

止めるの基本

南京 政信
車両制御技術研究部
(ブレーキ制御 研究室長)

狩野 泰
同
(同 副主任研究員)



なんきょう まさのぶ かりの やすし

はじめに

1964年に新幹線が営業を開始して以来、我が国の鉄道技術はめざましい進歩を続け、列車の運転速度はいまや300km/hを超えようとしています。しかし、「走り出したら停まらなければならない」ことが交通機械の宿命ですので、安全に停止するための機能を持つことは必須となっています。新幹線のような高速列車に限らず、すべての鉄道車両の安全な運転を支えているのが、ブレーキ装置です。ここでは、「止めるの基本」を担うブレーキシステムについて、いかにして安全性と信頼性が確保されているかを中心に述べるとともに、最近の研究開発の動向として、電動のブレーキ装置を紹介いたします。

安全の確保 ～フェールセーフ機構～

鉄道車両のブレーキ装置は、機構的に大別して図1に示すような分類をすることが出来ます。電車に用いられる「電気ブレーキ」は、駆動用の電動機を発電機として運転することによってブレーキ力を得るタイプのブレーキ方式です。機械ブレーキ方式に比べて、摩擦・摩耗が無く消耗部品がないという大きなメリットがあり、特に「回生ブレーキ」は、発電で得られた電力を架線に戻すことによって他の列車

の加速等に利用できるようになることから、省エネルギー性の高いものです。一方、電気ブレーキを正常に働かせるには、その制御等のためある程度の電力が必要です。また、回生ブレーキでは、架線の電圧が高かったり、近くにエネルギーを消費する列車がいなかったりする場合には、十分な制動力が得られないことがあります。すなわち、架線やその他何らかのトラブルが発生した場合に、電気ブレーキは使えないことを前提に考える必要があります。万が一の緊急時に用いられる最終的な減速の手段としては、あまりあてにできないものとも言えます。(一部、路面電車等で考え方が異なる場合があります。)

「機械ブレーキ」は、車輪やブレーキディスクと呼ばれる回転体に対して、制輪子を押し付けることによって摩擦力を発生させ、列車を止めるものであることをご存じかと思えます。図2に示すように、その機構は単純で、繰り返しの動作に耐える堅牢な構造となっています。制輪子を車輪等に押し付ける力の源とは、圧縮空気の圧力や油圧が用いられていますが、これらの流体は、空気タンクやアキュムレータと呼ばれる蓄圧装置を用いて、高い圧力を保持したまま蓄えておくことができます。列車が何らかの原因で電力の供給やその他の動力源を失い、すぐにでも停止

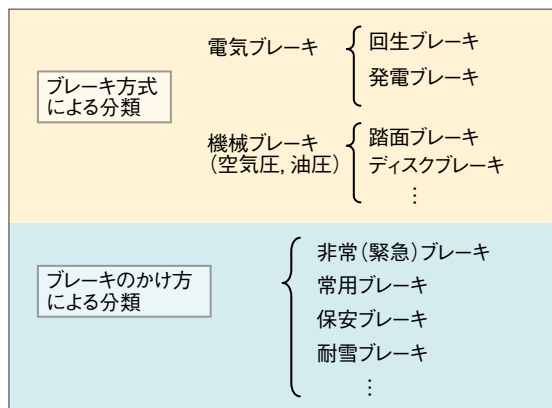


図1 鉄道車両におけるブレーキの分類

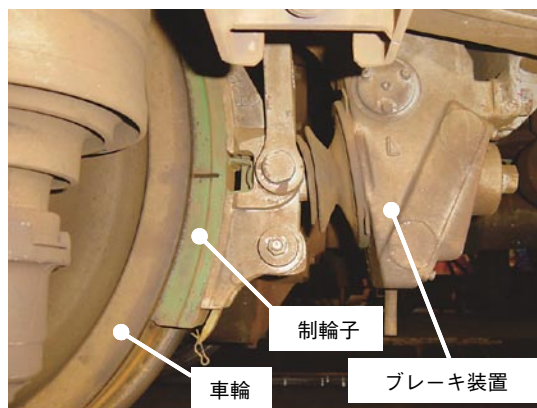


図2 機械ブレーキ装置（踏面ブレーキ）

しなければならないときでも、このような形で常時圧力を蓄えておけば、これを装置に送ることによって、機械ブレーキを作動させることができます。このように、機械ブレーキは、機構の簡素さも相まって、安全性の高いフェールセーフの構成が容易なものとなっています。ブレーキのかけ方の種類で、「非常ブレーキ」とか「緊急ブレーキ」と呼ばれるものは、万が一の時に速やかに列車を停止させるために用いられますが、これらはすべてこのように機械ブレーキを作動させる方式になっています。

ブレーキ制御システム

安全性の高い機械ブレーキですが、摩擦によって制動力を得るものであるため、制輪子の摩擦により交換が必要になる、車輪も摩擦したり熱の影響を受けたりして傷む、摩擦によって不快な音が発生する、などの欠点があります。そのため、多くの車両で、普段は機械ブレーキを可能な限り使わないようにし、肝心の時にはしっかり仕事をしてもらう、というような考え方でブレーキシステムが構成されています。そこで、消耗品が発生せず、省エネルギー性の高い電気ブレーキが主役に躍り出ます。列車は、駅等での停車を繰り返しますが、このような通常の運転では、電気ブレーキを優先的に使用し、それでもブレーキ力が足りない場合は、その足りない分だけ機械ブレーキを作動させ、これらのトータルで必要なブレーキ性能を確保するという制御を行うようにブレーキシステムは設計されています(図3)。現在のところ、機械ブレーキは作動流体に圧縮空気を用いるものが主流となっているので、鉄道車両の用語としては「空気ブレーキ」と呼ばれることが多くなっています。この空気ブレーキと電気ブレーキの双方の調和を取るということから、上に述べたような制御方法を「電空協調制御」と呼びます。

ところで、国内の電化区間を走る旅客列車のほとんどは、動力分散型の電車によって組成されています。一部の車種を除き、電車列車は編成を構成する車両のすべてが動力、すなわちモータを持っているのではなく、動力を持たない付随車が半数またはそれ以上連結されています。付随車は、上で述べた電気ブレーキの機能を持ちませんので、ブレーキ装置としては空気ブレーキのみを装備しています。通常の減速・停止で、付随車の空気ブレーキを頻繁に使用することは、制輪子の摩擦低減や省エネルギーの観点から、上と同様に極力避けたいと考えるのはごく自然なことです。

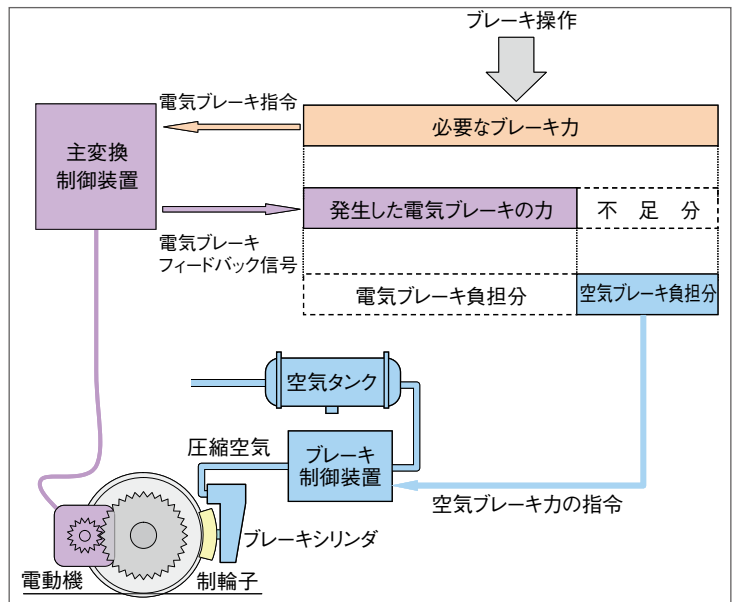


図3 電空協調ブレーキシステムの考え方

これを実現するのが、やはり電気ブレーキを用いた制御です。例えば、動力車と付随車おのおの1両ずつを連結した列車を考えます。このような列車でブレーキをかけたとき、動力車で発生した電気ブレーキの力が大きく、動力車自身だけでなく付随車で必要なブレーキ力までまかなうことが出来る場合には、付随車の空気ブレーキを使用しないようにする、といったことが行われています。最近の電車はインバータの普及により、電気ブレーキで安定した高い力が得られるようになってきているので、駅に停車するときのように、減速するのに必要な力が特別大きなものではない場合には、電気ブレーキのみで付随車の分も含めて負担することができます。運転士がブレーキハンドルを操作するなどして減速を強め、この「必要な力」が大きくなってくると、電気ブレーキのみでは次第にブレーキ力が足りなくなってくるので、不足する分を補うため付随車の空気ブレーキをあとから使用することになります。このような制御動作を称して「遅れ込め制御」と呼んでいます。近年は、この考え方を長編成の列車全体に拡張して、連結されている複数の動力車すべてが発揮する電気ブレーキの力を合計し、列車全体で必要なブレーキ力に満たない分を、残りの複数の付随車すべてでそれぞれの重量に応じた配分でまかなう方式の車両が増えて来ています。いずれの場合も、付随車の空気ブレーキでもまかないきれない場合には、動力車の空気ブレーキも使用することになります。

なお、ここで述べた電気ブレーキを主体としたブレーキの制御方式は、急を要する非常ブレーキ等では作動せず、通常の運転で用いる常用ブレーキのみでの作用となっており、ブレーキシステムの安全性を損ねるものではありません。

「電気」で動く「機械ブレーキ」

機械ブレーキには、空気等が作動流体として用いられていると書きましたが、近年、路面電車等では機械ブレーキの駆動に電気を用いているものがあります。圧縮空気は、機器を前後に動かす直線動作に適しており、ブレーキの他にドアの開閉やサスペンション等に用いられていますが、車両には重量とスペースが大きい空気圧縮機を搭載しなくてはなりません。近年、軌道事業者等で導入が進んでいる低床式車両は、走り装置が特殊なため取り付けられる機器の制約が大きく、また、車体に空気圧縮機を積むスペースを捻出することが出来ないなどの理由から、コンパクトな油圧式ブレーキや、この「電気」で動く機械ブレーキが開発されました。これを称して「電動ブレーキ」と呼びます。電動ブレーキは、鹿児島市交通局の1000形超低床式路面電車ですべて実用化されました。この装置は、図2に示したタイプのブレーキ装置で、内蔵する電動機の力によって制輪子を車輪に押し付けます。通常時に、内蔵するバネに力を蓄えておき、電気が無くなったときなどはそれを解放することで、非常ブレーキをかけることが出来るフェールセーフ構造となっています。一方、鉄道総研では、これとは別のタイプの「電動ブレーキ装置」を開発しています。

電動ブレーキ装置の開発

鉄道総研では、国土交通省からの国庫補助金を受けて、「軽量車両用ブレーキ装置の開発」を行ってきました。ここでは、開発した電動ブレーキ装置の仕組みや使い方について紹介します。

(1)力の伝達(推力変換機構)

電動ブレーキでは、モーターの回転力を押し付け力と呼ばれる、直線運動に変換する必要があります。そこで、機械要素を二つ組み合わせた、回転と直進を同時に行えるネジ機構を選択しました。

ネジは回転させると本体の中心線に沿って直線的な往復運動をする性質があり、ネジの回転と直線的な移動距離とは、ネジ山のピッチ(間隔)によって規定された正確な比例関係となります。マイクロメータなどの測定器は、この性質を利用して、回転運動を往復の移動量に変換するネジ回転機構の代表的な利用例です。

次に、力を得るための使い方です。ネジはトルクを得て回転すると、クサビの勾配に相当するリード角の効果により、与えられたトルクを直線方向の力(軸力)に変換します。身近な工具では、万力などが、この性質を利用して、小さ

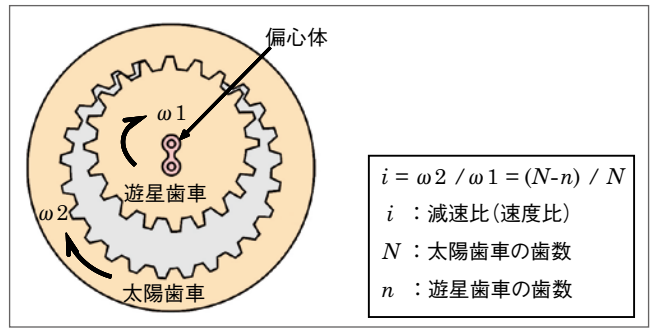


図4 内接揺動式減速機の動作原理

$$i = \omega_2 / \omega_1 = (N-n) / N$$

i : 減速比(速度比)
 N : 太陽歯車の歯数
 n : 遊星歯車の歯数

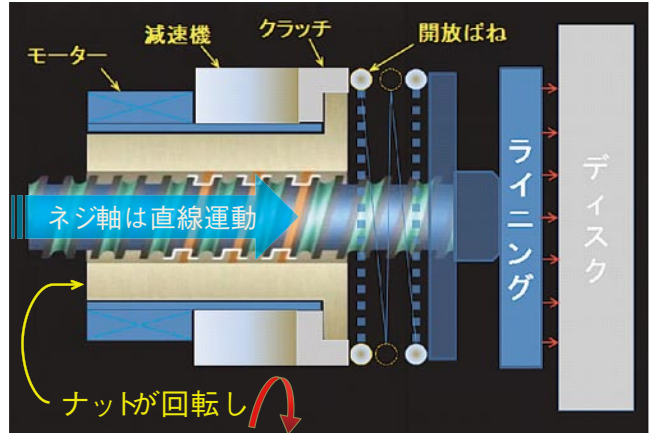


図5 電動ブレーキ装置の基本構造

な回転トルクを大きな力に変換するネジ回転機構の代表的な利用例です。

このように、ネジ特有の動きを用いると、回転体から移動と力という二つの直線運動が得られます。まさに、ブレーキ動作で必須の運動であり、電動ブレーキの推力変換機構として組み込むことにしました。

(2)力の増幅(減速機)

運動のもとである動力源の多くは回転体で、この回転数を高く(増速)したり、低く(減速)したりするのに、必ず複数の歯車を組み合わせたメカニズム(以降、減速機という)が用いられています。極力、小型のモーターと組み合わせ、コンパクトな電動ブレーキを開発するためにも、減速機を用いた力の増幅は必須です。

そこで、「内接揺動式減速機」というものを検討しました。動作原理を図4に示します。この減速機は、互いに噛み合う一対の歯車(遊星歯車と太陽歯車)に、偏心体から角速度 ω_1 で回転入力されると、固定された遊星歯車が太陽歯車と内接しながら揺動運動を行い、出力軸となる太陽歯車を角速度 ω_2 で入力軸と同方向に回転させて減速します。

この減速機を採用したことにより、必要な減速比をモー

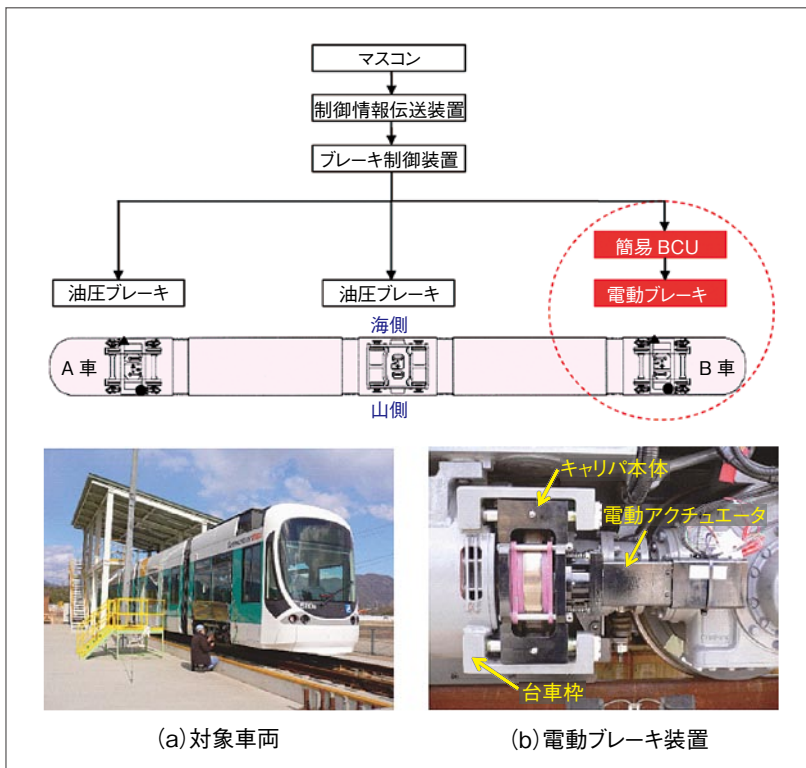


図6 国産LRVへの搭載状態

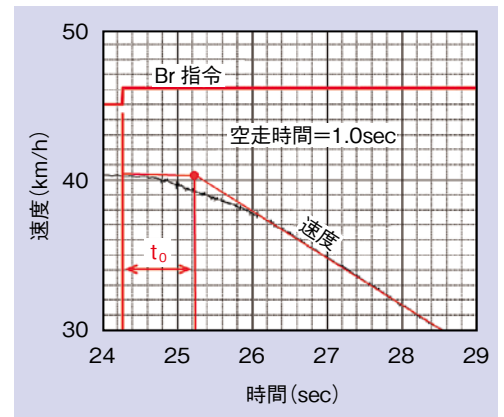


図7 走行試験の結果例

ター回転軸と同軸上の小スペース内に組み込むことが可能となりました。

(3) 電動ブレーキの検討

図5に、前述の推力変換機構と減速機を使用した、電動ブレーキ装置の基本構造を示します。

この装置は、内蔵する小型モーターの回転力を、減速機で増幅し、減速機の出力軸に直結したナットを回転させることで、ネジ軸を直線運動させ、内蔵するばねに力を蓄えます。ブレーキ動作時は、クラッチを切り離して、ばね力を開放することで押し付け力が得られる構造となっています。

(4) 試験の結果

試作した電動ブレーキ装置を、図6 (a) に示す国産LRV (Light Rail Vehicle) に搭載し、初速度10～40km/hからの停止ブレーキ試験を実施しました。なお、試作した電動ブレーキ装置は、現行ブレーキ装置と完全な取り付け互換性を持たせてあります。本試験では、一つの台車の両側2カ所に電動ブレーキ装置を取り付け、車内には、ブレーキ制御装置の後段に、運転台からのマスコン操作に連動して、必要なブレーキ力を電動ブレーキ装置に設定できる簡易的な制御装置を追加しました。

図7より、初速度40km/hにおける空走時間は1.0secであり、現行ブレーキ装置の空走時間と概ね一致する結果

でした。初速度40km/hからの平均停止距離は85.8mで、このときの平均減速度は2.67km/h/s、空走時間1.0secを除いた実平均減速度では3.07km/h/sという結果が得られました。

この結果は、本試験の目標減速度2.4km/h/sを満足するもので、現行ブレーキ装置と同等の停止ブレーキ性能が得られることが確認されました。

おわりに

「電動ブレーキ装置」は、今のところ制動力や吸収エネルギーが小さくてすむ路面電車等の比較的軽量で速度の遅い車両に向けたものとして開発されていますが、JRの在来線やその他民鉄等の、いわゆる普通鉄道の車両に使用可能なものが出来れば、圧縮空気の供給源が不要になるなど、車両軽量化の可能性があり大きなメリットをもたらすものと考えられます。その場合は、やはり文頭の方で述べたようなフェールセーフ性の確保が重要なキーポイントとなります。

安全性と信頼性を第一に考え、今後も技術開発を続けていきます。RRR