

# 電気ブレーキ

大江 晋太郎(車両制御技術研究部 駆動制御 主任研究員)

## はじめに

電車や電気機関車(これ以降の説明では、両者を総称して「電気車」と記述します)のように電動機を動力源とする鉄道車両では、列車を減速・停止させる際に、電動機に接続される電気回路や電力変換装置の制御回路を切り替えることにより、電動機を発電機として機能させることができます。「電気ブレーキ」とは、電気車の電動機を発電機として動作させ、走行する電気車の運動エネルギーを電気エネルギーに変換し、何らかの方式でそのエネルギーを消費することにより、列車を減速させるブレーキ方式です。

電気ブレーキは、高速から低速まで幅広い範囲の速度域で安定かつ強力なブレーキ力を発生させることが可能であり、一般的な「摩擦ブレーキ」と違って、車輪の発熱問題の心配や摩耗部品の交換作業が不要となるなど、有利な点が多く、今日の電気車には必ず搭載されている重要な装置となっています。

## 電気ブレーキ方式の分類

電気ブレーキを安定に作用させるには、発生した電気エネルギーを「確実に消費させる」ということが大切ですが、その消費方法の違いにより「発電ブレーキ」と「回生ブレーキ」に分類することができます。「発電ブレーキ」(図1)は、ブレーキ時に発生した電気エネルギーを自らが搭載する抵抗器でジュール熱として消費させることによりブレーキ力を得る方式です。「回生ブレーキ」(図2)は、発生した電気エネルギーをパンタグラフから「架線(電車線)」に戻し、近くを走行する他の電気車が消費する、もしくは変電所を介して鉄道会社や電力会社の一般配電網で消費してもらうことでブレーキ力を得る方式です。

発電ブレーキでは、発生した電気エネルギーを電気車自身で消費することができるため、常に安定的なブレーキ力を確保することができますが、そのブレーキ力に見合った容量の抵抗器を新たに搭載するスペースが必要となり、その分だけ車両重量の増加につながります。一方回生ブレーキでは、発生するブレーキ力は、「電気エネルギーの消費者(消費車)次第」というのは極端な話ですが、ある程度の変動要素を想定する必要があるため、不足するブレーキ力は、摩擦ブレーキで補完することになります。

## 電気機関車の電気ブレーキ

狭い国土に多くの山間部が存在する我が国では、各地に急こう配線区があります。電気ブレーキは、下り坂で長時間にわたり摩擦ブレーキを使用する際に問題となる、車輪の発熱やブレーキ部品の摩耗増加を防止する技術として開発が進められてきました。

急こう配線区の代表例としては、すでに廃線となってしまいましたが、信越線の「横川～軽井沢」間が有名です。この区間は、歯車の組合せを応用した「アプト式鉄道」と呼ばれる特殊な運転方法からスタートし、後に「レール/車輪間の摩擦力」による一般的な運転方法に転換しました。転換に合わせて新たに開発されたEF63形電気機関車は、より強力な発電ブレーキを搭載して輸送量の増加と通過時間の短縮を実現しました。また、山形新幹線が走行する「福島～米沢」間も急こう配線区として有名で、昭和24年に直流電化、昭和43年に交流電化へ切換え、平成4年に山形新幹線開業と、複雑な経過を辿ってきました。当然ながら、使用された電気機関車も変遷を重ねました。当初は、電気ブレーキを装備しない一般型の電気機関車からスタートしたものの、やがて摩擦ブレーキ時の車輪温度上昇問題が表面化し、回生ブレーキ機能を追加する改造工事が、機関車はもとより地上の変電所設備に対しても行われました。その後、出力を增強した新型機関車へ転換される際には、より安定的な電気ブレーキとするため、発電ブレーキ方式が採用されています。交流電化への転換が決まると、新たにこう配線区用の交流電気機関車開発がスタートしました。

当時の直流電気機関車では、加速時の制御に「抵抗制御」という方式を用いており、抵抗器は必ず搭載されます。したがって発電ブレーキ用として追加が必要な容量は少なく済みますが、交流電気機関車では加速制御用の抵抗器は不要であるため、発電ブレーキのためだけに大容量の抵抗器を搭載することは現実的ではありません。そこで、当時の最新技術である「サイリスタ素子」と呼ばれる半導体を用いて回生ブレーキの制御を行う研究・開発が進められました。こうして誕生したのがED78・EF71形電気機関車で、山形新幹線開業まで活躍しました。

近年、最新の「VVVFインバータ制御方式」を採用した新型電気機関車への置き換えが進められており、全てのタイプに発電ブレーキ装置が搭載されています。

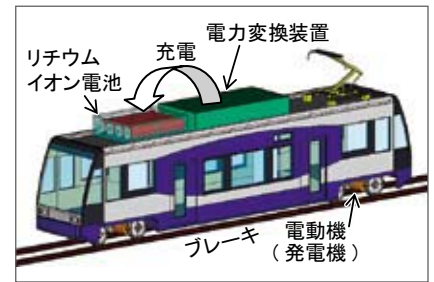
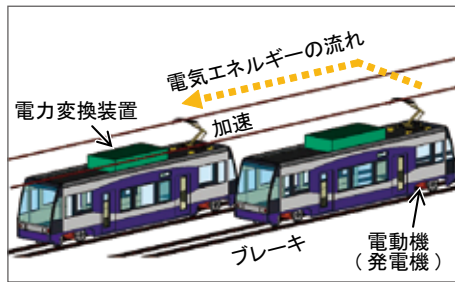
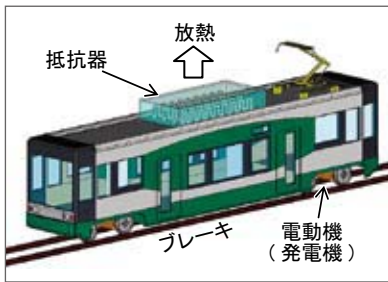


図1 発電ブレーキ(抵抗器にて放熱)

図2 回生ブレーキ(他車の加速に使用)

図3 回生ブレーキ(蓄エネ方式)

### 在来線電車の電気ブレーキ

中央線の前身である甲武鉄道において、本格的な電車運転が開始された当時から、加速制御用の抵抗器は既に床下に取り付けられていましたが、容積・重量とも大きく、発電ブレーキ用の抵抗器を新たに追加することは困難でした。その後、小型で大容量の抵抗器が開発され、発電ブレーキの搭載が一気に進みました。やがて、先ほどのサイリスタ素子を用いた加速・回生ブレーキ制御方式の開発が進められていきます。「チョップ制御」と呼ばれる当時の最新技術は、主に地下鉄を運行する鉄道事業者が先導して開発が進みました。その理由として、地下鉄では発電ブレーキ時に発生する熱がトンネル内に留まり、ホームでは、乗降客が床下から吹き上がる不快な熱風を浴びることになります。実際、東京の地下鉄千代田線では、一足先に運行を開始したチョップ制御車の中に、猛烈な熱風を発生する国鉄車両が乗り入れ、不評を買いました。地下鉄事業者からも、チョップ制御の203系電車への置き換えにより、ようやく解決されました。回生ブレーキと言えば、省エネルギー技術の代名詞と思われがちですが、このように発電ブレーキ時の熱風対策という面も持ち合わせていました。

今日では、地上・地下を問わず、全ての線区の新型電車に、回生ブレーキ機能を有する「VVVFインバータ制御」が採用されています。以前に、「回生ブレーキでは、発生するブレーキ力は電気エネルギーを消費できる他の車両の存在に依存する」とご紹介しましたが、大都市の線区では、早朝・深夜を除いて、回生ブレーキの効きが悪くなる現象は、ほとんどありません。しかし、列車の運転間隔が開く地方線区や電化区間の終端近くでは、やはり回生ブレーキの効きが悪くなる現象は避けられません。こうした線区を走行することが想定される電車には、発電ブレーキ用の抵抗器を搭載して、回生および発電ブレーキを併用できる機能を持つ車両も開発されています。

### 新幹線電車の電気ブレーキ

0系と呼ばれる初代の新幹線電車には、発電ブレーキが搭載されました。その後、東北・上越新幹線開業時の200系、「2階建て新幹線」と呼ばれた100系、山形新幹線開業時の400系までは、床下に抵抗器を搭載した発電ブレーキ方式が採用されています。やがて「初代のぞみ形」である300系において、初めて回生ブレーキが実用化されました。この300系新幹線電車の回生ブレーキは、次世代新幹線の制御システムとして1980年代より開発が進められてきました。回生ブレーキ方式なので、床下の抵抗器は不要となり車両の軽量化が可能となります。1986年には、新たに開発した「PWMコンバータ」と呼ばれる電力変換装置を廃車となった0系新幹線車両に仮設し、国鉄浜松工場（現JR東海浜松工場）構内にて走行試験が行われ、貴重なデータが得られました。鉄道総研では、実物車両により実際の走行状態を再現できる「車両試験装置」を用いて加速・減速試験を繰り返し行い、制御上の問題点の抽出と解決策の検証などの基礎実験が行われました。そして、PWMコンバータによる回生ブレーキを初めて実用化した300系新幹線のシステムは、今日、新幹線車両の標準仕様となっています。

### 回生ブレーキと蓄エネ技術

従来、回生時の電気エネルギーが他車で消費しきれない場合、摩擦ブレーキに肩代わりさせたり、抵抗器で熱に変換して大気に放出させたりしていました。鉄道総研では、回生ブレーキ時に発生する電気エネルギーを自車に搭載した小型で大容量の「リチウムイオン電池」に蓄えることにより、無駄のない回生ブレーキシステム（図3）を実現した試験電車「ハイ！トラム」を開発し、走行試験を実施しています。リチウムイオン電池などを用いた「蓄エネ技術」は、今後の回生ブレーキシステムを支える重要な要素として、注目される技術となるものと思われます。