

1303 鉄道車両用電子機器の信頼性評価の研究

Research of reliability evaluation in electric devices used in rolling stock

正 [機] ○斉藤 憲司 (JR 東日本)

阿保 史彦 (JR 東日本)

正 [電] 岸本 康治 (日立製作所)

Kenji SAITO, East Japan Railway Co. 2-0, Nisshin-cho, Kita-ku, Saitama City

Fumihiko ABO, East Japan Railway Co.

Yasuharu KISHIMOTO, Hitachi, Ltd.

For the purposes of improving the reliability of rolling stock, and saving labor on maintenance, many electric devices are increasingly being carried on board instead of machine parts, such as cam, switch, etc. However, with the increase in the use of these electrical devices, there has also been an increase in the tendency for these devices to fail frequently. Therefore, the improvement in reliability of these electric devices has become a pressing matter.

Based on this background, we have investigated the cause of failure and degradation condition of an electric device, and have found the factors that cause failure, and with what tendency. In addition, since the location of where the electric device is placed seemed to influence the driver's degradation greatly, its usage environment was investigated in detail. Finally, we carried out life an accelerated examination, and established a life evaluation technique for electric devices used in rolling stock.

Keyword: Electric device, Secular deterioration, Use environment, Heat cycle test, Lifetime evaluation

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る。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たが、電子機器は劣化しないと考えられており、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た。そのため、電子機器の信頼性向上が急務の課題となっていた。

このような背景を踏まえて、電子機器の故障原因の調査および劣化調査を行い、電子機器の劣化傾向・劣化要因を明らかにすることとした。さらに、電子機器の寿命は搭載されている箇所の環境が劣化に大きく影響すると言われていることから、使用環境の精査を行い、また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、信頼性を向上することを目的とした。

2. 電子機器劣化調査

2.1 調査対象機器

まず、経年により電子機器がどのように劣化するのか調査することとした。対象は、1979年に開発され製造から約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(Fig. 1)の電子機器(プリント基板)とした。¹⁾

劣化調査を行うに際して、JR 東日本大井工場でのメンテナンス記録を調査した結果、次の事が明らかになった。

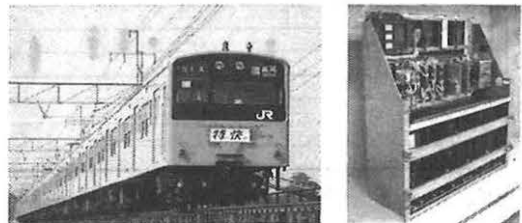


Fig.1 Gate control unit of 201 series train

- ① ゲート制御ユニットは様々な基板から成り立っているが、不具合が多発している基板はその内の数枚である。
- ② 基板の不具合箇所は、数箇所に限られる。

以上の結果を踏まえて、劣化調査は表1に示す項目について行うこととした。

Table 1. Investigation items and contents

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・IC	異常な動作の有無	通電試験

2.2 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 Fig.2 に示すようなクラックが見つかった。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る。

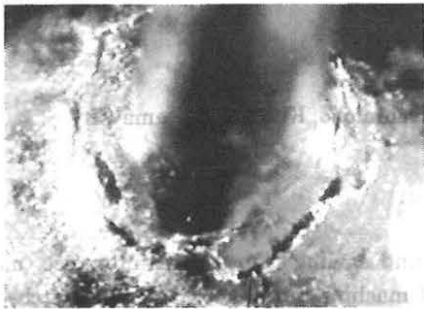


Fig.2 Crack at solder jointing point

(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が、容量を測定したところ低下しているものも多く見受けられた。さらに、JR 東日本大井工場で行っていた電解コンデンサの容量測定結果(Fig. 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った。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る。

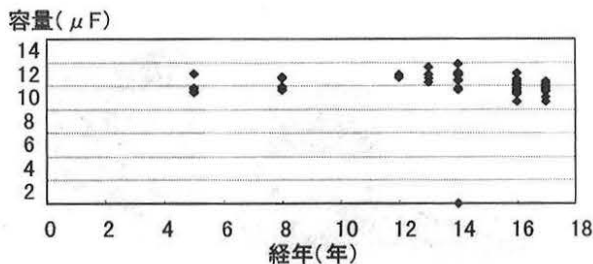


Fig.3 Capacity change as age deteriorate

なお、この他の項目については特に異常はなく、劣化傾向は見られなかった。

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「アルミ電解コンデンサ」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った。

因みに、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、更新工事を実施した。

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事ができたので、電子機器の寿命評価が可能が検証することとした。

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)とした(Fig. 4)。

205 系電車を対象とした理由は、205 系電車は 1985 年に投入後およそ 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ないが、他線区等へ転用改造され今

後 15 年程度使用する計画があり、その使用可否を判断する必要があったためである。

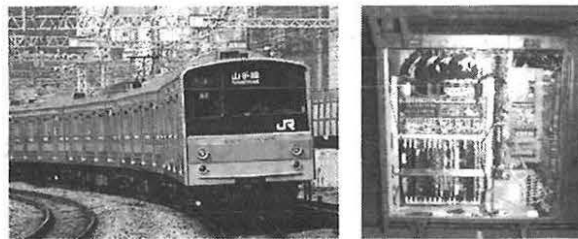


Fig.4 Main controller of 205 series train

3.2 電子機器劣化調査

劣化調査は、201 系での調査結果から、はんだの劣化調査・電解コンデンサの電気的特性測定を行なうこととし、また温度環境が劣化に影響すると考えられることから、基板の発熱状況を調査することとした。これらの結果を以下に示す。

(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た。この他、JR 東日本大井工場での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った。

なお、この他の基板については、はんだクラックは発生していなかった。

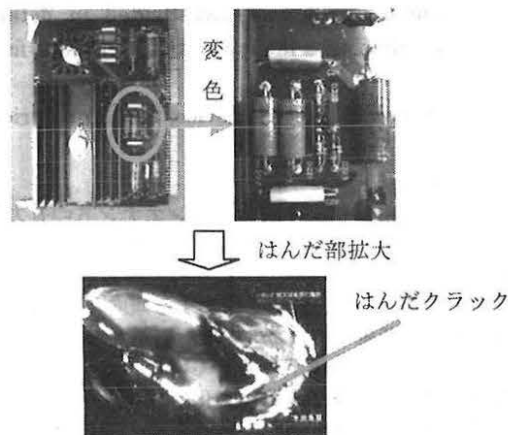


Fig.5 Crack at solder jointing point (AVR2 board)

(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なかった。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る。

3.3 電子機器寿命評価

以上の結果、電子機器の寿命を左右する最大の原因ははんだクラックである事が分った。従って、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ることにした。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 と顕著であった(Fig. 6)。

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った。

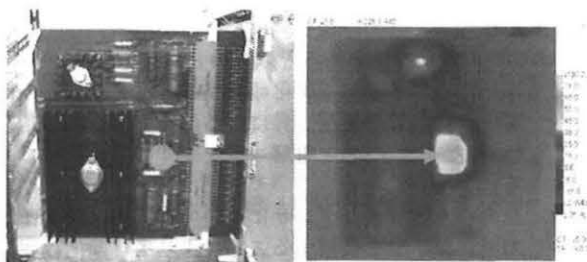


Fig.6 Temperature distribution (AVR2 board)

(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る。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、Fig. 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た。

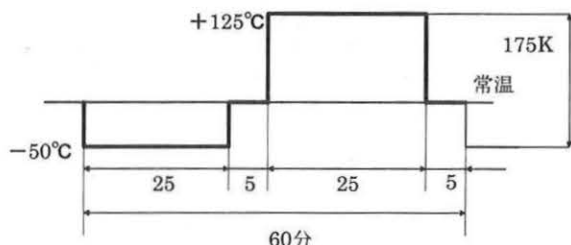


Fig.7 Heat Cycle Test conditions

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(α)を算出し、余寿命の推定を行った。Coffin-Manson の修正式を式(1)に示す。

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

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る。また、 Q, K_B はそれぞれはんだの活性化エネルギー・ボルツマン定数である。

ここで、 n は 2~2.4 の値をとると云われているが、安全を考慮して 2 と定め、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た。

4. 電子機器寿命評価手法の検証

4.1 調査対象機器

電子機器寿命評価手法を検証することを目的とし、ヒートサイクル試験の精度向上を試みた。対象機器は、これまでは経年劣化した基板を対象としていたため、ここでは JR 東日本の最新の車両である E231 系 VVVF 制御装置とした (Fig. 8)。また、JR 東日本では、209 系以降の車両(いわゆる新系列車両)については、新保全体系と呼ばれる新しい検査を実施している。新保全体系では、走行距離 480 万 km (約 32 年)で廃車とし、その中間における 240 万 km (約 16 年)において車体保全と呼ばれるリフレッシュ工事を施工するこ

ととしている。E231 系車両の電子機器は、仕様 16 年で設計されているため、その検証も併せて行なうこととした。

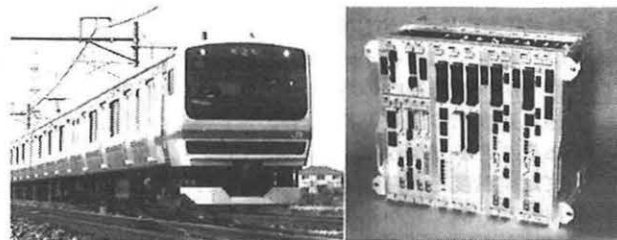


Fig.8 VVVF controller of E231 series train

4.2 使用環境調査

前章では、Coffin-Manson の修正式による加速率の算出の際に、フィールド時の温度($\Delta T_1, T_{1max}$)は推定値を用いた。ここでは、精度を向上するため、基板の発熱状況・現車による温度測定を実施した。 $\Delta T_1, T_{1max}$ は以下の式で表すことができる。

$$\Delta T_1 = \Delta T_a + \Delta T_B + \Delta T_{ap} + \Delta T_s \dots (2)$$

$$T_{1max} = T_{amax} + \Delta T_B + \Delta T_{ap} + \Delta T_s \dots (3)$$

ここで、 ΔT_a : 1 日の気温変化、 ΔT_B : 箱内温度上昇、 ΔT_{ap} : プリント基板周囲温度上昇、 ΔT_s : 自己発熱による温度上昇、 T_{amax} : 日の最高気温 である。

(1) 発熱状況調査

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

この結果、基板の発熱(ΔT_s)は 26K と定めた。

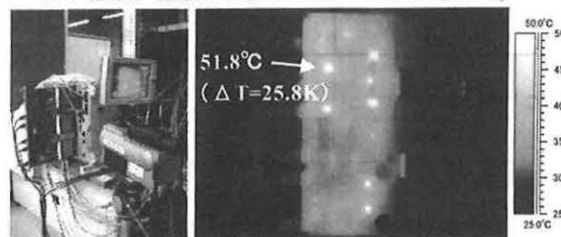


Fig.9 Temperature distribution (PWM board)

(2) 現車による温度測定

次に、冬季・夏期の 2 回に渡り、それぞれ約 10 日間の現車測定を実施した (Fig. 10)。その結果を Fig. 11 に示す。

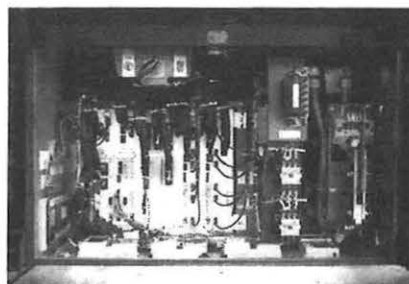


Fig.10 Temporary installation of the measuring instrument

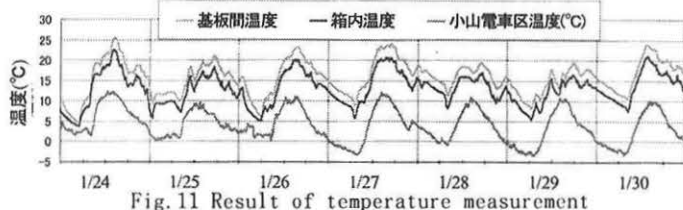


Fig.11 Result of temperature measurement

Fig. 11 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だけでほぼ同様の傾向を示している。この結果、1日の温度変化(ΔT_a)および最高温度(T_{max})がそれぞれ約10K、313K(40℃)であることが確認された他、

- ① 現車におけるヒートサイクルは1サイクル/日($f_1=1$)
- ② 床下機器箱内の温度上昇(ΔT_B)は約10K
- ③ 基板間の温度上昇(ΔT_{ap})は約5K

であることが分かった。

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、電子機器にとって非常に良好な環境であることが分かった。

以上により、電子機器の実使用環境を把握することができた。

(3)ヒートサイクル試験

ここでは、Fig. 12-1、12-2に示す2種類のヒートサイクル試験を実施した。ヒートサイクル試験1,2に違いは低温側の温度であり、それぞれ-55℃、0℃とした。よって、 ΔT_2 はそれぞれ180K、125K、 T_2max は共に398K(125℃)となり、ヒートサイクル試験1の方が厳しい試験となる。2種類の試験を実施した理由は、加速率(α)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からである。

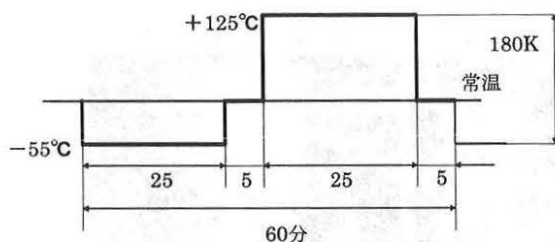


Fig. 12-1 Heat Cycle Test 1

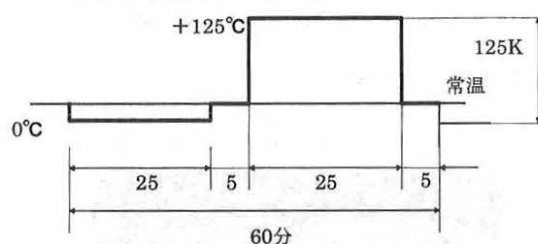


Fig. 12-2 Heat Cycle Test 2

ヒートサイクル試験の結果の一部をFig. 12-1、12-2に示す。行った2種類のヒートサイクルでははんだクラックは発生しなかった。そこで、ヒートサイクル試験1,2の600サイクル、2200サイクルが等しいと仮定し、 n を推定した。その結果、車両用電子機器の寿命評価では $n=2.4$ を採用することとした。

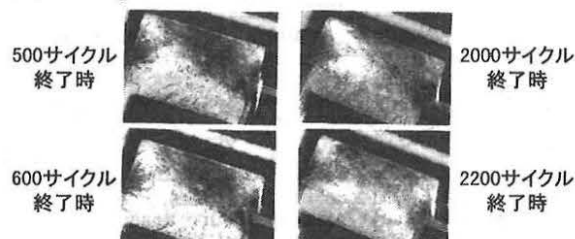


Fig. 13 Result of Heat Cycle Test 1(Left), 2(Right)

以上の結果を用いて、E231系VVVF制御装置の寿命を推定すると、16年以上であることが確認できた。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のとおりとなる。

1. 車両用の電子機器で劣化傾向が最も早く現れるのは、基板の発熱等の温度上昇によるはんだ接合部の亀裂(はんだクラック)と電解コンデンサの容量抜けである。
2. 1のうち電解コンデンサについては、長寿命タイプのコンデンサを使用することにより劣化傾向は現れないため、はんだ部の寿命が電子機器の寿命となる。
3. はんだ部の寿命は、使用環境(温度)の精査とヒートサイクル試験を実施し、Coffin-Mansonの修正式により評価することができる。

5. 今後の課題

本研究により、鉄道車両用電子機器の寿命の評価手法を確立する事ができた。しかし、この手法は床下機器箱内という良好な環境下に搭載されている電子機器に対してである。新系列車両では、床下機器箱以外にも搭載されるようになっているため、使用環境および寿命が異なることが予想される。実際、室内に搭載されているドアコントロール基板を対象に現車測定(測定時期 平成15年7月初旬)を実施したところ、基板周辺湿度が80%RHを超える測定結果が得られている。

従って、鉄道車両用電子機器の寿命に対する湿度の影響について引き続き調査する必要がある。このため、現在、E231系車両のドアコントロール基板を対象に、高温高湿動作試験を実施し、その影響について検証を行っている。

また、電子機器の技術の進歩はめざましく、新しい電子部品が次々に開発されている。電子部品単品の品質については、本研究とこれまでの故障実績からほぼ問題ないことが確認されているが、新しい電子部品を採用する際には注意を要する。具体的には、使用環境・使用期間を明確にメーカーに伝え、場合によっては鉄道事業者自らが加速試験を行い、検証する必要があると考える。

6. おわりに

本研究の成果として鉄道車両用電子機器の弱点箇所(発熱部)を把握し、その寿命が16年以上であることが確認できた。その上で、電子機器の信頼性を確かなものとするためには、定期検査時にサンプルチェックを行うことが望ましいと考える。

従って、現在、走行距離がおよそ160万kmの209系・E217系車両に対して実施している精密な検査も踏まえて、定期検査時の検査項目を決定する予定である。

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