

# 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

小山 達弥\* 網干 光雄\*\*

## Mechanism of Formation of Undulating Wear on Overhead Rigid Conductor Line due to Dynamic Characteristics of a Pantograph

Tatsuya KOYAMA Mitsuo ABOSHI

Distinct undulating wear on overhead rigid conductor line causes contact loss of a pantograph, inducing troublesome arcing. The arc causes extreme wear of contact lines and contact strips of the pantograph. However the mechanism of formation of the undulating wear has not been clarified yet. This paper makes the mechanism of the formation of the undulating wear be clear by means of on-site investigations of overhead rigid conductor lines and excitation tests of the pantograph.

キーワード：剛体電車線，パンタグラフ，波状摩耗，集電，しゅう動面凹凸，機械インピーダンス

### 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くて済むことから、主に地下鉄やトンネル区間で使用されている。剛体電車線は一般的に保守が容易とされているが、しゅう動面に波状摩耗が発生する場合も少なくない<sup>1) 2)</sup>。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現象である。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（電車線との機械的な接触を失うこと）に伴うアーク放電により、電車線の急速摩耗やパンタグラフすり板の異常摩耗の原因となることが多いため、波状摩耗の発生機構解明とその対策の実用化が急がれている。

これまでに報告されている剛体電車線の波状摩耗は、その波長がほぼ一定でパンタグラフの舟体間隔の整数分の一と一致している場合が多い。これは、この波長においてパンタグラフの複数の舟体が同時に離線しアーク放電が発生するためであると考えられている<sup>3) 4)</sup>。また、離線に至る前段階である当該波長の初期凹凸の形成要因については、パンタグラフの振動特性に起因する機械的な形成機構によるものであると報告されている<sup>5)</sup>。一方、近年、上記波長と異なる新たな形態の波状摩耗、すなわちパンタグラフ舟体間隔より長い波長の波状摩耗が見られるようになり、これによる電車線の急速摩耗が問題となっている。そこで筆者らは、波状摩耗の発生状況並びにパンタグラフの振動特性を調査し、この新たな形

態の波状摩耗の発生機構を考察するとともに、これまでに報告されている形態を含めて波状摩耗の発生機構を統一的に説明することを試みた。

なお、本号掲載の論文「剛体電車線における波状摩耗とその抑制手法」<sup>6)</sup>に、波状摩耗の発生状況や抑制策に関する総論が記載されているのであわせて参照されたい。

### 2. 剛体電車線のしゅう動面凹凸調査

剛体電車線の波状摩耗の特徴を調査するために、剛体電車線凹凸精密測定装置<sup>5)</sup>を用いて剛体電車線のしゅう動面凹凸を測定した。当該線区の運転曲線に定められた運転速度ごとにしゅう動面凹凸スペクトルを平均化したものを図1に示す。縦軸は凹凸の波数であり、波長の逆数と定義される。横軸は列車速度を表わす。なお、波状摩耗のパワースペクトルは波数の $10^{-3}$ に比例して減少することが多いことから<sup>5)</sup>、卓越している波状摩耗を確認しやすくするために、波数 $n$ のスペクトルに対して $10^{3\log n}$ を乗じる正規化を行っている。当該線区のパンタグラフは、2列の舟体により構成される構造であり、その舟体間隔は0.234mである。またパンタグラフは1編成に2台搭載されており、パンタグラフ間隔は約16mである。図1より、運転速度35～55km/hにおいて、波数8 (1/m) (A部)、4 (1/m) (B部)、ならびに1～2 (1/m) (C部)に比較的顕著な凹凸成分が見られる。これらの凹凸が波状摩耗に相当する。また、A部の波状摩耗は電車線偏位が大きい箇所が発生していることを確認している。

\* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

\*\* 電力技術研究部

特集：電力技術

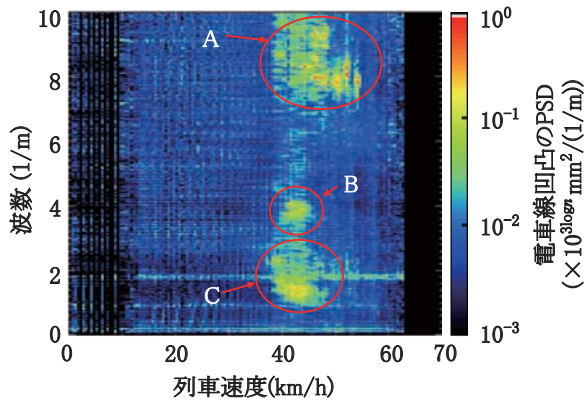


図1 運転速度ごとに平均化した電車線凹凸スペクトル

3. 波状摩耗の発生機構の推定

パンタグラフのモデルを用いて波状摩耗の発生機構を推定する。なお、「波状摩耗の発生」とは、電車線が一樣に摩耗せずに規則的の間隔で摩耗し、それによりパンタグラフが離線してしゅう動面にアーク痕が認められる状態になることと定義する。また、「周期的小凹凸」とは、電車線しゅう動面の規則的な間隔の凹凸のうち、パンタグラフが離線しない程度の振幅を持つ凹凸と定義する。「周期的小凹凸の形成」とは、剛体電車線新設時の初期凹凸の中から、特定波長の周期的小凹凸が選択的に成長することと定義する。

3.1 機械的摩耗による周期的小凹凸の形成と成長

しゅう動面に波長 $\lambda$ 、振幅 $A$ の凹凸をもつ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、

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

で表わされる<sup>5)</sup>。ただし、 $Z_p$ 、 $Z_t$ はそれぞれパンタグラフと電車線の機械インピーダンスである。剛体電車線では、機械インピーダンスを無限大とみなせるため、式(1)は、

$$F = i\omega Z_p A e^{i\omega t} \quad (2)$$

となる。接触力に比例して電車線の摩耗量が増加し、初期凹凸において振幅 $A$ が波長 $\lambda$ に依存していないと仮定すれば、パンタグラフの機械インピーダンスが高い周波数において電車線摩耗が進行することになる。すなわち、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において接触力変動が極大となり、初期凹凸の中からこれらに相当する波長をもつ周期的小凹凸が選択的に形成されるものと考えられる。

次に、周期的小凹凸の形成に与える2列舟体の影響について、図2に示すばね・質点モデルを用いて考察する。上部の質点は舟体を表わし、下部の質点は枠組やホーン

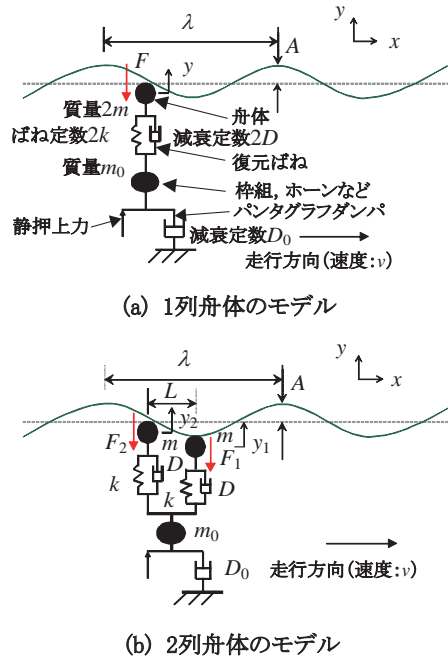


図2 ばね・質点系によるパンタグラフモデル図

などを表わしている。図2 (a) は1列舟体の場合、図2 (b) は2列舟体の場合である。ただし、双方のモデルにおいて、枠組の上部にある質量、ばね定数、減衰係数の和が同じになるようにする。

凹凸変位を式(3)で仮定すると、1列舟体の場合、電車線しゅう動面の接触力変動 $F$ は式(4)で表わされる。

$$y = A e^{i\omega t}, \omega = 2\pi v / \lambda \quad (3)$$

$$F = 2 \left\{ \frac{2(k + i\omega D)^2}{-m_0 \omega^2 + 2k + i\omega(D_0 + 2D)} - (-m\omega^2 + k + i\omega D) \right\} A e^{i\omega t} \quad (4)$$

一方、2列舟体の場合（進行方向前側を舟体1、後方を舟体2とする）、舟体間隔を $L$ とし、各舟体位置における電車線しゅう動面の凹凸変位を式(5)で与えると、各舟体の接触力変動は式(6)、式(7)で表わされる。

$$y_1 = A e^{i\omega t}, \omega = 2\pi v / \lambda \quad (5)$$

$$y_2 = A e^{i\omega t} e^{i\theta}, \theta = 2\pi L / \lambda$$

$$F_1 = \left\{ \frac{(k + i\omega D)^2 (1 + e^{i\theta})}{-m_0 \omega^2 + 2k + i\omega(D_0 + 2D)} - (-m\omega^2 + k + i\omega D) \right\} A e^{i\omega t} \quad (6)$$

$$F_2 = \left\{ \frac{(k + i\omega D)^2 (1 + e^{i\theta})}{-m_0 \omega^2 + 2k + i\omega(D_0 + 2D)} - (-m\omega^2 + k + i\omega D) e^{i\theta} \right\} A e^{i\omega t} \quad (7)$$

式(5)の $\theta$ は舟体2の位置における電車線しゅう動面の変位の位相遅れを表わしている。舟体2が舟体1の位置に到達したときの接触力変動 $F_2^*$ は式(7)に位相遅れを考慮する $e^{i\theta}$ を乗じることで求められ、剛体電車線の舟体1の位置における両舟体の接触力変動の総和は、

$$F_1 + F_2^* = 2 \left\{ \frac{(k + i\omega D)^2 (1 + \cos \theta)}{-m_0 \omega^2 + 2k + i\omega(D_0 + 2D)} - (-m\omega^2 + k + i\omega D) \right\} A e^{i\omega t} \quad (8)$$

で表わされる。これは、パンタグラフの振動特性に起因する機械的摩耗による周期的小凹凸の形成に関して、2列舟体の影響を示すものである。 $m, m_0, k, D, D_0$ をそれぞれ3.8kg, 5kg, 41200N/m, 40Ns/m, 50Ns/mとし、速度50km/hのときの電車線しゅう動面の単位凹凸振幅あたりの接触力変動の絶対値を、1列舟体(式(4))と2列舟体(式(8))で比較したものを図3に示す。ただし、図中の横軸は、波数をすり板間隔の波数で正規化した無次元化波数

$$\beta = \frac{1/\lambda}{1/L} = \frac{L}{\lambda} = \frac{\theta}{2\pi} \quad (9)$$

を表わしている。縦軸は、単位凹凸あたりの接触力変動を示し、以下では単に接触力変動と記す。図中曲線の右肩上がりの特性は、主に式(4)、式(8)の右辺第2項によるもので、枠組質点を固定したときの舟体質点の運動による特性である。一方、 $\beta=0.3$ 付近の極大は反共振によるもので、主に上記式の第1項で表わされる特性である。図3において、2列舟体の場合は反共振付近での極大が軽減されており、その他の波数ではほとんど差異がないことがわかる。これは、舟体間隔に由来する $\theta$ が上記式の第1項のみに存在すること、1列舟体の場合に比べて2列舟体の場合は第1項の大きさが $(1 + \cos \theta) / 2$ 倍であり、 $\theta=2N\pi$  ( $N=1,2,\dots$ ) すなわち $\beta=1.0, 2.0, \dots$ 以外では小さくなることによるものである。したがって、このモデルにおいては1列舟体と2列舟体の周期的小凹凸の形成に関わる相違は、周波数が比較的lowく、 $\beta=1.0, 2.0, \dots$ 以外に現れる、剛体モードの共振点間にある反共振点付近に

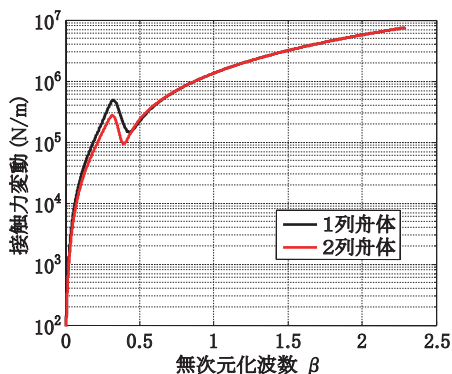


図3 舟体1の位置における両舟体の接触力変動の和

のみ生じることがわかる。

### 3.2 離線アークの電氣的摩耗による波状摩耗の発生

周期的小凹凸が機械的摩耗により選択的に形成され、ある程度まで凹凸振幅が成長した後は、パンタグラフは電車線から離線するため周期的小凹凸はそれ以上成長しない。しかし、離線により電車線とパンタグラフ間にアーク放電が発生し、電氣的摩耗により凹凸が成長すると考えられる<sup>7)</sup>。離線時のアーク放電は、複数の舟体のいずれもが電車線と機械的な接触を失ったときに発生する。このとき、パンタグラフ全体の接触力変動が定常押上力よりも大きくなっていると考えられるため、ここではパンタグラフ全体としての接触力変動を評価し、この値が大きいほど接触力が0になる機会が多く離線しやすい、つまりアーク放電が発生しやすいと考える。

1列舟体の場合は、前節で示したパンタグラフ機械インピーダンスの極大周波数に相当する波長において接触力変動が大きくなるので、機械的摩耗で形成された波長の凹凸が離線アークの電氣的損耗により成長する。一方、2列舟体の場合は、前節で示した式(6)、式(7)から、両舟体の接触力変動の瞬時和は

$$F_1 + F_2 = (1 + e^{i\theta}) \left\{ \frac{2(k + i\omega D)^2}{-m_0 \omega^2 + 2k + i\omega(D_0 + 2D)} - (-m\omega^2 + k + i\omega D) \right\} A e^{i\omega t} \quad (10)$$

で表わされる。これは、パンタグラフの離線アークに伴う電車線しゅう動面の凹部の電氣的損耗による波状摩耗の発生と成長に関して、2列舟体の影響を示すものであり、舟体間隔に由来する $\theta$ を含む項が上記式の全体にかかっている。

図4に、2列舟体(式(10))と1列舟体(式(4))の接触力変動を比較して示す。2列舟体の場合、 $\theta=2N\pi$  ( $N=1,2,\dots$ ) すなわち $\beta=1.0, 2.0, \dots$ のときは1列舟体の場合と同じであるが、 $\theta=(2N-1)\pi$  ( $N=1,2,\dots$ ) すなわち $\beta=0.5, 1.5, \dots$ のときは接触力変動が極小となる。舟体間隔の整数分の一の波長は $\beta=1.0, 2.0, \dots$ の場合であり、したがってこの波長においてはパンタグラフが離線しやすくアークによる電車線の損耗によって凹凸が成長しやすいと説明できる。

一方、 $\beta$ が0.3程度、つまり舟体間隔の約0.3分の一(約3.3倍)以下であれば、1列舟体とほぼ同じ接触力変動が生じるので、離線の程度もほぼ同様と考えられる。この場合、 $\beta=0.5$ において接触力変動の極小域があるため、 $\beta=0.3$ 付近には接触力変動の極大域が表れ、選択的に離線しやすい傾向にあることがわかる。したがってこの付近にパンタグラフ機械インピーダンスの極大がある場合には周期的小凹凸の形成が進みかつ離線しやすいので、

特集：電力技術

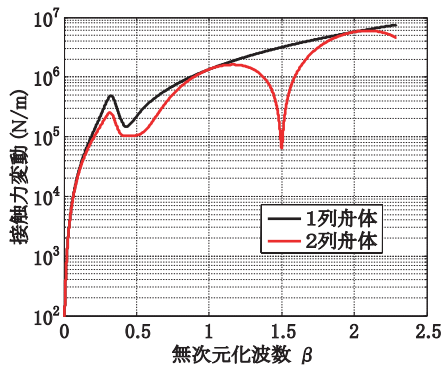


図4 両舟体の接触力変動の瞬時和

比較的顕著に波状摩耗が発生する可能性がある。これが、長波長の波状摩耗が形成される要因と考えられる。

4. 推定した波状摩耗発生機構の検証

前章で示したように、波状摩耗の発生にはパンタグラフの舟体間隔や振動特性が関係していると推定される。そこで、図1に示した電車線凹凸を測定した線区で使用されているパンタグラフの加振試験を実施してその振動特性を調査した。加振方法は、圧電式インパルスハンマによる打撃試験とし、一方の列のすり板上面に加振力を加えた。加振点のレール方向の位置はすり板中央とし、まくらぎ方向の位置は舟体中央および舟体中央から100mm、200mm離れた点の3点とした。以下では、舟体中央から100mm、200mm離れた点をそれぞれ偏位100mm、偏位200mmと記す。すり板上面の加振点近傍には鉛直方向に感度を持つように圧電式加速度計を設置し、各加振点における加振点機械インピーダンスを求めた。

この加振試験結果を元に図5に示すパンタグラフモデルを作成し、推定した波状摩耗の発生機構を検証した。パンタグラフモデルは、舟体部分を弾性はりとし、枠組やホーンなどの部材を集中質量としている。進行方向前側舟体を舟体1、後側舟体を舟体2とし、各舟体のまくらぎ方向座標を $x_1, x_2$  (原点は共に舟体中央)、鉛直方向座標を $y_1, y_2$ とする。舟体1および舟体2が電車線と接触する点を $x_1=x_2=X$ とし、それぞれの舟体の接触力を $F_1, F_2$ とする。加振試験とパンタグラフモデルによる数値計算から得られた舟体中央および偏位200mmにおけるパンタグラフの機械インピーダンスを図6に示す。図6から、両者の傾向がおおむね一致することがわかる。パンタグラフモデルを用いて、実際のパンタグラフの反共振点とその振動モードを求めると、

- (1) 15Hz付近における機械インピーダンスの極大は、舟体が上下動せず、枠組やホーンのみが上下動する反共振点
- (2) 45Hz付近における機械インピーダンスの極大は、並

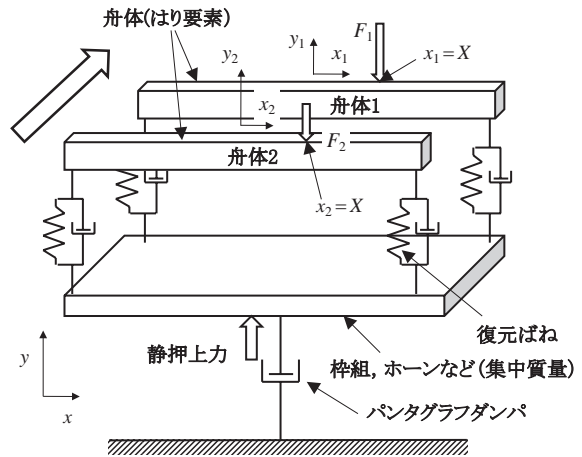
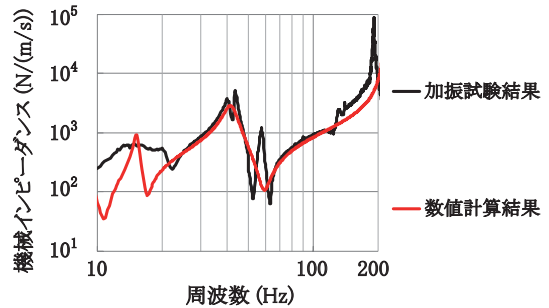
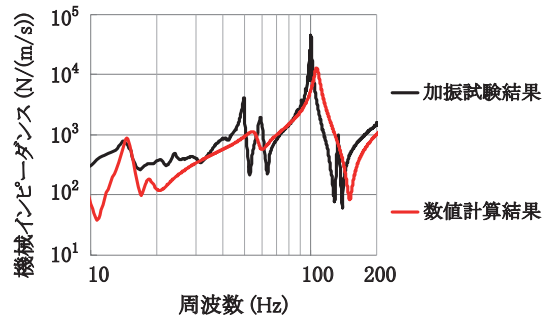


図5 舟体にはり要素を用いたパンタグラフモデル



(a) 舟体中央



(b) 偏位200mm

図6 加振試験と数値計算のパンタグラフの機械インピーダンスの比較

進モードと舟体の弾性1次モードの共振点間にある反共振点

- (3) 105Hz付近における機械インピーダンスの極大は、弾性1次モードと2次モードの共振間にある反共振点であることがわかる。

$x_1=X$ における舟体1の加振点機械インピーダンスを $Z_{11}$ 、舟体1の $x_1=X$ に作用する加振力に対する舟体2の $x_2=X$ における機械インピーダンスを $Z_{12}$ とし、双方の舟体の振動特性が同一であると仮定すると、

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{y}_1|_{x_1=X} \\ \dot{y}_2|_{x_2=X} \end{pmatrix} \quad (11)$$

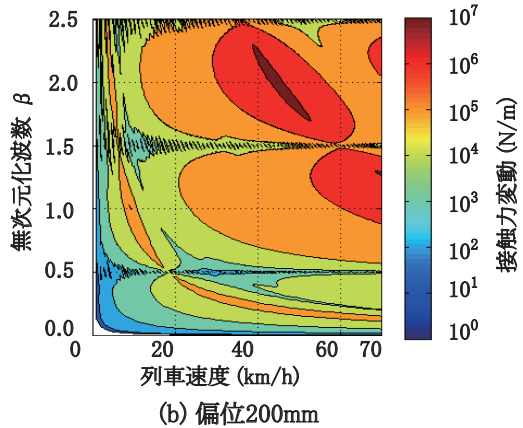
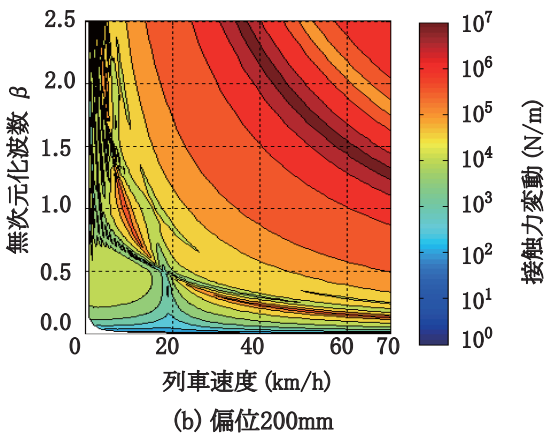
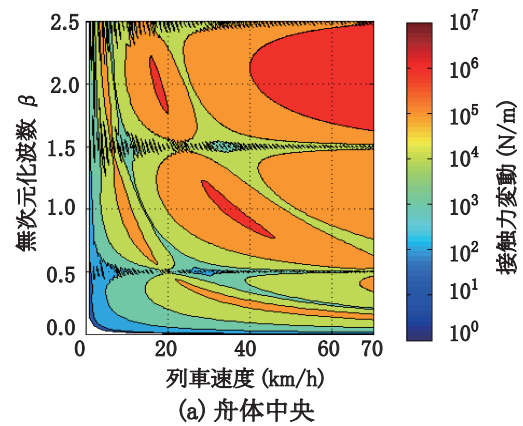
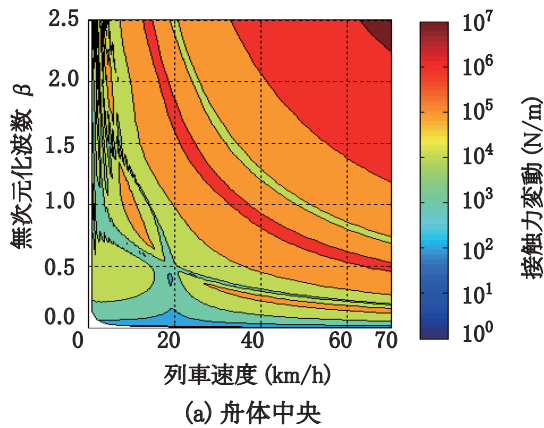


図7 舟体1の位置における両舟体の接触力変動の総和

図8 両舟体の接触力変動の瞬時和

として接触力変動を表わすことができる。

式(8)および式(10)と同様にこのモデルでも舟体1の位置における両舟体の接触力変動の総和と、両舟体の接触力変動の瞬時和をそれぞれ求めた。舟体中央および偏位200mmにおける単位凹凸あたりの舟体1の位置における両舟体の接触力変動の総和を図7に、接触力変動の瞬時和を図8にそれぞれ示す。図7と図8の縦軸は無次元化波数を、横軸は列車速度としている。図7(a)(b)の接触力変動が大きい箇所(赤褐色部)は、パンタグラフの反共振周波数に一致している。図8においては、 $\beta=0.3, 1.0, 2.0$ 付近で接触力変動の極大が、 $\beta=0.5, 1.5, 2.5$ で接触力変動の極小がそれぞれ見られる。これらは図4に示した特性と一致しており、弾性振動を伴う実際のパンタグラフでも、舟体間隔による選択的な波状摩耗の成長が起こることを示している。瞬時和の計算を偏位100mmでも行い、舟体中央、偏位100mm、偏位200mmの計算値の和を示したものを図9(a)に示す。図9(a)のA部には2箇所の赤褐色領域があるが、これは偏位を離散的に計算しているために現れたものであり、実際は連続的に分布しているものと思われる。なお、A部の赤褐色部は右側が偏位100mm、左側が偏位200mmによる接触力変動の極大値である。また、図9(b)には図1の電車線凹凸スペクトルを再掲する。ただし、図9では、右

側縦軸に無次元化波数 $\beta$ をとり、 $\beta=0.3, 1.0, 2.0$ 、つまりパンタグラフの舟体間隔の整数分の一および約0.3分の一(約3.3倍)に等しい波長の直線と、パンタグラフの反共振周波数を追記している。図9(a)と図9(b)を比較すると、接触力変動スペクトルが大きい箇所A~C部と、凹凸スペクトルが大きい箇所A~C部には一致がみられる。また、図9から偏位が大きくなるに従って速度40~60km/hかつ無次元化波数2の接触力変動が大きくなっており、この結果は第3章に記載したA部の波状摩耗は偏位が大きい箇所で発生していることと一致している。さらに、図7に示す周期的小凹凸の形成に関わる接触力変動の総和についても図9のA~C部で大きくなっている。よって、前章に記載した波状摩耗の発生機構は妥当であると考えられる。

ところで、図9に示すように、波数1~2(1/m)の長波長の波状摩耗がパンタグラフ機械インピーダンスの極大線上で発生しているものの、運転速度40km/h前後の箇所が顕著であることについては、次のように考えている。第一に、低速域においては複数のパンタグラフで通過速度が異なることから、特定波長の周期的小凹凸が形成されにくいことが挙げられる。第二に、この長波長の波状摩耗が見られる区間は、波数8(1/m)付近または波数4(1/m)付近の波状摩耗が発生しているか、もしくはこれらが

特集：電力技術

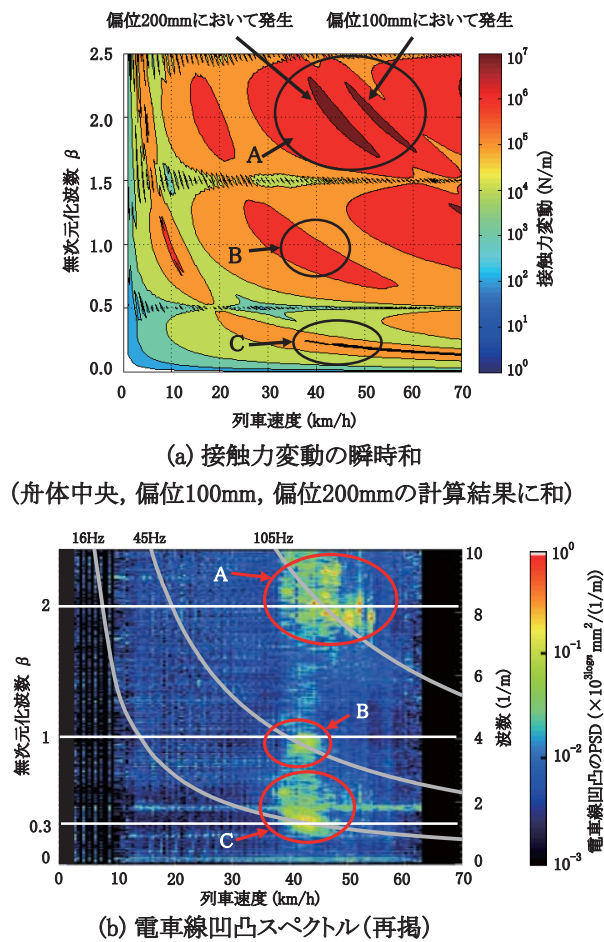


図9 電車線凹凸スペクトルと接触力変動の比較

かつて顕著に発生していた箇所に限られることを確認している。このことから、波数8 (1/m) 付近または波数4 (1/m) 付近の波状摩耗によるパンタグラフの離線に伴い、機械的摩耗の増加や非周期的なカオティックな運動<sup>8)</sup>により長波長凹凸が形成されやすくなっていると考えられる。

以上のことから、波状摩耗の発生機構を統一的に整理すると、次の2段階の過程で波状摩耗の発生および成長を説明できる。

- (1) パンタグラフの振動特性に起因する機械的摩耗により周期的小凹凸が形成され、パンタグラフが離線する凹凸振幅まで成長する。
- (2) (1) で形成された周期的小凹凸の内、離線アークによる電氣的損耗によりさらに選択的に波状摩耗が発生し成長する。

また、形成される波状摩耗の波長については、(1)については、パンタグラフ機械インピーダンスの極大周波数に相当し、パンタグラフの剛体モードや弾性振動モードの各共振点間にある反共振によるものである。また

(2)については、接触力変動が極大となる波長に相当し、反共振周波数であり、かつ舟体間隔の整数分の一の場合と、舟体間隔の約0.3分の一(約3.3倍)の場合がある。

5. まとめ

近年顕在化しつつある長波長の波状摩耗について、剛体電車線のしゅう動面凹凸の精密測定とパンタグラフの振動特性確認試験を実施し、これに基づいて剛体電車線における波状摩耗の発生機構について検討を行った。波長が舟体間隔の整数分の1の波状摩耗と舟体間隔より長い波状摩耗の発生機構を統一的に整理すると、波状摩耗の発生は、「パンタグラフの振動特性に起因する機械的摩耗により周期的小凹凸が選択的に形成され、パンタグラフが離線する凹凸振幅まで成長すると、離線アークによる凹部の電氣的損耗によりさらに選択的に摩耗が成長し波状摩耗が形成される」と考えられる。

謝辞

現地試験に際してご協力いただいた鉄道事業者ならびに保全会社の関係者各位に深く謝意を表する。

文献

- 1) 剛体集電系の速度向上技術調査専門委員会編, “電気鉄道の剛体集電系に関する調査報告”, 電気学会技術報告第466号, 1993
- 2) 篠原廣 視, 伊藤和廣, “小断面地下鉄における電車線路”, 鉄道と電気技術, Vol. 6, No.9, pp.43-50, 1995
- 3) 網干光雄, 長沢広樹, “トロリ線波状摩耗対策の開発(在来線)”, 鉄道総研報告, Vol. 6, No.9, pp.37-44, 1992
- 4) 網干光雄, 高樋健一, 澤田一郎, “剛体電車線における波状摩耗とその発生防止策の開発”, 電気学会研究会資料, TER-95-7, 1995
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 白田隆之, 池田充, 山下義隆, 源導士, “営業線におけるパンタグラフ接触力の地上モニタリング”, 鉄道総研報告, Vol.24, No.2, pp.29-34, 2010
- 8) 河村 賢, 北上耕太郎, 堀田真吾, 吉沢正紹, “剛体架線・パンタグラフ系における衝突振動の基礎的検討”, 日本機械学会論文集C編, Vol.73, No.728, pp.18-25, 2007