

1602 電車線路劣化メカニズムの解明

The elucidation of the deterioration mechanism at trolley lines

○衣笠 潤一 宮口 浩一 [電] 近間 大志 [電] 久保 吏 [電] 石井 順

(西日本旅客鉄道株式会社)

Junichi KINUGASA, Kouichi MIYAGUCHI, Hiroshi CHIKAMA, Tsukasa KUBO, Jun ISHII

West Japan Railway Company. 2-4-24, Shibata, Kita-ku, Osaka city

The electrical metal fittings, such as a clamp and a feeder ear, cause a fever phenomenon by the contact defect. At worst, it is caused even in the breakage of the main electrical wire, for example trolley wire and messenger wire. However, it is that an effective inspection technique can't be established against a fever phenomenon in the present. Therefore, we try to grasp the main factor that the function is lost, additionally the deterioration tendency. By these considerations, we aim to propose the effective inspection techniques against the electrical metal fittings. So, in this research, we paid attention to the case that the auxiliary messenger wire broke at the AT connector in the past. And the following examinations were done.

- (1) The observation of the sample after the acceleration
- (2) The measurement of the contact resistance, by the acceleration corrosion due to the mist of salt water
- (3) The energizing examination

Keyword: the electrical metal fittings, the fever, contact resistance, the acceleration corrosion

1. はじめに

電車線路において、クランプやフィードイヤーといった電気的金具は接触不良等によって発熱現象を引き起こし、最悪の場合は主要電線（トロリ線・吊架線等）の断線にまで至る恐れがある。しかし、現段階において、発熱現象に対する有効な検査手法が確立されていない。

そのため、電気的金具が機能を喪失してしまう主要因を把握し、またその劣化傾向を捉えることによって、効率的且つ有効な検査手法を提案していくことを目指し、本研究に取り組んだ。そこで、過去に発生したATコネクタ箇所での補助吊架線断線事例を踏まえて、今回は補助吊架線とATコネクタの接触部に注目した。劣化した電車線路部材における通電時の発熱メカニズム解明の一環として、補助吊架線とATコネクタの接触部を模したサンプルに対して、塩水噴霧による加速腐食を行った上で、測定・観察を実施した。

- ①より線およびコネクタクランプの腐食状況観察
- ②接触抵抗測定による劣化経緯の把握
- ③大電流賦課によるサンプルの発熱状態把握

2. サンプルについて

2.1 サンプル作製

サンプル用材料には、補助吊架線として硬銅より線H100 mm²（Φ2.6mm×19 本より）を、またコネクタクランプとして袋ねじ4号コネクタを用いた。

サンプルの作製例を図1に示す。より線は1.5mに切断し、一端及び他端から50cmの箇所に樹脂製結束バンドでほぐれ防止の緊縛を施し、更に同箇所から塩水が浸透しないよう防水処理も施した。また、緊縛を施していない残り50cm

m部はよりをほぐし、電気抵抗測定および大電流通電試験の際に各素線に同時に電流を送り込めるようにした。

一方、コネクタクランプは緊縛を施した長さ1m部分の中間に取り付けた。

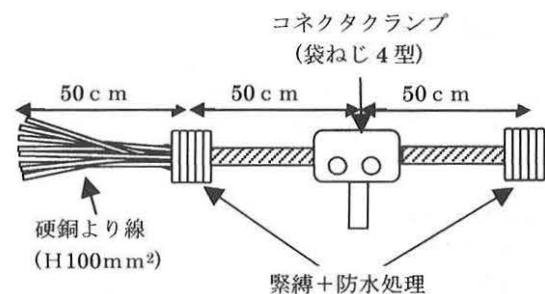


図1 サンプル作製例

2.2 サンプル条件

表1 サンプル条件

	事前腐食		防錆剤
	金具 (コネクタクランプ)	より線 (補助吊架線)	(ショウアルコン)
①	—	—	—
②	—	—	○
③	—	○	—
④	○	—	—
⑤	○	○	—

{○：事前腐食または防錆剤塗布実施}

サンプルの条件は、より線およびクランプの事前腐食の有無により 4 種類、さらにより線・クランプ間の接触部への防錆剤(ショウアルコン)塗布により 1 種類を加えて、表 1 に示すよう計 5 種類とした。なお、サンプル毎の個体差を考慮して、1 条件に付き各 5 個のサンプルで試験を実施した。また、事前腐食を行うサンプルについては、事前に 5% 塩水噴霧を 1,000 時間施した上で本試験を実施した。

3. 試験実施内容

3.1 腐食状況観察

各サンプル条件に塩水噴霧を 2,000 時間実施した後、より線・クランプを解体して、より線では各層ごとの腐食状況を、またクランプでは内部接触面の腐食状況を観察した。

3.2 接触電気抵抗測定

全サンプル 25 本について 5% 塩水噴霧による加速腐食を 2,000 時間まで行い、塩水噴霧前、塩水噴霧後 258 時間、516 時間、1,000 時間、1,500 時間、2,000 時間の計 6 回、接触電気抵抗の測定を行った。

測定方法の概略図を図 2 に示す。通電して電流と電圧効果から抵抗値を求める方法を用い、全素線に同時に通電しながら測定した。また、各素線には 1(心線)、2~7(第 2 層)、8~19(最外層)と付番し、毎回の測定において同じ素線の抵抗を比較できるようにした。

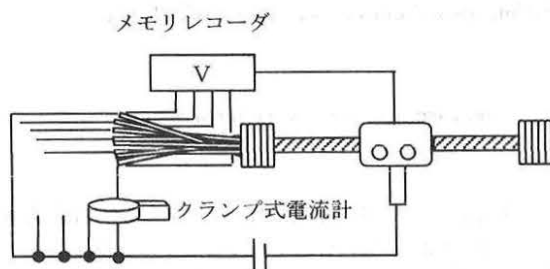


図 2 接触電気抵抗測定方法概略図

3.3 大電流試験試験

塩水噴霧を 2,000 時間実施した後、各サンプル条件について、直流 1,000 A・10 分間の通電試験を行い、熱電対による温度測定および赤外線熱画像カメラによる発熱状況観察を行った。

4. 試験結果と考察

4.1 腐食状況観察

表 2 塩水噴霧 2,000 時間後のクランプ・より線腐食状況

	クランプ把持部				以外
	クランプ	より線			より線
		最外層	第 2 層	心線	全層
①	△	○	○	○	×
②	○	○	○	◎	×
③	△	×	△	△	×
④	×	△	○	○	×
⑤	×	×	×	△	×

{腐食進行小 ◎ < ○ < △ < × 腐食進行大}

塩水噴霧を 2,000 時間行った後、クランプ・より線の腐食状況を観察した結果を表 2 に示す。表 2 が示すように、より線の場合には観察箇所をクランプによる把持部とそれ以外の部分に大きく 2 つに分けることができる。

まず、クランプでの把持部で注目すべきこととして、防錆剤を使用した場合(②)により線・クランプ双方とも腐食が進行していないことが挙げられる。即ち、防錆剤を塗布することによって、クランプ・より線間への塩水の浸入を防ぎ、初期状態を保持できたと考えられる。また、防錆剤を使用していない場合でも、事前腐食がなければ内部腐食が一部進行しつつも接触部では光沢が保たれていた(①)。一方、事前腐食を与えたサンプル(③~⑤)では、当然ながら接触面に腐食が見られた。これらのことから、サンプル作製時における事前腐食の有無が、その後の接触面状態を大きく左右することが分かる。

それに対して、クランプで把持した部分以外では、心線まで腐食していたことが全サンプルで共通して確認された。このことから、同箇所では各素線間で電気が流れにくい状況にあり、反対にクランプ把持部のような接続箇所でのみ素線間での電気のやり取りが行われていることが予想される(図 3 参照)。即ち、クランプ把持部でのクランプ/より線間の接触抵抗値、強いては各素線間の接触抵抗値が素線毎の電流分布に影響すると考えられる。よって、低い接触抵抗値を持つ素線に電流が集中しやすくなり、過電流・発熱につながるのである。

但し、今回の試験ではより線に張力を加わっていないため、塩水が内部層まで浸透しやすい状況であった可能性も考えられるので、実設備の撤去品を調査する等今後検討する必要もある。

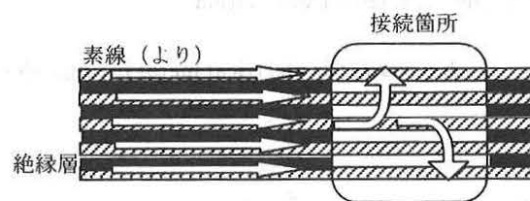


図 3 素線間の電気の流れ(モデル)

4.2 接触抵抗測定

塩水噴霧前(初期)、塩水噴霧 258~2,000 時間後において、各サンプル条件での全体抵抗値(平均値)を図 4 に示す。同図から、全体抵抗値には、塩水噴霧時間と比べて事前腐食の有無による影響が強いことが見てとれる。例えば、金具・より線に事前腐食を与えていない場合(①・②)では初期値が 0.17mΩ であるのに対して、塩水噴霧 2,000 時間後においても 0.18mΩ とほぼ抵抗値が安定している。また、クランプに事前腐食を与えた場合(④: 0.6mΩ、⑤: 2.9mΩ)では初期値が①・②と比べて過大となるが、時間経緯に伴う全体抵抗値の変化は若干の増加に留まっている。

前節で触れたように、クランプ把持部を除いた部分では全サンプルで内部素線まで腐食が至っているため、素線間での電気の流れはない、と考えられる。一方、一部のサンプル条件下では、クランプでの把持部においてクランプ/より線間、また素線間に金属光沢が確認されており、素線間での電気の流れも予想される。

そこで、硬銅より線 H100mm² の抵抗値が 0.178mΩ/m であることを用いると、クランプ・より線双方に事前腐食を施さない場合(①・②)の全体抵抗値とほぼ一致する。即ち、クランプ/より線間の接触抵抗値は 0.01mΩ = 10μΩ 以下で、接触面は導通しているとみなせる。しかしながら、クランプ、もしくはより線に事前腐食を施した場合には、前述した 0.178mΩ と比較すると、抵抗値に差異が生じる。そこで、その差異をクランプ/より線間の接触抵抗値と考えると、

サンプル条件毎の接触抵抗値は図 5 のようになる。同図より、塩水噴霧を 2000 時間実施した各サンプル条件での接触抵抗値は、より線のみを事前腐食した場合(③)に約 $30\mu\Omega$ 、クランプのみを事前腐食した場合(④)に約 $500\mu\Omega$ と求まる。このことから、同時間の事前腐食でも、より線部よりクランプ側の腐食が接触抵抗に影響を及ぼすことが分かる。

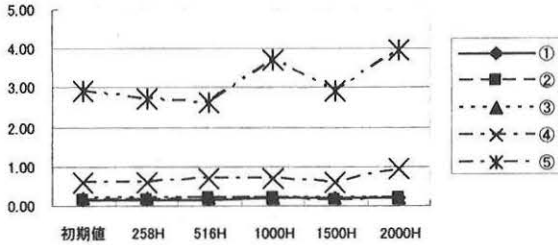


図 4 各サンプルの電気抵抗値と時間経緯との相関

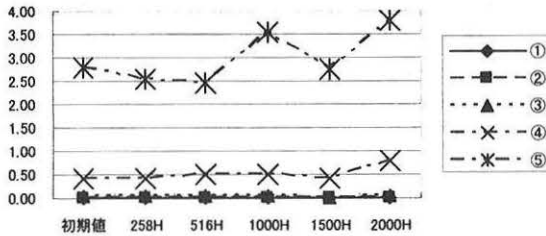


図 5 各サンプルの接触抵抗値と時間経緯との相関

その理由については、図 6 を参考に示す。ATコネクタクランプは 2 片の銅板をボルトでとじる構造となっており、その片方の銅板(B片)にコネクタリード線がつながっている(もう一方の銅板をA片とする)。また、実設備での電気の流れは「補助吊架線(硬銅より線)→クランプ→コネクタリード線→トロリ線」となっていることから、より線に流れる電流はA・B片双方に流れ込み、全電流がコネクタリード線に集約される。そこで、クランプ/より線間の接触抵抗(図中●部分)は③・④に共通して存在する。しかしながら、クランプのみを事前腐食した場合(④)には、A・B片の接触面も双方腐食しているため、A片からB片への電流は流れにくい状態にある。そのため、A片/B片の接触面の抵抗が影響して、④の場合には接触抵抗値として一桁大きな値となると考えられる。

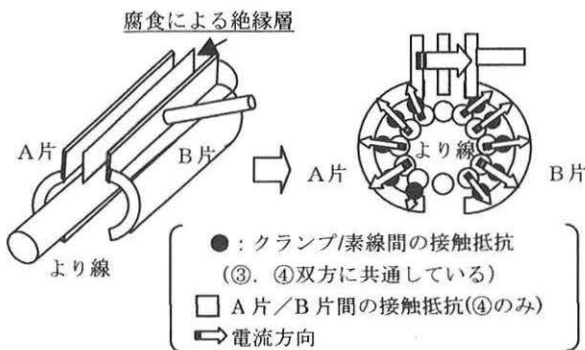


図 6 より線/クランプ間での電気の流れ

また、より線・クランプ双方を事前腐食した場合(⑤)には $3,500\mu\Omega$ と大きな接触抵抗値を示しており、双方の事前腐食によって接触面に何らかの相乗効果が働いて接触抵抗値が増大したと考えられる。

これらのことを踏まえて保全に反映した場合には、既存設備でコネクタを取り替える場合に、より線/クランプ間の接触面の腐食、特にクランプ側の腐食を除去することが重要となる。

4.3 大電流賦課試験

接触抵抗値の差異によって通電時に生じる発熱状態を把握するため、2,000 時間塩水噴霧を行った各条件のサンプルに、直流 1,000 A、10 分間の通電試験を行った。また、図 7 に示すように、発熱状態を把握する対象として、熱電対による温度測定および赤外線熱画像カメラによる発熱状況観察を行った。

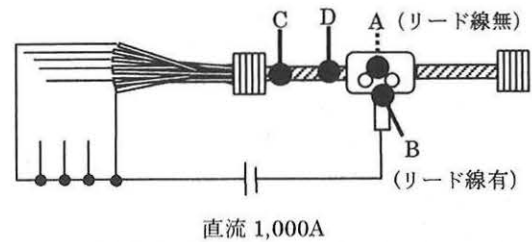


図 7 熱電対による大電流賦課試験での測定点

まず、クランプ/より線双方に事前腐食を与えなかった場合(①・②)には、各測定点の温度が通電時間に比例して上昇したが、クランプ・より線毎の温度上昇度を詳しく注目してみると、クランプに比べより線の方が高い上昇度を示した(クランプ: $0.07^\circ\text{C}/\text{S}$ より線: $0.10^\circ\text{C}/\text{S}$)。その原因として、電流通過面積と熱容量の違いが挙げられ、クランプではより線に比べて電流通過接触面積が大きく熱容量も大きいために、温度上昇度に差が生じたと考えられる。

また、クランプもしくはより線に事前腐食を与えた場合には、各測定部の温度上昇度が確実に高くなり、特に電気的な接触箇所となるクランプ部での上昇度が顕著である。その理由として、クランプ/より線間での導通面積の縮小化が考えられる。これらのサンプル条件の場合、クランプ/より線間の大部分の接触面が事前腐食によって錆(緑色)の膜で覆われ、接触抵抗の増大につながる。その中で、抵抗値が小さい限られた接触面に多くの電流が流れやすくなるのである。そのため、低抵抗箇所の電流負担量は増加することになり、電流分布に差異が生じる。また、金属に通電した場合には、電流の 2 乗もしくは抵抗に比例する相関関係を持って発熱する(式(1)参照)ので、今回のように接触抵抗が増加することによって、発熱量も比例して増加する。このことから、クランプ部での発熱量増加による急激な温度上昇について説明できる。

また、通電試験を行った各サンプルの全体抵抗値と各測定点の温度(通電 10 分後)との相関を図 7 に示す。同図から、全体抵抗値の増大に伴って各測定点の温度も対数的に上昇していることが見受けられる。特に、コネクタリード線側のクランプ片(図 6 では B 片)での B 点では、他の測定点と比較して高い温度上昇を示している。図 6 にも示したように、より線からの電流は A・B 片に分流するが、最終的には B 片に全電流が集約されてコネクタリード線に流れることになる。そのことから、A・B 片の通電電流値に差が生じており、強いては温度差に影響していることが判る。

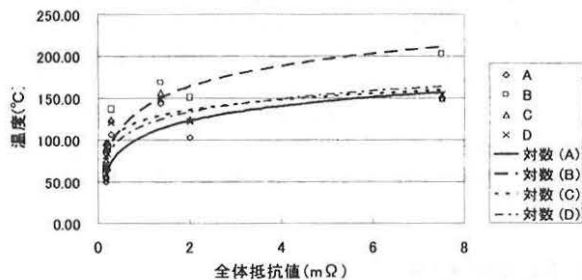


図7 全体抵抗値と各測定点の温度との相関(通電10分後)

また、今回の大電流試験ではより線部の溶損等を確認されなかったが、より過大な電流を流した場合には溶損・断線に至る恐れがある。そこで、溶損に至る電流値をシミュレートするために、式(1)を用いて検討する。まず、実測値であるより線部の表面温度(C・D{図7})を用いて、素線毎に流れる電流値(平均)を求めて、検証してみた。

$$\theta_0 = I^2 R / A \times (1 - \exp(-A t_0 / C)) \quad \dots \text{式(1)}$$

θ_0 : t_0 後の温度上昇(°C)
 A : 電線単位長の熱放散率(W/°C)
 C : 電線単位長の熱容量(J/cm・°C)
 R : 電線単位長の抵抗(Ω/cm)
 I : 電流値(A)
 t_0 : 通電時間(sec)

事前腐食を施していない場合(①・②)ではより線部の表面温度が70~90°Cを示していたことから、式(1)より各素線に流れる電流値は57~69Aと求まる。

また、前述したように、クランプ把持部を除いたより線部は内部層まで腐食が進行しているため、各素線間が絶縁された状態となっている。よって、より線には通電電流1000Aの1/19≒約53Aの電流が断面積5.3mm²の素線毎に平均して流れることが予想される。これらのことから、式(1)が大方有効であることが示すことができる。

そこで、既存設備で断線に至る場合を想定してみると、通電時間が15秒の場合、素線一本に約267A流れることで銅の融点(1086度)に達し、素線が溶損する。即ち、素線切れを防止するためには、素線同士の接触抵抗、さらにはクランプ/より線間の接触抵抗を抑制することで祖先毎の電流分布を均一化し、素線1本当たり267A以下にすることが必要となる。

5. まとめと保全への提言

劣化した電車線路部材における通電時の発熱メカニズム解明への一環として、補助吊架線とATコネクタの接触部を模したサンプルに対して塩水噴霧による加速腐食を行った上で、実施した測定・観察についてまとめると以下のようになる。

① より線およびコネクタクランプの腐食状況観察

・クランプでの把持部について、より線・クランプ双方とも事前腐食が無い場合には、加速腐食を行った後でも接触部の光沢が保たれていた。

⇒既存設備での老朽取替の際に、より線・クランプ双方の接触面を磨くことによって良い接触面を維持できる。

・クランプで把持した部分以外について、心線まで腐食していたことが全サンプルで共通して確認された。

⇒張力が加わった実設備での更なる検討を要する

② 接触抵抗測定

・サンプル条件での全体抵抗値(平均値)は、塩水噴霧時

間に比べ事前腐食の有無による影響が強い。

・クランプ/より線間の接触抵抗値について、クランプ・より線双方に事前腐食を施さない場合(①・②)は、10μΩ以下で導通しているとみなせる。しかしながら、クランプ・より線に事前腐食を施した場合には接触抵抗が増大し、更にクランプ・より線双方を事前腐食した場合には3,500μΩと大きな接触抵抗値を示した。

⇒既存設備での取替の際には、より線/クランプ間の接触面の腐食、特にクランプ側の腐食を除去することが重要である。

③ 大電流賦課による発熱状態

・クランプ/より線双方に事前腐食を与えなかった場合(①・②)には、各測定点の温度が通電時間に比例して上昇した。

・クランプもしくはより線に事前腐食を与えた場合には、各測定部の温度上昇度が確実に高くなり、特に電気的な接触箇所となるクランプ部での上昇度が顕著である。

…クランプ/より線間での導通面積の縮小化による。

・通電試験を行った各サンプルの全体抵抗値と各測定点の温度(通電10分後)との相関から、全体抵抗値の増大に伴って各測定点の温度も対数的に上昇し、特にコネクタリード線側のクランプ片B点では、他の測定点と比較して高い温度上昇を示した。

…コネクタリード線が繋がっている1片には全電流が流れ込むために、コネクタ把持部でも2片の銅板間に温度差が生じた。