

将来の引留長最適化に向けた 電車線長手方向変位の計算法



山下 義隆
Yoshitaka Yamashita
鉄道力学研究部
集電力学研究室長



佐藤 宏紀
Koki Sato
電力技術研究部
電車線構造研究室
副主任研究員

はじめに

電気鉄道の電車線は、移動する車両に電力を供給するための重要な構成部材です。電車線は、移動する車両に継続して電力を供給するために、長距離にわたって架設されていますが、標準的には1500～1600m以下¹⁾の長さで区分されています。電車線の張力をできるだけ均一に保つための設備として、電車線の**引留点**に設置される自動張力調整装置（以下、張力調整装置）および**引留区間**内の電車線を支持するために電柱に設置される可動ブラケット

があります（図1）。

張力調整装置には、ばねの力や重錘の自重により電車線に張力を付与するものなどがあります（図2）。温度変化による電車線の伸縮などに伴って張力調整装置の電車線との接続部が変位

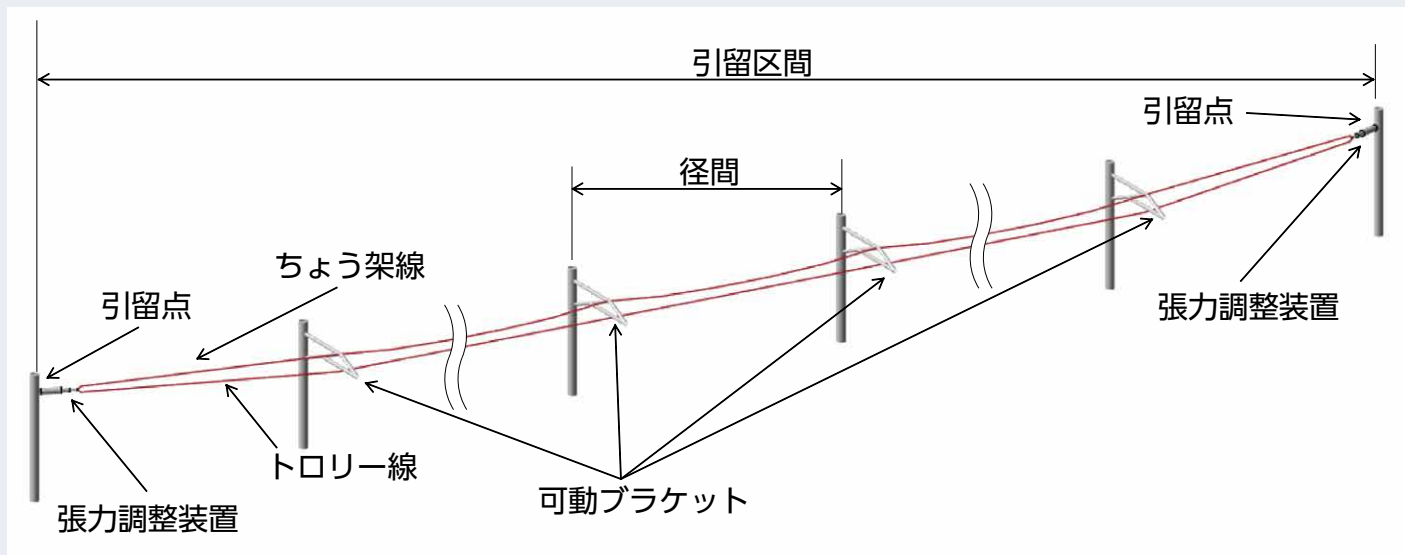
引留点

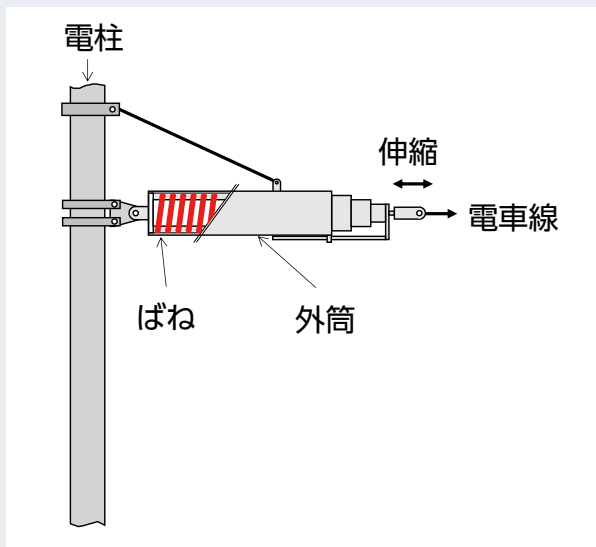
電車線の末端を留める位置のことです。

引留区間

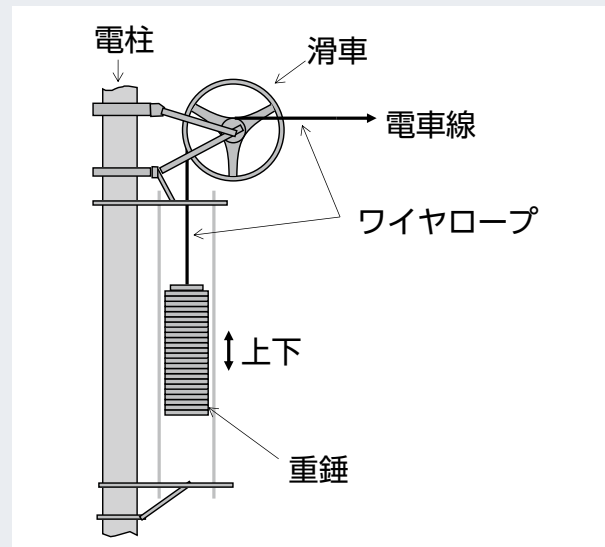
引留点間の区間のことです。この区間の長さを引留長といいます。

図1 引留区間内の電車線の例





(a) ばね式



(b) 滑車式

図2 自動張力調整装置

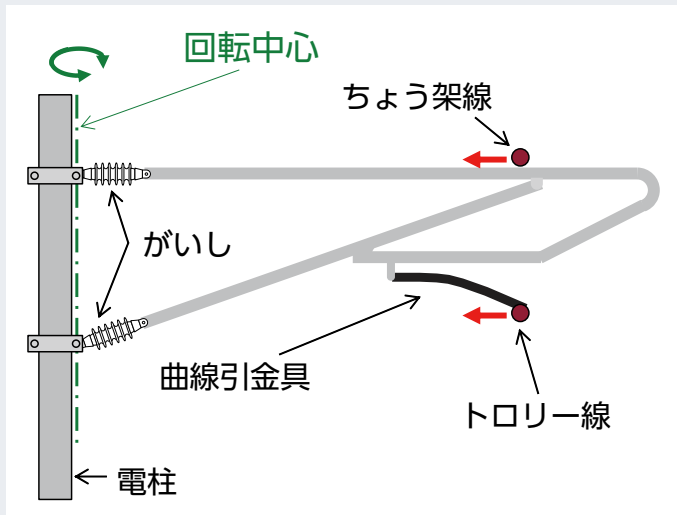
し、これにより電車線の張力には標準使用張力に対して数%から十数%の変動が生じます。
 可動ブラケットは、電柱側のブラケット固定箇所をヒンジ支持としてブラケットに水平回転自由度を与えたものです。可動ブラケットは、温度変化による電車線の伸縮などにより回転し、電車線の張力調整を円滑に行っています。可動ブラケットには、I型およびO型と呼ばれるものがあり、前者は電車線を線路に直交する方向

の電柱側に、後者は電車線を電柱の反対側に引っ張っています(図3)。
 さまざまな要因により電車線の長手方向の変位が観測されることがあります。代表的なものとして気温変化による電車線伸縮に起因するものが挙げられますが、理想的な条件では、両端に張力調整装置が導入されている場合には、両端の電車線変位は大きさが同じで向きが逆になります。ところが、引留区間内の電車線全体が

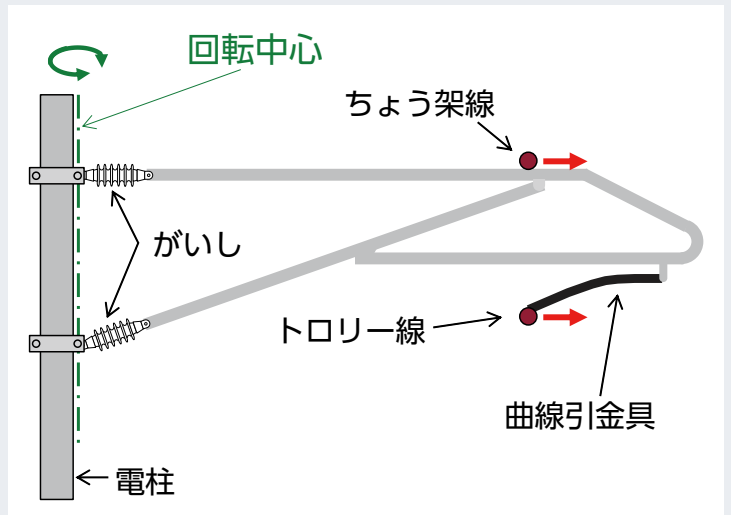
図3 可動ブラケット模式図

図中赤矢印は可動ブラケットが電車線を引っ張る方向※

※電柱側(内側: In)に電車線を引くものをI型, 電柱の外側(Out)に電車線を引くものをO型といいます。



(a) I型



(b) O型

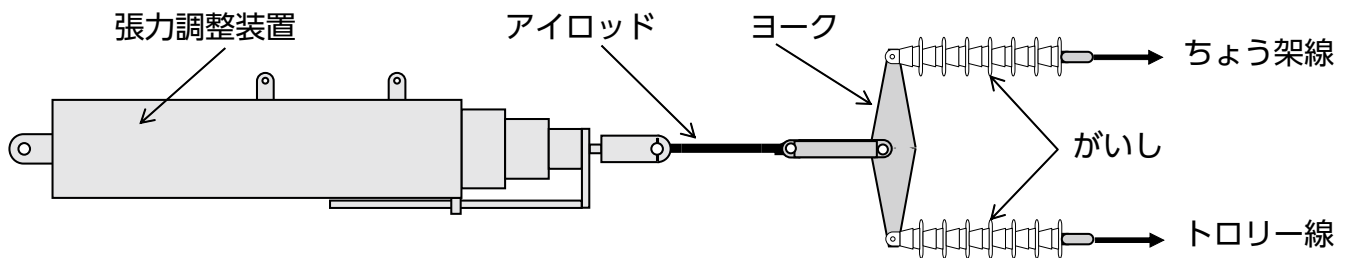


図4 ヨークによる複数線条の一括引き留め

片側の引留区間の端部に偏る場合があります。偏りが生じ、その量が大きい場合、張力調整装置の可動域の限界に達することで、正常な張力調整の機能を発揮することができなくなるおそれがあります。温度変化などにより生じる電車線の長手方向変位を予測することができれば、適切なストロークの張力調整装置の選定や適正な引留長の提示などが可能となり、正常な張力調整の機能を失うリスクが低減されます。本記事では、温度変化などにより生じる電車線の長手方向変位を表現する解析モデルならびに電車線の長手方向変位を計算する手法について紹介します。

解析モデルと計算方法

ここでは、複数の線条を「ヨーク」と呼ばれる金具を介して一つの張力調整装置で引き留めている区間を対象としてモデル化をする方法について示します(図4)。電車線の長手方向変位の大まかな挙動を把握するために、次のように単

純化した解析モデルを提案しました(図5)。

- ① ヨークを介して一括で引き留められるちょう架線とトロリー線を1条の線条で表現
- ② 1条の線条で表現した電車線は、軸方向の温度伸縮および弾性変形のみを考慮した棒要素で表現
- ③ 張力調整装置は線形ばねで表現
- ④ 可動ブラケットは剛体棒要素で表現
- ⑤ 可動ブラケットの棒要素の回転中心を電車線長手方向に対して左右どちらに配置するかによってI型とO型を表現(例えば、曲線路において、曲線路の外側に棒要素の回転中心を配置する場合は、電車線を回転中心側に引っ張っているためI型を表現してい

⑤ ヨーク

ちょう架線とトロリー線など2本の線条を一括して引き留めるための金具です。三角形や菱形の鋼板を使用し、両端に2本の電線を取り付け、2線の張力の釣合いの点から反対方向にワイヤを引き出して引き留めます。

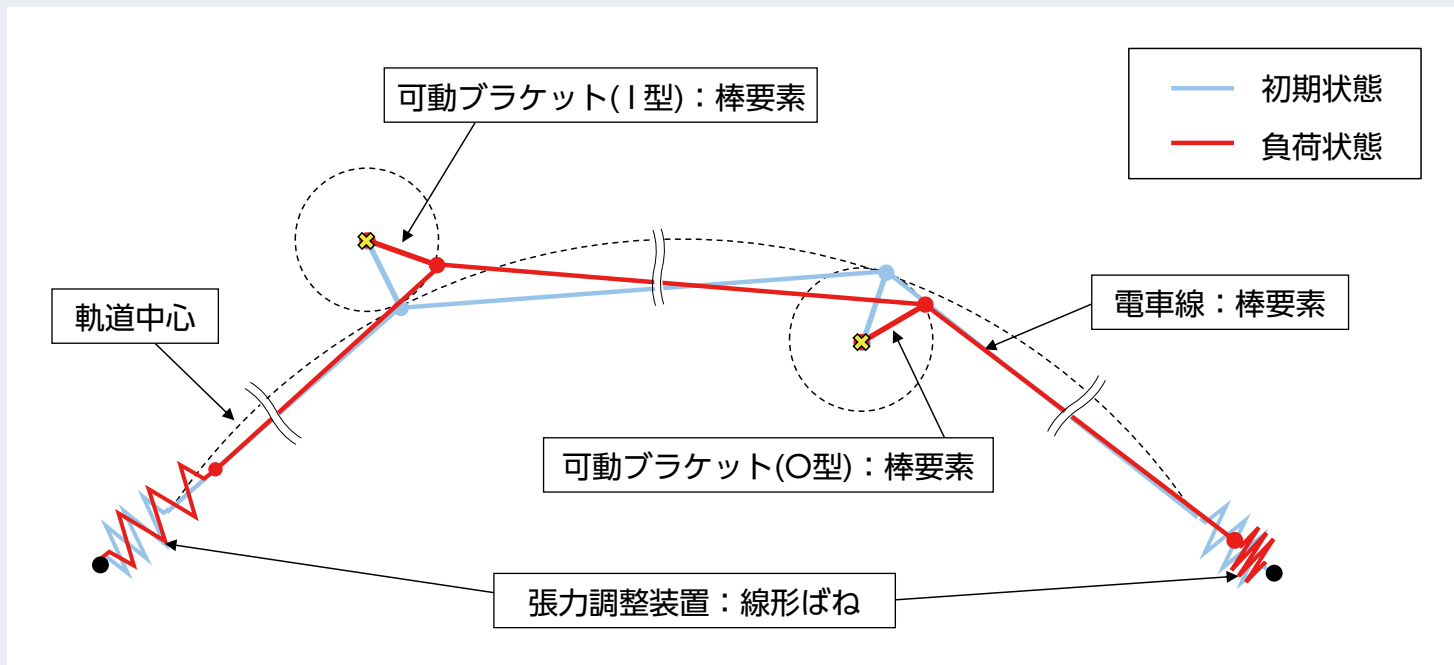


図5 解析モデルの概略

ることと等価となり、内側に配置する場合はその逆と等価となります。)

- ⑥ 電車線は、張力調整装置および可動ブラケットとの接続点を節点として要素を分割し、これら節点で電車線要素・張力調整装置・可動ブラケットそれぞれをピン結合

このモデルにおける節点の幾何学的拘束条件と節点周りの力の釣合いの方程式を連立して解くことで、温度などの変化に対して、力が釣り合った状態で節点が静止する座標、すなわち節点の長手方向変位を計算することが可能となります。幾何学的拘束条件と力の釣合いは、非線形の連立方程式で表現されるため、ニュートン法¹⁵⁾という反復計算により解いています。

15) ニュートン法

方程式を数値的に解く方法の1つで、適当な解の候補(推定値)を初期値として与え、その解を反復的に修正して正確な解に収束させる方法です。

模型試験

上述のモデル化と計算方法の妥当性を確認するために、可動ブラケット1基が引留区間に存在する簡単な模型(図6)を製作して実験と計算結果を比較しました。模型では、電車線を直径2mmのステンレスワイヤロープ、可動ブラケットをリンクで表現しました。ワイヤロープに張力を付与する張力調整装置に相当する要素としてコイルばねを用いました。コイルばねに予張力を与えてワイヤロープに接続することで、ワイヤロープに張力を付与しています。座標原点とリンクの距離 δ を変えることで、軌道の曲率半径および可動ブラケットのI型・O型の種別を変更することに相当させることができます。今回の模型試験では、両端のコイルばねの伸縮量が等しくなるリンクの角度を0として、リンクに初期角度を与えて離れた後にリンクが静止した角度を計測しました。計算結果との比較では、模型と同じモデルで計算を実施して、節点が静止する座標からリンクの回転角度を算出し

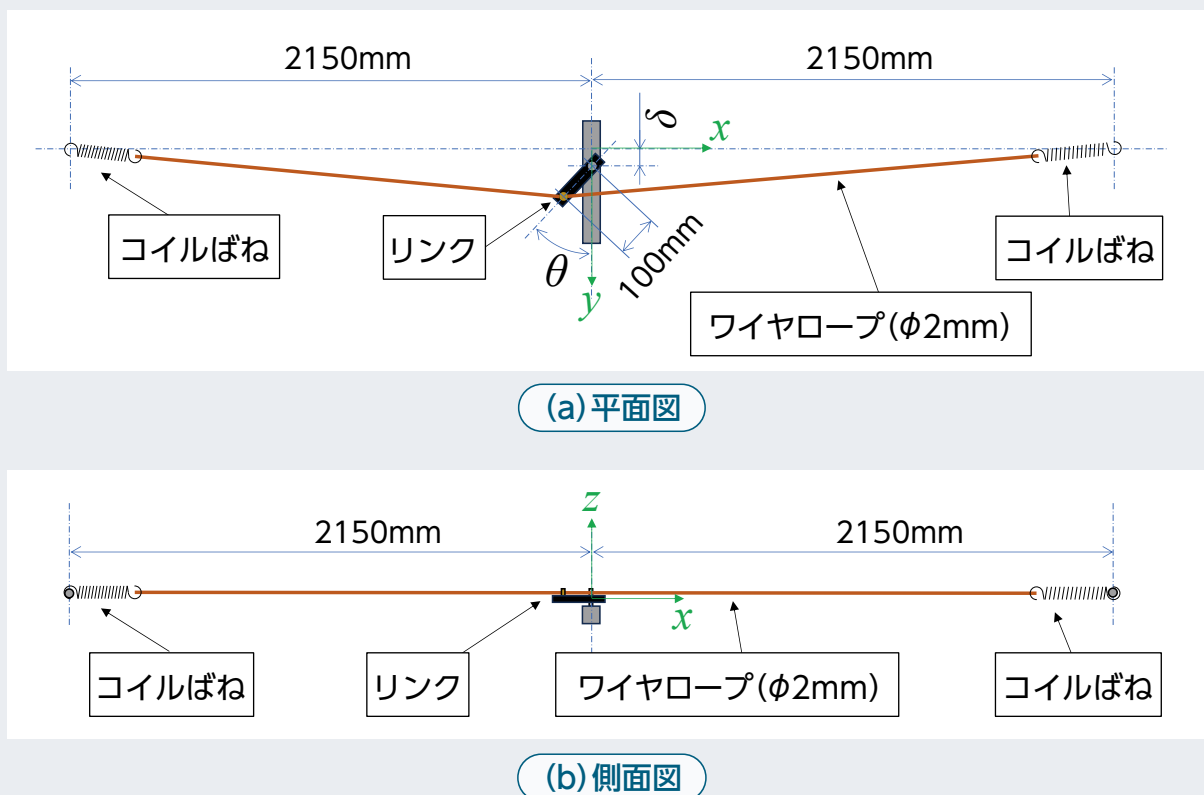


図6 模型試験の概略

ました。両端のコイルばねのばね定数などの条件によって、角度が0以外に収束して静止する場合がありますが、そのような条件を含めて、計算結果と実験結果がある±5°程度の誤差で一致することが確認できました(表1)。

計算例

前述の模型試験によりモデルの妥当性が確認できたので、ここでは、実際の引留区間と同様に複数の可動ブラケットを有する長区間のモ

デルで計算を行いました。計算条件は、新幹線区間で現実的にあり得る条件の一例として、直線または曲線半径4000mの曲線路内にある引留区間内の電車線(径間数20, 径間長全て50m, 電車線張力39200N, ブラケット長さ全て4m)に対して、I型およびO型の可動ブラケットの配置が20℃の気温増加時に張力調整装置のストロークに与える影響を計算しました。張力調整装置としての両端の線形ばねのばね定数は6000N/mとしました。計算条件は、次の

表1 模型試験結果と計算結果の比較

	両端のばね定数※	リンクと座標原点の距離δ	可動ブラケット	曲線半径	模型試験結果*	計算結果*
条件 A	500 N/m	-50 mm	O型相当	41.2m	0.0°	2.8°
条件 B	500 N/m	-150 mm	I型相当	41.2m	0.0°	4.9°
条件 C	0 N/m	50 mm	O型相当	15.5m	120.0°	124.0°
条件 D	0 N/m	-200 mm	I型相当	23.2m	0.0°	5.3°

※ 0 N/m の条件は、リンクの回転に伴うばねの反力が生じないように滑車を介した重錘によりワイヤロープに張力を付与して実現しました。

* 模型試験結果および計算結果は、絶対値で記載しました。

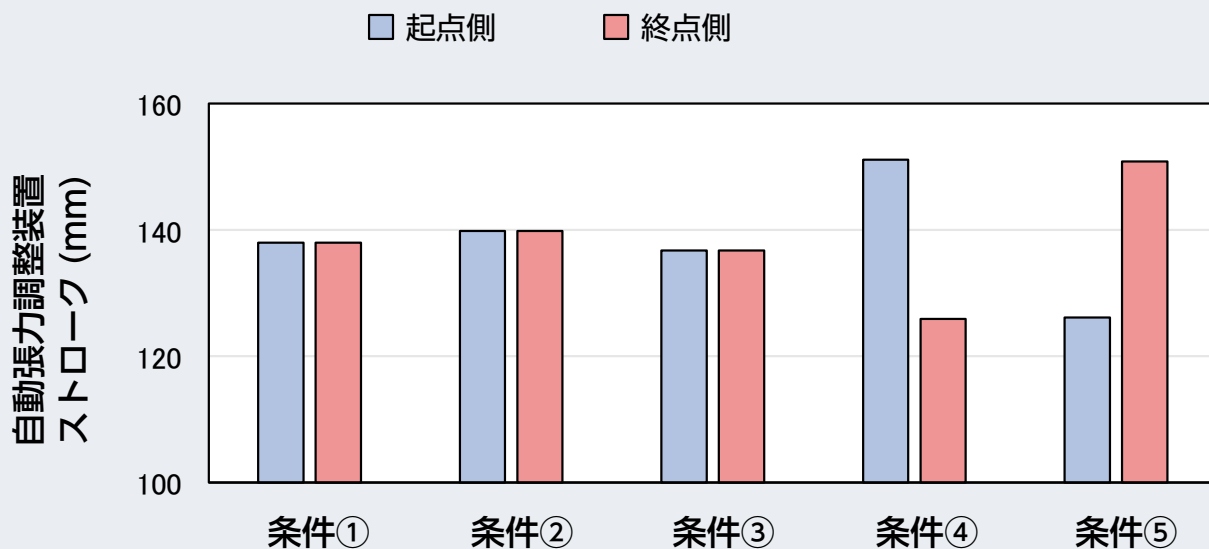


図7 計算例

5条件です。

条件①：曲線，I型とO型の可動ブラケットを交互配置

条件②：曲線，全てO型の可動ブラケットを配置

条件③：曲線，全てI型の可動ブラケットを配置

条件④：曲線，起点側半分にO型・終点側半分にI型の可動ブラケットを配置

条件⑤：曲線，起点側半分にI型・終点側半分にO型の可動ブラケットを配置

計算結果を図7に示します。これらの結果は、引留区間内の可動ブラケットの種別の配置が中央対称とならない場合には、両端の張力調整装置のストローク量に偏りが生じることを示唆する結果だと言えます。両端の張力調整装置の個体差が大きい場合²⁾などにより、ストローク量の偏りがさらに大きくなり、正常な張力調整ができなくなることも想定されます。このような事象が発生しないように、電車線路の設計時などに本計算手法を活用することで、正常な張力調整が可能なパラメーター（張力調整装置の必

要ストローク量，I型・O型可動ブラケットの配置，引留長など）の最適化につなげることができると考えています。

おわりに

ここでは、温度変化などにより生じる電車線の長手方向変位を表現する解析モデルならびに電車線の長手方向変位を計算する手法について紹介しました。この研究は、適切な電車線設備の選定・配置を可能とし、鉄道の安定輸送に貢献できると考えられます。今後は、解析モデルの精緻化などに取り組み、引留長，張力調整装置のストローク，可動ブラケットの配置などの最適化に取り組みたいと思います。RRR

文献

- 1) 日本鉄道電気技術協会：鉄道技術者のための電気概論 電車線路シリーズ3 電車線装置，pp.109-112，2003
- 2) 佐藤宏紀，山下義隆，諏訪和徳，川本海：電車線の流れおよび中性点の移動に対する検討，電気学会 交通・電気鉄道／リニアドライブ合同研究会，pp.41-46，2022