

剛体電車線における波状摩耗とその抑制手法

網干 光雄* 小山 達弥**

早坂 高雅*** 松村 周#

Undulating Wear of Rigid Conductor Lines and Its Restraint Methods

Mitsuo ABOSHI Tatsuya KOYAMA

Takamasa HAYASAKA Itaru MATSUMURA

Rigid conductor lines are used in many subways, because there happen few accidents and the space required for installation is small. However, when an undulating wear occurs on sliding surface, arcs due to contact loss cause extreme wear of contact lines and contact strips of pantographs. In order to investigate the mechanism of the generation of undulating wear of rigid conductor lines, we carried out precise measurements of the sliding surface unevenness, exciting tests of pantographs, theoretical analyses with dynamic model and questionnaire survey to domestic railway companies. This paper describes the mechanism of the formation of the undulating wear in relation with the mechanical impedance of pantograph, and proposes restraint methods for undulating wear, such as installation of a side-winded contact wire, grinding of the sliding surface and pantograph design based on restraint guidelines.

キーワード：集電，剛体電車線，波状摩耗，しゅう動面凹凸，パンタグラフ

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安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ではなく規則的な間隔で波状に摩耗する形態のことを言う。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く、発生機構の解明とその対策の実用化が急がれている。

カテナリちょう架式電車線における波状摩耗については、これまで、新幹線高速走行区間で発生する形態¹⁾や直流在来線で発生する形態²⁾があり、それぞれの発生機構が解明され、対策が実施されてきた。一方、剛体ちょう架式電車線における波状摩耗については、波長や発生場所などさまざまな形態があると思われるが、凹凸振幅が小さいために本格的な調査が行われた例はわずかで、また海外を含めても公表文献が極めて少ないため、波状摩耗の発生状況や発生要因等を把握することが難しい状

況である。また、カテナリちょう架式電車線に比べてパンタグラフの振動特性が大きく影響していることが予想されるものの、車両を含めた総合的な調査事例が極めて少ないことが、剛体ちょう架式電車線の波状摩耗発生機構の解明を困難にしている一因と考えられる。

そこで、鉄道技術推進センターでは、平成22～23年度の2年間にわたり、「剛体電車線の波状摩耗抑制に関する調査研究」を実施してきた。本調査研究では、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。本論文では、波状摩耗の発生状況や特徴について述べるとともに、発生抑制策について提案を行う。なお、パンタグラフの加振試験を含む波状摩耗の発生機構に関する検討内容については、本号掲載の次論文³⁾で詳述する。この内容については、本論文では概要のみ述べるので、あわせてご参照願いたい。

2. 波状摩耗の発生状況

2.1 調査方法

剛体電車線の波状摩耗の発生状況等を把握するため、全国の鉄軌道事業者に対してアンケート調査を実施して全体的な実情を把握するとともに、公表された技術文献を調査し、注目される内容については鉄軌道事業者に対する聞き取り調査等により資料等の収集を行った。さら

* 電力技術研究部

** 鉄道力学研究部 集電力学研究室

*** 電力技術研究部 電車線構造研究室

電力技術研究部 集電管理研究室

特集：電力技術

に、数路線において、剛体電車線用凹凸測定器^{4) 5)}を用いて、しゅう動面凹凸の精密測定を実施した。

アンケート調査は、剛体電車線を有する全国の鉄軌道事業者（ただし鉄道技術推進センター会員に限る）に対して依頼し、合計41社から計87路線の回答を得た（回答率100%）。なお、ここでは、地下鉄等で一般的に用いられている架空剛体ちよう架式電車線のほか、第三軌条式（サードレール）や、モノレール、新交通システムで用いられている剛体複線式を含めた。

2.2 波状摩耗の発生状況と特徴

図1に、波状摩耗の発生状況の一例を示す。剛体電車線のしゅう動面にはアーク痕のある箇所と金属光沢のある部分が数cm～数十cmの規則的の間隔で見られるのが特徴である。表1に、アンケート調査による波状摩耗発生の有無を示すが、波状摩耗は約7割の路線で発生していることがわかる。特に、剛体ちよう架式電車線と剛体複線式に限れば、約8割もの路線で発生している。剛体ちよう架式電車線には、アルミ架台式、銅架台式、導電鋼レール式があるが、いずれにおいても発生している。

波状摩耗は力行区間で発生している例が多く、公表文献^{6) 7) 8)}で報告されている波状摩耗は、いずれも力行区間で発生している。表2に、アンケート調査による波状摩耗の発生箇所を示す。波状摩耗の発生箇所は、発生している路線のうち、駅出発区間や駅中間の力行区間が約7割の路線で、制動区間でも約4割の路線で発生している。

図2に、波状摩耗発生箇所のしゅう動面凹凸測定結果の一例を示す。図中には、支持点、架台継目の他、波長1m以下、0.25m以下の凹凸を拡大して示す。この場合、波状摩耗の凹凸振幅は、波長約0.8mで2mm (p-p)程度、波長約0.1mで0.4mm (p-p)程度の箇所がある。アンケート調査によると、凹凸振幅が1mm以上の顕著な波状摩耗は、発生している路線のうち、架空剛体ちよう架式を中心に約1割もの路線で発生している。また、波状摩耗が発生することにより、発生している路線のうち約7割の路線で電車線の異常摩耗・局部摩耗等の問題が発生しており、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

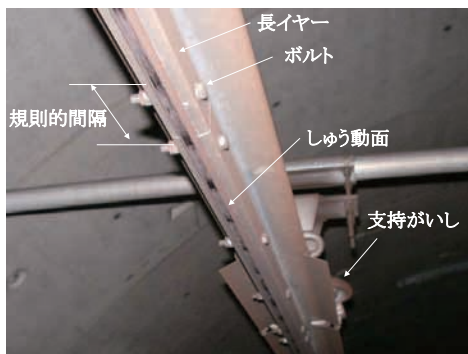


図1 剛体電車線の波状摩耗

している。トロリ線摩耗率が約0.2mm/万パンタもの高い値を示す路線があり、対策案の実用化が急がれている。

図3に、しゅう動面凹凸の空間スペクトル分布の一例を示す。縦軸は凹凸の波数(1mあたりの波の数)である。赤色ほどスペクトル強度が大きく、青色ほど小さいことを表す。この場合、駅出発の力行区間を中心に、波数8, 4, 1.5 (1/m) 付近の波状摩耗が発生している。なお、波数1, 2 (1/m) の凹凸が一部に見られるが、これは製造

表1 波状摩耗発生の有無（アンケート結果）

回答 (単位：路線数)	架空剛体 ちよう架式	第三軌条 式	剛体複線 式	合計	割合 (%)
ある	40	5	17	62	71.3
ない	11	8	4	23	26.4
わからない		1	1	2	2.3
計	51	14	22	87	100.0
「ある」の割合 (%)	78.4	35.7	77.3	71.3	

表2 波状摩耗の発生箇所（アンケート結果）

回答 (複数回答) (単位：路線数)	架空剛体 ちよう架式	第三軌条 式	剛体複線 式	合計	割合 (%)
駅出発区間	29	3	9	41	66.1
駅中間の力行区間	34	2	8	44	71.0
駅中間の惰行区間	9	1	2	12	19.4
制動区間	20	2	3	25	40.3
わからない	1	2	3	6	9.7
波状摩耗ありの路線数	40	5	17	62	100.0

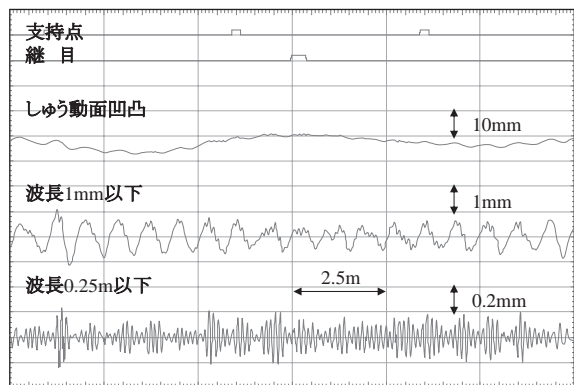


図2 波状摩耗箇所のしゅう動面凹凸の測定例

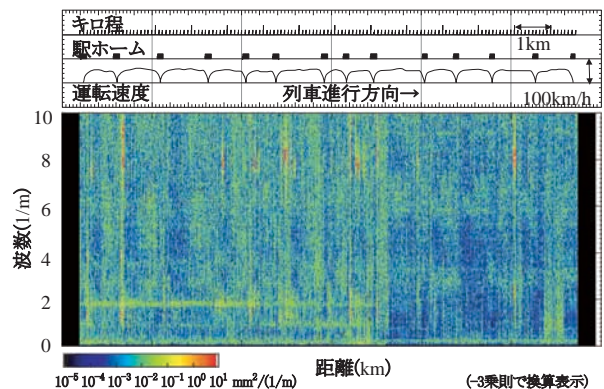


図3 しゅう動面凹凸の空間スペクトル分布例

時に形成されたものである。アンケート調査においても、波状摩耗の波長は数cmから数十cmと様々であり、複数の波長が混在している路線も多い。

3. しゅう動面凹凸による接触力変動解析

3.1 解析モデルによる接触力変動解析

図4に、しゅう動面凹凸による接触力変動解析モデルを示す。波長 λ 、振幅 B の凹凸のある剛体電車線をパンタグラフが速度 v で走行した際の接触力変動 F は、しゅう動面凹凸を $y=B\exp(i\omega t)$ とおけば、式(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り、 i は虚数単位である。

$$F = -i\omega Z_p B \exp(i\omega t), \quad \omega = \frac{2\pi v}{\lambda} \quad (1)$$

パンタグラフの機械インピーダンス Z_p は、加振点における作用力の上下振動速度に対する比として定義される。機械インピーダンスが大きいほど動き難い、つまり追従性能が劣ることを表す。剛体電車線の場合の接触力変動は、パンタグラフの機械インピーダンスに直接比例することになる。電車線の摩耗が接触力に比例すると仮定すれば、波状摩耗の形成・成長にパンタグラフの振動特性が強く影響を与えることが予想される。簡単のため、パンタグラフを1質点モデルと仮定しその質量を m_p とすれば、 $Z_p = i\omega m_p$ であるから、式(1)は、

$$F = \omega^2 m_p B \exp(i\omega t) \quad (2)$$

となり、接触力変動と凹凸変位は同位相となる。つまり剛体電車線の新設時の微小な凹凸は、パンタグラフの通過によってその振幅が大きくなるという成長機構を基本的に有していることがわかる。特定の周波数でパンタグラフの機械インピーダンスが大きい周波数(反共振周波数)があれば、その周波数に相当する凹凸の振幅が選択的に増大すると考えられる。

3.2 パンタグラフの振動特性

一般的に、パンタグラフの運動解析ではばね・質点モデルが用いられるが、より高周波の特性を対象とする場合には舟体の弾性振動を考慮する必要がある。

図5に示すように、パンタグラフの舟体を、 $x=X_a$ 、 X_b でばね・ダンパで単純支持されたような梁モデルと仮定し、 $x=X$ の任意の点で力 F が作用する場合を考える。このとき、梁のたわみ曲線は次式で表される。ただし ρ は線密度、 EI は曲げ剛性、 $\delta(x)$ はディラックのデルタ関数である。

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = F_a \cdot \delta(X_a) + F_b \cdot \delta(X_b) + F \cdot \delta(X) \quad (3)$$

解の形を $y=A\exp(kx)\exp(i\omega t)$ と仮定し、上式右辺を0と

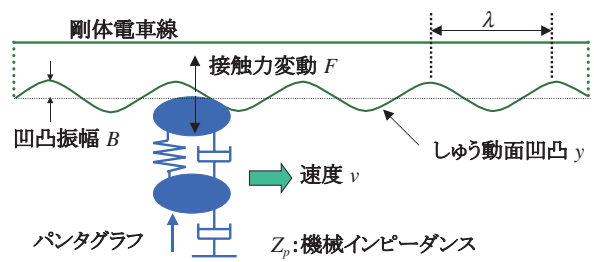


図4 解析モデル

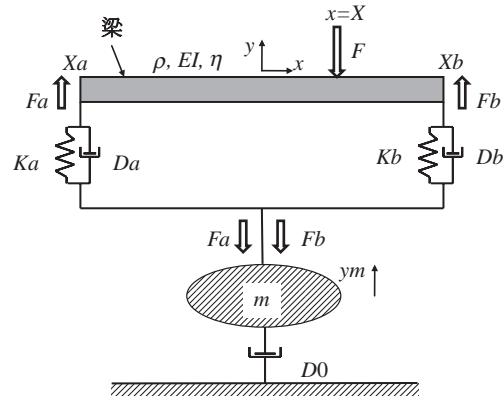


図5 パンタグラフの振動解析モデル

置いた同次方程式に代入すると、

$$EI k^4 - \rho \omega^2 = 0 \quad (4)$$

の特性方程式が得られる。ただし、 ω は角振動数、 k は波数である。波数を式(5)とすれば、梁の各区間におけるたわみの一般式は式(6)で表される。

$$k_1 = \alpha, \quad k_2 = -\alpha, \quad k_3 = i\alpha, \quad k_4 = -i\alpha, \quad \alpha = \sqrt[4]{\frac{\rho}{EI}} \sqrt{\omega} \quad (5)$$

$$y_a = \left(\sum_{j=1}^4 A_{aj} \exp(k_j x) \right) \exp(i\omega t) \quad (X_a \leq x \leq X)$$

$$y_b = \left(\sum_{j=1}^4 A_{bj} \exp(k_j x) \right) \exp(i\omega t) \quad (X \leq x \leq X_b) \quad (6)$$

境界条件、つまり $x=X$ での変位、傾斜、モーメントの連続およびせん断力のつりあい、 $x=X_a$ 、 X_b でのモーメント0、せん断力のつりあいおよびばね力のつりあい、さらに枠組み(質点 m)の運動方程式を用いることにより、上記の係数 A_{aj} 、 A_{bj} ($j=1 \sim 4$)を求めることができる。

図6に、 $X_A = -0.5\text{m}$ 、 $X_B = 0.5\text{m}$ 、 $\rho = 8\text{kg/m}$ 、 $\eta = 0.01$ 、 $EI = 2 \times 10^3 \text{Nm}^2$ 、 $K_A = K_B = 2.5 \times 10^4 \text{N/m}$ 、 $D_A = D_B = 10 \text{Ns/m}$ 、 $M = 6.8\text{kg}$ 、 $D_0 = 0 \text{Ns/m}$ とした場合の加振点応答(アクセラランス)を示す。ただし、 η は梁の損失係数で、 $E - E(1+i\eta)$ として縦弾性率を複素数で表現する。

この場合、17Hzは並進の共振周波数、22Hzはローリングの共振周波数に相当する。また約60、160、300Hzのピークは、それぞれ梁の1次、2次、3次モードの曲げ振動の共振周波数に相当する。これらの共振周波数の間

特集：電力技術

に、加振点応答が極小の反共振周波数が存在する。なお、機械インピーダンス Z_p とアクセラランス A_c との関係は、

$$Z_p = i\omega / A_c \quad (7)$$

であり、アクセラランスが極小となる反共振周波数において機械インピーダンスが極大を示す。

3.3 波状摩耗とパンタグラフの反共振周波数

図7に、図3で示したしゅう動面凹凸のスペクトル分布の運転速度特性に、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 (16, 45, 105Hz) を重ね書きしたものを示す。運転速度は当該路線の運転曲線を用いた。また反共振周波数は、実機パンタグラフを用いて加振試験を行った実測値である。この図には、波状摩耗成長可能波長 (全てのすり板が離線する幾何学的配置)²⁾ であるすり板間隔の整数分の1の波数も書き入れている。

この図から、波状摩耗は、すり板間隔の整数分の1の横線とパンタグラフの反共振周波数の曲線が交差する付近の波数と運転速度で発生していることがわかる。また1.5 (1/m) 付近の波状摩耗は、すり板間隔より長い波長であるが、反共振周波数の曲線上に分布していることがわかる。

加振試験結果を含む詳細な検討結果については、本号掲載の次論文³⁾ で詳述する。

4. 波状摩耗の発生機構

これまでの調査結果から、剛体電車線の波状摩耗は力行区間で発生し、しゅう動面には多数のアーク痕を伴うこと、またその波長がほぼ一定でパンタグラフすり板間隔の整数分の1となっている場合が多いことがわかる。これは、波状摩耗の凹凸波長が波状摩耗成長可能波長と一致しており、離線時のアーク放電によって波状摩耗の凹部が繰り返し損耗するため、凹凸振幅が成長すると考えられる。

離線に至る前段階である当該波長の周期的小凹凸の形成については、パンタグラフの振動特性に起因する機械的な形成機構と考えられる。すり板間隔以上の長波長の波状摩耗が近年顕在化しているが、これも含めて、波状摩耗の波長および運転速度の関係が、パンタグラフの反共振周波数に相当することからも裏付けられる。

これらのことをまとめると、剛体電車線における波状摩耗の発生機構として、次の2段階が考えられる。

- 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周期的小凹凸の選択的形成
- ② パンタグラフの離線アークに伴う凹部の電氣的損耗による選択的凹凸成長

ただし、広い速度範囲で発生する波状摩耗の形態も見られることから、初期段階から何らかの理由で離線ア

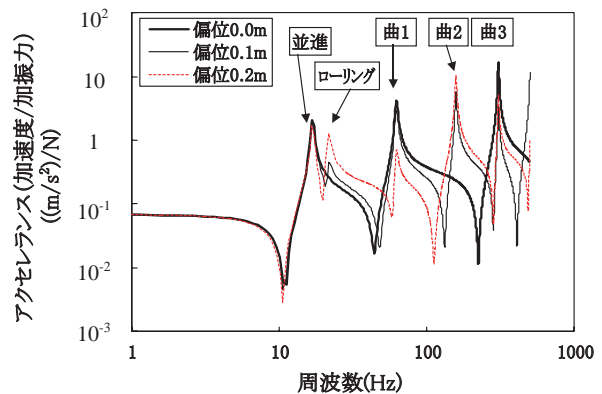


図6 パンタグラフの加振点応答の計算例

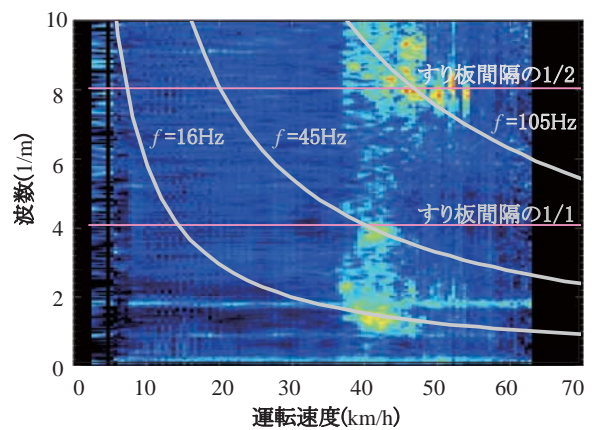


図7 波状摩耗とパンタグラフ反共振周波数との関係

ク発生環境下にある場合には、①の過程を経ないで②に過程に至る場合もあると考えられる。

波状摩耗の波長については、すり板間隔 (2列すり板の場合)の波数を基準にした無次元化波数 β で表わすと、 $\beta=1, 2, 3...$ のすり板間隔の整数分の1の波長と、 $\beta=0.3$ 付近のすり板間隔より長い波長がある。

これらの各過程と詳細な検討結果については、本号掲載の次論文³⁾ で詳述する。

5. 波状摩耗抑制策の提案

以上述べた発生機構に基づき、これまで鉄軌道事業者や工事・保全会社等で実施してきた対策を参考にしつつ、波状摩耗抑制策を整理して提案する。

5.1 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、初期凹凸をできるだけ小さく架設することは、波状摩耗の発生を遅らせるなどの抑制効果がある。支持点間のしゅう動面凹凸を精密に測定した結果によると、剛体電車線のしゅう動面凹凸には、支持点間のたわみ凹凸のほか、架台や導電鋼レール

の大曲り、接続箇所凹凸、長イヤーの取付ボルト間隔の凹凸、整流器使用により形成された凹凸等が確認されている⁹⁾。また、剛体電車線のしゅう動面凹凸による接触力変動は、凹凸の波長が短いほど大きな影響があることも示されている。

このため、支持点間のたわみ凹凸の低減対策や、架台または導電鋼レールの大曲りの低減対策、接続箇所凹凸の低減対策等が実施されている事例がある⁹⁾。これらの対策が広く採用されるとともに、今後も引き続き改善されることが望まれる。

5.2 横巻トロリ線の採用

長イヤー取付ボルト間隔の凹凸ならびに整流器使用による凹凸低減対策として、横巻トロリ線を有張力で架設する方法が有効である。この方法は、すでに一部の鉄道事業者で実施されており、初期凹凸の低減に有効であること、また波状摩耗の抑制に効果的であることが報告されている¹⁰⁾。

5.3 しゅう動面の切削

初期凹凸は、製造過程や施工段階で軽減可能な部分もあるが、構造上または施工上不可避な要素もある。そこで、剛体電車線に新設時にしゅう動面切削装置¹¹⁾を用いて初期凹凸を除去する方法が有効と考えられる。しゅう動面切削装置は、直径約20cmの円形砥石を高速で回転させて、電車線しゅう動面を切削して凹凸を除去するものである。

剛体電車線新設時ならびに営業後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。また別の鉄道事業者では、切削による凹凸抑制は二十数ヶ月を経過しても効果があることが確認されている¹⁰⁾。この方法は言わば直接的な抑制策であるが、現時点では最も有効な対策の一つと考えられる。

5.4 パンタグラフ側の対策

パンタグラフのすり板配列を変更することによって、波状摩耗を消滅させた事例が報告されている⁶⁾。これは、全てのすり板が電車線から離線する幾何学的配置を見直して、離線アークに伴う凹部の電氣的摩耗による凹凸成長を抑止するものである。単一形式のパンタグラフを使用するとそれに相当する波長の波状摩耗が形成される可能性もあるので、複数形式のすり板配列を混用することによって、特定波長の波状摩耗を形成させない方法が望ましい。

固形潤滑剤を白ワックス系から純カーボン製に変更することにより、波状摩耗の抑制に効果を上げている事例がある。純カーボン製の固形潤滑剤は、全てのすり板が

離線するのを防ぎ、離線アークに伴う凹部の電氣的摩耗による凹凸成長を抑制するものである。この方法は固形潤滑剤を変更するだけなので、経費が少ないという利点がある。なお同路線での実績から、固形潤滑剤の1列外しは、剛体電車線の波状摩耗抑制については効果が小さいものと考えられる。

いずれについても、これらのパンタグラフ側の対策は、新たな波長の波状摩耗の発生を根絶することを保証するものではないということに留意する必要がある。

5.5 波状摩耗抑制を考慮したパンタグラフの設計指針

機械的摩耗による周期的小凹凸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。基本的な考え方は、以下のとおりである。

- (1) パンタグラフの舟体（またはすり板列）は2列とし、復元ばねを直動シリンダタイプのもので、前後力の影響が小さくなるよう独立舟体とする。1列すり板は、長い区間にわたって波状摩耗が発生する可能性があり、また波状摩耗に関しては、3列以上にすると有効性が特に見当たらない。また、一体舟体の場合は、ピッチングによる反共振が生じる恐れがあるためである。
- (2) すり板幅は50mm程度とする。短波長の波状摩耗を抑制するため幅広望ましいが質量が増加するため、使用実績のある実用的な幅とする。
- (3) 反共振周波数を、以下のように設定する。図8に、説明図を示す。パンタグラフの反共振周波数のうち最も低い反共振周波数（通常は並進の反共振）に相当する波数を、速度 v_1 程度で無次元化波数0.2程度に設定する（A部）。反共振周波数に相当する波数曲線を、無次元化波数0.3と交差させないようにするためである。
- (4) パンタグラフの反共振周波数のうち2番目に低い反共振周波数（通常は並進の共振と弾性1次曲げの共振間の反共振）に相当する波数を、当該線区の営業最高速度 v_{max} で無次元化波数1.4程度に設定する（B部）。反共振周波数に相当する波数を、無次元化波数1.0と交差させないようにし、さらに、波状摩耗の発生し難い波数1.5付近をできるだけ利用するためである。舟体弾性振動の反共振周波数を上げるための対策として、舟体長さの短縮、高剛性で軽量な材料（CFRPなど）の適用が有効と考えられる。
- (5) 無次元化波数1.7程度以上については、電車線のしゅう動面切削装置で平滑化する（C部）。速度 v_1 程度以下で波状摩耗の発生が予測される場合は、この区間も含める（D部）。

特集：電力技術

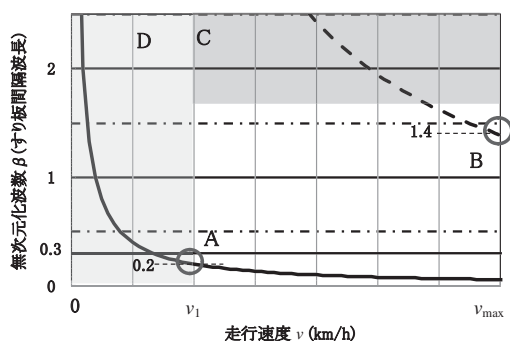


図8 波状摩耗抑制を考慮したパンタグラフの設計指針

6. まとめ

本調査研究では、剛体電車線における波状摩耗について、全国の鉄軌道事業者に対するアンケート調査や文献調査、個別調査等を実施して発生状況の実態の把握を行った。さらにしゅう動面凹凸の精密な測定やパンタグラフの加振試験等を実施し、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提案を行った。主な成果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 波状摩耗は主に力行区間で発生しており、しゅう動面にはアーク痕が見られる。波状摩耗の波長は、すり板間隔の整数分の1（全てのすり板が離線する幾何学的配置）とすり板間隔より長い2種類がある。
- (2) 剛体電車線における接触力変動はパンタグラフの機械インピーダンスに比例し、波状摩耗の形成・成長にパンタグラフの振動特性が大きな影響を与える。
- (3) 波状摩耗は、パンタグラフの機械インピーダンスの極大周波数（反共振周波数）に相当する波数と速度域で発生している。
- (4) 波状摩耗の発生機構として、「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選択的に形成され、②離線アークによる凹部の損耗により選択的に凹凸が成長する。」で説明できる。
- (5) 波状摩耗抑制策として、横巻トロリ線を有張力で架設するなどの初期凹凸の低減を図るとともに、しゅう動面の切削が有効である。また、波状摩耗抑制を考慮したパンタグラフの設計も可能である。

今後の課題として、導電鋼レール用のしゅう動面切削装置の開発、波状摩耗抑制を考慮したパンタグラフの開発とその効果の検証が挙げられる。また、電車線とパンタグラフすり板の摩耗に関して、アーク放電や通電電流、接触力等の影響を含めた機構について、引き続き研究を行う必要がある。

7. おわりに

波状摩耗の発生機構がカタナリちよう架式電車線の場合

合に比べて、パンタグラフの振動特性を含むなど複雑であり、また電車線架設精度のより精密な管理を必要とするなどにより、その取り組みに長年を要することになったものと考えられる。本調査研究では、いくつかの課題は残されたものの、所期の成果を得ることができたと考えている。本報告書が、鉄軌道事業者ならびにメーカ、工事・保全会社等の今後の業務に役立てていただくとともに、本調査研究で提案した波状摩耗の抑制策が適用され、名実ともに安全性に優れた電車線になることを期待している。

最後に、アンケート調査にご協力いただきました全国の鉄軌道事業者、ならびにしゅう動面凹凸測定およびパンタグラフの加振試験にご尽力いただきました鉄軌道事業者、工事・保全会社の関係者の方々に厚くお礼を申し上げます。また、有益なご指導、ご助言を賜りました「剛体電車線の波状摩耗抑制に関する検討会」の委員各位に、深く感謝の意を表します。

文献

- 1) 真鍋克士：トロ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：トロリ線波状摩耗対策の開発，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，大浦 泰：剛体電車線用凹凸測定器の開発，電気学会交通電気鉄道研究会資料 TER-08-10，pp.19-24，2008
- 5) 東海林博行，相原政美：レーザ変位計方式による剛体電車線凹凸測定器の開発と実用化，鉄道電気テクニカルフォーラム，No.21，pp.81-84，2007
- 6) 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，電気学会交通・電気鉄道研究会資料 TER-95-7，pp.57-66，1995
- 7) 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
- 8) 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，電気学会論文誌D編，Vol.126，No.2，pp.109-115，2006
- 9) 網干光雄，清水政利，沖本文男：剛体電車線のしゅう動面凹凸低減による波状摩耗対策，鉄道総研報告，Vol.25，No.4，pp.29-34，2011
- 10) 清水政利，久保喜昭：剛体電車線のしゅう動面凹凸低減による波状摩耗対策，平成23年電気学会全国大会，No.5-057，p.93，2011
- 11) 清水政利，原田 智，藤井保和：剛体電車線用しゅう動面切削装置の開発，平成12年電気学会全国大会，No.5-273，pp.2322-2323，2000