

信号用電子機器の寿命を診断する

近年、鉄道信号設備への電子機器の導入が進められています。一方、電子機器の劣化傾向の把握が困難であることが多いため、電子機器の更新時期の適切な設定が課題となっています。そこで、電子機器のうち電子連動装置に着目し、その使用環境において装置の寿命にもっとも寄与する電子部品を特定したうえで、当該部品の寿命から装置全体の寿命を評価する手法を開発しました。ここでは、電子連動装置における寿命の考え方を整理するとともに、評価手法ならびにケーススタディーを実施した結果について紹介します。



藤田 浩由
Hiroyuki Fujita
信号・情報技術研究部
信号システム研究室
副主任研究員
【専門分野】ATS、雷害
対策、電子機器の劣化・
寿命評価



新井 英樹
Hideki Arai
信号・情報技術研究部
信号システム研究室
室長
【専門分野】信号シス
テム一般

はじめに

鉄道信号設備は、列車の安全・安定輸送を確保するための設備として、沿線に広く導入されています。また、信号設備の高機能化および小型化にともない、リレー制御による継電機器から電子機器へ置き換えが進んでいます(図1)。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ます。とりわけ、1980年代後半から導入された電子連動装置(☞参照)については、初期に導入された多くの装置が更新時期を迎

えており、更新に要する人的・経済的負担が大きいため、耐用寿命を技術的に明確にする意義は大きいといえます。

そこで、電子連動装置を対象に装置を構成する各電子部品について、その使用環境において装置の寿命にもっとも寄与する部品を特定したうえで、当該部品の寿命から装置全体の寿命を評価する手法を開発しました。

☞ 電子連動装置

駅構内の信号機や転てつ器の制御と相互の鎖錠を行う連動装置を電子化した装置のことです。

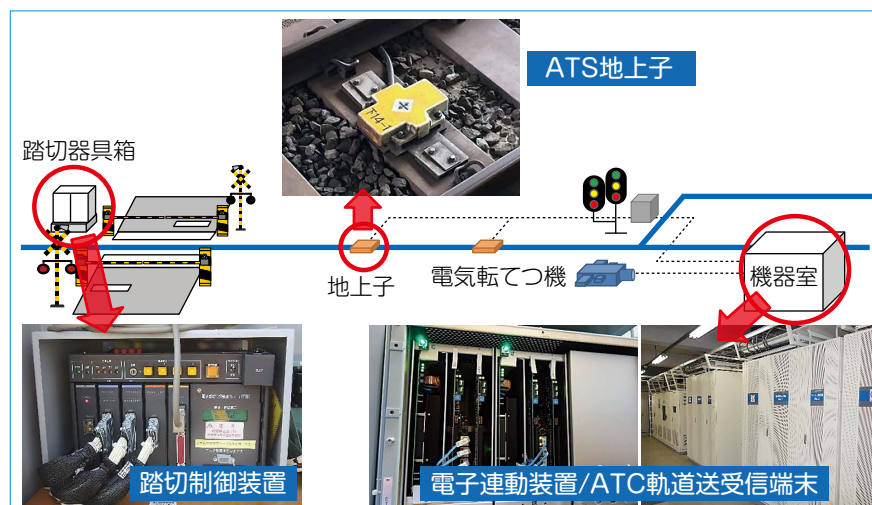


図1 信号用電子機器の設備イメージ

電子連動装置の寿命の考え方

(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期間に大別されます。図2に故障率(単位時間あたりに故障する確率)および累積故障確率(任意の時間で故障している確率)と経過年数との関係を示します。

図2(a)は、一般にバスタブカーブといわれています¹⁾。また、図2(b)は、ワイブルプロットといわれ、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現したものとなります。初期故障のほとんどは、製造工程内での不良品選別により排除されますが、排除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ります。偶発故障は、平均故障ともよばれ、時間に対して一定の故障率になるとされています。また、雷害などの外部要因による故障も偶発故障に含めることが一般的です。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す。故障は、時間とともに増加し、いずれすべてが故障に至ります。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ます。すなわち、図2に示すように一般には使用期間内において、摩耗故障を発生させないことが重要であり、耐用寿命を故障率が著しく増大(故障数自体の増加が顕著化)する摩耗故障期が訪れる前に設定する必要があります。

(2) 寿命評価対象故障期間

電子連動装置は、製作メーカーによる違いはあるものの、図3に示すようにおおむね論理部、入力部および出力部など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ます。そのため、片系故障が発生した場合でもただちにシステム停止に至る

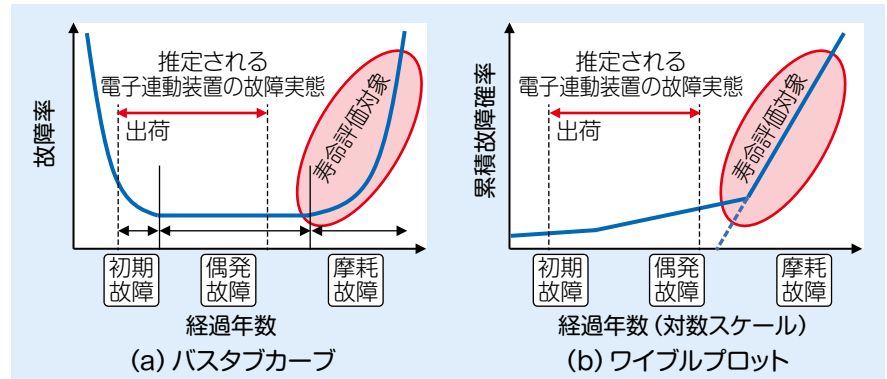


図2 バスタブカーブと摩耗故障に着目した故障分布

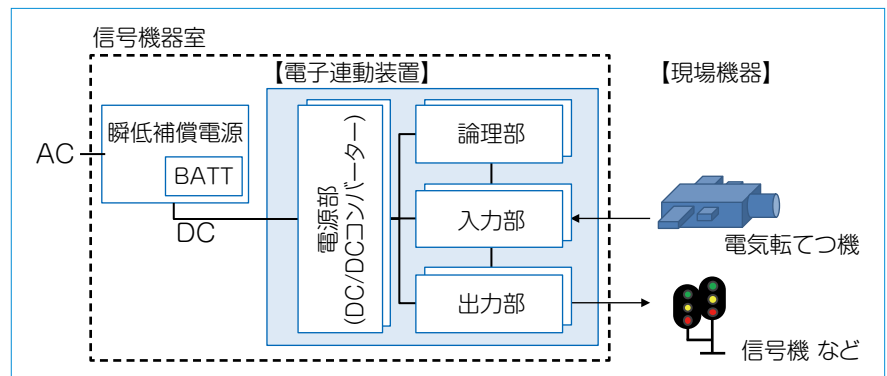


図3 電子連動装置の主な構成

ことはありません。電子連動装置の故障が要因となり、列車の運転に影響のあった件数は、鉄道安全データベースならびに鉄道事業者保有のデータより、少ないことが判明しています。また、電子連動装置製作メーカー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ーを除き²⁾、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ています。

つまり、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ます。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、列車の運転に影響を与える可能性が高まることから、電子連動装置の寿命評価では、摩耗故障期を推定することが重要といえます。

なお、装置を構成する部品のうち、交換できない電子部品、かつ連動機能に影響する電子部品の寿命を装置寿命として代表させることとしました。

開発した寿命評価手法

電子連動装置の摩耗故障期を対象と

信頼性試験

ここでは、部品メーカーが実施する試験を指します。部品が壊れるまで試験を実施した信頼性決定試験(故障率や寿命を求める試験)と、JISなどに代表される公規格に基づく信頼性適合試験(目標(要求)としている故障率をクリアしているかどうかを判定する試験)の2種類があります。

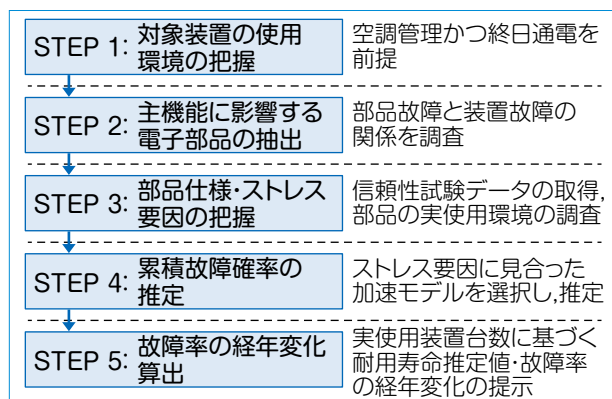


図4 寿命評価ステップ

表1 劣化要因分類

No.	大別	要因分類1	要因分類2	電子連動装置環境 (想定)
1	環境 ストレス	熱的要因	定常温度	機器室25℃
2			温度変化	なし
3		電氣的要因	電磁気・サージ	外部要因として整理
4			雰囲気	良好（活性ガスなし）
5		周囲環境要因	水分・湿度	良好（30～50%RH程度）
6			振動・衝撃・加速度	なし
7		機械的要因	曲げ・疲労・しゅう動	なし
8	動作 ストレス	電氣的要因	電圧	部品による
9			電流負荷	部品による

した寿命評価は、図4に示す5段階の寿命評価ステップにより行います。本手法では、部品メーカーで保有している信頼性試験(参照)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ます³⁾。以下に、各段階の詳細を記述します。

(1) 使用環境の把握

電子部品の劣化要因を環境ストレスならびに動作ストレスに分類し、影響する要因を抽出しました(表1)。今回対象とした電子連動装置の使用環境は、空調の管理された機器室内での設置かつ終日通電を前提としています。また、劣化調査²⁾⁴⁾および環境調査結果を踏まえ、主な劣化要因として、熱的要因(定常温度)、ならびに電氣的要因(電圧・電流負荷)を考慮することとしました。

(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となった場合に、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します。部品故障から装置故障に至る影響度解析を行い、故障すると機能に影響がある部品の寿命を装置寿命ととらえることが可能と考えられます。

(3) 部品仕様・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ー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、故障判定基準など

の試験条件を把握します。また、装置稼働状態において、部品温度ならびに電圧・電流などを測定し、ストレス要因について定量化を行います。

(4) 累積故障確率の推定

電子部品の故障は、構成している素材の蒸発や拡散、酸化などの劣化反応(以下、故障メカニズム)によって生じます。故障メカニズムは、表1に示したような温度や湿度、振動、電圧などにより促進され、この促進度合いを表わす関係式は加速モデルとよばれています。電子連動装置の寿命評価においては、(1)使用環境の把握より定常温度、電圧・電流負荷による故障メカニズムに着目し、当該故障メカニズムを再現可能な加速モデルを選定することとしました。加速モデルの選定は、抽出したIC、コンデンサー、フォトカプラーなどの電子部品に対して行います。ここでは、故障メカニズムとして、比較的わかりやすいアルミ電解コンデンサーを例に解説します。図5にアルミ電解コンデンサーの電気特性変化に影響する故障メカニズムを示します。アルミ電解コンデンサーは、周囲温度や通電電流による自己発熱により、内部に充填された電解液が蒸散・枯渇し、結果としてコンデンサー容量低下などの電気特性の変化を生じます。このメカニズムは、温度による加速モデルとして、図6に示す10℃2倍則⁵⁾(温度が10℃上昇すると寿命が半減)で近似できることが知られており、部品

メーカーで実施の信頼性試験結果から実使用環境に置換することができます。たとえば、試験環境温度105℃に対して実使用環境35℃の場合は、温度差が70℃となり、10℃2倍則を適用すると、128倍の加速係数が得られるため、1,000時間の試験結果は、12.8万時間(約14.6年)に相当することとなります。このとき、信頼性試験データにおいて、累積故障確率の経年変化^{だいたい}が得られている場合は、図6中の^{だいたい}橙線より、任意の累積故障確率に至る時間を推定することができます。

(5) 故障率の経年変化算出

電子部品ごとの累積故障確率と使用時間の関係は、(4)累積故障確率の推定により推定可能となります。耐用寿命は、故障率増加割合(故障率が現行装置で目安とされている耐用年数時点からどの程度増加するか)、および故障部品数(累積故障確率×使用部品数)により判定することとしました。なお、電子連動装置の寿命にもっとも寄与する電子部品の特定を行い、当該部品寿命を装置寿命として代表させることとしています。たとえば、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ります。

ケーススタディーの実施

開発した寿命評価手法を小駆用電子

連動装置に適用し、図3に示す論理部、入力部、出力部の各ユニットに対して評価を行いました。使用環境は、空調の管理された機器室内（25℃一定）設置、かつ終日通电としました。評価の結果、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は、入力部で使われているフォトカプラー（光電変換を用いた絶縁素子）と特定しました。図7に特定部品であるフォトカプラーの寿命評価結果として、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年ごと）を示します。故障率増加割合および故障部品数ともに経年とともに増加していく様子がわかります。また、20年経過を基準とした際の30年経過時の故障率増加割合は約3.2倍、1個目故障発生時期（図7中の累積故障数が赤破線を越える時期）は約29年と推定することができました。

したがって、特定した部品の1個目故障が発生する時期を目安とすると、耐用寿命は約29年と判定されます。同条件にて、29年を超過して使用する場合は、故障のリスクが上がることを前提とした使用の継続といえます。

なお、耐用寿命の決定に際しては、本手法による摩耗故障期推定結果に加え、装置の供給性、技術サポート継続性、ならびに経済性などの劣化要因以外の要素も考慮することが必要です。

まとめと今後の展開

ここでは、電子連動装置における寿命の考え方を整理するとともに、評価手法ならびにケーススタディーを実施した結果について紹介しました。今回

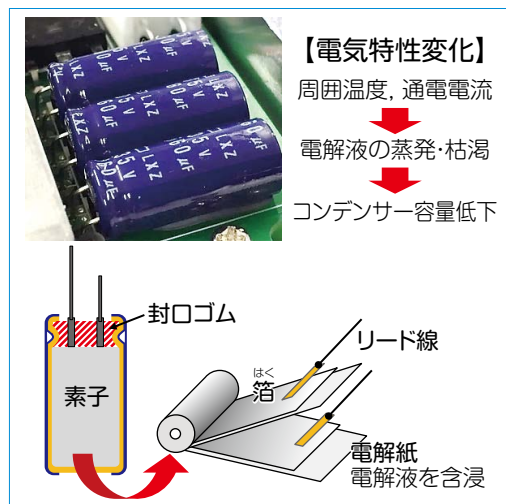


図5 アルミ電解コンデンサの故障メカニズム

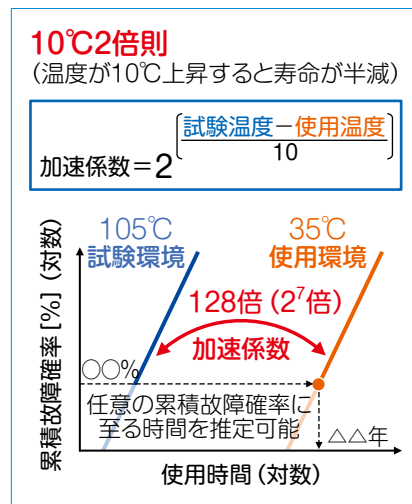


図6 加速モデルによる使用環境への展開例

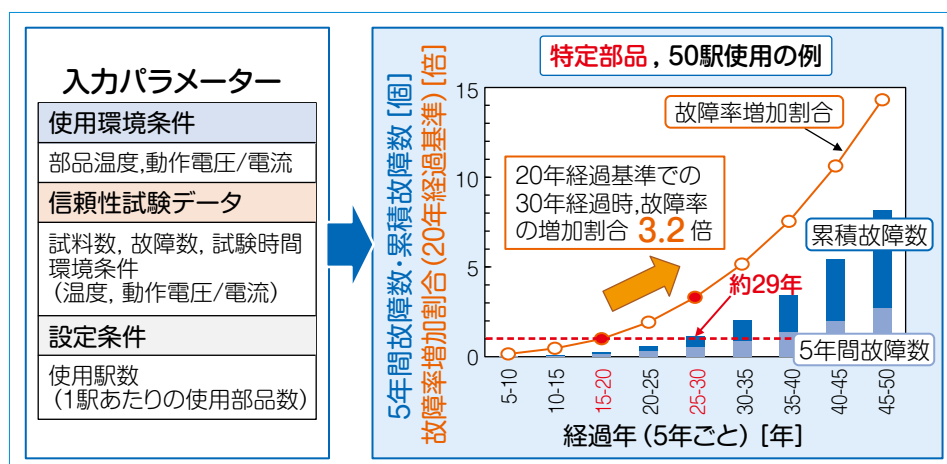


図7 ケーススタディーによる故障率・累積故障数の経年変化算出結果

開発した寿命評価手法は、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目安とさ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ました。また、本手法は、屋内設置の同様な環境下で使われる電子機器であれば、電子連動装置以外にも適用するこ

とができます。

一方、信号用電子機器は、屋内環境だけでなく、沿線に広く導入されています。引き続き、沿線のより過酷な環境で使われる電子機器の寿命評価への展開を進めていきます。【RRR】

文献

- 1) 赤木雅陽：変電機器の劣化状況を診断する, RRR, Vol. 74, No. 5, pp. 12-15, 2017
- 2) 宮瀬昇一郎, 和田哲英, 伊東和彦, 山野井隆, 志田洋, 川原敬治, 大串裕部：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
- 3) 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, TER-17-006, pp. 29-34, 2017
- 4) 柳ヶ瀬滋夫, 鈴木雅彦, 加藤尚志：電子連動装置の劣化メカニズムについての研究, 平成27年電気学会全国大会, No. 5-131, p. 206 (第5分冊), 2015
- 5) TDK：エレクトロニクス入門 コンデンサ編 No. 7「電解コンデンサ②」, TDK Magazine, http://www.tdk.co.jp/techmag/electronics_primer/vol7.htm (2018/2/23)