

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 電気鉄道への安定した電力供給を支える技術

輸送量・車両数からみて、現在の鉄道の主役は電気鉄道です。電車線路設備とパンタグラフは駅のホームから視認されやすいこともあり、その存在はお客様からも十分に認識されています。しかし、電車線路設備の実態や電力を供給する変電設備の技術は裏方の存在となっています。ここでは電気鉄道への安定した電力供給を支える技術として、電車線路設備と変電設備の概要と技術進展を概説します。



**兎束 哲夫**  
 Tetsuo Uzuka  
 電力技術研究部  
 部長  
 【専門分野】 交流き電方式、省エネルギー

## 電気鉄道の現況

2016年4月現在の日本における鉄道営業キロは約25,200km、うちJRが約17,400kmを占めています。このうち電化距離は約15,900kmで電化率は63%となっており、これらは約1,800箇所のき電用変電所から電力が供給されています<sup>1)</sup>。また電車線の長さは約19,000km、配電線は75,000km、これらを支える電車線支持物（電化柱）は約85万本となっています<sup>2)</sup>。これら電力設備の概念を図1に示します。

鉄道全体の旅客輸送実績としては年間約420,000百万人キロに達しており、これは航空・船・バスなどを含む公共輸送機関の旅客輸送分担率で約72%に相当します。自家用車を含む国内全旅客輸送においても鉄道が占める割合は、2012年度の人キロベースで28.6%を占めています。

2016年4月現在の旅客営業用車両数は、JRが約25,000両、大手民鉄および公営事業者が約22,000両、中小民鉄が5,000両の合計約52,000両です。うち50,000両弱が電車と大半であり、旅客輸送量のほとんどは電車によっていることがわかります。地方都市間輸送や

ローカル輸送を担当する内燃動車は約2,700両が活躍しています。また、約900両の機関車のうち半数が電気機関車であり、約11,000両の貨車が年間に約200億トンキロの輸送実績を持っており、航空・船・自動車などを含む全貨物輸送分担率で約5%に相当します。

このように、現在の日本においては鉄道輸送の主体は電気鉄道による輸送となっています。

## 電気鉄道の歴史と技術開発

ここで電気鉄道の歴史と技術開発を簡単に振り返ってみましょう。

国鉄・JRの電化距離に電車数を加えた推移を図2に示します。20世紀初頭から直流き電方式の鉄道電化が開始され、1950年代後半に開始された交流き電方式とともに急速に伸び続け、1980年代からは伸びが鈍化しました。新幹線は1964年の東海道新幹線から約10年ごとに新区間開業が続く、整備新幹線は21世紀になってからも2016年春の北海道新幹線まで伸び続けています。

電車数は1950年代から一貫して増え続けています。図2からは、21世紀

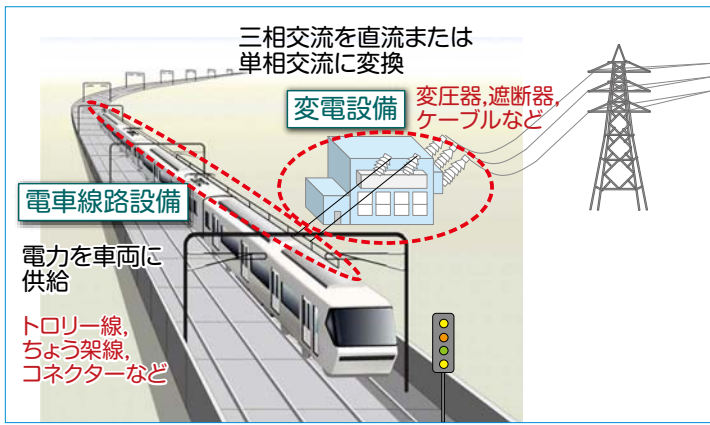


図1 鉄道電力設備

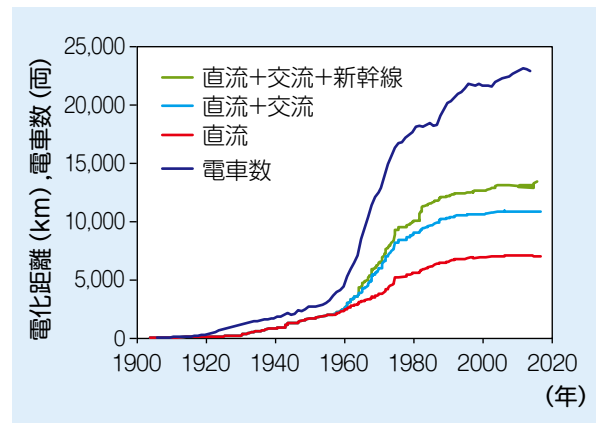


図2 国鉄・JR電化距離と電車数の推移

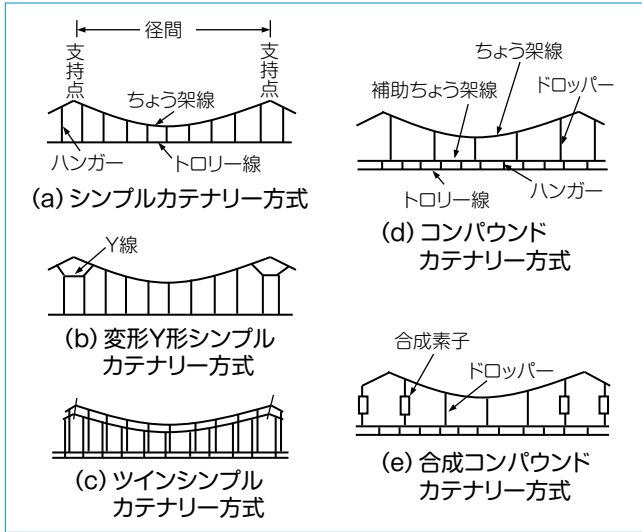


図3 各種カテナリーちょう架方式

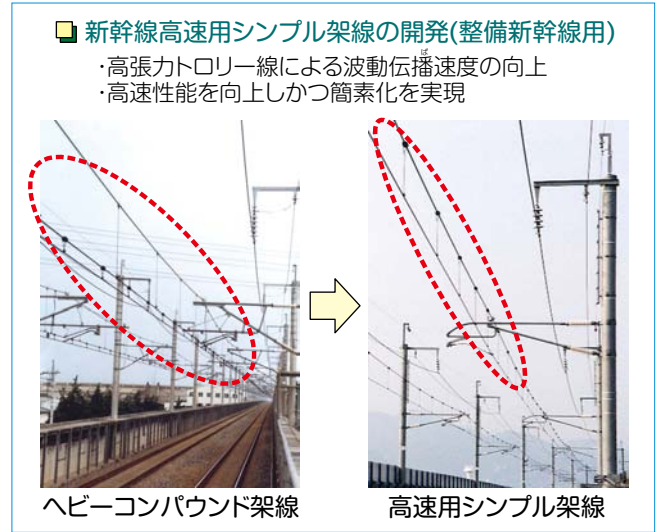


図4 新幹線の高速用シンプル架線

入って電化距離が頭打ちになってからも電車が 증가していることがわかります。これは、鉄道事業者が進めている列車増発や長編成化による混雑緩和の状況を表しています。

電気車(電車と電気機関車の総称)に向けて電力を送り出す変電所機器は、当初はアメリカ・欧州からの輸入でした。1920年代から国産化が開始され、第二次世界大戦後は基本的に国産となっています。具体的には1950年代のシリコン整流器、同時期の交流き電方式、1964年の東海道新幹線開業に伴う大電力対応、1970年代の交流AT(自動変圧器)式き電方式と、1960年代から1970年代の大量建設時代にその基盤技術が固められました。1980年代からは制御機器のデジタル化とネットワーク化、1990年前後からは

パワーエレクトロニクス機器の導入が開始されました。

電車線路設備は、電気車のパンタグラフと接触し、スムーズにしゅう動しながら電力を供給するトロリー線を中心として、高速化と大容量化に対応しながらメンテナンス作業の軽減に努めて発展しました。トロリー線一本の直ちょう架線から始まって、張力を与えたトロリー線とちょう架線の電線二本からなるシンプルカテナリー方式(図3a)が標準となり、大都市圏では電流容量が大きいシンプルカテナリー架線を二組並べたツインシンプルカテナリー(図3c)が使われました。1990年代以降は、メンテナンス作業の軽減を考慮して部品点数を削減したき電ちょう架線方式が広く使われています。

1964年の東海道新幹線では電線三

本で構成される合成コンパウンド架線(図3e)が採用され、1972年の山陽新幹線では張力を向上したヘビーコンパウンド架線に発展しました。1997年の北陸新幹線長野開業からは経済性の視点からシンプルカテナリー方式が用いられ、近年では既開業の新幹線のシンプルカテナリー方式への変更も計画されています(図4)。電車線支持物は当初の木柱から鉄柱、コンクリート柱と主役が変転し、新設区間では耐震性向上のために鋼管柱が採用されています。

強度と導電性の両立が求められるトロリー線の材料開発では、純銅(GT: Grooved Trolley)から錫入り銅(GT-Sn)、鉄鋼と銅との複合材料(CS: Copper Steel)、析出強化型銅合金(PHC: Precipitation Hardened Copper)と進歩しました。

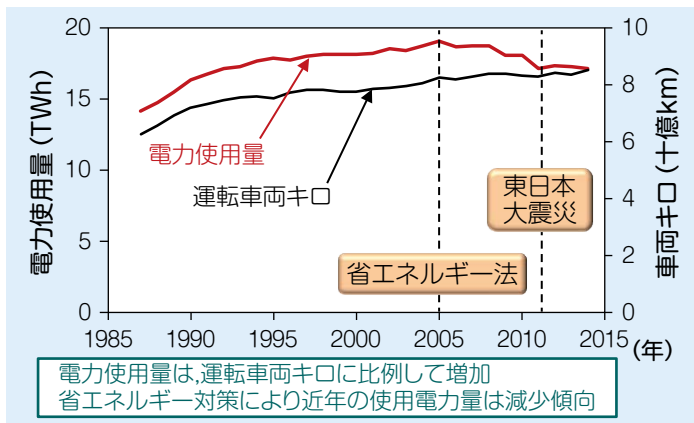


図5 電力使用量と運転車両キロの関係  
出典：鉄道統計年報・電気事業連合会

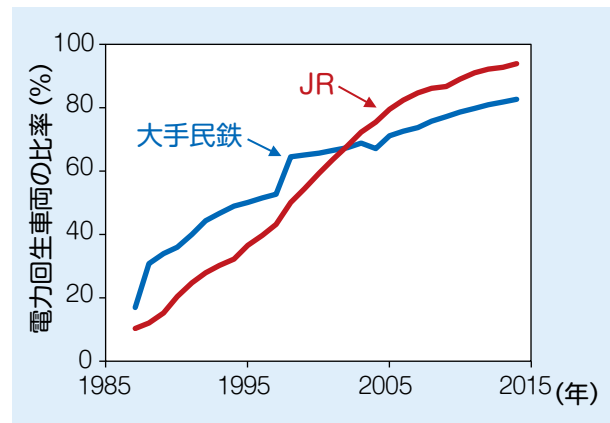


図6 省エネルギー車両の増加  
出典：鉄道統計年報・鉄道事業者環境報告書他

### 省エネルギーへの取り組み

日本における電気鉄道はネットワークとしては完成に近づいており、新線開業や新規電化路線開通は減っています。したがって、現在の電気鉄道の技術は既存の路線をいかに上手に安定して運用していくか、すなわち省エネルギーと省メンテナンスを中心とした研究開発となっています。

大都市圏の通勤輸送を担っている直流き電方式において、2011年の東日本大震災（東北地方太平洋沖地震）以降の最重要課題は省エネルギーとなっています。JRをはじめとした各鉄道事業者では、国土交通省と環境省が設定したエコレールラインプロジェクトの活用もあって、軽量かつ回生ブレーキを装備した車両を引き続き投入しており、運転方法も改善しています。これらの努力の成果を図5および図6に示します。鉄道全体の運転車両キロは伸び続けていますが、2005年ぐらいから使用電力量は減少しています。図6からは、JRおよび大手民鉄において回生ブレーキを常用する省エネルギー車両が増加していることがわかります。

地上側では蓄電装置導入による車両回生電力の有効活用、き電電圧の見直しによる回生効率向上、上下線の架線を接続するき電損失低減、駅舎補助電源インバーターによる回生電力活用といった施策が次々に実施されてきました。

た。駅や事務所・車両基地などでの照明のLED化や空調改良、さらには太陽光発電などの取り組みも各事業者で展開されています。鉄道総研では電気二重層キャパシターを用いた蓄電装置の実用化、最適制御手法の開発、運転電力の計算とさまざまな研究開発を積み重ねてきました。

これらの省エネルギー施策は、設備を現場に設置したらそれで終わりではありません。とくに蓄電装置は設置後の綿密な調整によって、さらなるエネルギー効率向上が期待できます。鉄道事業者では季節や時間帯によって蓄電装置の動作設定電圧を変更するなどの、運用上のノウハウが蓄積されています。

運転電力に関して省エネルギー施策を推進していくうえでの難しさは、施策による節電効果の数値目標が容易に電力料金での償却に換算されること、一方で数値目標達成の検証が困難なことです。一列車単位の運転電力は混雑度や天候、運転操作のタイミングなどのさまざまな要因で10%以上も変動します。また、列車間の回生電力のやり取りも発生することから線区全体の運転電力も変動します。そのため、詳細な事前検討をしたとしても、実際に機器を設置してみると日々の運転電力変動が激しいため、電力軽減幅がはっきりしない場合がありえます。一方で、数週間から一年の単位の統計をみれば、各種施策は

確実に電力節減効果を発揮しています。

最近の研究では、運転・車両・地上の正確な模擬と詳細な計算と実測に基づく運転電力検討を進めています。その中で、時間帯による電力系統からの受電電圧変動といった鉄道側で制御できない要因によっても、運転電力が数%程度の影響を受けることが判明しています。

このように、運転電力は本質的にランダム要素を持つ変数を多数含んでいます。ある省エネルギー施策は何パーセントの節電効果を持つ、と定量的に説明しにくいこと、しかし着実に効果はあることに対して理解を得ていく必要があると考えています。

### 省メンテナンスの取り組み

電車線路は屋外に連続的に敷設されており、車両通過時にパンタグラフがトロリー線としゅう動しながら集電しています。そのため、トロリー線・パンタグラフすり板の双方が、機械的および電氣的に摩耗し、機械的に疲労します。また、軌道面から5m程度の高所に位置し、かつ高圧で加圧されることから現場で携わる作業者の労働条件が厳しく、原則として停電時の作業が必要です。

変電設備でも電力用遮断器・断路器などは日に数回程度以下と動作回数は少ないものの、動作にしたがって機械的な劣化が進行していきます。新幹線では切替セクションを用いた電源切換

を行っているため、切替開閉器は列車通過の都度、動作しています。

これらの各機器は、不具合のある部材を取り替えて機械的故障を防止することが保守の最大の目的となっています。そこで各鉄道事業者では状態監視に基づくメンテナンス作業 (CBM: Condition Based Maintenance) が導入されつつあります。なお、状態監視の頻度は必ずしも時間連続ではなく、定期的な検測による例が多くなっています。たとえば電車線路のメンテナンスは電気検測車を用いた定期的な検測結果に基づいています。検査の結果、要注意箇所があった場合には現地での外観検査・至近距離検査を行い、必要によって補修作業をしています。

これに対して、沿線に点在する変電設備の多くは変圧器・整流器といった静止機器およびその制御回路です。これらは固定設備タイプに分類され、原則として機械的摩擦を考慮する必要はありませんが、長期間の使用に伴って絶縁材料などの劣化が進み、故障に至ることがあります。一般に静止機器は定期的なメンテナンス作業 (TBM: Time Based Maintenance) を中心としており、最近ではCBMが導入されています。

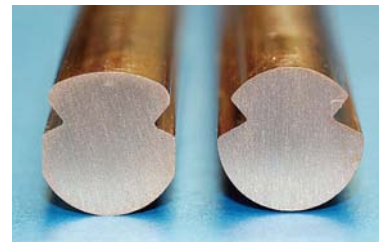
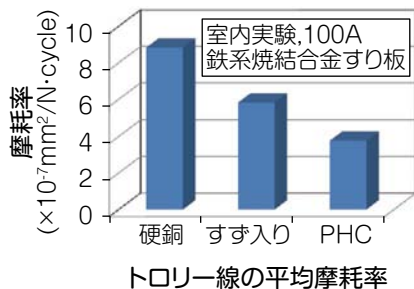
変電設備の場合、想定寿命を30年程度に設定し、機器ごとに順次更新しています。しかし、電化開業時・新線開業時に線区単位で一括して製作された機器が多いことから、一斉取り替えは経済的に大きな負担となってしまうため、経年機器を安全に使用し続けるための寿命判定技術が求められています。

電車線路のメンテナンスに関しては、以下の視点から研究開発を進めてきました。これらの例のいくつかを別稿で紹介しています。

- (1) シンプルな架線構造の開発 (図4)
- (2) 部材の長寿命化 (図7)

### ■ 耐摩耗・耐疲労トロリー線の開発

硬銅 → すず (Sn) 入り → 銅覆鋼 (CS) → PHC (Cr-Zr系合金)



(左) 耐疲労特性を向上した PHCトロリー線

### ■ カーボン系,C/Cすり板の開発

トロリー線の摩耗は、金属すり板に比べて1/3~1/5に低減

図7 耐疲労特性を向上したPHCトロリー線

- (3) 検査・診断手法の開発
- (4) 摩耗・劣化メカニズムの解明と対策
- (5) 保守基準の策定

また、変電設備は定期的な点検に加えて、最近では電圧・電流などの定常的な監視と監視カメラの導入が進んでいます。さらに、機器各所に温度・圧力などのセンサーを取り付けて状態監視する試みが開始されています。

### 省メンテナンスの課題

このように、省メンテナンスに通じる研究開発は現在の柱となっていますが、依然としていくつかの課題があります。

#### (1) 状態監視データの有効活用

状態監視技術の導入により、各設備に対して膨大な計測データが蓄積されつつあります。これに対して、データからの機器故障予測については、引き続き研究開発が必要です。機器の劣化メカニズムについてはさらなる研究を要しており、並行して従来からの検査指標との整合性を確保する必要があります。鉄道事業者間で協力して、高経年機器のデータ収集に努めています。

#### (2) 状態監視技術の限界

さまざまな状態監視技術の発達にもかかわらず、依然として電子機器は突発的に故障する例が多く、故障メカニ

ズム自体が不明な場合があります。また、一般に各種センサーの寿命は測定対象よりも短い場合があり、状態監視システム自体の保守負担を考慮する必要があります。

#### (3) 省メンテナンス設備の開発

電気設備は数十年後の更新を前提としている設備であるため、更新に際して計画的に新技術導入が可能です。したがって、電車線路のシンプル化の例のように簡素かつ強固な省メンテナンス設備を開発しておけば、設備の信頼性向上と将来の負担軽減につながります。

### おわりに

電気鉄道の世界において、地上電力設備と車両は一体になって歩んできました。電力設備はお客様に直接接することが少ない裏方です。しかし、万一その機能が失われた場合には長時間にわたって運行を止めてしまう重要な設備です。これからも安定輸送と省エネルギーの両面から、技術開発を続けていきます。 [RRR]

### 文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修：数字でみる鉄道2016, 運輸総合研究所, 2016
- 2) 鉄道電気設備年鑑編集委員会編：鉄道電気設備年鑑2016年版, 鉄道界図書出版, 2016