

実走行車両における車載コネクタの劣化解析

Deterioration Analysis of Automotive Connectors Used in Long Driven Vehicle

澤田 滋*
Shigeru Sawada

清水 敦
Atsushi Shimizu

齋藤 寧
Yasushi Saitoh

近年、自動車の電子化の進展は著しく、コネクタの増加や多極化が進行している。そのため、コネクタの信頼性の確保が重要な課題となっている。高信頼の車載コネクタの開発に当たっては、実際の走行車両に搭載されたコネクタの劣化状態を知ることが重要である。そこで、本研究では実走行車両（10万キロ走行、15万キロ走行）のコネクタを回収し、端子劣化状態とその要因について調査した。その結果、端子劣化は走行距離に応じて進行しているものの、信頼性が問題となる水準には達していないことを確認した。また、回収端子の表面観察の結果から、主な劣化要因は摺動摩耗によるものと推定された。そこで、台上試験である微摺動摩耗試験との比較により、10万キロ走行に相当する微摺動試験での摺動回数の推定を行った。結果、その回数は予想よりも非常に小さく、コネクタの信頼性を十分維持できるものであった。

Various electrically controlled systems are used in recent vehicles, such as the automated driving system. This trend increases the number of connectors and also calls for a variety of connectors in the vehicle. In order to develop high reliability vehicle connectors, it is important to investigate the deterioration state of connectors used in long driven vehicles. Thus, in this study, the terminal resistance was investigated using connectors collected from vehicles (driven 100,000 km in 8 years and driven 150,000 km in 13 years) to figure out the behavior of terminal resistance and the deterioration state of terminals over mileage driven. This investigation revealed that the terminal resistances are small enough to keep connector reliability and the deterioration of connectors is estimated to be mainly fretting corrosion caused by vibration.

キーワード：コネクタ、微摺動摩耗、接触抵抗、実車環境、端子劣化

1. 緒言

現在の自動車では、運転制御の自動化、燃費向上のための精密なエンジン制御、自動ブレーキ制御などの安全のための装備、快適性向上のための自動ドアなど、さまざまな部分で電子化が進行している。そのため、搭載される電子機器は増加の一途をたどっている。電気電子機器を接続する電線やコネクタは年々増加し、接続信頼性が益々重要になってきている。このような背景のもと、接続信頼性の高い車載コネクタを開発するためには、実車環境におけるコネクタの劣化状態を知ることが重要な課題である。

本研究では実際に走行した車両を回収し、そのコネクタの劣化状態とその劣化要因を調査した。また、これらの結果と台上試験である微摺動摩耗試験との比較評価により、実車走行に相当する摺動回数を推定した。また、長距離走行における端子抵抗値を推定した。

2002年製造、経年8年、走行距離が10万km。もう1台は1997年製造、経年13年、走行距離が15万kmの車両で、共に日本国内での走行車両である。

これらの車両から、ハーネスを切断し、嵌合された状態のままコネクタを回収した。回収したコネクタの個数を表1に示す。主にエンジンルームで使用される防水コネクタと車室内で使用される非防水コネクタに分けて調査した。ハーネスの例および回収されたコネクタを図1に示す。回収されたコネクタは、嵌合状態のまま、10mA通電し4端子法で端子抵抗を測定した。端子は、すべて錫めっき端子で、測定された値から、電線長に相当する抵抗値を差し引き、端子抵抗を求めた。また、比較のため同型の新品端子抵抗も測定した。

表1 調査車両のコネクタ回収数

	10万キロ走行	15万キロ走行
防水コネクタ (エンジンルーム)	34	31
非防水コネクタ (室内)	67	69
合計	101	100

2. 調査方法および結果

2-1 回収品コネクタ調査方法

コネクタ回収調査対象車両として、国産のDセグメント車（セダンタイプ）を選択した。対象車両は2台で、1台は、

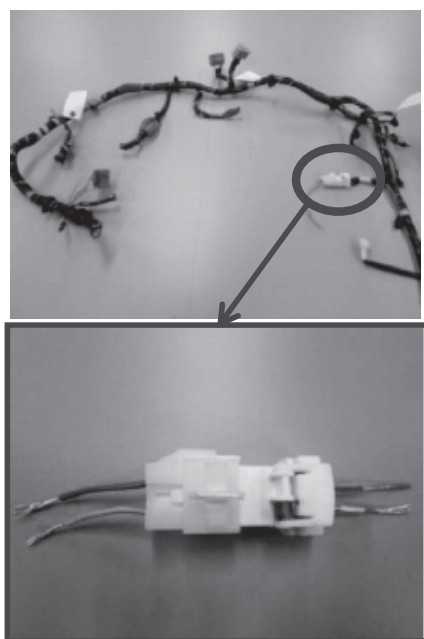
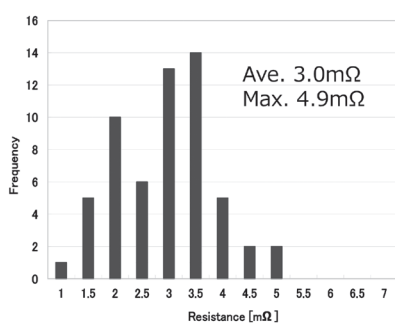


図1 ワイヤーハーネスおよびコネクタサンプル例

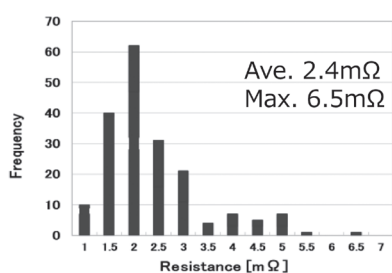
端子抵抗測定後に、一部の端子については、端子を解体し、接触部分の表面を走査電子顕微鏡 (SEM) にて観察した。

2-2 回収品コネクタ調査結果

10万km走行車から回収したコネクタの中で、最も数が多い一般向け錫めっき中電流用端子 (最大26A用) について解析を行った。中電流用端子の抵抗測定の結果を図2に示す。



a) 防水コネクタ

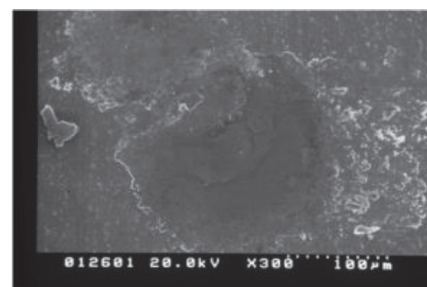


b) 非防水コネクタ

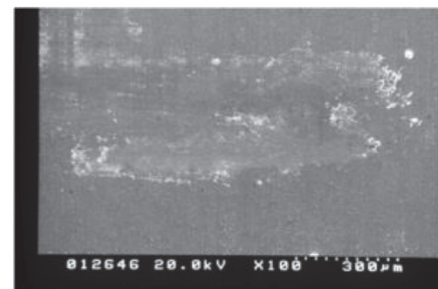
図2 中電流用端子抵抗測定結果 (10万キロ走行車)

防水コネクタの中で、最も高い抵抗値は、4.9mΩで、この値は接続信頼性が問題となるような値ではなかった。この最も高い値を示した端子は、エンジンに近いイグニッションコネクタ端子であった。非防水コネクタの中では、エンジンワイヤーハーネスに直結しているWire To Wireコネクタの端子で最も高い抵抗値 (6.5mΩ) を示した。この値も、接続信頼性が問題となる値ではない。

防水コネクタの抵抗が高い端子と低い端子について、端子を解体し、接触面を観察した。その結果を図3に示す。高

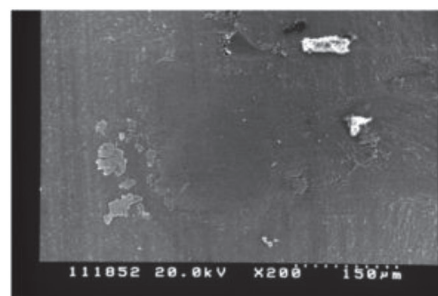


メス端子

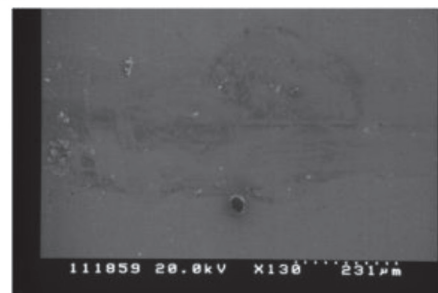


オス端子

a) 高抵抗端子 (4.9mΩ)



メス端子



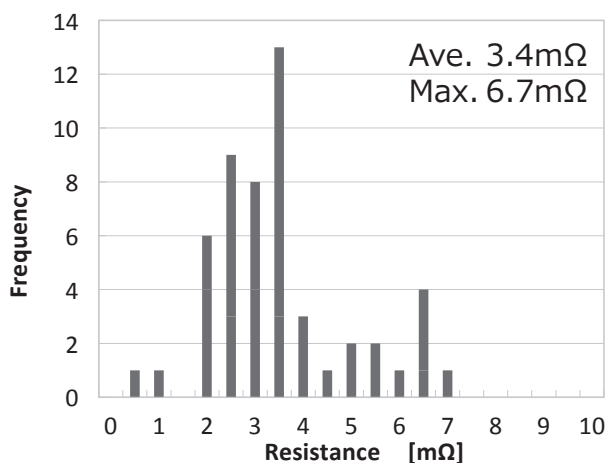
オス端子

b) 低抵抗端子 (0.7mΩ)

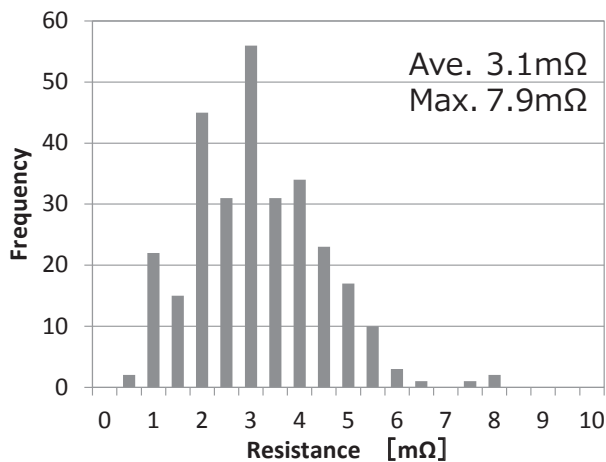
図3 端子接点のSEM観察結果

抵抗端子 (4.9mΩ) では、激しい接点摩耗が観察されたが、低抵抗端子 (0.7mΩ) の接触面は非常になめらかで、摩耗は発生していなかった。変位反力の低下による接触抵抗の上昇も考えられるため、高抵抗端子のばね部分の変位反力測定を行ったところ、初期値とほぼ同じ値を示し接触荷重の低下は認められなかった。また、圧着部分についても、大きな抵抗上昇は認められなかった。そのため、これらの結果から、端子抵抗上昇の主原因として摺動摩耗が考えられる。

次に15万km走行車から回収した中電流用端子の抵抗測定結果を図4に示す。10万km走行車の結果と同様に、端子抵抗値の最大は7.9mΩと信頼性が問題となる値ではなかった。また、最も高い抵抗値を示した端子は10万km走行車と同様に、防水コネクタではエンジンに最も近いイグニッションコネクタ端子であり、非防水コネクタでは、エンジンワイヤーハーネスに直結しているWire To Wireコネクタ内の端子であった。



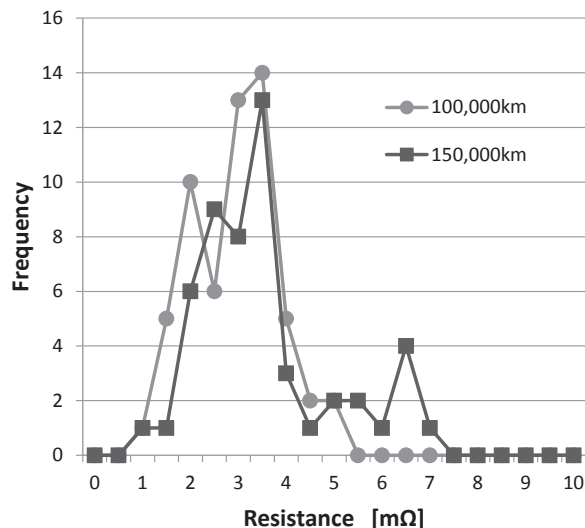
a) 防水コネクタ



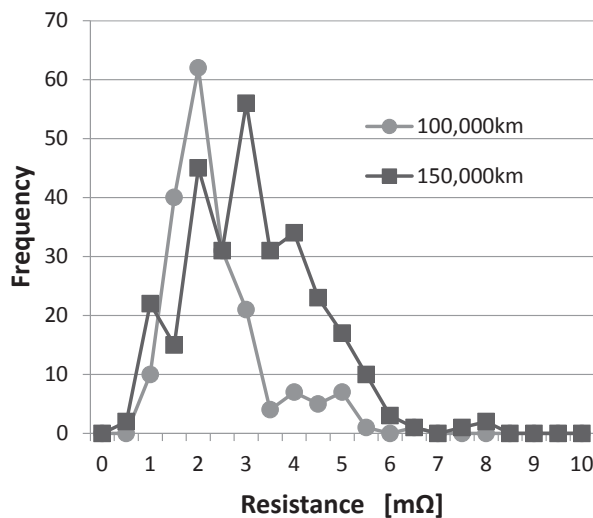
b) 非防水コネクタ

図4 中電流用端子抵抗測定結果 (15万キロ走行車)

図5に中電流用防水コネクタ、非防水コネクタの抵抗値分布を比較して示す。この図からわかるように、どちらのコネクタにおいても走行距離が延びるに従い、抵抗値が上昇している。



a) 防水コネクタ



b) 非防水コネクタ

図5 中電流用端子抵抗値分布比較

3. 微摺動摩耗試験との比較

回収品コネクタの調査より、摺動摩耗がコネクタ劣化の主要な要因と推定されたため、微摺動摩耗試験^{*1}との比較を行った。具体的には、回収した端子の摩耗粉粒径を走査電子顕微鏡により観察し、微摺動摩耗試験の摩耗粉と比較した。図6に微摺動摩耗試験において発生した摩耗粉の例を示す。摩耗粉の長径と短径の平均値を粒径と定義した。このように

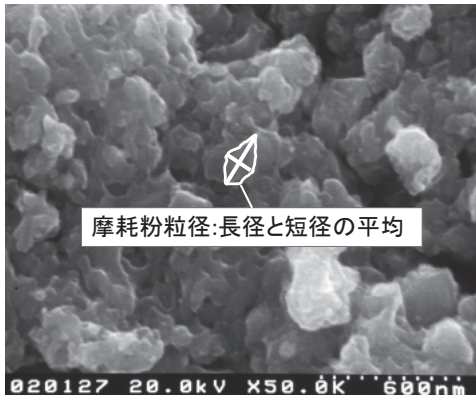


図6 微摺動摩耗試験サンプルの摩耗粉粒径測定例

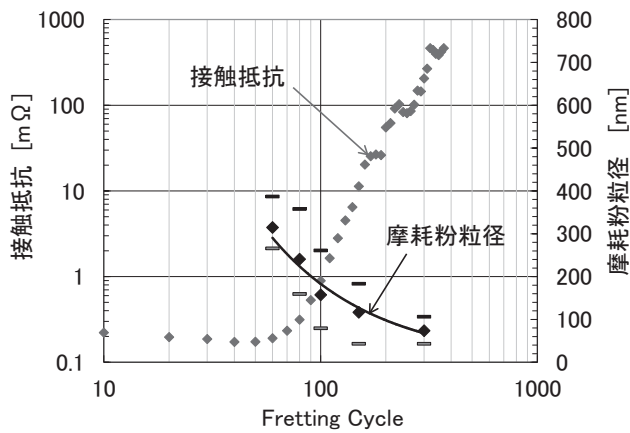
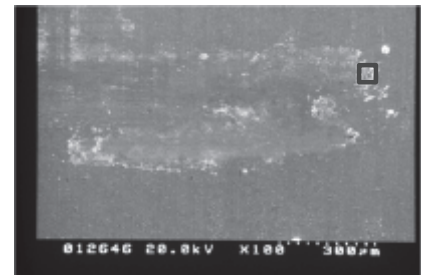


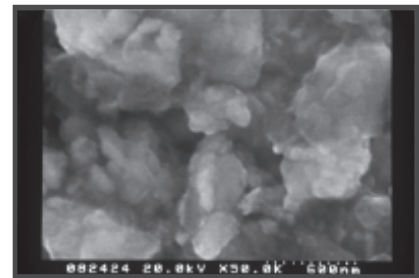
図7 微摺動摩耗試験における摩耗粉粒径と接触抵抗

して測定した微摺動摩耗試験における摩耗粉の粒径と抵抗値の関係を図7に示す^{(1), (2)}。サンプルの微摺動試験条件は、荷重3N、摺動距離50 μ m、摺動周波数1Hzである。摺動回数が進むにつれ接触抵抗が増大し、摩耗粉粒径が小さくなっている。これは錫摩耗粉の酸化が進行することにより摩耗粉粒径が小さくなっていることを示している。図8に、10万キロ走行品で高抵抗端子の端子接触部分と摩耗粉の写真例を示す。摩耗粉粒径は平均で169.7nmであった。図9に回収品端子における摩耗粉粒径と端子抵抗との関係を示す。この結果からわかるように、図7の微摺動摩耗試験結果と同様に摩耗粉粒径が小さいと端子抵抗値が高い傾向が見られ、摩耗粉粒径と端子劣化が関係することがわかる。回収品から得られた摩耗粉粒径と、微摺動摩耗試験における摺動回数とを比較したものを図10に示す。その結果、10万キロ走行における劣化を微摺動摩耗試験に換算した場合、平均では、往復75回程程度、最大でも往復150回程程度と推定される。ただし、微摺動摩耗試験条件は接触荷重3Nでかつ摺動距離を50 μ mとして実施している一方、中電流用端子の接触荷重は10N

程度で、摺動距離も一定ではない。そのため、これらの違いについては、今後の調査課題である。



(a) オス端子接触表面全体



(b) 拡大図

図8 回収品端子の摩耗粉粒径観察結果例

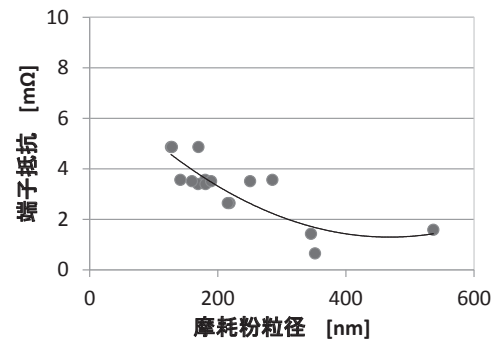


図9 摩耗粒径と端子抵抗の関係(回収品)

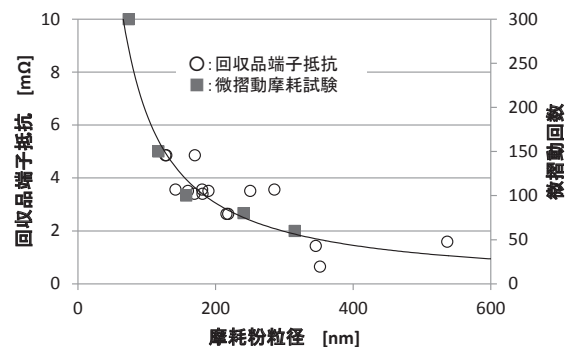


図10 摩耗粒径と微摺動回数、端子抵抗の関係

4. ワイブル統計解析による劣化予測

4-1 高抵抗端子の出現確率

10万km走行、15万km走行車両における端子抵抗の調査では、一部の端子に摩耗による劣化は観察されたものの、その抵抗値は信頼性が問題になるようなものではなかった。しかし、高抵抗の端子が全く存在しないとは限らないため、高抵抗端子の出現する確率を、ワイブル分布関数を用いることにより推定した。抵抗値を t として、 t 以下の累積確率 $f(t)$ は、ワイブル分布関数を用いて式(1)のように表すことができる(3)、(4)。

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 η は、尺度パラメータ、 m は、形状パラメータである。

推定の手順は以下のように行った。中電流用端子の抵抗値測定結果から累積確率分布を算出する。ワイブル分布関数の形状パラメータ(m)と尺度パラメータ(η)の数値を、実験結果の累積確率との誤差が最小となるようにそれぞれ求めた。その結果を図11に示す。防水、非防水端子それぞれ

に対して得られた η 、 m の値から、式(1)を用いて、10万キロ走行に対する端子1億個中で発生する出現個数を計算した。結果を表2に示す。10万キロ走行において、端子1億個中に10mΩ以上の抵抗値が出現する個数はゼロであった。

表2 10万キロ走行での中電流端子1億個中の出現個数

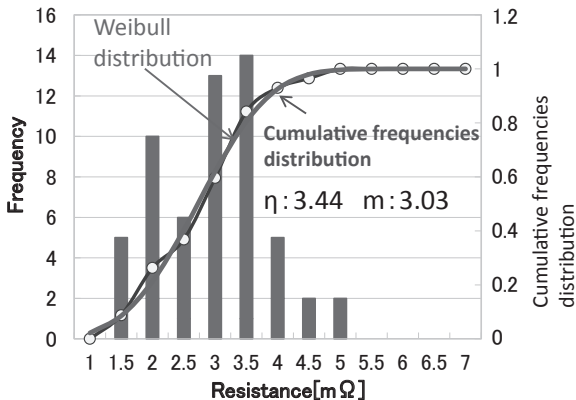
抵抗値 (mΩ)	出現個数	
	非防水端子	防水端子
6.0	304	2,788
6.5	17	100
7.0	1	2
7.5	0	0
8.0	0	0
8.5	0	0
9.0	0	0
9.5	0	0
10.0	0	0

4-2 20万キロ走行車両での抵抗値予測

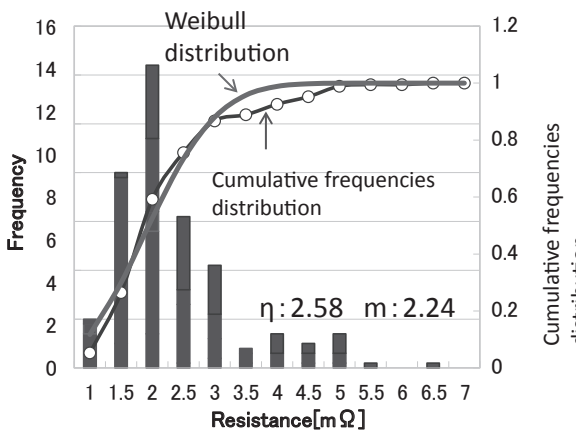
今回の調査により、10万キロ走行、15万キロ走行における端子抵抗値の関係が得られたので、20万キロ走行におけるコネクタの端子抵抗を推定した。抵抗は、指数状に上昇すると仮定した式(2)。

$$R_{ave} = Ae^{Bx} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 R_{ave} は、端子抵抗の平均値、 x は、走行距離、 A 、 B は定数である。最小二乗法により A 、 B を推定した結果を図12に示す。初期抵抗値1.5mΩに対し、防水コネクタ、非防水コネクタで劣化には違いがあり、20万キロ走行における抵抗値は、非防水コネクタで3.9mΩ、防水コネクタで4.9mΩと予想された。防水コネクタの方が非防水コネクタに比べ、約1.25倍の劣化が速い。これは、非防水コネクタに比べて、防水コネクタのほうが、温度・振動などの環境が厳しいため劣化しやすいことを示唆している。



a) 中電流用防水コネクタ



b) 中電流用非防水コネクタ

図11 10万キロ走行端子における解析結果例

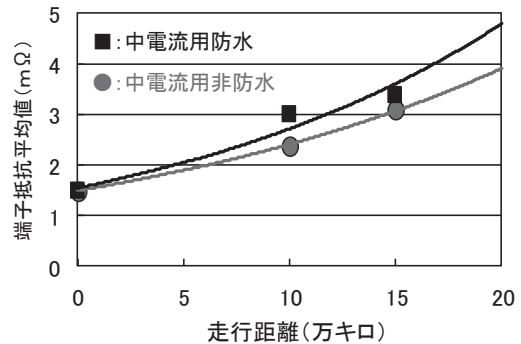


図12 走行距離に対する端子抵抗(平均値)の関係

5. まとめ

実走行における車載コネクタの劣化状態を知るため日本国内にて10万キロ、15万キロ走行した車両のコネクタを回収し、中電流用端子について端子抵抗を測定した。その結果以下のことが判明した。

1. 走行距離に伴い端子抵抗は上昇し、10万キロ走行より15万キロ走行では端子抵抗の平均値、最大値とも高くなっている。しかし、その値はいずれも信頼性が問題となる値ではなかった。
2. 接点観察の結果、端子抵抗の上昇の主な要因は、摺動摩耗による劣化であると推定される。また、微摺動摩耗試験の摩耗粉粒径と、回収品端子の摩耗粉粒径とを比較すると、回収品コネクタ内の摩耗は、摺動摩耗試験における回数換算で、平均で75回、最大でも150回程度と推定された。
3. 故障解析により、10万キロ走行において信頼性が問題となる端子の発生確率は非常に小さかった。また、故障解析から20万キロ走行におけるコネクタの平均抵抗値は、初期抵抗値の約3倍となると推定された。

6. 謝 辞

本研究を遂行するにあたり回収車両の解体・調査にご協力いただきました三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 飯田和生教授に感謝の意を表します。

用語集

※1 微摺動摩耗

非常に小さい距離 (μm オーダー) で接点が往復摺動することで、接点部分の摩耗が進行すること。Fretting Corrosion (フレッティング腐食) とも呼ばれている。往復摺動により摩耗粉が発生し、その摩耗粉が酸化、接点に堆積することで、接点障害が発生する。外部からの振動、機械的衝撃による接点移動だけでなく、冷熱サイクルにおける熱膨張係数の違いにより摺動摩耗が発生する場合もある。

参考文献

- (1) 猿渡裕也、齋藤寧、玉井輝雄、飯田和生、服部康弘、「実車環境の把握と車載コネクタ劣化メカニズムの解明」、機構デバイス研究会、Vol.111、No.254、EMD2011-59、pp.13-18 (2011年10月)
- (2) 伊藤大二、齋藤寧、玉井輝雄、飯田和生、服部康弘、「微摺動摩耗現象における接触抵抗挙動のナノスケール表面観察での検討」、継電器・コンタクトテクノロジー研究会 No.122-3 (平成22年11月)
- (3) Chi. H. Leung, E. Streicher and D. Fitzgerald, "Weibull analysis of switching contact resistance in laboratory and commercial circuit breakers," Proc. 53rd IEEE Holm conf. on electrical contacts, pp.56-61 (2007)
- (4) M. Hasegawa and Y. Tabagitani, "Analysis of contact resistance data with Weibull distribution function," Proc. 54th IEEE Holm conf. on electrical contacts, pp.344-349 (2008)

執 筆 者

澤田 滋* : (株)オートネットワーク技術研究所
回路接続研究部 主幹
博士 (工学)



清水 敦 : (株)オートネットワーク技術研究所
回路接続研究部 主席
博士 (工学)



齋藤 寧 : (株)オートネットワーク技術研究所
回路接続研究部 部長



*主執筆者