車両内の電気の流れをみる

電車や電気機関車に流れる電気は，架線からパンタグラフを通じて車内に入り，車両を駆動する主回路，冷暖房や照明のための補助回路で電気を使用し，台車に取り付けられた接地ブラシ，車輪を通じて車両から出て，マイナスの電線であるレールへと流れていきます。主回路では以前は直流モーターが使用され，抵抗制御やチョッパー制御が採用されていましたが，現在は交流モーターが多く使用され，インバーター制御が主流となっています。ここでは，パンタグラフから車輪までの電気の流れや，抵抗制御・チョッパー制御・インバーター制御について紹介します。

米山　崇
Takashi Yoneyama
車両制御技術研究部
水素・エネルギー研究室
副主任研究員
［専門分野］電車の電気回路，燃料電池，高圧ガス

はじめに

電気車（電車と電気機関車の総称）は変電所から架線（架空電車線）を通じて送られてきた電気を屋根上のパンタグラフから取り込み，車両の中で電気を消費し，車輪からレールを通じて変電所に電気を返しています。

パンタグラフから入った電気は，車両を動かすモーターを通る主回路，または，それ以外の電灯や空調などの補助回路を通り，接地端子台，接地装置を経て車軸，車輪へ至ります（**図1**）。ここではこれら車両内の電気の流れについて紹介します。

パンタグラフ

パンタグラフは電車の屋根上に取り付けられ架線から電車に電力を取り入れる装置です。パンタグラフには，電車の走行に十分な大きさの電流が流せること，架線の高さが変わっても架線を押し付ける力が変わらないことや架線から離線しない追従性，高速で走行しても騒音を出しにくい低騒音性などが求められます。

以前はひし形や下枠交差形（**図2**）が用いられていましたが，最近では，小型軽量なシングルアーム形（**図3**）も普及しています。シングルアーム形は，使用できる架線の高さの範囲が広いほ

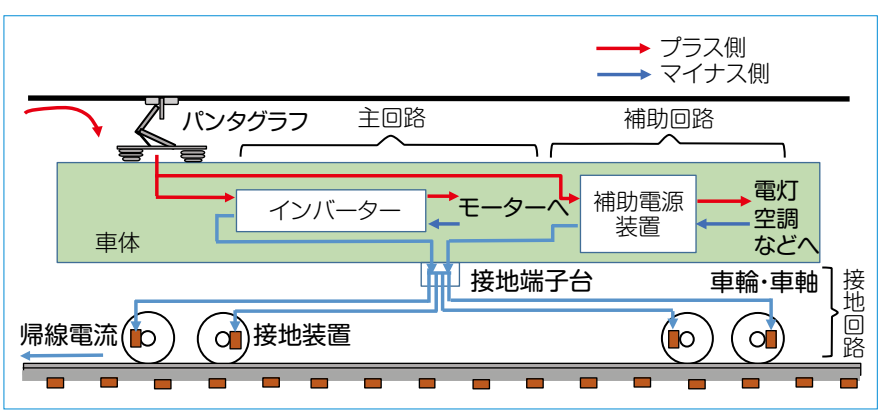

図1　車両内の電気の流れ

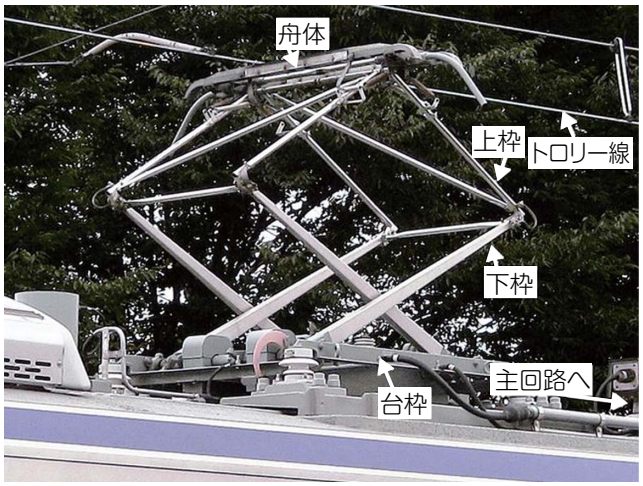

図2　パンタグラフ（下枠交差形）[1)]

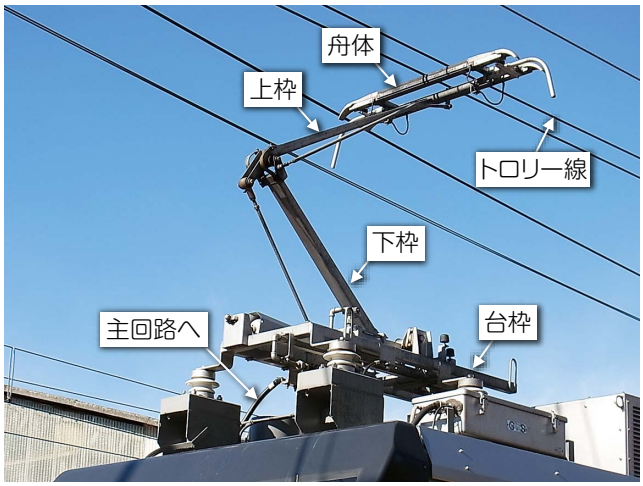

図3　パンタグラフ（シングルアーム形）

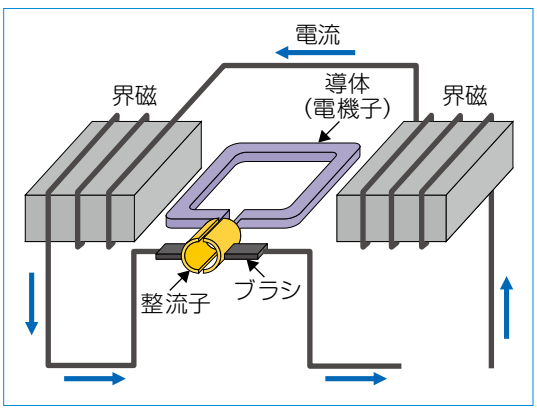

図4　直流モーターのしくみ

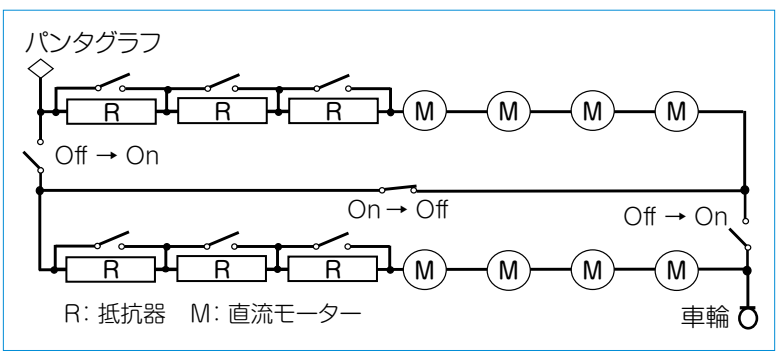

図5　抵抗制御車の主回路概略図（On/Offは直列→並列切替時の様子）

か，風を受ける部材が少ないため風切り音が減り，構造が簡単で部品が少ないことにより省メンテナンス化が図られています。また，冬季の積雪に強いというメリットもあります。

舟体の架線との接触部分には「すり板」が取り付けられています。すり板は摩耗部品ですので，定期的に交換が必要で，長寿命化・低コスト化の研究開発が絶えず行われています。

電気の流れは，架線→「すり板」→「舟体」→「上枠」→「下枠」→「台枠」→主回路へ，という順序になります[1)]。

主回路と補助回路

車両の中の電気回路は大きく分けて，車両を駆動するモーターへ電気を送る「主回路」と，それ以外の電灯や空調などの電気を流す「補助回路」に分けられます。「主回路」は，モーターの種類や，技術の進歩にともない「抵抗制御」「チョッパー制御」「インバーター制御」と変わってきました。これらについては，この後で述べます。

もう一方の「補助回路」については，本誌の2017年10月号の鉄道技術来し方行く末「車両用補助電源装置」で詳しく紹介されています。

抵抗制御

鉄道車両の走行用のモーターは，以前は直流モーター（**図4**）が主流でした。直流モーターでは，電車が動き始めるときに電流が流れすぎないように，モーターと架線の間に抵抗器を入れて，適切な電流値になるように制御します（**図5**）。電車が動き始めると，モーターの回転により「逆起電力」というモーターの電機子のコイルがモーターの電流を減らす方向に発電を始めるため，電流が減らないように主制御器と呼ばれる装置の中にある抵抗器に並列に接続されたスイッチで抵抗器を短絡し，抵抗値を下げていきます。**図5**ですべての抵抗器が短絡されると，8個直列に接続されていたモーターを4個直列の2並列にすることで，モーターにかかる電圧を大きくし，これを直並列制御といいます。電車のモーターのように回転速度が変わり，あらゆる回転速度でトルク（回転する力）を生む必要があるモーターに対して，抵抗器と機械的なスイッチという比較的基礎的な技術を用いることで，直流電圧の調整を行い運転することができます。

チョッパー制御

抵抗制御には電圧調整のための機械的な接点部品が多いことや，抵抗器で電気エネルギーをロスしているなど

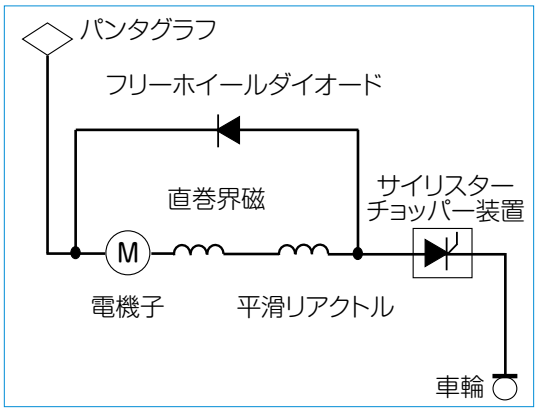

図6　チョッパー制御車の主回路概略図

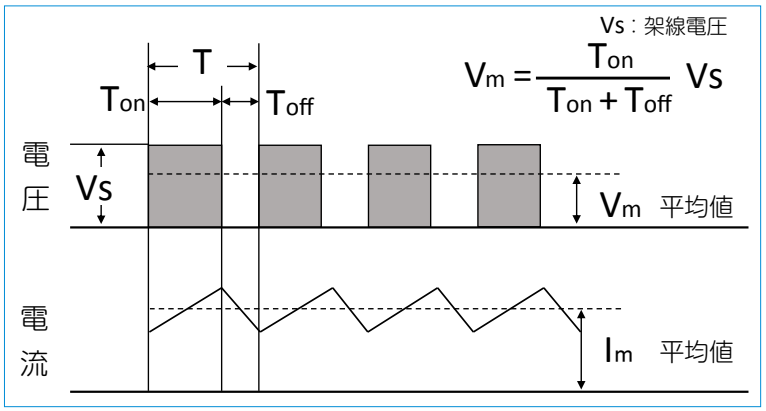

図7　チョッパー制御における電圧と電流の波形

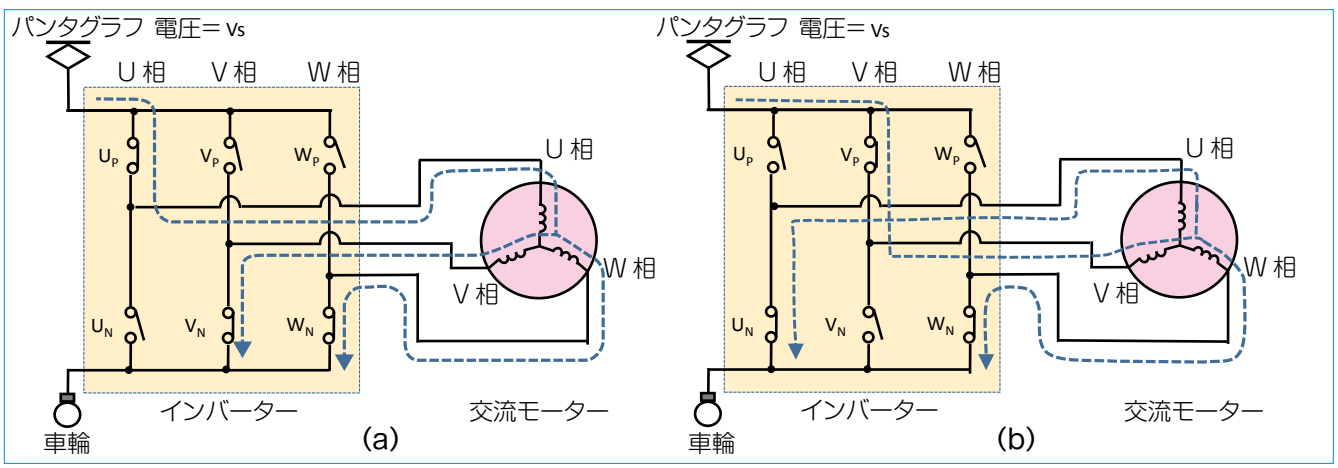

図8　インバーター装置と交流モーター

の課題もありました。技術の進歩により直流の電圧と電流を1秒間に数百回という高速でOn／Offが可能なサイリスターと呼ばれる半導体のスイッチが生まれました。**図6**はサイリスターを利用したチョッパー制御の車両の主回路の図です。架線電圧をスイッチで切り刻むことからチョッパーといわれ，**図7**のように，動作の全体の時間Tは変えずに，モーターに電圧をかける時間（T_{on}）を増やし，電圧をかけない時間（T_{off}）を減らすことで，モーターに与える電圧（V_m：モーターにかかっている電圧の時間的な平均）を制御することができます。電圧はパルス状（矩形波）になりますが，リアクトル（コイル）の作用により，途絶えることなくモーターに電流を流すことができます。

チョッパー制御では，機械的なスイッチが減ることで，故障や点検・修理の作業が減るほか，ブレーキ時にモーターを発電機として使用し，ほかの電車で電気を再利用する回生ブレーキも使用することができるようになりました。ただし，直流モーターを依然として使用していることにより，ブラシ・整流子の整備作業が必要なことや，フラッシュオーバーというモーターの故障が発生する可能性があるため，技術の進歩にともない，次第にブラシ・整流子が不要な交流モーターへと変わっていきました。

インバーター制御

現在では，製造されるほとんどの車両では，インバーターと呼ばれる装置と交流モーター（誘導電動機または永久磁石同期電動機）が使用されています（**図8**）。インバーターにはシリコン（Si）を主な材料にした半導体のスイッチであるGTOサイリスターやIGBTが使用されてきましたが，最近ではシリコンカーバイド（SiC）を材料にしたMOSFETも使われ始めています。

交流モーターは一般的に3本のコイルにつながれた電線（U相･V相･W相）があり，モーターの回転数に合わせて，モーターに流れる電流の周波数（1秒間に電流がプラス・マイナスを繰り返す回数）を変える必要があります。これをインバーターでは6個の半導体のスイッチが行います。**図8**の**(a)**では，架線からモーターへはU相から電流が流れ込み，V相とW相から電流が出て，マイナス側の回路を通って，車輪･レールへと流れていきます。これを**図8**の**(b)**のようにスイッチのOn/Offを切り

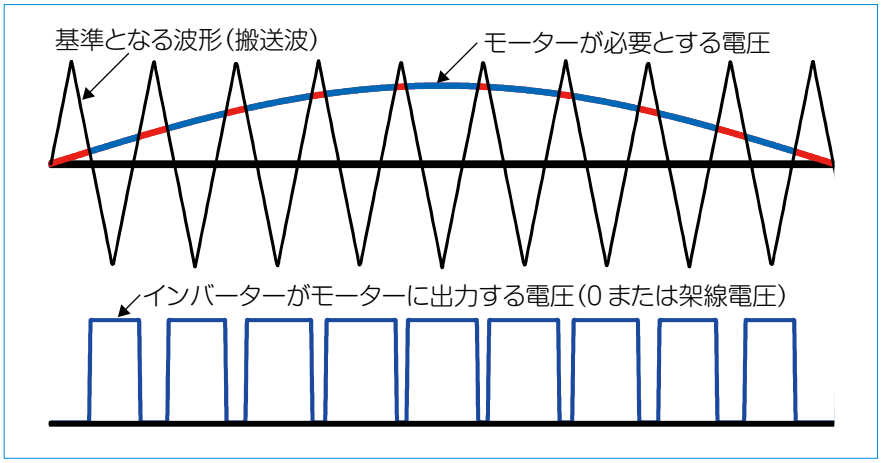

図9　モーターが必要とする電圧と実際にインバーターが出力する電圧

替えると，モーターの内部を流れる電流の向きが変わります（モーターが回転する際に流れる電流の向きが変わるため，交流モーターと呼ばれています）。さらに，モーターに与える電圧の大きさの調整も必要ですが，**図9**に示すように，インバーター内部のコンピューターで電車の速度，モーターに流れている電流などからモーターが必要とする電圧（交流）の大きさを計算して，コンピューター内部で作った基準となる波形（搬送波）に対して，必要となる電圧の方が大きいときは，架線側のスイッチをOnし，パルス状の電圧を出力します[2]。

このようにすることで，インバーター制御装置では電圧の調整や電流の向きを変えることができ，直流モーターの電車のように抵抗器，機械的なスイッチ，ブラシ，整流子といった部品を使用する必要がなく，省エネルギーで，メンテナンス作業の少ない装置になっています。

接地回路

架線からパンタグラフにより取り込まれ，主回路や補助回路を通った電流は，帰線電流と呼ばれ，車輪を通じてレールに流れ，変電所へ帰っていきます。車内で帰線電流が流れる回路を接地回路と呼び，「車両の装置」→「接地端子台」→「接地装置」→「車軸」→「車輪」→レールへと流れていきます（**図1**）。

接地装置は車体から流れてきた電流を鉄でできた車軸・車輪を通じてレールへと流す装置です（**図10**）。車軸に取り付けられた集電環という金属のリングと金属とカーボン（炭素）でできた接地ブラシからできています。車軸と一緒に回転する集電環へ接地ブラシがこすれながら接触することで電気的につながっています[3]。

なお，電気車や一部の気動車では「車体」→「接地装置」が電線でつながれている，いわゆるボディーアースとなっています。

おわりに

ここでは，車両内の電気の流れと題して，パンタグラフから車輪までの電気の流れや，主回路の抵抗制御・チョッパー制御・インバーター制御の概略を紹介しました。

もともと，電気は目で見ることが難しいものですが，以前の抵抗制御の電車の主回路は，スイッチ類が機械部品であることもあり，電気の流れを目で追いやすいものでした。しかし，現在のように半導体のスイッチが電子基板のコンピューターにより高速でOn/Offされているものは，実物だけを見ても電気の流れを理解することは難しくなってきています。また，電気車の電気の入口のパンタグラフは目にする機会も多いですが，出口の接地装置はなかなか目にする機会がないものであると思います。こちらも接地ブラシという摩耗部品があるとともに，電気回路にとって重要なアースを構成する回路です。

この記事がこうした普段見ることのない電気の流れを「見る」一助となりましたら幸いです。RRR

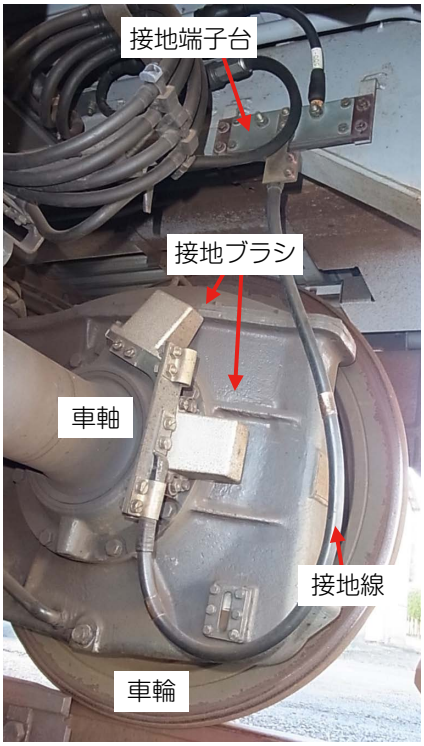

図10　接地装置と接地端子台

文　献

1) 根津一嘉：走行する車両に絶やさず電気を流す，RRR，Vol.66，No.10，pp.18-21，2009
2) 古谷勇真：モータを動かす電気の流れ，RRR，Vol.66，No.10，pp.26-29，2009
3) 廿日出悟：車両からレールまでの電気の流れ，RRR，Vol.66，No.10，pp.30-33，2009