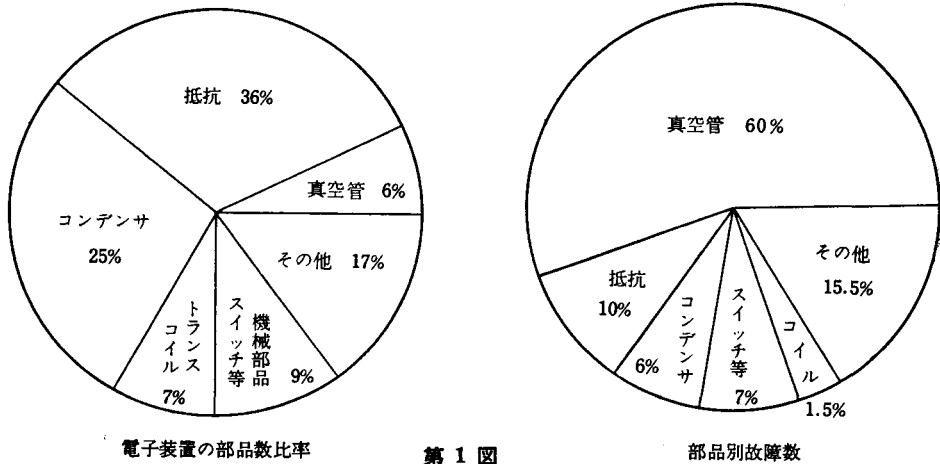


真空管の保守とそのコスト

斎藤嘉博*

§1. はじめに

最近十数年の間に見られた電子装置の発達は極めて著しく、その構成と機能とは高度に複雑化してきた。カラー TV の出現によって、TV の放送に用いられる部品の総数が白黒 TV の場合の一躍数倍に増加した事等はそのよい例であろう。このため故障数の上昇は勿論、システムの中の一つの故障が他に及ぼす影響は極めて大きいものになってきた。一方現場でそれ等機器の保守や整備にたずさわる人々の能力は必ずしも機器の進歩に追随し得ない。このような状況の下で近年装置の信頼性に関する論議が盛んになってきたのは当然のことといえよう。ある機械の信頼度はそれ等を構成する部品個々の信頼度や、設計の際決定されるそれ等部品の使用条件に負う所が大きいことはいうまでもない、またそれ等の装置をどのように保守してゆくかという点を除いては論ずることができない。機械の保守に無制限の費用を注げばその信頼度はいくらかでも 100% に近づけることができようが、全体のシステムを最少の費用で運転しようとするのは当然のことであろう。ここに保守の方法とそのコストに関する問題が生じてくる。



電子装置の部品数比率

第 1 図

部品別故障数

今とくに TV 放送関係に使用されているいくつかの機器を取上げて部品別の使用頻度とそれ等の故障比率を検討してみるとおよそ第 1 図の如くなる。これによれば故障の 60% 以上は真空管によって占められ、その使用頻度をも併せて考えればそれが如何に電子装置に対して弱点となっているかに気付くであろう。しかし一方受信管の不良によって放送中に惹起された事故は案外ともいえる程少数であって、これはその保守に多くの経費と努力とが支払われているからにほ

* NHK 技術研究所 昭和 35 年 4 月 23 日、日本 OR 学会第 7 回研究発表会にて、また同年 11 月 6 日 第 8 回研究発表会にて講演 昭和 35 年 11 月 14 日受理

かならない。そしてそれ等経費と努力との集積は全国で尨大なものになるであろう。このような観点から本文ではその焦点を電子装置の中、とくに真空管に向けてその寿命分布を調べ、保守方法とコストとの聯関性について明かにしようとするものである。

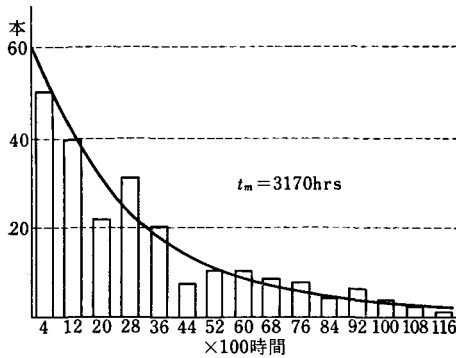
なお OR では更新問題、在庫問題等この種類のものが多いが本問題はそれ等の一例題となる。

§2. 受信管の寿命分布

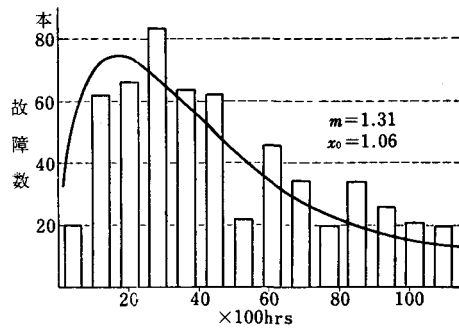
受信管の故障は他の場合と同様偶発故障と劣化故障とに大別することができる。偶発故障とはフィラメント断、電極タッチ、クラック等の原因で突然障害を生じたものである。これ等は他の場合と同様その寿命密度分布を対数関数で近似することができる。

$$f(t) = \frac{1}{t_m} \exp\left(-\frac{t}{t_m}\right) \tag{1}$$

第2 a 図は一放送所の資料から求めた偶発故障に関する寿命分布の一例で、その平均寿命 t_m は約 3200 時間である。



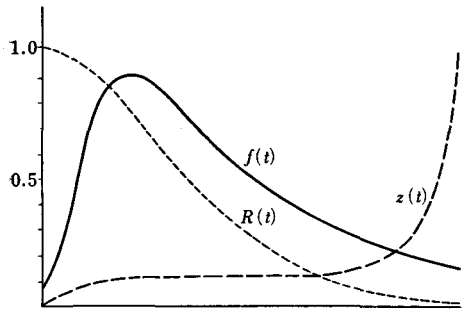
第2. a 図 偶発故障による真空管の寿命分布



第2. b 図 劣化故障による真空管の寿命分布

また劣化故障は主として陰極放射面の疲労によって真空管が徐々にその活力を失って生じるも

ので、その活力は多くの場合その相互コンダクタンス (g_m) と強い相関性を持っているから、 g_m の測定によって劣化のおよその様子を知ることができる。第2 b 図は前と同じ放送所で得た劣化故障管に関する寿命分布図である。*、**



第3 図 劣化故障に対する信頼度関数

劣化故障に対してはいろいろな近似関数が提案されている。第2 b 図の分布に基いて信頼度関数 $R(t)$ 、寿命分布関数 $F(t)$ 、故障率関数 $Z(t)$ を画

くと第3図のようになるが、これ等に対する近似関数を求めてみよう。

2.1 ワイブル(Weibull)分布関数

* 付録参照。

** 第2 b 図は後述の潜在故障限界に関してとった寿命分布である。

ワイブル分布関数は最近この方面に可成り広く用いられている関数の一つで、次の諸式で示される。

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^m}{t_0}\right) \quad t > 0 \quad (2)$$

$$f(t) = \frac{mt^{m-1}}{t_0} \exp\left(-\frac{t^m}{t_0}\right) \quad (3)$$

$$Z(t) = \frac{mt^{m-1}}{t_0} \quad (4)$$

(2)式から $R(t) = 1 - F(t)$ を求めてみると、この式は両辺の対数を二回とることによって直線となるから、その傾斜及び X_t 軸との交点から m 及び t_0 という二つのパラメータを求めることができる、またこの手段を容易にするために両軸を $\log, \log \log$ にしたワイブルチャートというものがある。ここに m は形状パラメータ、 t_0 はスケールパラメータと呼ばれており、 m は一定の部品に対してほぼ一定値を保つが、 t_0 は他のいろいろな条件に従って(例えば後に述べる寿命の限界等)変化する。第2 b 図中に示した曲線はワイブル関数による近似であってこの場合パラメータの値は $m=1.31$, $t_0=1.06$ であった。

2.2 正接正規分布関数

先に受信管の活力はほぼその g_m で代表させ得ることを記したが、今百分率で示した g_m の劣化度を次式で近似できるものと仮定しよう。

$$y(t) = y_0 - \frac{2\alpha}{\pi} \tan^{-1} \frac{t}{t_0} \quad (5)$$

y_0 は g_m の初期値であって、式中の y_0 及び α は夫々 $N(100\%, \sigma_1^2)$, $N(\alpha_0, \sigma_2^2)$ で示される正規分布をするものと仮定する。 g_m が定格値の $(1-\beta) \times 100\%$ になったときを受信管の寿命と考えて、この線に対する寿命の分布密度を求めてみると次式を得る。

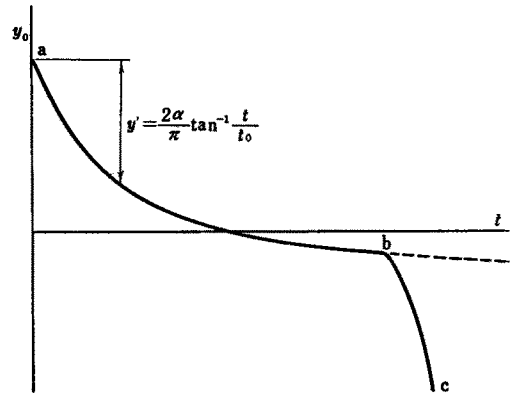
$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2 t^2}} \exp\left[-\frac{2\alpha_0^2}{\pi^2(\sigma_1^2 + \sigma_2 t^2)} \left(\tan^{-1} \frac{t}{t_0} - \tan^{-1} \frac{T}{t_0}\right)\right] \quad (6)$$

ここに

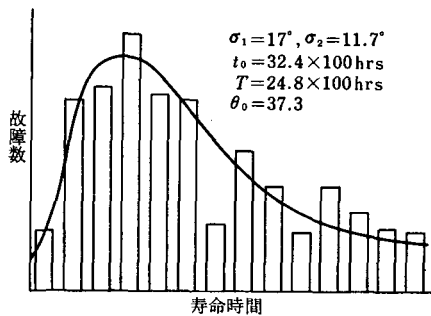
$$\sigma_2 t = \frac{2\alpha_0}{\pi} \tan^{-1} \frac{t_0}{t}$$

$$\tan^{-1} \frac{T}{t_0} = \frac{\pi\beta}{2\alpha_0} \triangleq \theta_0$$

(6)式による分布密度曲線を仮りに正接正規分布関数(tangential normal function)と呼ぶことにしよう。第2 b 図に示す受信管の寿命分布について(6)式の近似曲線を求めると第5図の曲線が得られ、可成りよい近似を示すことが判る。従って(5)式をもって g_m 劣化に対する一つの近



第4図 真空管の劣化特性の近似



第5図 正接正規分布による近似

との関係に注意されたい.)

ある性質に関する分布曲線を関数式で近似すれば、その取扱いや解析が容易になるが、工学的立場からいえば、単に数式の形がきれいだとか実際の分布によく適合するとかいう興味より、むしろ多少その点を犠牲にしてもその分布の生成原因、即ち本質に目が向けられることが必要ではなからうか。

§3. 保守のやり方とそのコスト

真空管の保守形態について考えてみると大略次の三つに要約できるが、一般の機器の保守も大同小異と考えてよいであろう。

- I 故障の都度その真空管を新しい品と交換する。(以下I型保守と呼ぶ)
- II ある一定期間毎に故障の有無にかかわらず全数を新しい品と交換し、期間中途に生じた故障品についてはその都度交換を実施する。(以下II型保守と呼ぶ)
- III ある一定期間毎に全数検査を行い、定められた廃棄規準値を割るものについてのみ交換を行う。期間中途の故障についてはその都度交換をする。(以下III型保守と呼ぶ)

上記の各保守方法に対してそのコストを計算してみる。

3.1 I型保守のコスト

全数が新しい真空管である装置の運転を始めた時刻を $t=0$ とすれば、時刻 t における真空管の故障密度は次式で示される。

$$u(t) = f_I(t) + \int_0^t u(t-\tau) f_I(t) d\tau \quad (7)$$

これは一般に再生方程式と呼ばれているもので、 $f_I(t)$ は機器が真空管 g_m の低下によって実際に障害を蒙る限界 β_I に対して求められた寿命分布密度関数である。この β_I はその真空管が使用されている場所によって可成り変化があり、それはある確率分布を持っているものと思われるが、平均して定格値の 40 %位に考えてよいものと思われる。(7)式は $t \rightarrow \infty$ に従って平均寿命 t_m の逆数 $1/t_m$ に収束するから、ある程度使用された装置では定常的な保守コストをこの

平均寿命を以て論じることができる。即ち一本の真空管の故障によって支出される費用(真空管の単価+交換に要する人件費+故障に附随する損害額*)を K_1 とすれば、単位時間、単位ソケット当りの保守コストは次式で求められる。

$$C_I = \frac{K_1}{t_m} \tag{8}$$

3.2 II 型保守のコスト

この場合、定期的実施される保守の間隔を h 、その際の交換費(真空管の単価+交換に要する人件費)を K_2 とすれば、単位時間、単位ソケット当りの保守コストは次式の如くなる。

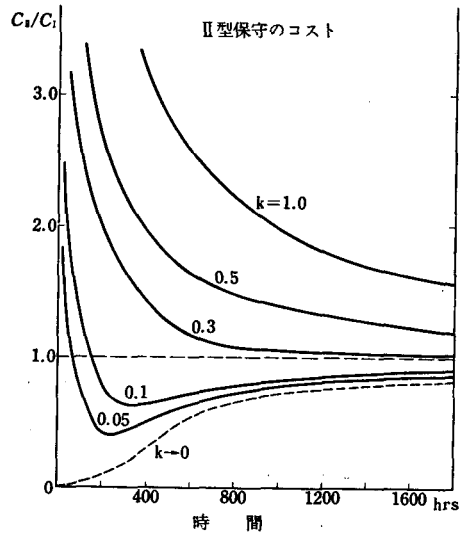
$$C_{II}(h) = \frac{K_1}{h} \left(n_1 + \frac{K_2}{K_1} \right) \tag{9}$$

n_1 は期間内に故障を起こして交換されるものの数で

$$n_1 = \int_0^h u(t) dt$$

ここに $u(t)$ は(7)式で与えられる。真空管一本当りの交換に要する人件費は集団交換の場合、個別交換より低く、また K_2 には故障によって生じる損害に関する項を含んでいないから、当然 $K_2 > K_1$ が成立し、ここにこのような保守形態の存在価値が生じる。 $C_{II}(h)$ はその保守期間 h の関数であるから、これを I 型保守のコストに対する比として表わすと第 6 図の如くである。

これによれば $K = K_1/K_2 < 0.2$ の場合に II 型保守のコストは I 型保守のコストを下廻り、ある h に対してコストが最少となる。この場合理論値より短い h に対してはコストが急激に上昇するのに対し、長い h に対する上昇は極めて緩慢であるから保守期間はやや長めにとることが安全である。 $h \rightarrow \infty$ の極限において II 型保守のコストが I 型保守のそれに一致するのは当然であろう。

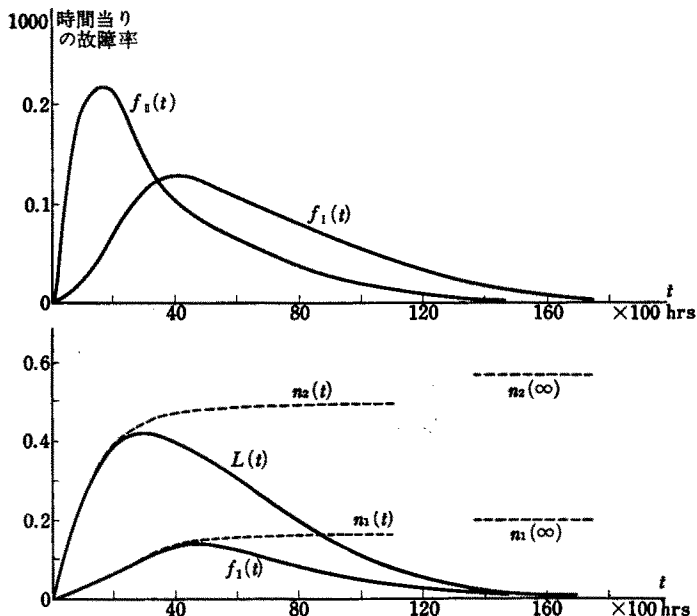


第 6 図 II 型保守のコスト

3.3 III 型保守のコスト

III 型保守で定期的に行われる全数検査の際の廃棄規準は、保守間隔 h 、真空管の寿命分布等と共に保守コストに対する変数となるが、問題を簡単にするため経験的に定められている値(普通定格値の 65% としている)をもとにして最適保守間隔を求めることにする。この廃棄規準と前述の故障限界とを併せて考えれば、全ての真空管はその g_m の値によって次の三つの中何れかの帯域に属させることができる。

* 例えば事故によって放送を中止した場合、聴視者に与える損害を金額に換算したもの。この算定は非常に困難であるが適当な規準により推定し得る。



第7図 故障数の時間推移

良品域	定格値の 100%~65%
潜在故障域	定格値の 65%~40%
故障域	定格値の 40%~0%

この表現を用いればⅢ型保守では定期的に潜在故障域にある真空管を新しい品と交換することができる。Ⅲ型保守で単位時間、単位ソケット当りのコストは次式で表わし得る。

$$C_{III}(h) = \frac{K_1}{h} \left[n_1 + \frac{K_2}{K_1} (n_2 + p) \right] \quad (10)$$

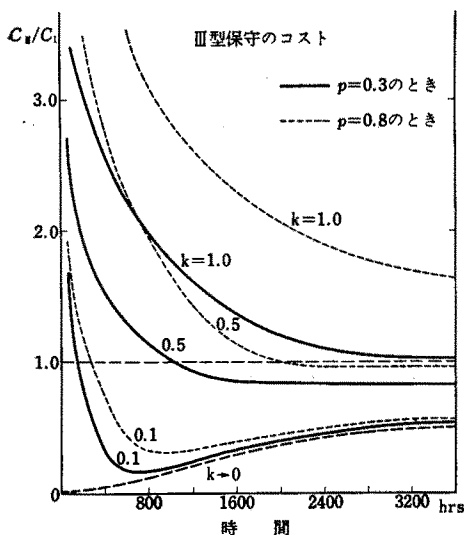
ここに $K_2 p$ は全数検査に要する費用で、検査方法、人件費等の影響を受けるが、 p はおよそ 0.3~0.8 の範囲にあると考えてよい。また n_2 は期間末の潜在故障数で次式で近似*できる。

$$n_2(h) = L(h) + \int_0^h u(t) L(h-t) dt \quad (11)$$

$u(t)$ は(7)式で求められる。また潜在故障限界に対する寿命分布密度関数を $f_{II}(t)$ で表わすとすれば上式中の $L(h)$ は

$$L(h) = \int_0^h [f_{II}(t) - f_I(t)] dt \quad (12)$$

である。



第8図 Ⅲ型保守のコスト

* Ⅲ型保守では次の保守周期の最初に全数が新しい品ではないから、厳密には問題が残るが、この近似式を用いても大過ない。この式ではそのコストがやや安く計算される。

Ⅲ型保守について前項と同様の計算をすると第8図を得る。 $h \rightarrow \infty$ の極限における g_m 分布を求めてみると良品域と潜在故障域の分布数はほぼ等しい。

§4. む す び

以上各種の保守形態についてその相対的なコストを求めてみた。前章では劣化故障のみについて計算したが、§2に述べたように相当程度の偶発故障が生じるから、等価的に第6図、第8図中の K の値は更に小さくなる。従って真空管のように寿命のばらつきが極めて大きいものでは故障による損害額がとくに大きくないと定期保守の効果はあまり期待できないことになる。この事実は第3図中の故障率曲線 $Z(t)$ が殆ど平坦であることからも予知できよう。なんとすれば一般に事前保守は $Z(t)$ が増加関数となる対象に対して有効であることを証明できるからである。

また人件費の比較的安価なわが国の現状ではⅡ型保守はⅢ型保守のコストより安くならない。

以上の考え方は寿命分布が既知である場合の部品の保守に広く応用できるが、寿命分布が正規型である場合には更に明確な数式で表現することができる。

益々複雑化する電子装置の信頼度を向上するには、設計の段階においてとくに保守が容易にできるように留意し、冗長系の利用等によって故障をできる限り低くするようにつとめる事の必要は勿論であるが、上述の議論によってわかるように、われわれ使用者の立場からいけばたとえ平均寿命にやや減少をみたとしても受信管の寿命のばらつきが小さくなって欲しいと思うのである。それによって保守の合理化と信頼度の向上とが適切な計画の下に行われ得るであろう。

本文の執筆に関していろいろ御討論を頂いた当研究所の上司と家入氏に感謝する。

付 録

§2では、ある放送所得た寿命に関する資料を管種別等に戸層することなく一体として取扱った。このような資料の併合にはその前提としての検定が必要であるが、全ての場合を考えて検定を行うことは不可能に近い。従って放送所を一つのシステムとし、それ等の構成がほぼ一様であると考えればよいであろう。なおいくつかの因子について行った検定結果の一例を下に示す。

a) メーカー別因子について

水準：メーカー5社。

要因	ss	df	ms	F
C.F	389.6	1	389.6	
S_A	15.4	4	3.85	1.07 ($E_{(0.05)}=3.9$)
S_e	126	35	3.60	

b) 機械別因子について

水準：カメラヘッド, V.F, カメラコントロール, モニタ類。

要因	ss	df	ms	F
C.F	46.3	1	46.3	
S_A	38.7	4	9.6	4.6** ($F_{(0.01)}=4.0$)
S_e	63.6	30	2.1	

機器別の場合 TV カメラ系統の真空管寿命がモニタ類の真空管に比して短いことに有意差が認められる。これは TV カメラが映像の主系統にあって、とくにその規格が厳密であるほか、常時の移動による振動、小型化のための放熱不良等いくつかの原因が考えられる。

参 考 文 献

- (1) E. L. Welker; Relationship between Equipment Reliability, Preventive Maintenance Policy and Operating Costs; 5th National Symposium on Reliability and Quality Control, 1959
- (2) 斎藤: 受信管の信頼度: 通信学会 信頼性と品質管理専門委員会資料. 1960年10月

《第 33 回国際統計会議開催について》

昨年度日本で開かれた国際統計会議 (ISI) は 2 年に 1 回開かれるが、昨年が 75 周年記念に当り 1 年延期していたため、今年 8 月 29 日から 9 月 7 日までフランスのバリ市で開かれる。その予定はまだ決定したわけではないが。

I GENERAL MEETINGS

- 1) Present status of statistics in the Sciences.
- 2) Model building (Economic, Biological and Physical Sciences).

II INVITED PAPERS MEETINGS

A) Economic and Social Sciences

- 1) Prediction, income and financial flows in national accounts.
(Organizer: Mr. G. M. W. FURST, Germany)
- 2) Food availability and nutrition statistics.
(Organizer: Mr. P. V. SUKHATME, India)
- 3) Statistical aspects of urban sociological research.⁽¹⁾
(Invited Organizer: Mr. D. V. GLASS, United Kingdom)
- 4) Traffic Congestion.⁽²⁾
(Organizer: Mr. H. GUTH, Switzerland)

B) Biology

- 1) Statistics and health problems.
(Organizer: Mr. J. BERKSON, United States)

C) Physical Sciences

- 1) Time series analysis⁽³⁾.

(Organizer: Mr. J. DURBIN, United Kingdom)

- 2) Life testing and reliability⁽⁴⁾.

(Invited Organizer: Mr. A. BLANCO LOISELLIER, Spain)

D) Data Processing

(Organizer: Mr. M. H. HANSEN, United States)

E) Statistical Training

- 1) Training for industrial applications of Statistics in European countries⁽⁵⁾.
(Organizer: Mr. A. VESSEREAU, France)

III CONTRIBUTED PAPERS MEETINGS (予定)

- 1) Business tests.
- 2) Statistical analysis of risk and tariffs in accident insurance.
- 3) Application to biology of multivariate and discriminatory analysis
- 4) Mathematical statistics—Recent results.

- 註 (1) International Association of Municipal Statisticians (ISI section) の後援による。
- (2) International Association of Municipal Statisticians と Committee on Statistics in Physical Sciences の後援による。
- (3) Committee on Statistics in Physical Sciences の後援による。
- (4) Committee on Statistics in Physical Sciences と Committee on Statistics in Industry and Technology の後援による。
- (5) Committee on Statistics in Industry and Technology の後援による。