

使用環境センシングによる信号用電子機器の寿命予測手法

藤田 浩由* 椿 健太郎* 高崎 建* 往古 直之**

Lifetime Estimation of Signalling Electronic Equipment Based on Sensing Information of Usage Environment

Hiroyuki FUJITA Kentaro TSUBAKI Ken TAKASAKI Naoyuki OKO

In recent years, technological development to shift from conventional time-based maintenance (TBM) to condition-based maintenance (CBM) has been progressing. In response to this trend, various efforts are being made for signaling equipment along railway tracks. However, there are issues to be solved when applying CBM to signaling electronic equipment of which indications of deterioration is difficult to be detected. Focusing on the environment in which signaling electronic equipment is installed, this paper describes the results of examining new methods for lifetime estimation of the equipment on the basis of sensing information of the usage environment.

キーワード：信号用電子機器，鉄道沿線環境，寿命予測，CBM，加速試験，センシング情報

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。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）を対象とし、使用環境に応じた摩耗故障期の故障率を算出する評価手法の構築を行った^{1) 2)}。その結果、あらかじめ設定した固定の環境条件下において、対象機器の最短寿命部品および箇所を特定し、機器寿命を予測することを可能とした。ただし、沿線電子機器においては、対象機器の収容状況の差異、ならびに将来にわたる環境変動を考慮し、使用環境条件にマージンを設ける必要がある。それゆえ、過大なマージンが設定され、寿命が過小評価される可能性がある。

また、鉄道設備のメンテナンスは、従来の時間基準保全（TBM：Time Based Maintenance）から状態基準保全（CBM：Condition Based Maintenance）への転換が進んでおり、鉄道沿線に点在する信号設備についても様々な取り組みが行われている^{3) 4)}。

そこで、著者らは、周囲の状況により環境が変化しやすい沿線電子機器について、寿命予測精度の向上および

CBMへの適用を目指し、使用環境の変化を捉えることで機器の寿命予測を行う新たな手法を構築した。本稿では、信号用電子機器の保全手法についての課題を整理するとともに、新たに構築した使用環境センシングによる寿命予測手法の考え方とケーススタディによる検証結果について述べる。

2. 信号用電子機器の保全手法

2.1 保全の現状とCBMへの期待

鉄道設備のメンテナンスは、従来より一定周期で検査や保全作業を実施するTBMが主流となっており、保全計画が容易に構築できる利点がある一方、短期的には突発的な故障に対応できないこと、長期的にはより多くのマージンを確保した状態で設備更新が発生することなどの課題を合わせ持っている。これらTBMの持つ課題を解消するため、近年ではCBMへの転換を図る動きが加速している。CBMへの転換により、故障の予兆把握、人手による定期検査の削減、ならびに効率的な設備更新の実現が期待されている。現在、CBM化の取り組みが行われている事例としては、JR東日本が提唱するスマートメンテナンス構想に基づく線路設備や車両設備のモニタリングなどが挙げられる⁵⁾。また、東京メトロ³⁾やJR九州⁴⁾などでも同様の取り組みが進んでおり、鉄道設備のメンテナンスにおける革新技術として、CBMに対する期待が大きいことがわかる。

2.2 信号用電子機器へのCBMの適用

CBM実現のためには、対象設備における故障の予兆把握が前提となる。線路設備や一部の車両設備のモニタリングにおいては、故障につながる劣化指標を直接セン

* 信号技術研究部 信号システム研究室

** 信号技術研究部 信号システム研究室（現 日本信号株式会社）

シングでき、かつ連続的に変化を捉えることができることから、CBM化に適した事例と言える。一方、信号用電子機器のように劣化そのもの、あるいはその兆候を捉えることが困難な対象も数多く存在しており、これらの設備に対するCBMの適用が課題となっている。

そこで、信号用電子機器については、これまでに構築した寿命評価手法を基に、対象機器の設置された環境の変化を捉えることで機器の寿命予測を行う新たな手法の構築を目指すこととした。本手法は、あらかじめ設定した使用環境条件にて最短寿命箇所の予測寿命を求め、運用中の使用環境を監視することで当初の予測寿命値の補正を行うものである。これにより、間接的ではあるが、実況での劣化状態を推定できるため、直接的に劣化状態の監視が困難な対象においても、CBMの実現手段として適用可能であると考えられる。

このような使用環境センシングによる寿命予測手法の実現にあたっては、評価対象機器の使用環境を把握するとともに、環境変化の将来予測から寿命予測を行う仕組みが重要となる。前者については使用環境センシング手法、後者については逐次寿命予測手法として、4章および5章に構築した各手法の考え方を述べる。なお、その前段として、あらかじめ設定した固定の環境条件下における寿命評価手法について3章で述べる。

3. 固定環境条件下での寿命評価手法

本章では、これまでに構築した固定の環境条件下において、寿命評価を行う手法^{1) 2)}の概要について述べる。

3.1 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、各基板上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。過去に事業者ならびに著者により、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。

沿線電子機器において、寿命に影響する環境ストレスを抽出した結果を表1に示す。さらに、表1に示したストレス要因について、寿命に支配的要因となるものが現地調査に基づき選定されている。選定された結果は、定常温度、温度変化、水分・湿度などの温湿度となる。

そこで、図1に示すように沿線電子機器の寿命評価に

表1 沿線電子機器の環境ストレス要因と寿命影響選定結果

| No. | 環境ストレス要因 | | 寿命影響選定結果 | |
|-----|----------|---------|----------|-------|
| | 要因1 | 要因2 | | |
| 1 | 熱的要因 | 定常温度 | ○ | 影響あり |
| 2 | | 温度変化 | ○ | 影響あり |
| 3 | 電氣的要因 | 電磁気・サージ | × | 偶発要因 |
| 4 | 周囲環境要因 | 雰囲気 | × | 規格値未滿 |
| 5 | | 水分(湿度) | ○ | 影響あり |
| 6 | 機械的要因 | 振動、衝撃 | × | 規格値未滿 |
| 7 | | 曲げ、疲労 | × | 該当なし |

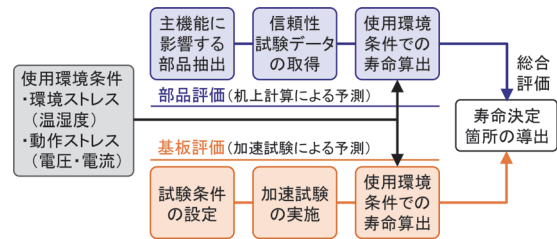


図1 沿線電子機器の寿命評価手法の概要

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、3.2節に電子部品の寿命予測手法について述べる。

3.2 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することで実施する。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とともに、機能に影響があるため、部品寿命を機器寿命と捉えることが可能と考えられる。特に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選択する。

(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ー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⁶⁾。

いずれの場合であってもメーカー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するものを選定するものとし、部品製作メーカー毎にモデルが異なる場合は、対象部品の製作メーカー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°C 2 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。固定環境条件にて予測するため、式 (1)、式 (2) における電流密度および絶対温度について、あらかじめ設定した値を代入することとしている。

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⁶⁾。

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

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 3 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

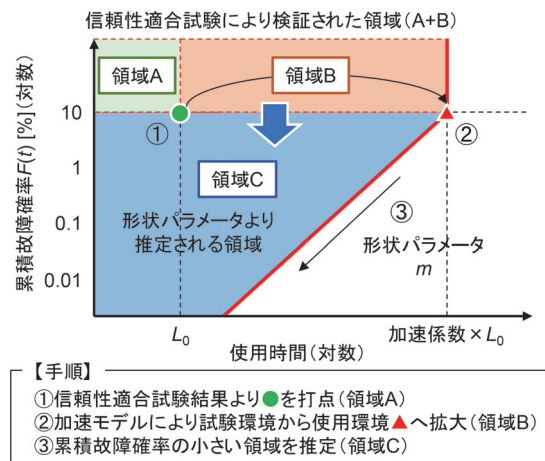


図 2 信頼性適合試験に基づく累積故障確率の経年変化推定手順

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と言える。

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。

4. 使用環境センシング手法

寿命予測を実施するうえで、評価対象機器の使用環境を把握するためには、センシング項目およびセンシング箇所を的確に選定することが必要となる。本章では、信号用電子機器の使用環境におけるセンシング項目および箇所を選定過程とともに、評価対象箇所に対するセンシング精度検証試験の結果について述べる。

4.1 センシング項目の選定

3.1 節より、寿命に支配的要因となる環境ストレスは、定常温度、温度変化、水分・湿度などの温湿度となることから、センシング項目として、温度および湿度を選定することとした。なお、信号用電子機器の構成要素のうち、アルミ電解コンデンサや光素子に代表される有寿命部品、ならびに接合部の主要な故障メカニズムは、温度を環境ストレス要因としていることから、センシング項目として、温度を必須項目とすることとした。

4.2 センシング箇所の選定

4.1 節にて選定したセンシング項目については、使用環境下で推定される寿命決定箇所を直接センシングすることが理想である。ただし、寿命決定箇所毎にセンサが必要になるとともに、既存機器に対する組み込みに課題がある。それゆえ、比較的センシングの容易な収容箱内空間や機器筐体表面を代表として、機器内部の対象箇所の温湿度を推定する手法が有効と考えられる。そこで、必須のセンシング項目として選定した温度について、センシング箇所に応じた推定精度の検証を行った。

(1) 検証方法

直射日光を防ぐ遮蔽板付き収容箱に設置した踏切用列車検知装置を供試体として、機器内部の対象箇所の温度を真値として取り扱う。ここで、対象箇所は、あらかじめ設定した使用環境条件にて推定した寿命決定箇所とし、アルミ電解コンデンサ2箇所、およびフォトカプラ1箇所の計3箇所とした。この寿命決定箇所の温度について、収容箱内空間温度、および対象機器筐体表面温度から推定する試験を実施した⁷⁾。また、対象機器筐体表面温度について、設置箇所の異なる収容箱間でのばらつきを検証した。いずれも温度センサとして、熱電対（T型、HIOKI製）を用い、10分間隔で記録するとともに、天候の網羅性を考慮して検証期間を2週間以上確保することとした。検証にあたっては、記録データから1日毎の平均温度を算出し、比較することとした。1日毎の平均温度とした理由については、5.1節に後述する。

なお、収容箱および機器筐体表面を基準とした温度推定については、鉄道総研国立研究所内にて実施し、代表収容箱を基準とした温度推定については、JR四国土讃線（土佐山田～土佐大津駅付近、10km程度の範囲）にて実施した。それぞれの検証イメージを図3に示す。

(2) 収容箱・機器筐体表面を基準とした温度推定結果

実測した寿命決定箇所の温度について、1日単位の平均温度における収容箱内空間温度、および対象機器筐体表面温度からの差分の分布を図4に示すとともに、収容箱近傍に設置した百葉箱内空間温度からの差分の分布も併せて示す。図4より、寿命決定箇所の温度との差分は、機器筐体表面温度を基準とした場合に最も分布範囲が小さくなり、次いで箱内空間温度、百葉箱内空間温度の順で分布が拡大する様子が見られる。対象機器が通電により発熱状態となっていることから、百葉箱内空間温度と比較すると、温度差分値が大きく乖離していることがわかる。ここで、図4を用いると、それぞれの温度センサ値を基準とした場合、寿命決定箇所の温度は「温度センサ値+最頻出温度差分±分布範囲」で推定できる。これは、分布範囲が小さいほど、精度よく対象温度を推定

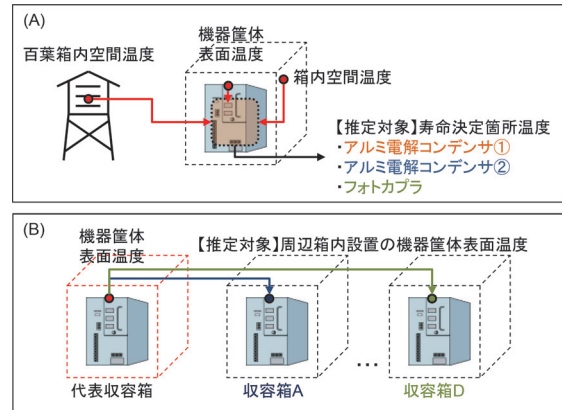


図3 温度推定の検証イメージ ((A) 収容箱および機器筐体表面基準, (B) 代表収容箱基準)

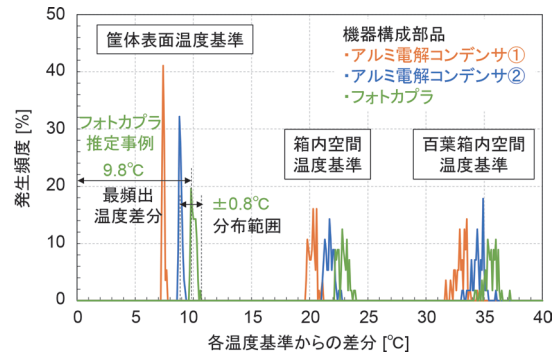


図4 各基準からの寿命決定箇所温度の差分

表2 各基準からの寿命決定箇所の温度推定範囲

| 基準 | 寿命決定部品 | 最頻出温度差分[°C] | 分布範囲[°C] (累積頻度 99%) |
|-------|----------|-------------|------------------------|
| 筐体表面 | アルミ電解 C① | 7.4 | ±0.3 |
| | アルミ電解 C② | 8.8 | ±0.5 |
| | フォトカプラ | 9.8 | ±0.8 |
| 箱内空間 | アルミ電解 C① | 20.3 | ±0.8 |
| | アルミ電解 C② | 21.7 | ±1.0 |
| | フォトカプラ | 22.8 | ±1.1 |
| 百葉箱空間 | アルミ電解 C① | 33.5 | ±1.8 |
| | アルミ電解 C② | 34.9 | ±1.8 |
| | フォトカプラ | 35.3 | ±1.9 |

できることを指す。したがって、分布範囲の最も小さい機器筐体表面を基準とすると、例えばフォトカプラの温度は、機器筐体表面の温度センサ値+最頻出温度差分 9.8°C ± 分布範囲 0.8°C で推定（累積頻度 99% を包含）できると言える。それぞれの温度センサ値を基準とした場合の寿命決定箇所の温度推定範囲を表2に示す。

(3) 代表収容箱を基準とした温度推定結果

実測した周辺収容箱内に設置の対象機器筐体表面温度について、1日単位の平均温度における代表収容箱内の同筐体表面温度からの差分の分布を図5に示す。図5より、10kmまでの範囲に存在する収容箱内の対象機器筐体表面温度は、代表収容箱内の温度センサを基準とす

ると、温度差分値の乖離を含め、ばらつきを持った分布となっている様子がわかる。これは、収容箱毎に設置高さ、設置方角、周辺環境などの設置条件が異なるためと考えられる。ここで、前述の(2)で示した温度推定方法と同様に、「代表収容箱内の温度センサ値+最頻出温度差分±分布範囲」で推定すると、表3に示す温度推定範囲となる。分布範囲は、距離に比例して拡大する傾向があるものの、10kmまでの範囲であれば、±2℃程度（累積頻度99%を包含）で推定できると言える。

4.3 センシング箇所に対する温度推定精度

4.2節では、寿命決定箇所の温度を機器毎あるいは代表収容箱毎に設置した温度センサにより推定する場合の精度について示した。なお、著者らはこれまでの研究において、気象庁の観測所公開データを用い、収容箱内の温度を推定する方法について検討した。その結果、対象とする収容箱と観測所間距離が10km未満の場合、1日単位の平均温度については、±5℃以内（累積頻度99%を包含）で温度推定を行えることを示している⁸⁾。

本節では、温度推定精度が寿命予測値に与える影響について、上記の観測所公開データを用いた場合を含め考察する。寿命予測にあたっては、温度が環境ストレスの主要因となるアルミ電解コンデンサを例に試算した。ここで、温度センサとして用いた熱電対（T型）の測定精度は、±1℃であるため、センサ単体誤差として考慮することとした。本考察の比較対象は、センサを用いる方式として、①寿命決定箇所毎（部品・箇所毎）、②対象機器毎、③代表収容箱毎にセンサを取付ける3種類の温度推定方式に加え、センサレスの方式として、④観測所公開データを用いる方式の計4種類とした。センサを用いる方式の温度推定精度は、センサ単体誤差、機器筐体表面温度からの推定誤差、代表収容箱からの推定誤差をそれぞれ含むことになる。つまり、①部品・箇所毎にセンサを取付ける場合、温度推定精度はセンサ単体誤差のみとなるため±1℃となる。同様に、②対象機器毎の場合は、①に機器筐体表面温度からの推定誤差が加わるため±2℃、③代表収容箱毎の場合は、②に代表収容箱からの推定誤差が加わるため±4℃となる。センサレス方式の④は、±5℃として扱うこととした。各方式の温度推定精度と寿命予測精度の関係を試算条件と合わせて表4に示す。表4より、寿命予測精度検証用の比較用寿命（真値：13.6年）に対し、温度推定精度の誤差に応じた寿命予測値が得られた。自明のことながら、温度推定精度の誤差が小さいほど寿命予測誤差も小さくなるため、要求する寿命予測精度に合わせ、センサ構成を選択できると言える。

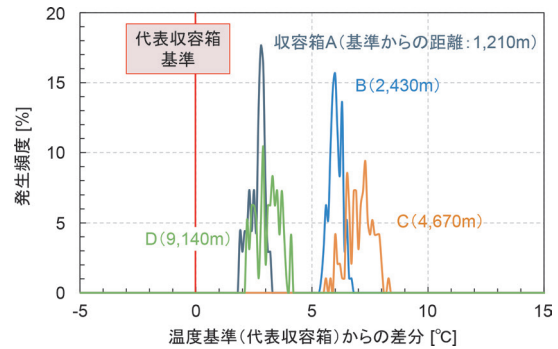


図5 代表収容箱からの周辺収容箱温度の差分

表3 代表収容箱からの周辺収容箱の温度推定範囲

| 収容箱名称 | 代表収容箱からの距離[m] | 最頻出温度差分[°C] | 分布範囲[°C] (累積頻度99%) |
|-------|---------------|-------------|--------------------|
| A | 1,210 | 2.8 | ±0.9 |
| B | 2,430 | 6.0 | ±0.7 |
| C | 4,670 | 7.3 | ±1.7 |
| D | 9,140 | 2.9 | ±1.2 |

表4 温度推定精度と寿命予測精度の関係

| 方式 | センサ設置箇所 | 温度推定精度 | 寿命予測精度* |
|----|----------------|--------|---------------------------|
| ① | 対象部品・箇所 | < ±1℃ | 12.7~14.6年 (-1.0~1.0年) |
| ② | 機器筐体表面 (各収容箱) | < ±2℃ | 11.8~15.6年 (-1.9~2.0年) |
| ③ | 機器筐体表面 (代表収容箱) | < ±4℃ | 10.5~17.8年 (-3.2~4.2年) |
| ④ | 気象庁観測所公開データ使用 | < ±5℃ | 9.6~19.3年 (-4.0~5.7年) |

* ()内は比較用寿命13.6年からの差分を示す
 試算条件：アルミ電解コンデンサ（105℃，2,000時間品）
 試料数22個（故障0個），累積故障確率1%，
 部品発熱+20℃，観測所公開データ（府中）

5. 逐次寿命予測手法

3章で示した固定環境条件下での寿命評価手法は、環境変動の発生しにくい屋内電子機器では有用である。また、沿線電子機器においても、ある程度マージンを見込んだ環境条件を設定することで、固定条件下での寿命予測も十分有用であると考えられる。ただし、環境変動に対して必要以上のマージンを設定した場合、寿命予測結果が大幅に短縮される可能性があるほか、収容箱内環境の変化に追従した予測が難しい。そこで、選定した加速モデルの環境変数をセンシングし、その情報を寿命予測計算の入力値として使用する手法の構築が必要となる。本章では、3章で述べた固定環境条件下での寿命評価手法を拡張し、センシング情報を反映可能とした逐次寿命予測手法の考え方と概要について述べる。

5.1 逐次寿命予測手法の考え方

信頼性試験データを実際の使用環境に合わせるため、加速モデルを使用する。このとき、使用環境の時間変化を表現するため、加速モデルを時間に対して離散化し、

積算することで寿命予測を行う。 L_1 を実使用環境下での寿命時間、 L_0 を試験時間、 p を離散時間間隔、 n を離散化された時刻の総数、 AF_i を離散化された各時刻における加速係数とするときの離散化加速モデルを式(4)に示す。

$$L_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{p} \cdot L_0 \cdot AF_i \quad (4)$$

また、式(4)で表される離散化加速モデルを式(1)、式(2)で示した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に適用すると、式(5)、式(6)となる。ここで、 T_{i_i} を離散化された各時刻における使用温度、 J_{i_i} を離散化された各時刻における使用電流密度とする。

$$L_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{p} \cdot L_0 \cdot 2^{\left(\frac{T_0 - T_{i_i}}{10}\right)} \quad (5)$$

$$L_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{p} \cdot L_0 \cdot \left(\frac{J_0}{J_{i_i}}\right)^n \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_{i_i}} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (6)$$

式(5)、式(6)ともに温度の積算量が寄与することがわかる。一方、式(6)において、動作ストレスである電流密度についても離散化の要素はあるが、回路構成上変動が生じる可能性が低い場合は、定数として扱うこととした。

なお、この離散化加速モデルにおける時間間隔の設定値 p は、加速モデル毎に考慮する必要がある。例えば、式(5)、式(6)のように温度の積算量が寄与するモデルの場合は、高温側で加速が進むため、温度のピークを捉えることが重要となる。ここで、式(5)を用いた場合の時間間隔設定値と10分毎の予測結果を基準に正規化した寿命予測結果の関係について、図6に示す。寿命予測にあたっては、気象庁の観測所データ(2001年1月1日開始、府中)を用い、10分毎、1時間毎、1日毎、1月毎、4半期毎、および1年毎の平均温度から試算した。図6より、時間間隔をより細分化した場合に真値に近づくこととなり、時間間隔を1日毎とした場合は10分毎に対して103%、同4半期毎とした場合は107%程度となる。使用環境センシング手法において、寿命決定箇所の温度を筐体表面温度などから推定する場合、時間間隔が細分化されると筐体などの熱容量の影響が無視できなくなるため、温度推定精度が悪化する懸念がある。一方、温度サイクルが影響する加速モデルの場合、日間最高温度、最低温度の差分が寄与することから、時間間隔は最低でも1日毎とする必要がある。

したがって、信号用電子機器においては、時間間隔の

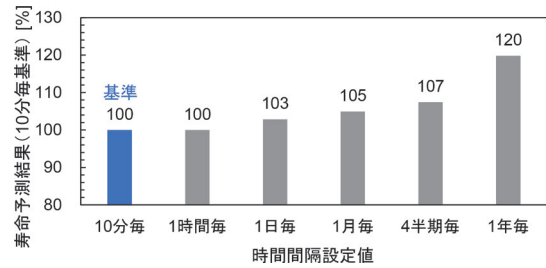


図6 時間間隔設定値と寿命予測結果の関係(アルミ電解コンデンサ, 10分毎基準)

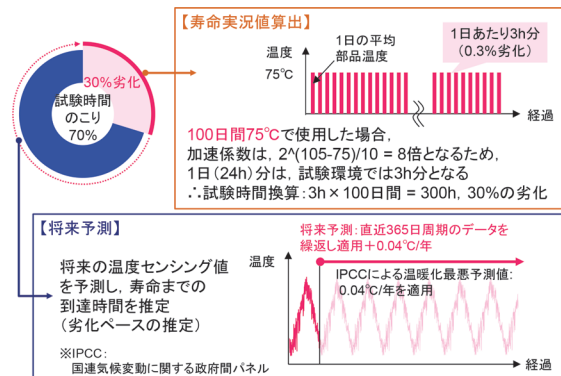


図7 寿命実況値算出および将来予測イメージ

設定値を1日毎とし、予測した値から3%分差し引いた値を最終寿命予測値として提示することとした。

5.2 逐次寿命予測手法の概要

逐次寿命予測手法は、5.1節で示した離散化加速モデルを核とし、センシング情報に基づく寿命実況値算出、将来予測、異常検出の3つのアルゴリズムから構成される。本節では、それぞれの概要について述べる。

(1) 寿命実況値算出

寿命実況値算出アルゴリズムでは、離散化加速モデルを用い、実際の使用環境での劣化進展度合いを信頼性試験データにおける試験時間に換算する。このとき、時間間隔の設定値 p 毎に試験時間と対応させる。例えば、アルミ電解コンデンサの信頼性試験データとして105°C、1,000時間が示されている場合の寿命実況値算出イメージを図7に示す。ここで、100日間75°Cで使用した場合、式(5)より1日毎の加速係数は8倍、試験時間に換算すると1日あたり3時間分となる。すなわち、実際の使用環境100日分は、試験時間に換算すると300時間分となり、劣化が30%進展したと表現できる。

なお、任意の累積故障確率を考慮する際は、加速係数は変わらないため、3.2節で述べた式(3)およびワイブル分布の形状パラメータを用い、基準とする試験時間を調整することで対応する。上記の事例において、試料数

22個、故障数0個、形状パラメータを4と仮定すると、累積故障確率10%では1,000時間、同0.1%では556時間となる。

(2) 将来予測

将来予測アルゴリズムでは、将来のセンシング情報を予測するとともに、予測結果に基づき(1)で示した実況値算出アルゴリズムを適用することで、寿命までの到達時間(劣化ペース)を推定する。センシング対象である温度は、国内の多くの地点で年間を通じた大きな変動がある。そこで、図7の下部に示すように1日毎の温度センシング値を1年間蓄積し、直近365日周期のデータとして繰返し適用することで、将来の温度予測を行うこととした。それゆえ、センシング開始直後の1年間は将来予測ができないが、今回構築した寿命予測手法では、初期故障や偶発故障ではなく、摩耗故障を対象としているため、実運用上の問題はないと考えられる。

また、地球温暖化を考慮し、国連気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)の第5次評価報告書に記載される温室効果ガス排出量のシナリオのうち、最悪ケースを想定したシナリオ(Representative Concentration Pathways, RCP 8.5)に基づき、今後100年間での温度上昇を4℃(0.04℃/年)と見積もることとした⁹⁾。

(3) 異常検出

異常検出アルゴリズムでは、センシング情報から使用環境の異常な変化を検出し、管理端末などに通知を行う。センシング対象である温度は、年間を通じての変動のほか、対象機器の異常発熱、同一収容箱内の他機器の取替えや数量増減、周辺環境の変化などに影響される。収容箱の扉開閉のような一時的な温度変化は、対象機器の寿命に大きく影響を及ぼさないが、恒常的な変化となると無視できない。それゆえ、異常検出は、気候変動によるセンシング値の変化を除いた、恒常的な温度環境変化を的確に識別することが求められる。単独のセンシング情報で気候変動と検出対象の状態との識別を行うことも不可能ではないが、検出までに時間を要する。

そこで、隣接収容箱内のセンシング情報または気象庁の観測所公開データとの比較により、異常検出を行うこととした。異常検出のイメージを図8に示す。いずれも対象のセンシング情報に対して、隣接収容箱内のセンシング情報および観測所公開データとの1日毎の平均温度を比較する。例えば、相互の差分から異常検出の温度差分しきい値を決定し、決定したしきい値を連続して超過した場合に異常とすることで、気候変動を除いた恒常的な変化を速やかに検出することができる。

異常検出時は、管理端末などに通知を行う。寿命予測

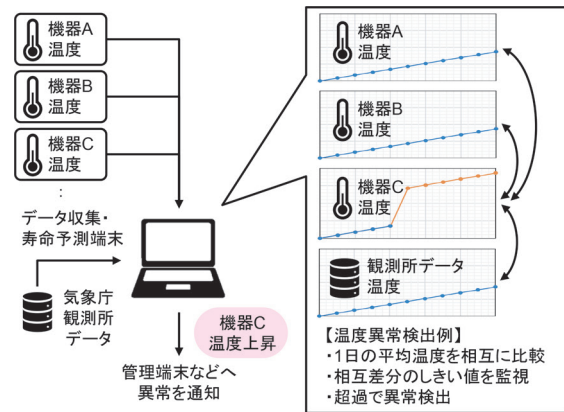


図8 異常検出イメージ

表5 ケーススタディ設定条件

| 設定条件 | 設定内容・設定値 | 備考 |
|---------|------------|------------|
| 対象部品 | アルミ電解コンデンサ | |
| 試験時間 | 2,000時間 | |
| 試験温度 | 105℃ | |
| 試料数 | 22個 | 故障0個 |
| 使用環境温度 | 観測所(府中) | 2001年1月1日～ |
| 部品発熱 | 25℃ | |
| 将来温度予測 | 直近365日繰返し | +0.04℃/年考慮 |
| 設定時間間隔 | 1日毎 | 日間平均温度 |
| 加速モデル | 10℃2倍則 | 式(5)を適用 |
| 信頼水準 | 90% | |
| 形状パラメータ | 4 | |
| 累積故障確率 | 10% | |

値が短縮する側の異常の場合、使用環境を従前に改善可能であれば、そのように対処することで機器の延命を図ることができる。

6. ケーススタディ

5章で示した逐次寿命予測手法を実装したツールを作成し、沿線電子機器内部に実装されているアルミ電解コンデンサを例に、将来予測に関するケーススタディを行った。ケーススタディの条件を表5に示す。1日毎の温度センシング値として、気象庁の観測所公開データ(2001年1月1日開始、府中)を用い、発熱分25℃を加えた値を部品温度とした。また、センサ誤差±1℃を想定した寿命予測範囲も合わせて試算した。累積故障確率10%(B10 life)に至る寿命時間を予測した結果を図9に示す。

図9は、観測所公開データを真値とした場合に、残寿命の10年前時点での予測結果を示している。図9の上段は、この時点までに実績として得られた温度を赤線、直近365日周期のデータとして繰返し適用し、0.04℃/年の温度上昇を考慮した将来の温度予測値を緑線で表している。図9の下段は、横軸を経過時間、縦軸を残寿命として寿命までの到達時間(劣化ペース)の推移を示し、実績温度センシング値による寿命予測結果



図9 逐次寿命予測手法を実装したツールによるケーススタディ結果（表5の設定条件に基づく）

（真値）を赤線、将来予測温度に基づく寿命予測結果を緑線で表している。結果として、残寿命10年に対して9.8年の寿命予測となっており、5.1節で述べた時間間隔の設定値による誤差分3%を考慮しても半年以内の予測誤差が実現できている。一方、これまでの固定環境条件下では、±5℃のマージンを設けていたため、同条件で試算すると、残寿命10年に対して短い側で4.9年の寿命予測となり、逐次寿命予測手法により予測精度向上が実現していることが示された。なお、他の期間の観測所公開データ（1981年、1991年のいずれも1月1日開始、府中）においても、同様にケーススタディを実施したところ、寿命到達10年前時点で約半年の誤差範囲となることを確認している。これは、更新計画の策定に際して、寿命到達10年前時点で年間の更新箇所の選定が行えることを示唆する結果と言える。ただし、センサ誤差や対象箇所の温度推定誤差を考慮すると寿命予測の誤差範囲が拡大するため、要求する寿命予測精度に合わせ、センサ構成を検討する必要がある。

7. おわりに

本稿では、信号用電子機器の保全手法についての課題を整理するとともに、新たに構築した使用環境センシングによる寿命予測手法の考え方とケーススタディによる検証結果について述べた。

使用環境センシングによる寿命予測手法においては、信号用電子機器の寿命に与える環境ストレスの主要因を温度とし、センシング対象として選定するとともに、対象機器毎および代表収容箱毎の温度測定結果より、寿命決定箇所の温度推定精度を導出した。さらに、逐次寿命予測手法として、離散化加速モデルを核としたセンシング情報に基づく寿命実況値算出、将来予測、異常検出の考え方について示し、特に将来予測に関するケーススタディの結果、寿命到達10年前時点で半年以内の予測誤

差を実現した。本寿命予測手法を活用することで、予測精度の向上が可能となり、鉄道事業者において適切な時期での更新計画策定に活用できると考えられる。

また、本寿命予測手法は、使用環境に基づき実況での劣化状態の推定ならびに将来予測が可能であるため、信号用電子機器のように劣化そのもの、あるいはその兆候を捉えることが困難な対象においても、CBMの実現手段として適用可能であると考えられる。

謝辞

本研究における現地試験の実施にあたり、四国旅客鉄道株式会社の関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文献

- 1) 藤田浩由, 丹羽順一, 新井英樹: 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, 鉄道総研報告, Vol.32, No.5, pp.23-28, 2018
- 2) 国崎愛子, 藤田浩由, 野村拓也, 石井琢: 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) 状態基準保全 (CBM) の導入に向けた技術開発に取り組みます, 東京メトロ News Release, 2019年3月26日
- 4) 鉄道信号設備のCBM化に向けた共同開発について, JR九州 News Release, 2019年6月24日
- 5) 松浦和史: ICTを活用したスマートメンテナンスの展望, JR EAST Technical Review, No.55, pp.5-8, 2016
- 6) 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
- 7) 椿健太郎, 藤田浩由, 往古直之, 高崎建: 鉄道沿線信号設備における電子機器構成部品の温度推定手法に関する検討, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER21068, 2021
- 8) 野村拓也ほか: 信号設備収容箱内における温度環境推定, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER18091, 2018
- 9) 藤田浩由, 往古直之: CBMへの適用を目指した信号用電子機器の寿命予測に関する検討, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER21023, 2021