

新幹線電管用電子機器の劣化評価



松本 隆*

新幹線の400系車両は1992年に、E1系車両は1994年に導入されており、どちらも経年は10年を超えている。これら新幹線車両の主要部分では電子制御を採用しているため電子機器が数多く搭載されている。近年の研究により、電子機器の劣化傾向や劣化要因は徐々に明らかとなっているが、電子機器故障は使用環境によってその寿命が左右されるなど突発的に発生し、かつ的確な予測が不可能なものがほとんどであるため、信頼性を向上させるためには劣化・寿命を予測した予防保全が大切となってくる。

そこで、新幹線車両（400系・E1系）のCI等の制御装置を対象に劣化・余寿命の評価を行い、今後の予防保全として、交換・修繕の必要な部位の特定、およびトレースとして注意すべき部位の特定を行った。

●キーワード：新幹線、電子機器、経年劣化、使用環境、加速試験、寿命評価

1. はじめに

鉄道車両の信頼性の向上とメンテナンスの省力化を目的として、接触器類等の機械部品に代わり電子機器が数多く搭載されてきた。さらに、鉄道車両の電子化は、車両性能の向上、情報化、そして省エネルギー化にも寄与しており、今後も電子機器は多く採用される傾向にある。しかし、電子機器を多く搭載するにつれて故障も増加し、特に使用年数が多い電子機器に多く故障が見られるようになった。電子機器の故障のほとんどが突発的で予測不可能であるため、事前に劣化を判断する予防保全が電子機器の信頼性の向上には急務となっている。

新幹線車両（400系・E1系）について、400系は1992年に、E1系は1994年に導入されており、使用年数は10年ほど経過している。今後も信頼性の高い車両を提供するためには電子機器の余寿命を把握する必要がある。

そこで本研究では、新幹線車両（400系・E1系）の主変換装置（CI）等の制御装置を対象に、電子機器の信頼性評価手法を用いて劣化・余寿命の評価を実施した。

2. 400系新幹線車両の劣化・余寿命評価

今回の評価対象として、劣化による故障が懸念される主制御整流装置（MRf）用電子機器を調査した。図1に当

該制御装置を示す。当該制御装置は、カードリッジタイプのプリント基板7種類9枚およびバックボード板1枚と収納するラックで構成されている。

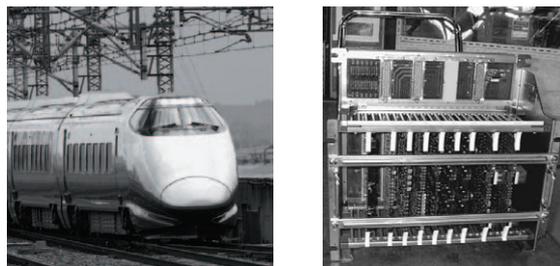


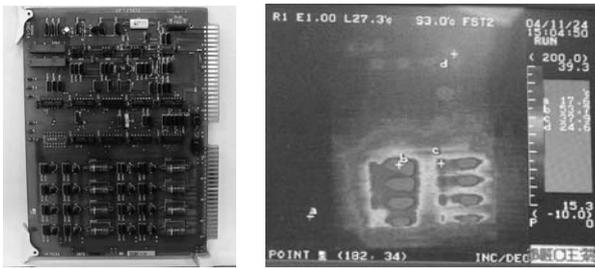
図1 400系新幹線（左）と評価対象機器（右）

2.1 温度上昇調査試験

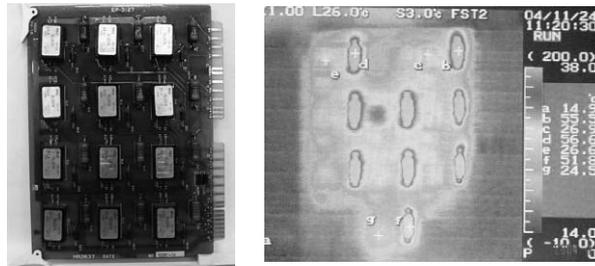
一般に部品やはんだ部の劣化は、当該部の温度上昇が重要な要素となっている。そのため、それぞれのプリント基板が通常の運転状態でどの程度の温度上昇となっているのかを通電試験を行い確認することとした。

各プリント基板の通電温度上昇測定は、各差込式の試験用基板でプリント基板を引き出し、模擬運転信号による動作状態として通電しサーモグラフィ画像を撮影した。

特に温度上昇が高い基板2種類のサーモグラフィ画像を図2に示す。このように、抵抗器を多く使用している周辺では特に温度上昇が大きくなっていることがわかった。



(a) 基板 (SYC-1A)



(b) 基板 (RY-1A)

図2 温度上昇の高い2種類の基板とサーモグラフィ画像

2.2 はんだ部の調査

2.2.1劣化調査

はんだ部の劣化を確認するために、外観を目視及びマイクロスコップで調査した。その結果プリント基板表面のコーティング剤及びはんだに劣化の兆候を確認した。これは前項の大きな温度上昇値を示した位置とほぼ一致していた。

具体的にはRY-1A基板の抵抗 (Re1) にはんだクラックが発生していた (図3)。このはんだクラックは、円周の1/4程度発生しているが、電気的不導通に至るまでには達していない。

その他の部分にはクラックの発生は見られなかった。他にはコーティングの劣化を見ることが出来た。特に、バックボードではんだ周辺部に白色異物 (はんだ溶剤) が付着していた (図3)。これはコーティングのクラック部から流出したと考える。なお、はんだ溶剤自身は非腐食性であるので劣化の影響はない。

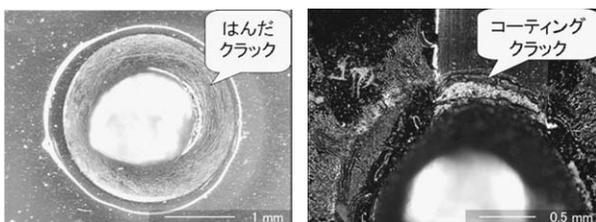


図3 はんだクラックとコーティングクラック

2.2.2 余寿命調査

今後の使用に際しては、はんだ部の寿命がどのくらいもつかを判断する必要がある。はんだの劣化は、主に温度振幅が影響を与えると考えられるため、余寿命の検証方法として、実使用よりも大きな温度振幅を加えるヒートサイクル試験を実施した。現車での温度変化測定結果を用いて、Coffin-Mansonの修正式によりはんだ部寿命予測の加速率を算出し、さらに現在稼動している装置の余寿命を推定した。試験条件として、図4に示すヒートサイクル試験を行った。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5)。

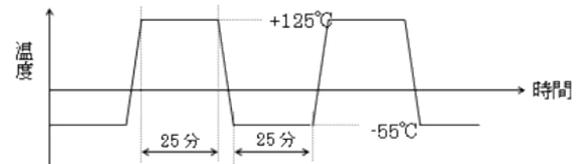


図4 ヒートサイクル試験温度条件



図5 冷熱衝撃試験機

加速率を求めるCoffin-Mansonの修正式を以下に示す。

$$\alpha = \left(\frac{f1}{f2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\Delta T2}{\Delta T1} \right)^A \times \exp \left\{ \frac{Q}{K_B} \left(\frac{1}{T1_{max}} - \frac{1}{T2_{max}} \right) \right\} \dots (1)$$

この式において、f1は1日当りの温度サイクル数、ΔTは温度幅、Tmax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はそれぞれ活性化エネルギー、ボルツマン定数である。

上記の式 (1) でべき乗数Aを2.0 2.2 2.4と変化した場合の加速率αと稼動年数の関係を図6に示す。

ここではべき乗数Aを決定するため、車両搭載品と同時に新品を試料とし試験を行った。ヒートサイクル試験の結果から、クラック発生平均試験サイクル数を求めると、

搭載品：584サイクル

新品：1406サイクル

となった。搭載品は、現車稼動年数+584サイクルではん

だクラックが発生すると考えられ、新品は、1406サイクルではんだクラックが発生すると考えられることから、

$$1406 \text{ サイクル} - 584 \text{ サイクル} = 822 \text{ サイクル}$$

=現車稼働年数15年相当

と考えることができ、べき乗数Aは図6から2.0とすることで現車と試験が等価であるといえる。したがって、現車稼働年数で換算すると、約29年相当となる。このことから、現車稼働年数が15年の場合、余寿命は約14年という結果が得られた。

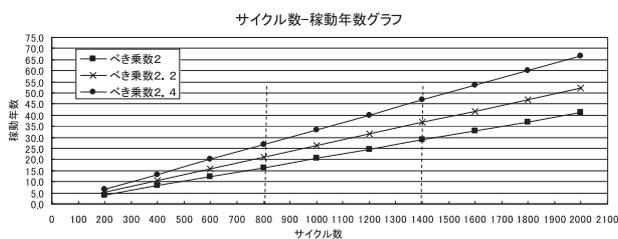


図6 現車稼働年数一試験サイクル数グラフ

2.3 実装部品の個別調査

2.3.1 劣化調査

プリント基板に実装している各部品の劣化を個別に調査した。調査した部品は、デジタルIC (CMOS)、アナログIC、TTL-IC、D/Aコンバータ、EP-ROM、リニアIC、水晶発振器 (クリスタル)、アナログスイッチ、アルミ電解コンデンサである。

これらの部品について、動作特性から劣化は認められなかった。また、ICについてはX線透視確認を行ったが、内部のボンディングワイヤに異常はなく、透視可能な部分について、異常は認められなかった。

2.3.2 余寿命調査 (アルミ電解コンデンサ)

現車搭載品をサンプリング調査し、その後高温印加試験 (105℃) を実施し、コンデンサ容量-時間特性を取得した。そして寿命計算式とこれまでの経過時間等から、余寿命を算出した。

その結果、試験時間720時間で、 $\tan \delta$ が判定値を超え、その後値がばらつく現象が発生する部品があった。このことから、現車における電解コンデンサの余寿命を算出した。以下に、アルミ電解コンデンサの推定寿命計算式 (アレニウス則) (2) を示す。

$$L_F = L_{105} \times 2^{\frac{T_{105}-T_R}{10}} \text{ (Hr)} \dots (2)$$

L_F : フィールドにおける寿命 (Hr)

L_{105} : 105℃における寿命 (Hr)

T_{105} : 加速試験時の周囲温度 (105℃)

T_R : フィールドにおける周囲温度 (℃)

この式に、判定値を超えた720時間を代入すると、余寿命は10.9年となることから、この電解コンデンサは、今後約10年は使用可能という結果を得た。ただし、封口ゴム部の劣化を考慮して、今後もトレースとして定期的な抜き取り検査が必要といえる。

2.4 まとめ

本章では、400系新幹線の主制御整流装置 (MRf) 用電子機器の劣化調査及び余寿命評価を行った。

その結果、はんだについては、加速試験により今後の余寿命として14年という結果を得たが、調査時 (稼働年数15年) にはんだクラックが一部発生し始めていることから、今後継続して使用するにあたり、定期的にはんだ部の調査を実施する必要がある。

また、アルミ電解コンデンサについては、加速試験結果から、今後10.9年は使用可能であるという結果を得たが、封口ゴム部の劣化を無視することはできないため、定期的な抜き取り検査を実施する必要がある。

3. E1系新幹線車両の劣化・余寿命評価

本劣化評価での対象として、主変換装置 (CI) の電子機器を調査した。図7に制御装置の外観図を示す。制御装置は、コンバータ用とインバータ用の2種類あり、各20枚のプリント板とバックボード1枚そして、それらを収納するラックで構成される。

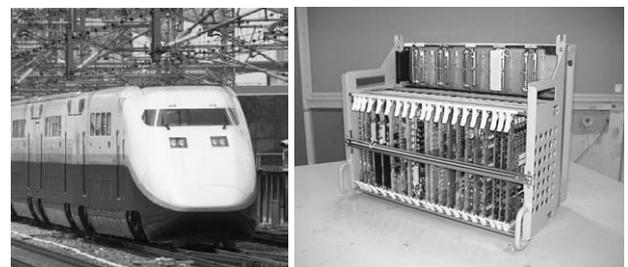


図7 E1系新幹線 (左) と評価対象機器 (右)

3.1 使用環境調査

現車での稼働環境湿度測定を実施すると共に、制御装置単体での通電温度上昇試験を実施して、温度上昇箇

所の確認を行った。

通電温度上昇試験では、模擬信号を入力し稼動させた状態で、プリント板上の部品・はんだ部の温度上昇をサーモグラフィで測定した。その際に温度上昇が高く記録された箇所については、熱電対を用い、部品・はんだ部近傍の温度上昇を測定した。

サーモグラフィで測定した結果、コンバータ用制御装置で最も温度上昇している箇所は、LVD-5基板であった。またインバータ用制御装置で最も温度上昇している箇所は、BUF-144基板であった。これらの結果を図8に示す。その他では、HDI2-8基板の温度上昇が高いという結果が得られた。

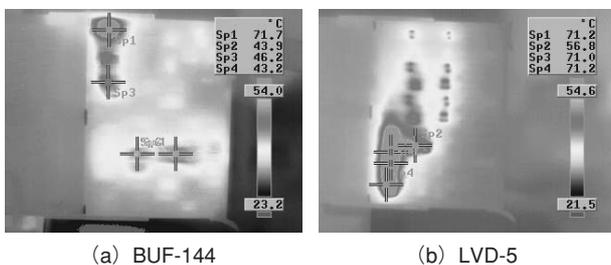


図8 基板のサーモグラフィ画像結果

3.2 はんだ部の調査

3.2.1 劣化調査

はんだ部の劣化調査については、目視およびマイクロスコープで観察を行った。インバータ用およびコンバータ用制御装置の基板を観察したところ、特に基板自体の大きな変色は認められなかった。しかし、コーティング変色部周辺についてははんだ部を確認したところ、一部にはんだクラックを発見した。

はんだクラック発生箇所は、BUF-144基板の抵抗器部(図9)、HDI2-8基板の集合抵抗器部で認められた。これらクラックが発生した箇所は、環境調査の際に温度上昇が高いと認められた箇所である。

また、ゲートドライブについても調査を行ったが、コーティングの変色が発生している箇所はあるものの、はんだクラック発生には至っていなかった。しかし、温度上昇値が大きい部品が多いため注意が必要である。

3.2.2 余寿命調査

400系新幹線と同様の方法で、実使用よりも大きな温度振幅を加えるヒートサイクル試験を実施した。試験を実施するにあたり、温度上昇値が大きかったプリント基板11枚を選択した。

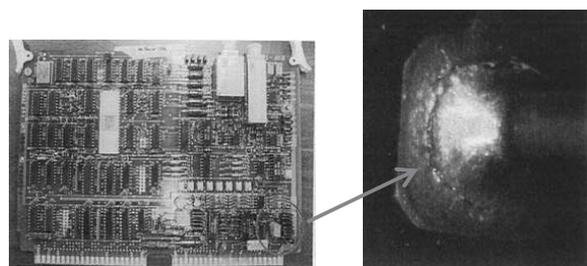


図9 BUF-144基板にはんだクラック

ヒートサイクル試験でははんだクラックの発生状況は、使用環境調査での測定結果にあるはんだ接合部温度・振幅の高い順に劣化が進行していることがわかった。これらクラック発生サイクルから、Coffin-Mansonの修正式により余寿命を算出した。その結果、HAI2-9A基板、LVD-5基板は余寿命判定が11~13年以上となった。ここでの余寿命は、クラック発生をもつての劣化寿命としているため、寿命の値で電氣的不導通になるわけではない。

3.3 基板の調査 (塵埃の影響)

E1系新幹線のインバータ装置は冷却機構の構造上、塵埃の影響を避けて考えることができない。そのためE1系新幹線では塵埃が電子機器プリント基板等に堆積し、それらが吸湿することによって、絶縁性能低下やマイグレーション発生に繋がるのが考えられる。そこで、それを検証するため、装置一体を高温高湿状態にさらし、動作状態を確認した。

図10に試験概略図を示す。恒温層内にインバータ・コンバータ用制御装置およびゲートドライブをいれて、高温高湿状態で通電させる。半導体部分には模擬負荷を与え、最大ノッチ走行を模擬した状態を作り出した。図11

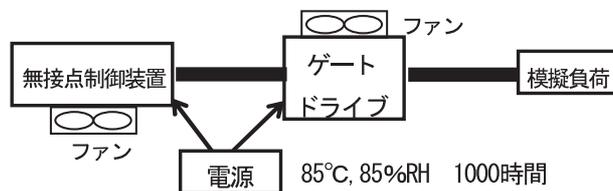


図10 試験概略図

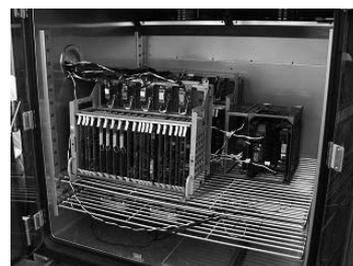


図11 試験概要図 (恒温層内)

に試験概要図（恒温層内）を示す。

本試験の高温高湿条件を表1に示す。これは、フィールド上と比較した場合、マイグレーションの観点から以下の式(3)を用いて加速率を算出すると、1,000時間の試験時間は約50年相当となる。

表1 高温高湿試験条件

No.	設定項目	設定
1	温度	85℃
2	湿度	85～90 %RH
3	試験時間	1000時間

$$N_m = C \cdot E^{-m} \cdot H^{-n} \cdot \exp\left(\frac{Q}{K \cdot T}\right) \dots (3)$$

ここで、Nmはマイグレーション寿命（Hr）、Cは定数、m、nは指数、Qは活性化エネルギー、Eは電界強度、H、Tはフィールド時と加速条件での相対湿度と絶対温度、そしてKはボルツマン定数を示す。

試験時間1,000時間経過後、全てのプリント基板について調査をおこなった。表面はコーティングが茶色に変色しているが、プリント基板には変色はなく、マイグレーションの発生は認められなかった。また、湿度や汚れによりインピーダンス変動の発生しやすい高抵抗値の抵抗器周辺に関しても異常は認められなかった。バッテリーに液漏れが生じていたが、バッテリーの許容周囲温度より試験温度が高かったために生じたもので、フィールド上では問題とはならない。

これらの結果から、今後10年使用するにあたって、塵埃の堆積によるマイグレーションの観点では問題ないと判断した。

3.4 実装部品の調査

3.4.1 劣化調査

各制御装置、ゲートドライブ等の部品調査を行った。まず、特に劣化が考えられる電解コンデンサについて調査したが、液漏れは発生していなかった。ゲートドライブ内の電解コンデンサについては、特性調査の結果、容量について仕様値よりも低い値を示していた。初期値の記録が残っていないため劣化傾向を示すかは詳細に判断できないが、稼動後10年以上経過していることも考慮し交換が望ましいと考える。次に、光インターフェースについて調査を行ったが、特性劣化は認められなかった。しかしこの部品は現在製造しておらず、代替部品もない

ことから注意すべきであり、定期的なサンプリング調査が必要である。

3.5 まとめ

本章では、E1系新幹線の主変換装置（CI）の電子機器の劣化調査及び余寿命評価を行った。

その結果、塵埃によるマイグレーションに対する試験ではマイグレーションの発生は認められず、これによる影響は小さいと判断する。

部品については、電解コンデンサの交換及び光インターフェースの定期的なサンプリング調査が必要である。

また、はんだ部について、ヒートサイクル試験でのクラック発生までの寿命は、環境調査での温度上昇値の高い順と概ね一致する結果となった。はんだクラックが劣化調査時にすでに生じている部位に対し再はんだ作業が必要である。また、10年程度の余寿命結果となった箇所や温度上昇値の大きいゲートドライブについては、全検入場時など定期的な確認が必要と考える。

4. おわりに

本研究では、400系、E1系新幹線車両について今後も信頼性の高い車両を提供するため、主変換装置（CI）等の主要な制御装置を対象に、電子機器の信頼性評価手法を用いて劣化・余寿命の評価を行った。その結果、交換・修繕の必要な部位の特定および今後注意すべき部位が特定できた。

これらの結果を、新幹線車両の今後のメンテナンスに反映していき、故障が少なく、効率の良いメンテナンスを実現していく。

参考文献

- 1) 車両用電子機器の故障防止に関する調査研究，鉄道総合技術研究所，2003/03
- 2) 磯部昭二；電気・電子部品の寿命診断，日本規格協会，1989/02
- 3) 栗原四郎；電子部品の寿命判定の考え方，鉄道と電気技術，2005.7 VOL.16 No.7
- 4) 鹿沼 陽次；信頼性加速試験の効率的な進め方とその実際，日本テクノセンター，2001
- 5) 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