

パンタグラフ接触力測定システムの開発とデータの活用



岩井中 篤史* 佐藤 文久* 出野 市郎*

パンタグラフは架線と常に接触し、相互に力を作用し合いながら走行している。同じパンタグラフが走行しても、速度や環境条件、架線構成やその状態によってパンタグラフが受ける力は変わる。つまり、パンタグラフが架線と接触する力が分かれば、架線状態に関する情報を取得することができるとも言える。本稿では、パンタグラフ接触力を正確に測定する技術、および絶縁性能の高い光ファイバセンサを用いることによって検測車に搭載可能なシステムを紹介する。また、接触力測定データと架線の静的データの関係、設備状態診断や集電性能解析に活用できる情報等について記述する。

●キーワード：トロリ線、パンタグラフ、接触力、光ファイバセンサ

1 はじめに

架線・パンタグラフの境界領域において、トロリ線とパンタグラフは常時互いに作用し合いながら接触・摺動している。接触している状態では、自分の持っている情報を相手に与えあっていると見える。例えば、重い金具によりトロリ線が多少下がっているような状態では、「パンタグラフへの衝撃」という形、また過大な揚力を発生しているパンタグラフからは、「架線に大きな押上量が発生」という形で情報が与えられる。逆に互いに健全な状態であれば、定常的な測定値が観測される。このように、互いのモニタリングによってそれぞれの健全性を評価することができる。

本稿では新幹線のパンタグラフを対象に、微妙な架線の状態を診断し、設備の構成不具合箇所や摩耗進行予想箇所等の発見により、日常保全に役立てるパンタグラフ接触力測定システムの構成とそのデータの活用について言及する。

2 パンタグラフ接触力

パンタグラフ接触力とはどのようなものか。簡単に言えば、トロリ線とパンタグラフが接触している力(またはその変動)のことである。接触力が常に一定であれば、離線(パンタグラフが架線から離れる現象)せずに良好な状態で集電できるが、実際には高速になるほど接触力の変動が大きくなる。なぜなら図1のように架線設備には、曲線引金具やハンガ、コネクタといった金具が取り付けられており、トロリ線摩耗や勾配により高さも微

妙に変化しているため、その力学的性質は一様ではなく、接触力は常に変動するからである。

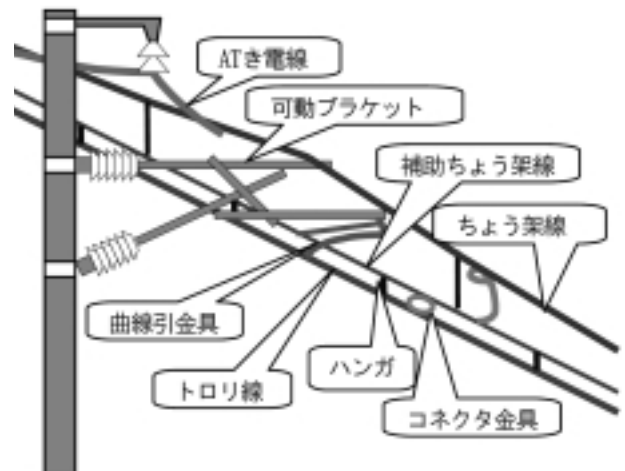


図1：架線設備(新幹線の例)

欧州ではドイツを中心に従来から行われており、架線性能評価に使用されてきた接触力測定であるが、日本では近年まで行われてこなかった。その理由は、

- 1) 日本では集電性能は離線率によって行われており、それで不都合は生じていなかった。
- 2) 欧州の測定用センサのような形状では、騒音源となるため、日本のパンタグラフ形状に見合った測定方法を開発しなければ測定できなかった。

等である。

しかし最近、鉄道総研等により接触力測定手法が開発されてきており、また離線というONかOFFかの2値による評価だけではなく、接触力という数値により評価を行い、より高度な保全を行いたい、というニーズから接触力による評価の研究が行わ

れてきている。

これらの背景により、JR東日本においても、新幹線電気軌道総合試験車(以下East-i)に搭載し、接触力測定可能なシステムの実現を目指して開発を行った。



(a)ドイツICE (b)東北新幹線E3系

図2：欧州と日本のパンタグラフの違い

3 パンタグラフ接触力測定方法

3.1 パンタグラフ接触力測定原理

パンタグラフ接触力を測定する方法は、菱形パンタグラフとシングルアーム型パンタグラフでは若干異なる。またシングルアーム型パンタグラフであっても形式によりセンサ取付位置等が変わる。ここではEast-iに搭載されているPS206型パンタグラフの測定原理について述べる。

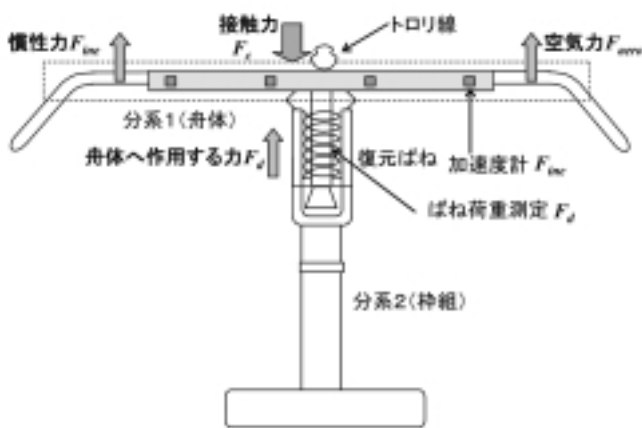


図3：パンタグラフ接触力の測定原理

図3のようにシングルアーム型パンタグラフをトロリ線と摺動する分系1(舟体部分)とそれ以外の枠組部分分系2(枠組部分)に分け、垂直方向に作用する力に着目する。分系2から分系1へ働く力を F_d 、分系1に作用する全慣性力を F_{ine} 、分系1に作用する全空気力(主に舟体の揚力)を F_{aero} とすると、図3より接触力 F_c は

$$F_c = F_{ine} + F_d + F_{aero} \dots (1)$$

と表すことができる。

分系1と分系2の間に作用する力 F_d は、復元ばねに生じる荷重を荷重センサ等で測定する。分系1の慣性力 F_{ine} は舟体に複数個の加速度計を取り付け測定することにより求められる。しかし分系1の空気力 F_{aero} を直接測定することは、このパンタグラフでは難しいため、 F_{aero} については、速度や環境条件によって補正を行うこととなる。これらの測定および計算により接触力が算出される。

3.2 計算式

処理を行う計算式を式(2)に示す。舟体加速度 y_n およびばね変位 y_c は、列車走行中にリアルタイムで実測するデータであるが、その他の定数については、各パンタグラフ固有の数値であり、走行前の計測により求めておく必要がある。またばね速度 y_c はばね変位 y_c の一回微分により求める。なお、式(2)の計算は図4に示すデータ処理装置にて自動的に行うことができる。

$$F = K(1 + gi)y_c + C \dot{y}_c + m \sum_{n=1}^4 \omega_n \ddot{y}_n \dots (2)$$

- F : 接触力
- $y_n, \dot{y}_n, \ddot{y}_n$: 舟体と枠との相対上下変位、速度、加速度
- y_c : 各加速度計取付位置の上下加速度
- ω_n : 加速度重み係数 ($\sum \omega_n = 1$)
- K : 復元ばね定数
- g : 複素ばね定数
- i : 虚数単位
- C : 速度比例減衰定数
- m : 舟体質量



図4：パンタグラフ接触力データ処理装置

4 検測車搭載システム

4.1 接触力測定における課題

前章で述べたように、接触力測定を行うには、加速度計やばね荷重を測定できるセンサが必要となる。これらのセンサは、走行時の安全確保や騒音発生源とならないように、舟体にあらかじめ内蔵する必要があるため、車上で容易に取り付けられるものではない。また、センサは25kVの特別高圧部に取り付けられ

ているため、そのままケーブルにて車内にデータを伝送するわけにはいかず、テレメータ装置によって無線にてデータを伝送するのが一般的である。しかし、テレメータ装置の車両への仮設、その電源として使用しているバッテリー交換が頻繁に必要なこと等が測定作業を煩雑なものとしている。(図5参照)

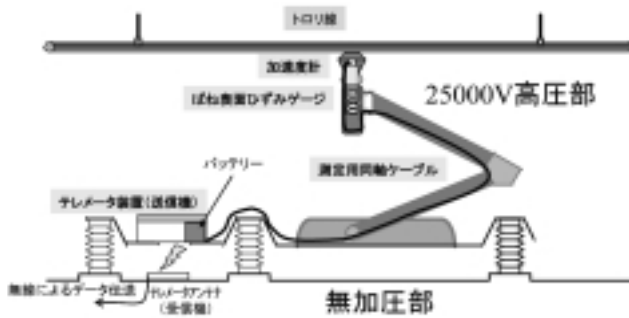


図5：従来の接触力測定システム

4.2 光ファイバセンサによる測定システム

これらの問題を解消するために、センサを全て光ファイバ方式とし、テレメータ装置を使用しないシステムの開発を行った。2004年1月にEast-iiに搭載し、センサの使用可否を見極める現車試験を行い、同10月には光ファイバセンサのみを用いた接触力測定システムの現車試験を行った。光ファイバセンサを用いたシステムの概要と現車試験の様子を、図6、図7にそれぞれ示す。

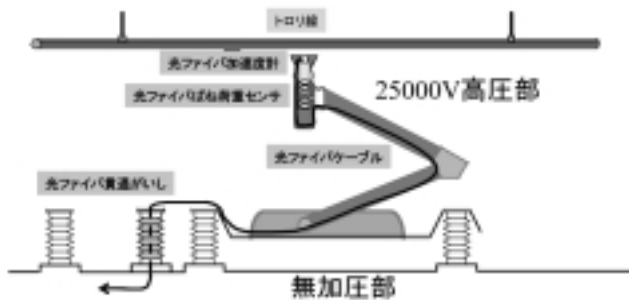


図6：光ファイバセンサを用いた接触力測定システム



図7：光ファイバセンサによる接触力測定現車試験



図8：光ファイバ加速度計



図9：光ファイバ荷重センサ

図8に示す舟体に取り付ける光ファイバ加速度計は、従来のひずみ式加速度計と同様、0~100Hz程度まで精度良く測定できる。また、ばね荷重を測定する光ファイバ荷重センサを図9に示す。本センサは、ばね荷重を支えるばね受け部に組み込み、センサに加わる荷重を光ファイバにより伝送するものである。

4.3 検測車への本搭載に向けて

光ファイバセンサによる接触力測定システムは、絶縁性能が高く、また保守に手間がかからないのでEast-iiに搭載するにはふさわしいと言える。これにより、日常的に測定できる接触力測定システムの実現が可能となる。ただし、光ファイバセンサの安定度の向上や、温度による出力値のドリフト現象の低減等の課題も若干残っている。また架設時には、光ファイバケーブルを損傷させないように十分注意しなければならない。

5 接触力測定データの活用

5.1 接触力測定と架線設備診断

2章でも述べたように、パンタグラフ接触力は、速度に比例して増加する傾向にあるが、同じ速度であっても、架線高さ構成や偏位の不具合等構成が良好でない場合に、他の良好な箇所とは異なりより大きな測定値が観測される。このような箇所では、トロリ線の摩耗が進行しやすいので、早めに情報を取得し、その原因となるものを取り除くことが望ましい。接触力測定データより、その判別を行う研究を行っているので以下に紹介する。

大きな接触力が観測される地点は主に、約1kmごとに存在するオーバーラップ箇所と約40~50mごとに存在する支持点箇所である。オーバーラップ箇所は架線が入れ替わる箇所であり、パンタグラフ側から見ると現在摺動しているトリ線（移行前A線）から、新しいトリ線（移行後B線）に接触し始めるときの衝撃によるもの（図10参照）、一方支持点箇所では、架線金具の重量による上下反力（いわゆる架線硬点）によるものが主な原因となる。数値的には、オーバーラップ箇所の方が大きな値が測定されやすく、両者を分けて考える必要がある。

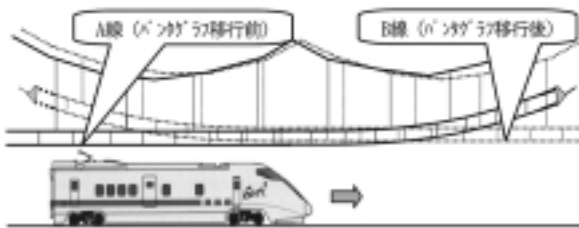


図10：オーバーラップ構成図と実際の設備

5.2 接触力によるオーバーラップ診断

2003年6月に東北新幹線の新白河・郡山間においてE3系電車にて340km/hの高速走行試験を実施した。そのときの接触力測定チャート例を図11に、オーバーラップ通過時の測定結果を表1に示す。その後、各箇所において保守用車を使用した架線の精密測定を行い、オーバーラップ構成と接触力の関係についても調査を行った。

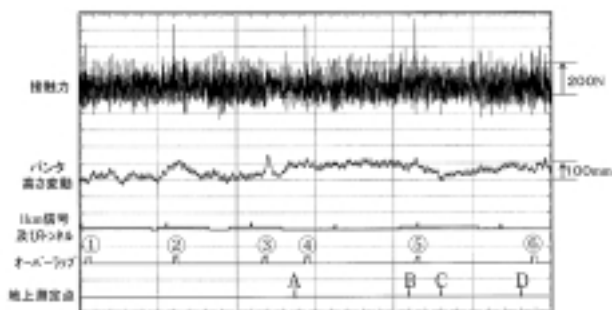


図11：接触力測定波形（E3系340km/h走行）

表1：各オーバーラップ箇所の接触力測定値

オーバーラップ 番号	接触力測定値	
	340km/h 1走行目	340km/h 2走行目
①	344N	314N
②	426N	430N
③	239N	229N
④	426N	424N
⑤	510N	467N
⑥	259N	272N

2走行行った結果を比較した場合、どの箇所においても、1走行目と2走行目で測定値の差は10%以内であり、接触力測定には再現性があり、また設備状態と接触力の相関は十分あると言える。図11において、接触力の最も大きい⑤と、比較的値の小さい③について架線構成を精密に測定した結果を図12、図13に示す。⑤の箇所では、パンタグラフ移行箇所やや吊りあがっていると同時に、B線側の架線が低くなっていた。このため移行時にパンタグラフ・架線に大きな力が加わり、トリ線の局部摩耗も進行していることが分かる。逆に③の箇所では、良好な構成となっており、摩耗進行も進んでいない。その他の箇所においても、概ね接触力が大きい箇所は、架線構成があまり良くないことが判明した。

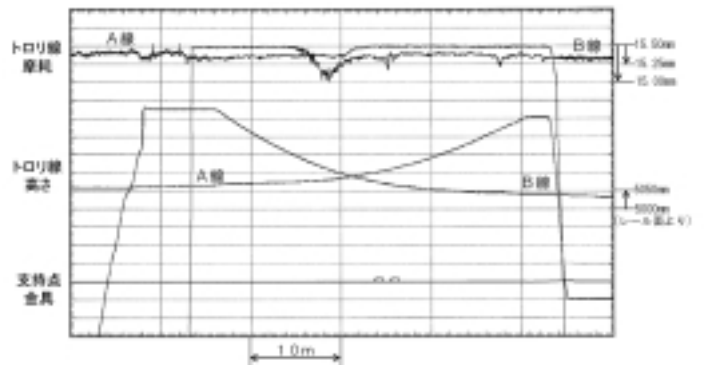


図12：架線精密測定結果（オーバーラップ⑤）

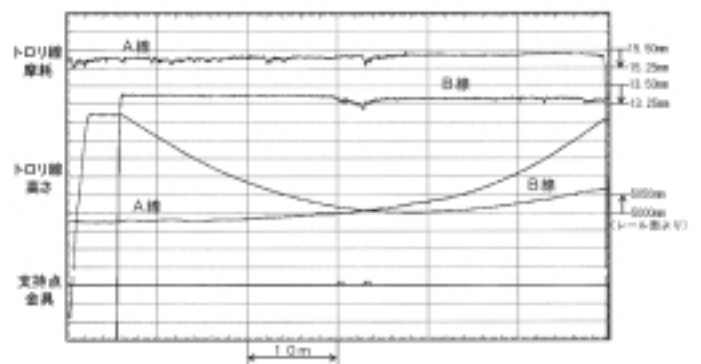


図13：架線精密測定結果（オーバーラップ③）

しかし、例外箇所も存在する。図14に示す⑥のオーバーラップ箇所では大きな接触力が記録されていないが、架線構成はB線側が低くなっており、一般的にあまり良好ではないといわれているものである。この原因として、離線気味で走行していた場合等も考えられることから、さらに多くのオーバーラップでのデータ比較を行っていく必要がある。

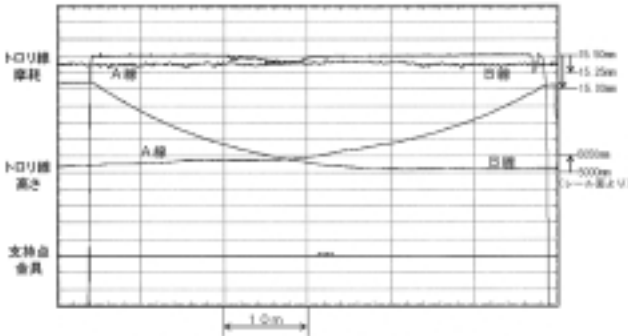


図14：架線精密測定結果（オーバーラップ⑥）

5.3 接触力とトロリ線ひずみ

通常の保全ではあまり測定しないが、速度向上試験等で集電性能評価のために測定される重要項目にトロリ線ひずみがある。トロリ線ひずみは、パンタグラフの押上力により、トロリ線が微小変形するものであり、過大な応力が繰り返し与えられると、疲労断線の危険性があるので、注意しなければならない。このトロリ線ひずみと接触力の間には、シミュレーション上でも密接な関係にあることが分かっているが、測定結果からも強い相関関係があることが分かってきた。

2003年6月の高速走行試験では、図11のA～Dに示す4箇所の定点にて、トロリ線押上量やひずみ等を測定している。これらの4点はそれぞれ

- (A) 析出強化型銅合金トロリ線PHC130mm²架設箇所
- (B) 明かり区間STB(ばねバランサ)架設ドラム
- (C) トンネル箇所
- (D) 明かり一般箇所

である(図15参照)。



図6：光ファイバセンサを用いた接触力測定システム

各測定点におけるパンタグラフが通過したときのトロリ線ひず

みと接触力の関係を図16に示す。接触力とトロリ線ひずみは、測定結果からもほぼ比例関係にあることが分かる。このことは、今まで定点でしか測定できなかったトロリ線ひずみを、接触力により連続的に測定・解析できる可能性を示唆しており、保全上また集電性能解析上、非常に有用な技術であると言える。

今後も他の測定例の解析結果等を分析し、関係を明確にし、この技術を実用化していきたいと考えている。

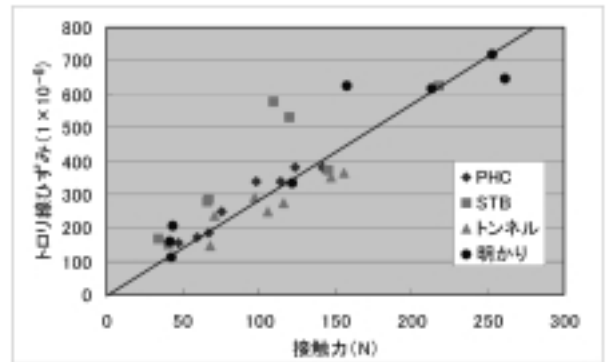


図16：接触力とトロリ線ひずみの関係

6 まとめ

本稿では、接触力測定の目的、測定原理、検測車に搭載可能な光ファイバセンサによる測定システム、接触力測定データの活用法について述べてきた。光ファイバセンサによる測定技術は、機能の確認を終えたばかりであり、温度ドリフト対策やセンサの安定性の向上等が求められる。また測定データの活用においては、架線設備状態と接触力の関係をさらに深く分析し、対処法を提示する必要がある。

この研究を進めていくには、接触力を日常的に測定し、数多くのデータを蓄積することが必要不可欠であり、今後も鋭意取り組みんでいく所存である。

参考文献

- 1) 長坂他2名：日本機械学会2001年度年次大会講演論文集(IV) pp167、2001.8
- 2) 池田、長坂：鉄道総研報告Vol.16、No.6、2002.6
- 3) 池田：鉄道と電気技術Vol.14、No.10、pp46、2003.10
- 4) 岩井中他2名：第10回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 pp553、2003.12