CRT 用ガラスの強度特性の統計的性質†

大 杉 重 夫* 吉 岡 純 夫* 宮 崎 政 行** 伊 藤 順 子**
谷 周 一* 中 村 浩 二*** 土 方 明 躬****

Statistical Properties on Mechanical Strength of Glass for Cathode Ray Tubes

by

Shigeo OHSUGI*, Sumio YOSHIOKA*, Masayuki MIYAZAKI**, Junko ITOH**
Shuichi TANI*, Koji NAKAMURA*** and Akemi HIJIKATA****

It is well known that the strength characteristics of the glass used for the cathode ray tubes usually has a distinct scatter under the influence of surface flaws. Therefore, it is important to consider the variations in the static and delayed fracture strength of glass for the reliable design of vacuum cathode ray tubes under the atmospheric pressure. In this study, static and delayed fracture strength tests of glass were carried out using polished, abraded and scratched surface specimens in atmosphere in order to investigate the influence of the surface conditions on the strength characteristics statistically. From the goodness of fit test by the chi-square (χ^2) method, the validity of the assumed distribution of the cumulative failure probability on the static and delayed fracture strength corresponding to each surface condition are discussed. Moreover, the statistical properties of the relationships between the static and delayed strengths are examined.

Key words : Glass, Cathode ray tube, Mechanical strength, Delayed fracture, Statistical properties

1 緒 言

電子機器の構造部材として広く使用されているガラスは、強度的には、表面の傷に敏感で、強度のばらつきが比較的大きい材料であることはよく知られている。このため真空容器としての機能を有する電子機器である CRT (Cathode Ray Tube) の強度信頼性設計では、それに使用されるガラスの強度に対する欠陥 (表面傷) の影響^{1), 2)} 時間負荷の影響³⁾などを考慮して行われている。しかしながら、強度特性の統計的性質 (特に時間遅れ破壊に対する) に関する実用的な研究^{4), 5)}は十分ではない面もある。

そこで、筆者らは CRT 用ガラス材料を用いた室温、大気中で静的強度試験と時間遅れ破壊 (以後、単に遅れ破壊と称する) 試験を実施⁶⁾して、強度特性 (破壊確率 50% の強度で基準化した静的強度・遅れ破壊時間強度) の統計的性質についての検討を行ったので、その結果について報告する。

2 供試材と試験方法

供試材料は、CRT に使用されているバリウム・ストロンチウム系ソーダガラスであり、その主成分の化学組成は 11.2BaO, 5.0SrO, 60SiO₂ (いずれも wt.%) である。

これを溶解後、板厚 5mm と 10mm に成型し、応力除去焼なましを施した。

Fig. 1 に、試験片の種類および形状を示す。本試験には、鏡面仕上げを施した試験片 (表面粗さ 0.04 μ m 以下、以下鏡面試験片と略す)、片面をエメリー紙 #150 で研磨して加傷した試験片 (方向性のないように円弧状に研磨、表面傷* (深さ): 0.030~0.075mm, 平均 0.052mm, 以下加傷試験片と略す) および片面にスクラッチ傷を入れた試験片 (傷*の深さ: 0.08~0.49mm, 以下スクラッチ試験片と略す) を供した。⁶⁾ (*破断面での測定値)

Table I に示す試験条件で、室温、大気中で四点曲げの静的強度試験と遅れ破壊強度試験 (最大約 1×10^4 時間) を行った。⁶⁾

3 静的強度の統計的性質

3・1 強度分布に及ぼす板厚の影響

50% の強度で基準化した強度の確率分布に及ぼす板厚の影響を検討するために、板厚 5mm と 10mm のそれぞれの試験片の静的強度の統計的性質を比較した。(破壊確率 50% の強度 (絶対値) は、板厚 10mm が約 10% 高い⁶⁾)

† 原稿受理 平成 9 年 12 月 15 日 Received Dec. 15, 1997

* 正 会 員 三菱電機(株)先端技術総合研究所 〒661-8661 尼崎市塚口本町, Advanced Tech. R & D Center, Mitsubishi Elec. Corp., Tukaguchi-Honmachi, Amagasaki, 661-8661

** 三菱電機(株)先端技術総合研究所 〒661-8661 尼崎市塚口本町, Advanced Tech. R & D Center, Mitsubishi Elec. Corp., Tukaguchi-Honmachi, Amagasaki, 661-8661

*** 三菱電機(株)ディスプレイデバイス統括事業部 〒617-0828 長岡京市馬場園所, Display Devices Business Division, Mitsubishi Elec. Corp., Zusho-Baba, Nagaokakyo, 617-0828

**** 正 会 員 金沢工業大学工学部機械工学科 〒921-8812 石川県野々市町扇が丘, Dept. of Mech. Eng., Kanazawa Inst. of Tech., Nonoichi, Ishikawa, 921-8812

Fig. 1. Shape and dimensions of specimens.

Table I. Test condition.

Types of specimen	Static test	Delayed fracture test
Polished	○, △	○, —
Abraded	○, △	○, △
Scratched	○, △	○, △

○: t=5mm △: t=10mm

鏡面および加傷試験片は四点曲げ強度 σ_b (公称曲げ応力) で, スクラッチ試験片は片側き裂を有する梁の純曲げのモード I の応力拡大係数 K の式⁷⁾を用いて求めた破壊じん性値 Kc で整理した. なお, き裂長さ (スクラッチ深さ) は, 試験後, スクラッチ深さを幅方向に 4 分割して, 中央部の 3 点の平均値を用いた.

Fig. 2 に, 板厚 5mm と 10mm の鏡面, 加傷およびスクラッチ試験片に対してそれぞれの破壊確率 50% の強度 ($\sigma_{b(50\%)}$, $K_{c(50\%)}$) で基準化した静的強度特性を, 2 母数ワイブル分布で整理した結果を示す. 累積破壊確率 P は次式で表されるメジアンランクの近似式⁸⁾から求めた.

$$P = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (1)$$

ここで, i はデータの順位数, n はデータ総数である.

(a) Polished specimen

(b) Abraded specimen

(c) Scratched specimen

Fig. 2. Weibull distribution of nondimensional static strength for polished, abraded and scratched specimens.

同図に示すように, 鏡面, 加傷およびスクラッチ試験片とも, 破壊確率 50% の強度で基準化した強度の確率分布の, 板厚による顕著な差は認められない. 従って, 本報の検討では, 基準化した板厚 5mm と 10mm のデータを同一統計量として取り扱った.

3・2 確率分布形態の適合度の検討

鏡面, 加傷およびスクラッチ試験片の破壊確率 50% の強度 ($\sigma_{b(50\%)}$, $K_{c(50\%)}$) で基準化した静的強度特性の統計的性質を, 正規分布, 対数正規分布および 2 母数, 3 母数ワイブル分布の 4 種類の確率分布を用いて整理し, 各確率分布の適合度を検討した.

確率分布の適合度の検定は, 次式で表される χ^2 検定⁸⁾を用いて行った.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - nP_i)^2}{nP_i} \quad (2)$$

ここで, i は階級の順位 ($i = 1 \sim k$), n_i は度数 (各階級でのデータの個数), n はデータ総数, P_i は確率密度関数に対する階級 i に存在する母集団の確率である.

強度の階級を 6 段階としてデータを分類し, 鏡面, 加傷およびスクラッチ試験片の破壊確率 50% の強度 $\sigma_b(50\%)$, $K_{c(50\%)}$ で基準化した場合の静的強度の 4 種類の確率分布に対する適合度検定を行った.

Fig. 3 に, 鏡面, 加傷およびスクラッチ試験片の各確率分布 (3 母数ワイブル分布は省略) で整理した結果を示す. 同図より, 加傷材が最もばらつきが小さいことが判る. また, 三種の強度データを一つの母集団と見なし整理した結果を Fig. 4 に示す. 種々の表面状態のガラス材料の強度分布の集合体としては, まとまった分布特性を示している.

Table II に適合度検定結果を示す. なお, Table II には, 棄却域 (有意水準 $\gamma = 0.05$) に対する判定基準値 χ^2 を併記した. χ^2 を用いた適合度検定から, 実用面から全体的なばらつきを把握するために, 3 種類の試験片の全データを一つにまとめた場合には, 自由度数が同一である 2 母数ワイブル分布, 正規分布, 対数正規分布の中では, 2 母数ワイブル分布が最も適合しており, この時の

Fig. 3. Probability distribution of nondimensional static strength for polished, abraded and scratched specimens.

Fig. 4. Probability distribution of nondimensional static strength (all data).

Table II. Test of goodness of fit for nondimensional static strength.

Specimen [Thickness t(mm)]	χ^2			
	Normal distribution	Log-normal distribution	Weibull distribution	
			Two- parameter	Three- parameter
Polished [5, 10]	10.90	13.49	6.99☆	6.99
Abraded [5, 10]	5.81	8.90	3.92☆	3.33
Scratched [5, 10]	3.80☆	5.17	5.51	5.49
All data	12.21	27.03	5.03☆	2.84
(χ^2)	(7.82)	(7.82)	(7.82)	(5.99)

☆ Best fit(exclude three-parameter Weibull distribution)

χ^2 は判定基準を満足している。従って、全データを一つにまとめた基準化した静的強度はワイブル分布に適合するといえる。なお、個別の試験片と比較した場合にも、一部（スクラッチ）を除きワイブル分布が最も適合している。（鏡面試験片では、3 母数ワイブル分布の位置母数 γ は 0 で、2 母数ワイブル分布と同一）

4 遅れ破壊特性の統計的性質

4.1 遅れ破壊特性

静的強度の統計的性質と比較することを主目的に、遅れ破壊特性の統計的性質の整理・検討を行った（データ数の少ない鏡面試験片は適合度検定を行わなかった）。

破壊確率 50% の強度で基準化した特性を用いた静的強度の場合と同様に、遅れ破壊特性においても基準化した特性を統計量とすることにした。時間依存性は無視できるものとして、破壊確率 50% の遅れ破壊特性線図（時間強度）で基準化した全領域のデータを対象に統計的性質の検討を行った。統計処理に必要な破壊確率 50% の遅れ破壊特性線図は、次に示す手順で求めた。

まず、遅れ破壊寿命（時間）の確率分布を 3 母数ワイブル分布で整理する。Fig. 5 に、ワイブル確率紙上にプロットした加傷試験片の各負荷レベルでの遅れ破壊寿命の確率分布を示す。なお、破壊確率 P は、基本的にはメジアンランクの近似式を用いているが、未破壊データがあるため、それを考慮した形の次式⁸⁾を用いて P を求めた。

$$P = \frac{j-0.3}{n+0.4} \quad \left. \begin{aligned} j &= j_0 + \frac{(n+1)-j_0}{(n+1)-(i-1)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 j は破壊データの順位数、 n はデータ総数（未破壊データを含む）、 j_0 は i 番目のデータ x_i の直前にある破壊データの順位数、 i は未破壊データを含めた

データの順位数である。

Fig. 5 に示す 3 母数ワイブル分布で整理した遅れ破壊寿命の確率分布曲線から、各負荷レベル毎の破壊確率 50% の遅れ破壊寿命を求め、以下に示す漸近回帰式⁹⁾を用いて、最小自乗法により破壊確率 50% の遅れ破壊特性線図を求める。

$$\log(Y - c) = a \log X + b \quad (4)$$

ここで、 Y は縦軸の値 (応力)、 X は横軸の値 (遅れ破壊時間)、 a 、 b 、 c は定数である。なお、Fig. 5 において、板厚 5mm と 10mm で、負荷レベル ($\sigma/\sigma_{b(50\%)}$) の差が小さいものについては、同一負荷レベルと見なし、その時の $\sigma/\sigma_{b(50\%)}$ の値は平均値を採用した (加傷試験片: 負荷レベル = 8 水準, 負荷レベルの差 ≤ 0.01 , スクラッチ試験片: 負荷レベル = 6 水準, 負荷レベルの差 ≤ 0.07)。

Fig. 6 に、上記の漸近回帰式により得られた加傷試験片の静的強度 ($\sigma_{b(50\%)}$) で基準化した破壊確率 50% の遅れ破壊特性線図 (応力-破断時間線図) を示す。

Fig. 7 に、静的強度 ($\sigma_{b(50\%)}$, $K_{c(50\%)}$) で基準化した鏡面, 加傷およびスクラッチ試験片の遅れ破壊特性を示す。なお、データが少ない鏡面試験片については、西島の少標本疲労データの統計解析手法¹⁰⁾を用いて遅れ破壊特性線図を求めた。

4・2 確率分布形態の適合度の検討

鏡面, 加傷およびスクラッチ試験片の遅れ破壊特性の統計的性質を、静的強度の場合と同様に、正規分布, 対数正規分布および 2 母数, 3 母数ワイブル分布の 4 種類の確率分布を用いて整理し、各確率分布の適合度を検討した。なお、確率の計算には、未破壊データを考慮した式 (3) を用いた。

各遅れ破壊強度 (破壊データ) を、式 (4) から得られた破壊確率 50% の強度 $\sigma_{(50\%)}$ (鏡面, 加傷試験片) または $K_{(50\%)}$ (スクラッチ試験片) で基準化して、式 (2) で表される χ^2 を用いた適合度検定を行った。

Fig. 8 に、破壊確率 50% の強度で基準化した鏡面, 加傷およびスクラッチ試験片の遅れ破壊強度 (破壊データ) を各確率分布 (3 母数ワイブル分布は省略, Fig. 9, 10 も同じ) で整理した結果を示す。静的強度の場合と同様、加傷試験片が最もばらつきが小さい。また、三者の強度データを一つにまとめて各確率分布で整理した結果を Fig. 9 に示す。

Table III に適合度検定結果を示す (鏡面試験片は適合度検定せず)。加傷試験片では対数正規, スクラッチ試験片では 2 母数ワイブル分布の適合度が最もよく、 χ^2 検定の判定基準を満足している。一方、3 種類の試験片の全データを一つにまとめた場合には、4 種類の確率分布に大差はない。遅れ破壊特性に対しては各分布形に対する顕著な適合度の差は認められないといえる。

4・3 静的強度との比較

棄却域に対する判定基準を考慮すると、3 種類の試験片の全データを一つにまとめた場合の遅れ破壊強度の確

Fig. 5. Probability distribution of delayed fracture time for abraded specimen.

Fig. 6. Nondimensional delayed fracture characteristics for abraded specimen.

Fig. 7. Nondimensional delayed fracture characteristics for polished, abraded and scratched specimens.

率分布形態にはいずれの分布形も適合しなかったため、ここでは、静的強度の確率分布形態に対して、最も適合した 2 母数ワイブル分布を用いて、遅れ破壊強度と静的強度の確率分布形態を比較する。

Fig. 10 に、2 母数ワイブル分布で整理した、鏡面, 加傷およびスクラッチ試験片の破壊確率 50% の強度で基準化した遅れ破壊強度 (記号) と静的強度 (点線) の確率分布を示す。

標準偏差 (S) を強度の平均値 (μ) で基準化した変動係数 S/μ をばらつきの指標として、各試験片の遅れ破壊と静的強度のばらつきを求めた。Table IV に、各試験片の遅れ破壊強度と静的強度の変動係数を示す。加傷試験片以外は、静的強度に比べて遅れ破壊強度のばらつきは若干大きくなっている。一方、各試験片間の強度のば

Fig. 8. Probability distribution of nondimensional delayed fracture strength for polished, abraded and scratched specimens.

Fig. 9. Probability distribution of nondimensional delayed fracture strength (all data).

Fig. 10. Weibull distribution of nondimensional delayed fracture and static strength.

らつきの大小関係は、遅れ破壊強度、静的強度ともに、加傷試験片が最も小さく、次いで、鏡面試験片、スクラッチ試験片の順であり、エメリー紙で研磨した加傷試験片の傷の分布が、最も強度的に均一であるといえる。

全データ（鏡面、加傷、スクラッチ）を高応力（短寿命）データと低応力（長寿命）データに区分し、遅れ破

壊特性の確率分布に対する時間依存性の有無を検出した。

100 時間の時間強度 $\sigma_{(100hr)}$, $K_{(100hr)}$ （平均値）を境にして、高応力（ Δ ）・低応力（ $\circ$ ）データに区分し、それぞれの遅れ破壊強度の確率分布（2 母数ワイブル）を比較したものを Fig. 11 に示す（全データに対する静的

Table III. Test of goodness of fit for nondimensional delayed fracture strength.

Specimen [Thickness t(mm)]	χ^2			
	Normal distribution	Log-normal distribution	Weibull distribution	
			Two- parameter	Three- parameter
Polished [5]	—	—	—	—
Abraded [5, 10]	6.70	6.09☆	11.73	6.63
Scratched [5, 10]	6.46	6.04	5.24☆	6.08
All data	22.31	20.62	22.87	21.86
($\chi^2_{.95}$)	(7.82)	(7.82)	(7.82)	(5.99)

☆ Best fit(exclude three-parameter Weibull distribution)

Table IV. Coefficient of variation.

Specimen [Thickness t(mm)]	S / μ			
	Static strength	Delayed fracture strength	Delayed fracture strength	
			High level stress σ, K_2 $\sigma_{(100hr)}, K_{(100hr)}$	Low level stress σ, K_1 $\sigma_{(100hr)}, K_{(100hr)}$
Polished [5]	0.10	0.13		
Abraded [5, 10]	0.08	0.08		
Scratched [5, 10]	0.11	0.16		
All data	0.09	0.12	0.12(Δ)	0.11(○)

Fig. 11. Weibull distribution of nondimensional delayed fracture and static strength (all data).

強度の確率分布線を併記). 低応力(長寿命)データと高応力(短寿命)データで大きい差が認められず, 遅れ破壊特性の確率分布に対する顕著な時間依存性は認められないといえる. また, 低応力(長寿命)と高応力(短寿命)の変動係数の値 (Table IVに併記) はほぼ等しく, しかも静的強度の変動係数の値に近い値である.

5 結 言

CRT 用ソーダガラス材料を用いた静的強度と遅れ破壊強度試験を実施し, 50% 破壊確率の(時間)強度で基準化した値を用いて, 静的強度特性および遅れ破壊特性の統計的性質の検討を行い, 下記の結論を得た.

(1) 自由度数が等しい正規, 対数正規および 2 母数ワイブル分布の中で, 静的強度(全データ)に対しては, 2 母数ワイブル分布が最も適合するが, 遅れ破壊特性(全データ)に対しては三者の間で顕著な適合度の差は認められない.

(2) 変動係数を指標とした強度のばらつきは, 静的強度, 遅れ破壊特性とともに, 加傷試験片が最も小さく, 次に, 鏡面試験片, スクラッチ試験片の順である.

(3) 静的強度と遅れ破壊特性のばらつきを比較すると, 加傷では同じであるが, 鏡面, スクラッチでは遅れ破壊強度のばらつきが若干大きくなる.

(4) 遅れ破壊特性(全データ)の確率分布に対する顕著な時間依存性は認められない.

参 考 文 献

1) 宮田 寛, 中門公明, 木本 寛, 日本材料強度学会誌, **21**, 45 (1986).

2) 小林秀敏, 臺丸谷政志, 野島武敏, 材料, **45**, 310 (1996).

3) 木村雄二, 山本茂夫, 関谷道雄, 国尾 武, 材料, **36**, 160 (1987).

4) A. Ghosh, C. Y. Cha, W. Bozek and S. Vaidyanathan, "SID 92 DIGEST", p.508 (1992).

5) Y. Kimura, T. Yagasaki and K. Kunio, Engng. Fracture Mech., **19**, 1025 (1984).

6) 大杉重夫, 吉岡純夫, 宮崎政行, 伊藤順子, 谷 周一, 中村浩二, 材料, **47**, 79 (1998).

7) The Society of Materials Science, Japan, "STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK", Vol.1, p.11 (1987) Pergamon Press.

8) 日本材料学会編, "実用信頼性工学", 2, 3 章 (1987) 養賢堂.

9) 日本鉄鋼協会基礎研究会 VAMAS 材料評価研究部会編, "金属材料疲労寿命データの標準的解析法", p. 9 (1994) 日本鉄鋼協会.

10) 西島 敏, 日本機械学会論文集, A-46, 1303 (1980).