電子連動装置の使用環境を考慮した寿命評価手法の開発

藤田　浩由*　　丹羽　順一**　　新井　英樹*

Development of Lifetime Evaluation Method for Electronic Interlocking Equipment in Consideration of Usage Environment

Hiroyuki FUJITA　　Junichi NIWA　　Hideki ARAI

With regard to the electronic interlocking equipment introduced in the latter half of the 1980s, the time to replace a large portion of the equipment introduced in the early stage has come, and since the labor and economic burden required for the replacement is larger than that of other signalling facilities, technical development of life-time elongation is required for the purpose of leveling the burden. In this research, the authors developed a lifetime evaluation method to be applied to the periods of deterioration progression with time based on the redundancy configuration and the occurrence records of faults excluding disturbance of electronic interlocking equipment. In this method, based on the reliability test data collected by the parts supplier, the electronic parts that most contribute to the equipment life are identified by the use of the acceleration model for each part and with consideration on the environment in which they are used. Additionally, because it covers the wear failure period, the authors decided to treat the life-time of the specified electronic parts as the equipment life. By applying this method to the electronic interlocking equipment for small stations, the authors were able to identify the electronic parts in which the fault appears first in the equipment and to present the change of the failure risks with time.

キーワード：電子連動装置，摩耗故障，劣化，加速モデル，寿命評価，電子部品

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，図 1 に示すような従来の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，導入が進めら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。とりわけ，1980 年代後半から導入された電子連動装置については，全国の JR 会社において，現在 1,000 台程度が稼働しており，そのうち初期に導入された多くの装置（数百台オーダ）が更新時期を迎えている。電子連動装置は，他の信号設備と比較して更新に要する人的・経済的負担が大きく，その負担の平準化を図る目的から耐用寿命延伸の技術的評価が求められている。つまり，使用環境を考慮した電子連動装置の寿命評価手法を確立し，劣化兆候および更新時期を明確にする意義は大きいと言える。

そこで，電子連動装置を構成する各電子部品について，当該装置の使用環境を考慮した部品加速モデルを整理するとともに，モデル計算により得られる値から電子連動装置としての耐用寿命を推測する方法について検討を行った。

本論文では，電子連動装置の稼働状況ならびにシステム構成について述べるとともに，摩耗故障による寿命評価手法として提案した 5 段階の寿命評価ステップについて示す。特に信頼性適合試験データを活用した寿命評価手法について，ケーススタディでの事例とともに述べる。

＊　信号・情報技術研究部　信号システム研究室
＊＊　信号システム研究室（現 日本信号株式会社）

2．電子連動装置における寿命の考え方

2.1　電子部品の故障分布

電子部品の故障分布は，初期故障期，偶発故障期，摩耗故障期の 3 期間に大別される。図 2 に使用時間と瞬間

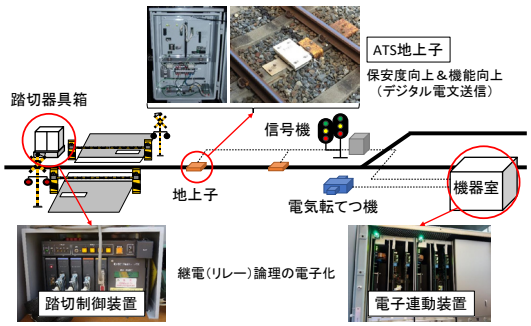

図 1　鉄道信号設備の電子化事例

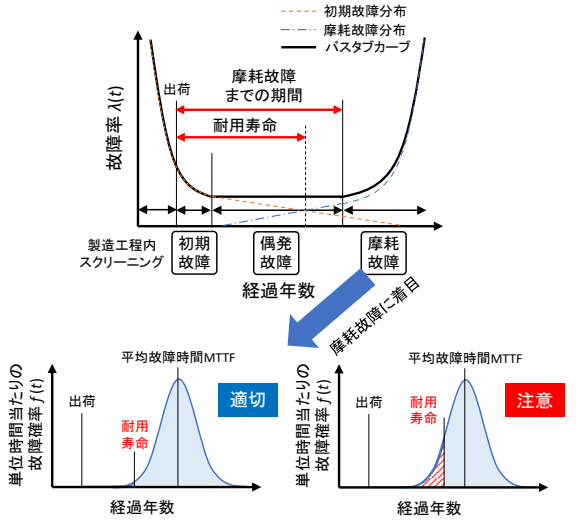

図２　バスタブカーブと摩耗故障に着目した故障分布

故障率（λ）との関係を示す。図２は，一般にバスタブカーブと言われている。初期故障のほとんどは，製造工程内でスクリーニングされるが，スクリーニングしきれなかった電子部品は，稼働開始後に比較的短時間で故障が顕在化することがある。偶発故障は，平均故障とも呼ばれ，時間に対して一定の故障率になるとされているが，実際には故障率が減少傾向を続ける初期故障の延長と考えるのが妥当である[1)]。また，雷害等の外部要因を含めて偶発的な故障と呼ぶ場合もある。摩耗故障は，電子部品を構成する材料の寿命によって生じる故障期間であり，部品そのものの寿命である。故障は，時間とともに増加し，いずれすべてが故障に至る。なお，耐用寿命は装置の故障率が著しく増大し，経済的に引き合わなくなるまでの時間と定義されている[2)]。すなわち，図２に示すように一般には耐用期間内において，摩耗故障を発生させないことが重要であり，耐用寿命が摩耗故障期に大きく入り込むと，故障率が著しく増大（故障数自体の増加が顕著化）することがわかる。

2.2　寿命評価対象故障期間

電子連動装置は，製作メーカによる違いはあるものの，図３に示すように概ね論理部，入力部および出力部等の各ユニットから構成され，信頼性向上のために冗長構成となっているものが多い。そのため，片系故障が発生した場合でも直ちにシステム停止に至ることはなく，電子連動装置の故障が起因して運転阻害となった件数は少ないことが判明している。例えば，国内全鉄軌道事業者の運転事故・インシデント・輸送障害（列車の運休もしくは30分以上の遅延が発生したもの）の情報が集約された鉄道安全データベースを用い，2011年度～2013年度の電子連動装置の故障に起因する障害発生件数を調査したところ，各年度ともに信号設備障害件数の1%未満で

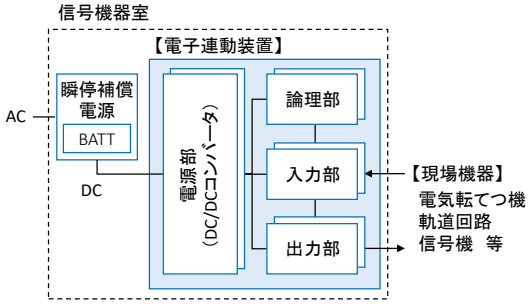

図３　電子連動装置の主な構成

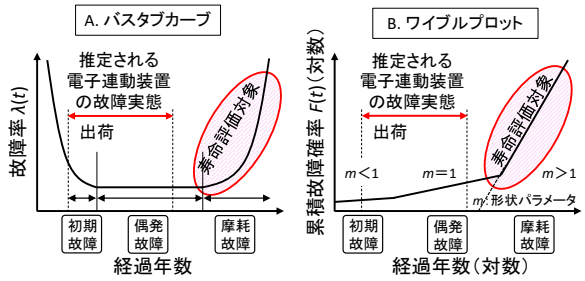

図４　電子連動装置の故障実態
（A：バスタブカーブ，B：ワイブルプロット）

あった。また，電子連動装置製作メーカに返戻された故障データを解析したところ，電源部で使用されているアルミ電解コンデンサを除き[3)]，経年20数年までの装置において同一箇所，同一部品型式での故障の偏りが見られず，稼働母数を考慮しても摩耗故障期には至っていないことを確認した。この分析結果を元に，電子連動装置における故障実態とバスタブカーブとの関係を示すと図４（A）のようになる。また，バスタブカーブを累積故障確率と対数スケールの経過年数との関係で表わしたワイブルプロットのイメージを図４（B）に示す。

したがって，電子連動装置の構成ならびに故障発生状況を考慮すると，一定の故障率で推移する偶発故障期は，装置稼働に対して大きな影響を与えないと考えられる。一方，故障率自体が増加に転じる摩耗故障期については，確保する予備品が相当数必要となるほか，片系故障発生から両系故障となるまでの確率が上昇し，列車の運行に影響を与える可能性が高まることから寿命評価の対象を摩耗故障期とすることとした。

2.3　部品寿命と装置寿命の関係

一般に装置製作メーカが設計時に算出する平均故障時間（MTTF：Mean Time to Failure）あるいは平均故障間動作時間（MTBF：Mean Time between Failure）は，偶発故障期における部品故障率を基準としている。摩耗故障期での部品故障率の増加は，設計時のMTTFおよびMTBFから逸脱する要素となるため，当初の保全方法では両系故障となる可能性が高まると言える。また，アルミ電解コンデンサやフォトカプラ等に代表される有寿命

部品は，摩耗故障期に至る時期が半導体部品等よりも早く，その故障分布の特徴から急激に故障率が増加する傾向にある。そのため，寿命決定部品としては，有寿命部品が特定されることが推測されるとともに，特定部品の故障率の増加傾向から，装置全体の故障率に展開した場合であっても当該部品の故障率が支配的であると考えられる。

したがって，寿命評価の対象を摩耗故障としたため，交換「しない」または「できない」部品かつ連動の主機能に影響する部品に着目し，最も短命となる部品寿命を装置寿命として代表させることとした。

3．寿命評価手法

電子連動装置の摩耗故障期を対象とした寿命評価は，次の5段階の寿命評価ステップにより行うこととした[4)5)]。①対象装置の使用環境の把握，②主機能に影響する電子部品の抽出，③抽出した電子部品の仕様およびストレス要因の把握，④加速モデルによる累積故障確率の推定，⑤得られた累積故障確率に基づく耐用寿命の設定・評価である。上記の寿命評価ステップは，既に稼働している装置に対して適用するものであり，新規に設計・製造する装置においては，⑤の耐用寿命を先に決定し，それを実現できる部品の調達および回路設計を行うことが望ましい。また，本手法は，部品メーカが保有している信頼性試験データの活用を前提としており，これにより新たな試験時間を要することなく短期間での推定を可能としている。以下に各段階の詳細について述べる。

3.1　対象機器の使用環境の把握

電子部品の劣化要因として，環境ストレスならびに動作ストレスに分類した場合に，影響する要因を抽出した。結果を表1に示す。今回対象とした電子連動装置の使用環境は，空調で管理された機器室内設置かつ終日通電を前提としており，また，これまでに実施した劣化調査[3)]および環境調査結果を踏まえ，主な劣化要因として，環境ストレスとしての熱的要因（定常温度），ならびに動作ストレスとしての電気的要因（電圧・電流負荷）を考慮することとした。

3.2　主機能に影響する電子部品の抽出

電子連動装置を構成する電子部品が寿命に達した場合に，当該装置の機能に与える影響を明確に結びつけることで，部品故障の影響度を導出する。部品故障から装置故障に至る影響度解析は，FMEA（Failure Mode and Effect Analysis）の手法を用いて表2に示す6段階のレベルを定義することで実施した。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とともに，機能に影響があるため，部品寿命を装置寿命と捉えることが可能と考えられる。レベル1のような動作不安定の領域においては，故障が顕在化しにくいため，部品寿命をそのまま装置寿命と断定できないが，部品の種別を考慮した上で抽出の判定を行うことが望ましいと言える。今回は，片系故障以上となるレベル2以上を抽出対象として選定した。

3.3　電子部品の仕様およびストレス要因の把握

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入手し，加速条件（温度，電圧・電流），試験時間，試料数，故障判定基準等の試験条件を把握する。また，電子連動装置稼働状態において，部品温度ならびに電圧・電流等を測定し，ストレス要因について定量化を行う。ここで，後述する累積故障確率の経年変化の導出にあたっては，部品寿命まで試験を実施した信頼性決定試験（対象部品の故障率，平均故障寿命，寿命等の信頼性特性値を決定するための試験）のデータ取得が望ましいが，一般的には，JIS等に代表される公規格に基づく信頼性適合試験（対象部品の信頼性特性値が要求故障率に合致しているかどうかを判定する試験）のみ実施している部品が多いと予想される。

3.4　加速モデルによる累積故障確率の推定

電子部品の信頼性試験データより，検証範囲を特定す

表1　劣化要因分類

No.	大別	要因分類		電子連動装置環境（想定）
		要因1	要因2	
1	環境ストレス	熱	定常温度	機器室25℃
2			温度変化	なし
3		電気	電磁気・サージ	外部要因
4		周囲環境	雰囲気	良好
5			水分（湿度）	良好
6		機械	振動，衝撃	なし
7			曲げ，疲労	なし
8	動作ストレス	電気	電圧	部品による
9			電流負荷	部品による

表2　電子連動装置の故障影響度解析

レベル	装置影響度	事例
0	影響なし	機能に影響を与えない故障 （表示LED）
1	動作不安定	ユニット動作が不安定となる故障 （ICバイパスコンデンサ）
2	部分機能停止	回路ブロックが機能停止となるが，ユニットや装置の機能は継続する故障 （通信，入出力回路）
3	ユニット停止	ユニット基板が機能停止となるが，装置の機能は継続する故障 （CPU，ローカルバス）
4	当該系停止	系全体が機能停止となるが，装置の機能が継続する故障（WDT回路）
5	連動全機能停止	連動装置全体が機能停止となる故障

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実施している部品の場合，例えば，「1,000h 保証品」という記載は，JIS 等の公規格に基づく試験を合格した製品という意味であり，具体的な耐用寿命を保証するものではない。そこで，故障時間が定義されている場合（信頼性決定試験を実施）はその値を活用し，一般的な推定手順により累積故障確率の推定を行う[6]。公規格に基づく試験実施のみの場合（信頼性適合試験のみ実施）はサンプルサイズで規定される累積故障確率 $F(t)$ の値（最悪値想定）を参照することとした。ここでは，信頼性適合試験データを活用した累積故障確率の推定手法について示す。

信頼性適合試験データを使用する場合，故障 0 個のときの累積故障確率を求めることとなる。信頼性を調査するために標本データを解析する場合には，信頼性が不足しているものを誤って合格と判断し，品質問題の発生につながる事象を回避できるように，信頼性を低めに推定する（＝不信頼度を高めに推定する）データ解析が一般に実施されている。ある時間 t における母集団の不信頼度（累積故障確率）が $F(t)$ であるとき，その時点で n 個抜取りを行った試料すべてが故障していない確率 P は (1) 式で表わされる。

$$P=\{1-F(t)\}^n \tag{1}$$

この P の値が故障 0 個で合格，故障 1 個で不合格と判定する標本データを使ったデータ解析において，信頼性が不足しているものを誤って合格と判断する確率となる。信頼性が不足している母集団を誤ることなく不合格と判定する，信頼性特性値を推定した結果に対する確からしさを示す信頼水準 C_L は (2) 式で表わすことができる。

$$C_L=1-P=1-\{1-F(t)\}^n \tag{2}$$

(2) 式を $F(t)$ について解くと (3) 式が得られる。

$$F(t)=1-(1-C_L)^{1/n} \tag{3}$$

(3) 式は，標本データ n 個を用い，信頼性が不足している母集団を信頼水準 C_L の確率で間違いなく不合格と判定することができる条件において，故障が 0 個である標本データが得られたときに推定できる母集団の累積故障確率を表している。これにより，試料数 n と累積故障確率 $F(t)$ との関係を導くことができる[7]。

また，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。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 5 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，試験時間を L_0 とすると，(3) 式より図 5 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を用いて使用環境下での故障時間に拡大すると，B の領域となる。図 4 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の拡大検証領域を推定したものと言える。つまり，推定された検証領域においては，摩耗故障が発生しないものとして扱うことができる。また，形状パラメータ（故障分布）は，電子部品毎，故障メカニズム毎に異なるため，評価対象の部品の使用環境に合わせ，十分に考慮したうえで選択する必要がある。形状パラメータの値が大きいほど，摩耗故障としての特性が強く現れることとなり，故障がある時期に集中する傾向となる。

なお，本推定手法は，信頼性試験研究会から提案されている電子部品の信頼性試験ガイドラインを参考に検討したものである[7]。

3.5 累積故障確率に基づく耐用寿命の設定・評価

電子部品毎の累積故障確率と使用時間の関係は，3.4 節により推定可能である。耐用寿命を定める際には，故障率の増加割合（傾向）および故障部品数により判定する。前者は現行耐用年数を基準とした使用年数延長時の故障率増加割合を，後者は導入装置数との積算による故障数の経年変化を導出する。これらを以下，故障リスクと呼ぶ。また，電子連動装置の寿命に最も寄与する電子

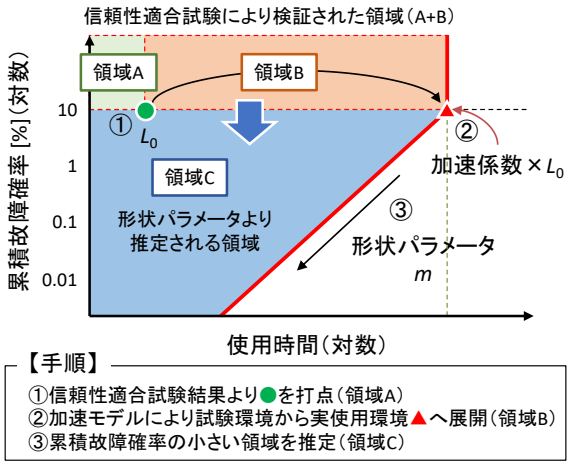

図 5　信頼性適合試験に基づく累積故障確率の経年変化推定手順

部品の特定を行い，当該部品寿命を装置寿命として代表させることとする。例えば，摩耗故障が具現化するまでを耐用寿命とすると，故障部品数による判定において，1 個目故障が発生する時期が最短となる部品を特定部品とし，その時期を装置寿命とすることがひとつの目安となる。また，別途許容可能な故障率を定めている場合は，これにかなう耐用寿命の設定が可能となる。

なお，耐用寿命の設定に際しては，本手法による摩耗故障期予測結果に加え，装置の供給性，技術サポート継続性，ならびに経済性等の劣化要因以外の要素も考慮することが望ましいと言える。

4．ケーススタディによる検討

3 章で述べた寿命評価手法を一般的な小駅用電子連動装置に適用し，評価を行った。評価にあたっては，論理部，入力部，出力部の各ユニットを対象とし，表 1 に示す機器室内条件を基本として実施した。ここで，電源部に関しては，オーバホール対象品であることから評価対象外とした。本章では，摩耗故障に着目した場合に最初に故障が現れると想定される電子部品の特定，および故障リスク（装置使用台数に応じた故障数ならびに現行耐用寿命を基準とした際の故障率増加割合）の経年変化の評価結果について示す。

今回のケーススタディ対象とした小駅用電子連動装置においては，構成部品点数が多いため，能動部品，LED デバイス，受動部品の 3 種に分類した上で，ストレス要因のうち発熱の大きい箇所をそれぞれ上位 3 点程度特定し，予測手法を適用した。ここでは，3.3 節，3.4 節について，論理部で使用している半導体（以下，部品 A）での事例をケーススタディの代表例として示す。

信頼性適合試験データにより，部品 A の連続動作＋高温バイアス試験条件は，試料数 215 個，試験時間 2,000h，環境温度 125℃，ゲート電圧 1.44V（定格 1.2V ＋ 20%），故障数 0 個であった。一方，実使用環境を測定すると，環境温度 35℃，ゲート電圧 1.2V であった。次に試料数 215 個，試験時間 2,000h より検証範囲を特定する。試料数で規定される累積故障確率（$F(t)$）は，信頼水準（C_L）を 90% とすると，(3) 式にて求めることができ，1.07% となった。また，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を算出した。ここでは，エレクトロマイグレーション（EM），経時的絶縁破壊（TDDB）ならびに負バイアス温度不安定性（NBTI）について，表 3 に示す 6 種類の加速モデルよりそれぞれ算出し，最短時間となるものを採用した。部品 A においては，酸化膜の厚さが 1.6nm であるため，表 3 中の No. 1，4 ～ 6 の 4 種類が対象となり，最短時間は TDDB の 92 年となった。これらの結果を用いて，累積故障確率の経年変化を図 5 で示した手法を適用して求める。結果を図 6 に示す。実使用環境下においては，2,000h の試験時間は 92 年となり，図中の領域は A から B へ拡大する。累積故障確率 1.07% 未満の領域は，半導体で考えられる最小値として，$m = 2$ で推定を行い，図中の C の領域が求められる。したがって，図 6 より部品 A では，例えば 89 年経過で累積故障確率 1%，28 年経過で 0.1% という関係が求められる。

なお，50 駅に導入されていると仮定すると，部品 A は 1 駅あたり 4 個使用されているため，200 個が稼働していることとなる。このとき，20 年経過では 0.1 個，30 年経過では 0.23 個となり，1 個未満の故障数予測となる。また，1 個目の故障発生は約 63 年と推定された。30 年経過後の現行耐用年数 20 年基準の故障率増加割合は，1.5 倍となった。部品 A における故障率増加割合および故障部品数の経年変化（5 年毎）を推定した結果を図 7 に示す。

同様に，入力部のフォトカプラ（以下，部品 B）について，同様の手順で累積故障確率と使用時間の関係を求め，50 駅に導入されている場合の故障率増加割合および故障部品数の経年変化（5 年毎）を推定した結果を図 8 に示す。1 個目故障の発生は約 29 年と推定され，評価対象とした他の部品を含め，当該装置において最初に摩

表 3　部品 A に適用する加速モデル

No.	故障モデル	加速モデル式	計算結果
1	EM	$L = L_0\left(\frac{J_1}{J_0}\right)^{-n}\exp\left\{-\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_0}\right)\right\}$	694 年
2	TDDB 5nm 以上	$L = L_0\exp\left\{\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_0}\right)-\gamma(E_{ox1}-E_{ox0})\right\}$	1,768 年
3	TDDB 5nm 以上	$L = L_0\exp\left\{\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_0}\right)+G\left(\frac{1}{E_{ox1}}-\frac{1}{E_{ox0}}\right)\right\}$	21 万年
4	TDDB 5nm 以下	$L = L_0\exp\left\{\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_0}\right)-\gamma'(V_{G1}-V_{G0})\right\}$	92 年
5	TDDB 2nm 以下	$L = L_0\left(\frac{V_{G1}}{V_{G0}}\right)^{-n'}\exp\left\{\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_0}\right)\right\}$	2 万年
6	NBTI	$L = L_0 10^{-\beta(E_1-E_0)}\exp\left\{\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_0}\right)\right\}$	3 万年

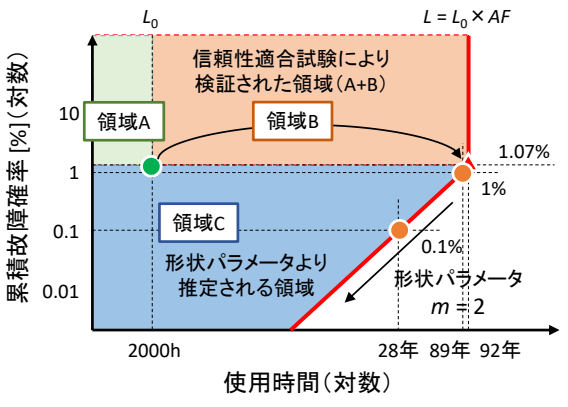

図 6　累積故障確率の経年変化推定結果（部品 A）

耗故障が現れる部品であった。これは部品 B の 1 駅あたりの使用数が多い（700 個超）ことも起因している。また，部品 B は一般に有寿命部品であることが知られており，故障率増加割合は部品 A と比較して大きいことが図 7 および図 8 より見て取れる（推定に使用した形状パラメータの値に依存）。したがって，電子連動装置の耐用寿命決定において，累積故障確率と導入装置数との積算により 1 個目故障が発生するまでを基本とすると，耐用寿命は約 29 年と判定される。同条件にて，29 年を超過して使用する場合は，事業者において故障リスクを認識した上で使用することとなる。

なお，故障率増加割合については，形状パラメータの値で決定されるため，安全側に見積もるために最小値を選択している。しかし，故障率増加割合の面では低く算出されることに注意が必要である。

5．おわりに

本論文では，電子連動装置を構成する各電子部品について，耐用寿命を推定する手法について検討を行い，摩耗故障を対象とした寿命評価手法を 5 段階の寿命評価ステップとして提案した。本手法では，部品メーカで保有している信頼性試験データの活用を前提に推定を行うこととしており，特に信頼性適合試験データからの累積故障確率の推定では最悪想定の見積もりとなるが，最初に摩耗故障が現れると想定される電子部品を特定することが可能となる。また，小駅用電子連動装置を対象にケーススタディを実施し，導入数に応じた摩耗故障数の経年変化，ならびに現行装置で定められている耐用年数に対する故障率の増加割合を当該装置導入事業者に示すことを可能とした。本手法は，電子連動装置の使用環境に応じた更新時期の策定に活用できると考えられる。

今後，電子連動装置以外の鉄道信号設備における電子機器への適用について検討を進めていくとともに，信号設備全般の電子機器の寿命・更新の考え方の体系化を行う予定である。

最後に，本研究を進めるにあたり，多くの助言をいただいた関係各位に深く感謝する。

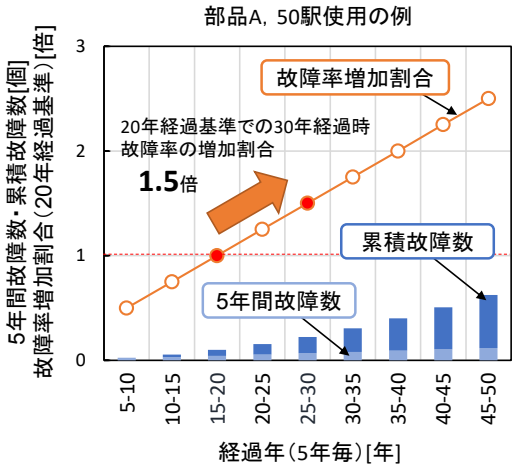

図 7　故障数ならびに現行耐用年数 20 年基準の故障率増加割合の経年変化（部品 A，50 駅使用）

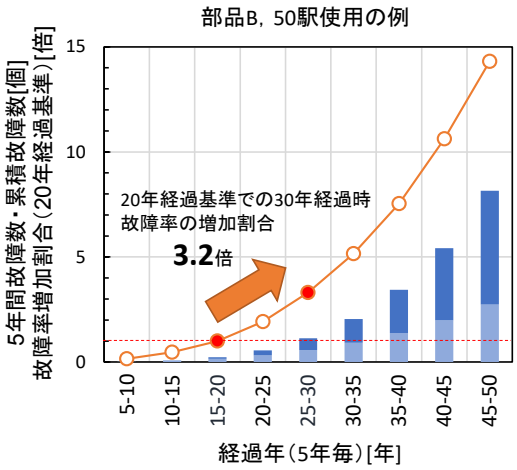

図 8　故障数ならびに現行耐用年数 20 年基準の故障率増加割合の経年変化（部品 B，50 駅使用）

文　献

1）JEITA：半導体デバイスの加速寿命試験運用ガイドライン，EDR-4704A，2007
2）故障物性研究会：新しい信頼性技術と管理手法，日刊工業新聞社，2011
3）宮瀬昇一郎，和田哲英，伊東和彦，山野井隆，志田洋，川原敬治，大串裕郁：鉄道電気設備における電気機器の劣化に関する調査（その 3），平成 26 年電気学会産業応用部門大会，No. 5-12, pp. V-173-V-176，2014
4）藤田浩由，丹羽純一，新井英樹，鈴木雅彦，久保田恭嗣，志田洋：電子連動装置の劣化・寿命評価の考え方，日本信頼性学会第 29 回秋季信頼性シンポジウム，pp. 89-92，2016
5）藤田浩由，丹羽順一，新井英樹：摩耗故障による電子連動装置の寿命予測に関する考察，電気学会交通・電気鉄道研究会資料，TER-17-006，pp. 29-34，2017
6）棟近雅彦，関哲朗：信頼性データ解析入門，日科技連，2011
7）松岡敏成：電子部品の信頼性試験ガイド（第 2 回）—摩耗故障に対する信頼性試験計画（計数抜取試験）—，REAJ 誌，Vol. 30，No. 5，pp. 435-440，2008