

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 鉄道沿線電子機器の劣化寿命を予測する

近年、鉄道信号設備への電子機器の導入が進展しています。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、鉄道沿線で使用される信号用電子機器（以下、沿線電子機器）に着目し、その使用環境における電子部品ならびに実装基板の劣化状態を推定することで、装置全体の寿命を予測する手法を開発しました。ここでは、沿線電子機器における寿命の考え方を示すとともに、予測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**  
Hiroiyuki 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、電子機器の寿命評価



**野村 拓也**  
Takuya Nomura  
信号・情報技術研究部  
信号システム研究室  
研究員  
【専門分野】ATS、電子機器の寿命評価



**国崎 愛子**  
Aiko Kunisaki  
信号・情報技術研究部  
信号システム研究室  
研究員  
【専門分野】ATS、電子機器の寿命評価

## 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。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。これまでに筆者らは、空調の設備された機器室内で使用される電子連動装置（以下、屋内電子機器）に対して、使用環境に応じた装置寿命

を予測する手法を開発しました<sup>1)</sup>。

今回は、図1に示すような踏切制御装置やATS地上子などのより過酷な環境である鉄道沿線で使用される信号用電子機器（以下、沿線電子機器）へ適用対象を広げるため、沿線電子機器の使用環境を定量化するとともに、電子部品と基板の接合部を含めた寿命を予測する手法を開発しました。

## 沿線電子機器の故障実態

電子機器を構成する電子部品の故障分布は、故障率と経過年数との関係で見ると、一般にバスタブカーブとよば

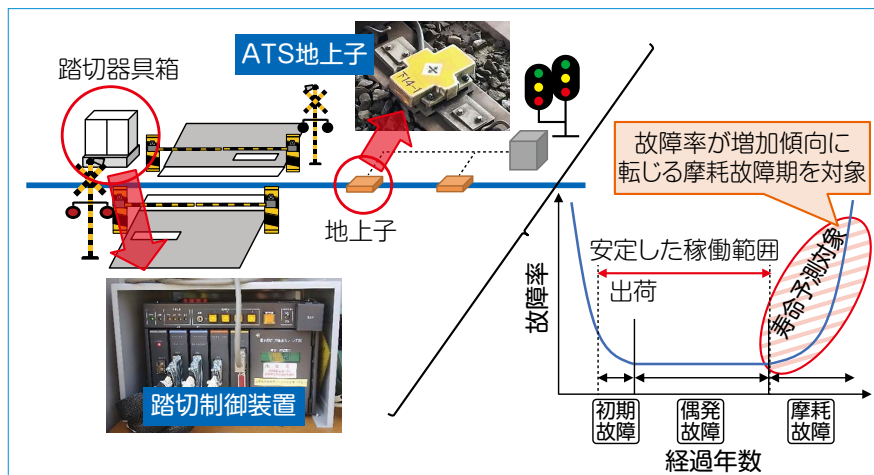


図1 沿線電子機器の設備イメージとバスタブカーブ（故障率の経年変化）

れる初期故障期，偶発故障期，摩耗故障期の3期間に大別されます(図1)。初期故障期は，製造工程内で排除しきれなかった不良品が稼働開始後に比較的短時間で故障が顕在化する期間であり，故障率は時間とともに減少する傾向となります。また，偶発故障期は，時間に対して一定の故障率となる期間を指し，一般に雷害などの外部要因による故障も含まれます。摩耗故障期は，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，故障率は時間とともに増加する傾向となります。そのため，図1に示すように使用期間内に摩耗故障を発生させないことが重要であり，摩耗故障期が訪れる前に電子機器の更新を行う必要があります。

そこで，沿線電子機器の故障実態を把握するため，2004年度～2013年度までの10年分の自然災害および作業ミス以外の劣化に起因する故障データを装置製作メーカーより収集しました。本データに基づき屋内電子機器と沿線電子機器を区別して分析した結果，たとえば，図2に示すように半導体部品に関する故障傾向に大きな差異が見られました。屋内電子機器で使用される半導体部品では，累積故障件数が経年とともに緩やかな増加傾向となる一方，沿線電子機器においては，指数関数的な増加傾向となっています。これは，使用期間中に図1に示す摩耗故障期に至っている可能性があり，寿命予測の必要性が大きいことを示唆しています。また，沿線電子機器が屋内電子機器と比較して，厳しい使用環境下に置かれていることの裏付けともいえます。

## 沿線電子機器のストレス要因

### (1) 想定ストレス要因

信号用電子機器の寿命に影響するストレス要因を，環境ストレスならびに

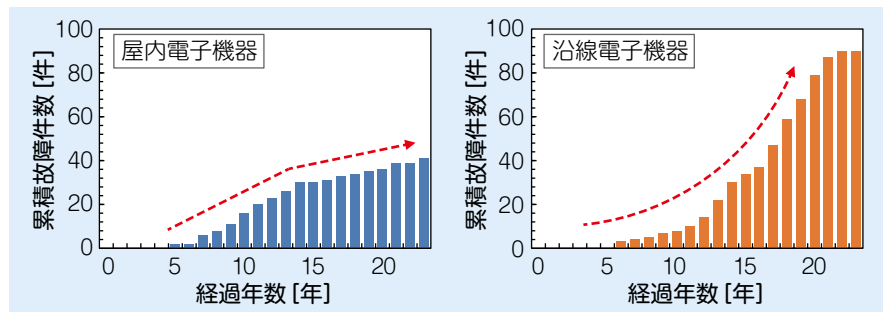


図2 製作メーカーの故障返戻データ分析結果(半導体部品)

表1 信号用電子機器のストレス要因

No.	大別	要因分類	屋内電子機器環境	沿線電子機器環境
1	環境 ストレス	定常温度	○ 機器室25℃	○ 環境による
2		温度変化	× なし	○ 環境による
3		電磁気・サージ	△ 外部要因	△ 外部要因
4		雰囲気	× 良好	○ 環境による
5		水分・湿度	× 良好	○ 環境による
6		振動	× なし	○ 環境による
7		曲げ・疲労・摺動	× なし	× なし
8	動作 ストレス	電圧	○ 部品による	○ 部品による
9		電流負荷	○ 部品による	○ 部品による

○：考慮すべき要因 △：場合により考慮すべき要因 ×：考慮の必要なし

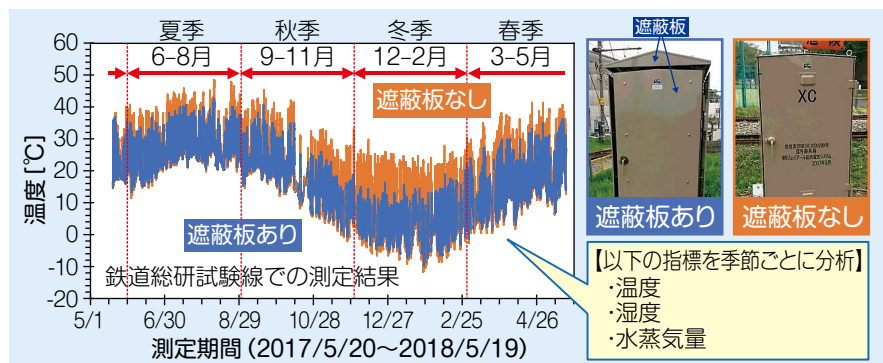


図3 ストレス要因定量化のための現地調査例

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)。屋内電子機器である電子連動装置においては，安定した環境下での使用となるため，主なストレス要因として，定常温度(No.1)，ならびに動作ストレスである電圧・電流負荷(No.8, 9)を抽出することとしました。一方，沿線電子機器においては，その使用環境から考慮すべきストレス要因が増加することが見込まれます。沿線電子機器では，電子連動装置で抽出したストレス要因に加えて，温度変化(No.2)，雰囲気(No.4)，水分・湿度(No.5)，振動(No.6)の影響を抽出する必要があるといえます。

### (2) ストレス要因の定量化

沿線電子機器は，屋内電子機器と比較して，抽出すべきストレス要因が多岐に渡ることが示されました。そこで，各ストレス要因については，国内3地点(寒冷地：北海道，中間地：東京都，温暖地：愛媛県)において，器具箱内外の温湿度，雰囲気(腐食性ガス)，振動などの使用環境を調査することで，影響度の定量化を行いました。

たとえば，器具箱内温度は，直射日光による温度上昇を防ぐ遮蔽板の有無により異なり，最高温度ならびに温度変化量に大きな差がみられました(図3)。湿度については，器具箱の

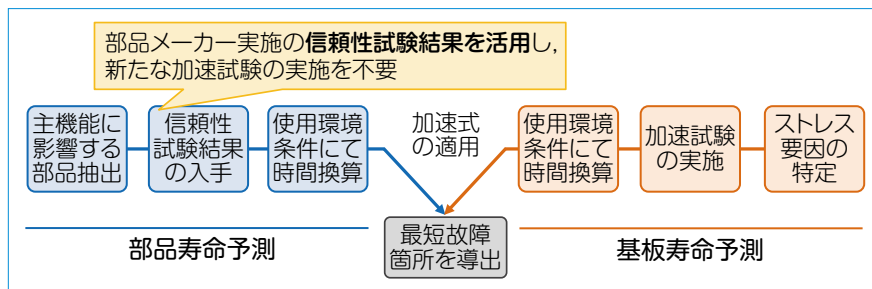


図4 沿線電子機器の寿命予測手法

密閉度合いにより異なることを確認しました。なお、腐食性ガスなどの雰囲気の影響は、器具箱内の亜硫酸ガス(SO<sub>2</sub>)、硫化水素ガス(H<sub>2</sub>S)、塩素系ガス(Cl<sub>2</sub>, HCl)の濃度測定の結果、基準値以下の良好な環境であることを確認しました。また、振動に関しても、器具箱内の振動加速度がJIS規格(JIS E 3014)で定められた基準値内に収まることを確認しました<sup>2)</sup>。

以上より、器具箱内におけるストレス主要因は、定常温度、温度変化、水分・湿度などの温湿度であると考えられます。

### 沿線電子機器の寿命予測手法

鉄道事業者が過去に実施した撤去品調査結果より、一部の機器において、温度変化にともなう熱膨張・収縮に起因するはんだへのクラック(以下、はんだクラック)が観測されています<sup>3)</sup>。そのため、屋内電子機器では、抽出したストレス要因に温度変化が含まれないことから電子部品のみを対象に寿命予測を行っていましたが、沿線電子機器では、基板との接合部(はんだ)の寿命予測も必要となると判断しました。そこで、図4に示すように沿線電子機器の寿命予測については、実装電子部品の寿命予測(以下、部品寿命予測)と接合部を含む基板の寿命予測(以下、基板寿命予測)の二つのアプローチで実施することとしました。

部品寿命予測では、屋内電子機器の寿命予測を実施した際に開発した、加速試験(☞参照)結果を使用環境条件

に時間換算する手法<sup>1)</sup>を基本とし、器具箱内でのストレス主要因である温湿度に適合した故障メカニズムに対応することとしました。いずれも部品メーカー実施の信頼性試験結果を活用し、実使用環境下での累積故障確率(任意の時間ですでに故障している確率)の推定を行います。

一方、基板寿命予測では、沿線電子機器の種類ごとに部品配置や基板への実装方法が異なることから、個々の機器に対して加速試験を実施し、予測を行います。故障返戻データや撤去品調査、使用環境調査よりストレス要因を特定し、故障状態を再現可能な加速試験を実施します。今回は、熱膨張・収縮起因のはんだクラックを再現するため、温度サイクル試験を実施し、はんだクラックの加速式として、修正コフィン・マンソン則(☞参照)を適用することで実時間への換算を行うこととしました。

これら部品寿命予測と基板寿命予測で構成した寿命予測手法により、それぞれ対象とする沿線電子機器の使用環境に応じて、最短で故障となる箇所・部品・要因を導出します<sup>4)</sup>。

### ケーススタディーの実施

沿線電子機器として国内で広く使用されている踏切用列車検知装置に、寿命予測手法を適用しました。使用環境は、鉄道総研所内試験線に設置の遮蔽板あり器具箱内および遮蔽板なし器具箱内の二つの条件で寿命予測を実施しています。

## (1) 部品寿命予測結果

対象機器は、ICなどの半導体やフォトカプラー、コンデンサー、抵抗などの電子部品から構成されています。対象機器において、主機能への影響が推定される部品のうち、とくにコンデンサーなどの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しました。また、抽出した電子部品について、当該部品製作メーカーより、信頼性試験結果を入手し、加速条件(ストレス主要因である温湿度+電氣的ストレス)、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した。

試験条件を実使用環境条件に換算するための加速式は、半導体に関しては、JEITA(一般社団法人電子情報技術産業協会)の発行する加速寿命試験運用ガイドラインから選定しました。また、コンデンサー、抵抗、コイルなどの受動部品については、それぞれの部品ごとに適用される加速式(たとえば、アルミ電解コンデンサーでは使用温度が10℃上昇すると寿命が半減する10℃2倍則など)を用いることとしました。

累積故障確率1%に至る寿命時間(B1 life:100個中1個が故障するまでの時間)を推定した結果、抽出した部品のうち、最短部品はCPUとして使用している半導体となり、遮蔽板ありの場合29.5年、なしの場合27.5年となりました。

#### ☞ 加速試験

機器の使用環境より厳しい条件(たとえば、高温、高湿など)による試験を行い、意図的に劣化を進めて機器の寿命を検証する試験です。試験条件と使用環境条件との関係をモデル化した式を加速式と言います。

#### ☞ 修正コフィン・マンソン則

温度サイクル試験におけるはんだ接合部の寿命予測に用いられる「ひずみ振幅」を考慮した加速モデル式です。温度サイクルの頻度、温度差、最高温度に基づき、試験条件から実使用条件への換算を行います。

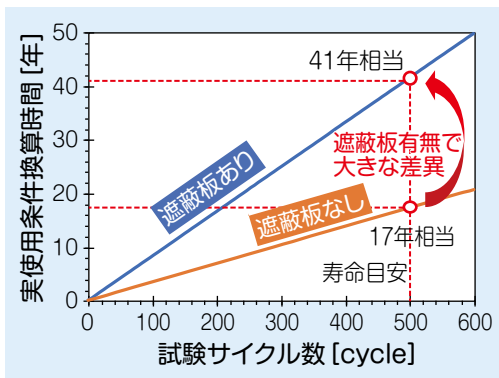


図5 修正コフィン・マンソン則による試験条件から実使用条件への換算

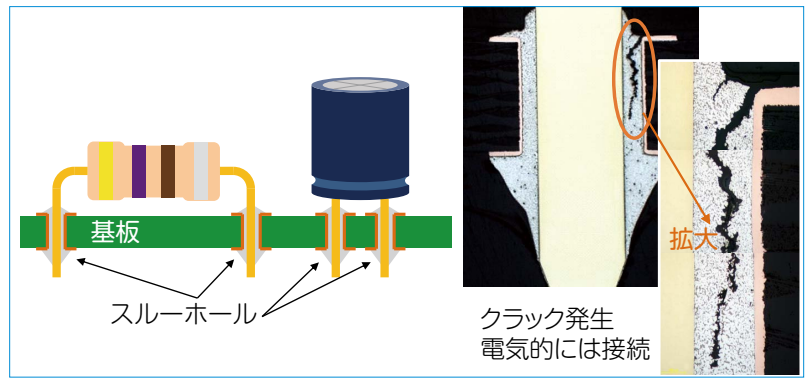


図6 断面観察結果 (500サイクル後)

表2 電子機器寿命予測

	部品寿命 予測結果	基板寿命 予測結果	総合評価
遮蔽板あり 器具箱	29.5年	41年	29.5年
遮蔽板なし 器具箱	27.5年	17年	17年

## (2) 基板寿命予測結果

対象機器は、部品と基板との接合に共晶はんだ (Sn-Pbはんだ) が使用されています。加速試験は、 $-20^{\circ}\text{C}$  ~  $+60^{\circ}\text{C}$  の温度サイクルを8時間ごとに実施し、100サイクル経過ごとに供試体を取り出し、機能検査とはんだ面の外観観察を行いました。500サイクル経過までは、とくに異常は見られませんでした。ここで、修正コフィン・マンソン則を適用し、実使用条件に換算すると、500サイクルは遮蔽板ありで41年相当、遮蔽板なしで17年相当となります (図5)。なお、500サイクル経過後にはんだ断面観察を実施した結果、スルーホール箇所でクラックの発生を確認しましたが、電気的には接続されている状況でした (図6)。クラックは、一度発生すると進展していくことが予測されるため、今回試験をした範囲内では、クラック発生を確認した500サイクルを寿命の目安とすることとしました。

## (3) 総合評価

部品寿命予測ならびに基板寿命予測の結果、表2に示す通り、鉄道総研所内試験線において遮蔽板ありの器具箱内で使用している場合、最短は半導

体寿命となり29.5年 (B1 life)、一方、遮蔽板なしの器具箱内の場合、最短は基板寿命となり17年が目安の寿命といえます。

## まとめ

沿線電子機器の寿命は、ケーススタディーでも示したとおり、使用環境によって最短故障部品・箇所が異なる結果となります。そのため、寿命予測対象とする機器の使用環境を把握することが重要となります。たとえば、部品寿命結果における温度依存性は、図7に示すとおり、高温側へ推移するほど寿命が短い結果となります。これは、地域差や器具箱内の他の発熱体の有無に大きく依存することを示しています。さらに、基板寿命予測においては、温度差に依存するため、機器の通電状態も大きく影響します。

昨今、機器の保全において、一定の時間毎に保守を行う時間基準保全から、劣化状況に合わせて都度保守を行う状

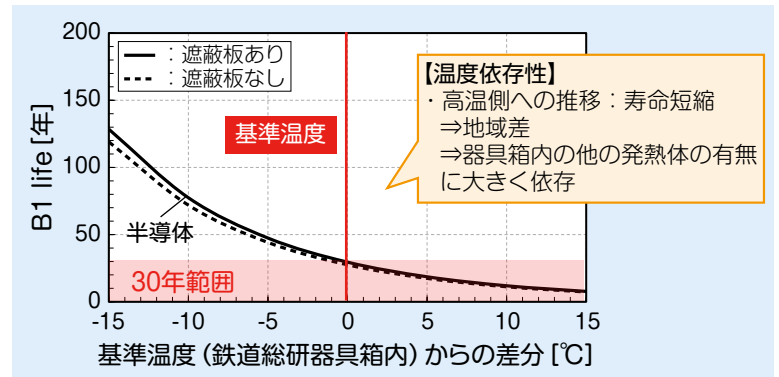


図7 部品寿命の温度依存性予測例

態基準保全 (CBM) への移行ニーズが高まっています。今後、状態基準保全におけるセンシング対象箇所の選定や、事前に予測した寿命に対する劣化進展度合いの推定などに今回開発した寿命予測手法を活用していく予定です。

## RRR

## 文献

- 1) 藤田浩由, 新井英樹: 信号用電子機器の寿命を診断する, RRR, Vol.75, No.4, pp.12-15, 2018
- 2) 亀本ジョ, 藤田浩由, 野村拓也, 天野歩, 比澤庸平, 河野勉: 鉄道沿線電子機器における振動影響の一考察, 平成31年電気学会全国大会, 5-202
- 3) 宮瀬昇一郎, 和田哲英, 伊東和彦, 山野井隆, 志田洋, 川原啓治, 大串裕都: 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, 5-12, pp.173-176, 2014
- 4) 藤田浩由, 野村拓也, 亀本ジョ, 国崎愛子: 鉄道沿線環境に応じた信号用電子機器の寿命予測, 第25回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018), No.2308