

# ガスばね式張力調整装置における集電性能の評価

武藤 洋\* 清水 政利\* 佐藤 宏紀\*

Estimation of Current Collection Performance of Catenary System with Gas Spring Type Tensioning Device

Hiroshi MUTO Masatoshi SHIMIZU Koki SATO

The static geometry and current collection characteristics of overhead contact lines are affected by the influence of tension fluctuation which depends on the characteristics of the automatic tensioning device. In this paper, we clarified the influence of the properties of the automatic tensioning device, that of the catenary's geometry and condition upon the tension and height of the OCS and its current collection performance with a focus on the gas spring type automatic tensioning device (GSTB). We carried out numerical simulation to evaluate the structural fluctuation of the overhead contact line due to temperature change. As a result, it was ascertained that the heavy compound catenary system with the GSTB has sufficient current collection performance when trains run at a speed of 300 km/h or less.

キーワード：集電，張力調整装置，電車線張力，架線構成

## 1. はじめに

電車線の静的な構造や集電特性は、気温変化に起因する張力変動の影響を受けるが、近年採用が広がりつつあるガスばね式張力調整装置 (GSTB) を採用した場合の影響については明らかにされていない。

そこで、種々の電車線の条件 (線条の種類や引留長) や状態 (トロリ線摩耗, 温度) に対して、ガスばね式張力調整装置単体の特性が、電車線の静的な構造 (張力, 静高さ) や集電性能に及ぼす影響をシミュレーションによって明らかにした。また、この検討に当たり、ガスばね式張力調整装置の張力特性を詳細に評価し、採用した場合の張力計算が可能な手法を新たに構築した。

## 2. 従来の架線張力算出方法

ヘビーコンパウンド架線を含むカテナリ式電車線において、温度変化やトロリ線の断面積の変化 (以下、摩耗) により電線が伸縮すると、ヨークの傾斜および張力調整装置の特性に起因して総張力が変化する。従来用いられているヨーク単体の傾斜による張力変化の計算手法<sup>1)</sup>を応用して、2つの三角ヨークの傾斜および張力調整装置の特性を考慮した引留装置のモデルを構築し、各線条の張力変化を計算する手法が提案されている<sup>2)</sup>。ここでは、その計算方法の概要を述べる。

図1にヘビーコンパウンド架線の張力計算モデルを示す。考慮する諸元は、各線条について、温度  $t$ 、調整装置1基当たりが調整する長さ  $L$  (両引きの場合、引留長の半分)、張力  $T$ 、断面積  $A$ 、線膨張係数  $\alpha$ 、ヤング率  $E$

\* 電力技術研究部 電車線構造研究室

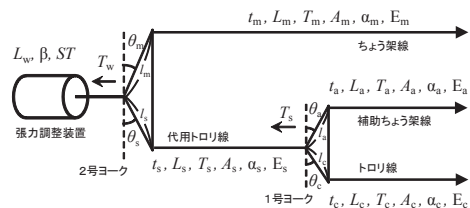


図1 張力計算モデル

である。添え字は、mをちよう架線、sを代用トロリ線、aを補助ちよう架線、cをトロリ線としている。三角ヨークの諸元は、ヨーク辺の長さ  $l$ 、ヨーク辺の角度  $\theta$  である。張力調整装置に関する諸元は、調整する架線全体の長さ  $L_w$ 、総張力  $T_w$ 、張力変動率  $\beta$ 、可動長  $ST$  である。

張力が作用している線条の温度、張力、断面積が変化するとき、添え字の1を初期値、添え字の2を変化後の値とすると、その長さの変化量は式(1)で表すことができ、各線条の諸元を与えることにより、長さの変化量を算出できる。三角ヨークにおける各線条の張力は、1号ヨークを例とすると式(2)で表され、上部と下部の線条の伸縮差によるヨークの傾斜により、張力の配分が変化する。

$$L_2 = L_1 \left\{ 1 + \alpha(t_2 - t_1) + \frac{1}{E} \left( \frac{T_2}{A_2} - \frac{T_1}{A_1} \right) \right\} \quad (1)$$

$$T_{c2} = T_{s2} \frac{l_a \cos \theta_{a2}}{l_c \cos \theta_{c2} + l_a \cos \theta_{a2}} \quad (2)$$

$$T_{a2} = T_{s2} \frac{l_c \cos \theta_{c2}}{l_c \cos \theta_{c2} + l_a \cos \theta_{a2}}$$

ここで、式(1)により計算された補助ちよう架線の長さ  $L_{a2}$  とトロリ線の長さ  $L_{c2}$  とすると、電線の伸縮とヨーク傾斜の関係は式(3)で表され、式(2)と式(3)によりヨークの傾斜角と各線条の張力が求められ、電線の伸縮量とヨークの傾斜角から1号ヨーク点の伸縮

特集：電力技術

量が求まる。2号ヨークについても、同様な考え方により各線の張力と2号ヨーク点の伸縮量を求めることができる。張力調整装置より与えられる総張力は式(4)で表され、架線全体の長さの変化量 $\Delta L_w$ に応じて変化する。実際の計算では、1号ヨーク、2号ヨーク、張力調整装置についての計算結果は相互に影響を与えるので、これらが一定値に収束するまで繰り返し計算を行うことにより、各電線の張力、長さ、ヨークの傾斜角、張力調整装置の変位を算出することができる。

$$L_{c2} - L_{a2} = l_c(\sin\theta_{c1} - \sin\theta_{c2}) - l_a(\sin\theta_{a1} - \sin\theta_{a2}) \quad (3)$$

$$T_{w2} = T_{w1} \left( 1 - \beta \frac{\Delta L_w}{ST/2} \right) \quad (4)$$

なお、新幹線の張力調整装置には、GSTBの他に重錘式自動張力調整装置(WTB)やばね式自動張力調整装置(STB)、トンネル用自動張力調整装置(TTB)などの種類があり、電車線の張力変動特性はそれぞれの張力調整装置の仕様の影響を受ける。本章の計算法はWTB、STB、TTBに適用可能である。さらに、張力調整装置の仕様上設定された張力変動特性に加え、張力調整装置の可動部の摩擦抵抗等を起因とするヒステリシスによっても張力変動が発生する。

### 3. ガスばね式張力調整装置の張力計算手法

#### 3.1 ガスばね式張力調整装置の構造、仕様、特徴

GSTBは、張力が架線全体の長さの変化量 $\Delta L_w$ だけでなくガス温度によっても変化するため、従来の計算方法では張力を計算ができない。本章では、GSTB単体の張力特性を表現する計算モデルを検討する。

GSTBの構造を図2に示す。GSTBはガススプリングと言われるガス圧で作用するスプリングを、金属の外筒で圧縮する形で収納している。このとき発生するガスの反発力を利用して、電車線に張力を与えている。

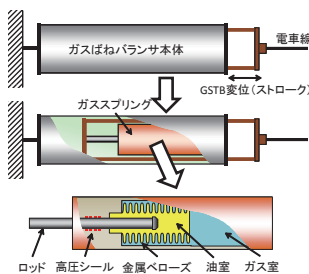


図2 GSTB 構造図

#### 3.2 GSTBの動作原理

GSTBの動作原理を図3に示す。標準温度時から温度が上昇すると、ガススプリング内のガスが膨張しGSTBのストロークが縮む。一方温度が下降すると、ガスが収縮してGSTBのストロークが伸びる。この温度変化に

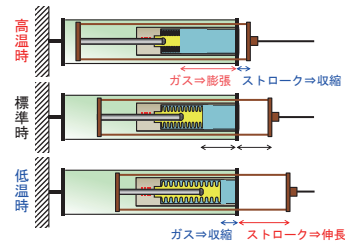


図3 GSTB 動作原理

よるストロークの変化量を電車線の伸縮量に合わせた仕様にすることで、ガスの圧力変化を抑えて、電車線の張力が一定になるようにしている<sup>3) 4)</sup>。

#### 3.3 理論式によるGSTB単体での張力計算方法

GSTB単体の張力計算方法について述べる。張力計算モデルを図4に示す。

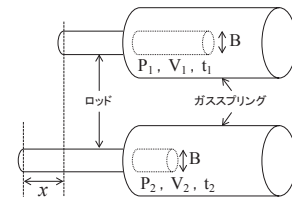


図4 GSTB 張力計算モデル

GSTBは内部にガスが封入されており、理想気体に近い性質であることから、ボイル・シャルルの法則より、式(5)が成り立つ。

$$\frac{P_1 V_1}{t_1} = \frac{P_2 V_2}{t_2} \quad (5)$$

ここで、 $P$ はガス圧力[Pa]、 $V$ はガス体積[m<sup>3</sup>]、 $t$ はガス温度[K]、各記号の添え字は1が初期値、2が変化後の値を意味する。次に、 $B$ をロッドの受圧部面積[m<sup>2</sup>]、 $x$ をロッドの初期(中立)状態からの変位量とすると、ガス体積の変化およびガス温度とロッドの変位が変化したときのガス圧力は式(6)、式(7)となる。

$$V_2 = V_1 + Bx \quad (6)$$

$$P_2 = \frac{P_1 t_2}{t_1} \left( \frac{V_1}{V_1 + Bx} \right) \quad (7)$$

ただし、ガス圧力 $P_1$ 、 $P_2$ は絶対圧力であるため、線条に与える張力としては相対圧力 $P_1'$ 、 $P_2'$ に換算して計算する必要がある。つまり、大気圧を $P_0$ [Pa]とすると、式(7)は次のようになる。

$$P_2' = \frac{(P_1' + P_0) t_2}{t_1} \left( \frac{V_1}{V_1 + Bx} \right) - P_0 \quad (8)$$

また、そのときの張力[N]を $T_2$ とすると、式(8)より次式が得られる。

$$T_2 = P_2' B = \left\{ \frac{(P_1' + P_0) t_2}{t_1} \left( \frac{V_1}{V_1 + Bx} \right) - P_0 \right\} B \quad (9)$$

以上が、GSTB単体の張力計算方法である。実際に

GSTBを設計する場合には、ロッドの変位量 $x$ が線条の温度変化による伸縮量に相当するものとして、温度が変化しても張力が一定になるように、ガス圧力やガス体積などを設定している。また、式(6)のガス体積変化については、ベローズ内部の作動油の熱膨張があることを考慮して計算をしている。

#### 4. 屋内定置試験での張力特性

##### 4.1 試験方法

鉄道総研の油圧式引張試験装置を用い、屋内にてGSTB(新品)の張力特性を確認した。試験は、GSTB変位を±100mm(伸び方向が+)の範囲で1往復させることにより行った。測定項目は張力、ガス圧力、GSTB変位およびGSTB外筒の表面温度である。試験概要図を図5に示す。この結果と3.3節に示す手法による結果を比較した。

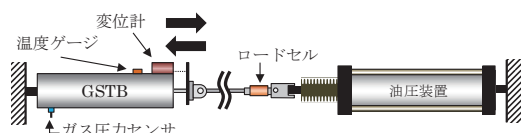


図5 引張試験概要図

##### 4.2 試験結果

図6に試験結果を示す。図6はGSTB変位-張力特性で、張力の実測値と計算値、実測したガス圧力から計算した張力(ガス圧換算張力)を示している。ここで、張力計算値はガス圧力の計算値とロッド受圧部面積の積であり、ガス圧換算張力はガス圧の実測値とロッド受圧部面積の積である。なお、屋内試験であり、気温の変動が小さいため、計算値はガス温度とGSTBの外筒表面温度が同じ温度として算出した。

張力計算値とガス圧換算張力値は概ね一致しており、本試験ではガス温度と外筒表面温度に大きな差はなかったと考えられる。また、ガス圧換算張力値は、0.8kN程度のヒステリシスループを描いた。

実測張力値はヒステリシスが大きく、ガス圧換算張力値を基準として、-2.0kN～+1.5kN程度の差があった。これは、GSTB可動部の摩擦抵抗等によるヒステリシスと考えられる。

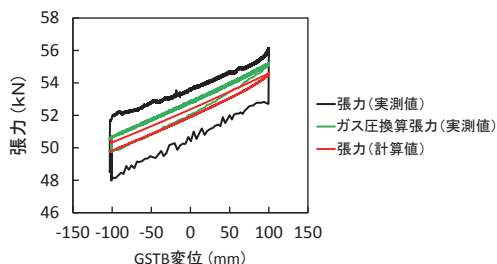


図6 引張試験結果

#### 5. 屋外定置試験での張力特性

##### 5.1 試験方法

GSTBガス温度特性を把握するため、屋外にGSTBを設置して特性を確認した。試験概要図を図7に示す。試験では、2種類のGSTB(試験品AおよびB)を鉄道総研の模擬架線電柱に設置し、外筒の表面温度(各GSTB)およびガス室内部温度(試験品B)、ガス圧力(試験品A)、模擬架線のトリ線温度を測定した。実際のガス温度測定は困難であるため、一方のGSTB(試験品B)のガス室に小さな穴をあけ、ガス室内部に温度ゲージを挿入したのち、外気が侵入しないよう密封することで、ガス室内部の温度を測定することとし、もう一方のGSTB(試験品A)のガス圧力を測定することで、ガス室内部の温度変化とガス圧力変化の時間変化を比較した。なお、各GSTB変位は最小(収納状態)とし、測定は7日間実施した。

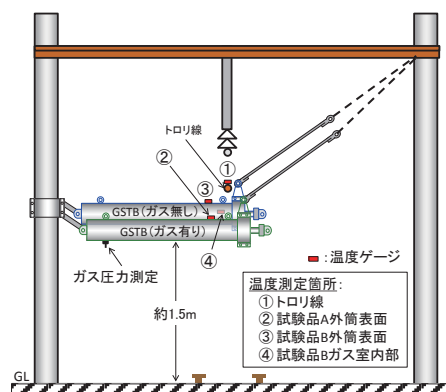


図7 温度特性試験概要図

##### 5.2 試験結果

図8に試験結果を示す。図8は測定したトリ線温度、試験品Aのガス圧力、試験品Bのガス室内部温度を示している。同時刻におけるトリ線温度に対する各測定箇所の温度は、試験品Aの外筒表面温度は-3.6℃～8.9℃、試験品Bの外筒表面温度は-3.0℃～8.8℃、試験品Bのガス室内部温度は-7.4℃～6.0℃の範囲で差がみられた。

次に、ガス圧力が各日において最大、最小となる時刻を基準として、トリ線ならびにガス室内部温度が各日において最大、最小となる時刻の差について、7日間の平均時間を表1に示す。この結果より、線条の温度とガ

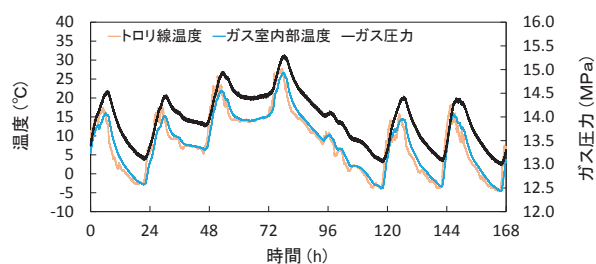


図8 温度とガス圧力の時間変化の比較

特集：電力技術

ス温度の差により張力差が生じることを考慮する必要があると考えられる。なお、ガス室内部温度とガス圧力の時間特性に差が見られた要因は、ガス室内部の温度が1点のみでの測定であり、ガス室内部全体の平均温度を正確に測定できていないこと等が考えられる。

表1 ガス圧力を基準としたトロリ線およびガス室温度のピーク時刻差

	最大値	最小値
	平均時刻差 [分]	平均時刻差 [分]
トロリ線温度	93	33
ガス室内部温度	25	5

6. 一般条件での張力変動特性

6.1 調整距離が仕様値と異なる場合

2章及び、3.3節の計算法により、電車線張力の変動特性について検討した。計算条件を表2に示す。この条件は新幹線の明かり区間を想定した条件である。計算の初期値は、温度が15°C、トロリ線が新線の条件で、ヨーク傾斜角を0°としている。温度範囲はA地区相当の15±25°Cとし、線条温度とGSTBのガス温度は同じとしている。GSTBは53.9kN用であり、これはちょう架線が鋼より線のヘビーコンパウンド架線であることを想定して設計されたものである。片側の架線長さ（実調整距離）は仕様上の標準調整距離（800m）に比べて100m短い場合、同じ場合、100m長い場合を想定した。

図9に温度が変化した場合の張力計算結果を示す。ここでの温度変化は、トロリ線温度および、ガス温度を同一として算出した。

総張力は、標準調整距離に対して架線長さが同じ場合はほぼ一定であるのに対し、架線長さが短い場合は温度に対して正の傾きになり、架線長さが長い場合は温度に

表2 計算条件

ちょう架線	St 180 (標準張力 19.6kN)
代用トロリ線	St 240 (標準張力 34.3kN)
補助ちょう架線	PH 150 (標準張力 14.7kN)
トロリ線	SNN-P 170 (標準張力 19.6kN)
三角ヨーク寸法 (初期値) l [mm] θ [°]	$l_m:364$ $l_s:224$ $\theta_m:16$ $\theta_s:27$ $l_a:93$ $l_c:73$ $\theta_a:22$ $\theta_c:29$
張力調整装置	GSTB (53.9kN用)
標準調整距離 [m]	800
標準 GSTB 変位 [mm]	± 365
架線長さ [m]	800 ± 100 (片側)
温度変化量 [°C]	15 ± 25
トロリ線残存直径 [mm]	初期値 (新線) : 15.49 変更値 (摩耗) : 12.50

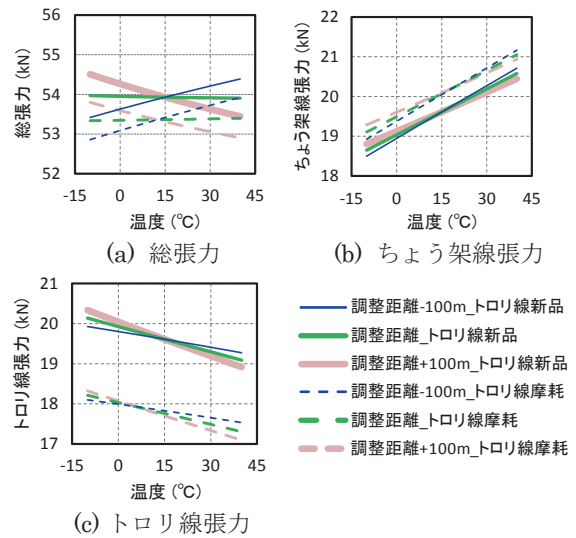


図9 調整距離が仕様値と異なる場合の張力計算結果

対して負の傾きになる。また、ちょう架線張力は架線長さが長いほど傾きが小さくなるのに対して、補助ちょう架線張力およびトロリ線張力は架線長さが長いほど傾きが大きくなる。トロリ線が摩耗した場合の同一温度における張力変化はトロリ線の弾性伸びによるものである。このように、架線長さが標準調整距離と一致しない場合、架線長さの変化量が GSTB の設計上想定している伸びと異なることで、ガス圧力が一定とならず張力が変化することを定量的に示すことができる。

6.2 ガス温度と線条温度が異なる場合

GSTB ガス温度と線条温度が異なる場合の張力変動特性を検討した。計算条件は表2と同じで、線条温度を15±25°Cの範囲で変化させたとき、ガス温度が線条温度と同じ場合と、ガス温度が線条温度に対して±5°Cおよび±10°C異なる場合の張力の温度特性を、架線長さ標準調整距離が一致する場合で張力計算した結果を図10に示す。また、温度が異なる場合の温度条件の考え方を図11に示す。線条温度と同様にガス温度も温度範囲を15±25°Cとし、線条温度の変化に追随するようにガス温度が変化すると考えて、張力計算を実施した。なお、線条温度の変化に伴う張力変動の方向を図10に矢印で示す。

各張力は、ガス温度が線条温度と同じ場合の張力を基準として、ガス温度が線条温度に比べて高い場合は高くなり、低い場合は低くなる。さらにガス温度と線条温度の差が大きいほど張力の変動幅も大きくなる。図10を参照することにより、こうした傾向を定量的に把握することができる。

6.3 摩擦抵抗等によるヒステリシスを考慮した場合

4.2節の屋内設置試験結果より、GSTBにおける実際の張力は、GSTB ガス圧力から換算される張力に、摩擦

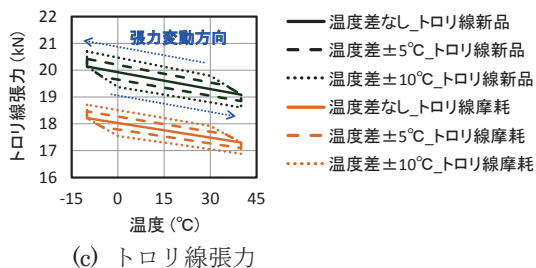
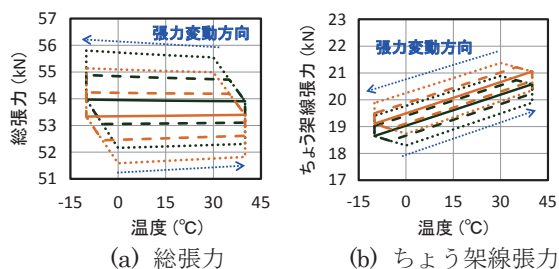


図 10 ガス温度が線条温度と異なる場合の張力計算結果

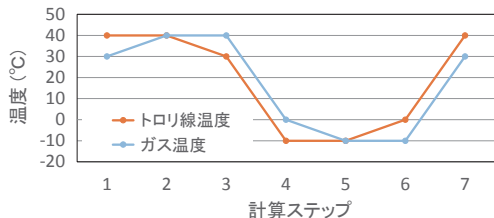


図 11 温度が異なる場合の温度条件の考え方

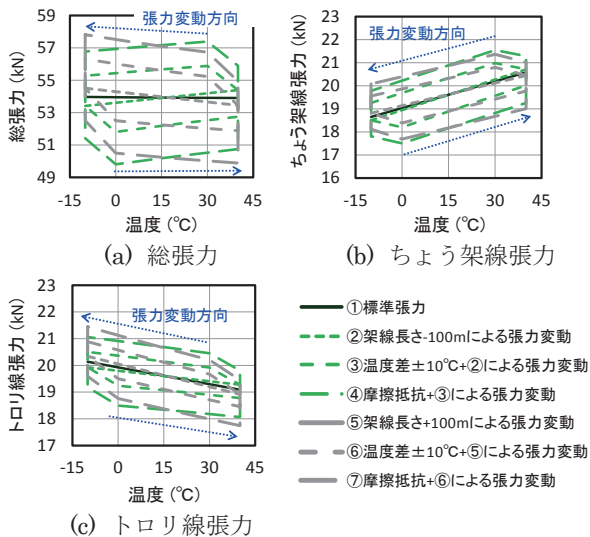


図 12 摩擦抵抗等によるヒステリシスを考慮した場合の張力計算結果（トロリ線新品時）

抵抗等を加算した値となるため、これを考慮した張力変動特性を検討した。計算例として、6.2節のガス温度が線条温度に対して±10℃異なる場合の計算結果に対して、架線全体の長さが縮む場合は+1.5kN、伸びる場合は-2.0kNのヒステリシスを加算した。このヒステリシスは4.2節の屋内定置試験結果に基づいた値である。トロリ線新品時の場合における張力計算結果を図12に示す。

### 6.4 張力変動特性のまとめ

張力計算結果について、標準張力に対する変動率を要因別にまとめたものを表3に示す。張力は総張力を $T_w$ 、ちょう架線張力を $T_M$ 、トロリ線張力を $T_T$ として示す。なお、想定されるGSTBの張力変動率とその他自動張力調整装置(WTB, TTB)の張力変動率については、大きな相違はない<sup>5)</sup>。

表 3 張力変動特性のまとめ

張力	トロリ線	標準張力に対する変動率 (%)		
		標準調整距離に対する架線長さの差(±100m)	ガス温度と線条温度の差(±10℃)	摩擦抵抗等
$T_w$	新品	99.1 ~ 101.1	95.6 ~ 104.5	91.9 ~ 107.3
	摩耗	98.1 ~ 100.0	94.7 ~ 103.1	90.9 ~ 105.9
$T_M$	新品	94.4 ~ 105.7	90.5 ~ 109.2	87.0 ~ 112.2
	摩耗	96.6 ~ 108.0	92.6 ~ 111.6	89.0 ~ 114.6
$T_T$	新品	96.5 ~ 103.8	94.1 ~ 106.6	90.5 ~ 109.4
	摩耗	87.2 ~ 93.5	85.2 ~ 96.0	81.8 ~ 98.6

## 7. 電車線構造変化と集電特性

### 7.1 電車線構造変化

GSTBを用いた場合に想定される電車線構造の変化について検討した。架線条件は表2と同じで、径間長は50mとした。電車線構造の変化を計算するにあたっての電車線張力は、6章の結果を用いた。これらを用いて、張力やトロリ線の残存直径が変化した場合のトロリ線支持点高さを架線構造計算プログラムにより算出し、標準張力におけるトロリ線支持点高さからの変化量を求めた結果を図13に示す。

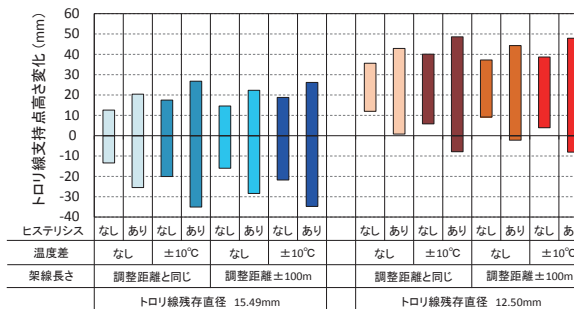


図 13 GSTB で想定される電車線構造変化

図13は、トロリ線高さ変動を小さくするためには、架線構造毎（線条種類）に適合するGSTBを用いること、GSTB調整距離と架線長さとの差を小さくすること、GSTBの摩擦抵抗等によるヒステリシスを小さくすることが有効であることを定量的に示すものである。このような検討を詳細に行うことにより、GSTBの選定を合理的に行うことが可能である。

### 7.2 集電特性

実線区にGSTBを用いた場合に想定される集電特性を検討するため、架線・パンタグラフ系の動的シミュレー

特集：電力技術

シジョンを行い、260～320km/h域における支持点のトロリ線押上量および、ひずみ量を算出した。電車線の諸元は表2とし、パンタグラフは図14の力学モデルとした。なお、パンタグラフについては、押上力Fは静押上力(54N)と揚力(走行速度300km/hにて、なびき方向は約37N、反なびき方向は約54N)を加え、パンタグラフ数は2個とし、その間隔を163mとした。また、表4にGSTBを想定した電車線条件を示す。

算出結果を図15に示す。集電性能はトロリ線押上量および、ひずみ量で評価し、その目安値はトロリ線押上量100mm以下、ひずみ量 $500 \times 10^{-6}$ 以下とした。いずれの走行速度においても押上量は目安値以内に収まるが、走行速度300km/hを超える条件では、ひずみ量が目安値( $500 \times 10^{-6}$ )を超える場合がある。これは、ガス温度が線条温度より低く、総張力が低下する場合に起こり、トンネル内のような温度差が発生しにくい環境では、ひずみ量も目安値以内に収まると考えられる。また、300km/h以下であれば、標準状態(試番A)のトロリ線押上量および、ひずみ量に対して、想定される張力変動条件(試番B～N)に応じて、押上量で±15mm程度、ひずみで± $170 \times 10^{-6}$ 程度の変化があるが、当該の走行速度におけるトロリ線押上量および、ひずみ量の最大値はいずれも目安値以内であった。なお、ばね $k_1$ (図14)より上の部位の質量が小さければ、追随性が向上するため、質量低減が可能な多分割すり板方式であれば、走行可能な速度域の向上が可能だと考える。

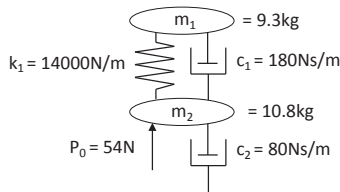
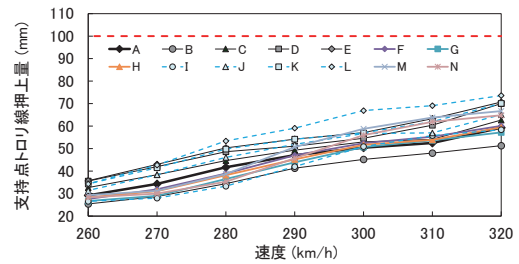


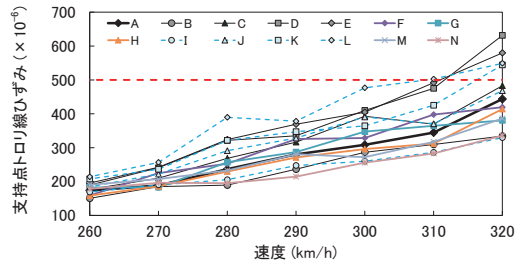
図14 パンタグラフの力学モデル

表4 電車線の条件

試番	条件				
	長さ	温度 [°C]		ヒステリシス	トロリ線
		トロリ線	ガス		
A	0	15	15	なし	新線
B	+100	-10	0	あり	新線
C	-100	-10	-10	あり	新線
D	-100	0	-10	あり	新線
E	+100	40	30	あり	新線
F	-100	40	40	あり	新線
G	-100	30	40	あり	新線
H	0	15	15	なし	摩耗
I	+100	-10	0	あり	摩耗
J	-100	-10	-10	あり	摩耗
K	-100	0	-10	あり	摩耗
L	+100	40	30	あり	摩耗
M	-100	40	40	あり	摩耗
N	-100	30	40	あり	摩耗



(a) 支持点のトロリ線押上量



(b) 支持点のトロリ線ひずみ量

図15 シミュレーションによる集電性能算出結果

また、種々の設計等において離隔等を検討する場合には、動的な押上量に加えて図13のような静的な電車線構造の変化も考慮する必要がある。

8. まとめ

- (1) GSTBを適用した場合の温度変化に伴う電車線張力の変動を、ガス圧力、仕様上の調整距離と実調整距離との差、ガス温度と線条温度の差、GSTBの摩擦抵抗を考慮した上で詳細に評価する手法を提案した。
- (2) 新幹線のヘビーコンパウンド架線にGSTBを適用した場合について、多分割すり板方式ではないパンタグラフ条件を想定した上で気温が標準15°Cに対して±25°C変化したときの集電性能を評価したところ、標準状態に対して、トロリ線押上量で±15mm程度、トロリ線の支持点ひずみで± $170 \times 10^{-6}$ 程度変動するが、走行速度300km/h以下ではトロリ線押上量および、ひずみ量の最大値はいずれも目安値以内であった。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：電車線とパンタグラフの特性，研友社，pp.15-20，1993
- 2) 神保圭佑，常本瑞樹，清水政利，齋藤真吾：電車線の張力変動特性，鉄道技術連合シンポジウム，pp.2-3，2014
- 3) 打越徹：テーマ技術資料 ガスばねバランスの開発，鉄道と電気技術，Vol.11，No.1，pp.49-53，2000
- 4) 一般社団法人日本鉄道電気技術協会：ガスばねバランスの構造について，電車線技術進展のあゆみ，p.47，2009
- 5) 常本瑞樹：温度変化とトロリ線摩擦が集電性能に与える影響の評価，鉄道総研月例発表会講演要旨，No.286，pp.1-2，2015