

信号用電子機器の延命対策に関する定量評価手法

藤田 浩由* 高崎 建 進藤 卓朗 神谷 剛志 (鉄道総合技術研究所)

Quantitative Evaluation Method of Lifetime Prolonging Measures for Signalling Electronic Equipment

Hiroyuki Fujita*, Ken Takasaki, Takuro Shindo, Tsuyoshi Kamiya (Railway Technical Research Institute)

Against the background of the recent semiconductor shortage, the availability of supply has become an issue for signalling electronic equipment. Furthermore, there is a strong need for a lifetime prolonging in hopes of reducing replacement costs. The useful life of signalling electronic equipment depends on the life of the electronic components and the solder joints with the substrate, thus it is possible to prolong the lifetime by selecting electronic components and improving the using environment. In this paper, a method for quantitatively evaluating the effect of lifetime prolonging measures was investigated by utilizing the lifetime evaluation method for signalling electronic equipment that has been developed in the past.

キーワード：信号用電子機器，電子部品，延命対策，寿命予測，定量評価手法

(Keywords, Signalling Electronic Equipment, Electronic Part, Lifetime Prolonging Measure, Lifetime Estimation, Electronic Part, Quantitative Evaluation Method)

1. はじめに

鉄道信号設備は、列車の安全・安定運行を確保するための設備として、沿線に広く導入されている。また、信号設備の高機能化および小型化に伴い、リレー制御による継電機器から電子機器への置換えが進んで久しい。一方で、電子機器は劣化傾向の把握が困難であることが多く、導入された電子機器の更新時期の適切な設定が課題となっている。更新にかかるコスト低減を期待した、長寿命化に対する高いニーズが存在しており、特に昨今の半導体不足を背景に供給性が新たな課題となるのに伴い、そのニーズはますます高まっている。

これまでに著者らは、機器室等の屋内ならびに鉄道沿線環境に設置されている信号用電子機器（以下、それぞれ屋内電子機器、沿線電子機器とする）に着目し、使用環境に応じた摩耗故障期の故障率を算出する寿命評価手法の開発を行った⁽¹⁾⁽²⁾。本寿命評価手法において、信号用電子機器の耐用寿命は、構成する電子部品や基板とのはんだ接合部の寿命に依存することが示されており、電子部品の選定や構成要素の寿命に影響を与える使用環境の改善などで延命を図ることができると考えられる。

そこで、これまでに開発した寿命評価手法を活用し、延命対策の効果を定量的に評価する手法について検討した。本稿では、寿命評価手法の概要を述べるとともに、延命対策として取り得る手段ならびに対策効果の定量評価手法について、ケーススタディを実施した結果と合わせて示す。

2. 信号用電子機器の寿命評価手法

本章では、これまでに開発した信号用電子機器の寿命評価手法の概要について述べる。

〈2・1〉寿命評価のアプローチ 信号用電子機器は、複数の基板から構成されることが多く、各基板には電子部品がはんだにより接合され、回路が構成されている。したがって、電子機器全体の動作を阻害する故障は、電子部品故障、基板故障、はんだ接合部故障の3点に分類される。過去に鉄道事業者ならびに著者らにより、信号用電子機器の撤去品調査を行った結果、アルミ電解コンデンサなどの有寿命部品に明確な特性変化（劣化）を観測するとともに、沿線電子機器において温度変化に起因するはんだクラックを確認した。また、基板上の配線には錆や亀裂、断線などの特異な点は確認されなかった。ゆえに、電子部品およびはんだ接合部を寿命評価の対象部位として扱うこととした。

また、撤去品調査ならびに使用環境に関する現地調査を行った結果、沿線電子機器において寿命に影響する環境ストレスについては、温湿度が支配的であること示された。

そこで、図1に示すように沿線電子機器の寿命評価については、実装電子部品の寿命予測（部品評価）と接合部を含む基板の寿命予測（基板評価）の2つのアプローチで実施することとした。以下、2.2節に電子部品の寿命予測手法について述べる。

〈2・2〉電子部品の寿命予測手法（部品評価） 本節では、図1に示す沿線電子機器の寿命評価手法のうち、電子部品の寿命予測手法として、主機能に影響する部品抽出、信頼

性試験データの取得、使用環境条件での寿命算出の 3 段階について概要を示す。

(1) 主機能に影響する部品抽出

対象機器において、構成する電子部品が寿命となった場合に、当該機器の機能に与える影響度解析を FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) の手法を用い、影響なし (Lv. 0)、動作不安定 (Lv. 1)、部分機能停止 (Lv. 2)、ユニット停止 (Lv. 3)、装置機能停止 (Lv. 4) までの 5 段階のレベルを定義して実施する。基本的には、レベル 2 以上の影響度であれば、自己診断機能により故障検出が可能である一方で、機能に影響があるため、その部品寿命を機器寿命と捉えることができる。その結果、アルミ電解コンデンサや光系素子 (フォトカプラ) に代表される有寿命と考えられる部品、ならびに発熱の大きい部品を抽出することになる。

(2) 信頼性試験データの取得

抽出した電子部品について、当該部品製作メーカより信頼性試験データを取得し、加速条件 (温湿度、電圧・電流)、試験時間、試料数、故障判定基準などの試験条件を把握する。ここで、後述する累積故障確率の経年変化を導出するためには、部品寿命まで試験を実施した信頼性決定試験データの取得が望ましいが、一般には公規格に基づく信頼性適合試験データのみが多い⁽³⁾。

いずれの場合であってもメーカによる既実施の信頼性試験データを活用することで、新たな加速試験の実施を不要とすることができる。

(3) 使用環境条件での寿命予測

信頼性試験データを実際の使用環境に合わせるため、加速モデルを使用して、使用環境下での故障時間 L_1 を算出する (加速係数 AF を求め、検証時間 L_0 との積で算出)。このとき、故障メカニズムが複数想定される場合には、それぞれに対応した加速モデルにより故障時間を並列で算出し、最短時間となるものを採用する。なお、加速モデルは、機器稼働時のストレス要因に関係するものを選定することとし、部品製作メーカ毎にモデルが異なる場合は、対象部品の製作メーカに合わせて選定することとする。アルミ電解コンデンサ、フォトカプラにおける代表的な加速モデルとして、それぞれ電解液蒸散に伴う静電容量低下を表す $10^{\circ}C2$ 倍則 (アレニウス則の近似) を式 (1)、内蔵する LED の輝度低下を表す Black モデルを式 (2) に示す。

$$L_1 = L_0 \cdot 2^{\left(\frac{T_0 - T_1}{10}\right)} \quad (1)$$

$$L_1 = L_0 \cdot \left(\frac{J_0}{J_1}\right)^n \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (2)$$

ここで、 E_a は活性化エネルギー、 k はボルツマン定数、 J は電流密度、 T は絶対温度、 n は係数を示し、添え字の 1 は使用環境条件、0 は試験環境条件を示す。

また、電子部品の信頼性試験データより、検証範囲を特定する。信頼性決定試験を実施している部品の場合は、定義されている故障時間を使用する。一方、信頼性適合試験のみを

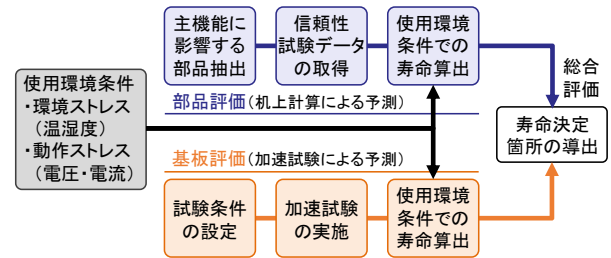


図 1 沿線電子機器の寿命評価手法の概要

Fig. 1. Overview of lifetime evaluation method for wayside signalling electronic equipment.

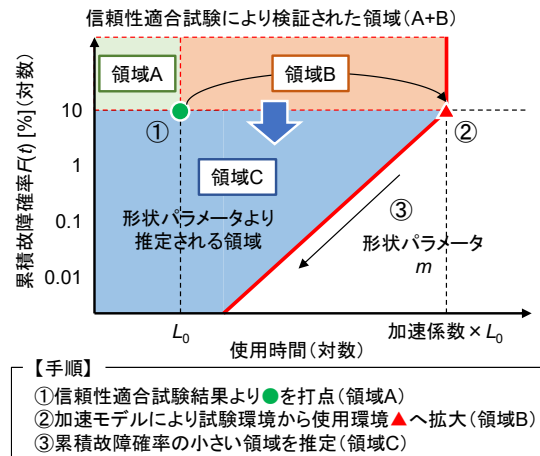


図 2 信頼性適合試験に基づく累積故障確率の経年変化推定手順

Fig. 2. Estimation method of aged deterioration by reliability compliance test.

実施している部品に関しては、信頼水準 (C_L) における試料数 (n) で規定される累積故障確率 ($F(t)$) の値を式 (3) より求める⁽¹⁾。

$$F(t) = 1 - (1 - C_L)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

ここで、信頼性適合試験結果より累積故障確率の経年変化を推定する手法を図 2 に示す。例えば、試料数 22 個、信頼水準 90%、故障数 0 個の試験結果で検証可能な領域は、式 (3) より図 2 中の A で示される領域となる ($F(t) = 10\%$)。本領域を加速モデルにより使用環境下での故障時間に拡大すると、B の領域となる。さらに、図 2 に示したようなワイブルプロット上での故障分布の形状パラメータ (m) を経験的に決定し、累積故障確率の小さい領域を推定すると、検証領域は C まで拡大できることとなる。これは、B において 1 個目の故障が発生したと仮定し、電子部品毎に最小と考えられる形状パラメータの値を定める (経験値の中での安全側) ことで求められる最悪想定 of 拡大検証領域を推定したものと云える。

このように、図 2 の関係が得られると、任意の累積故障確率に至るまでの時間を推定することができるため、対象部品における耐用寿命の決定を可能としている。

3. 延命対策として取り得る手段

〈3・1〉 **延命対策の考え方** 信号用電子機器の延命対策として取り得る手段について、対象機器の設計変更、および使用環境の改善の大きく 2 種類的手段に分類し、2 章で述べた寿命評価手法に基づき検討を行った。前者は、対象電子機器を構成する電子部品の選定や回路構成など、後者は、寿命の支配的要因である温湿度環境の改善などが該当する。以下、3.2、3.3 節にそれぞれの具体的な手段について述べる。

〈3・2〉 **対象機器の設計変更による対策** 本対策は、電子部品の選定と回路構成の見直しを主とする。対象機器を構成する電子部品のうち、寿命評価手法にて故障に至る時間が短い部品を抽出し、抽出された部品に対して対策を行う。対策として取り得る手段としては、①部品自体を長寿命対応品あるいは②信頼性試験条件の厳しいものに変更すること、③回路構成を見直すことで、部品を定格値以下で動作させるディレーティングの割合を高めることが挙げられる。それぞれの具体的な手段を表 1 に示す。一方、はんだ接合部については、応力を緩和する基板設計の見直しなどの対策も挙げられる。

なお、本対策は、設計変更を伴うため、既製品の延命対策にはなりにくいが、本質的な対策となることから手段としては有効と考える。

〈3・3〉 **使用環境の見直しによる対策** 本対策は、対象機器の使用環境のうち、寿命の支配的要因である温湿度環境の見直しを主とする。温湿度環境の見直しは、これまでに鉄道事業者やメーカーが様々な取り組みをしており、代表的な事例では、直射日光による温度上昇を防ぐための収容箱への遮蔽板設置がある。遮蔽板を設置することで、収容箱内の温度変化が緩やかとなり、日間温度差(最高温度と最低温度の差分)が小さくなるとともに、平均温度も若干低下することが示されている⁽²⁾。寿命評価手法を踏まえると、上記事例のような改善により、信頼性(加速)試験条件と使用環境条件との差が大きくなるため、加速係数の増加分だけ対策効果が期待できる。

なお、本対策は、対象機器自体への対策ではなく、使用環境による対策となるため、既製品の延命対策として有効である。そのため、現在、著者らは使用環境の対象を温度と湿度に区分し、温度については収容箱への遮蔽板設置、表面への機能性塗料の塗布、放熱フィンの設置などによる温度ならびに温度差低減対策を、湿度については収容箱内部への木板、乾燥剤、吸湿材の設置などによる湿度低減対策を実施し、鉄道総研所内にて比較検証試験を行っている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

4. 延命対策効果の定量評価手法

〈4・1〉 **延命時間の定量化** 3 章で示した延命対策の実施効果について、定量的な評価を行うため、延命時間への換算を行う。これにより、各対策での見直し効果が延命時間という同一スケールで比較できるため、費用対効果の評価の一

表 1 設計変更による延命対策の手段

Table 1 Examples of lifetime prolonging measures due to design change for equipment.

対象	手段	具体例
部品選定	長寿命対応品	保証時間(検証時間 L_0) が長い部品を選定 例) 検証時間 $L_0 = 1,000\text{h} \rightarrow 5,000\text{h}$
	信頼性試験条件の厳しい部品	試験での検証温度や電圧・電流が厳しい条件、あるいは試料数の大きい部品を選定 例) 試験温度 $T_0 = 105^\circ\text{C} \rightarrow 125^\circ\text{C}$ 試験電圧 $V_0 = 5\text{V} \rightarrow 6\text{V}$ 試料数 $n = 10 \text{ 個} \rightarrow 22 \text{ 個}$
回路構成	ディレーティング	回路構成を見直すことで、使用条件を緩和(加速係数の増加、故障判定しきい値の緩和) 例) 使用電圧 $V_1 = 6\text{V} \rightarrow 5\text{V}$ 使用電流 $I_1 = 20\text{mA} \rightarrow 10\text{mA}$ 故障判定しきい値 初期値 -20% 低下 $\rightarrow -30\%$ 低下

元化に寄与できると考える。

延命時間の定量化にあたっては、2 章で述べた寿命評価手法を活用する。対象機器の設計変更による対策において、部品選定の見直しについては、寿命評価の基準となる信頼性試験条件(試験時間、試験温度、試料数など)が変更となる。したがって、見直し前後の電子部品の信頼性試験条件を用い、寿命評価結果を比較することで、延命時間を導出することができる。一方、回路構成の見直しについては、ディレーティングによる使用電圧や故障判定しきい値などの使用条件の変更となるため、見直し前後の電子部品の使用条件を用い、上記と同様に寿命評価結果を比較することで、延命時間を導出することができる。また、使用環境の見直しによる対策においても、回路構成の見直しと同様に温湿度などの使用条件の変更となる。

すなわち、各延命対策による効果は、信頼性(加速)試験条件と使用環境条件との差分による加速係数の増加分(図 2 中の領域 B の拡大分)により、延命時間に換算することで定量評価が可能となる。なお、試料数については、式(3)により、信頼性試験結果の累積故障確率における検証範囲を対応付ける要素であり、試料数が多くなるほど、より小さい領域の累積故障確率まで検証範囲とすることができる。

〈4・2〉 **ケーススタディ** 本節では、延命対策の手段毎に延命時間を試算したケーススタディ結果について述べる。延命対策の手段は、部品選定の見直しにおいては長寿命対応品および信頼性試験条件の厳しい部品への変更、回路構成の見直しにおいてはディレーティング、使用環境の改善においては温度、湿度、温度差の低減の事例を対象とした。延命対策効果の定量化結果を表 2 に示す。なお、はんだ接合部以外の電子部品は、累積故障確率 0.1%に至るまでの時間(B0.1 life)を試算した。

部品選定の見直しにおいては、アルミ電解コンデンサを例に、信頼性試験条件として試験時間、試験温度、試料数を変更した場合の延命時間を試算した。試験時間および試験温度の変更に対しては加速モデルとして、 10°C^2 倍則である

表 2 延命対策効果の定量化結果 (ケーススタディ)

Table 2 Results of quantitative evaluation by each lifetime prolonging measures.

対象	手段	試算対象・条件※1	対策箇所	関係式 (加速モデル など)	試算結果	
					延命時間 (年) ※2 (対策前・対策後の 寿命予測値)	延命効果 (倍) ※3
部品 選定	長寿命対応品	アルミ電解コンデンサ $L_0 = 1,000\text{h}$, $T_0 = 105^\circ\text{C}$, $n = 6$ 個, 部品 発熱 $+10^\circ\text{C}$, 収容箱平均温度 $+5^\circ\text{C}$	$L_0 = 5000\text{h}$	式 (1)	16.0 (4.0・20.0)	+5.0
	信頼性試験条件の 厳しい部品		$T_0 = 125^\circ\text{C}$	式 (1)	12.0 (4.0・16.0)	+4.0
			$n = 22$ 個	式 (3)	1.5 (4.0・5.5)	+1.4
回路 構成	ディレーティング	フォトカプラ $L_0 = 60,000\text{h}$, $I_{F0} = 20\text{mA}$, $T_0 = 40^\circ\text{C}$, 収 容箱平均温度 $+5^\circ\text{C}$, $I_{F1} = 20\text{mA}$	$I_{F1} = 16\text{mA}$	式 (2)	10.3 (18.3・28.6)	+1.6
環境 改善	温度低減	アルミ電解コンデンサ $L_0 = 1,000\text{h}$, $T_0 = 105^\circ\text{C}$, $n = 6$ 個, 部品 発熱 $+10^\circ\text{C}$, 収容箱平均温度 $+5^\circ\text{C}$	収容箱平均 温度 $+2^\circ\text{C}$ (3°C 低減)	式 (1)	0.9 (4.0・4.9)	+1.2
		アルミ電解コンデンサ $L_0 = 2,000\text{h}$, $T_0 = 105^\circ\text{C}$, $n = 22$ 個, 部品 発熱 $+10^\circ\text{C}$, 収容箱平均温度 $+5^\circ\text{C}$	収容箱平均 温度 $+2^\circ\text{C}$ (3°C 低減)	式 (1)	2.6 (11.0・13.6)	+1.2
	温度差低減	はんだ接合部 試験サイクル 500 回, $T_{0\text{max}} = 80^\circ\text{C}$, $T_{0\text{min}}$ $= -20^\circ\text{C}$, 収容箱平均温度 $+5^\circ\text{C}$ 使用環境温度差 (遮蔽板無) $+10^\circ\text{C}$	使用環境 温度差 (遮蔽板有) $+5^\circ\text{C}$	式 (4)	28.1 (28.5・56.6)	+2.0
	湿度低減	半導体 $L_0 = 1,000\text{h}$, $T_0 = 85^\circ\text{C}$, $RH_0 = 85\%RH$, $n = 22$ 個	収容箱平均 湿度 -5%	式 (5)	21.9 (42.3・64.2)	+1.5

※1 試算条件共通：周囲の温湿度は、気象庁観測所（東京）の値を基準

※2 延命時間：はんだ接合部以外の試算結果は累積故障確率 0.1%に至るまでの時間 (B0.1 life)

※3 延命効果：対策後の寿命予測値を対策前の寿命予測値で除した値

式 (1) を用い、試料数の変更に対しては式 (3) により、延命時間の定量化を行った。対策前の電子部品と比較して、特に長寿命対応品 (1,000h 品→5,000h 品) や温度カテゴリ (T_0) のランクを上げた部品 (105°C品→125°C品) を選定することで、大幅な延命効果が期待できる結果となった。また、回路構成の見直しにおいては、フォトカプラを例に入力電流 I_F をディレーティング (20mA→16mA) した場合の延命時間を Black モデルである式 (2) を用いて試算し、加速モデルに応じた延命効果が得られることを確認した (式 (2) 中の電流密度 J を電流 I と読み替え)。さらに、使用環境の改善においては、アルミ電解コンデンサを例に温度低減 (平均温度 3°C 低減)、はんだ接合部を例に温度差低減 (遮蔽板有による温度差 5°C 低減)、半導体を例に湿度低減 (平均相対湿度 5% 低減) した場合の延命時間を試算した。はんだ接合部については、加速モデルとして、式 (4) に示す修正 Coffin-Manson 則を用い、半導体については式 (5) に示す相対湿度モデルを用いた。

$$L_1 = L_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_0}\right)^m \cdot \left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_1}\right)^n \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_{1\text{max}}} - \frac{1}{T_{0\text{max}}}\right)\right] \quad (4)$$

$$L_1 = L_0 \cdot \left(\frac{RH_0}{RH_1}\right)^n \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (5)$$

ここで、 f は 1 日当たりの温度サイクル数、 ΔT は温度差、 T_{max} は最高温度、 RH は相対湿度、 m , n は係数を示し、添え字の 1 は使用環境条件、0 は試験環境条件を示す。いずれも使用環境の改善に対して、加速モデルに応じた延命効果が得られることを確認した。

このように、延命対策の手段毎に延命時間を定量的に示

すことができたと言える。つまり、本定量評価手法を用いることで、延命時間に対して、各対策にかかる費用や実現性を考慮した実施判断が可能となると考えられる。

5. おわりに

本稿では、信号用電子機器の寿命評価手法の概要を述べるとともに、延命対策として取り得る手段ならびに対策効果の定量評価手法について、ケーススタディを実施した結果と合わせて示した。

延命対策の手段として、対象電子機器を構成する電子部品の選定や回路構成の見直し、および寿命の支配的要因である温湿度環境の改善を挙げた。延命対策の実施効果については、寿命評価手法を活用し、延命時間へ換算する手法を構築することで、各対策での見直し効果が延命時間という同一スケールで比較できるため、費用対効果の評価の一元化に寄与できることを確認した。

今後、本手法を取り入れることで、従来一元化された指標での評価が困難であった費用対効果を定量化し、信号用電子機器のライフサイクルコスト最適化への寄与を目指す。

文 献

- (1) 藤田浩由 他：電子運動装置の使用環境を考慮した寿命評価手法の開発、鉄道総研報告, Vol.32, No.5, pp.23-28, 2018
- (2) 国崎愛子 他：鉄道沿線信号設備における電子機器の寿命予測手法、鉄道総研報告, Vol.34, No.7, pp.11-16, 2020
- (3) 松岡敏成：品質保証のための電子部品の信頼性試験、日本接着学会誌, Vol.50, No.10, pp.318-325, 2014
- (4) 進藤卓朗 他、信号用電子機器の温度環境改善に関する検討、第 29 回鉄道技術連合シンポジウム, 2022 (発表予定)
- (5) 神谷剛志 他：信号用電子機器の湿度環境改善に関する検討、第 29 回鉄道技術連合シンポジウム, 2022 (発表予定)