

# 3414 パンタグラフ振動特性が接触力変動に与える影響

○網干 光雄 (鉄道総合技術研究所)

Influence of Pantograph Characteristics on Contact Force Fluctuation  
Aboshi Mitsuo (Railway Technical Research Institute)

A relationship between contact force fluctuation and pantograph characteristics is complicated in catenary suspension lines, because it depends on not only the pantograph characteristics but also the wave propagation characteristics of contact lines. This paper describes the influence of pantograph vibration characteristics on the contact force fluctuation between pantograph and contact line. In this study, factors of contact force fluctuation are theoretically analyzed and verified by computer simulation method. It is confirmed that the contact force fluctuation is proportional to series mechanical impedance of pantograph and contact line. In order to reduce the contact force fluctuation, it is effective to decrease the series mechanical impedance at the frequency corresponding to hanger span cycle or dropper span cycle.

キーワード：電気鉄道，集電，架線，パンタグラフ，接触力

Keyword: Electric railway, Current collection, Overhead contact line, Pantograph, Contact force

## 1. はじめに

パンタグラフの運動モデルは、比較的低周波においては一般的に数個の質点とばね、減衰要素で表現される。パンタグラフの追随特性はこれらの諸元を用いて算出することが可能で、パンタグラフの接触性能を表す指標として用いられている。高追随性能を有するパンタグラフの開発にあたっては、質点の質量を小さくすることや多質点モデルの共振域を主要な凹凸波長（ハンガ間隔）相当の周波数に合わせるなどの要点は既に周知のことである。しかしながら集電系全体の接触性能を表す指標、すなわちパンタグラフが走行した際の架線・パンタグラフ間の接触力変動については、カテナリちよう架式架線の場合には単にパンタグラフの追随特性のみならず架線の波動伝播特性等にも依存するため複雑である。このため、パンタグラフの追随性能と架線・パンタグラフ間の接触力変動との定量的関係については、必ずしも十分明確にはなっていない。

本論文では、カテナリちよう架式架線下を走行する場合において、パンタグラフの振動特性（追随性能）が架線・パンタグラフ間の接触力変動に与える影響について、理論解析に基づきシミュレーション法を用いて検証する。

## 2. 無限長弦モデルによる理論解析

### 2.1 凹凸のある無限長弦を走行したときの接触力変動

図1に示すように、架線を振幅 $B$ 、波長 $\lambda$ の凹凸のある無限長弦（線密度 $\rho$ 張力 $T$ ）と仮定し、パンタグラフが速度 $v$ で走行する場合を考える。この時の接触力変動 $F$ の大きさは、式(1)で表される<sup>1)</sup>。

$$|F| = |Z| \omega_0 B, \quad Z = \frac{1}{1/Z_p + 1/Z_l} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし $\omega_0 = 2\pi v / \lambda$ であり、 $Z_p, Z_l$ はそれぞれパンタグラフと架線の機械インピーダンスを表す。なお、架線（無限長弦）の機械インピーダンスは、式(2)で表される。

$$Z_l = 2\sqrt{\rho T} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)より、接触力変動の大きさは凹凸振幅に比例し、また架線とパンタグラフを直列結合した場合の機械インピーダンス $Z$ （以下、「直列機械インピーダンス」という）に比例することが示される。

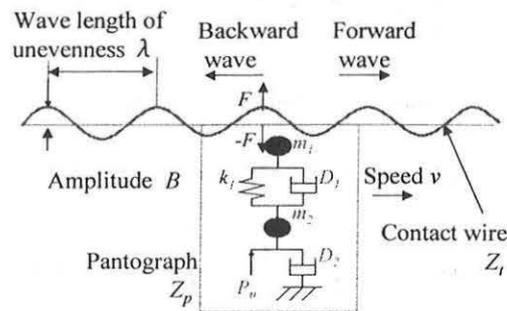


Fig.1 Analysis model of catenary-pantograph system

### 2.2 凹凸によって励起された波動が反射してパンタグラフに入射する場合

架線凹凸によって励起された波動がハンガ点等で反射してパンタグラフに入射した場合の接触力変動 $F$ の大きさは、式(3)で示される<sup>1)</sup>。ただし、 $\gamma_R$ は波動の反射係数で、 $\beta$ は走行速度の架線波動伝播速度に対する比（無次元化速度）である。

$$|F| = \frac{|\gamma_R|}{Z_l} |Z(\omega_0)| |Z(\omega_r)| \frac{1+\beta}{1-\beta} \omega_0 B \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Z = \frac{1}{1/Z_p + 1/Z_l}, \quad \omega_r = \frac{1+\beta}{1-\beta} \omega_0$$

この場合も、架線・パンタグラフ間の接触力変動は、架線・パンタグラフの直列機械インピーダンス $Z$ に比例することが示される。

これらのことから、パンタグラフの振動特性（追随性能）が接触力変動に与える影響は、架線・パンタグラフの

直列機械インピーダンスに比例するものと考えられる。なお剛体ちょう架式架線においては  $Z_i = \infty$  と考えられるので、直列機械インピーダンスは  $Z = Z_p$  で、パンタグラフの機械インピーダンスに等しくなる。すなわち接触力変動の大きさは、パンタグラフの機械インピーダンスすなわち追従性能のみに依存することになる。

### 3. 架線・パンタグラフの機械インピーダンス

#### 3.1 パンタグラフの機械インピーダンスと追従性能

図2に、パンタグラフのばね・質点モデルの例を示す。パンタグラフの各質点モデルに対する機械インピーダンス（加振点インピーダンス） $Z_p$  は、上下加振力の上下速度に対する比として定義され、振動特性を決定付ける。例として式(4)に、2質点モデルのパンタグラフの場合の機械インピーダンスを示す。ただし、 $\omega, i$  は振動角周波数、虚数単位で、その他の記号は図中に示したものである。

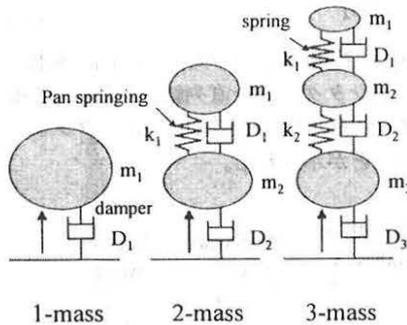


Fig.2 Pantograph model (mass-spring model)

$$Z_p = i\omega m_1 + \frac{1}{\frac{1}{D_1 + k_1/i\omega} + \frac{1}{D_2 + i\omega m_2}} \quad \dots\dots (4)$$

パンタグラフの追従振幅は、パンタグラフを上下加振した際に離線しないで応答できる最大振幅である。パンタグラフの押上力を  $P$  とすれば、追従振幅  $A_c$  の大きさは、式(5)で表される。

$$|A_c| = \frac{P}{\omega |Z_p|} \quad \dots\dots (5)$$

表1に、本論文で検討を行う際の例として、各質点モデルの計算定数を示す。各質点モデル間での性能比較のため、質点の総和質量は全て 20kg としている。その他は、現用の新幹線用パンタグラフの定数を参考にして設定している。

図3に、表1に示す各質点モデルにおけるパンタグラフの機械インピーダンスを比較して示す。また図4に、各質点モデルの追従振幅特性を比較して示す。なお、押上力は 54N としている。

Table 1 Parameters of pantograph for calculation

1-mass	2-mass	3-mass	unit
$m_1=10$	$m_1=10, m_2=10$	$m_1=2, m_2=8, m_3=10$	kg
	$k_1=20$	$k_1=20, k_2=20$	kN/m
$D_1=100$	$D_1=30, D_2=100$	$D_1=30, D_2=30, D_3=100$	Ns/m

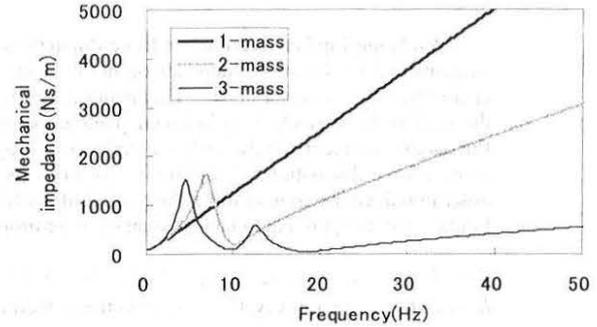


Fig.3 Mechanical impedance of pantograph

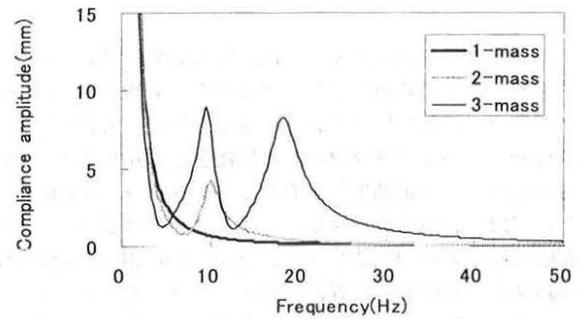


Fig.4 Compliance characteristics of pantograph

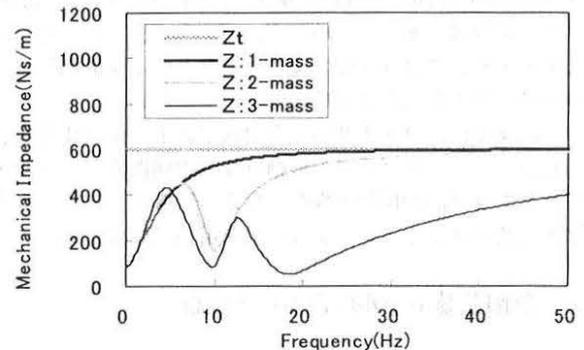


Fig.5 Series mechanical impedance

#### 3.2 架線・パンタグラフの直列機械インピーダンス

図5に、各質点モデルのパンタグラフとCSシンプル架線における直列機械インピーダンスの計算例を比較して示す。架線の機械インピーダンスとしては、架線系全体の値（線密度、張力はいずれも各線条の総和）を用いて算出している。直列機械インピーダンスは、高周波側で架線の機

械インピーダンスに漸近するが、低周波側ではパンタグラフの機械インピーダンスの影響が比較的大きく現れている。直列機械インピーダンスが極小となる周波数は、ばね・質点系の共振周波数に相当する。

#### 4. シミュレーションによる検証

##### 4.1 シミュレーション条件

今回の検討では、架線・パンタグラフの運動シミュレーション法を用いて、上記の特性を検証する。シミュレーションにおいては、線条を質点に分割して各質点の運動方程式に基づき微小時間きざみの運動を計算している。計算プログラム「架線道」<sup>2)</sup>を基本とし、本論文で用いる方法では、線条減衰（質点間減衰係数）の周波数補正<sup>3)</sup>と、線条曲げ剛性を導入している。また計算区間端部に波動反射抑制のための減衰要素を追加している。本論文では質点間隔を0.1mとし、約50Hzまでの架線波動を考慮することにする。計算区間は8径間とし、各径間長は50mとする。接触力スペクトルの算出区間は、計算端部の各2径間を除いた中央部4径間とした。FFTポイント数は1024個で、ハンニングウィンドウを使用した。

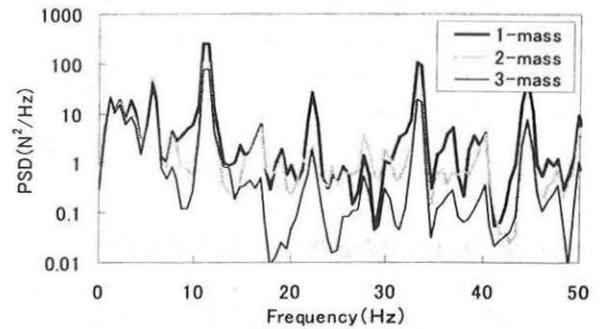
##### 4.2 パンタグラフ追従性能改善による接触力変動の低減

図6に、ヘビーコンパウンド架線とCSシンプル架線を各質点モデルのパンタグラフが200km/hで走行した際の接触力パワースペクトル密度を示す。支持点間隔、ドロップ間隔、ハンガ間隔に相当する周波数は、それぞれ1.1Hz、5.6Hz、11.1Hzである。

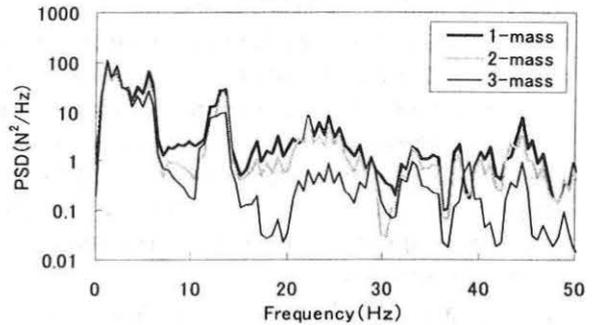
CSシンプル架線における接触力変動の代表的な周波数としては、支持点間隔周期及びその整数倍の周波数が挙げられる。これに対してコンパウンド架線では、支持点間隔周期の変動成分は比較的小さいが、ハンガ間隔周期並びにドロップ間隔周期及びこれらの整数倍の周波数において比較的特著であることが特徴である。

図7に、3質点モデルの場合の1質点モデルに対する接触力の振幅比（パワースペクトル密度比の平方根）を示す（1質点モデルのPSDが $1\text{N}^2/\text{Hz}$ 以上）。またこの図には架線とパンタグラフの直列機械インピーダンスの比も合わせて示しており、架線系全体とした場合とトロリ線のみとした場合の両方を示している。さらに凹凸によって励起された波動が反射してパンタグラフに入射する際の直列機械インピーダンス比（周波数遷移する前の周波数における直列インピーダンス比に、当該周波数の直列機械インピーダンス比をかけたもの）も示している。シミュレーションの結果はある程度分散しているが、接触力変動の低減比は直列機械インピーダンスの低減比に概ね比例する傾向が見られる。

支持点間隔周期程度の周波数においては架線系の各電線が一体となって運動するので、この場合の直列機械インピーダンスは、架線系全体との直列機械インピーダンスと考えるのが適当と考えられる。ハンガ間隔周期程度の周波数

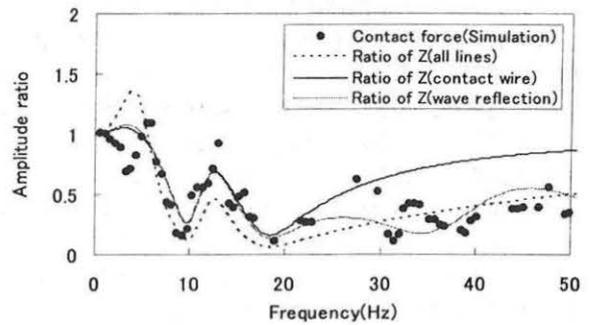


(a) Heavy-compound catenary

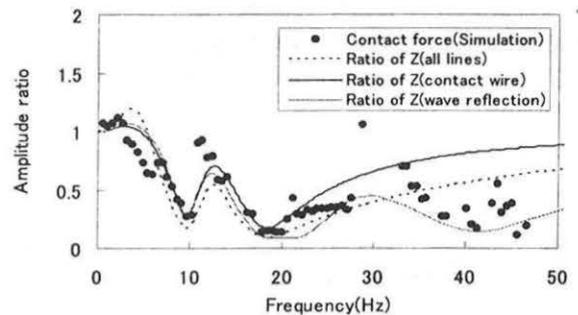


(b) CS-simple catenary

Fig.6 Spectrum of contact force (simulation:200km/h)



(a) Heavy-compound catenary



(b) CS-simple catenary

Fig.7 Amplitude ratio of contact force (3-mass to 1-mass)

においては、主にトロリ線のハンガ間凹凸による接触力変動と考えられるので、トロリ線との直列機械インピーダン

スと考えるのが妥当と考えられる。ハンガ間隔周期の周波数の $(1+\beta)/(1-\beta)$ 倍程度以上の周波数においては、ハンガ間トロリ線弛度の高次凹凸成分による変動成分と、励起された波動が反射して入射することによる変動成分が混在すると考えられる。このため、これらの直列機械インピーダンス比の中間に位置するものと考えられる。

#### 4.3 復元ばね定数が接触力変動に与える影響

前節で得られた結果を基に、復元ばねのばね定数が接触力変動に与える影響について検討する。対象架線として、ヘビーコンパウンド架線とCSヘビーコンパウンド架線（CS110/19.6kN）し、走行速度は200km/hとする。パンタグラフは2元系として、復元ばね定数を5, 10, 20, 50kN/mと変化させる。図8に、各ばね定数における架線・パンタグラフの直列機械インピーダンスを示す。ばね定数20kN/mでは10Hz付近に直列機械インピーダンスの極小値（追随振幅の極大値）があり、200km/h走行の場合ハンガ間隔周期にほぼ相当する。またばね定数5kNでは5Hz付近に直列機械インピーダンスの極小値があり、同じくドロップ間隔周期の周波数にほぼ相当する。

図9に、復元ばねの各ばね定数における接触力の標準偏差を示す。追随振幅の極大となる周波数をハンガ間隔周期またはドロップ間隔周期に合わせることで、標準偏差を小さくして接触性能を向上させることができる。

パンタグラフの追随性能を向上させる（機械インピーダンスを低減させる）周波数帯域としては、①支持点間隔周期及びその整数倍の周波数、②ハンガ間隔周期及びその整数倍の周波数、③ドロップ間隔周期及びその整数倍の周波数が挙げられる。またこれらの周波数でも架線構造によってその優先度が異なると考えられる。例えば①については、支持点間隔周期の接触力変動の比較的大きな架線構造の場合、例えばシンプル系架線などの総張力の比較的小さい架線構造で重要となる。②については、ハンガ間隔周期の接触力変動の比較的大きな架線、例えば無次元化速度 $\beta$ （トロリ線波動伝播速度に対する列車速度の比）が比較的大きな架線構造や、き電吊架方式架線のようにハンガ点での波動反射係数の比較的大きな架線構造で重要である。また③は、コンパウンド系架線において考慮する必要がある。

#### 5. まとめ

カテナリちょう架式架線において、パンタグラフの振動特性（追随性能）が走行時の架線・パンタグラフ間の接触力変動に与える影響について検討した。その結果をまとめると、以下ようになる。

- (1)パンタグラフの追随性能を向上した場合の接触力変動の低減効果は、架線とパンタグラフの直列機械インピーダンスの低減割合に比例する。
- (2)接触力変動の主な周波数は、支持点間隔、ハンガ間隔、ドロップ間隔（コンパウンド系架線）とこれらの整数倍の

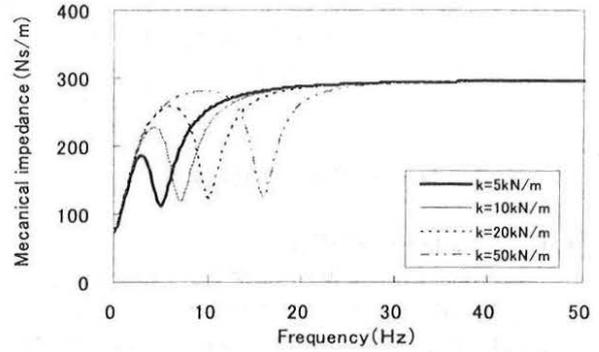


Fig.8 Series mechanical impedance (variation of spring constant of pan springing)

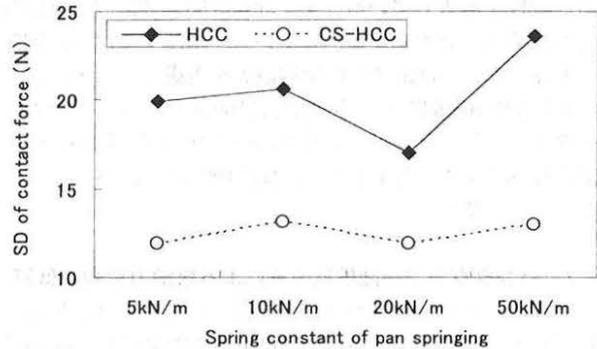


Fig.9 Standard deviation of contact force (200km/h)

周波数であり、接触力変動を低減するためには、これらの周波数において直列機械インピーダンスを低減することが効果的である。

(3)直列機械インピーダンスの改善は、シンプル系架線などの総張力の比較的小さい架線構造では支持点間隔周期及びその整数倍の周波数において重要である。また無次元化速度 $\beta$ が比較的大きな架線構造やき電吊架方式架線などでは、ハンガ間隔周期及び整数倍の周波数において重要である。またコンパウンド系架線においては、ドロップ間隔周期及びその整数倍の周波数が加わる。

#### 文献

- 1)網干光雄；トロリ線波動の低減による集電系の動的特性改善手法に関する研究，鉄道総研報告，特別第26号，1998年10月
- 2)真鍋克士；架線・パンタグラフ系の運動シミュレーション，平成7年電気学会産業応用部門大会，1998年3月
- 3)網干光雄；電車線設備状態の動特性評価法，平成12年電気学会産業応用部門大会，2000年8月