

車両用電子機器の信頼性評価

JR東日本研究開発センター テクニカルセンター 車両G
大戸 伸一



鉄道車両の信頼度の向上とメンテナンスの省力化を目的として、カム・スイッチ類などの機械部品に代わり電子機器が数多く搭載されるようになってきています。しかし電子機器の増加に伴い、故障も増加する傾向となったことから、電子機器の信頼性向上が課題となっていました。

そこでJR東日本では1998年から部外有識者を交えた電子機器委員会を設置するなど、電子機器の故障原因の調査及び劣化調査を行い、電子機器の劣化傾向・劣化要因を明らかにするとともに、使用環境の調査をもとに加速試験による寿命評価を行うことで、鉄道車両用電子機器の寿命評価手法を確立し、各車両形式について評価を行いメンテナンスに反映してきました。

1. はじめに

鉄道車両の信頼度の向上とメンテナンスの省力化を目的として、カム・スイッチ類などの機械部品に代わり電子機器が数多く搭載されるようになってきています。しかし電子機器の増加に伴い、故障が増加する傾向となったことから、その対応に苦慮していました。中でも製造から約20年以上経過した電子機器に故障が多発していたことから経年劣化とも考えられましたが、出力もデジタル(ON,OFF)であるため、動作データや機能検査から劣化判定は困難であり、電子機器の故障は突発型で予測不可能であると考えられていました。そのため、電子機器の信頼性向上が課題となっていました。

そこでJR東日本では1998年から部外有識者を交えた電子機器委員会を設置するなど、電子機器の故障原因の調査及び劣化調査を行い、電子機器の劣化傾向・劣化要因を明らかにするとともに、使用環境の調査をもとに加速試験による寿命評価を行うことで、鉄道車両用電子機器の寿命評価手法を確立し、各車両形式について評価を行いメンテナンスに反映してきました。本記事では、鉄道車両用電子機器の信頼性評価手法を確立したこれまでの研究についてまとめました。

2. 電子機器劣化調査

2.1 調査対象機器

最初に、経年により電子機器がどのように劣化するのか調査しました。対象は当時約20年が経過し経年劣化と推定される故障が増加傾向にあり、更新工事が計画されていた201系電車のゲート制御ユニット(図1)の電子機器(プリント基板)としました¹⁾。



図1 201系ゲート制御ユニット

劣化調査は、それまでのメンテナンス記録から、表1に示す項目について行うこととしました。

表1 調査項目および内容

調査項目	重点とする調査内容	調査方法
部品外観状態	部品の実装状態	目視
パターン	剥がれ、断線の有無	目視
はんだ	亀裂の有無	目視
電解コンデンサ	容量低下の有無	容量測定
ポリウム抵抗	接点の状態	通電試験
半導体・ホップ	異常な動作の有無	通電試験

2.2 劣化調査結果

表1について調査した結果、以下の2項目について劣化と推定される異常が認められました。

(1) はんだ

はんだを拡大鏡で調査した結果、IC・半導体・固定抵抗のリード部に図2に示すようなクラックが発生していました。原因としては、基板材料・部品リード部・はんだの熱膨張係数の違いから、温度変化による繰り返し応力が発生したためと考えられます。



図2 はんだクラック

(2) 電解コンデンサ

電解コンデンサについては、外観の異常はなかったものの、容量を測定したところ低下しているものが多い見受けられました。さらに、電解コンデンサの容量測定結果（図3）を見ると、製造から16～17年経過したコンデンサに容量が低下しているものが多いことが分かりました。これは、内部電解液が封口ゴムを透過し、時間とともに蒸発が進んだためであり、一般に実使用温度が高くなると、劣化が進むことが知られています。

なお、この他の項目については特に異常はなく、劣化傾向は見られませんでした。

以上の結果、電子機器の中で顕著に劣化が進むのは「はんだ接合部」と「電解コンデンサ」であり、その経年劣化を促進する要因は温度上昇であることが分かりました。

そこで、201系電車のゲート制御ユニットについては、劣化傾向が見られた基板に対して、ディレーティング（使用出力に対し余裕のある定格の部品を選択）により発熱（温度上昇）を抑える対策を行い、更新工事を実施しました。

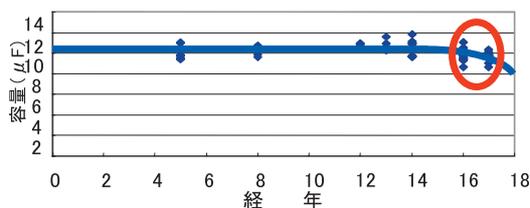


図3 コンデンサ容量測定結果

3. 電子機器寿命評価

3.1 調査対象機器

201系電車における調査により、電子機器の劣化傾向・劣化箇所を把握することができたので、電子機器の寿命評価が可能か検証することにしました。

対象車両は205系電車とし、機器は201系電車と同様に主制御器（添加励磁装置）としました（図4）。

205系電車を対象とした理由は、205系電車は当時15年程度経過しており201系電車のような顕著な故障は発生していませんでしたが、他線区等へ転用改造するにあたり、基板等の更新が必要か判断を求められていたからです。



図4 205系主制御器（添加励磁装置）

3.2 劣化調査結果

(1) はんだ劣化調査

はんだの劣化程度を調査した結果、AVR2基板にはんだクラックが発生していました（図5）。メンテナンス記録を調査したところ、製造後約10年でAVR2基板に再はんだをしている実績がありました。この他の基板については、はんだクラックは発生していませんでした。

(2) 電解コンデンサの電気的特性測定

電解コンデンサの電気的特性を調査したところ、静電容量、 $\tan \delta$ とも全て規定値以内であり、劣化の兆候は見られませんでした。これは、201系電車よりも発熱を抑えた長寿命タイプのコンデンサが使用されているためだと考えられます。

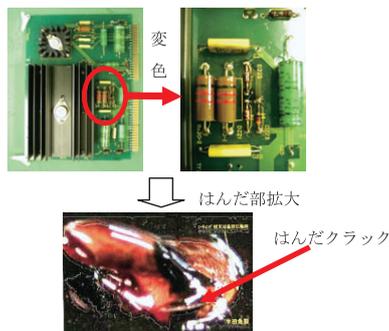


図5 AVR2基板はんだクラック

3.3 寿命評価

以上の結果から、はんだクラックにターゲットを絞り、電子機器の寿命評価を試みました²⁾。

(1) 発熱状況調査

はんだクラックの要因は、温度変化であると考えられることから、基板の発熱状況を調査しました。その結果、AVR2基板におけるはんだクラックの発生部で温度上昇が約45Kと顕著でした(図6)。

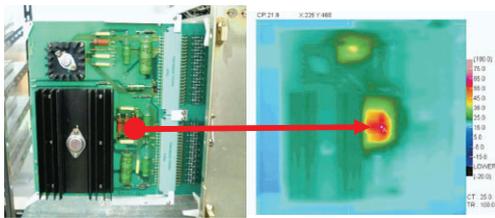


図6 AVR2基板発熱状況

なお、この他はんだクラックの発生していない基板・部位の温度上昇値は概ね20K以下であり、はんだクラックの原因が温度上昇であることを裏付ける結果となりました。

(2) ヒートサイクル試験

はんだ部の寿命評価をする方法としては、ヒートサイクル試験を実施し、後述するCoffin-Mansonの修正式により評価する方法が知られています³⁾。

本研究では、経年約15年の205系主制御器基板(5枚)を対象に、図7に示す条件によりヒートサイクル試験を実施し、はんだクラックの発生状況を観察しました。

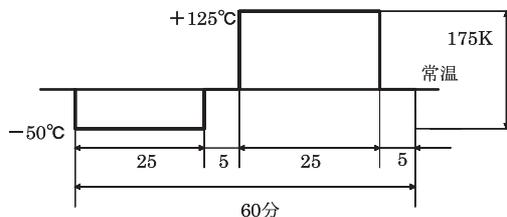


図7 ヒートサイクル試験条件

クラックの発生状況およびCoffin-Mansonの修正式によりヒートサイクル試験の加速率(a)を算出し、余寿命の推定を行いました。Coffin-Mansonの修正式を式(1)に示します。

$$\alpha = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)^n \times \exp\left\{\frac{Q}{K_B} \left(\frac{1}{T_{1\max}} - \frac{1}{T_{2\max}}\right)\right\} \dots (1)$$

この式において、 f は温度サイクル数/日、 ΔT は温度幅、 T_{\max} は最高温度を表しており、添字1, 2はそれぞれ

フィールド時、加速試験時を意味しています。また、 Q 、 K_B はそれぞれ活性化エネルギー・ボルツマン定数です。

ここで、 n は2~24の値をとるといわれていますが、安全側をとって2とし、フィールド時の温度については前述の基板の発熱状況・AVR2基板が10年ではんだクラックが発生したこと等を考慮して推定しました。

その結果、AVR2以外の基板については、概ね15年以上の余寿命があると推定することができました。

4. 新型通勤電管用電子機器の信頼性評価

4.1 熱サイクルに対する寿命評価

4.1.1 調査対象機器

次に、新型車両のE231系VVVF制御装置を対象として、寿命評価を行いました(図8)。E231系電車は新しい保全体系の車両であり、設計寿命である16年以上の信頼性の確保を検証することを目的としました。



図8 E231系VVVF制御装置

4.1.2 使用環境調査

(1) 発熱状況調査

基板の発熱状況を調べるために、定置試験を実施しました。測定状況・結果の一例を図9に示します。

この結果、最も温度上昇が顕著な基板の発熱は25.8Kでした。

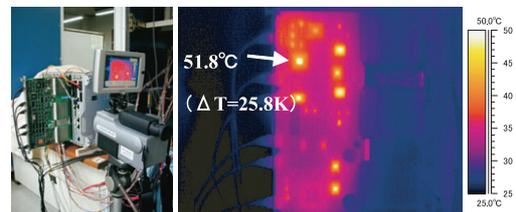


図9 PWM基板発熱状況

(2) 現車による温度測定

次に、冬季・夏季の2回に渡り、それぞれ約10日間の現車測定を実施しました。

図10は冬季の現車測定結果の一部ですが、夏季もベースの温度が上がるのみではほぼ同様の傾向でした。

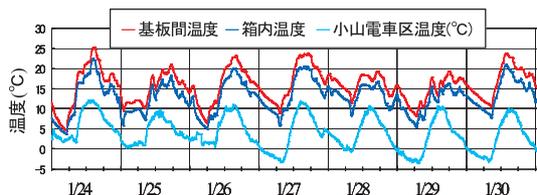


図10 温度測定結果

この測定結果から以下のことが分かりました。

- ① 1日の外気温の変化は約10K
- ② 現車におけるヒートサイクルは1サイクル/日
- ③ 床下機器箱内の温度上昇 (ΔTB) は約10K
- ④ 基板間の温度上昇 (ΔTap) は約5K

また、温度と同時に湿度の測定を行いました。測定期間中に降雨の日もあり、外気湿度は45~95%RHと大きく変動しましたが、VVVFインバータ制御装置箱内については、30~55%RH (平均で45%RH) でした。さらに、塵埃等もなく、電子機器にとって非常に良好な環境であることが分かりました。

4.1.3 加速試験による寿命評価

ここでは、図11に示す2種類のヒートサイクル試験を実施しました。ヒートサイクル試験1、2の違いは低温側の温度であり、それぞれ -55°C 、 0°C としました。よって、ヒートサイクル試験1の方が厳しい試験となります。2種類の試験を実施した理由は、加速率 (a) はフィールド時と加速試験時のサイクル数の比であるため、それぞれの試験結果を比較することにより、Coffin-Mansonの修正式における n を推定することができるためです。

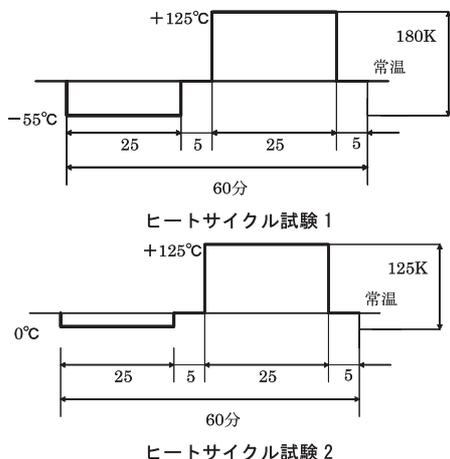


図11 ヒートサイクル試験条件

ヒートサイクル試験の結果の一部を図12に示します。行った2種類のヒートサイクル試験ではほとんどクラックは発生しませんでした。そこで、ヒートサイクル試験1の600サイクルと試験2の2200サイクルの劣化傾向が等しいと仮定し、 n を推定しました。その結果、本寿命評価では $n=2.4$ を採用しました。

以上の結果を用いて、E231系VVVF制御装置の耐熱性寿命を計算すると、16年以上であることが推定できました。

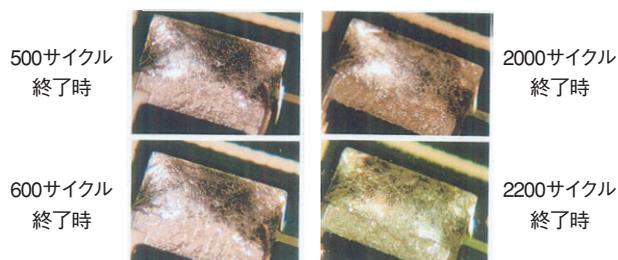


図12 ヒートサイクル試験結果 (左ヒートサイクル試験1、右同2)

4.2 湿度に対する寿命評価

4.2.1 調査対象機器

これまでは床下機器の電子機器を対象としてきましたが、ドア部では床下機器よりも湿度が高いことが予想されます。従って、E231系のドアコントロール基板 (以下、LCU) を対象に、環境測定および高温高湿動作試験を実施しました。

4.2.2 使用環境調査

夏季に約10日間、温湿度測定を実施しました。測定箇所は前頁図13に示すドア部の温湿度と車内の温湿度、外気

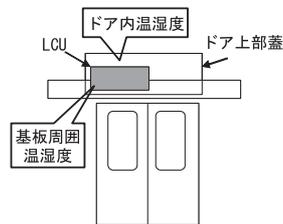


図13 温湿度測定箇所

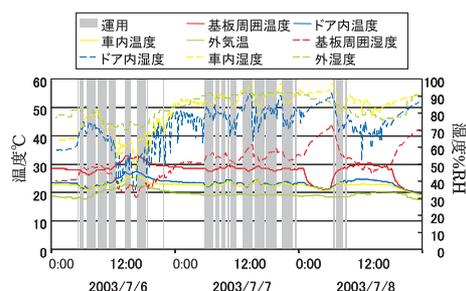


図14 温湿度測定結果

としました。E231系の測定結果の一部を図14に示します。

温湿度測定の結果、以下の知見が得られました。

- ・温度について、床下機器箱内とはほぼ同様
- ・湿度について、最高83.1%RH、平均50%RH程度

基板周囲湿度は、冷房の効果等により車内・ドア内湿度より低くなりますが、車両留置中に高くなる傾向でした。

以上の結果をもとに、高温高湿動作試験を実施し、電子機器の寿命に対する湿度の影響を検証することとしました。

4.2.3 加速試験による寿命評価

(1) 試験概要

調査対象機器に対して、図15の様なドアの開閉を模擬したモックアップを組み、高温高湿動作試験を実施しました。試験条件は、各LCUに搭載されている部品のカタログにある動作保証温度等を参考にして、75℃・85%RHの試験条件としました。それぞれのLCUを5台ずつ恒温恒湿器内に入れ、通常は走行中を模擬して制御電源のみを通電状態とし、約100時間毎にドアモックアップを使用してドア開閉等の機能確認を行いました。



図15 高温高湿動作試験

(2) 試験結果

試験開始後約675～770時間の間に、LCUの1つにドア位置を検知しないという故障が発生しました。同じ故障が、約842～910時間、約1,070～1,165時間、約1,165～1,237時間の間にも立て続けに発生しました。なお、その他については2,000時間まで試験を実施しましたが、機能上の故障（動作不良）は発生しませんでした。

故障はフィルムコンデンサ破損（図16）によるもので、さらに原因究明を行ったところ、コンデンサが過度の水分を吸湿したことにより、内部が腐食・膨張し、外部樹脂が破壊されたものであることが分かりました。

この故障モードは連続で高湿下にさらされたために発生したものであり、図14のような湿潤と乾燥を繰り返す

現車環境下では起こり難い現象であると考えられますが、相対的に弱点箇所といえます。したがって当該コンデンサについては、今後サンプル調査によりトレースすることとしました。

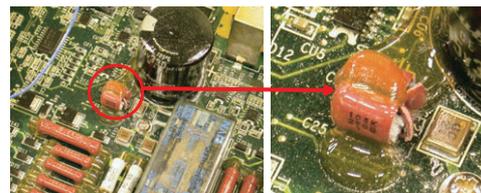


図16 フィルムコンデンサ破損

(3) 湿度影響評価

本加速試験における2,000時間が、実使用上の何年に相当するかを計算するため、式(4)に示すアレニウス活性化エネルギー式により、加速率（ a ）を推定しました⁴⁾。

$$\alpha = \exp\left[QH(H_2^2 - H_1^2) + \frac{QT}{K_B} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \quad \dots(2)$$

ここで、HおよびTはそれぞれ湿度および温度、また式(1)と同様に添字1, 2はそれぞれフィールド時、加速試験時を意味しており、 K_B はボルツマン定数、QHおよびQTはそれぞれ湿度および温度の活性化エネルギーです。

式(2)により、フィールドの温度・湿度を30℃（303K）・55%RHとして、計算すると $a \approx 111$ となり、試験時間2,000時間は約25年に相当します。従って、本試験結果からは、湿度に関しては25年以上の寿命であると推定しました。なお、フィールド時の温湿度は、現車測定時の平均温湿度から想定しました。現車測定は夏場に行ったことを考慮すれば、本評価は実際よりも厳しい値（安全側）で評価したと言えます。

これらの結果から鉄道車両用電子機器の使用環境では、湿度は寿命に対して特に影響を及ぼさないとと言えます。

5. 新幹線電子機器の余寿命評価

5.1 調査対象機器

これまでは在来線車両の電子機器について評価してきましたが、これらの知見を活かして新幹線車両の電子機器について評価を実施しました。今回調査する車両は10年以上経過した400系とE1系新幹線とし、CI等の制御装置を対象に劣化・余寿命の評価を行いました。（図17、図18）

5.2 使用環境調査

温度変化が劣化の大きな要因と考え、サーモビュアによる定置試験及び現車による使用温度測定を実施しました。その結果、特定の基板で温度上昇の顕著な抵抗器が集中する部分の発熱が大きいことが判明しました。温度上昇が最も高い部分では定置試験の結果、27.3Kを記録しました。



図17 400系MRf制御ユニット



図18 E1系CI制御ユニット

5.3 劣化・余寿命評価

余寿命の評価として、はんだ部の余寿命を評価するためヒートサイクル試験と、塵埃によるマイグレーション（絶縁皮膜等にイオン化した配線や電極の金属が入り込み絶縁低下を起こす現象）の影響を評価するため高温高湿通電試験を実施し、さらに劣化が懸念される電子部品の個別劣化評価を行いました。

(1) はんだ部の余寿命評価

ヒートサイクル試験では、図11のヒートサイクル試験1の条件で実施し、使用環境調査の結果を用いて式(1)のCoffin-Mansonの修正式により加速率を算出し余寿命の推定を行いました。

その結果、400系の基板はんだ部については、約14年の余寿命と推定し、E1系の基板はんだ部については、すでにクラックが発生している基板を除き、約11年以上の余寿命があると推定しました。

(2) 塵埃による影響評価

塵埃が付着しやすい基板があるため、その基板を高温高湿で最大負荷を与えてマイグレーションが発生するかを検証しました。試験時間は1000時間としましたが、マイグレーションの発生は認められず、マイグレーション

の観点からは約50年の余寿命があると推定できました。

(3) 電子部品の劣化評価

劣化が懸念される部品について個別調査を実施しました。特に劣化が懸念される電解コンデンサについては漏れの発生はありませんでしたが、電解容量について仕様よりも低い値を示していました。また、光インターフェースについては、特性の劣化は認められませんでした。現在製造中止の部品でもあり今後の定期検査で継続的に確認していく必要があります。

6. まとめ

これまでの研究の成果として、鉄道車両用電子機器の信頼性評価手法を確立し、それらの寿命を推定できることを確認できました。

しかし、電子機器プリント基板には非常に多くの部品が搭載されており、またその開発のスピードは目覚ましいものがあります。光モジュール、基板パターンの多層化、鉛レスハンダの使用等については、今後の劣化が予見できないのが現状です。

そのため、JR東日本では2006年度から外部有識者を招いて「電子機器メンテナンス検討委員会」を新たに立ち上げ、電気機器のメンテナンス方法を確立することにしました。また、フィールドでも定期的にサンプル調査を行い、劣化程度を検証しそのデータを蓄積することにより、設計にフィードバックして更に信頼性を向上させることにしています。

参考文献

- 1) 横山、今野、奈良、土屋、他：J-Rail2000講演論文集、P131-134、2000年
- 2) 土屋、安田、佐藤、横山、他：第38回 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集（講演番号536、CD-ROM）、2001年
- 3) 信学技訪EMD97-71 薄型ICパッケージのプリント基板実装技術検討：電子情報通信学会
- 4) C.Lea., A Scientific Guide to Surface Mount Technology
- 5) 鹿沼 陽次 編：信頼性加速試験の効率的な進め方とその実際、2001年、日本テクノセンタ
- 6) 秦 広；車両用電子部品の劣化と故障について、鉄道と電気技術、2005.7 Vol.16 No.7