

可変剛性ばねを用いたパンタグラフ動特性制御による集電性能向上手法

鉄道力学研究部 集電力学

研究員 山下義隆

1. はじめに

パンタグラフの集電性能を評価する指針の一つに追随振幅特性がある。追随振幅特性はパンタグラフの動特性を示す周波数応答関数であり、物理的にはある周期の正弦波状の凹凸を有する剛体架線をパンタグラフが摺動しながら走行する場合に、離線を起こさないで走行可能な架線凹凸の最大振幅を意味する。架線凹凸の周波数がハンガ等の架設周期と列車走行速度で決まると考えると、列車速度に応じてパンタグラフの追随振幅特性を連続的に制御することができれば、図1に示す追随振幅曲線のピーク点の包絡線のように、架線固有の凹凸に対してあらゆる速度において良好な追随振幅特性を得ることができると考えられる。

本発表では、前述のようにパンタグラフの追随振幅特性を制御することにより集電性能向上を図る手法を提案するとともに、その有効性を数値シミュレーションによって検証した結果について報告する。また、このような追随振幅特性の制御を実現するための可変剛性ばねを提案・試作し、可変剛性ばね単体の変位-復元力特性を調べるとともに、この装置をパンタグラフを模擬したモデルに組み込んで追随振幅特性の制御を試みた結果について報告する。

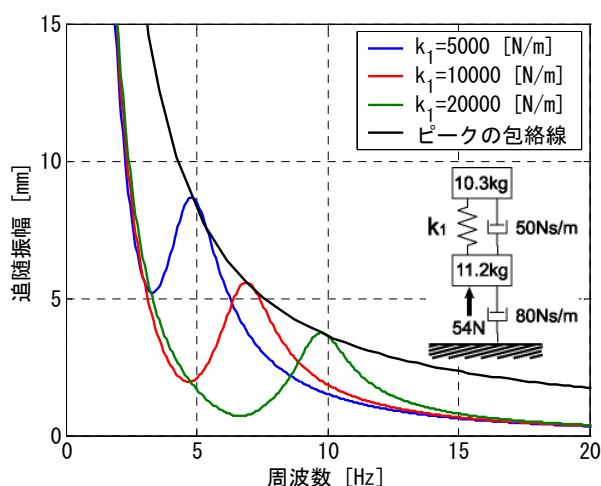


図1 パンタグラフの追随振幅特性

2. 数値シミュレーションによる集電性能向上効果の検証

2.1. 可変剛性ばねによる集電性能向上手法の概要

追随振幅は、図1中に示すようなパンタグラフの運動モデルを用いて求められ、周波数に対して複数の谷やピークを有する曲線となる。これらの谷やピークが出現する周波数は、主にパンタグラフの運動モデルの質量 m_1, m_2 とばね定数 k_1 によって決定される。図1に示す複数の追随振幅曲線は、図1中のモデルのばね定数 k_1 を変化させた場合の曲線である。今回提案する集電性能向上手法はパンタグラフのばね定数 k_1 を連続的に変化させ、図1に示す追随振幅曲線のピーク点の包絡線のようにあらゆる周波数の架線凹凸に対して良好な追随振幅特性を与えることにより、集電性能を向上させるものである。しかしながら、追随振幅は、単一の凹凸波長を有する剛体架線を走行したときのパンタグラフの追随性能を表わす指標であり、カテナリ架線のように架線側も運動する場合には、パンタグラフへの外乱周波数は単一ではない。ここでは、カテナリ架線の凹凸が主に架線金具の一つであるハンガの間隔 $L(\cong 5m)$ で代表されると仮定し、追随振幅曲線のピーク周波数がパンタグラフの走行速度 $V(m/s)$ とハンガ間隔で決まるパンタグラフへの外乱周波数 $V/L(Hz)$ に一致するようにパンタグラフのばね定数 k を速度に応じて調節したときの集電性能向上効果をシミュレーションにより検証した。このシミュレーションでは、架

線・パンタグラフ間の接触力変動量を指標として集電性能を評価した。

2.2. カテナリ架線走行シミュレーション結果

き電ちょう架式架線を走行する三元系パンタグラフの走行シミュレーションを行った。本シミュレーションでは、架線を複数の質点で表現し、質点を剛性要素と減衰要素で接続したモデルを用いている。走行速度は 40km/h から 180km/h まで 20km/h 刻みで 5 径間(1 径間 50m)を一定速度で走行し、3 径間目から 4 径間目までの 100m の区間の接触力変動の標準偏差を求めた。シミュレーションに用いた架線の諸元を表 1 に示す。三元系パンタグラフの場合、運動モデルには二つのばね要素が存在する。シミュレーションで使用したパンタグラフモデルを図 2 に示す。ばねの剛性が一定の場合、パンタグラフの各ばね定数は $k_1 = 10740(\text{N/m})$, $k_2 = 21520(\text{N/m})$ とした。可変剛性ばねを有するパンタグラフでは、所望の追従振幅特性を得るために各ばね定数を走行速度に応じて同じ比率で変化させた。つまり、

$$k_1 = 10740 \times K (\text{N/m}), k_2 = 21520 \times K (\text{N/m}) \quad (1)$$

ただし、 K は速度によって決まる定数で剛性比と呼ぶ。速度による剛性比の変化を図 3 に示す。三元系のパンタグラフの場合、追従振幅曲線のピークは二つ存在するが、ここでは、低周波数側のピークを架線凹凸と速度で決まる周波数 $V/L(\text{Hz})$ に一致させるようばね定数 k_1, k_2 を調整した。

シミュレーションによって得られた各速度における接触力標準偏差を図 4 に示す。一定剛性と可変剛性の場合における剛性がほぼ等しい(剛性比が 1 に近い) 100km/h を除いては、速度に応じて剛性を変化させることによって接触力変動が低減している様子がわかる。このように、本手法はカテナリ架線においても有効であることがわかった。

3. 空気ばねを用いた可変剛性ばね

3.1. 概要

ここでは、本手法を実現するために考案した可変剛性ばねについて紹介する。考案した可変剛性ばねの概念図を図 5 に示す。本可変剛性ばねは二つの空気ばねを上下に対向配置し、中央の部材を可動部として使用するものである。可動部が中立位置にあ

表 1 シミュレーションに使用したき電ちょう架式架線諸元

	トロリ線	ちょう架線
線種	GTM170	PH356×2
張力 [kN]	14.70	39.20
線密度 [kg/m]	1.511	6.440
波動伝播速度 [km/h]	355.1	280.9

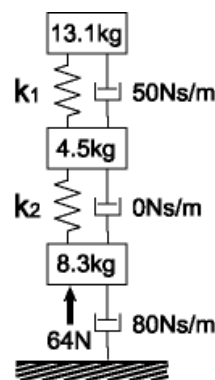


図 2 シミュレーションに使用した三元系パンタグラフモデル

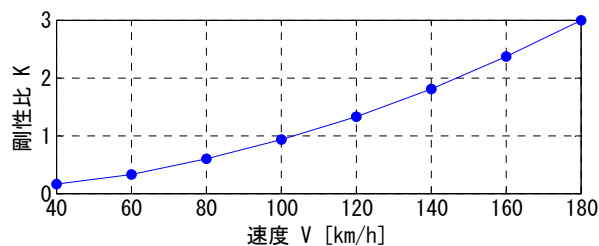


図 3 速度に対する剛性比の変化

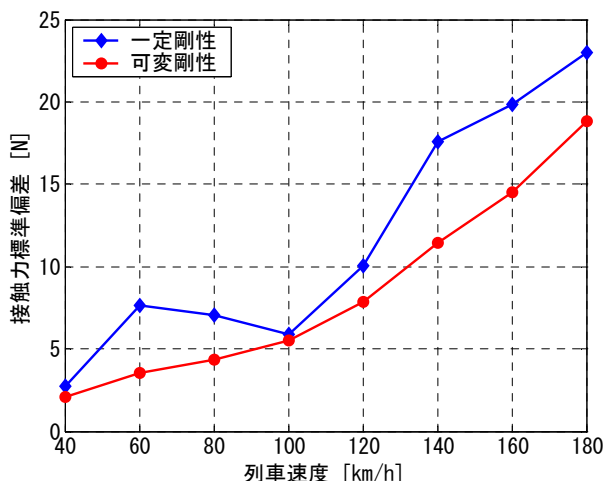


図 4 パンタグラフの追従振幅特性

るとき、空気ばねの気室内の圧力および体積がそれぞれ P_0, V_0 で上下ともに等しいとする。可動部に変位 x を与えた場合、可動部は空気の圧縮・膨張により復元力 F を受けることとなる。可動部の変位に伴う気室内の空気の状態変化がポリトロープ変化であるとすると、

$$P_0 V_0^\gamma = P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad (2)$$

で成り立つ。ただし、 $P_i, V_i (i=1,2)$ は気室内の圧力および体積、 γ はポリトロープ指数を表わす。添え字は上下の気室に対する番号であり、1 の場合下側、2 の場合上側を意味する。また、可動部の変位に伴う気室体積の変化が次のように線形関係にあると仮定する。

$$\begin{cases} V_1 = V_0 - Ax \\ V_2 = V_0 + Ax \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 A は可動部の受圧面積とする。このとき、復元力 F は次のように表わされる。

$$F = A(P_1 - P_2) = AP_0 \left\{ \left(\frac{V_0}{V_0 - Ax} \right)^\gamma - \left(\frac{V_0}{V_0 + Ax} \right)^\gamma \right\} \quad (4)$$

上式を $x=0$ 近傍でテイラー展開し、次式を得る。

$$F = \frac{2\gamma A^2 P_0}{V_0} x \quad (5)$$

x の係数が剛性であることから、空気圧 P_0 を変化させることによって剛性が変化することがわかる。以降、特に断りの無い限り空気圧とは可変剛性ばねの中立位置における空気圧 P_0 を意味することとする。

3.2. 試作可変剛性ばねの剛性

空気ばねを用いた可変剛性ばねを試作し、空気圧変化に対する可動部の変位－復元力特性を調査した結果を図 6 に示す。空気圧を増加すると、変位－復元力関係の傾きが増加する様子が見られる。この曲線に対して最小二乗法による直線近似を行い、その傾き、つまり剛性を空気圧の関数として示したものを図 7 に示す。空気圧の増加に伴い剛性が増加することがわかる。

4. パンタグラフ模型の動特性制御

前節で述べた可変剛性ばねをパンタグラフ模型に組み込み、剛性を変化させることによ

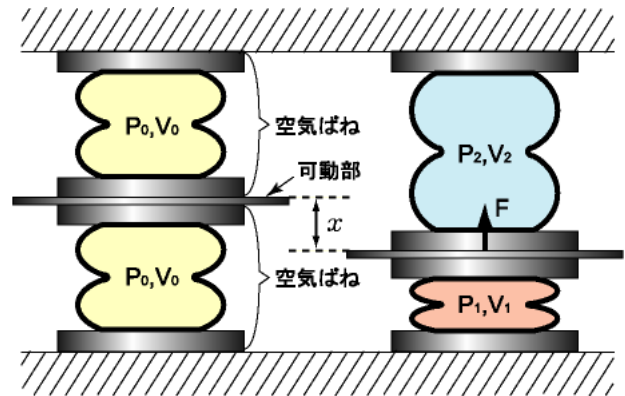


図 5 可変剛性ばね概念図

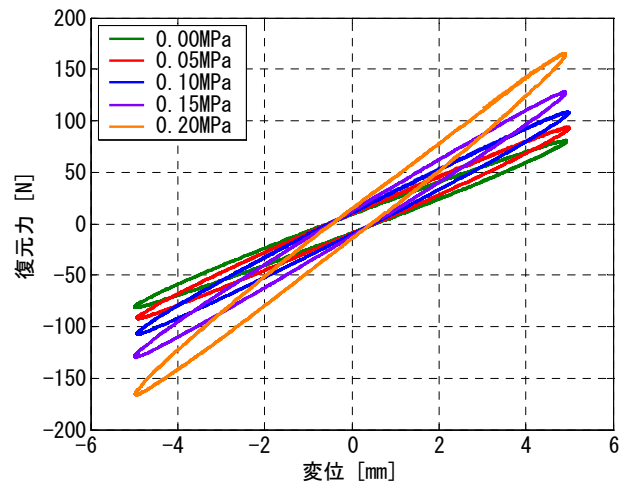


図 6 可変剛性ばねの変位－復元力関係

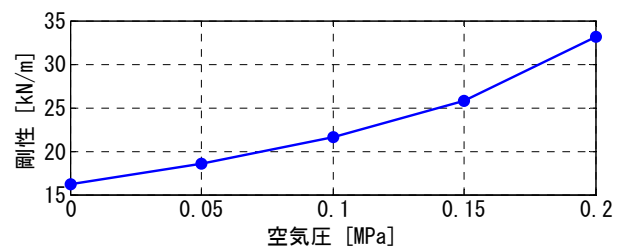


図 7 空気圧による可変剛性ばねの剛性の変化

って模型の動特性制御を試みた。使用したパンタグラフ模型を図 8 に示す。模型は二元系パンタグラフを模擬しており、下プレートおよびこれに固定されているダミーウェイトが枠組質量に、上プレートおよびこれに固定されているダミーウェイトが舟体質量に対応している。質量はそれぞれ 7.60kg および 9.61kg である。下部質量には定荷重ばねによる静押上力(194N)が作用している。それぞれの質量部は上下方向にのみ運動を許容するようにリニアガイドとリニアブシュにより拘束されている。上下の質量間には、前節で述べた可変剛性ばねが取り付けられている。

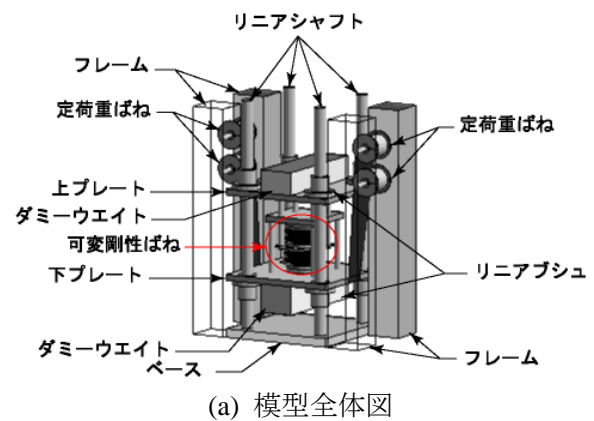
1 章で述べた追従振幅特性の制御可能性を調査するために、パンタグラフ模型の上部質量に 32Hz までの周波数成分を含む擬似ランダム波による強制変位加振を行い、加振点における接触力から上部変位の伝達関数、つまりコンプライアンスを測定した。コンプライアンスに静押上力を乗じたものが追従振幅である。可変剛性ばねの空気圧を 0.10MPa および 0.20MPa に設定して比較を行った。

コンプライアンスの測定結果を図 9 に示す。空気圧を変化させることによって、コンプライアンスのピーク周波数が変化しており、動特性制御が可能であることを確認することができた。

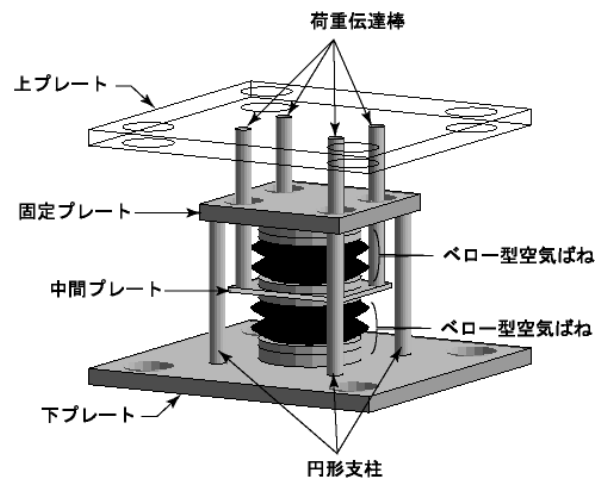
5. まとめ

本発表では、可変剛性ばねを用いてパンタグラフの動特性を制御し、集電性能を向上する手法について報告した。数値シミュレーション結果より、代表的な架線凹凸周期と走行速度によって決まる周波数を追従振幅のピーク周波数に一致させるように可変剛性ばねの剛性を調節することによって接触力変動を低減することが可能であることがわかった。また、実際に本手法を実現するため、空気ばねを用いた可変剛性ばねを試作し、このばねに与える空気圧を変化させることでばねの剛性を変化させることが可能であることを示した。さらに、試作した可変剛性ばねをパンタグラフ模型に組み込み、動特性制御が可能であることを確認した。

今後は、可変剛性ばねの小型化、剛性変化範囲拡大などの課題に取り組むとともに、これをパンタグラフへ実装して各種試験を行う予定である。



(a) 模型全体図



(b) 可変剛性ばね近傍拡大図

図 8 可変剛性ばねを組み込んだパンタグラフ模型概略図

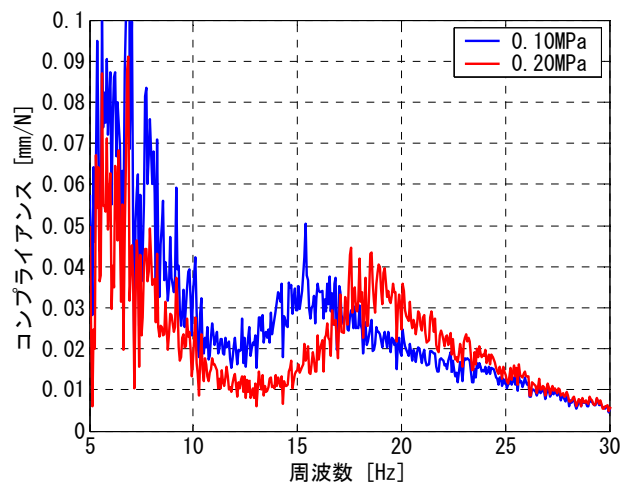


図 9 可変剛性ばねによるパンタグラフ模型の動特性制御