

ちょう架線支持滑車の張力抑制抵抗評価と 集電特性への影響

倉岡 拓也* 久須美 俊一* 常本 瑞樹*
濱田 貴弘** 源 導士**

Evaluation of Resistance at Supporting Pulley of Messenger Wire and Its Influence on Current Collection Characteristics

Takuya KURAOKA Shunichi KUSUMI Mizuki TSUNEMOTO
Takahiro HAMADA Michihito MINAMOTO

It is required that the tension of overhead contact line system should be constant to maintain acceptable current collection. However, it is considered that the tension is not exactly constant, because of the resistance at the supporting pulley of messenger wire. In this paper, we investigated the mechanism of the resistance, and carried out the measurement of tension fluctuation and moving situation of messenger wire as a part of investigation. Furthermore, in order to investigate the influence of the resistance at the supporting pulley on the current collection, we carried out the simulation to find out how the current collection characteristics will be influenced by the change of the tension of the messenger wire.

キーワード：ちょう架線支持滑車，張力，抑制抵抗，集電特性

1. はじめに

架空電車線は良好な集電性能を維持するため、その張力は一定であることが望ましい。しかし、電車線は温度変化により伸縮するため、引留箇所に張力調整装置を取り付け、支持点を電車線の移動が可能な構造（滑車支持、可動ブラケット支持）にするなどして、引留区間（以下、ドラムと記す）内の張力を一定に保つようになっている。しかしながら、支持点の構造によっては摩擦力などの線条の移動を抑制する抵抗力（以下、抑制抵抗と記す）が発生し、同一ドラム内でも径間毎の張力は必ずしも一定ではないと考えられている。

そこで本研究では、首都圏在来線で多く見られるき電ちょう架式電車線のちょう架線支持滑車の抑制抵抗について試験架線を用いてそのメカニズムを検討すると共に、営業線で張力や線条移動量を測定し抑制抵抗の実態調査をおこなった。また、抑制抵抗が集電特性へ及ぼす影響を調べるため、張力が変動した場合の集電特性を架線-パンタグラフ走行シミュレーションを用いて評価した。

2. 滑車支持方式の抑制抵抗

近年、首都圏における電車線は従来のシンプルカタナ

* 電力技術研究部（電車線構造）

** 東日本旅客鉄道株式会社

リ系架線からき電ちょう架式電車線に変わってきている。これはJR在来線ではインテグレート架線と呼ばれ、ちょう架線がPH356mm²:2条（1条あたり張力19.6kN）、トロリ線がGT-M-Sn170mm²（張力14.7kN）である。一般にちょう架線は支持点にて滑車で支持されており、引留箇所にはばね式自動張力調整装置（以下、STBと記す）がちょう架線、トロリ線それぞれに設置されている。

ちょう架線支持滑車は、図1に示すように1本のちょう架線を2個の滑車で支持する構造であり、50m径間では約1kNの荷重が1個当りの滑車に作用する。この滑車は、本体にポリカーボネート、軸接触面にはモリブデン入りナイロンが使用されており、軸はステンレス鋼製である。

滑車を回転させようとする力は滑車上面に働く。この力は温度伸縮等により隣接径間の線条に張力差が生じると発生し、この張力差によるモーメントが軸との静摩擦力によるモーメントに打ち勝つと滑車は回転を始める。

いま、図2のように滑車上面に張力差 ΔT が働くとき、滑車が回転し始める条件はモーメントの釣り合いから、



直線用滑車

曲線用滑車

図1 ちょう架線支持滑車

特集：電力技術

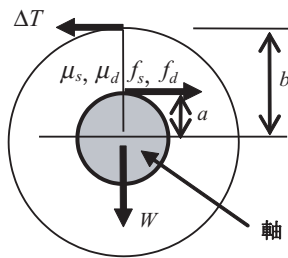


図2 滑車とこれに作用する力

$$b\Delta T > a f_s = a \mu_s W \quad (1)$$

となる。ここで、 f_s は静摩擦力、 μ_s は静摩擦係数、 W は滑車に加わる荷重、 a と b は軸中心から軸面までと滑車上面までの長さである。式(1)を変形すると、

$$\frac{\Delta T}{W} > \frac{a}{b} \mu_s \quad (2)$$

となる。一般に水平方向の外力を物体の荷重で割ることは摩擦係数を求めることになるが、滑車の外周面に作用する外力を滑車に加わる荷重で割ることは摩擦係数ではなく、軸と荷重点のモーメントを考慮に入れた別の係数を表すことになる。そこで、ここでは $\Delta T/W$ を抵抗係数と呼ぶことにする。抵抗係数は小さいほど見かけ上の摩擦係数が小さくなり、滑車は小さな力 ΔT で回転する。

滑車が回転し始めるとちょう架線は移動し、線条長さが変わるため径間内の張力も変化して、 ΔT は次第に小さくなる。この ΔT によるモーメントが軸面での動摩擦力によるモーメントより小さくなったとき、回転は停止する。

動摩擦力を f_d 、動摩擦係数を μ_d とすると、回転が停止する時の ΔT は式(1)と同様に

$$b\Delta T < a f_d = a \mu_d W \quad (3)$$

となる。このとき滑車に作用する張力差 ΔT は

$$\Delta T < \frac{a}{b} \mu_d W \quad (4)$$

となる。一般には $\Delta T > 0$ となり、滑車回転後も滑車両側の張力差 ΔT は残る。このように抑制抵抗と呼ばれるものは2種類あり、1つは回転させるために必要な張力差、もう1つは回転し終えたときに残る張力差である。

3. 抑制抵抗基礎試験

温度変化に伴う張力変化とちょう架線移動量を把握するため、滑車支持方式のき電ちょう架式電車線を鉄道総研構内に架設し、抑制抵抗に関する基礎試験を行った。

3.1 測定方法

試験架線の平面略図とセンサ配置を図3に示す。ちょう架線支持滑車は支持点①と⑥に曲線用、②～⑤には直

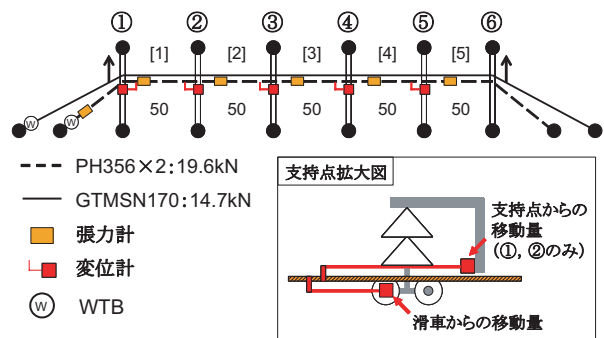


図3 試験架線とセンサ配置図

線用を用いた。ちょう架線に張力計を割り入れ、各径間の張力を測定するとともに、各支持滑車に変位計を取り付け、滑車が回転することにより生じるちょう架線の移動量を測定した。滑車が回転しなくても、がいしが傾くことによりちょう架線が移動することが考えられるため、支持点①と②では支持物から見たちょう架線の移動量を測定する変位計も取り付けた。また、がいしが傾かないように支持点に固定した状態での測定も行った。

3.2 測定結果

この測定結果より、以下のことが確認できた。

- (1) 1日の14°C程度の温度変化に伴い、滑車式自動張力調整装置(以下、WTBと記す)のある引留から径間[5]までの各径間の張力はWTBの張力変動も含め1.2～2.5kN程度変動し、その変動量はWTBから遠くなるほど大きかった。これは支持点での抑制抵抗により、張力調整がうまく行われていないためと考えられる。
- (2) 滑車回転に伴うちょう架線移動量は温度の小さな変化には追従せず、1日に2回程度大きく変動した。すなわち、滑車はある程度温度が変動して張力差が大きくなると回転しないことを確認した。WTBから離れるほどこの回転時の移動量は小さくなり、支持点⑤では1日に1回も動かない場合も見られた。
- (3) 支持物から見たちょう架線移動量は温度変化に追従した変動をしており、支持点②の変位量は1°C当たり5.3mmであった。これは約310mの電線の伸縮量に相当し、支持点②から支持点⑥方の引留までの距離(約300m)とほぼ一致する。この変動と(2)を併せて考えると、温度の小さな変動に伴うちょう架線の移動は滑車の回転ではなく、滑車を支持しているがいしが傾いたため発生したものと判断できる。
- (4) 滑車回転時は、滑車から見たちょう架線移動量が大きく変動するのに対し、支持物から見た移動量はその20～30%程度しか変動しなかった。このことから、滑車回転時はちょう架線が移動する動きよりも、傾いていたがいしが中立位置付近に戻る動きが主体であることがわかった。

- (5) 各支持点の張力差は温度変化に伴い徐々に大きくなり、滑車回転とともに急激に減少した。滑車回転時の張力差は約0.3kNであり、がいしの傾きだけでは張力差を吸収しきれなくなると滑車が回転するものと考えられる。
- (6) がいしが傾斜する場合は、がいしが傾斜しないよう固定した場合と比較して、滑車回転時の抑制抵抗で約0.1kN、回転後の抑制抵抗で約0.3kN小さかった。これは傾斜したががいしが重力により元に戻ろうとする復元力が張力差に加わるためであると考えられる。

4. ちょう架線支持滑車の抑制抵抗測定

支持滑車の抑制抵抗について調査し、その軽減策について検討するため、き電ちょう架線用支持滑車、ならびに各種電車線用滑車について抑制抵抗の測定を行った。

4.1 測定方法

測定装置の概要を図4に示す。PH356電線1条を50mスパンで2径間架設し、一方の引留には張力19.6kN用のSTBを、他方の引留には油圧式アクチュエータを設置した。中央の支持点には測定する滑車を取り付け、あわせて滑車に作用する垂直荷重を測定するためのロードセルを設置した。前述したようにちょう架線用支持滑車は架線1条分につき2個の滑車で支持する構造となっている。そのため、滑車そのものの特性を評価するためにこれを分解して1個の滑車単体とした場合と、分解せずちょう架線支持滑車金具とした場合について測定を行った。滑車単体を治具に取り付ける場合の軸には、通常使用されている軸材料と同じ材質であるステンレス鋼製のコッタボルトを用い、軸径も同じとした。

アクチュエータを一定速度で引く、あるいは押し出すと、アクチュエータ側径間の架線張力が増加、減少し、STB側の張力との差が抑制抵抗以上になると滑車が回転して架線が移動を開始する。架線移動中の張力差を抑制抵抗とし、これをそれぞれのスパンに割り入れたロードセルにより測定した。測定は「引く→15秒停止→押す→15秒停止」の動作を5回繰り返して行った。測定される張力差波形の略図を図5に示す。測定開始前の初期状態において、両スパンの張力差をゼロにすることが困難なため、引いている間の張力差平均と押し出している間の張力差平均の振幅を5回分平均し、その1/2を抑制抵抗として求めた。なお、アクチュエータの動作速度は約0.7mm/sとした。また、製品ごとの個体差も考慮して各滑車を3個ずつ測定して平均値を求めることを基本とし、滑車によってはPH356を支持するだけの幅が無いため、支持点の前後1.5mの部分に170mm²のトロリ線の割り入れを行った。これにより滑車にかかる荷重が若干変化するため、ここでは抵抗係数で滑車の回りにくさを評価した。

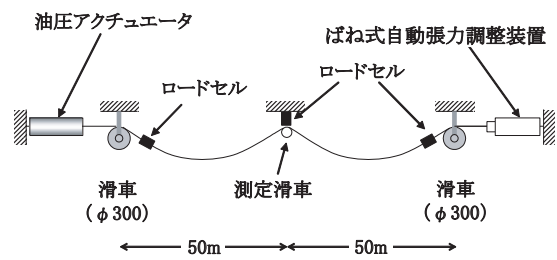


図4 抑制抵抗測定装置の概要

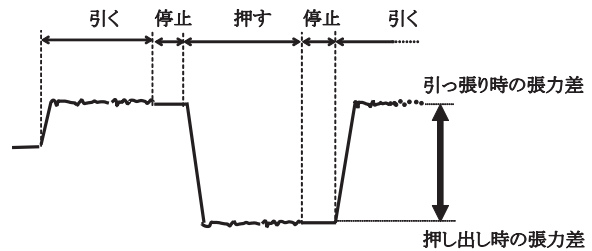


図5 張力差の波形

表1 抵抗係数測定結果

No.	滑車種別	軸接触面材質	内径/外径	抵抗係数	備考
1	PH356 × 2条直線用	モリブデン入りナイロン	0.50	0.085	
2	PH356 × 2条曲線用	モリブデン入りナイロン	0.30	0.061	
3	St90 ~ 135 × 1条用	ナイロン6	0.35	0.057	
4	St90 ~ 135 × 1条用	ステンレス	0.35	0.117	
5	曲線引滑車一般用	ボールベアリング	0.17	0.003	
6	支持金具 PH356 × 1条直線用	モリブデン入りナイロン	0.30	0.058	測定は1個のみ
7	支持金具 PH356 × 2条曲線用	モリブデン入りナイロン	0.30	0.138	測定は1個のみ

4.2 測定結果

抵抗係数の測定結果を表1に示す。表中の滑車単体とは分解して1個の滑車で支持した場合を、支持金具とは分解せずに支持した場合を示す。この結果からわかったことを以下にまとめる。

- (1) 滑車の材質が同じ場合、内径/外径の比(図2のa/b)が小さいほど、抵抗係数は減少する。【No.1, 2】
- (2) 滑車の形状が同じでも、軸接触面の材質により抵抗係数は大きく異なる。【No.3, 4】
- (3) ボールベアリングを軸受に用いた滑車は極端に抵抗係数が小さい。【No.5】
- (4) No.6, 7は共にNo.2の滑車を2個使用した支持金具であるが、No.6の抵抗係数がNo.2と同等であるのに対し、No.7では2倍以上となっている。No.6の金具は2個の滑車が遊びなく固定されている構造であるのに対し、No.7は曲線での横張力による傾きに対応するため滑車と金具の間に遊びがあり、これが抵抗係数の違いに大きな影響を与えていると考えられる。【No.2, 6, 7】

以上の結果から、抵抗係数を軽減するには内径/外径の縮小、適切な材質選択、遊びの小さな支持構造とすることが有効であると考えられる。なお、本測定ではトロリ線の重量および曲線での横張力等による滑車の横方向のこじれ等は含まれていないため、実架線ではこの結果より抵抗係数が大きくなるものと考えられる。

特集：電力技術

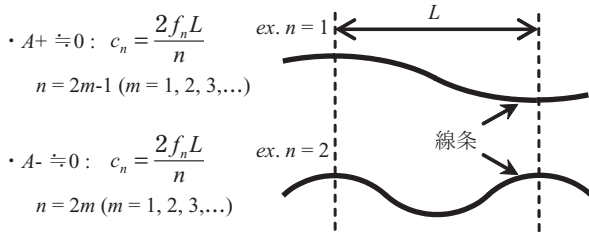


図6 2点の加速度と波動伝播速度の関係

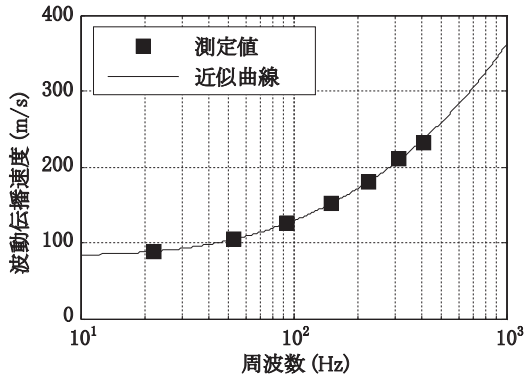


図7 電車線の波動伝播速度

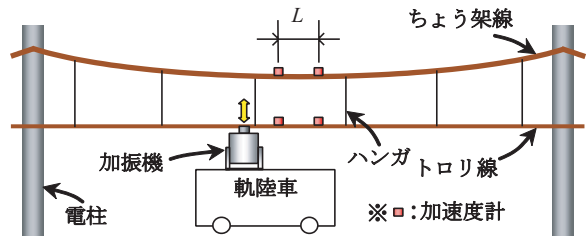


図8 張力測定概略図

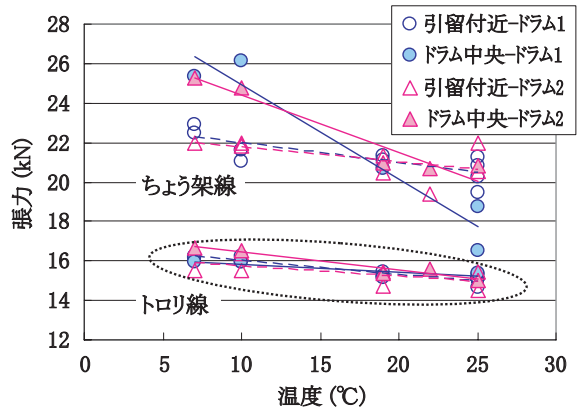


図9 滑車支持区間の張力測定結果

5. 営業線における張力実態調査

営業線における張力分布とちょう架線移動量の実態を把握するため、支持滑車方式のき電ちょう架式電車線区間において調査を行った。

5.1 電車線張力測定方法

営業線のちょう架線にロードセルを割り入れることはできないため、電車線を加振し、その応答波形から張力を求める方法¹⁾を用いて張力測定を行った。

図6に示すように、電車線を加振したときに距離Lだけ離れた2点における加速度を測定し、2点の加速度の和のパワースペクトル密度A+もしくは差のパワースペクトル密度A-が極小(≒0)となる周波数f_nを求め、この周波数における波動伝播速度c_nを求める。また、剛性と周波数を考慮した波動伝播速度cは次式で表される。

$$c = \sqrt{\frac{T + \sqrt{T^2 + 16\pi^2 \rho E I f^2}}{2\rho}} \quad (5)$$

ただし、ρ: 線密度、E: 縦弾性係数、I: 断面2次モーメント、T: 張力、f: 周波数である。

ここで、図7のように加振試験により求めた周波数f_nと波動伝播速度c_nの近似曲線を、式(5)を用いて求めることにより張力を同定することができる²⁾。

5.2 現地での張力測定

測定ドラムは曲線の多いドラム(測定ドラム1)と直線の多いドラム(測定ドラム2)の2つとし、1年間、計5回測定した。図8のように、径間中央付近のハンガ間でちょう架線およびトロリ線に加速度計を取り付け、軌陸車上に

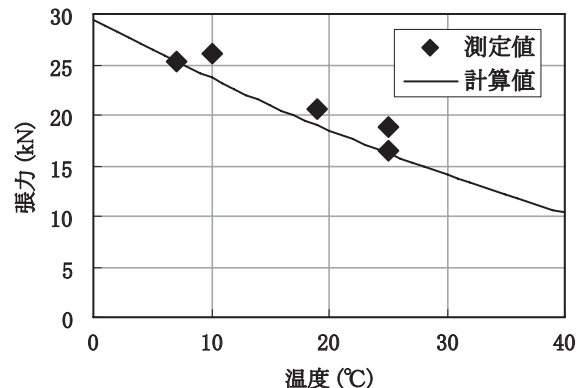


図10 張力理論値と測定結果の比較

設置した加振機でトロリ線を加振して測定を行った。

図9に張力測定結果を示す。ドラム中央付近では温度によりちょう架線張力が変動し、ドラム1の場合、25°Cで18kN程度、7°Cで26kN程度となり、夏と冬で8kN程度の差が見られた。一方、引留付近のちょう架線張力はSTBの張力変動によると思われる変化はあるものの、ドラム中央のような大きな張力変動は見られない。また、トロリ線については張力変動がほとんど見られなかった。

測定ドラム1のドラム中央の張力測定径間において、ちょう架線が両端固定、トロリ線張力が一定の条件でちょう架線張力を計算³⁾し、実測値と比較した結果を図10に示す。計算値は実測値とよい一致を示している。このことから、ドラム中央のちょう架線は両端固定状態となっており、線条の移動が行われていないために張力変動が発生しているものと考えられる。

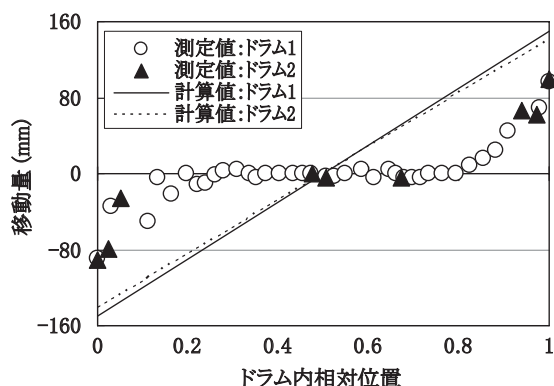


図 11 ちょう架線移動量測定結果
(2月：7℃ → 6月：19℃)

5.3 ちょう架線移動量測定

ちょう架線の温度伸縮による移動を調べるため、2月(7℃)に支持点箇所のちょう架線にマーキングし、6月(19℃)に滑車を基準としたマーキング箇所の移動量を測定した。図11に測定結果と抑制抵抗がない場合の移動量の計算値を示す。相対距離が0と1の測定値はSTBの目盛の移動量である。2つのドラムとも引留付近ではちょう架線がスムーズに移動しているが、ドラム中央付近ではほとんど移動していないことがわかる。

ドラム1の測定値を見ると、移動した支持点は10箇所程度である。つまり、引留から10径間内部に入った箇所では、ドラム中央の張力とほぼ等しくなっていることが推定される。図9を見ると、ドラム中央の張力は2月(7℃)の約26kNから6月(19℃)には約21kNまで5kN程度変動しており、引留付近の張力は約22kNから約21kNへと1kN程度変動している。温度変化による移動が認められた10径間はこの差し引き4kN分の張力変動とともにちょう架線が伸びたものと考えられ、4kNが10箇所の支持点で減少したと考えると、1箇所当たりの平均的な減少張力は0.4kNとなる。すなわち、これが滑車回転後に残る抑制抵抗といえる。

6. 抑制抵抗による張力変動を考慮した集電特性

これまでの検討から、支持滑車の抑制抵抗のためドラム中央付近では両端固定状態となり、大きな張力変動が発生していることがわかった。張力が変動すると弛度も変化することから、集電特性に大きな影響を与えられとされる。そこで両端固定状態で温度が変化した場合についてき電ちょう架式電車線の架線-パンタグラフ走行シミュレーションを実施し、集電特性を検討した。

6.1 シミュレーション条件

想定温度は最低温度の-10℃から最高温度の40℃の範囲とし、2つの温度に対応する張力を求めてそれを計算する上限と下限とし、その間を標準張力の19.6kNから±10%

表 2 パンタグラフ定数

	パンタグラフ A	パンタグラフ B
静押上力 (N)	64	64
等価質量 (kg)	$M_1=13.1, M_2=4.5, M_3=8.3$	$M_1=14.8, M_2=4.2, M_3=8.7$
ばね定数 (N/m)	$K_1=10720, K_2=21520$	$K_1=10740, K_2=21520$
ダンパ定数 (Ns/m)	$C_1=50, C_2=0, C_3=80$ (片効き)	$C_1=0, C_2=0, C_3=0$
パンタグラフ間隔 (m)	80, 120 (3 パンタ)	40, 40, 40 (4 パンタ)

ずつ(最低・最高温度付近は5%ずつ)変化させてパンタグラフを走行させた。径間長は30, 40, 50mとし、9径間とした。表2に示すように、パンタグラフは首都圏で多く走行している2種類を選定した。いずれも等価質量、ばね定数ともに大差ない構造であるが、最も大きな違いはパンタグラフダンパ(80Ns/m:片効き)の有無である。また、パンタグラフ数と間隔も表2に示すとおりであるが、進行方向によりパンタグラフ間隔が異なるため、ここでは両方向について計算した。走行速度は70~140km/hである。

6.2 シミュレーション結果

図12に-10℃(最低)、15℃(標準)、40℃(最高)における計算結果の例を示す。低温で張力が増加した場合にはトロリ線が上に凸となるホグ状態、高温で張力が低下した場合には下に凸となるサグ状態となっていることが分かる。特に張力が低い場合には支持点で大きな接触力が生じ、条件によっては標準状態の3倍近い接触力が発生するなど、集電特性の悪化が見られた。

集電特性上許容される張力変動について検討するため、集電性能の指標の一つである離線率および最大離線時間について評価を行った。前述したように標準温度から最低・最高温度まで張力を変化させながらシミュレーションを行い、離線率および最大離線時間のどちらかが目安値(5%, 200ms)を超えた時点で許容張力を超えたと判断し、その直前の張力を許容張力とした。許容張力をまとめた結果を図13に示す。ただし、白抜のプロットは想定した最低・最高温度における張力でも離線の目安値を超えなかったこと、すなわち離線という観点からは両端固定状態であっても想定温度内では走行に問題が無いことを示す。この最低・最高温度となっても目安値を超えない速度は、ダンパのあるパンタグラフAで120km/h程度まで、ダンパのないパンタグラフBで100km/h程度までであった。なお、このときの最高・最低張力は、30m径間で34.3kN・8.8kN、40m径間で32.3kN・10.8kN、50m径間で29.4kN・12.7kNである。

ただし、前述したように大きな離線は発生しなくても著大接触力が発生する可能性があり、トロリ線の局部摩耗を引き起こすことが懸念されるため、このような大きな張力変動は可能な限りその範囲を狭くする必要がある。そこで、上記の最高・最低張力になる径間をドラム中央だけに限るようにすることを考えてみる。ドラム長が1500mで50m径間が連続すると仮定すると、引留か

特集：電力技術

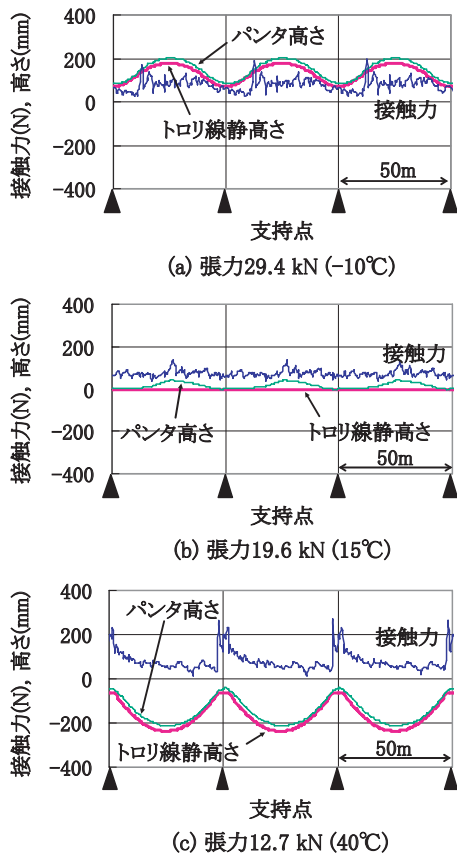


図12 シミュレーション波形の一例
(パンタグラフA, 110km/h)

らドラム中央までの支持点数は15箇所となる。標準張力(19.6kN)と最低張力(12.7kN)との差が6.9kNであるから、支持点1箇所当たりに許される抑制抵抗は0.46kNとなる。5章で求めた抑制抵抗0.4kNはこれよりやや小さいものの、さらなる高速走行において安定した集電を実現するためには、抑制抵抗の低減が必要となる。

7. まとめ

- (1) 抑制抵抗は左右径間の張力差として表され、滑車を回転させるための張力差と、回転し終えた時に残る張力差の2種類がある。
- (2) ちょう架線の移動は、小さな温度変化に対してはがいの傾斜によって発生する。温度変化が大きくなると滑車が回転するが、このとき傾斜していたがいは中立位置付近に戻る。
- (3) したがって、ちょう架線の移動は滑車の回転だけではなく、がいの傾斜も大きく寄与しており、がいが傾斜すると復元力が張力差に加わるため、抑制抵抗は小さくなる。
- (4) ちょう架線支持滑車の抵抗係数の低減には、内径/外径比の縮小、適切な材質選択、遊びのない支持構造とすることが有効である。

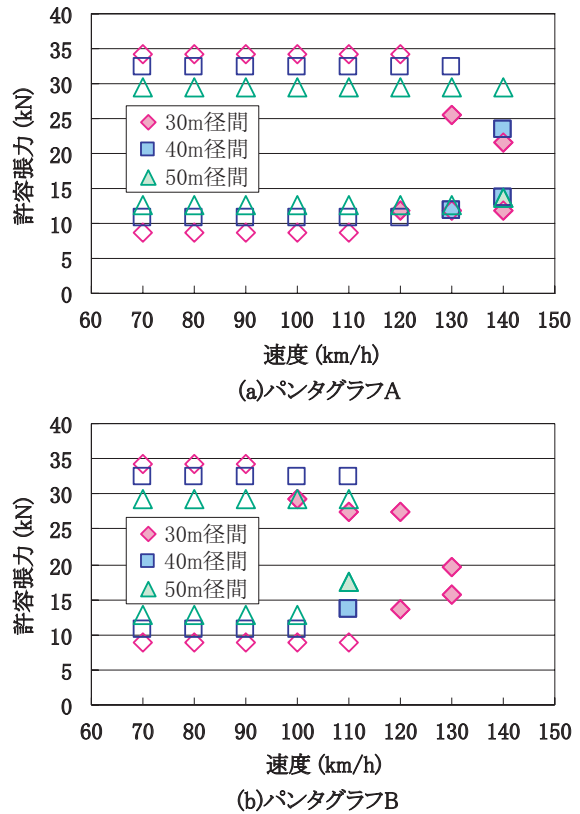


図13 離線特性から見た許容される張力
(白抜：最低・最高温度でも目安値内)

- (5) 実架線ではドラム中央の径間で大きな張力変動が発生しており、ちょう架線の移動も見られないことから、両端固定状態となっているものと考えられる。
- (6) 両端固定状態における最低・最高温度に対応する張力変動があった場合、離線の目安値を超えない速度はダンパのあるパンタグラフで120km/h、ダンパのないパンタグラフで100km/h程度までであるが、接触力の増大による摩耗の進行に注意が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご協力いただいた東日本旅客鉄道株式会社の関係各位に厚く御礼申し上げます。

文献

- 1) 網干光雄, 真鍋克士: トロリ線波動伝播速度の測定方法, 日本機械学会第74期全国大会講演論文集, Vol. IV, pp.425-426, 1996
- 2) 網干光雄: 凹凸精密測定によるトロリ線張力の計測法, 平成13年度電気学会全国大会講演論文集, Vol.5, pp.2132-2133, 2001
- 3) 鉄道総合技術研究所: 電車線とパンタグラフの特性, pp.24-28, 2005