

在来線新系列車両用 電子機器の劣化評価



松本 隆*

鉄道車両用電子機器に対するこれまでの信頼性評価の取組みから、「はんだ」「コンデンサ」の劣化が主な要素であることがわかっている。しかし、他にも有寿命と考えられていながら実際の寿命が明らかでない部品もある。そこで、使用年数の長い電子機器で使用している部品のうち寿命が不明確なものをいくつか選定し、これらを対象に劣化調査を実施した。このうち光電子部品については加速試験を行い寿命評価も実施した。

また、使用年数の長い電子機器のはんだ部に対する劣化調査および加速試験を行い、車両用電子機器の劣化に関するフィールドデータを蓄積することによって、従来行ってきた経年の短い時点における劣化評価に対する妥当性を確認した。

●キーワード：新系列車両、電子機器、劣化調査、寿命評価

1. はじめに

新系列車両は従来の車両と比べ電子化が進み、高性能化やメンテナンスフリー化が進んできた。しかし、電子機器を多く搭載するにつれてこれに関わる故障も増加傾向となり、特に使用年数の長い電子機器に多く見られるようになってきた。そこでJR東日本では電子機器の故障原因調査、劣化調査および余寿命評価を実施して弱点となる機器を明らかにし、予防保全に取り組んできた^{1) 2) 3)}。これまでの劣化評価の取組みから、車両で使用される電子機器では周囲温度が最も劣化に影響することを確認し、また劣化の主な要素が「はんだ」や「コンデンサ」であることを確認している。

しかし、それら以外の要素について有寿命品と考えられる部品もある。そのため、それらを調査してメンテナンスのタイミングを検討する必要がある。そこで今回は製造から約13年経過した209系電車（図1a）の車両用電子機器の中から寿命が明確になっていない部品を中心に現状の劣化調査を行った。その中でも近年使用されることが一般的になってきた光電子部品については、劣化調査に加え劣化加速試験を実施し寿命評価を行った。

さらに、約7年経過したE231系電車（図1b）の車両用電子機器についても、VVVFインバータ装置など主要な電子機器について劣化調査および加速試験によるはんだ部の評価を行った。



a.209系

b.E231系

図1 調査対象車両

2. 電子機器（部品）の劣化評価

電子機器で使用している部品にはさまざまなものがあるが、今回は特に劣化が懸念される部品について、電気的特性調査や分解調査を実施し劣化を評価した。さらに光電子部品については、加速試験も実施し、その後の寿命についての評価を行った。

またディレーティング^注が計算どおりになっているかを確認する必要があるため、基板の自己発熱や周囲温度について調査し、設計時と実使用時との差異について比較評価した。

2.1 光電子部品

光電子部品は小型化・低価格化が進み、さらに大容量化や耐ノイズ性、絶縁能力の向上などが図られてきたことから、鉄道車両用電子機器にも使用されるようになってきている。

今回は209系電車に搭載しているVVVFインバータ装置の無接点制御装置基板に実装している光送信モジュールを対象に劣化評価を実施した。図2に今回調査したモジュ

* JR東日本研究開発センター テクニカルセンター
注) 素子の故障率を少なくする目的で、素子の定格よりも十分低いストレスで意図的に使用すること。

ールの実装基板を示す。

光送信モジュールは電子基板とレーザダイオードで構成されており、無接点制御装置からのON/OFF信号を電気信号から光信号に変換して半導体ユニットへ伝える役割を持つ。

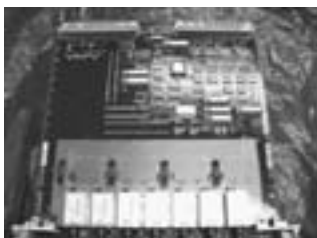


図2 光送信モジュール実装基板

2.1.1 電気的特性試験及び外観調査

はじめに電気的特性を測定し、基準値と比較することにより良品であることを確認した。さらに分解調査を行った結果、外観において異常・劣化は見られなかった。取り出したレーザダイオードの外観の写真を図3に、その素子部の顕微鏡写真を図4に示す。



図3 レーザダイオードの外観写真

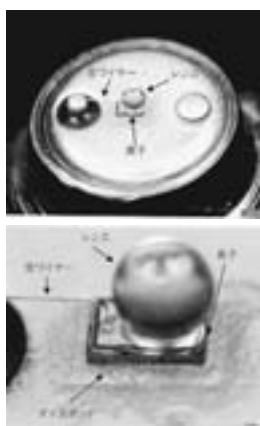


図4 レーザダイオード素子部の顕微鏡写真

2.1.2 劣化加速試験

レーザダイオードの劣化モードでは高温動作による劣化が最も頻度が高いと考えられるため、今回は高温動作試験を実施した。部品を抜き取り方式で試験する場合には、MIL規格 (Military Standard: 米国国防省が制定する規格) MIL-S-19500Gが広く用いられている。この規格では最小抜

き取り個数と判定個数が決められていることから今回の抜き取り個数はこれに従い22個とした。また加速試験条件は、同規格MIL-HDBK-217Fに沿って行うこととし、使用環境から加速試験条件を表1のように決定した。なお今回の試験は、現車で13年程度使用後のレーザダイオードとした。

表1 レーザダイオード加速試験条件

項目	内容
試験温度	90℃
試験個数	22個
通電条件	使用条件に準じ、信号に800Hzのパルス印加
中間取出し	98H, 168H, 500H, 1000H, 2000H, 3000H, 4000H, 5000H (H:時間)
判定基準	各スペック値

加速試験を実施するには、加速率を算出する必要があるため、まず加速試験時のジャンクション温度と夏期運転時のジャンクション温度を求めた。定置試験の結果、部品上部の最大温度上昇が22.5Kであったことから、これをレーザダイオードの自己発熱と推定した。このことと現車温度測定の結果、夏期営業運転中の周囲温度が39.2Kであったことから、夏期運転時のジャンクション温度 (T_{jT}) は61.7℃ (=39.2+22.5) とした。また表1の試験温度を90℃とすることから加速試験でのジャンクション温度 (T_{jA}) は112.5℃ (=90+22.5) とした。

加速率は、下記の式 (1) の温度ファクタ (π) を各条件で算出しそれぞれの比を取ることで決定する⁴⁾。温度ファクタとは劣化に関わるいくつかの要素から温度に関する部分を数値化したものである。

$$\pi = \exp \left[-4635 \left(\frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{298} \right) \right] \dots\dots(1)$$

式 (1) に各ジャンクション温度 (T_j) を代入し、各条件での温度ファクタを算出した結果、

加速試験での温度ファクタ $\pi_t=34.1$ ($T_j=T_{jT}$ の時)

実運転時の温度ファクタ $\pi_r=5.5$ ($T_j=T_{jR}$ の時)

となった。そして、これらの温度ファクタの比より加速率 ($\pi_t/\pi_r=34.1/5.5$) =6.2倍を得た。

高温動作試験では、5000時間後に3個の不良品を確認し、それ以外は良品と判定した。不良の現象は3個とも発光不良であった。この3個の電気的特性を調査したところ電気回路部分に異常が無かったことから、いずれも素子の不良と考えるのが適切だと判断した。次にこれら3個に対し分解調査を実施したところ、いずれもレーザダイオードのダ

イスポンドにおいて顕著なクラックは見られなかったものの黒く変色していることがわかった（図5）。またアルミパターンでも一部パターンの欠落が見られた。しかし、これらが腐食によるものであるか否かは確認できなかった。

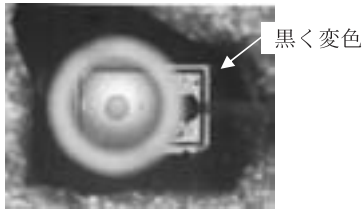


図5 加速試験後の発光不良品の状態

2.1.3 余寿命推定

偶発故障期である加速試験開始時点から摩耗故障期に至るまでの期間を余寿命と考えることで、今回は加速試験で求めた平均故障寿命（MTTF：Mean Time to Failure）を余寿命とした。

4000時間での調査では故障の発生が見られず、5000時間で3個の故障発生を確認し、いずれも摩耗故障と見られたことから、4500時間までを偶発故障期と仮定して余寿命推定を行った。

MTTF（平均故障寿命）は、

$$MTTF = \frac{T}{a} \dots\dots (2)$$

と示される。このときTは総試験時間、aはJISで定められた信頼水準を決定する定数であり信頼水準90%のとき2.3となる⁵⁾。総試験時間（T）は4500時間×22個×6.2倍=623700時間と求まり、MTTF（信頼水準90%）は、MTTF（信頼水準90%）=623700時間/2.3=271173.9時間となる。車両の稼働時間を4500時間/年（15時間/日×300日/年）とすると、MTTF（信頼水準90%）=60.3年となる。

2.1.4 光電子部品まとめ

以上をまとめると、光電子部品の13年程度実使用した光送信モジュールの現状劣化調査から全て良品であることを確認し、その後の余寿命を加速試験から60年と推定した。

また、主幹制御器に使用するフォトカプラに対しても同様の加速試験を行い、余寿命を38年と推定した。

2.2 その他の電子部品

この章では特に劣化が懸念される部品として光電子部品以外の部品を調査した。選定にあたっては比較的新しい部品であるなど経年劣化に対する知見に乏しい部品や、5年程度で不良となったものがある部品など、13年程度実際に使

用した状態を確認する必要があるものとした。また7年程度経過した部品については、電解コンデンサを含め調査を実施した。

2.2.1 経年13年部品の劣化調査

209系電車で約13年使用した部品としてDC/DCコンバータ、HIC、PLD、オペアンプ、リードリレー、絶縁アンプなどについて調査を実施した。表2に209系電車の調査部品と調査部位について示す。

部品調査として電気的特性試験および分解調査を実施したところ、ブレーキ装置のリードリレーの一部で接触抵抗値が高かった。しかし若干の変化であり許容値内であることを確認した。

このように一部の部品に若干の特性値の変化が見られた程度であり、大きな劣化は確認されなかったことから、今回調査した部品について13年以上の寿命があることを確認した。

表2 209系電車の調査部品とその部位

素子	調査部位
DC-DCコンバータ	VVVFインバータ装置
H-IC	VVVFインバータ装置 ブレーキ装置
IC(絶縁アンプ)	補助電源装置 ブレーキ装置
オペアンプ	VVVFインバータ装置 戸閉装置
リードリレー	VVVFインバータ装置 制御伝送装置 補助電源装置 ブレーキ装置
スナバコンデンサ	補助電源装置
巻線抵抗	補助電源装置

2.2.2 経年7年部品の劣化調査

次に、E231系電車で7年程度使用した部品についても調査を実施した。主幹制御器のDC/DCコンバータや、VVVFインバータ装置と補助電源装置の基板に実装している電解コンデンサや光モジュールについて、電気的特性や分解調査を実施した。

その結果、一部の電解コンデンサで特性値に変化が見られた。補助電源装置の実装部品の電解コンデンサで規定値内に収まっていたが、わずかながら劣化傾向が認められた。また主幹制御器のDC/DCコンバータは、外観・電気的特性に異常は無かったが、製品内に含まれる電解コンデンサが規定下限値に近い値となっていた。

それ以外の部品については劣化傾向は認められなかったことから、電解コンデンサは注意を要する部品であることを確認した。

2.3 ディレーティング検証

実運用で実際の機器周囲温度環境測定やサーモグラフィ

による自己発熱測定を実施し、設計時に想定した温度に対して実測値との差異を検証し、デレレーティングが計算どおり実施できているか確認した。

E231系電車のVVVFインバータ装置について調査を実施したところ、工場内動作試験時と実運用時の機器周囲温度上昇測定値は同程度であった。一部基板では、設計時の想定よりも5K以上のマージンを持っているが、このことは特に電解コンデンサの長寿命に寄与するものと考えられる。また、サーモグラフィにて基板に実装している部品ごとに自己発熱状況を測定した結果、無接点制御装置の基板の中の1枚について、設計値として19K程度の温度上昇を想定した抵抗器に対し、実使用では46.4Kの温度上昇であるものがあった。この理由として、この抵抗部品は同様な抵抗が密集して実装されているため、基板の熱放出量を超えてしまい熱のこもりが発生したものと考える。その対策として、抵抗器として表面積の広いタイプのものを用いる方法や、抵抗部品同士を千鳥状にして上側の抵抗器が受ける下側の抵抗器からの熱を少なくする対策（図6）が考えられる。

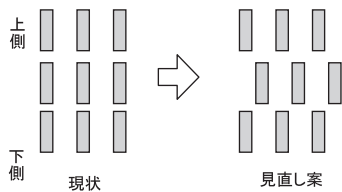


図6 抵抗器の配列見直しの例

これは大型部品のはんだ部に応力が他の部品よりも大きくかかるためであると考えられる。また、ICソケット部に微細なクラックが発生していることがわかった。このICソケットは取り外し作業が行われる部位であるために、取り外し時などに応力が働いたためクラックが発生したものと推定される。

次に制御伝送装置の基板を調査した。その結果、コンデンサとダイオードのはんだ部にクラックの発生を認めたが、断面観察したところ、いずれも顕著な進展でないことがわかった（図7）。またこちらの基板についてもICソケット部の根元に微細なクラックが発生していた。このICソケットは取り外し作業を行う部位ではなく、ソケット材に使用している樹脂の温度変動による伸縮が大きいために発生していると考えられる。

それ以外の機器の調査基板についてはクラックなどの異常は発見されなかった。



a.外観調査結果



b.断面観察結果

図7 はんだ部のクラック発生状況

3. 電子機器（はんだ部）の劣化評価

基板はんだ部については、現状を調査する劣化調査とその後のクラックが入るまでの期間を評価する加速試験を実施した。劣化調査については部品の劣化評価と同様に、209系電車で実際に13年程度使用した基板のはんだ部を調査した。また加速試験は7年程度使用した基板のはんだ部に対して実施することとした。

3.1 劣化調査

209系電車の13年程度使用したVVVFインバータ装置および制御伝送装置を対象にはんだ部の劣化を調査した。まずVVVFインバータ装置について外観調査をしたところ、クラックなどの劣化は認められなかった。次にはんだ内部の状態を調査するためはんだ部をカッティングし、その断面を観察した結果、大型部品（DC/DCコンバータやトランス）の部品面側のはんだで微細なクラックが発生していることがわかった。

3.2 加速試験によるはんだ評価

はんだは劣化することでクラックが発生し、そのクラックが進展すると、最終的には導通不良となり装置の故障に至る。クラックは温度上昇、下降の繰り返しで、はんだ部に応力負荷がかかることにより発生するものである。そこで経年7年程度の基板に対し強制的に温度振幅を与え、はんだの劣化を加速させるヒートサイクル試験を実施して、はんだ部にクラックが入るまでの期間を推定した。表3にヒートサイクル試験を実施した基板を示す。対象とするこれら基板のうち、VVVFインバータ装置と補助電源装置の調査品はIGBTなどのスイッチング素子に指令を出す基板であり、過去の209系劣化調査にて劣化の傾向が顕著に現れたため、E231系についても同様の場所について調査する必要があると考えて基板を選定し加速試験を実施した。さらに戸閉装置の制御基板についても設置環境が悪いことから選定した。

表3 ヒートサイクル試験実施基板

車両	装置	調査基板
E231系	VVVFインバータ装置	ゲートドライブ基板
		パワーユニット基板
	補助電源装置	INVゲートユニット インバータユニット基板
217系	戸閉装置	制御基板

はんだ部の評価をする方法としては、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方法が知られている⁹⁾。

試験条件として、図8に示すようなヒートサイクルを1日に22サイクル与えることとした。試験装置は、JR東日本研究開発センターの冷熱衝撃試験機を使用した(図9)。

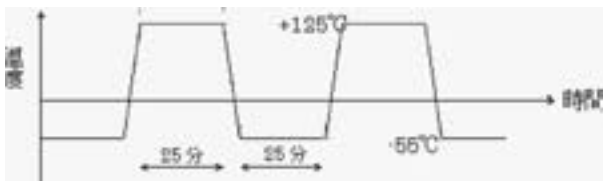


図8 ヒートサイクル試験温度条件



図9 冷熱衝撃試験機

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、クラック発生までの期間の推定を行った。Coffin-Mansonの修正式を式(3)に示す。

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

この式において、 f_1 は1日当りの温度サイクル数、 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 、 n はそれぞれ活性化エネルギー・ボルツマン定数・材料定数である。

図8より加速試験時の ΔT_2 を180K、 T_{2max} を398K(=125°C)とし、 f_2 を22とした。フィールド時の条件によって決まる値である ΔT_1 、 T_{1max} 、 f_1 および材料定数 n は各試験対象の使用環境により決定した。

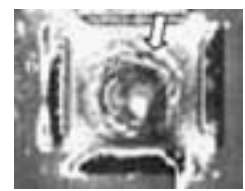
3.2.1 VVVFインバータ装置

VVVFインバータ装置については、表3に示す2形式の基板を対象にヒートサイクル試験を実施した。

パワーユニット基板について経年8年の基板を試験した。パワーユニット基板実装品のインダクタ(L1)のはんだ部で200サイクル到達時に微小なクラック発生を確認した。さらに、600サイクルまで試験を継続したところ、クラックは半周程度まで進展した。しかし、断面観察ではクラックは深く進展していなかった(図10)。また600サイクル実施後にIC(IC1A)を断面観察した際に、部品面にクラックがインダクタ(L1)の場合より進展していることがわかった。この部分は外観調査では見ることができない部分のため試験前にクラック発生の有無を確認することができなかった。このような外観調査では見ることができない部分の調査方法については今後の課題である。



L1部品



600サイクル L1表面



600サイクル L1断面



IC1A 断面(部品面側)

図10 パワーユニット基板

インダクタ(L1)に対するヒートサイクル試験の加速率を算出するための現車環境の条件として、現車温度測定と基板自己発熱測定を行った結果から、 ΔT_1 を48K、 T_{1max} を334K、 f_1 を1とした。

これらの値を式(3)のCoffin-Mansonの修正式に代入した結果、パワーユニット基板のはんだ部のクラック発生までの期間は5年相当という結果が得られた。

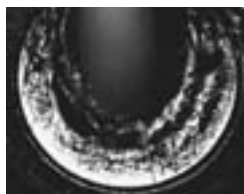
またゲートドライブ基板について経年5年程度の基板を試験した。その結果、コネクタ(CN2)で100サイクル到達時に微小なはんだクラック発生を確認した。このことからクラック発生までの期間として8年相当という結果が得られた。

3.2.2 補助電源装置

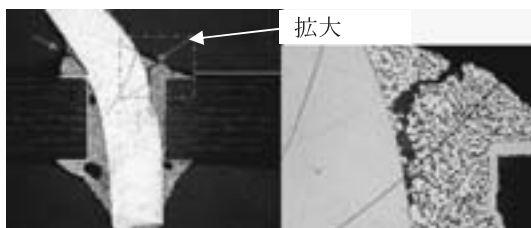
補助電源装置についても、表3に示す2形式の基板を対象にヒートサイクル試験を実施した。

ゲートユニット基板について経年7年の基板を試験した。ゲートユニット基板実装品の抵抗器 (Re51) のはんだ部で600サイクル到達時に微小なクラック発生を確認した (図11)。断面観察からクラックがスルーホールを貫通するものは無く、クラックの進展率は25%程度であった。

抵抗器 (Re51) に対するヒートサイクル試験の加速率を算出するための現車環境の条件として、現車温度測定と基板自己発熱測定を行った結果から、 ΔT_1 を39K、 T_{1max} を340K、 f_1 を1とした。



600サイクル Re51表面



600サイクル Re51断面

図11 ゲートユニット基板

これらの値から同様に、ゲートユニット基板のはんだクラック発生までの期間は18年相当という結果が得られた。

インバータユニット基板についても経年7年程度の基板を試験した。その結果、300サイクル到達時に抵抗器 (Re34) にはんだクラック発生を確認した。このことからクラック発生までの期間として5年相当という結果が得られた。

3.2.3 戸閉装置

戸閉装置制御基板については経年6年の基板について試験した。300サイクル到達時に抵抗器のはんだ部に微小なクラックの発生を確認した。さらに500サイクルまで試験を実施したところ、はんだクラックがスルーホールを貫通するものは無く、クラックの深さは160 μ m程度とわずかであった。

この抵抗器に対するヒートサイクル試験の加速率を算出するための現車環境の条件として、現車温度測定と基板自己発熱測定を行った結果から、 ΔT_1 を43K、 T_{1max} を335K、 f_1 を1とした。

クラックが発生が300サイクル到達時であることから、戸閉装置制御基板のはんだ部のクラック発生までの期間として10年相当という結果が得られた。

3.3 はんだ部劣化評価まとめ

劣化調査では、発熱の大きい部品の他にICソケットなどの大型品ではんだクラックが発生していることを確認した。また加速試験では、発熱の大きい抵抗器などの部品やインダクタなどの比較的大きな部品の周辺からクラックが発生していることを確認した。これらは過去に実施した新製時における加速試験によるはんだ評価の結果が経年の長い基板の劣化状態と一致していることを示している。こうして今回、経年の長い基板について劣化評価を実施したことによって、経年の短い時点での劣化評価の結果を裏付けることができた。

4. おわりに

本研究では、在来線新系列車両の経年の長い電子機器に対する劣化評価を実施することができた。これによりフィールドデータの蓄積だけでなく、これまでの経年の短い時点での評価に対する妥当性の確認をすることができた。

また、これまで寿命評価をしなかった光電子部品に対し、加速試験により寿命を推定できることを確認するとともに209系電車使用環境下では余寿命が十分にあることを確認した。

最近の車両には非常に多くの電子機器が搭載されており、またその開発のスピードは目覚ましいものがある。そのため、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、電子機器のメンテナンス方法を確立するとともに、フィールドでも定期的にサンプル調査を行い、劣化程度を検証しデータを蓄積してきた。本研究の成果もその一つであり、これらの成果を設計にフィードバックすることによりさらに信頼性を向上させていきたいと考える。

参考文献

- 1) 佐藤、今野、奈良、土屋：R&M、P35-40、7、2001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) 大戸、松本：JREA、P11-14、Vol.49、No.12、2006年
- 4) 米国防総省信頼度予測モデルMIL-HDBK-217F
- 5) 日本工業規格JIS C5003
- 6) 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