製品の事故データベースを利用した構成部品の故障率と その確率分布の決定[†]

原田 泰男* 倉敷 哲生*

Decision Method of Failure Rate and Its Probability Distribution for Components Composing of Products Using Incident Database of the Product

by

Yasuo Harada * and Tetsusei Kurashiki *

In this paper, we focus the failure rate of components which compose of products and are the dominant cause of unsafe incidents of the product. We analyzed data base of NITE reports to figure out component failure rate through electric fan incident cases. The failure rate resides in accidental failure mode and wear-out failure mode. We propose a method to derive an equivalent distribution of probability of failure rate by using the limited number of incident case samples. Failure rates at a certain time is shifted to an observation time, we derive the distribution of probability of failure rate data using shifted data to the observation time where we defined the distribution as equivalent distribution of probability of at the observation time. Assuming that the probability distribution can be identical at the crossing point of accidental mode and wear-out mode, we compare the failure rate distributions at the crossing point between accidental failure mode and wear-out failure mode and choose the crossing point based on its correlation. After setting crossing point, we estimate the all equivalent failure rate data from both failure modes comparing its distribution to Normal, Weibull, and Log-normal, and decide the Weibull distribution as the equivalent failure rate distribution with the highest correlation coefficient. Furthermore, we apply the probability distribution to the failure rate calculated by the definition of IEC/TR62380 and find that the probability of failure rate for a standard environment is 50% and severer environment failure rate becomes 69.5% of probability. As we apply the distribution function of failure rate given by the field data to IEC/TR62380 mathematical model, we can set standard criteria of the failure rate using IEC/TR62380 and adjust criteria according to the environment of product usage at setting the risk level for a manufacturing management system.

Key words:

Failure rate, Probability distribution, Correlation, Product Safety

1 緒 言

製造者が製品の安全品質を管理するためには、設計段階・出荷前に製品の出荷判断基準として、リスクレベルの明確化が必要である。筆者らは、製品に内在するハザード¹⁾に着目し、ハザードベース FTA を用いた製品のリスクレベル評価を実施する製品安全評価方法を提案した²⁾。この方法では、ハザードベース FTA により、内在するハザードのレベルとそのハザードを防護している部品の故障率³⁾から、製品のリスクレベルを特定するものである。内在するハザードは製造者の設計データより特定が可能であるが、安全に係る部品の故障率は、既知のデータベースが限られていることから、セーフガード部品の故障率を求める代替方法が必要となる。

本論文では、部品の故障に起因する実際に起こった事故の報告データベースを分析し、特定の部品の故障率を類推する方法を提案する。そして故障率を計算し偶発故障領域と摩耗故障領域の二つの領域が存在することを明らかにし、偶発故障領域と摩耗故障領域に分けられた故

障率の確率分布を求める手法について論じる。特に、限られた少数のデータから故障率の確率分布を効率的に推定するため、時間-故障率図において各時間における故障率を任意の時間における「等価故障率」へ換算することを提案する。等価故障率の概念を用いて、事故報告データベースから求めた製品の構成部品の故障率データを偶発故障領域と摩耗故障領域に分ける境界点の決定方法と、各領域のデータから故障率の確率分布を決定する方法を示す。さらに、求めた確率分布を適用し、標準的な使用環境と劣悪環境を想定した際の故障率を確率分布上に示し、IEC/TR62380⁴⁾で求められる故障率との比較を行う。以下にその詳細を記載する。

2 事故報告データベースを用いた故障率の算出手法

(独)製品評価技術基盤機構 (NITE) の製品事故データベースには家電製品をはじめ様々な事故データが報告されている⁵⁾。このデータをみると扇風機やエアコンの事故報告ではコンデンサが要因となる事故が多いことがわか

[†] 原稿受理 平成26年8月11日 Received Aug. 11, 2014 ©2015 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 大阪大学 大学院工学研究科 ビジネスエンジニアリング専攻 〒565-0871 吹田市山田丘,
Management of industry and technology, Graduate study of Engineering, Osaka University, Yamadaoka, Suita 565-0871

る^{6),7)}。このことから特定部品の事故例を抽出することにより、その製品に使用されている部品の故障率を推定することができると考える。まず、NITEの製品事故データベースより、扇風機の事故の中で、コンデンサが関係する事故例を抽出し、データベースの詳細内容より事故の製品使用期間ならびに製造年度を抽出し、また、その年の稼働製品数を各種工業会の統計データより製品出荷台数を得る。故障率は、ある時点まで稼働状態にあった製品が、単位時間内に故障が発生する確率を表し、単位時間内の総事故件数を総動作時間で除した値で示される³⁾。したがって、時刻 t_i （ただし、 $i=1, 2, \dots$ ）において残存している未故障の稼働製品数を $N(t_i)$ 、時刻 t_i から引き続く単位時間を Δt_i 、その間に生じる総故障件数を $n(t_i)$ とすると、総動作時間が $N(t_i) \cdot \Delta t_i$ となるので、故障率 $\lambda(t_i)$ は、次式で表される。

$$\lambda(t_i) = \frac{n(t_i)}{N(t_i) \Delta t_i} \quad (1)$$

故障率の算出においては、各年度における出荷台数、NITEに報告があった製品事故の件数、およびその事故となった製品の出荷からの使用期間を把握して、式(1)に基づいている。

1967年～2010年に出荷された扇風機について故障までの使用期間毎に故障率を計算した。ここで、使用期間は、5年毎として、その間の故障件数に基づき故障率を算出する。紙面の関係上、Table 1に、出荷年1967年～1971年の5年間に、使用期間を0年～45年を5年毎に分けて、その間に起きた事故件数を示した。Table 2には、それをもとに、故障率を求めた。2010年までの出荷分についても故障率を求め、Fig. 1に使用期間年数を横軸にとり、縦軸に故障率を示している。

Table 1 Number of total shipment and number of incidents case.

Year of shipment		1967	1968	1969	1970	1971
Number of shipment		563292	630149	702602	780870	865176
Elapsed year	0～5	0	0	0	0	0
	5～10	0	0	0	0	0
	10～15	0	0	1	0	0
	15～20	0	0	0	2	1
	20～25	0	0	0	2	0
	25～30	0	1	0	0	0
	30～35	0	1	1	2	1
	35～40	0	4	10	8	4
	40～45	3	5	0	0	0
total number		3	11	12	14	6

Table 2 Failure rate of electric fan for a shipment year.

Year of shipment		1967	1968	1969	1970	1971
Elapsed year	0～5					
	5～10					
	10～15			3E-10		
	15～20				6E-10	3E-10
	20～25				6E-10	
	25～30		3.6E-10			
	30～35		3.6E-10	3E-10	6E-10	3E-10
	35～40		1.4E-09	3E-09	2E-09	1E-09
	40～45	1.2E-09	1.8E-09			

Fig. 1 Failure rate estimated by incident report of electric fans.

Fig. 1は、製品の使用年数と、故障率の関係である。図から、式(1)により求めた故障率は、使用年数に対しほぼ一定となる領域と、ある使用年度から故障率が急激に増加する領域があると考えられる。すなわち、偶発故障と摩耗故障に大別されたと考える。

3 等価故障率の提案

本研究では、少数のデータから故障率の確率分布を推定するため、時間－故障率図において各時間における故障率を任意の時間における「等価故障率」へ換算することを提案する。以下に等価故障率の導出手順を示す。Fig. 2(a)に示すように、摩耗故障域において数点の故障率のデータが得られ、ばらつきを有する場合、まず、最小2乗法により直線回帰を行う。時間経過とともに故障率が変化するとき、製品を構成する部品が保全されることがなく継続的に使用されたとしたときに、その故障率の確率分布は同じ分布であることと仮定し、故障率の確率分布を求める時刻へ換算した故障率を等価故障率と定義する。次に、Fig. 2(b)に示すように、時間 N_1 で故障に至ったデータ（故障率 f_1 ）について、もしも時間 N_1 で故障せず、時刻 N_c で故障したと考えれば、回帰直線の傾斜に沿って故障率 f_2 の点で故障に至ることが確率分布を与える等価故障率を与えると考える。Fig. 2(c)に示すように、他のデータについても同様の処理を施す。このようにして時間 N_c における等価故障率のデータにFig. 2(d)に示す確率分布を推定し、摩耗故障域における故障率の分布を推定する。等価故障率の概念を用いることにより、異なる時間における故障率のデータを一つの分布にまとめられ、比較的少数のデータからでも故障率の分布を推定することが可能となる利点を有する。

同様の処理をFig. 2(e)における偶発故障域におけるデータに関しても行う。製品の構成部品が変化しない場合、偶発故障領域と摩耗故障領域での故障率の確率分布が等しいと仮定する。そこで、偶発故障域と摩耗故障域の境

界となる N_c の値を変えて偶発・摩耗の両領域の確率分布を求め、両領域の確率分布の相関が最も高くなる場合の N_c を採用する。処理内容は、時刻毎の標本データを平均値が異なる統計量を観測時刻における故障率の平均値により標本データを規格化する処理と同等であるが、本提案においては、標本データの数少なく限られた条件で、偶発領域と摩耗領域の確率分布がその分岐点で一定であることを利用して、分岐点における故障率に換算し確率分布を求めることを試みているところに特徴がある。このように求められる故障率分布を等価故障率分布と定義する。

偶発故障領域と摩耗故障領域の二つの領域でそれぞれの故障率の確率分布を求めて、双方の分布の相関が高い確率分布形状を決定することが可能となる。等価故障率分布は故障率を昇順に並べ替えた順序統計量として解析を行い、正規分布、対数正規分布、ワイブル分布の中から相関係数を比較して最も相関係数が高い分布を選択する。事故のデータベースのように長期間にわたり限られた故障率サンプルからその確率分布を明らかにし、製品安全評価基準を故障率の確率分布を考慮して設定することが可能となる。

(a) Failure rates samples and its linear approximations

(b) Shift of failure rates samples

(c) Shift of failure rates samples to the observation time

(d) Probability distribution from wear-out mode samples

(e) Probability distribution from accidental mode samples

Fig. 2 Procedure of obtaining the probability distribution of the equivalent failure rate samples.

4 等価故障率の確率分布の推定

提案手法の適用例として、Fig. 1 の扇風機の故障率データを対象に等価故障率分布の評価を行う。まず、偶発故障領域と摩耗故障領域の境界点の検証を行うために、境界点を 22.5 年、27.5 年、32.5 年とする。このことは、サンプル例が少ないため、5 年間の移動平均値として取り扱うため 5 年ごとの境界点を仮定した。それぞれの場合に、決定係数 (R^2) が 0.6 以上となるように近似線を求め、これらの結果を Fig. 3 に示す。なお、32.5 年は、傾斜部におけるデータが不足しているために近似式は得られてい

い. Fig. 3 には, 各故障率データを求めた近似式に従って平行移動を行った等価故障率のデータを○, △印で示す(それぞれ偶発故障領域, 摩耗故障領域のデータを表す).

このように, 22.5 年と 27.5 年について, 偶発故障領域から平行移動させた等価故障率と, 摩耗故障領域から境界点に移動させた等価故障率を得ることができる.

(a) Case of separated period of 22.5 year

(b) Case of separated period of 27.5 year

(c) Case of separated period of 32.5 year

Fig. 3 Equivalent failure rate of electric fan incident data.

(a) Normal distribution of probability

(b) Weibull distribution of probability

(c) Log-normal distribution of probability

Fig.4 Correlation to probability distributions of probability of equivalent failure rates ($N_c=22.5$ year).

次に, 境界点において偶発故障領域のサンプルから求めた等価故障率の確率分布と, 摩耗故障領域の等価故障

率から求めた確率分布の相関を比較する。確率分布形状として、正規分布、ワイブル分布、対数正規分布を想定し、偶発故障領域と摩耗故障領域の分布を確率紙上で比較する。Fig. 4に、境界点 22.5 年の場合について各確率分布紙で比較した結果を示す。次に、27.5 年を境界点として確率分布紙で整理した結果を Fig. 5 に示す。Fig. 4 と比べて、いずれの確率紙においても偶発故障領域と摩耗故障領域における等価故障率の確率分布が高い相関性を示すことが分かる。確率紙上で、22.5 年と 27.5 年の期間において分布を比較した結果、27.5 年付近に偶発故障領域と摩耗故障領域の境界点と定めることが妥当であることが言える。

(a) Normal distribution of probability

(b) Weibull distribution of probability

(c) Lognormal distribution of probability

Fig. 5 Correlation to probability distributions of probability of equivalent failure rates ($N_c=27.5$ year).

(a) Correlation to Normal distribution of probability

(b) Correlation to Weibull distribution of probability

(C) Correlation to log-normal distribution of probability

Fig. 6 Correlation to Normal, Weibull, Log-normal distribution of probability of equivalent failure rates ($N_c=27.5$ year).

偶発領域と摩耗故障領域の境界における故障率の分布の比較処理をわかりやすく説明するために明示的にそれぞれに近似線を与えたが、上記の相関性の比較のために、偶発故障領域から摩耗故障領域への境界点毎に、この時刻で観測した等価故障率の確率分布に関して、正規分布、ワイブル分布、対数正規分布への適用性を評価する。どの分布を適用するのが適当であるかを比較するために、摩耗故障と偶発故障領域から求めた等価故障率データの全てを同一の標本集合として取扱い、それぞれの確率分布を評価した。境界点が 22.5 年においては紙面の制限上図示はしないが、正規分布、ワイブル分布、対数正規分布との決定係数 (R^2) は、それぞれ、0.64, 0.85, 0.94 となり、また、境界点が 27.5 年の場合の Fig. 6 に示すように、決定係数 (R^2) が 0.92, 0.99, 0.97 となり、この結果、各データの分布に対して境界点 27.5 年とし、ワイブル確率分布を適用するのが最適であることが分かる。

5 IEC/TR62380 による故障率への適用

提案手法により求めた故障率とその故障率分布について、IEC/TR62380 の算出式を用いた故障率との比較を行う。

扇風機のコンデンサにおける動作環境として、運転と休止の 2 段階のフェーズを想定し、扇風機の動作時の内部温度を t_{ac} 、常時環境温度を t_{ae} 、(温度差 $\Delta T = t_{ac} - t_{ae}$) とする。 τ_{on} は動作比率 (コンデンサに電圧が印加されている時間比率)、 τ_{off} は非動作比率 (コンデンサに電圧が印加されていない時間比率) である。IEC/TR62380 では、環境温度に対する補正係数、部品に課されるストレスに対する補正係数を動作時間比率に応じて故障率を次式で計算している。

$$\lambda = 0.1 \cdot \left\{ \frac{\pi_t \cdot \tau_{on}}{\tau_{on} + \tau_{off}} \right\} + 1.4 \times 10^{-3} \cdot \left\{ \pi_n \cdot (\Delta T)^{0.68} \right\} \times 10^{-9} \quad (2)$$

π_t はキャパシターミッションプロファイルの接合温度に関連する温度係数であり、次式で示される。

$$\pi_t = \exp \left\{ 2900 \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{273 + t_{ac}} \right) \right\} \quad (3)$$

π_n はサイクル影響指数であり、次式で示される。

$$\pi_n = n^{0.76} \quad (4)$$

ここで、 n はサイクル数である。

故障率のばらつきを比較するために、代表的な例として国内の標準的な使用環境温度 30°C (JIS C9601:2007⁸⁾) で 27°C の温度上昇を想定した条件と、50°C の温度上昇を想定した厳しい条件とを、それぞれ Table 3, 4 にプロファイル Case-1, プロファイル Case-2 として示す。サイクル数は、年間 550 サイクル ($n=550$) としている。

式(2)~(4)に基づき故障率を計算すると、Case-1 のプロファイルでは、故障率は 2.35×10^{-10} (/hour) となる。この値は、事故報告データベースから得た故障率 2.33×10^{-10} (/hour) (Fig. 3(b)) とほぼ等しい結果となった。

使用条件を厳しい場合のプロファイル Case-2 を適用した場合には故障率は 3.22×10^{-10} (/hour) となる。この値は、前章で求めたワイブル確率分布の累積確率 69.5% に相当する。Fig. 7 に、提案手法により求めた故障率分布の累積確率 10%, 90% の故障率を示した。また、Case-1, Case-2 のプロファイルを適用し IEC/TR62380 に基づいた計算した故障率をそれぞれ太線破線、太線実線で示す。

このように、IEC/TR62380 に基づいて得た故障率の値に事故報告データベースの解析から得た故障率の確率分布を適用することにより、Table 3, 4 に示す環境パラメータの変化によって故障率が平均値からどの程度変化するかが明確となる。このことにより、出荷判断基準として故障率とその累積確率を設定し、生産管理を行うことが可能になる。製品安全評価基準を設定する際、実環境を考慮して基準値を制御することも可能になる。

Table 3 Environment parameter and operational profile: Case-1 (Japan climate example).

t_{ac} (°C)	τ_{on}	τ_{off}	Phase		
57	0.1	0.9	n (cycle/year)	t_{ae} (°C)	ΔT (°C)
			550	30	27

Table 4 Environment parameter and operational profile: Case-2 (severe condition example).

t_{ac} (°C)	τ_{on}	τ_{off}	Phase		
80	0.1	0.9	n (cycle/year)	t_{ae} (°C)	ΔT (°C)
			550	30	50

さらに、IEC/TR62380 の故障率の計算を適用するにあたり、決定した確率分布を考慮することで、故障率の確率分布の形状も分かり、上述の環境パラメータが変化した場合の故障率の確率分布の値の変化が明確となり、

製品の使用環境を考慮した基準値の設定が可能となる。

Fig.7 Comparison of failure rate derived from IEC/TR62380 and failure rate from NITE database of incident reports with its probability distribution function.

6 結 言

製品市場事故報告データのような少数の限られた故障率のデータから故障率の確率分布を効率的に推定するために、時間－故障率図において各時間における故障率を任意の時間における「等価故障率」への換算方法を提案した。また、製品の事故報告データベースから求めた製品の構成部品の故障率データを偶発故障領域と摩耗故障領域に分け、その境界点の決定方法と、それぞれの領域データから故障率の確率分布の決定方法を示した。扇風機の故障率データに適用した結果、偶発故障領域と摩耗故障領域の境界点の評価や、その確率分布としてワイブル確率分布で評価可能であること示した。

さらに、IEC/TR62380に従い標準的な使用環境で求めた故障率と劣悪環境で求めた故障率を上記ワイブル確率分布上で示し、確率分布が明らかでない IEC/TR62380 で求められる故障率に事故報告データベースの確率分布を適用した。

今後の展望として、故障率を生産管理基準に適用する場合に、設計目標に標準パラメータを設定し、出荷判断を行う基準値に、累積確率値で与えられる故障率を設定する評価基準設定方法が実現可能になる。このように、安全評価適合確率に従った基準値の設定が可能となり、確率分布に従って基準値の制御がより効果的に行えるようになり、より有効な製品安全評価基準を設けることができる。

参 考 文 献

- 1) IEC international Standard IEC62368-1 “Audio/video, information and communication technology equipment - Part 1: Safety requirements”, (2010).
- 2) Y. Harada, N. Waris, T. Kurashiki and M. Zako, “A study on a management system for pursuing product safety of consumer electronics products using hazard based assessment”, 2012 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering (ISPCE), CD-ROM, pp. 31-38 (2012) IEEE.
- 3) M. Ichikawa, “Reliability engineering”, pp10-19 (1988) Shokabo Inc.
- 4) IEC international Standard, IEC/TR62380, “Reliability data handbook - Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment”, (2004).
- 5) Product Incidents report information database, National Institute of Technology and Evaluation, <http://www.jiko.nite.go.jp/php/jiko/index.html>, (accessed September 1st, 2013), (2013).
- 6) K. Kawano, “Consideration of Aging degradation”, Life and Safety Journal, Vol. 10, pp20-25 (2010) National Institute of Technology and Evaluation.
- 7) Press release on the avoidance of accidents of air-conditioners and electric fans (Alert report), (June 24th, 2012), National Institute of Technology and Evaluation, <http://www.nite.go.jp/jiko/press/prs120621.html>, (accessed September 1st, 2013).
- 8) Japanese Industrial Standard JIS C6901-1, “Electric fan”, Japanese Industrial Standards Committee (2007).