

車載小型パワーリレーの作動限界評価

瀧川 貴稔

Load Durability Investigation of Compact Power Relays for Automotive Applications — by Takatoshi Takikawa —
In repetitive switching load operations, newly developed power relays for automotive use were tested. The relays are mounted on printed circuit boards and reduced in the case volume by 50 percent compared to low-profile ISO plug-in microrelays. The operating voltage and relay temperature was set to 14 V and 120 deg. C, respectively. The tests of normally open contact type relays were conducted with lamp loads (11 A) and horn loads (8 A), while those of transfer (changeover) contact type relays were with wiper motor loads (8.5 A, intermittent operation). For each load type ten relays were tested and the test results showed an adequate durability margin for practical use. The first failure happened after 2.2 million cycles, 3.3 million cycles and 2.4 million cycles, in lamps, horns and wiper motors, respectively. In addition, differences of the contact life cycles among the three kinds of test were found to be largely depending on load current characteristics.

Keywords: automobile, relay module, electromagnetic relay, load durability, contact life

1. 緒言

近年組み付けスペースが狭小化傾向にある乗用車のエンジンコンパートメントに収納できる、写真1に示すような基板実装リレーを多数用いたモジュールの製品化が進められている⁽¹⁾。従来リレーボックスで使用されているプラグイン型電磁リレーを小型化のうえ集合実装し、スイッチング信頼性を維持する必要がある。リレー集積化による発熱密度増に伴う温度上昇を抑えるためのパワースwitchングボード開発⁽²⁾と並行して、プリント回路基板実装用の小型リレーをリレーメーカーと共同開発した⁽³⁾。ISO規格のプラグイン端子を有する低背型マイクロリレー⁽⁴⁾と同等に使用可能な電流スイッチング能力を有する共に50%減のケース容積を実現している。一般的に小型化は磁気吸引力を減少させる。これは接点接触力と開離力をより小さく設定することになり、開閉時に発生する直流アークに起因した接点間固着故障または過消耗による不導通故障がより短い開閉回数で生じる傾向となる。以上の理由から汎用プラグイン

型リレーを代替する小型リレーには、コイル巻線容積をできるだけ大きくして吸引力を高く確保するなど構成部材レイアウトの設計工夫が重要となる。また、個別交換修理できない集合リレーなので、耐久性能の定量評価がモジュールの信頼性を決定するうえでより重要となる^{(5)~(7)}。本稿では、繰り返し開閉作動試験の故障率解析による耐久能力評価、およびリレー特性推移と接点表面状態評価による故障発生メカニズムの推定について述べる。

2. 開発リレーの概要

開発リレーは以下の2種類である。直流励磁時に接点閉成し負荷通電させる1接点对型（Normally open contact type、以下NO型と略記）および非励磁時と励磁時に負荷通電経路を切替える2接点对型（TransferもしくはChange-over contact type、以下TR型と略記）である。前者と後者のコイル抵抗はそれぞれ220Ω（20℃、12V定格で655mW）、150Ω（同960mW）である。両者はコイル巻線径とTR型の非励磁時に閉成しているNC（Normally close、以下NCと略記）側の部材構成を除き同じ構造である。写真2(a)にリレー外観を示す。ケース容積は低背型ISO規格マイクロリレーの50%である。写真2(b)はTR型の内部構造である。限られたケース空間内でコイル巻線容積を可能な限り大きくさせて起磁力確保を図ると共に、磁性部材の断面積も大きく確保することで磁気抵抗を抑えて効率的に磁気吸引力を発生させるレイアウト設計の工夫をしている。接点材料は、開閉時アークによる浸食および

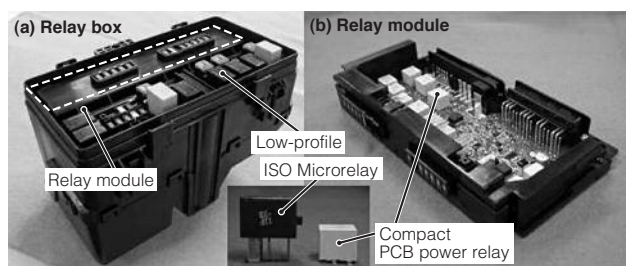


写真1 リレーボックス(a)とリレーモジュール(b)

溶着に対する抑制機能を持たせた錫とインディウムを主成分とした数ミクロン径の複酸化物粒子が銀基地に分散した構造のコンポジットである^{(8)、(9)}。

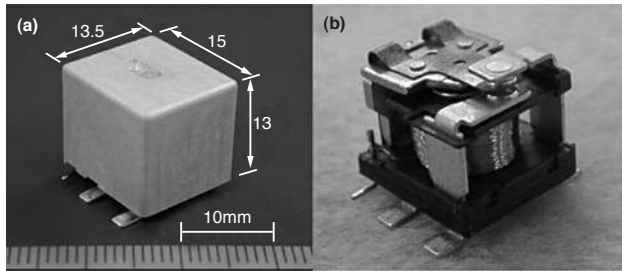


写真2 基板実装リレーの外観 (a) と内部構造 (b)

3. 開閉作動耐久試験と特性評価手順

3-1 試験回路 図1に開閉作動耐久試験の回路図を示す。シーケンサで制御したトランジスタスイッチによりリレーコイルへ信号を送る。作動電圧は、車両走行時のオルタネータから発生する直流電圧を想定した14Vとした。試験回路は作動時の負荷電位VLを監視している。シーケンサは以下に記す故障現象を検出すると、信号出力を中断する (Out 1) と同時に、負荷電流経路を遮断する (Out 2)。[1] リレーコイル電位V0を基準電位に戻したにもかかわらずVL > 10Vの出力が続き100msに達する (接点間着故障)、[2] V0が作動電位になってから100ms以降、基準電位に戻す時間までの範囲でVL < 10Vが生じる (電圧降下故障)。また、シーケンサは故障モードと故障発生時の開閉作動回数を自身に記録する。

3-2 リレーの試験環境とボード実装 エンジンコンパートメントの上限想定温度である120°Cに設定した恒

温槽内にボード実装したリレーを設置した。リレー巻線温度上限は、磁気吸引力が下限となる。可動接点を備えるスプリング負荷に対する磁気吸引力の大きさ、すなわち接点移動させる駆動力が最小となる。接点同士の接触開始位置から、アーマチュアとコアが完全に密着するまでの接点接触力が增大していく過渡期間での接点接触状態が不安定となる可能性が生じる。接点バウンス回数が増大することさえあり、接点表面のアーク浸食を加速させる因子となる。結果的に、接点寿命をより短くする影響の可能性がある環境温度と言える。図2にパワースイッチングボードに実装した試験リレーを示す。本ボードはリレーモジュール製品向けに開発したものと同一構造を有する^{(1)、(2)}。リレーの負荷電流端子は銅合金バスバーに、コイル端子はプリント回路基板にはんだ接合されており、その基板は接着シートを介してバスバーに固定している。したがってこの表面実装型リレーは負荷電流端子とコイル端子間に段差を有した構造となっている。高熱伝導を実現する目的でアルミファイラーを分散させた接着材でバスバーをアルミ放熱板に固定している。接着シートと接着材は、電気絶縁体である。リレーコイルのオフ時サージキラーとしてチップ型ダイオードをプリント回路基板に表面実装している。

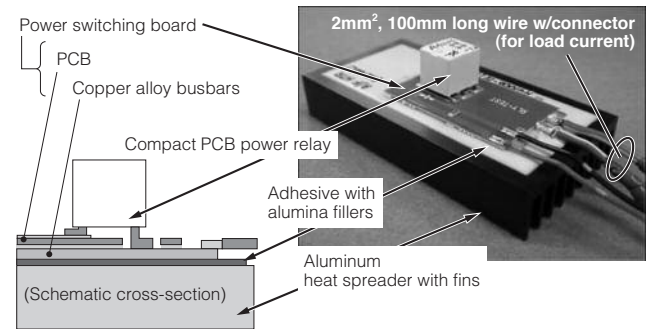
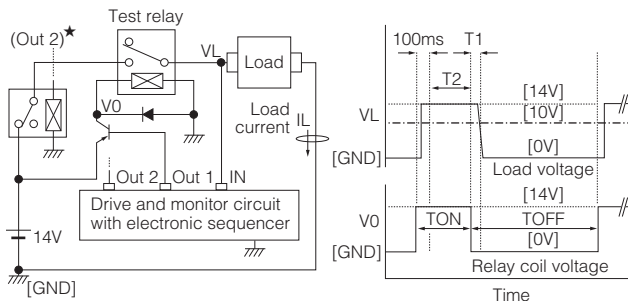


図2 試験用ボードに実装したリレー



★ The relay controlled by "Out2" cuts off a current path when detecting mode, [1] or [2].

- [1] Contact interlocking detection : VL > 10V and T1 > 100ms
- [2] Contact voltage drop detection : VL < 10V during T2

図1 開閉作動耐久試験の回路と故障検出条件

3-3 負荷部品 負荷として用いた電装部品は常温環境にセットした。負荷電流は負荷自身の温度に逆比例するのでリレー環境温度より低い設定にして、より高い負荷電流を出力させた。ランプ負荷試験の目的は、ヘッドライトハイビーム適用のハロゲンランプ^{(10)、(11)} 電流に対するNO型リレーの耐久能力確認である。通常2個の12V定格60Wバルブを並列使用する。ホーン負荷試験の目的は、前方警報適用のホーン^{(12)、(13)} 電流に対するNO型リレーの作動耐久能力確認である。異なる周波数設定のホーン2個を並列接続し、485~500Hzおよび400~410Hzで振動作動させた。前面ウインドウシールドワイパーシステム^{(14)、(15)} で使用するモータは間欠、低速および高速ワイピングの3

種の作動モードがある。TR型リレー試験では間欠作動を用いた。間欠作動はブレード往復毎にリレーが開閉作動し、他作動に比較して開閉頻度が最も高い。乗用車用としては高いレベルである26から28A程度の突入電流を生ずるモータを使用した。

3-4 リレー特性の測定 試験開始から故障発生までを通して、一定の作動回数毎に一時停止し、室温にてリレー特性を測定した。VP (Pull-in voltage、最低作動電圧または感動電圧)、VR (Drop-out voltage、復帰電圧または開放電圧) およびVD (Voltage drop across load terminals、負荷電流端子間電圧降下) である。VRはコイル端子間に印加した電圧を12Vから減少させて可動接点が固定接点から開離した時の電圧である。VDは12V作動で4端子を用いて測定した値である。用いた抵抗負荷電流はNO型に対して20A、TR型のNO、NC接点对それぞれに対して15A、10Aである。VDには、実装ボードのバスバーとその端部にはんだ接合した100mm長の2mm²ワイヤおよびコネクタ端子で生じる電圧降下を含んでいる。

3-5 故障リレーの評価 故障リレーの開閉能劣化状態を知るために、ケースを除去し図3に示す方法で、接点開離力FO (Contact opening force) とNO側の接点接触力FM (Contact mating force in making) を接点中心の軸に沿って測定した。FM測定時は、12V励磁によりアーマチュアとコアが完全に密着した状態となっている。図示していないTR型のNC側接点接触力FB (Contact mating force in breaking) は、FO測定時の接点開離位置における荷重に相当する。接点表面のアーク浸食形態を側面から光学顕微鏡で観察した。その後、固定端子およびスプリングの接点保持部位を切り離し、走査電子顕微鏡にて浸食状態の詳細観察をした。

4. 負荷電流波形

ランプ試験配線は、5mm²電線を用いて全長4m、ホーン試験配線は2mm²電線を用いて全長6m、ワイパーモータ試験配線は、5mm²電線を用いて全長5mとした。配線電気抵抗を実車装着状態よりも下げたうえで、接点の浸食因子である負荷電流を実車より高くできるように開閉作動サイクルの設定をした。NO型のランプとホーン負荷試験における開閉作動は0.8秒オン/7.2秒オフおよび0.2秒オン/4.8秒オフとした。TR型のワイパーモータ負荷試験における開閉作動は0.5秒オン/4.5秒オフとした。モータの回転シャフトにリンクを介して電圧制御のパウダーブレーキを連結させ、ターゲットとなる定常電流が出力できるようにした。図4に試験時の負荷電流波形を示す。モータ負荷のNC側接点通電域ではモータ内蔵の回転接点にも通電している。電流遮断はリレー接点でなくこの回転接点でなされ、実車ではブレードをホームポジションで停止させる機能となる。作動するブレードの向きに同期して実車の電流波形は円弧を描くが、本試験での一定負荷電流はこの円弧の最大レベルに一致させた設定である。通常のウエット時よりドライ時ウィンドウシールド上でブレード作動している状態に近い。以上のことからNO、NC側に接点浸食をもたらすアークエネルギーは実使用平均より高く、厳しい設定である。図中に示したターゲット電流レベルの維持を確認できるような電流波形を常時表示、確認のうえ試験実施した。電流が減少する、または断線故障となる寿命が比較的短いランプバルブとホーンは、それぞれ30万回毎、20万回毎のリレー接点开閉時点で新品に交換した。ワイパーモータは、内蔵回転接点のアーク損傷により通電量が減少し、異常な回転運動が生じた時点で交換した。

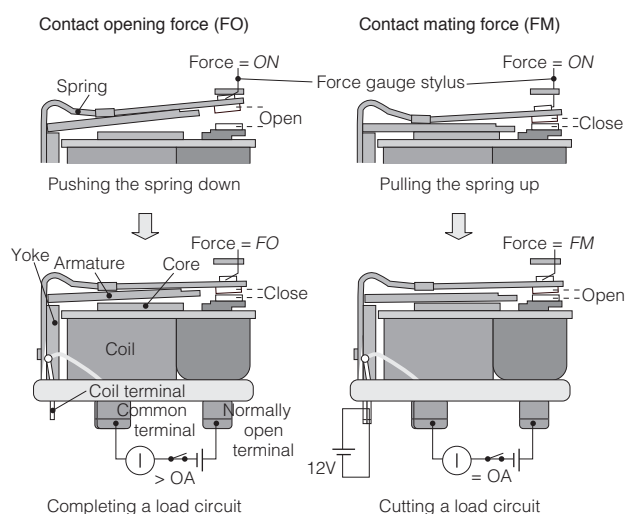


図3 接点开離力 (FO) と接点接触力 (FM) の測定

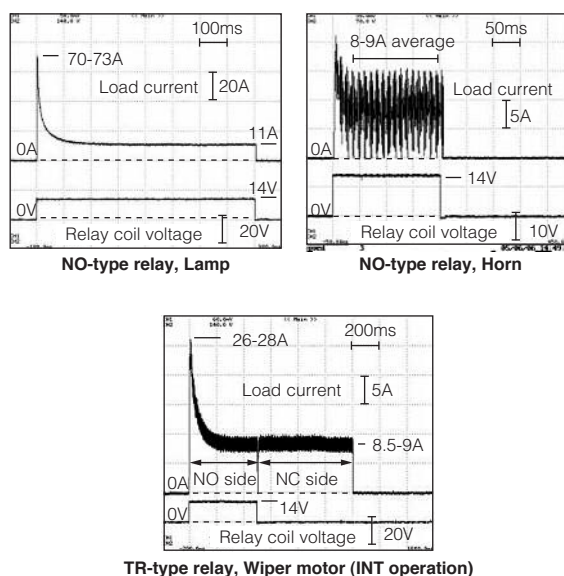


図4 試験時の負荷電流波形

5. 試験結果

図5に作動回数に対するリレーの累積故障率をワイブル分布表現で示す。各種の負荷試験につき10台のリレーを使用した結果である。

5-1 NO型リレーの故障発生回数と故障モード

最初と最後に故障発生した時のNO型の作動回数は、ランプ負荷が222万および324万、ホーン負荷が329万および695万回であった。故障発生回数の分布幅を定量表現するワイブル分布の形状因子は、ランプ負荷は7.4およびホーン負荷は2.8となった。実車で必要とされる耐用年数および走行距離を考慮した各負荷の想定総操作回数に対して余裕度の高い耐久性能であると判断できた。試験回路が検出した故障モードは、全リレーが接点間固着であった。故障検出で作動終了させたリレーを試験槽にセットしたままの状態、接点間の通電チェックを実施した。ランプ負荷の全リレーは接点間導通を維持していた。ホーン負荷は8番目と最後に故障発生したリレーのみ接点間導通を維持しており他は回復していた。両負荷の違いは、負荷電流特性と接点浸食挙動に起因すると考えられる。

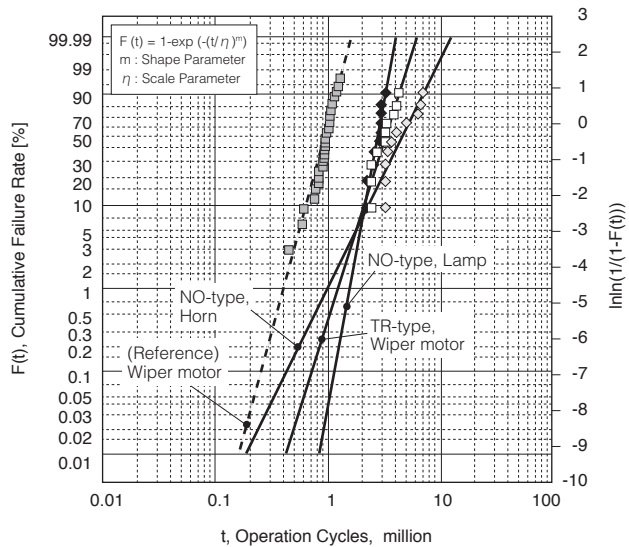


図5 リレー累積故障率分布

5-2 TR型リレーの故障発生回数と故障モード

モータ負荷試験で最初と最後に故障発生した時のTR型の作動回数は、241万および423万であり、形状因子は4.3であった。本結果についても実使用上十分な耐久性能を有すると判断できた。故障検出モードは全10台ともNO側接点对の固着であり、故障発生後の接点間導通を維持していたリレーは、4台（最初および6から8番目故障発生）であった。本試験を通じて不整回転作動を生じて使用中止した33台のモータの累積故障率プロットを図5に比較参考の

ため記した。リレーはモータのおよそ3倍の耐久性を有していると言える。

6. 故障発生までのリレー特性変化

6-1 最低作動電圧 図6に作動回数に対する最低作動電圧VPの推移を示す。試験リレー番号1~10が示す作動回数は、故障発生回数である（以降の図7~9も同じ）。開閉作動が進む間、可動接点を移動させる駆動力が適正範囲で維持していたかを判断できる。駆動力とはコア中心軸での磁気吸引力からスプリング負荷を減じた力である。NO型のVPが減少していく現象は、ベリリウム銅合金スプリングの熱的応力緩和の影響である。VP減少率は、ランプ負荷がホーン負荷より大きい。負荷電流の大きさによる発生熱エネルギー量差による影響と考えられる（ランプ負荷の突入および定常電流はホーン負荷のおよそ3倍および1.4倍）。モータ負荷TR型のVPは作動回数依存の傾向が明瞭でない。応力緩和が進む一方、NC側接点表面の浸食が磁気ギャップ長を増加させ、結果的に作動開始に要する励磁電圧が常には減少しないためと推察される。リレー10のみ、170万および210万回でのVPが0.7から0.8Vまでの範囲で急増している。NC側接点間の弱い固着力発生を捉えている可能性が高い。全般には、故障発生までスプリング負荷が応力緩和により減じているのみで、安定に接点移動させる駆動力は維持していたと結論できる。

6-2 復帰電圧 図7に作動回数に対する復帰電圧VRの推移を示す。この推移より作動回数毎のアークによる接点浸食量、およびその変動現象を推定できる。コア中心軸においてVRで励磁時の磁気吸引力は、接点完全閉成時のスプリングたわみで生じている接点接触力の負荷分力に等しく、接触状態の接点総厚さに比例する理由による

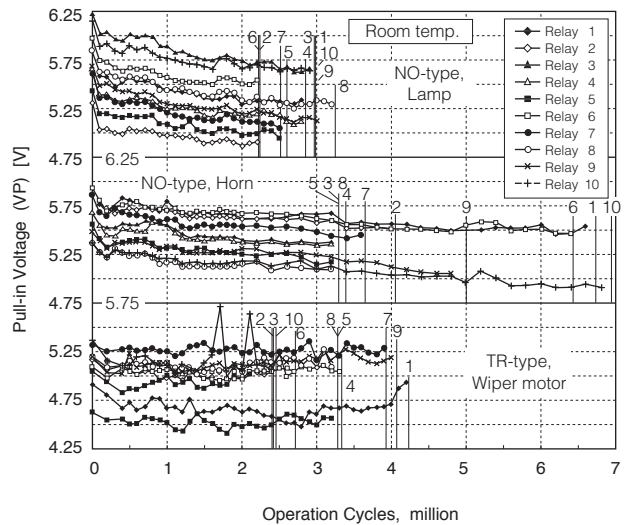


図6 開閉作動回数に対する最低作動電圧の推移

(片持ちばりの曲げ変位と発生荷重の関係)。NO型のランプ負荷はホーン負荷よりVR減少率は大きく変動は小さいことから、作動毎の接点浸食量はより大きく、かつ安定していたと言える。モータ負荷TR型のVR減少率は、作動回数が進むにつれ次第に小さくなっている。NO側接点接触域の偏在が進み、見かけ上の総接点厚さ減少率が小さくなったと推察される。

6-3 接点電圧降下 図8に作動回数に対する電圧降下VDの推移を示す (TR型はNO側接点对経路)。故障発生までにVDは増加傾向にある。ランプとホーン作動で生じたNO型の最大VD値は、0.13V (リレー8、320万回) および0.24V (リレー10、600万回) であり、モータ作動のTR型では、0.17V (リレー8、310万回) であった。

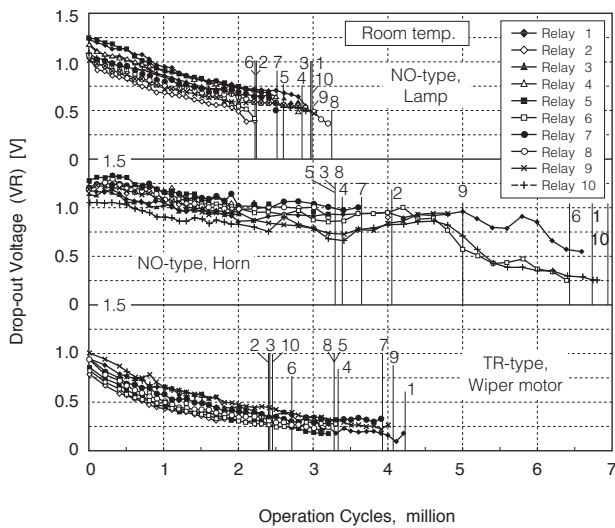


図7 開閉作動回数に対する復帰電圧の推移

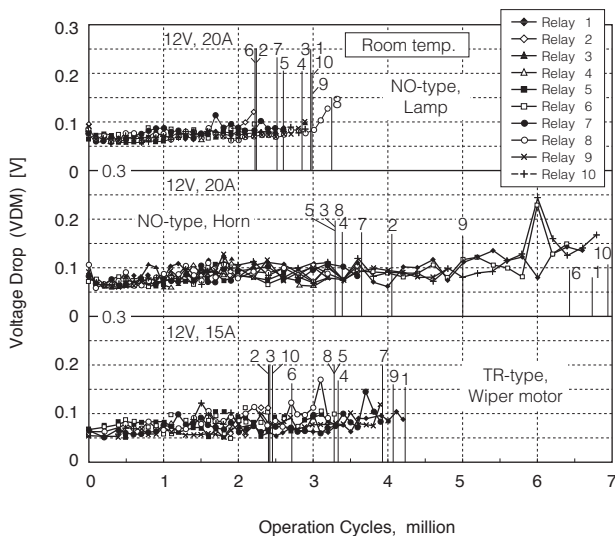


図8 開閉作動回数に対する電圧降下の推移 (TR型リレーはNO側)

電装部品が正常作動できるレベルの電圧降下までに抑制できている。接点浸食が進むことによる銀濃度の低下、表面粗さの増加に起因する接触実面積の減少および接触力減少⁽¹⁶⁾による接触抵抗増加の影響がVD増加の原因と考えられる。ランプ負荷のNO型は他2者に比べると、VD増加率の変動幅は最も小さい。接点浸食増加量と逆比例すなわち接触力と比例関係にある復帰電圧VRの減少率変動幅が最も小さく安定している傾向と整合している。図9にTR型のNC側接点对経路のVD推移を示す。最大のVD値は、0.09V (リレー8、260万回) であり、全般にほぼ一定のレベルを維持している。

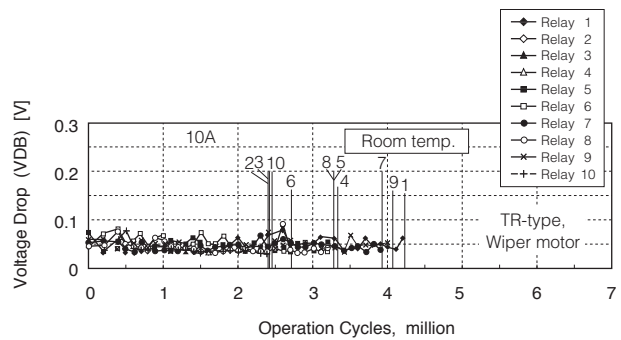


図9 開閉作動回数に対する電圧降下の推移 (TR型リレーのNC側)

7. 故障リレー評価と故障発生現象の考察

7-1 接点开離力 故障発生回数に対するNO側接点开離力FOのプロットを図10に示す。ゼロ回数でのバーは、未試験リレー30台の分布範囲を示す (以降の図11、12も同じ)。故障時は初期状態よりわずかに増加傾向にある。接点浸食による接点間ギャップ長増加に伴い、FO測定時にスプリングを変位させる距離が増大する。変位距離増によるFO増加作用が、VP変化で考察した応力緩和による減少作用をやや上回った現象であると考えられる。接点表面上で微視的に生じた銀の溶着やいびつな表面形状が原因の機械的固着を引き剥がす能力は、開離開始位置では故障まで維持されていたことを示している。

7-2 接点接触力 故障発生回数に対するNO側接点接触力FMのプロットを図11に示す。復帰電圧VRの推移と同様の傾向を示している。すなわち接点浸食量の増加がFMを比例減少させていることから、ランプ負荷NO型の作動回数に対する接点浸食量の増加率は他2者に比べ最も大きくかつ安定しており、ホーン負荷は接点浸食が最も不均等に進んでいたと言える。ホーン負荷のリレー8と10のFMが不自然に高い現象は、不均等な浸食形態の接点同士が、測定時にかみ合って見かけ上高い値を示したと推定される。モータ負荷TR型のFM減少率とその変動幅は

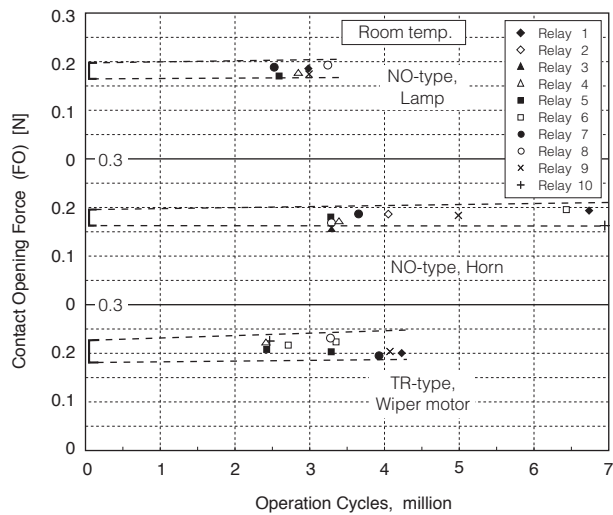


図10 故障発生作動回数に対する接点開離力の分布

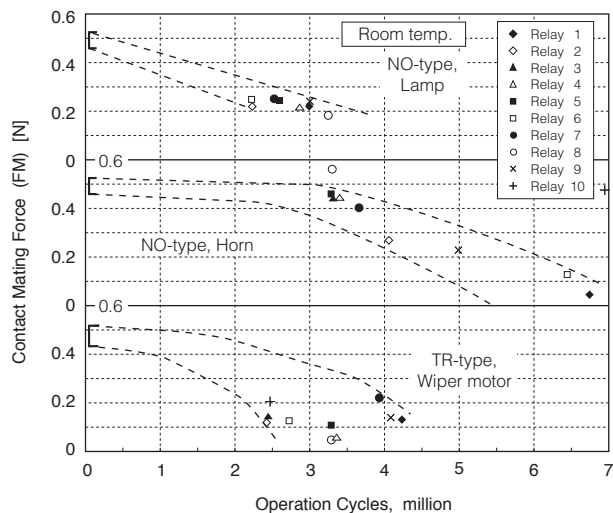


図11 故障発生作動回数に対する接点接触力の分布 (TR型リレーはNO側)

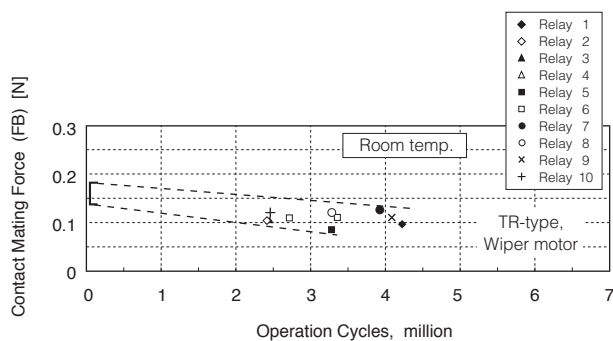


図12 故障発生作動回数に対する接点接触力の分布 (TR型リレーのNC側)

前二者の中間の様態を示している。FMの減少は、閉成時の接点バウンス回数を増加、すなわちアーク発生頻度を増加させる傾向がある。ランプ負荷では作動毎の接点浸食量が大きく変動しないまま固着故障に至ったと見られるのに対し、ホーン負荷は特に200ないし300万回作動以降で著しい浸食量加速が生じたと推察される。図12は、故障したTR型のNC側接点接触力FBを故障発生回数に対してプロットしたものである。未試験リレーの分布より低く位置している。浸食によるNC側接点の厚さ減少に伴うヒンジ部の応力減少の影響と考えられ、最低作動電圧VS推移の現象と整合している。FB減少率はFMに比べ小さく、接点接触抵抗への影響小、すなわち安定した電圧降下VDになったと言える。

7-3 NO型リレーの接点浸食状態 故障したNO型の接点側面および表面の観察結果を写真3に示す。両負荷とも陽極となる固定接点側がより優勢に浸食が進んでお

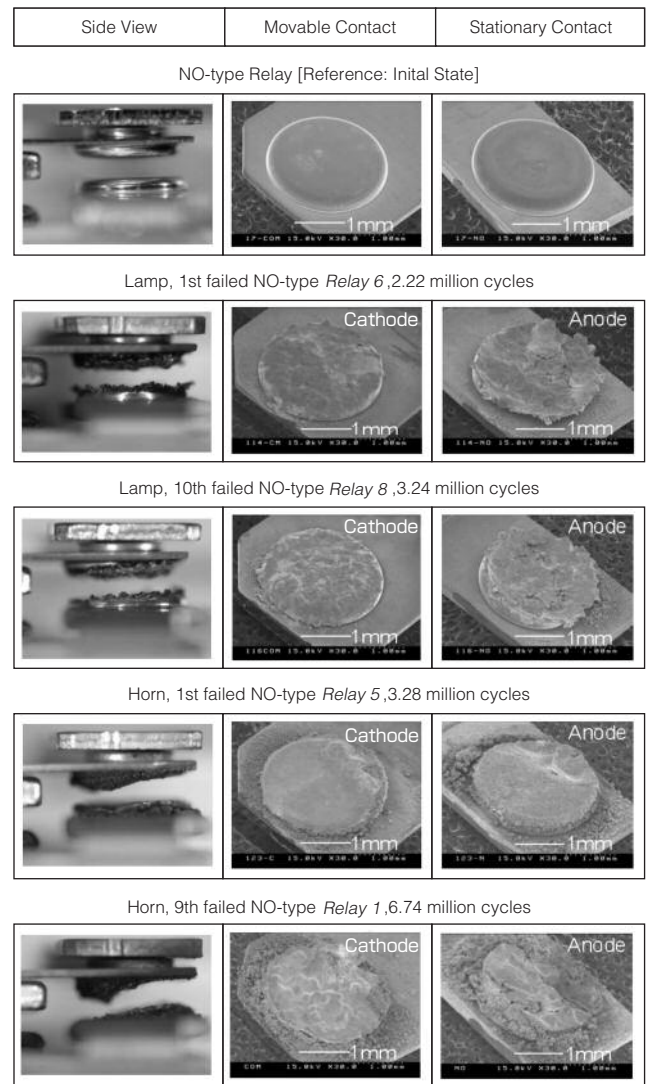


写真3 NO型リレーの未試験および故障接点状態

りアーク内の負帯電粒子の衝突による作用影響が大きい。ランプ負荷の陽極側接点周縁でより大きなアーク損傷が見られ、70A ピークの大きな突入電流の一部が局所集中していたと推察される。巨視的にはなだらかな形状なので、固着故障原因は接点同士のかみこみによる機械的固着でなく銀溶着であったと判断した。ホーン負荷では、陽極側接点のヒンジ側領域で局所的浸食が進み、対向する負極側接点表面に優勢な転移となって局所堆積している。ホーンはコイル巻線を内蔵する構造なので、接点開離による電流遮断時に数十msの過渡電流が発生し、より長い寿命のアークが短い接点間距離となっているヒンジ側領域で残存した結果である^{(17)、(18)}。ランプと比べて局所的浸食が進展したことから、銀溶着がより生じにくい20A ピーク程度の突入電流であることから故障発生回数の分布幅はより広がったと推察される。不自然に高いFMを示した故障リレーの存在を考えると、接点間固着故障は、著しくいびつな接点表面領域での機械的固着が原因で生じた可能性が高いが、銀溶着発生の可能性も残る。

7-4 TR型リレーの接点浸食状態 故障したTR型の接点側面およびNO側接点表面の観察結果を写真4に示す。モータ負荷も電流遮断後の過渡電流が生じるため、ホーン負荷NO型のようにヒンジ側領域での局所的な浸食と転移堆積が見られるが、330万回の7台目故障まではそれらの深さと高さはより浅い。これは復帰電圧VR推移から推定される現象、すなわちホーン負荷より作動回数の増加に伴う浸食量変動は小さいまま、不均等な表面浸食が進展して見かけの浸食量減少となった現象を支持している。

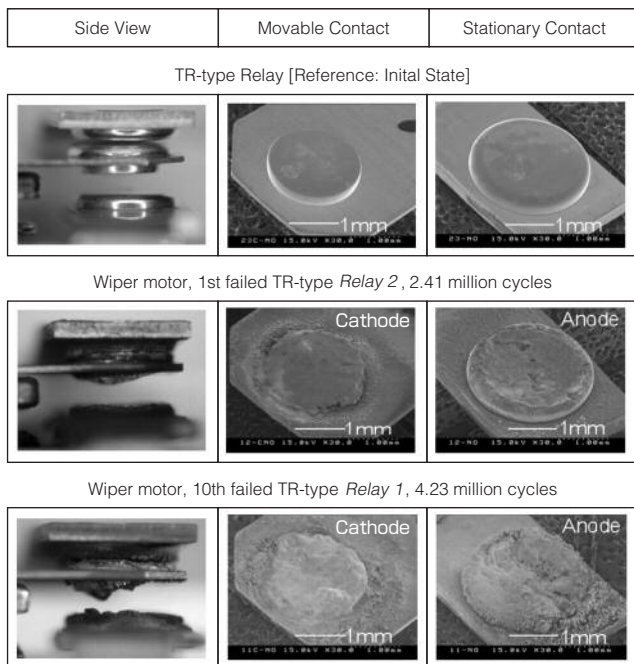


写真4 TR型リレーの未試験および故障接点状態 (NO側)

故障リレーのFM分布幅が比較的狭いこと、および接点表面の形状から判断して、固着故障原因は銀溶着であった可能性が高い。390万回の8台目故障からのリレーはホーン負荷のように浸食と転移の局所化が急激に進んでいた。これらは機械的固着が生じていた可能性がある。12V励磁時の接点側面およびNC側接点表面の観察結果を写真5に示す。比較的低い8.5A電流を投入する接点閉成時バウンスでのみ生じる低エネルギーアークにより、陰極の可動接点側からの転移が優勢であることが特徴的である。粗い表面状態となっているものの、機械的な接点固着故障を起こす可能性のある表面形状ではないと結論できる。

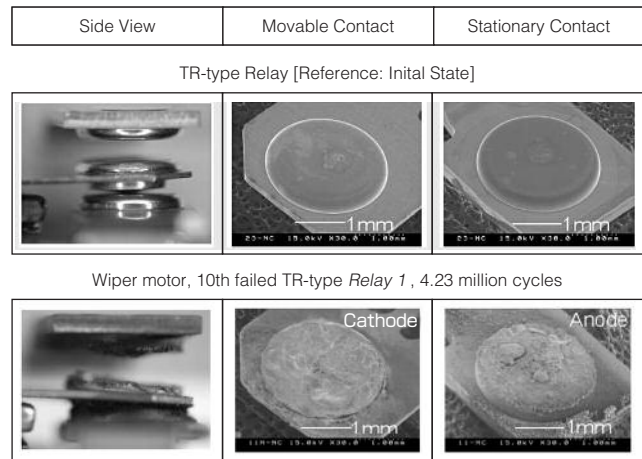


写真5 TR型リレーの未試験および故障接点状態 (NC側)

8. 結 言

エンジンコンパネメント収容の代表的電装部品を負荷として用いた開閉作動耐久試験を実施した。開発した基板実装型リレーは汎用プラグイン型の50%容積でありながら、実使用に十分な作動耐久能力を有することが累積故障率分布から定量的に検証できた。個別のリレー交換修理が不可能な集合リレーモジュールに使用できる故障率である。故障発生までの最低作動電圧推移と、故障後の接点開離力評価から、電磁作動による開閉挙動の安定維持を確認できた。それを前提に、故障発生までの復帰電圧推移、故障後接点の接触力および表面状態評価から、接点表面の直流アーク浸食経過と接点間固着故障発生メカニズムを考察した。ランプ負荷では、接点開離時の過渡電流が生じないため均等な浸食表面を維持したまま、閉成時の接点バウンスで生じるアーク発生の増加により銀溶着故障に至ったと結論した。ホーンとモータ負荷では接点開離時の過渡電流の存在により、作動回数増加につれて見かけの浸食速度変動を生じさせる局所的浸食が進んでいた。そのため、いびつ

な浸食表面形状に起因する機械的な固着故障発生が生じる状況であったため、故障発生回数の分布幅がランプ負荷より広い結果になったと考えられた。

9. 謝 辞

リレーモジュール搭載デバイスの信頼性評価方針の策定と結果考察に関して有用な技術助言をいただいた Honda R&D Americas, Inc.の Mathew E. Hargett 氏に厚く御礼申し上げます。

執筆者

瀧川 貴稔 : (株)オートネットワーク技術研究所
パワーネットワーク研究部
チーフエンジニア
車載電装ユニット、デバイス開発に従事



参 考 文 献

- (1) SEI World, 353, pp.4 (2007)
- (2) Onizuka, T., Isshiki, I., Nakanishi, R., Takagi, K., Chin, T., Yamane, S., "Circuit-constituting Unit and Method of Producing the same", US Patent 2003/0137813A1, July 24 (2003)
- (3) Takikawa, T., Shibata, M., "Load Durability Performance of Small-size Power SMD Relays", SAE Technical Paper, 2007-01-0956 (2007)
- (4) Road Vehicles – Electrical / Electronic Switching Devices – Part 3 : Microrelays, ISO 7588-3 (1998)
- (5) Plug-in Relay Test Method, SAE J2544 (2000)
- (6) Recommended Environmental Practices for Electronic Equipment Design, SAE J1211 (1978)
- (7) Automobiles – General Rules of Relays, JIS D 5010 (1993)
- (8) Leung, C., Streicher, E., Fitzgerald, D., Cook, J., "Contact Erosion of Ag/SnO₂/In₂O₃ Made by Internal Oxidation and Powder Metallurgy", Proc. of 51st. IEEE Holm Conf., pp. 22-27 (2005)
- (9) Witter, G., Chen, Z., "A Comparison of Silver Tin Indium Oxide Contact Materials Using a New Model Switch that Simulates Operation of an Automotive Relay", Proc. of 50th. IEEE Holm Conf., pp. 382-387 (2004)
- (10) Headlamp Beam Switching, SAE J564 (1990)
- (11) Semi-automatic Headlamp Beam Switching Devices, SAE J565 (1989)
- (12) "Horn-Forward Warning-Electric Performance, Test and Application", SAE J1105 (1989)
- (13) Electric Horns for Automobiles, JIS D 5701
- (14) Electric Windshield Wiper Switch, SAE J112a (1977)
- (15) Passenger Car Windshield Wiper Systems, SAE J903 (1999)
- (16) Cook, J., Streicher, E., Leung, C., Fitzgerald, D., "Analysis of Relay Contact Interface vs. Changes in Contact Force", Proc. of 54th. International Relay and Switch Technology Conf., pp. 27-31 (2006)
- (17) Leung, C., Lee, A., "Contact Erosion in Automotive DC Relays", IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 14(1), pp. 101-108 (1991)
- (18) Sallais, D., Jemaa, N. B., Carvou, E., "An Arc Study at High DC Current in Automotive Applications", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 30(3), pp. 540-545 (2007)