

# 新形通勤電車用電子機器の信頼性評価



斉藤 憲司\* 吉田 豊\*

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る。しかし電子機器の増加に伴い、故障も多発する傾向となったことから、電子機器の信頼性向上が急務の課題となっている。

このような背景を踏まえて、JR東日本では1998年度に部外有識者を交えた「電子機器信頼性向上のための検討委員会(通称 電子機器委員会)」を設置して、鉄道車両用電子機器の故障原因および劣化の調査を行い、電子機器の劣化要因・弱点を明らかにするとともに、余寿命予測について研究している。

本研究では、JR東日本の最新の通勤電車であるE231系電車の電子機器の寿命評価を行い、寿命評価手法を確立するとともに、その寿命が16年以上あることを確認した。

●キーワード：電子機器、経年劣化、使用環境、加速試験、寿命予測

## 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図1に示すような電子機器(プリント基板)が数多く搭載されるようになってきている。しかし電子機器の増加に伴い、故障も多発する傾向となったことから、電子機器の信頼性向上が急務の課題となっている。

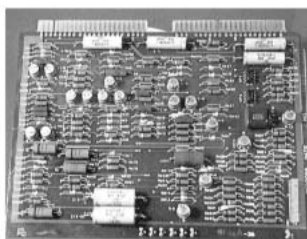


図1：電子機器列(プリント基板)

このような背景を踏まえて、JR東日本では1998年度に部外有識者を交えた「電子機器信頼性向上のための検討委員会(通称 電子機器委員会)」を設置して、鉄道車両用電子機器の信頼性向上に取り組んでいる。

最初に、製造から約20年が経過した201系電車の主制御装置(ゲート制御ユニット)を対象に、劣化調査を行った。<sup>1)</sup>その結果、図2に示すように、電子機器の弱点箇所は「はんだ接合部」(はんだクラック)と「電解コンデンサ」(容量抜け)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推定できた。

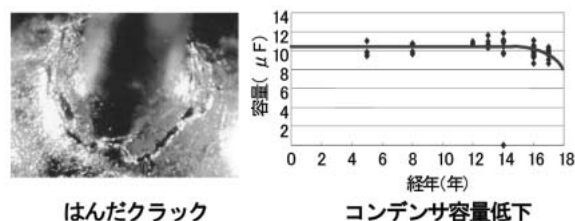


図2：電子機器劣化

電子機器の弱点箇所の把握の次のステップとして、205系電車の主制御器(添加励磁装置)を対象に、余寿命評価を試みた。<sup>2)</sup>205系電車には顕著な故障は発生していないが、1985年に投入以降およそ15年程度経過していたため、201系電車での調査結果を踏まえて、まず「はんだ接合部」・「電解コンデンサ」の劣化調査を行った。また、劣化要因が温度上昇と推定できたことから、サーモビュア撮影により各基板の発熱状況を調査した。その結果の1例を図3に示す。



図3：サーモビュア測定結果及びはんだクラック(AVR2基板)

図3からAVR2基板の温度上昇が顕著な箇所(約45K、他箇所は20K以下)にはんだクラックが発生しており、その原因が温度上昇であることを裏付ける結果となった。また、JR東日本

東京総合車両センター(旧 大井工場)でのメンテナンス記録を調べたところ、製造後約10年でAVR2基板に再はんだをしている実績があった。この再はんだにより、205系電車の故障が防止されていたと言える。

なお、電解コンデンサについては、201系電車より長寿命タイプのコンデンサを使用しているため、電気的特性における劣化の兆候は見られなかった。

以上により、電子機器の寿命は、はんだ部の寿命を評価することにより、推定できることになる。はんだ部の寿命は、ヒートサイクル試験を実施し2.3.1で述べるCoffin-Mansonの修正式により評価する方法が知られている。<sup>3)</sup>これにより余寿命評価を実施したところ、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た。

## 2 新形通勤電車用電子機器の信頼性評価

次に、JR東日本における最新の通勤電車であるE231系電車の寿命評価を行うこととした。E231系電車は、新しい保全体系の対象車両であることから、16年以上を基準として仕様を確認することを目的とした。

### 2.1 調査対象機器

調査対象機器は、主制御装置であるVVVF制御装置(無接点制御装置)のプリント基板に加えて、ドアコントロール基板(以後、LCU)とした。対象にLCUを加えたのは、LCUは209系以降のいわゆる新系列車両から導入され始めたこと、また搭載箇所が客室(戸袋)内であるため、VVVF制御装置等の気密性の高い床下機器箱内とは使用環境が異なるためである。

### 2.2 使用環境調査

#### 2.2.1 VVVF制御装置

##### (1) 発熱状況予備調査

使用環境が電子機器の寿命を左右することから、まず基板の発熱状況を調べるため、サーモビュアによる測定を行った。測定結果の1例を図4に示す。

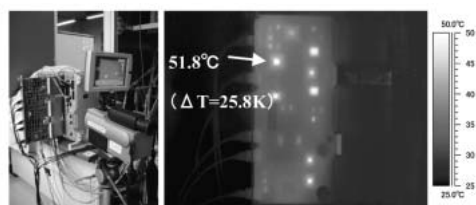


図4：PWM基板発熱状況

なお図4に示したPWM基板は、VVVF制御装置のなかで温度上昇が最も顕著な基板であり、その温度上昇は25.8Kであった。

##### (2) 現車測定

次に、冬季・夏季の2回に渡り、それぞれ約10日間の現車における使用環境の測定を実施した。測定対象は、無接点制御装置が搭載されている床下機器箱内の温度(箱内温度)、プリント基板間の温度(基板間温度)、外気としてJR東日本小山車両センター(旧 小山電車区)構内温度とした。測定器の仮設状況を図5に、測定結果を図6に示す。

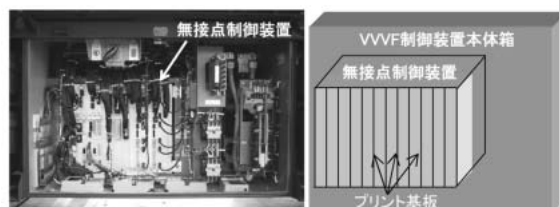


図5：測定器仮設状況

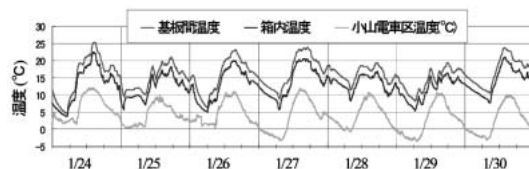


図6：温度測定結果

図6は冬季の現車測定の一部であるが、夏季もベースの温度が上がるものの、ほぼ同様の傾向である。現車測定により、以下の結果が得られた。

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

また、温度と同時に湿度の測定を行った。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)であった。さらに、塵埃等もなく、電子機器にとって良好な環境であることが分かった。

#### 2.2.2 ドアコントロール基板(LCU)

LCUについても、VVVF制御装置と同様に、基板の発熱状況調査と現車測定を実施した。基板の発熱状況は、VVVF制御装置とはほぼ同じで約25Kであった。

現車測定は、夏季に約10日間、温湿度測定を実施した。測定箇所は図7に示すドア部(ドア内、基板周囲)・車内・外気の温

湿度とした。測定結果の一部を図8に示す。

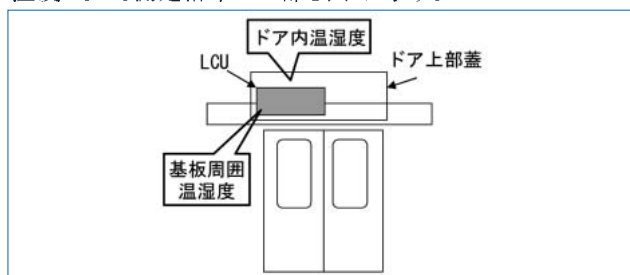


図7：湿度測定箇所

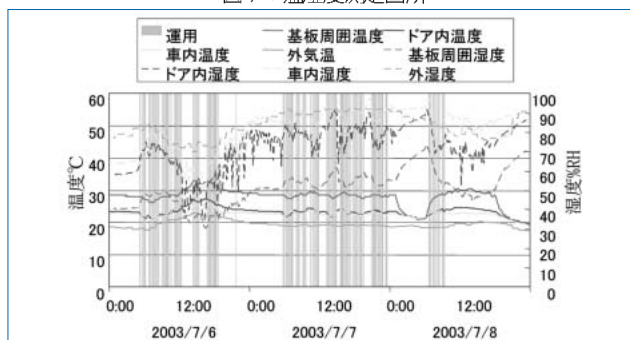


図8：湿度測定結果

湿度測定から、以下の結果が得られた。

- ・ 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

ここで、基板周囲湿度については、冷房の効果等により車内・ドア内湿度よりも低くなるが、車両留置中に高くなる傾向であった。

以上の結果を基に加速試験を実施し、電子機器の寿命を評価することとした。

## 2.3 加速試験

使用環境調査によって、床下機器箱内のVVVF制御装置については湿度の影響を考慮するほど上下動はないが、ドア部については考慮する必要があると判断した。なお、一般に湿度による電子機器の故障モードとしては、アルミ配線の腐食等が知られている。<sup>4)</sup>

従って、耐熱性(温度上昇)の寿命評価はVVVF制御装置を対象としたヒートサイクル試験によるはんだ部の観察により、耐湿性についてはLCUを対象とした高温高湿動作試験により評価することとした。

### 2.3.1 ヒートサイクル試験

はんだ部評価におけるヒートサイクル試験の加速率( $\alpha$ )は、式(1)に示すCoffin-Mansonの修正式により算出した。<sup>3)</sup>

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

式(1)において、 $f$ は温度サイクル数/日、 $\Delta T$ は温度幅、 $T_{max}$ は最高温度、添字1,2はそれぞれフィールド時、加速試験時を示している。また、 $Q, K_B$ はそれぞれ活性化エネルギー・ボルツマン定数である。

ここで、係数 $n$ は2~2.4の範囲にあるとされておりこの値により評価に差が生じる。従って、係数 $n$ を推定するために、図9に示す2種類のヒートサイクル試験を実施した(加速率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、推定が可能となる。)

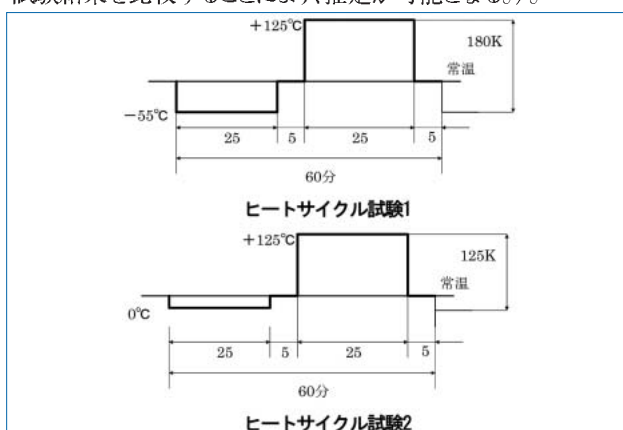
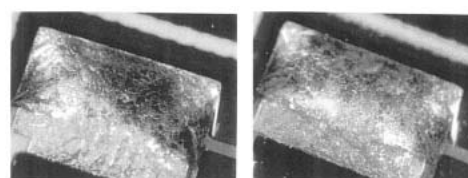


図9：ヒートサイクル試験条件

ヒートサイクル試験の結果の一部を図10に示す。



ヒートサイクル試験1 600サイクル終了後  
ヒートサイクル試験2 2200サイクル終了後

図10：ヒートサイクル試験結果

行った2種類のヒートサイクル試験では、はんだクラックの発生には至らなかった。そこで、ヒートサイクル試験1,2の終了時である600サイクルと2200サイクルにおける劣化状態が等しいと仮定して、 $n$ を推定した。その結果、車両用電子機器の寿命評価においては、 $n=2.4$ を採用することとした。

$n=2.4$ を用いると、ヒートサイクル試験1,2の終了サイクルはともに20年以上と計算されるため、E231系VVVF制御装置の耐熱性寿命は16年以上であるという結果が得られた。

### 2.3.2 高温高湿動作試験

#### (1) 試験概要

一般に電子機器の耐湿性の評価試験である高温高湿動作試験は、85℃・85%RHの環境で行われる。<sup>4)</sup>ここでは、2つのメ

カーのLCUを対象に高温高湿動作試験を行うこととしたが、LCUに搭載されている部品カタログに記載されている動作保証温度等を参考にして、試験条件は75℃・85%RHとした。試験装置の外観を図11に示す。LCUをそれぞれ5台ずつ、恒温恒湿器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・一斉開放等の機能確認を行った。なお、試験時間は2000時間とした。



図11：高温高湿動作試験

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た。同じ故障が同種のLCUに約842～910時間、約1070～1165時間、約1165～1237時間の間に続けて発生した。なお、この他については、試験終了まで機能上の故障は発生しなかった。

## (2) 故障解析

高温高湿動作試験中に発生した故障について、故障解析を実施した。基板の外観検査を行ったところ、図12に示すように、故障した全てのLCUのフィルムコンデンサが破損していた。フィルムコンデンサを正常品に取替えたところ、正常に機能したため、故障原因はフィルムコンデンサ破損であることが確認された。

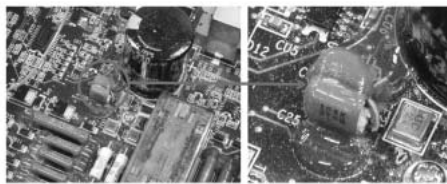


図12：フィルムコンデンサ破損

次に、フィルムコンデンサ破損の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った。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8のような湿潤と乾燥を繰り返す現車環境下においては起こり難い現象であると考えられるが、他の電子部品に故障が発生しなかったことを考慮すると、相対的には弱点箇所と言える。従って、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た。

## (3) 湿度影響評価

本加速試験における2000時間が、実使用上の何年に相当するかを計算するため、式(2)に示すアレニウス活性エネルギー式により、加速率( $\alpha$ )を推定した。<sup>5)</sup>

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

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、加速試験時を示しており、 $K_B$ 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ある。

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 $\alpha \approx 111$ となり、試験時間2000時間は約25年に相当する。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言える。ここで、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た。現車測定を湿度環境の厳しい夏季に行ったことを考慮すれば、本評価は実際よりも安全側で評価したことになる。

従って、鉄道車両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る。

## 3 おわりに

本研究の成果として、新形通勤電車用電子機器の使用環境(温湿度)を把握し、その寿命が16年以上であると判断することができた。

しかし、電子基板には非常に多くの部品が搭載されており、またその開発スピードは目覚ましい。さらに車両用ではないが、他の鉄道会社の地上設備であるCTC装置において、電子機器の経年劣化と想定される故障が発生する<sup>6)</sup>等の例も見られることから、電子機器の信頼性を維持するためには、7～8年というスパンでサンプル調査を行い、劣化程度を検証していくことが望ましいと考える。

### 参考文献

- 1) 横山、今野、奈良、土屋、他：「電子機器のメンテナンス手法の研究」J-Rail2000講演論文集、P131-134、2000年
- 2) 土屋、安田、佐藤、横山、他：「電子機器のライフサイクルに関する研究」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) 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、日本テクノセンター
- 5) C.Lea, A Scientific Guide to Surface Mount Technology
- 6) 鉄道と電気技術 2004年7月 VOL.15 No.7:(社)日本鉄道電気技術協会