

無絶縁軌道回路に対応した 新幹線用デジタルATCの開発

福田 光芳
信号通信技術研究部
(信号 主任研究員)

横田 倫一
独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構
(鉄道建設本部 電気部 信号通信課 担当係長)



ふくだ みつよし よこた りんいち

はじめに

列車を安全に運行させるための設備として信号設備があります。列車は進行の可否や許容する速度などの指示に従って運行されます。この指示の内容のことを信号現示と呼び、信号機の赤や青などの電球（最近はLEDが多い）を点灯させることを「信号を現示する」といいます。在来線の多くでは、線路沿線の信号機とATS(自動列車停止装置)の組み合わせで運行されていますが、高速で走行する新幹線では信号機を目で見て運転することが困難であるため、運転台の表示器に信号が現示され、許容する速度を超過するとATC(自動列車制御装置)によって自動的にブレーキが作動します。

ここでは、新幹線で用いられている様々なATCの基本を説明するとともに、最新のATCについて東北新幹線や上越新幹線で用いられているデジタルATCを例として紹介します。

新幹線のATC

ATCは列車の走行速度が、許容される速度を超過した場合に自動的にブレーキを作動させる装置ですが、その方式には大きく2種類あります。先ほど述べたように運転

台に信号が現示される「車内信号方式」とATSの場合と同様に線路沿線にある信号機を用いる「地上信号方式」です。新幹線や、ATCを採用している主な在来線では車内信号方式のATCを採用していますが、地下鉄などで地上信号方式を採用している場合もあります。

どちらの方式でも、許容される速度などが車上に連続的に地上から車上に伝送され、常に走行速度とのチェックが行われており、高い安全性が確保されています。許容される速度などの伝送には、主にレールを伝送媒体とする方式が用いられますが、伝送される情報は、列車の在線する位置、駅構内の進路やポイントの状態(列車がどの番線のどこまで行って良いかの制御状態)などによって決まります。列車の在線する位置の検知は、軌道回路を用いて行います。軌道回路はレールを電気回路の一部として用いる列車検知装置であり、図1のように左右のレールに電流を流し、逆側に接続した受信機器まで電流が届いた場合に列車なしと判定します。列車がその区間に在線すると、輪軸によって左右のレールが短絡され、電流が受信機器に届かなくなるので、列車在線と判定することができます。

また、先頭の輪軸より前に図2のようなアンテナ(受信器)を設置しておく、レールに流れる電流に応じてアン

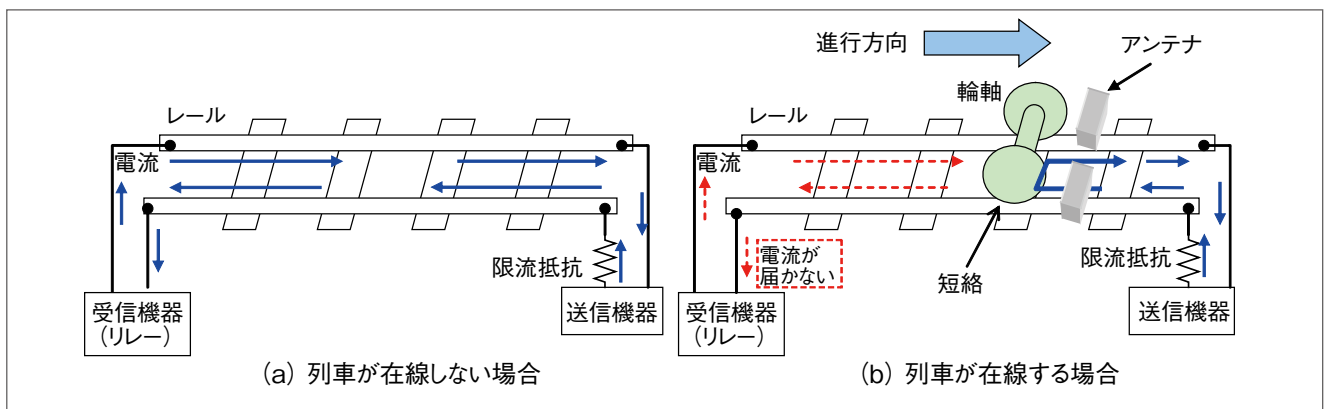


図1 軌道回路による列車在線の判定



図2 受電器(単体)

テナの出力電圧が変化するので、レールに流れている電流の大きさや周波数などを検知することができます。レールに流れる電流に情報を付加することにより、地上から車上に情報を伝送することができます。

新幹線のATCが最初に作られた時、レールに流れる電流に情報を付加する方式として、AM変調(振幅変調)方式の一種が採用されました。AM変調は電流の振幅の大きさを変化させるものでラジオなどにも使われています。振幅の大きさのある周波数で繰り返し変化させる場合、この周波数を変調周波数と呼びます。新幹線のATCでは、210km/h, 160km/h, …, 30km/hなどの許容速度と変調周波数を対応付けて情報を伝送する方式としました。例えば、変調周波数が10Hzの時は、許容速度210km/hとして車上で認識されます。図3は新幹線のATCによる列車の走行状態を示したのですが、区間毎に階段状の許容速度が伝送され、区間毎にブレーキの作動・緩解を繰り返す制御が行われます。

デジタルATC

その後、技術の進歩に伴って情報量(変調周波数の種類)が増やされ、許容速度の種類も増えましたが、この方式では伝送可能な情報量に限りがあります。図3のような速度制御であれば、AM変調のままでも問題ありませんでしたが、多くの情報で安全かつより効率の良い制御をするために、MSK変調(Minimum Shift Keying)によるデジタル符号伝送を行うデジタルATCが開発されました。MSK変調は軌道回路の電流を中心周波数(f_c)から一定の周波数(Δf)だけ変化させた、 $f_c + \Delta f$, $f_c - \Delta f$ の2種類の周波数によって、“0”, “1”のビットを伝送します。軌道回路のIDや停止すべき位置に関する情報を“0”, “1”のビット列に変換しておき、そのビット列を $f_c + \Delta f$, $f_c - \Delta f$ の周波数に変換し

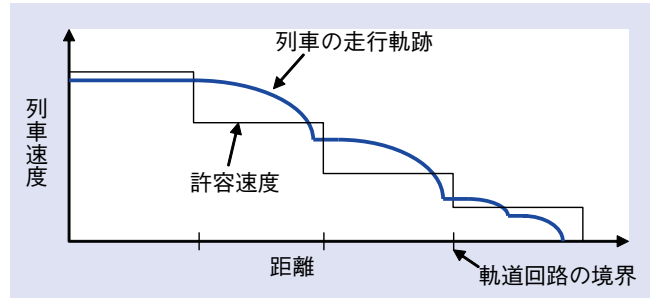


図3 階段状の速度制御

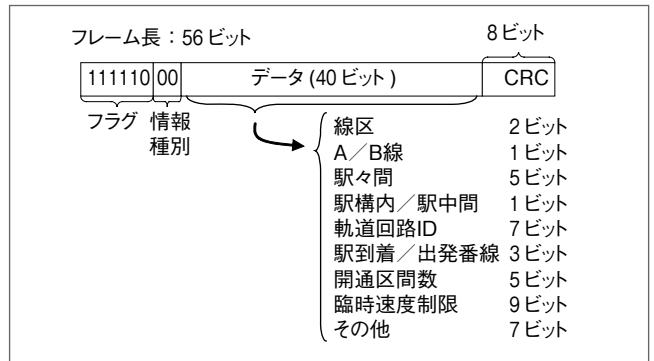


図4 伝送フォーマットの例

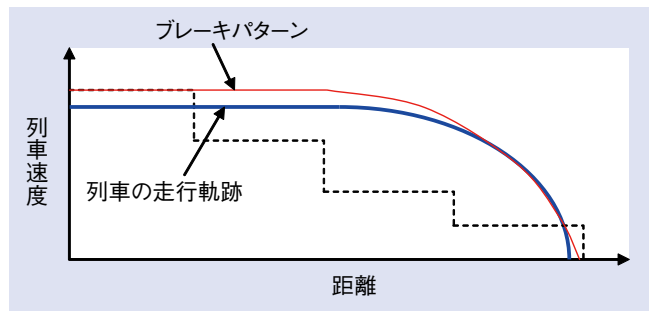


図5 デジタルATCのブレーキ制御

てレールに流します。伝送する情報の例(フレーム構成)を図4に示します。

車上装置は、地上から伝送された情報と車上に記憶している線路データベースから停止すべき位置を算出し、自列車のブレーキ力に応じたブレーキパターンを計算したり、読み出したりします。車上装置は、図5のように列車速度がブレーキパターンを超過した場合にブレーキを作動させます。ブレーキを1回だけ動作させれば良いので、許容速度の段階毎にブレーキを緩めることがなく、列車間隔を短くすることが可能になります。また、ブレーキを作動させる時に弱めのブレーキから作動させるなどの細かい制御も可能になるので、乗り心地の改善も図れます。

デジタルATCは、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構(以下、鉄道・運輸機構)やJR各社の協力を得て、鉄道総研が開発を行いました。この過程では、新幹線や在来線

など様々な条件下で試験を行い、レールを用いたデジタル符号伝送と車上のデータベースを用いた制御が実用可能であることを確認しました。¹⁾²⁾

その後、各社でデジタルATCの実用システムが開発され、東北新幹線、東海道新幹線やその他の新幹線、在来線でデジタルATCの導入が進みました。

無絶縁軌道回路に対応したDS-ATCの開発

東北新幹線で導入されたデジタルATCは、DS-ATCと呼ばれるものです。

鉄道総研と鉄道・運輸機構および東日本旅客鉄道株式会社は共同で、八戸から新青森までの東北新幹線の延伸区間について、さらなるコスト削減などを目的として、「無絶縁軌道回路に対応したDS-ATC」を開発しました。

図1に軌道回路の原理を示していますが、通常、レールの両端は電氣的に絶縁されており、隣の区間とは明確に区別されています。無絶縁軌道回路とは、図6のように、レールの絶縁をなくした方式です。中央の「送信機器②③」からの電流は、「受信機器②」と「受信機器③」に届くので、1つの送信機器で、2つの軌道回路に電流を送信することができます。この方式は「中央送電両端受電方式」と呼ばれています。レールに明確な区切りがなく、外側にも電流が流れていくので、外側の位置に列車が在線していても列車ありと判定してしまいましたが、列車が検知される範囲が外側に広がるだけなので、安全上は問題ありません。この検知範囲のずれを「境界ずれ」と呼んでいます。この方式では、レールの絶縁や絶縁部分に必要なトランスなどの機器類、ケーブルなどの設備点数が減らせるので、初期コストを低減することが可能になります。

無絶縁軌道回路の方式としては、軌道回路の境界に共振

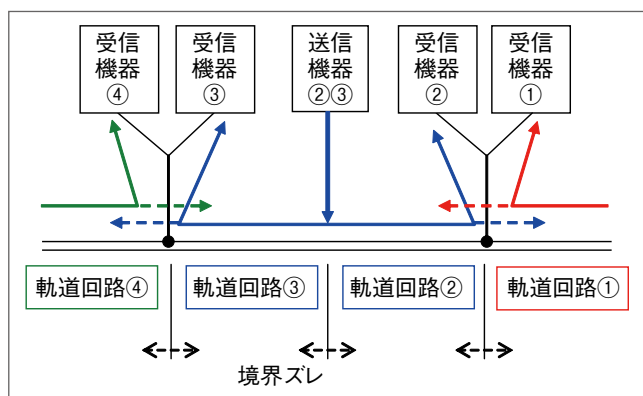


図6 無絶縁軌道回路のイメージ

回路を設けて、外側に電流が流れないようにするものもありますが、設備構成をシンプルにできることから、図6のような方式を採用しました。

ATCの情報伝送の電流（以下、ATC波）は列車の先頭車両にある受電器で受信される必要があるため、列車の進行方向から軌道回路の信号を流さなければならず、図6の無絶縁軌道回路の構成のままではうまくいきません。例えば、軌道回路②、③はどちらかが逆向きの電流になってしまいます。このような場合、列車検知の電流と情報伝送の電流を別々にレールに流すことにより解決が可能です。列車検知のための送信機器、受信機器は図6のように配置し、ATCのための送信機器は軌道回路境界毎に配置します。送信機器、受信機器が増えてしまうように思えますが、軌道回路境界に必要な左右両側の軌道回路の受信機器（2種類）とATCのための送信機器が1つのユニットで実装できてしまうので問題ありません。また、有絶縁軌道回路では、常にATC波をレールに流していますが、無絶縁軌道回路では、他の列車まで情報伝送の電流が届いてしまう可能性があるため、列車が在線する軌道回路だけにATC波を流します。この方式は、列車の先頭が次の軌道回路に踏み込んだタイミングでATC波を送信するので、「踏込送信方式」と呼ばれています。

図7に有絶縁軌道回路の境界部分、図8に無絶縁軌道回路の境界部分を示します。有絶縁軌道回路の現場機器は、レールを絶縁により区分する「接着レール絶縁」、信号電流と帰線電流とを区分する「インピーダンスボンド」、複数の「ケーブル接続点」によって構成されます。無絶縁軌道回路は、接着レール絶縁とインピーダンスボンドが不要

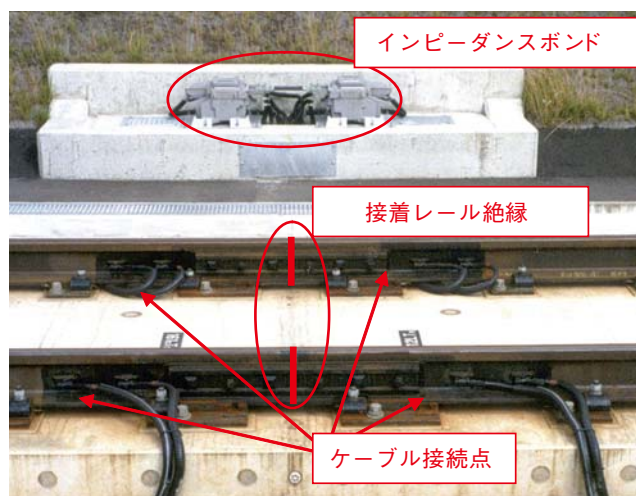


図7 有絶縁方式軌道回路境界

となります。また、無絶縁軌道回路は列車検知として中央送電両端受電方式、ATCとして踏込送信方式を採用しているため、ケーブル接続点が少なくなります。無絶縁軌道回路は有絶縁軌道回路に比べて、現場機器が少ないため施工性が良く、保守メンテナンスに優れています。

シミュレーションによる検討と現地試験

開発にあたっては、まず、計算機シミュレーションを行って、ATC波が十分に確保できること、列車検知の電流(以下、TD波)による列車検知特性が十分に確保できることの両方を満足する電氣的仕様を検討しました。ATC波の周波数などを変更してしまうとDS-ATCの車上装置を改修しなければならないので、ATC波の周波数や電文フォーマットはDS-ATCと同じとしました。TD波はATC波と同時にレールに流さなければならないので、ATC波とは異なる周波数にする必要があります。また、新青森までの区間では、積雪時にスプリンクラーによる消雪が行われますが、この場合、軌道上にはシャーベット状の雪が溜まってしまうので、左右のレール間が少しずつ短絡されたようになり、軌道回路の電流が遠方まで届きにくくなります。これらの制約条件を満足するため、シミュレーションを繰り返し、伝送路の各部の素子のパラメータを調整し、試験用の装置を試作しました。

次に既設の東北新幹線(盛岡・八戸間)いわて沼宮内駅のエリアを用いて試験装置を用いた検証試験を実施しました。

検証試験では、まず、列車を走行させず、模擬短絡(列車の代わりに人手でレール間を短絡)してシミュレーショ

ン結果と同等の特性が得られていることを確認しました。確認項目としては、TD波で列車を検知できる範囲(境界ずれの大きさ)、短絡した時のATC波の電流の大きさなどです。

その上で、2007年3月に4日間、営業列車終了後に実際の車両を走行させて試験を行いました。これらの結果を受けて、実用機の開発が進められました。

運用開始に向けた総合試験

現地の確認試験として、新規に開発した無絶縁軌道回路の実用1号機を東北新幹線(八戸・新青森間)七戸十和田駅信号通信機器室および八甲田トンネル内の上下線22軌道回路に設備して模擬短絡による検証試験を行いました。その結果、シミュレーションとの整合性やATC波の短絡電流値などの各数値が満足していることを確認しました。

その後、実車を用いた総合試験を行いました。整備新幹線では、鉄道事業者(JR)への引渡し前に実列車を走行させて、相互に確認する総合監査・検査が行われます。合計32回におよぶ走行試験で、信号保安部門では通常のATC試験に加えて無絶縁軌道回路の確認項目として境界ずれや踏込送信機能などの確認を総合的に行いました。その結果、高速走行時でも正しく列車検知が行われ、ATC波の短絡電流値においても設計値を満足し、無絶縁軌道回路の特徴である境界ずれや踏込送信機能についても健全性が確認できました。

おわりに

今回は新幹線向けのデジタルATCを中心に紹介しましたが、在来線・地下鉄などでもその特状に応じたデジタルATCが広く導入されてきています。今後も鉄道の安全・安定輸送に寄与できるような信号システムの研究開発を進めていきたいと考えています。[RRR]

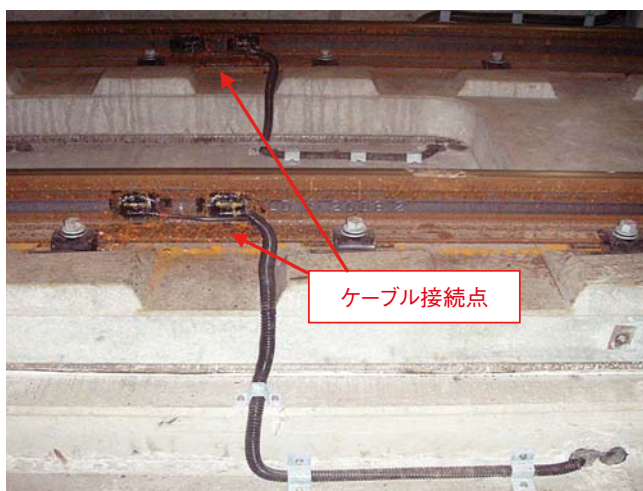


図8 無絶縁方式軌道回路境界

文献

- 1) 高重哲夫：デジタルATCのしくみ 軌道回路方式の列車制御を新する、RRR、49巻、11号、pp.9-14、1992.11
- 2) 渡辺郁夫、高重哲夫、志田洋、小林巧、内田清五、音無隆、犀川潤：山陽新幹線におけるデジタルATC性能試験、鉄道総研報告、14巻、2号、pp.41-46、2000.02
- 3) 小林英次、横山啓介、嶋田育男、有馬雅紀、網谷憲晴：新幹線DS-ATCシステム-新幹線用デジタルATCの開発-、鉄道における国際サイバネティクス利用国内シンポジウム論文集、通号40、2003.11