

剛体電車線におけるパンタグラフの動特性に 起因した波状摩耗とその抑制手法

鉄道力学研究部 集電力学研究室
副主任研究員 小山 達弥

1. はじめに

剛体電車線は、断線の恐れが少なく架設空間が小さいことから、主に地下鉄やトンネル内等で使用されている。剛体電車線は一般的には保全性に優れた電車線方式であるが、しゅう動面に波状摩耗が発生する場合がある。波状摩耗は、電車線のしゅう動面が一様に摩耗せず規則的な間隔で波状に摩耗する形態のことをいう。波状摩耗が発生した箇所においては、パンタグラフの離線に伴うアーク放電により、電車線やパンタグラフすり板の急速摩耗が生じることが多いため、発生機構の解明とその対策の実用化が急がれている。そこで、剛体電車線における波状摩耗の発生状況について実態を調査し、波状摩耗の発生機構を解明するとともに、波状摩耗抑制策について検討を行った。

2. 波状摩耗の発生状況

剛体電車線の波状摩耗の発生状況等を把握するため、全国の剛体電車線を有する鉄道事業者に対してアンケート調査を実施するとともに、剛体電車線用凹凸測定器¹⁾を用いて営業線におけるしゅう動面凹凸の精密測定を実施した。

アンケート調査結果から、剛体電車線を有する全ての路線のうち、約7割の路線で波状摩耗が発生していることがわかった。また、波状摩耗が発生している路線のうち、約7割の路線では駅出発区間や駅中間の力行区間において波状摩耗が発生していること、約1割の路線（特に架空剛体ちょう架式）において、凹凸振幅が1mm以上の顕著な波状摩耗が発生していること、約7割の路線で波状摩耗による電車線の異常摩耗・局部摩耗等の問題が発生し、すり板の異常摩耗や割損、舟体のクラック等の障害も発生していること、などが判明した²⁾。

営業線における架空剛体ちょう架式電車線のしゅう動面凹凸の測定例を図1に示す。図1の上段の波形は波長1m以下のしゅう動面凹凸を示す。下段は凹凸のパワースペクトル密度（PSD）を示す。ただし、ここでは波数は波長の逆数である。この路線では、A部～C部のように駅出発の力行区間を中心に特定の波数の波状摩耗が発生している。また、しゅう動面にはアーク痕がみられる³⁾。

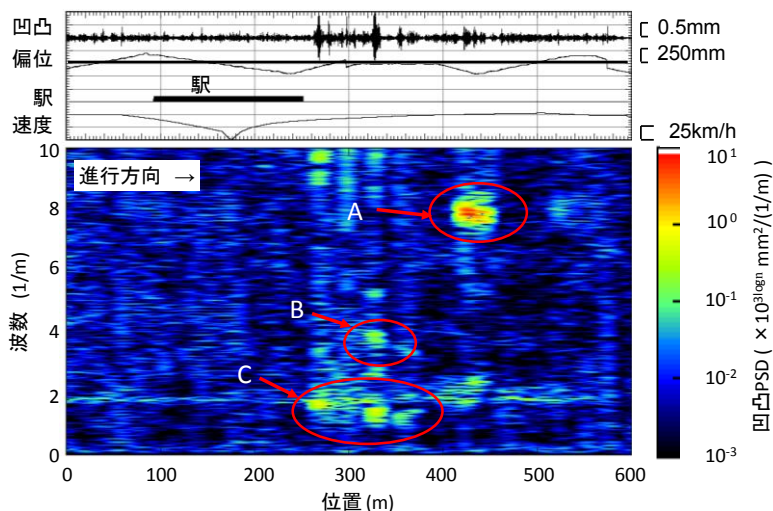


図1 しゅう動面凹凸測定結果の一例

3. 波状摩耗の発生機構

本研究により、波状摩耗は以下に記す2段階で形成されると考えられる⁽³⁾。

3.1 機械的摩耗による規則的凹凸の形成

しゅう動面に波長 λ 、振幅 A の凹凸がある剛体電車線をパンタグラフが速度 v でしゅう動した場合、電車線とパンタグラフ間の接触力変動 F は、

$$F = i\omega Z_p A e^{i\omega t}, \quad \omega = 2\pi v/\lambda \quad (1)$$

で表わされる。ただし、 Z_p はパンタグラフの機械インピーダンスである。接触力に比例して電車線の摩耗量が増加すると仮定すれば、初期凹凸の中からパンタグラフの機械インピーダンスが極大となる周波数、つまり反共振周波数に相当する波長をもつ規則的な凹凸が、機械的摩耗により選択的に形成され、成長すると考えられる。

3.2 電氣的損耗による規則的凹凸の成長

前節により形成された凹凸の振幅がある程度まで成長した後は、パンタグラフは電車線から離線しアーク放電が発生し、このアーク放電に伴う電氣的損耗により、凹凸の振幅がさらに成長すると考えられる。以下に、図2に示すモデルを用いて電氣的損耗による凹凸の成長について検討する。

パンタグラフの全てのすり板が電車線から離れたときに、アーク放電が発生すると仮定するとともに、パンタグラ全体の接触力変動が大きいほど離線アークが発生しやすいと考えて、両舟体の接触力変動の瞬時和を算出した(図3)。図3の横軸は無次元化波数 β (舟体間隔 L と凹凸波長 λ に相当する波数の比 $\beta=(1/\lambda)/(1/L)$)である。なお、 $\beta=0.1$ 付近の極大は反共振によるものである。1列舟体の場合は、反共振周波数のみに接触力変動の極大があるため、これに相当する波長の凹凸のみが形成されると考えられる。一方、2列舟体の場合には、 $\beta=0.5, 1.5, \dots$ で接触力変動が極小になるので、 $\beta=0.3, 1.0, 2.0, \dots$ 程度のときに接触力変動は相対的に大きくなり、離線アークが発生しやすいと考えられる。そのため、3.1節に記載した規則的な凹凸のうち、舟体間隔の整数分の1($\beta=1.0, 2.0, \dots$)と0.3分の1($\beta=0.3$)の波長を有する凹凸のみが成長すると考えられる。

3.3 波状摩耗の発生機構のまとめ

凹凸測定を実施した路線における波状摩耗が $\beta=0.3, 1.0, 2.0, \dots$ で実際に卓越しているか確認した。図1で示したしゅう動面凹凸のスペクトル分布を運転速度ごとに平均したものを図4に示す。同

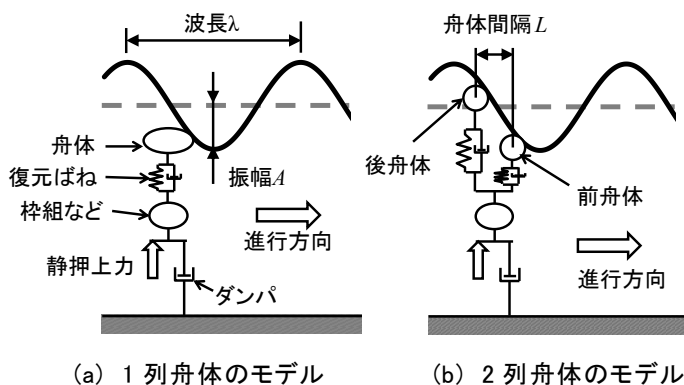


図2 ばねと質点を用いたパンタグラフモデル

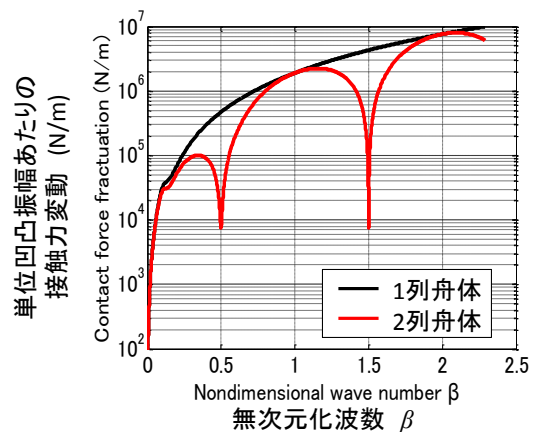


図3 両舟体の接触力変動の瞬時和

図には、当該路線で使用されているパンタグラフの反共振周波数（16Hz, 45Hz, 105Hz）に相当する波数曲線を追記している。この図より、パンタグラフの反共振周波数を示す波数曲線と $\beta=0.3, 1.0, 2.0, \dots$ を示す直線との交点付近で波状摩耗が発生していることが確認できる。

以上より、波状摩耗の発生機構を整理すると、次の2段階の過程で説明できる。

(1) パンタグラフの振動特性に起因する機械的摩耗による規則的な凹凸の選択的形成

(2) (1)で形成された凹凸のうち、離線アークに伴う電氣的損耗による選択的凹凸成長

ただし、初期凹凸が大きい場合など、初期段階から何らかの理由により離線アークが発生する環境下では、(1)の過程を経ずに(2)に至る場合もあると考えられる。

波状摩耗の波長（(2)の選択的凹凸の波長）は、舟体間隔の整数分の一（ $\beta=1.0, 2.0, \dots$ ）と舟体間隔の約0.3分の一（ $\beta=0.3$ ）に相当する波長である。

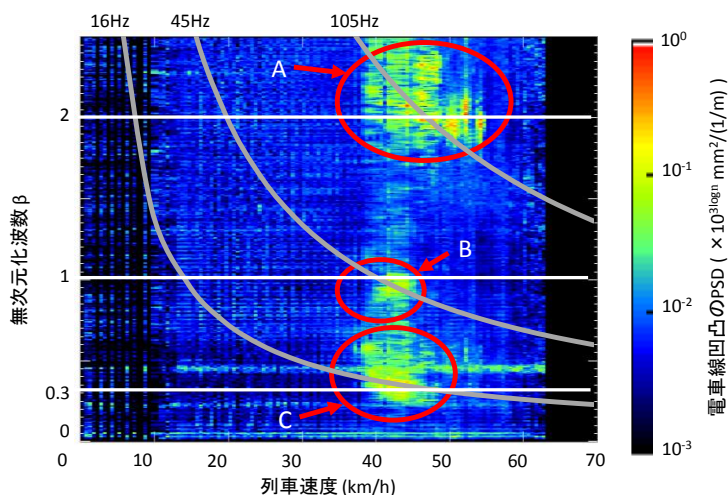


図4 電車線凹凸スペクトルと接触力変動の比較

4. 抑制策の提案

解明した発生機構に基づき、波状摩耗抑制策を提案する²⁾。

4.1 初期凹凸の低減

式(1)に示すように、しゅう動面の凹凸振幅が大きいほど接触力変動が大きいので、しゅう動面の初期凹凸をできる限り小さくすることは、波状摩耗の発生に対する抑制効果がある。具体的な方法として、支持点間たわみの低減や接続箇所凹凸の低減、架台や導電鋼レールの大曲がりの低減、横巻トロリ線の採用、有張力によるトロリ線の架設などがある。これらはすでに一部の鉄道事業者で採用されており、波状摩耗の抑制に効果があることが報告されている。

4.2 しゅう動面の切削

4.1節より初期凹凸が低減されるが、構造上または施工上不可避な初期凹凸が存在する。これに対しては、剛体電車線の新設時にしゅう動面切削装置を用いて初期凹凸を除去する方法が有効である。すでに、新設時ならびに定期的にしゅう動面切削を実施している鉄道事業者があり、波状摩耗対策として有効であることが確認されている。なお、切削による凹凸抑制効果が二十数カ月を経過しても持続していることが報告されている。ただし、砥石の径よりも長い波長を有する波状摩耗（ $\beta=0.3$ に相当する波長）については、切削することが難しい。長波長の波状摩耗に対しては、次節に述べるパンタグラフの設計が有効であると考えられる。

4.3 剛体電車線用パンタグラフの設計

パンタグラフ側の対策として、すり板間隔を見直して、離線アークに伴う波状摩耗の成長を抑制した例が報告されている。しかし、この方法は新たなすり板配列に起因する波長の波状摩耗が発生する可能性があり、注意を要する。

そこで、波状摩耗形成の第一段階である機械的摩耗による規則的な凹凸の形成を抑制するため、使用条件に合わせてパンタグラフの振動特性を設計する方法が考えられる。これは、波状摩耗の形成されやすい $\beta=0.3, 1.0, \dots$ の直線とパンタグラフの反共振周波数の波数曲線を交差させないように設計する考え方である。ただし、すべての交差を取り除くことは設計上困難であるため、具体的には以下に基づいて設計する（図 5 参照）。

最も低い反共振周波数 f_1 の波数曲線が波状摩耗が発生しづらい低い速度 v_1 で無次元化波数 0.2 程度に、また次に低い反共振周波数 f_2 （通常は舟体の剛体モードと弾性一次モード間の反共振）の波数曲線が最高速度 v_{max} において無次元化波数 1.4 程度に一致するようにパンタグラフの動特性を調整する。この調整に関しては、復元ばねのばね定数の変更や舟体長さの短縮、CFRP などの軽量・高剛性な材料の舟体への適用などを行う。 $\beta=1.7$ 程度以上の交差については、しゅう動面切削装置で平滑化することを前提とする。また、速度 v_1 以下の低速域で発生が予測される場合は、この区間もしゅう動面切削装置により平滑化する。

この設計方針を適用することで、切削が難しい長波長の波状摩耗の発生を抑制するとともに、切削箇所を限定化することができると考えられる。

なお、カテナリ架線区間と両用する場合は、舟体長さや共振周波数も考慮して設計する必要がある。

5. まとめ

剛体電車線における波状摩耗の発生機構を解明するとともに、波状摩耗の抑制策に関する提案を行った。波状摩耗の発生機構は、次の 2 段階の過程で説明できる。

- (1) パンタグラフの振動特性に起因する機械的摩耗による規則的な凹凸の選択的形成
- (2) (1) で形成された凹凸のうち、離線アークに伴う電氣的損耗による選択的凹凸成長

波状摩耗の発生を抑制する対策としては、横巻トロリ線を有張力で架設するなどのしゅう動面の初期凹凸の低減を図るとともに、しゅう動面切削が有効である。また、波状摩耗抑制を考慮したパンタグラフの設計も有効であると考えられる。

文献

- (1) 網干光雄, 中谷浩, 東海林博行, “剛体電車線における波状摩耗の発生機構”, 電気学会学論文誌 D, Vol.126, No.2, pp.109-115, 2006
- (2) 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
- (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”, 日本機械学会論文集 C 編, 78 巻, 789 号, pp.313-327, 2012

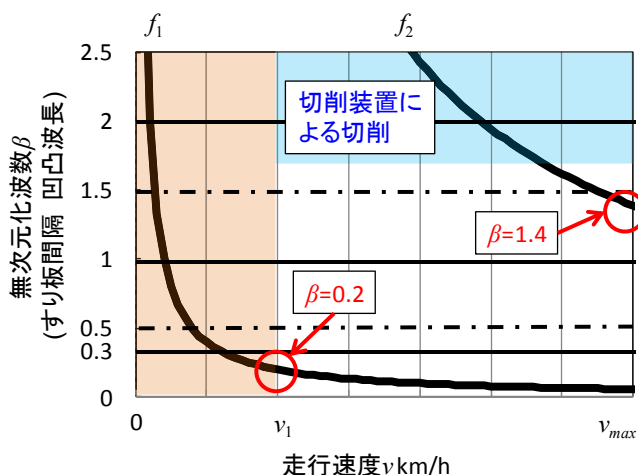


図 パンタグラフの設計提案