

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

帰線電流などの影響を受けにくい軌道回路を考える

列車の有無を検知する軌道回路は、天候や車両からの電流などの外部からの影響を受けます。これらの影響を受けにくく、また、多くの種別がある軌道回路を集約可能な新しい軌道回路を開発しました。



福田 光芳
Mitsuyoshi Fukuda
信号通信技術研究部
信号研究室
室長
[専門分野] 軌道回路,
ATC

はじめに

信号設備は、列車と列車の衝突が起さないように列車間隔を制御したり、駅で正しい進路に列車を進入させたりしています。列車がどこにいるのかを確実に知るために、「軌道回路」と呼ばれる装置が広く使われています。

軌道回路は、その名の通り「軌道（レール）」を電気的な「回路」として使用して列車の有無を判断する装置です。もともと鉄道に存在するレールを有効活用し、車上に特別な装置を搭載しなくても機能を発揮できるので、信号設備をシンプルに構成できます。

しかし、レールを用いる軌道回路は、レールに関わるさまざまな影響を受けます。例えば、レールは自然環境に置かれているため、汚損や湿気により電気的な特性が変化して電流が遠くまで届かなくなったりします。また、車両技術の進歩とともに、車両からレールに流れる電流の特徴が変わったり、車両の重量が変わったりします。これらは、いずれも信号分野以外の条件ですが、軌道回路に深く関わっており、軌道回路の課題の多くはレールに関わる境界問題といえます。以降では、はじめ

めに軌道回路が外部から受ける影響について説明します。続いて、外部からの影響、特に車両からの電流の影響を受けにくい軌道回路の開発について紹介します。

軌道回路のしくみ

軌道回路の最も単純な構成を図1に示します。電源から電流を送り、リレーで電流の有無（列車の有無）を判断します。電源は一部で直流電源が使用されていますが、多くの場合、交流電源が使用されています。交流電源の場合は、さまざまな周波数や変調方式が使用されています。限流抵抗は、電流が流れ過ぎて機器が焼損するのを防ぎます。列車が存在する場合は、図2のように輪軸（車輪と車軸）で2本のレールが電氣的に短絡され、電流がリレーまで届かなくなります。このとき、列車有りと判断します。

軌道回路の電気的特性と長さ

軌道回路はレールを電気回路の一部に用いています。レールの短い範囲に着目すると、その電気回路は図3のようにモデル化できますが、レールは長

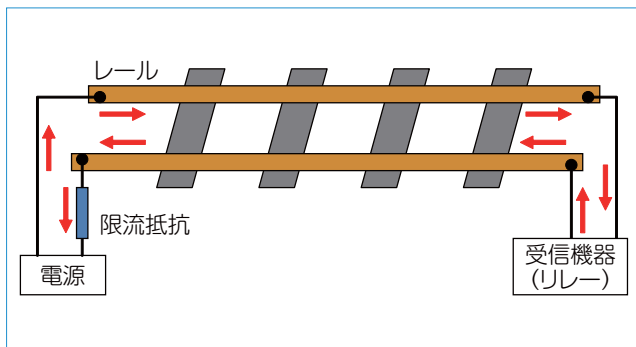


図1 軌道回路の基本構成

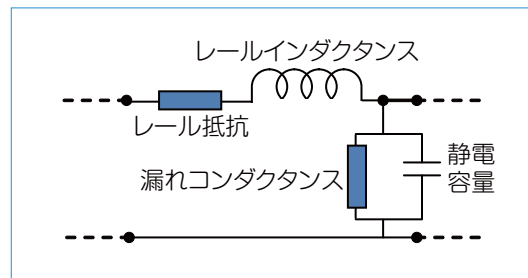


図3 軌道回路のモデル

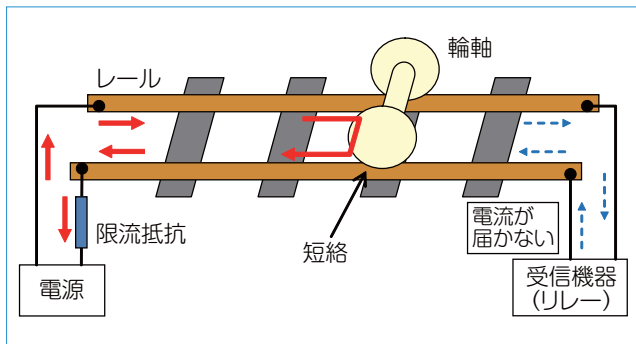


図2 輪軸による短絡

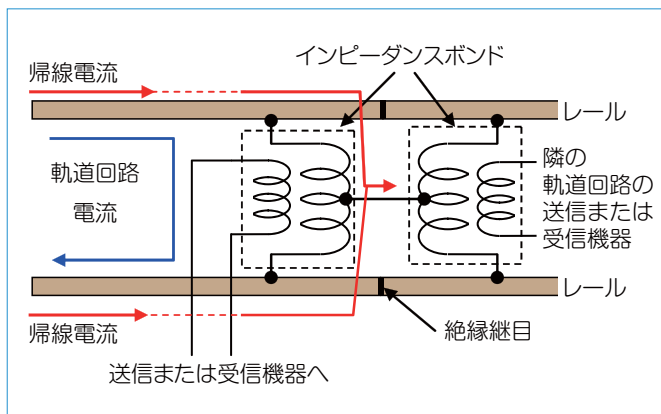


図4 軌道回路境界での電流の流れ方

いので、図3の電気回路が無数につながっていることとなります。レール抵抗、レールインダクタンス、静電容量は、レールの材質や形、軌間、道床などの種別によって概ね決まります。漏れコンダクタンスは、レールをマクラギに固定する締結装置やマクラギを伝って2本のレール間を漏れる電流(漏れ電流)の大きさを示すものです。レールを締結している部分に汚れが溜まっていたり、雨などで濡れていたりと、漏れ電流は大きくなります。漏れ電流が大きくなるとリレーまで届く電流は小さくなり、遠くまで届かなくなります。この影響を受ける度合いは軌道回路の周波数や送信・受信機器のインピーダンスによって異なります。そのため、軌道回路の種別によって構成可能な長さが異なり、一般には、低い周波数の方が長い軌道回路を構成できます。

電車からの電流による妨害

レールには軌道回路の電流だけでなく、電車からの電流(帰線電流)が流れています。図4は電化区間の軌道回路と軌道回路のつなぎ目(軌道回路境界)を示したものです。インピーダンスボンドと呼ばれる特殊なトランスを用いて、軌道回路の送信・受信機器とレールを接続しています。軌道回路電流は、左右のレールで逆向きに流れ、インピーダンスボンドを通して、一方のレールからもう一方のレールに流れます。また、帰線電流は左右のレールで同じ向きに流れ、インピーダンスボンドで合流して隣の軌道回路に流れ込みます。

軌道回路の電流は、数10mA～数A程度ですが、帰線電流は数100～数1000Aに達することがあります。大きな電流の中から小さな電流を取り出すことは、通常は難しいのですが、インピーダンスボンドを用いることで、簡単に軌道

回路の電流を取り出すことができます。帰線電流は左右のレールで同じ向きに流れているので、左右のレールの電流が等しければ、インピーダンスボンドの中の磁束は打ち消しあい、送信・受信機器には影響を与えません。ところが、軌道回路の電流は、左右で逆向きに流れているため、インピーダンスボンドは普通のトランスと同様に働き、軌道回路の電流に応じた電流が送信・受信機器側に流れます。つまり、インピーダンスボンドは、軌道回路電流にとってはトランスですが、帰線電流にとっては、左右のレールをつなぐ電線になり、軌道回路の電流だけを取り出せるのです。

しかし、分岐や長い曲線を含む軌道回路では、左右レールの経路の抵抗に差が出るため、左右レールの帰線電流の大きさが異なる場合があります。この電流の差を不平衡電流と呼びます。不平衡電流の影響は、インピーダンス

表1 低周波MSK軌道回路の主な仕様

項目	性能
搬送波周波数	83Hz, 135Hz, 165Hz
変調方式	MSK 変調
S/N	15dB
偏移周波数	± 5Hz
伝送速度	20bps
制御長	1.5km ~ 2.0km
漏れコンダクタンス	最大 0.5S/km
符号方式	巡回符号 (11bit/code)
情報数	5 情報
ID 数	8 軌道回路

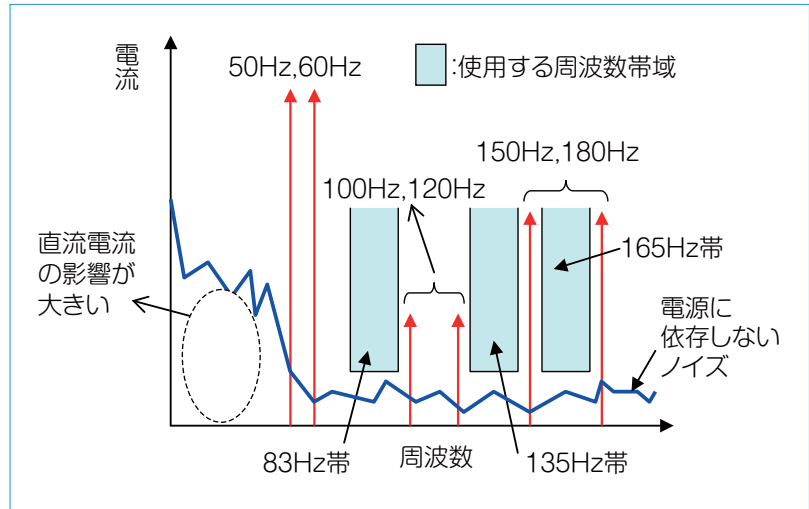


図5 電源高調波と使用帯域

ボンドで打ち消すことができず、電流に応じた電圧が送信・受信機器に印加されます。軌道回路で使用している周波数帯のノイズが帰線電流に含まれていると、軌道回路が誤動作することがあります¹⁾。

帰線電流には、本来の電流（電化方式により、直流または50/60Hz）以外にもさまざまなノイズ成分が含まれています。ノイズを周波数に着目して整理すると、電源周波数に関するノイズと電源周波数に関係しないノイズに分けられます。直流電化の場合も直流に整流する前の交流電源の周波数成分が含まれるので、いずれの場合にも、その地域の電源周波数とその整数倍の周波数のノイズ（電源高調波）が大きくなります。また、直流電化の間では、直流電流が変化すると数10Hz以下の周波数帯域のノイズが発生したようになり、影響を受けやすくなります。

なお、新しい形式の車両を製造する場合には、帰線電流によって軌道回路が誤動作しないことを試験によって確認しています。しかし、軌道回路種別が多いこと、誤動作を防止するための帰線電流の許容値が小さい種別がある

ことなどから、車両開発時にノイズを低減することに手間がかかっています。

外部からの影響を受けにくい軌道回路の開発

これまでに、線区の条件に合わせて、多数の種別の軌道回路が開発されてきました。しかし、保守・工事の効率性を考えると、種別が多いことは、不利になります。また、車両開発の点でも種別の多さや、ノイズ耐量の小さい軌道回路種別があることは同様です。そこで多様な線区の条件下で使用でき、

外部からの影響を受けにくい低周波MSK軌道回路（¹⁾参照）を開発しました²⁾。

表1に主な仕様を示します。天候などによる電気的特性の変化があっても十分な長さの軌道回路を構成できること、様々な帰線電流の妨害に強いことなどが特徴です。

搬送波周波数の83Hz, 135Hz, 165Hzは比較的低い周波数なので、漏れコンダクタンスが変化しても影響を小さく抑えられます。これにより、2km程度の軌道回路に対応できるの

MSK 変調方式

MSK (Minimum Shift Keying) 変調方式は、デジタル符号の“0”, “1”に合わせて、搬送波を中心の周波数から一定の大きさだけ上下に変化させるFSK (Frequency Shift Keying) 変調方式の一種です。名前が示す通り、同じ伝送速度を確保する場合に、FSK変調方式の中で最も帯域を狭くすることができます（同じ帯域幅であれば、最も伝送速度を速くできます）。中心から変化させる周波数（偏移周波数）が $\pm\Delta f$ [Hz] の場合、 $4 \times \Delta f$ [bps] の伝送速度になります。

デジタル ATC

レールを介して地上から伝送されるデジタル情報と車上のデータベースとを用いて、ブレーキ制御を行う新しいATCです。MSK変調方式を用いて情報量を大きくし、停止目標までの距離や位置の情報などを伝送しています。これに車上のデータベースに記憶している車両のブレーキ性能や線路条件を加味し、ブレーキの動作開始の判定を行っています。従来のATCと比べて効率的な制御が可能となり、到達時分や運転時隔の短縮に効果があります。新幹線や都市部の在来線の一部で使われています。

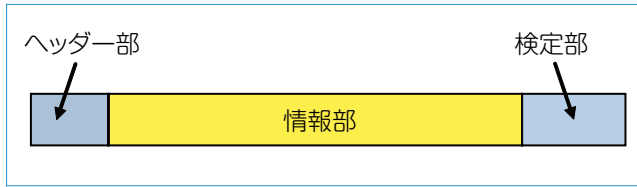


図6 デジタルATCなどの例

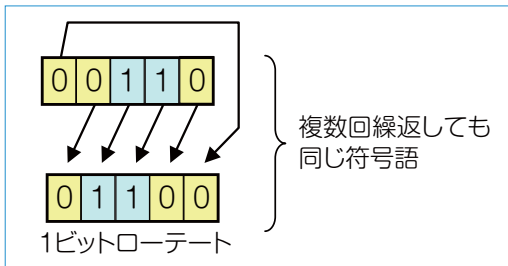


図7 巡回符号のイメージ

で、ほとんどの線区で使用できます。

搬送波周波数は図5の水色の部分の帯域なので、赤色の矢印で示した電源周波数に関係するノイズの影響を避けることができます。一方、図5に青色で示した電源周波数に関係しないノイズの影響も考える必要があります。これについては、レールに流す電流でデジタル符号を伝送して、その符号を照合し、軌道回路の電流とノイズとを区別することで、ノイズによる誤動作を防ぐようにしました。これはデジタルATC³⁾⁴⁾(※参照)などで使用されている技術を利用したものです。

しかし、図5の水色の帯域は、フィルタの性能などを考えると20Hz程度になってしまうので、低い伝送速度しか確保できません。必要なデジタル符号の受信に過大な時間がかかると、軌道回路としての機能が果たせなくなってしまうので、短時間で情報を受信できる符号方式を採用しました。デジタルATCなどで使用されているデジタル符号は、図6に示すようにヘッダー部、情報部、検定部から構成されます。これらのデジタル符号は送信器・受信器で同期をとらずに繰り返し伝送され

ているので、受信器がデジタル符号の途中のビットから受信開始した場合は、ヘッダー部を受信するまで待つ必要があります。低い伝送速度の場合、この待ち時間が無視できないので、図7のような巡回符号方式を採用しました。巡回符号方式では、特定のビット列も、そのビット列を巡回(ローテート)させたビット列も同じ情報として扱います。よって、どの位置から受信しても情報を確定できるので、待ち時間が発生しません。

情報数は符号語5種類と電流の有無による列車在線検知の1種類を加えた6情報です。1情報を予備とし、残りの5情報を用いて信号の5現示を実現できます。開発した軌道回路で使用するデジタル符号の例を表2に示します。IDは1～8までの8種類あり、それぞれ①～⑤の5種類の情報があります。①～⑤に信号機の「青」「黄」などの現示を割り当てて使用します。

まとめ

軌道回路は、帰線電流をはじめとして、外部からの影響を受けます。低周波MSK軌道回路は、特に帰線電流に

表2 符号語の例

ID	現示	符号語										
1	①	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
	②	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1
	③	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
	④	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1
	⑤	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1
ID2～ID7は省略												
8	①	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
	②	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1
	③	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1
	④	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
	⑤	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1

①～⑤を進行、停止などの現示に割り当てる

よる影響を抑制し、多様な線区条件で使用可能です。既存のさまざまな軌道回路を低周波MSK軌道回路に置き換えることで、軌道回路種別を集約することができます。また、車両開発の課題のひとつを解決することもできると考えています。

今後も、信号設備だけにとらわれるのではなく、鉄道システム全体を見渡した上で、より安全で、安定した鉄道システムの構築に寄与したいと考えています。RRR

文献

- 1) 電気学会・電気鉄道の電磁環境に関する共同研究委員会編：鉄道とEMC，オーム社，2008
- 2) 福田光芳，寺田夏樹，北野公一，遠山喬：耐ノイズ性を向上した中間軌道回路の開発，鉄道総研報告，Vol.25，No.5，pp.17-22，2011.5
- 3) 高重哲夫，渡辺郁夫：高速高密度区間用デジタルATCの開発，鉄道総研報告，Vol.9，No.1，pp.49-54，1995.1
- 4) 渡辺郁夫，高重哲夫，志田洋，小林巧，内田清五，音無隆，岸川潤：山陽新幹線におけるデジタルATC性能試験，鉄道総研報告，Vol.14，No.2，pp.41-46，2000.2