般的傾向として、

- (1) 暗電流の大きいほうが残像は小さい。
- (2) 光電流の大きいほうが残像は小さい。
- (3) 減衰は初めあるレベルまで急激に落ちるが、それ以後の減衰は遅く、長い尾を引く。
- (4) 立上りは初め遅いが、その後比較的速く飽和

図 8 容量性残像 ($aI_d T_f / C = 0.05$)
Capacitive lag. ($aI_d T_f / C = 0.05$)

図9 容量性残像 ($aI_d T_f / C = 0.5$)
Capacitive lag. ($aI_d T_f / C = 0.5$)

図10 $aI_d T_f / C$ を変数とした容量性残像
Capacitive lag as a function of dark current.

図11 $aI_p T_f / C$ を変数とした容量性残像
Capacitive lag as a function of signal current.

値に達する。

(5) 容量の大きいものほど残像が大きい。

図10には $aI_d T_f / C$ を変数にとって、第3フィールド目の残像 R_3 (立上り) と D_3 (減衰) の変化の様子が示してある。同様に $aI_p T_f / C$ を変数にしたのが図11に示してある。一般に $aI_p T_f / C$ が1より小さくなると残像は急激に大きくなる。

8. 光導電性の遅れを考慮した総合残像の計算

これまでの過渡状態の計算では、ターゲット電流が、光照射した瞬間に I_d から $I_d + I_p$ に、光を遮断した瞬間に $I_d + I_p$ から I_d に変化するものとした。しかし、実際の光導電体では多かれ少なかれ光導電性の遅れがありこれもビジコンの残像の一原因になっている。

そこで、ここでは光導電性の遅れを指数関数的変化と仮定して、ターゲット中を流れる電流が立上り時には、

$$i_t = i_d + i_p \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\} \quad (44)$$

減衰時には、

$$i_t = i_d + i_p \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (45)$$

とする。ここで、 τ は光導電体の光電流の時定数である。

3章で計算した方法にしたがって(13)式を使うと、過渡状態の立上りの場合には、

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i_d + i_p}{c} - \frac{i_p}{c} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (46)$$

減衰の場合には、

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i_d}{c} + \frac{i_p}{c} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (46)$$

が得られる。

これらの式から、各フィールドの表面電位の最低値から次のフィールドの表面電位の最高値の差、すなわち各フィールド時間に上昇する電位差を求めると、

$$v_n - v_{n-1}' = \frac{(I_d + I_p) T_f}{C} - \frac{I_p \tau}{C} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{T_f}{\tau}\right) \right\} \exp\left\{-\frac{(n-1) T_f}{\tau}\right\} \quad \dots\dots\dots \text{(立上り)} \quad (48)$$

$$v_n - v_{n-1}' = \frac{I_d T_f}{C} + \frac{I_p \tau}{C} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{T_f}{\tau}\right) \right\} \exp\left\{-\frac{(n-1) T_f}{\tau}\right\} \quad \dots\dots\dots \text{(減衰)} \quad (49)$$

となる。両式とも $n \rightarrow \infty$ で第1項のみとなり、過渡状態の条件を満足している。

両辺を a 倍して指数関数化すると、

$$\exp(av_n) = \frac{\exp\{-I_p^* (1-E) E^{n-1}\}}{E_d E_p} \exp(av_{n-1}') \quad \dots\dots\dots \text{(立上り)} \quad (50)$$

$$\exp(av_n) = \frac{\exp\{I_p^* (1-E) E^{n-1}\}}{E_d} \exp(av_{n-1}') \quad \dots\dots\dots \text{(減衰)} \quad (51)$$

$$\text{ただし } I_p^* = \frac{a I_p \tau}{C}, \quad E = \exp\left(-\frac{T_f}{\tau}\right)$$

が得られる。

ビーム走査時は、3章と同じく(12)式が使用でき、これらの式を繰返し使用して過渡状態の表面電位が求められる。途中の計算を省略すると、

$$\exp(av_n) = \frac{(1-E_d)\exp\{-I_p^*(1-E^n)\}}{BE_dE_d^nE_p^n + B(1-E_d)\sum_{r=1}^n E_d^{n-r+1}E_p^{n-r+1}\exp\{-I_p^*(1-E^{r-1})\}} \dots\dots\dots (立上り) \quad (52)$$

$$\exp(av_n') = \frac{(1-E_dE_p)\exp\{I_p^*(1-E^n)\}}{BE_dE_pE_d^n + B(1-E_dE_p)\sum_{r=1}^n E_d^{n-r+1}\exp\{I_p^*(1-E^{r-1})\}} \dots\dots\dots (減衰) \quad (53)$$

が得られる。

ターゲット電流の(22)式から立上り時のターゲット電流 I_{Rn} と減衰時のターゲット電流 I_{Dn} は、

$$I_{Rn} = \frac{C}{aT_f} \ln \frac{E_dE_d^nE_p^n + (1-E_d)\sum_{r=1}^{n+1} E_d^{n-r+1}E_p^{n-r+1}\exp\{-I_p^*(1-E^{r-1})\}}{E_dE_d^nE_p^n + (1-E_d)\sum_{r=1}^n E_d^{n-r+1}E_p^{n-r+1}\exp\{-I_p^*(1-E^{r-1})\}} \quad (54)$$

$$I_{Dn} = \frac{C}{aT_f} \ln \frac{E_dE_pE_d^n + (1-E_dE_p)\sum_{r=1}^{n+1} E_d^{n-r+1}\exp\{I_p^*(1-E^{r-1})\}}{E_dE_pE_d^n + (1-E_dE_p)\sum_{r=1}^n E_d^{n-r+1}\exp\{I_p^*(1-E^{r-1})\}} \quad (55)$$

となる。分子、分母とも同じ形であるが、和の項数が分子のほうが1だけ多くになっている。

したがって、立上り率 R_n と減衰率 D_n は、

$$R_n = \frac{100 \ln \left\{ \frac{E_dE_d^nE_p^n + (1-E_d)\sum_{r=1}^{n+1} E_d^{n-r+1}E_p^{n-r+1}\exp\{-I_p^*(1-E^{r-1})\}}{E_dE_d^nE_p^n + (1-E_d)\sum_{r=1}^n E_d^{n-r+1}E_p^{n-r+1}\exp\{-I_p^*(1-E^{r-1})\}} \cdot E_d \right\}}{\ln \frac{1}{E_p}} \quad (\%) \quad (56)$$

$$D_n = \frac{100 \ln \left\{ \frac{E_dE_pE_d^n + (1-E_dE_p)\sum_{r=1}^{n+1} E_d^{n-r+1}\exp\{I_p^*(1-E^{r-1})\}}{E_dE_pE_d^n + (1-E_dE_p)\sum_{r=1}^n E_d^{n-r+1}\exp\{I_p^*(1-E^{r-1})\}} \cdot E_d \right\}}{\ln \frac{1}{E_p}} \quad (\%) \quad (57)$$

となる。

図 12 光導電性の遅れを考慮した残像 ($aI_dT_f/C=0.5$)
太線はターゲットの光応答の遅れ、すなわちターゲットを流れる光導電電流の時間変化を示す。
Total image lag with capacitive lag and photoconductive lag. ($aI_dT_f/C=0.5$) (Curved line is photoconductive response of target)

図 12 には光導電性の遅れを考慮した総合残像の計算の一例として $\tau=T_f$ の場合につき、 aI_pT_f/C をパラメーターとし、 aI_dT_f/C を 0.5 としたときの残像の様子

図 13 T_f/τ を変数とした残像 ($aI_dT_f/C=0.1$)
Total image lag as a function of T_f/τ . ($aI_dT_f/C=0.1$)

を示してある。図中の太線はターゲットの光導電体の光導電電流の時間変化を示し、(44)式と(45)式で $\tau=T_f$ とした場合である。また図13には $aI_p T_f/C$ をパラメータにとり、 T_f/τ を変数とした第3フィールド目の残像が示してある。図9と図12から、光導電性の遅れの残像に対する影響がよくわかる。また図13からは、 T_f/τ が小さいところでは光導電性残像がほとんどであるが、 T_f/τ が大きくなると、容量性残像の本来の値となることがわかる。光導電性の遅れが問題になるのは、だいたい T_f/τ が1以下のところである。

9. む す び

ビジコンの容量性残像の計算方法、光導電性残像を考慮した総合残像の計算方法およびその結果を述べた。特に表面電位曲線は、ビジコンの動作を考えるうえに便利で、いろいろの面で応用できる。また、この結果から、ビジコンのターゲットの設計上のパラメータを知ることができる他、そのパラメータに対するビジコンの到達しうる残像の限界がわかるので、実際のビジコンの残像がどの程度までいっているかを知ることができる。

さらに、与えられたビジコンを、できるだけ残像を少なくして使用するには、この結果を利用し、ターゲット電流を多く流すことが望ましい。そのために入射光量を増して光電流を多くとり、一方、たとえば、バイアス光照射などにより、暗電流もできるだけ多くしたほうが良い¹⁰⁾。むしろ、その他の特性が悪くなることもありうるので、目的によって限度があることはいうまでもない。また、ビームが画素に当たっている単位時間を長くし、等価的に静電容量を減らす意味で、解像度の限界内でラス

ターを小さくするほうが有利である。

(昭和44年7月7日受付)

【参 考 文 献】

- 1) 木内: ビジコンの残像, テレビ誌, **11**, 8 (1957) 340
- 2) R.W. Redington: The Transient Response of Photoconductive Camera Tube Employing Low-Velocity Scanning, Trans. IRE, **ED-4**, 3 (1957) 220
- 3) B. Meltzer and P. L. Holms: Beam temperature, discharge lag and target biasing in some television pick-up tubes, Brit. J. Appl. Phys., **6**, 4 (1958) 139
- 4) 西田: ビジコンの動作と設計, テレビ誌, **16**, 2 (1962) 82
- 5) H.S. Sommers, Jr.: Response of Photoconducting Imaging Devices with Floating Electrodes, J. Appl. Phys., **34**, 10 (1963) 2923
- 6) 後藤: 1½インチビジコンの残像特性, テレビ誌, **18**, 3 (1964) 139
- 7) 芦川: ビジコンの動作機構について, テレビ用電子管委資236号 (1964)
- 8) L.V. van de Polder: Target-Stabilization Effects in Television Pick-Up Tubes, Philips Res. Rep., **22**, 2 (1967) 178
- 9) 木内, 田中: 低速度電子ビームの速度分散, 昭33年信学全大予, 176
- 10) 木内, 清水: CdSe ビジコンの残像の実験, 第3回テレビ全大予, 2-7 (1967)

<付 録>

ビームランディング特性を $i_b = I_b / \{1 + \exp(-av)\}$ とした場合には、4章のように残像をうまく数式表現することはむずかしい。減衰時については、表面電位曲線の性質を利用すると、略式の計算が可能になる。

0フィールドのターゲット電流がビーム電流の最大値 I_b より幾分小さければ、表面電位の最低値は0V以下となる。さらに暗電流が小さければ、次の第1フィールドの表面電位の最高値は0V以下にとどまる。この範囲ではビームランディング特性は $i_b = I_b \exp(av)$ で非常に良く近似できる。

したがって、0フィールドのみ $I_b / \{1 + \exp(-av)\}$ で表現し、第1フィールドからは $I_b \exp(av)$ で計算しても良い。この計算の結果は、0フィールドについては、

$$I_0 = \frac{C}{aT_f} \ln \frac{B + E_d E_p \ln E_d E_p}{(B + \ln E_d E_p) E_d E_p} \quad (\text{付} \cdot 1)$$

1フィールド以後については、

$$I_n = \frac{C}{aT_f} \ln \frac{B\{1 - E_d^{n+1} - E_d E_p (1 - E_d^n)\} + E_d^n (1 - E_d) \ln E_d E_p}{E_d \{B\{1 - E_d^n - E_d E_p (1 - E_d^{n-1})\} + E_d^{n-1} (1 - E_d) \ln E_d E_p\}} \quad \text{for } n \geq 1 \quad (\text{付} \cdot 2)$$

となる。

したがって減衰率 D_n は、

$$D_n = \frac{100 \ln \frac{B\{1 - E_d^{n+1} - E_d E_p (1 - E_d^n)\} + E_d^n (1 - E_d) \ln E_d E_p}{B\{1 - E_d^n - E_d E_p (1 - E_d^{n-1})\} + E_d^{n-1} (1 - E_d) \ln E_d E_p}}{\ln \frac{1}{E_p}} \quad (\%) \text{ for } n \geq 1 \quad (\text{付} \cdot 3)$$

と表現される。