

第26回

軌道回路

軌道回路の発明

列車の運行を支えているものに軌道回路と呼ばれる装置があります。これは、レールに電流を流し、列車の輪軸の有無によって電流の流れ方が変わることを利用して、列車が特定の区間に在線しているかどうかを検知するものです。これにより、列車が在線していれば、そこに列車を進入させないように信号機を自動で制御することが可能になります。

軌道回路として知られる最初のもは、アメリカのウィリアム・ロビンソン (William Robinson) が1872年8月20日に特許を取ったものとされています¹⁾。ロビンソンはそれに先立ち1870年の博覧会で図1に示すような開電路式と呼ばれる方式の軌道回路の模型を展示実演していました。この方式による軌道回路では車両が在線すると、電気回路が構成されて電磁石 (リレー) が動作します (図では電球のイメージで描きましたが、実際には円板を動かしていました)。しかし、この方式では電池が消耗すると列車が検知できなくなる弱点をもっています。これを克服して特許を取得したのが図2に示すような閉電路式と呼ばれる方式です。列車が在線していないときには、送った電気により電磁石が動作するようにしておいて青信号を出し、車両の輪軸により電気が届かなくなると電磁石が復帰し、これが消えるようにします。こうしておけば電池が消耗した場合は、

列車がいる時と同じになるのです。この発明によりフェールセーフの機能をもった軌道回路が実現されました。

この方式の軌道回路はロビンソンの発明の翌1873年にペンシルバニア鉄道に初めて採用されています。また、日本では明治37年 (1904年)、当時の甲武鉄道に採用されています。このときは直流電化であったものの、現在のようにレールを変電所への電流を流すためには使用せず、2本の架線を使って変電所からの電気を供給する方式であったため、直流軌道回路を使用しても問題ありませんでした。

現在でも直流軌道回路は非電化区間で使用されています。海外では交流電化区間でも使用例があります。

交流軌道回路の発明と軌道回路の国産化

ロビンソンの軌道回路が発明された当時は直流電源として安定して使えたのは電池しかなく、軌道回路には電池を使用していました。その後交流を使用する交流軌道回路が発明されます。交流軌道回路の利点は、電源に商用電源を用いることが可能であるという点にあります。現在電力供給に交流が一般的に使用されているのは、変圧器を使うことで電圧を簡単に変えられるためです。発電所から供給される大電力は電圧を高くして電流を小さくすることで損失を少なくし (電力の損失は導線に流れる電流が大きいほど

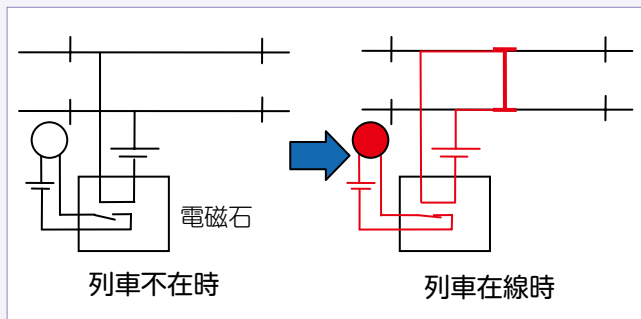


図1 開電路式軌道回路

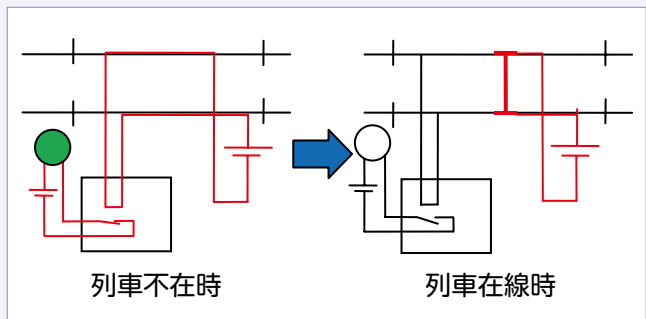


図2 閉電路式軌道回路

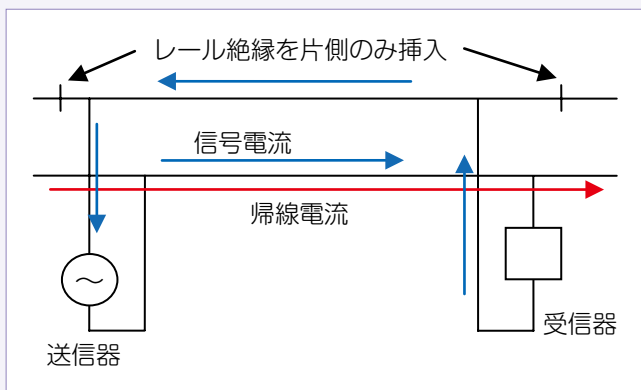


図3 単軌条式軌道回路

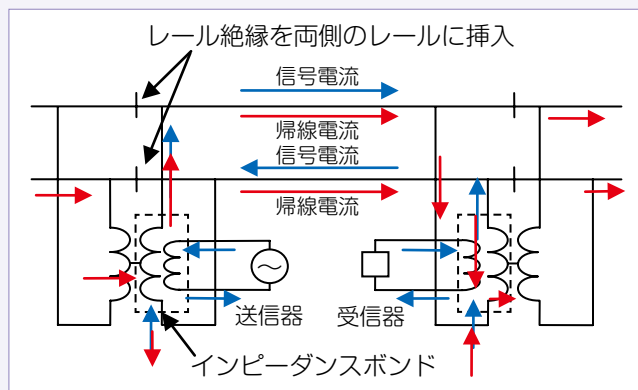


図4 複軌条式軌道回路

大きくなります), 家庭の近くでは電圧を下げて扱いやすい電圧にすることで, 電力供給が実現されています。軌道回路の電源供給も, 交流軌道回路であれば供給される交流電源と変圧器で容易に実現でき, 電池に比べると保守性が格段に増します。

直流軌道回路ではレールを流れる電車電流と軌道回路の信号電流を区別することができません。しかし交流であれば大丈夫です。さらにインピーダンスボンドという器具が発明され, 2本のレールを電車電流を流すのに使用できるようになります。図3がそれまでの方式で単軌条式軌道回路といいます。2本のレールのうちの1本を帰線レールと呼んで電車電流を流すために使います。もう片方はレール絶縁と呼ばれる絶縁物をレールの間に挟みます。通常は帰線レールの方が電流が流れやすいので, 送受信器には電車電流は流れ込みません。しかし, 帰線レールが折れたりしたら, 電流は送受信器に流れ込んでしまい, 大電流により損傷してしまいます。

これに対して図4がインピーダンスボンドを使った方式で複軌条式軌道回路と言います。2本のレールを使うことで電流が流れやすくなるので, 電車電流の供給の点で有利です。また, どちらかのレールが折れてももう片方のレールに電車電流が流れるので, 機器の損傷も防げます。

日本にも大正2年(1913年)に初めて交流軌道回路が導入されます。この時は一元形と呼ばれ受信した電力でリレーを動かす形式でしたが, 後に二元形と呼ばれる, 局部入力(電源として供給されるもの)と軌道入力(レールから受信するもの)の2つの入力を用いるものが使われるようになります。甲武鉄道の軌道回路も間もなく交流軌道回路に置き換えられました。

交流軌道回路の導入当初は軌道回路にはアメリカからの輸入品を使用していました。2元式に移行した当時は大きく分けて2つの方式があり, 翼板型と電動機型と呼ばれる

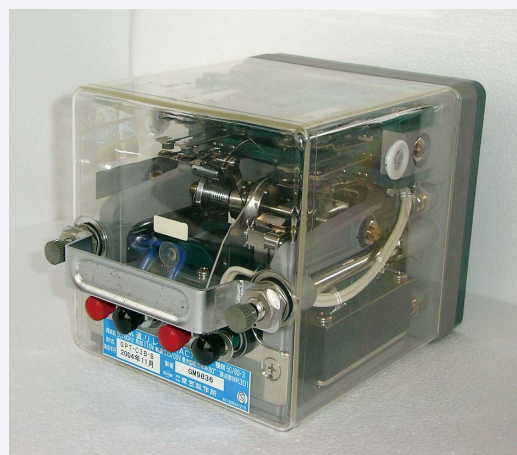


図5 現在の商用周波数軌道リレー

方式がありました。翼板型というのは翼型の板に, 電源(局部と呼びます)から供給される磁界と軌道から受信される信号による磁界により動力を発生する方式で電力計と同じ方式のものです。一方, 電動機型というのは, モーターと同じ方式で, 90度ずつずらして配置した2組のコイルにより円板を回転させる方式です。どちらも一長一短はあるものの, 性能的には甲乙つけがたしと言ったところだったようですが, 日本では翼板型の方が, リレーがどう動いているかがよくわかることから現場の保守者から支持されたようで, 翼板型が広く取り入れられることになりました。現在の軌道リレーはその流れを汲んでいます。なお, 海外では電動機型のリレーも使用されています。

その後急速に増大する輸送量に対応するため, 列車制御の自動化の推進が検討され, そのためには軌道リレーの大量調達が必要ということで, 国産化が検討されることになります。大正末期から国産の軌道リレーが製作されました。

そして, 戦後になり機器室の信号リレーのラックに差し込んで使用できる差込式のリレーが開発され(図5)現在に至っています。

現在でも商用周波数軌道回路は直流電化区間や、非電化区間でも幹線を中心に広く使われています。軌道リレーと変圧器により比較的安価かつ単純に構成でき、後述する電子機器と比べると雷などによる障害に対して強いことから、今後も広く利用されていくと考えられます。

交流電化と電子機器による軌道回路

電気鉄道は直流で始まり、その後低周波交流(16 $\frac{2}{3}$ Hz)がドイツなどで導入された後、1950年前後に商用周波数の交流電気鉄道が実現します。日本でも仙山線での試験を経て昭和32年(1957年)より交流電化が始まります。ところが、商用周波数の交流電化区間では、軌道回路に商用周波数を利用することができません。

海外の交流電化区間では、直流単軌条式軌道回路が使用されました。現在でも使用されている国は存在します。日本でも交流電化の当初は直流軌道回路も駅構内に限って使用されていましたが、直流電化区間と接続されると、そこから直流が流れ込むために問題があることが分かり、結局直流軌道回路は使用しないこととなりました。また、83.3Hz(50Hzの5/3倍)という信号も検討されました。これは83.3Hzの電源を発電機を使って作るのですが、83.3Hzの電源を沿線に配電するコストから断念し、結局駅構内でのみの使用ということになりました。

そこで採用されたのが、AF軌道回路とよばれる数百Hz～数千Hzの可聴域(Audio Frequency)を使用した電子機器の軌道回路です。AF軌道回路では、軌道リレーのように交流磁界を使って軌道リレーを動かすようなことはせず、受信した信号を増幅して、その電力を整流して直流のリレーを動かします。オーディオ機器のスピーカーを鳴らすのと同様に、電子機器で信号を増幅することができるのです。

AF軌道回路の研究は、第2次世界大戦中に通信線が切れた時にレールを代わりに使って伝送に使用できないかと、レールの伝送特性を測定したことに始まります。そして戦後(昭和28年)より本格的に研究が実施されています²⁾。研究開始当初はキロサイクル軌道回路と呼ばれていました。これは、当時は周波数の単位にサイクル(c/s)が使用されていたことによります。

最初に実用化されたAF軌道回路は、昭和32年8月に北陸本線田村～敦賀間に導入されました。ただし、まだ半導体の実績がないことから真空管を用いて実用化されています。この時は列車の有無を検知するだけの方式ですが、妨害を受けてもフェールセーフ性を保つように、信号の振幅

を20Hzで変調して、受信機では振幅が20Hzになっていることを検知するようにしてあります。数年するとゲルマニウムトランジスタが実用的になってきたことから、真空管の代わりにトランジスタを使用する方式が導入されていきました。さらに後にICが開発されると電子機器の信頼性は向上していきます。

このAF軌道回路を発展させたのが新幹線の軌道回路であり、ATC(Automatic Train Control:自動列車制御)です。新幹線のような高速運転をする場合、地上の信号機を見て運転するのではなく、車両の運転台に速度を表示することが必要と考えられました。そして地上の装置から運転台に情報を伝達する方法として、レールに流す信号に情報を載せることが考えられました。レールに流れる信号の情報を受電器と呼ばれるアンテナで受信するのです。これを実現する可能性を持っていたのがAF軌道回路でした。

ただし、在来線と新幹線では電車を動かすための電流が1ケタ違います。そうすると電源高調波が妨害となることが懸念されました。そのため、新幹線のAF軌道回路では電源高調波の影響を小さくするための検討が行われました。その他に車上装置が受信した情報を元に自動で列車にブレーキをかける仕組みを作り、新幹線の安全を支えているATCが実現しました。新幹線の開業は昭和39年10月ですから、研究開始から10年程度で電子回路の技術が導入されたこととなります。現在の新幹線でも、詳細については当時とだいぶ異なりますがAF軌道回路が使用されています。また、海外でもフランスなどで仕組みは全く異なりますが、可聴域を使った軌道回路が開発され使用されています。

一方、在来線の交流電化区間用の軌道回路については、その後開発された分倍周軌道回路が主役となりました。これは商用周波数の50/60Hzをその半分である25/30Hzに変換する分周器を使ってレールに電流を流し、受信側では25/30Hzを50/60Hzに変換する倍周器を使い、商用周波数用の軌道リレーを動作させるものです。これにより商用周波数軌道回路よりは部品点数は多くなるものの、商用周波数の電源を使って軌道回路を構成できます。分周器や倍周器は半導体を使わない電磁機器であるため、故障しにくいことが特徴です。また分周器には当時計算素子として注目を浴びたパラメトロンが使用されています。この分倍周軌道回路は海外を見ても例を見ないものです。

ME化軌道回路と軌道回路のデジタル化

1980年代に入り、マイクロコンピューターが広く使用

されてくるようになると、この技術が軌道回路にも導入されます。日本では連動装置(駅のポイントや信号機をコントロールする)、ATC車上装置などに続いて軌道回路にも導入され始めます。このような機器をME(マイクロエレクトロニクス)機器と呼んでいます。

ME機器では、これまでのアナログ機器では実現が難しかったさまざまな機能が実現可能になりました。例えば軌道回路は場所によっては天候や季節によって受信する信号の強さが変動してしまうのですが、これに対応するレベルの自動補正機能を簡単に付加することができます。また、1つの送受信器を使い、複数の区間に時間を分けて送受信することで、多くの軌道回路を制御することも可能になり、スペースや消費電力の削減につながります。

また、ATCのように多様な情報を伝送する必要があるとしても、マイクロコンピューターであれば対応が可能です。それまでは、速度情報に対応した信号をそれぞれ作って置いて、リレーを使って信号を選択し、増幅してレールに流す信号を作っていました。これに対しME機器では、直接信号波形を作ることができます。東急線などでは、一段式ブレーキ制御と呼ばれるATCが平成2年以降導入されていますが、これを支えているのがこのような軌道回路です。新幹線の軌道回路も現在では車両基地などの一部を除けばこのようなME機器が使用されています。

マイコン処理をさらに一歩進めたのが、軌道回路を使ったデジタル符号伝送です。90年代初めの鉄道総研では、軌道回路を使ったデジタル伝送の研究が行われていました。従来のATCでは、10Hz(1秒間に10回強弱を繰り返す)の信号であれば210km/hというような情報の送り方をしていました。この方法だと送信可能な情報の量は1度に10程度、あるいは2つの信号を使っても百程度でそれほど多くありません。これに対しデジタル伝送ではデータの情報量はずっと多くなります。たとえ伝送できるのがたったの10bitであっても $2^{10} = 1024$ なので1000の情報を送ることができます。また、情報が誤らないように検査するための符号をつけることができるので、信頼性も上がります。

この伝送方式を使って実現したのが車上主体型ATCと呼ばれるもので、デジタル伝送で送った情報を元に車両が最適なブレーキ制御を行う仕組みを実現しています。2000年代に導入されたJR東日本のD-ATC(山手・京浜東北線)やDS-ATC(新幹線)、JR東海のATC-NSと呼ばれるシステムがこの種類のATCの代表例ですが、いずれもレールにおける情報伝送にデジタル伝送を使用することで機能を実現しています。

このようにいろいろと進歩してきた軌道回路ですが、レールに送信器や受信器を取り付ける必要があります。送受信器の設置の仕方には2種類あって、1つは機器室に送受信器を集める方法です。この場合は機器の保守は簡単なのですが、ケーブルの敷設が大変です。もう1つは沿線に器具箱を置いて送受信器を配置する方法です。この場合には保守の手間がかかります。いずれも多大な労力をかけて維持しています。そして列車密度が低く、駅間の距離が長くなると相対的に軌道回路のコストが上がってきます。閑散線区では、駅間に列車が在線していることを確認する別の仕組みを作って、軌道回路を駅付近にしか設置していない場合もありますが、軌道回路をなくすことはできないかという議論が従来からよくなされています。

その答えの1つが無線で列車の位置をやりとりする無線式の列車制御システムです。JR東日本仙石線に導入されたATACSはその一例です。ATACSでは速度計の情報を元に車両が自分の位置を認識しています。まだ実績としては多くはありませんが、実績が増えるにつれて、このような無線のシステムは今後広がりを見せていくでしょう。

しかし、商用周波数軌道回路のような軌道回路を使った制御は、単純な仕組みであることから、早々になくなることはないと思います。

また、高密度線区においては依然として軌道回路が信頼を得ています。こういったところでは、レール絶縁を使わなくても列車が検知できる無絶縁軌道回路など、少しでもコストが下がるような技術が導入されてきていますが、無線を使ったシステムが実績を積むにつれて導入されていくことが考えられます。

(寺田夏樹/信号・情報技術研究部 信号システム研究室)

文献

- 1) 信号保安協会: 鉄道信号発達史 第4編 列車検知, pp273-345, 1980
- 2) 信号保安協会: リレー等列車検知, 鉄道信号発達史 第6編 信号機, pp273-345, 1980
- 3) 信号保安協会: キロサイクル軌道回路を語る, 信号保安, 第13巻, 第11号, pp.24-31, 1958