

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

架線・パンタグラフの境界と接点： 波状摩耗の発生機構を解明する

架線とパンタグラフのすり板は、その接点において共に摩耗していきます。摩耗の進行が速いと、メンテナンスコストを増大させるだけでなく、鉄道の安定輸送も脅かされるため、摩耗を抑制することは重要です。本稿では、架線側の摩耗、特に波状摩耗とよばれる特殊な摩耗形態を取り上げ、その発生機構の解明とそれに基づいて提案した対策法について紹介します。



小山 達弥
Tatsuya Koyama
鉄道力学研究部
集電工学研究室
副主任研究員
[専門分野] 架線・パン
タグラフの相互作用



網干 光雄
Mitsuo Aboshi
研究開発推進室
主管研究員
[専門分野] 集電工学、
電力

架線の波状摩耗

電気鉄道では、集電装置を介して電車線から車両に電気を取り込むことで、列車を走行させています。電車線のうち線路上空に架設されたものを架空式電車線（以下、架線と記す）といい、カテナリー式架線や剛体架線などがあります（図1）。また、架線に対応する集電装置としては主にパンタグラフ（図2）が用いられています。パンタグラフの舟体には架線と直接接するすり板が装着されています。

パンタグラフのすり板が架線をしゅ

う動しながら電気を取り込むため、その接点では双方が徐々に摩耗します。摩耗要因を詳しくみると、すり板と架線間の接触力（以下では単に「接触力」と記す）に起因する摩擦力によるものや、パンタグラフが架線から離れた際（これを離線といいます）に生じるアークによるものなどがあります。

架線の摩耗は一律ではなく、局所的な摩耗や、規則的な波長をもつ摩耗が生じることがあります。この規則的な波長をもつ摩耗形態を「波状摩耗」と呼びます。波状摩耗には、新幹線の

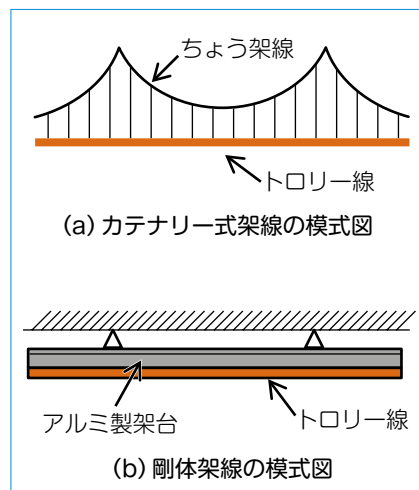


図1 架空式電車線

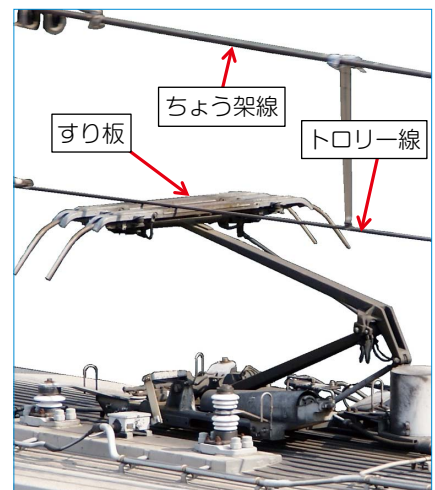
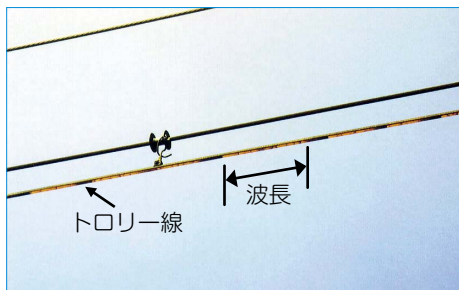
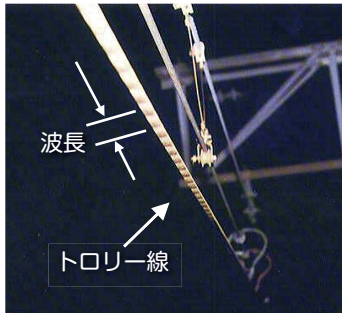


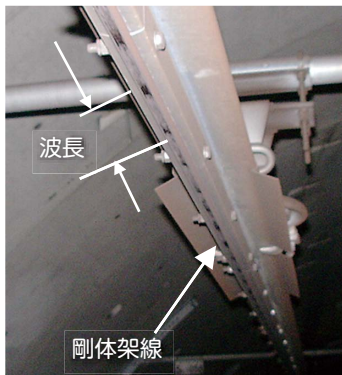
図2 在来線用パンタグラフの例
(シングルアームパンタグラフ)



(a) 新幹線高速区間(波長:約20cm)



(b) 直流在来線低速区間のカテナリー式架線(波長:約6cm)



(c) 剛体架線区間

図3 波状摩耗の例

高速区間(図3(a)), 直流在来線低速区間のカテナリー式架線(図3(b))や直流剛体架線区間(図3(c))の3つの箇所が発生することがわかっています。波状摩耗は、摩耗の進行を速くするため、トロリー線の寿命を著しく低下させます。また、波状摩耗が成長した箇所ではアークが生じ、架線だけでなくすり板の摩耗も促進され、アークに伴い発生するスパーク音による騒音が生じます。

図3(a)～(c)は同じように見えるかもしれませんが、これまでの研究により波状摩耗の形態ごとに発生機構が異なることが分かっています。以下で

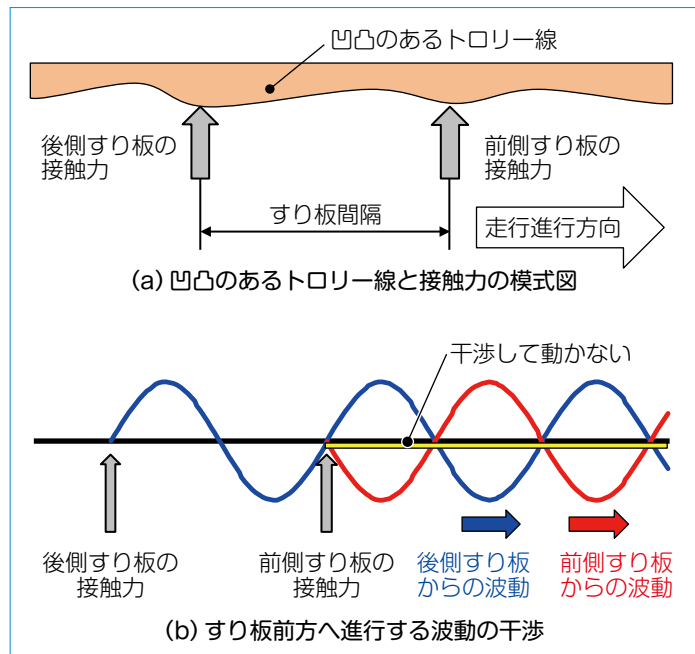


図4 新幹線高速区間に生じる波動

は、その形態ごとに発生機構と抑制策を示します。

新幹線の高速区間におけるトロリー線の波状摩耗

新幹線の高速区間において発生するトロリー線の波状摩耗は、2列のすり板を有するパンタグラフが使用される線区で発生します。この波状摩耗の波長は、パンタグラフのすり板間隔やその整数分の1にほぼ一致します。この波状摩耗の発生機構は、トロリー線の波動(☞参照)解析により解明されています¹⁾。図4(a)のように凹凸があるトロリー線を2列のすり板をもつパンタグラフが通過するとき、この凹凸により接触力が変動します。このとき、トロリー線にはそれぞ

れのすり板を発生源として波動が励起され、すり板の前方および後方に伝わっていきます。凹凸の周期がある条件を満たすと、これらの波動が互いに干渉し、図4(b)のように前側すり板と後側すり板から生じて進行方向前側へ進む波動が進行方向前側で反位相となって打ち消し合い、トロリー線があたかも動かないかのようにふるまいます。同じ現象は、進行方向後側でも発生しますが、ドップラー効果(☞参照)により発生する凹凸波長が進行方向前側の場合と異なります。このような「トロリー線が動かない」状態では接触力の位相と凹凸の位相が一致し、凹凸の振幅が徐々に大きくなります。これらの凹凸のうち、進行方向前側のトロリー線が動かない現象と後側のトロ

☞ 波動

波が周囲の媒体に伝わっていく現象のこと。身近な例では、水面の波、音(音波)があります。

☞ ドップラー効果

波の発生源と観測者との間に相対運動があるとき、発生源が観測者に近づくと波の周波数が高く、遠ざかると周波数が低く観測される現象のこと。例えば、サイレンを鳴らしている緊急車両(波の発生源)が近づくと音が高く聞こえ、遠ざかると音は低く聞こえる現象はドップラー効果によるものです。

リ線が動かない現象が同時に起こる波長をもつ凹凸が選択的に成長していきます。

ところで、波状摩耗が生じていたころ、パンタグラフの低騒音化を目的としてすり板の1列化が行われ、このパンタグラフが使用されている区間では波状摩耗が形成されにくくなりました。これは、すり板の1列化により波動の干渉がなくなったためです。パンタグラフすり板の1列化は、前述の理論と整合した波状摩耗対策と低騒音化を兼ね備えているため、広く採用されることとなりました。そのため、現在の新幹線では、波状摩耗の発生が抑制されています。

直流在来線低速区間のカテナリー式架線におけるトロリー線の波状摩耗

直流在来線低速区間のカテナリー式架線に生じるトロリー線の波状摩耗は、集電電流の大きな力行区間で、なおかつ1編成に1台のパンタグラフのみ、もしくは高圧母線で接続されていない複数のパンタグラフが搭載されている線区で顕著に発生します。

この波状摩耗の発生機構は、以下のように説明できます²⁾。固形潤滑剤(☞参照)を装着したパンタグラフが凹凸のあるトロリー線を通過するとき、トロリー線の山部が導電率の低い固形潤滑剤に乗り上げることでトロリー線とすり板間に離線アークが発生します(☞図5参照)。このアークによるトロリー線損耗によりすり板間隔の整数分の1の波長をもつ凹凸が選択的に成長し、波状摩耗が形成されます。なお、

☞ 固形潤滑剤

トロリー線と金属すり板の凝着摩耗の低減を目的としてすり板間に装着されます。

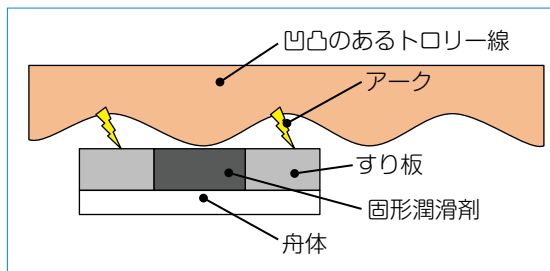


図5 直流在来線低速区間のカテナリー式架線に生じる波状摩耗の発生メカニズム

アークの強さは集電電流の大きさに比例するため、集電電流の大きな直流電化区間の力行区間で波状摩耗が発生しやすく、集電電流の小さな交流区間では発生しません。

この発生機構を考慮して、次のような対策が実施されました。第一に、固形潤滑剤を1列だけ外す方法が採られました。固形潤滑剤のある舟体においてトロリー線の山部が固形潤滑剤に乗り上げても、他方の舟体ではすり板がトロリー線と接触しているため離線アークが発生しません。第二に、カーボン系すり板の採用があります。カーボン系すり板は自己潤滑性に優れているため、波状摩耗の原因である固形潤滑剤を使用する必要がありません。

これらの対策により、直流在来線の低速区間における波状摩耗の発生はほとんど見られなくなりました。

剛体架線における波状摩耗

剛体架線における波状摩耗は、トロリー線凹凸や、舟体やすり板の幾何学的配置だけでなく、パンタグラフの振動特性に強く影響される複雑な発生機構を有しています。そのため、波状摩耗の発生自体は以前から知られていたものの、その発生機構の解明には長い年月を要しました。この波状摩耗の特徴は、力行区間で発生すること、剛体架線の種類によらず発生すること、波長は、舟体間隔およびその整数分の1だけでなく、舟体間隔の1/0.3(約3倍)に一致すること、などがあります。

この波状摩耗の発生機構は、精密な現地測定や数値解析により解明されています³⁾。剛体架線区間では、電車線がほとんど振動しません。そのため、パンタグラフの振動特性が電車線の摩耗形成を決定づけます。凹凸のある剛体架線をパンタグラフが通過するとき、パンタグラフが動きづらい周波数(反共振周波数)に一致する凹凸波長に対しては、パンタグラフと架線間の接触力が大きくなり、凹凸が徐々に成長します。パンタグラフが追従できなくなる程度に凹凸が成長すると、この凹凸の中から前側すり板と後側すり板が同時に離線する波長をもつ凹凸が離線アークにより選択的に成長していきます(☞図6(a)参照)。つまり、パンタグラフの反共振周波数と離線しやすい波長をもつ凹凸が選択的に成長し、波状摩耗が形成されます。☞図6(b)はある線区で発生した波状摩耗を列車速度ごとに平均化したもので、赤>黄>緑>青の順で凹凸の深さが大きくなります。縦軸の右側は波数(ここでは1mに含まれる波の数、つまり1/波長とします)を示し、左側は波長とすり板間隔の関係をわかりやすくするために波長をすり板間隔で整理した値を示しています。曲線はパンタグラフの反共振周波数に相当する波数(この曲線は波数=反共振周波数/列車速度として計算しています)を示しています。A～C部が波状摩耗の発生箇所を示しており、パンタグラフの反共振周波数と離線しやすい凹凸波長が一致する箇所では波状摩耗

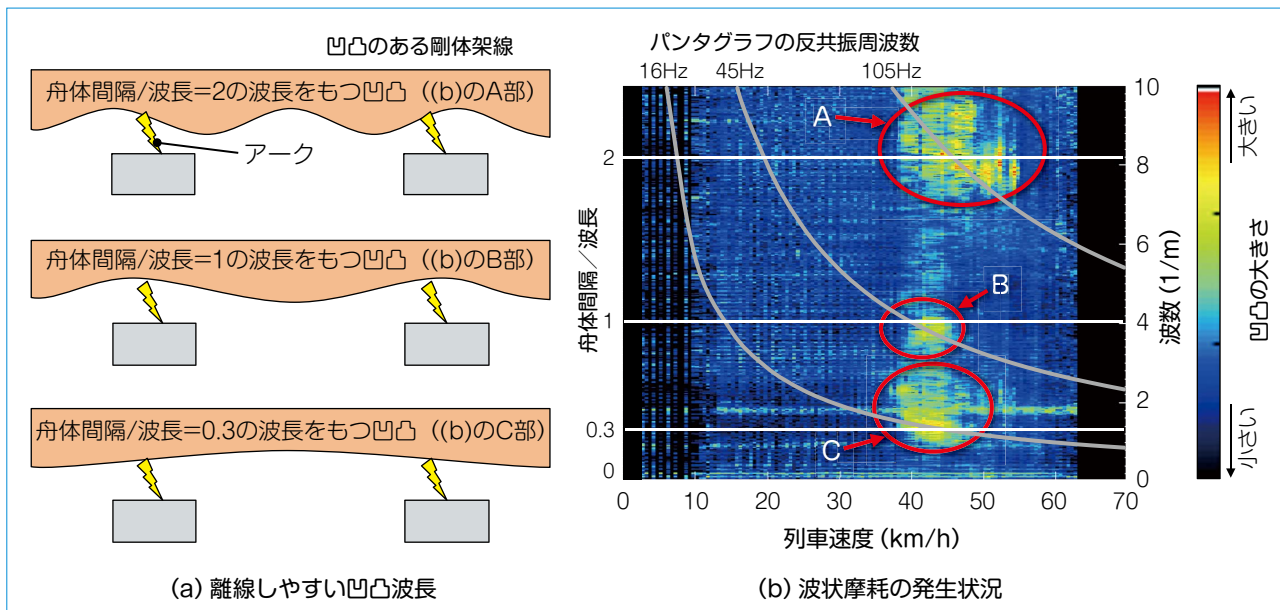


図6 剛体架線区間に生じる波状摩耗

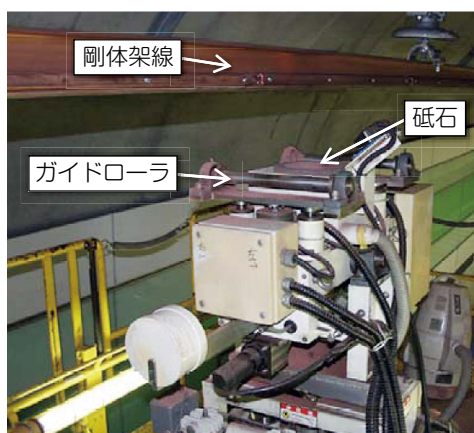


図7 切削装置による剛体架線区間の波状摩耗抑制策

が発生していることがわかります。なお、波数2付近に見られる強度の強い帯状の領域は、剛体架線の製造時に生成された凹凸です。

この発生機構に基づき、抑制策を提案しています⁴⁾。抑制策でもっとも効果があるのは、剛体架線の初期凹凸を減らすことです。具体的には、架台の大曲がりの抑制、架台接続部の平滑化、架設時の高低差を低減することなどです。架設後の対策としては、剛体架線を切削装置(図7参照)により切削し平滑化する方法があります。これらの対策の有効性は営業線で確認されています。また、パンタグラフ側の対策として、パンタグラフの振動特性とすり

板間隔を同時に調整する手法も提案しています。

おわりに

架線に発生する波状摩耗は古くから知られていましたが、その発生機構の解明が近年進んだのは、電車線の摩耗や凹凸を精密かつ連続的に計測できる装置が開発され、膨大な現場データを効率よく取得できるようになったことが大きく寄与しています。これにより仮説を立て理論解析により検証することで、有効な対策を提案することができました。かつては大きな問題となっていた波状摩耗も、新幹線や直流在来線低速区間のカテナリー式架線では発生が収束しています。

これまで述べてきた波状摩耗の発生機構を振り返ると、波状摩耗は発生してあたり前のように思えます。波状摩耗として成長するかどうかは、目に見えない微小凹凸の形成因子とそれを抑制する因子のせめぎ合いの結果であり、形成因子が勝ると成長過程に入り姿を表すものと考えています。例えば、同じ形式のパンタグラフが同じ速度で走

るような均質な運転条件や、顕著な初期凹凸がある付近から波状摩耗が発生しやすいのも、形成因子が勝った条件と思われる。

波状摩耗は電車線に現れる問題ですが、発生機構からわかるようにパンタグラフが密接に関係しています。そのため、波状摩耗は電車線担当部署だけでは解決できない課題であり、車両担当部署との連携が必要です。

なお、紙面の都合上、本稿には波状摩耗の発生機構とその対策の概略を紹介しました。詳細については、下記の文献に記載されていますので、興味のある方はぜひご参照ください。[RRR]

文献

- 1) 真鍋克士：トオリ線波状摩耗の発生機構解明，鉄道総研報告，Vol.13, No.7, pp.13-18, 1999
- 2) 網干光雄，長沢広樹：トオリ線波状摩耗対策の開発(在来線)，鉄道総研報告，Vol.6, No.7, pp.37-44, 1992
- 3) 小山達弥，網干光雄：パンタグラフの動特性に起因した剛体電車線の波状摩耗発生機構，鉄道総研報告，Vol.26, No.6, pp.23-28, 2012
- 4) 網干光雄，小山達弥，早坂高雅，松村周：剛体電車線における波状摩耗とその抑制手法，鉄道総研報告，Vol.26, No.6, pp.17-22, 2012