

第74回

通信線への電磁誘導

はじめに

電気鉄道では、トロリー線とレールで構成されるき電回路を介して、変電所から電車に電力を供給しています。電車が走行する際には、このき電回路に高電圧・大電流の電気が流れます。この時、鉄道沿線に敷設されている通信線には、近接するき電回路からの電磁誘導現象によって、本来は必要としない電流や電圧が発生します。電磁誘導現象により通信線に発生した電流や電圧は、通信設備の保守作業員や利用者が感電する、あるいは通話中の雑音が大きくなるといった影響を与えることが懸念されます。このため、日本国内における電化区間の拡大にともない、通信線の電磁誘導の影響を予測する計算手法や対策手法の開発が行われてきました。

ここでは、鉄道沿線の通信線に対する電磁誘導障害への取り組みと、電磁誘導の影響を予測するための手法に関して紹介します。

電気鉄道における誘導現象

導体に電流が流れると導体の周辺に磁束が発生します。交流電気回路では、電流の大きさが周期的に変化するため、周辺の磁束も変化し、近接する他の導体にも電気が発生します。この現象を電磁誘導とよびます。図1に電磁誘導現象の概要を示します。

電気鉄道の沿線に敷設された通信線で発生する電磁誘導現象の概要を図2に示します。電気鉄道のき電回路では、変電所からトロリー線を通して電車に流れる往路電流と、電車からレールを通して変電所に戻る帰路電流が存在します。この往路電流と帰路電流は逆向きとなり、それぞれの電流によって発生する磁束の向きも逆となります。ここで、もし、往路電流と帰路電流の大きさが同じであれば、通信線に発生する誘導電流が逆向きとなって打ち消し合い、電磁誘導現象による影響はほとんど発生しません。しかし、レールを

流れる帰路電流の一部は大地に漏れて、大地電流として変電所に戻るため、往路電流と帰路電流は同じ大きさになりません。このため、往路電流と帰路電流の差分が電磁誘導現象として通信線に影響を与えることとなります。

き電回路から通信線に対して電気的な影響を与える現象には、電磁誘導のほか、き電回路の電圧が原因となって発生する現象である静電誘導があります。ただし静電誘導については、低抵抗の接地に接続した導体（たとえばケーブルの遮蔽層など）で通信線を覆うなどの対策により比較的容易に影響を軽減できます。

鉄道における通信線の電磁誘導障害のはじまり

1895年に京都市で初めて電気鉄道の運転が開始されて以来、日本国内における鉄道の電化は、直流方式で進められました。

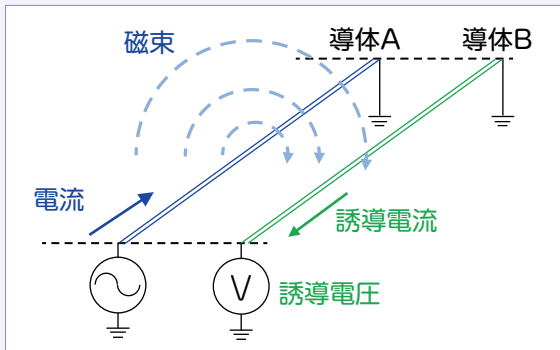


図1 電磁誘導現象の概要

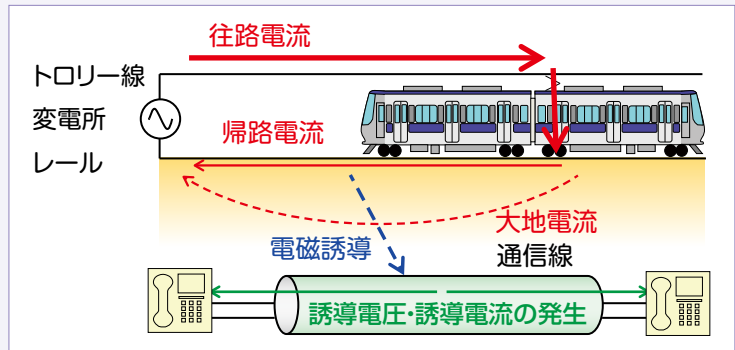


図2 電気鉄道における電磁誘導現象の概要

電気鉄道において通信線への電磁誘導による障害が初めて問題となったのは、1925年に豊川鉄道が電気運転を開始したときのことです。沿線に敷設されていた当時の通信省の通信線に電磁誘導が原因となる雑音が発生していたため、とくに雑音の大きい通信線には、電磁誘導の影響を低減させる目的で中継線輪とよばれるコイルを挿入するなどの対策が施されました¹⁾。

また、翌年の1926年には、き電回路に電力を供給するために旧国鉄の大井町変電所に新設した水銀整流器が問題になりました。これは、交流電力から直流電力に変換する際に発生した高調波電流（周波数成分がもとの交流電力の整数倍となる本来不要な電流）に起因する電磁誘導により、通信省や国鉄の通信線など広範囲に雑音が発生したため、水銀整流器の使用を一時停止する事態になりました。対策として水銀整流器の出力（直流）側に濾波器とよばれる高調波を軽減するフィルターを設置するとともに、通信省の通信線は裸電線からケーブルに変更して、通信線の2心線間の対地電圧の差で生じる線間電圧を軽減することにより、この障害は収束しました²⁾。

これらの障害発生をきっかけに、1928年に電気学会と電信電話学会（現在の電子情報通信学会）の合同で誘導障害防止研究委員会が設置され、通信線への誘導障害問題に対する研究が進められました。その結果、誘導障害を軽減するためのフィルターの仕様が策定されました²⁾。

しかし、1946年の上越線の電化工事においては、戦後の電力事情の悪化により、電源周波数の変動が大きくなっていったこと、各変電所に設置されたフィルターの周波数特性が統一されていなかったことが原因で、通信線に電磁誘導障害が発生しました。この障害により、フィルターの仕様が見直され、

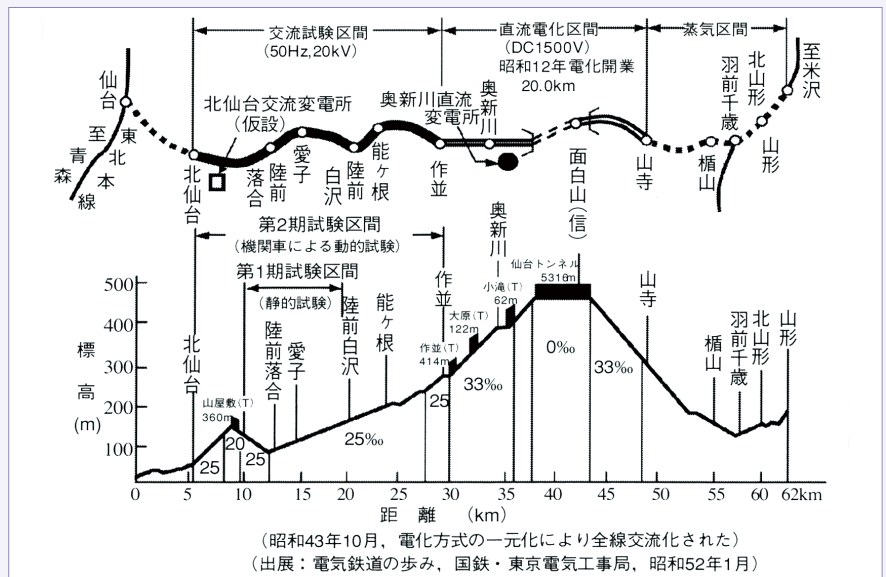


図3 仙山線における交流電化試験線路図⁴⁾

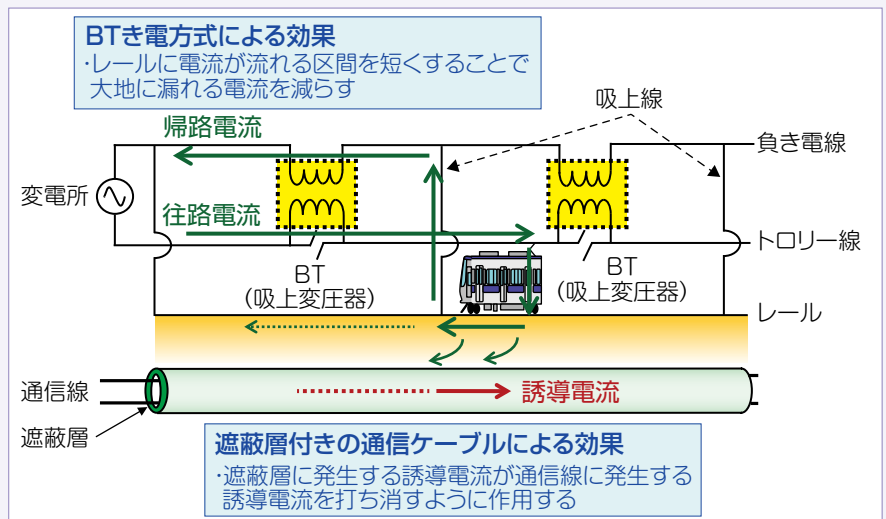


図4 BTき電方式による交流電化

直流電化区間沿線における通信線の電磁誘導障害は収束していきました³⁾。

BTき電方式による交流電化の採用と通信線の電磁誘導対策

1953年から、国鉄の内部に交流電化調査委員会が設置され、商用周波数（日本国内では50Hzまたは60Hz）の交流電力による鉄道の電化が検討されるようになりました。交流電化の場合には、従来の直流電化のように、変電所において交流を直流に変換する必要がなく、変電所間隔も直流電化より長くできるなど、電力を供給する面では

利点が多いと期待されていました。一方で、この交流電化の実現に向けては、交流用の車両の開発とともに、国鉄の通信線と沿線の日本電電公社（現在のNTT）の通信線への電磁誘導障害対策が大きな課題とされていました。

電磁誘導現象は電流の変化によって発生することから、本来は直流の電気回路では電磁誘導現象は発生しません。ただ、直流電化区間においても、交流から直流に変換する際に生じる高調波が原因で電磁誘導による通信線に電圧が発生することがあります。一方、交流電化では、電車に供給する交流電力が直接電磁誘導の発生要因となります。

このため、直流区間に比べると高い電磁誘導電圧が通信線に発生し、通信時の雑音だけではなく、通信設備の保守作業員や利用者が感電する、通信線に接続した装置が焼損するといったことが懸念されていました。

そこで、仙山線の北仙台～作並間に、電車に交流で電力を供給するき電回路や通信線への電磁誘導障害の影響などの検討を行う試験線が作られました(図3)。

この試験線における試験結果をもとに、電力を供給するき電回路に帰路電流を流すための線(負き電線)を設け、一定間隔で設置した吸上変圧器(BT: Booster Transformer)によってレールを流れる帰路電流を負き電線に流す構成とし、電磁誘導の発生要因となる大地に漏れる電流を減らすBTき電方式(図4)が採用されました⁴⁾。また、通信線には、電磁誘導の影響を軽減する効果がある遮蔽層で覆ったケーブルが採用されることになりました。交流電化調査委員会での検討と試験線での

試験で得られた知見は交流電化調査委員会資料(図5)としてまとめられ、日本国内における交流電化の技術的な基礎となりました。

その後、在来線でのBTき電方式による交流電化が進められ、1964年には東海道新幹線もBTき電方式による交流電化で開業しました。

ATき電方式の開発

BTき電方式による交流電化が進展していく中で、BT設置箇所における保守やアークなどが問題となってきました。そこで、1965年頃から、当時計画だった山陽新幹線での導入を視野に入れた新しい交流き電方式として、単巻変圧器(AT: Auto Transformer)を一定間隔で設置して帰路電流が分散して流れるようにし、大地に漏れる電流を減らすATき電方式(図6)の検討が本格的に開始されました⁶⁾。すでにBTき電方式で開業している線区において、ATき電方式を模擬した回路を構成し、実測などによる検討が行われました。その結果、1970年に鹿児島本線(八代～鹿児島間)がATき電方式で開業し、1972年には山陽新幹線(新大阪～岡山間)にも採用されています。また、ATき電方式は帰路電流が分散して流れ、通信線に発生する磁束が打ち消し合うため、通信線の

電磁誘導対策の観点からも有効でした。その後、ATき電方式は国内における鉄道の交流電化の標準的な方式となり、多くの区間で採用されて現在に至っています。

通信線における電磁誘導の影響を予測するシミュレーションの変遷

交流電化の検討が開始された頃から、実測による通信線に発生する電磁誘導電圧・電流の把握と並行して、予測計算手法の検討が進められてきました⁷⁾。仙山線での試験結果をもとに、高架やトンネルなどの影響やケーブル遮蔽層による遮蔽効果など、通信線の電磁誘導予測計算に必要な基本的な計算条件などが整理されました。

また、ATき電方式の検討の際には、電車の移動とともにき電回路の電流の流れが複雑に変化することから、コンピューターシミュレーションによる予測計算手法が検討されるようになりました。予測計算手法が検討され始めた当初は、トロリー線、レール、ATき電線の3導体で構成されるき電回路の計算プログラムを作成し、当時国鉄に導入されていたコンピューターを使用して、電磁誘導の原因となる電流の大きさと回路上での流れ方についてシミュレーションが行われました⁸⁾。その後、大型コンピューターの導入により、計算が可能な導体数が12導体に増えた多線条き電回路プログラムが開発されました⁹⁾。さらに、き電線の電流だけでなく通信線の電磁誘導電圧・電流計算の機能を追加したプログラムへと拡張していきました。ただしこの当時、鉄道技術研究所に導入された大型コンピューターは、現在の一般的なコンピューターに比べて処理能力が低く¹⁰⁾、計算する導体数が増やせないなどの制約もありました。なお、こ



図5 交流電化調査委員会資料⁵⁾

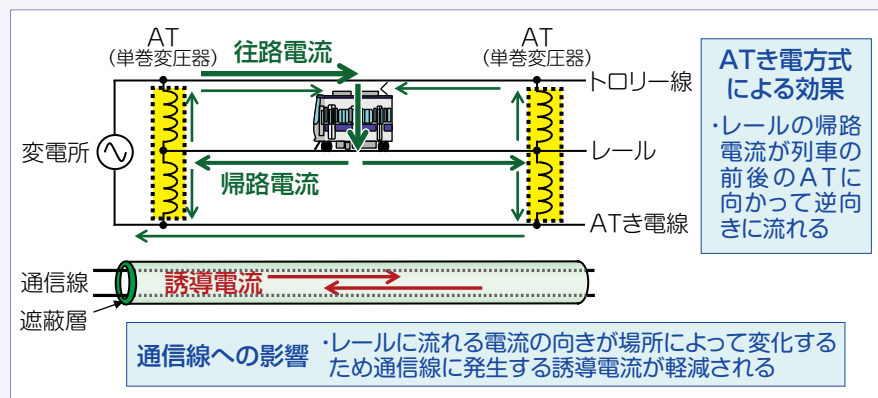


図6 ATき電方式による交流電化

のプログラムが開発された
 当時は、マークシート状の
 パンチカードをコンピュ
 ーターに読み込ませて、必
 要なデータを入力し、シ
 ミュレーションを行う方
 式でした¹¹⁾¹²⁾。その後、コ
 ンピューター技術の進展により、
 入力方法がテキスト形
 式に改められるなどの変更
 はありましたが、基本的な
 計算機能に大きな変更はな
 く、通信線の電磁誘導の予
 測に広く使用されてきました。

新たなシミュレーション手 法の開発

先に述べた通信線の電磁誘導予測計
 算プログラムは、計算の対象周波数
 が商用周波数と音声通話で使用され
 る4kHz以下の音声周波数帯域に限定
 されていました。しかし、近年は通信
 線が高速データ伝送にも使用されるよ
 うになり、使用される周波数帯域も
 1MHz前後までとなっています。

また、従来のシミュレーションプロ
 グラムでは、土木構造物に含まれる鉄筋
 などによる電磁誘導の軽減効果は、無
 視するか、多数の鉄筋を数個の導体に
 置き換えた近似モデルで計算を行って
 いました。このため、実際に通信線に発
 生する電磁誘導電圧・電流値より大き
 めの予測計算値が求められていました。

現在では、従来のシミュレーション
 プログラムが開発された当時と比べて
 コンピューターの処理能力は大幅に向
 上しました。そこで、これらの課題を
 解決するため、データ伝送で使用され
 る1MHz前後の周波数まで計算でき、
 土木構造物に含まれる多数の鉄筋をそ
 のままモデル化して、鉄筋の影響を加
 味した計算が可能な、新しいシミュレ

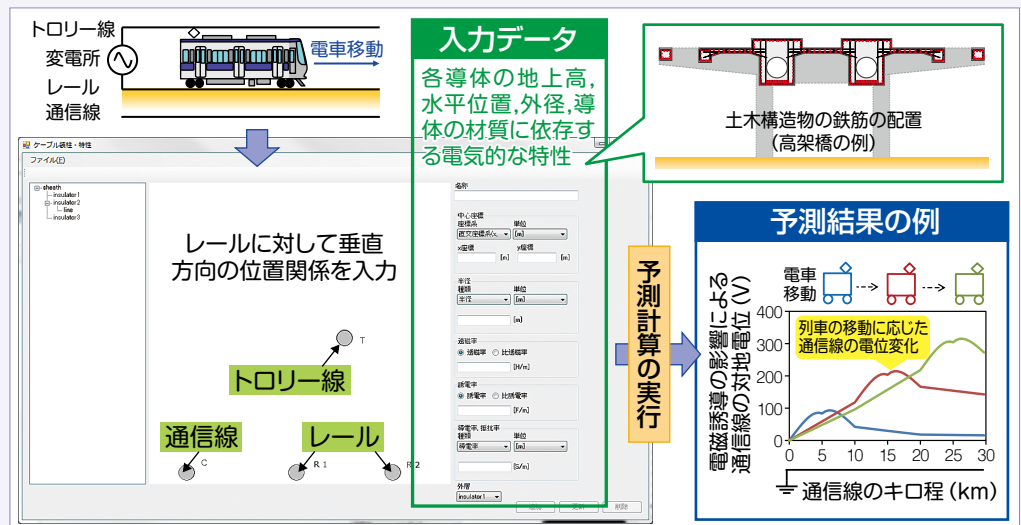


図7 新しいシミュレーションプログラムを用いた予測計算の概要

ーションプログラムを開発しました¹³⁾¹⁴⁾。
 新しいシミュレーションプログラムに
 よる予測計算の概要を図7に示します。
 このように新しいシミュレーション
 プログラムにより、現実に近い値を求
 めることが可能となりました。今後、
 通信線の電磁誘導の影響を予測する際
 に利用していく予定です。

おわりに

技術の進展により、携帯電話などの
 連絡手段が誕生し、読者の皆さんの日
 常生活において、通信線を使用する電
 話機(いわゆる固定電話)を必要とす
 る機会は減っていると思います。しか
 し、携帯電話がない時代に、電話回線
 に雑音が発生するという現象は、大き
 な社会問題となるものでした。そのた
 め、雑音の原因となる通信線の電磁誘
 導の予測や対策はととても重要であり、
 その歴史は鉄道の電化の歴史と大きく
 関わりがあるといえます。また、電磁
 誘導は導体に発生する現象ですので、
 電磁誘導の影響を受けない、光ファイ
 バーケーブルの採用も通信線の電磁誘
 導対策の一つといえます。

電気鉄道では、通信線に影響を与え
 る現象として、電磁誘導以外にもき電
 回路での短絡故障や落雷などがありま

す。今回紹介した電磁誘導を予測する
 新たなシミュレーションプログラムを
 もとに、これらの現象に対する影響を
 予測する手法の開発も進めています。

(竹内恵一/信号・情報技術研究部
 ネットワーク・通信研究室)

文献

- 1) 日本国有鉄道編：日本国有鉄道百年史9、成山堂書店、1972
- 2) 日本鉄道電気技術協会：鉄道における電磁環境解説集、日本鉄道電気技術協会、2008
- 3) 上越線変電所水銀整流器による直流脈動軽減に関する調査、鉄道電化協会、1948
- 4) 中道好信：交流き電(BTき電)、RRR, Vol.61, No.7, pp.32-33, 2004
- 5) 小野田滋：日本国有鉄道交流電化調査委員会資料一式、RRR, Vol.70, No.5, pp.34-35, 2013
- 6) 中道好信：交流き電(ATき電)、RRR, Vol.61, No.8, pp.34-35, 2004
- 7) 鉄道通信協会：鉄道通信発達史 第2編 通信線路、pp.48-49、鉄道通信協会、1970
- 8) 水野次郎、浜寄正一郎、剣持忠雄：単巻き電方式におけるき電特性ならびに起誘導電流の予測計算について(その1)、鉄道技術研究所速報、No.66-184, 1966
- 9) 水野次郎、浜寄正一郎、石川多了：単巻変圧器き電回路の計算プログラム(KIDEC)、(KIDEC)、(KIDEC-R)、鉄道技術研究所速報、No.70-1, 1970
- 10) 中西俊夫、沼田栄一、吉村彰芳、栗田信男：大型電子計算機システムの構成とその運用について、鉄道技術研究所速報、No.71-41, 1971
- 11) 山口大介：通信誘導計算のシミュレーション環境、RRR, Vol.71, No.4, p.41, 2014
- 12) 小林洋寿、松本駿太郎：電気鉄道における通信誘導(13)、鉄道通信、Vol.39, No.4, pp.27-30, 1988
- 13) 竹内恵一、山口大介：鉄道沿線の電磁誘導現象を探る、RRR, Vol.73, No.8, pp.8-11, 2016
- 14) 山口大介、竹内恵一、林雅江：データ伝送帯域に適用可能な電磁誘導予測シミュレータの開発、鉄道総研報告、Vol.30, No.1, pp.35-40, 2016