

- 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

鉄道車両のブレーキ技術

鉄道車両は鉄レール上を鉄車輪で走行するため転がり抵抗が小さく、省エネ性に優れます。このことは一方ですぐに止めるのが難しいことを意味します。そのため「ブレーキ」は安全確保の必須技術として、これまでもさまざまな工夫が積み重ねられてきました。実績に裏打ちされた安全担保が必要なため、革新的技術を採用しにくい側面もあります。それでも近年の鉄道の高速度化、高信頼化と低コスト化の両立の要求から、大きな技術変革の兆しが見られます。ブレーキ技術の新しい潮流について概説します。



小笠 正道

Masamichi Ogasa

車両制御技術研究部
主管研究員

【専門分野】電気鉄道車両の性能設計、回生有効活用研究、蓄電型車両の開発

ブレーキ方式の分類

ブレーキ方式は、用途による分類(常用・非常・保安・留置・耐雪さらに抑速の各ブレーキ)、ブレーキ機構による分類(踏面・ディスク・レール・ダイナミックの各ブレーキ)、ブレーキ制御装置への指令方式による分類(直通、自動、電磁併用、電気指令の各ブレーキ)、ブレーキ力発生媒体による分類(空気、油圧、電気の各ブレーキ)など、視点に応じていくつかの分類の仕方があります。ここでは良く用いられる例¹⁾として図1の分類を取り上げます。車輪とレールの転がり摩擦による伝達力である粘着力に頼るブレーキには、しゅう動摩擦を用いる踏面ブレーキやディスクブレーキ、しゅう動摩擦に頼らないダイナミックブレーキ(発電ブレーキ、回生ブレーキ、渦電流ディスクブレーキ、機関ブレーキ、排気ブレーキなど)、また非粘着ブレーキにはレールブレーキ、空力ブレーキ、リニアモーターのリアクションプレートによる渦電流ブレーキなどが代表的なものとして挙げられます。

列車のブレーキに要求される事項は以下のとおりです。

- ①迅速確実なブレーキ動作および緩め動作
- ②編成全車両のブレーキ動作と緩め動作の同期
- ③保安上必要なブレーキ距離内での停止
- ④列車分離の際に自動的に全車両にブレーキが動作すること
- ⑤短い周期で繰り返しブレーキ作用が行えること

これらの要求条件を満たすための主な基盤技術における工夫と変遷をみてみます。

主なブレーキ基盤技術と変遷

(1) 基礎ブレーキ装置

基礎ブレーキ装置とは、ブレーキ制御装置から指定された空気圧や油圧をブレーキシリンダーに流入させ、テコ機構などを介して摩擦材を車輪やディスクに圧着させるための、ブレーキシリンダーからしゅう動摩擦面に至るブレーキ機構のことです。制輪子(ブレーキシュー)を車輪踏面に押し当てる踏面ブレーキ方式と、ライニングをはさみ装置を介してブレーキディスクに押し当てるディスクブレーキ方式があり

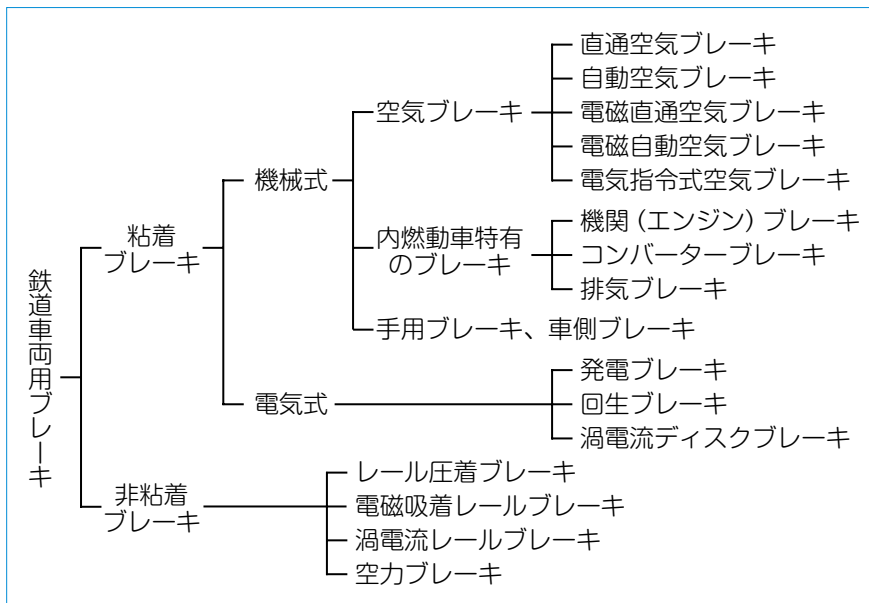


図1 ブレーキの分類

ます。前者では近年アクチュエーター部分と押し付け機構を一体化したユニットブレーキが多く使用されており、片抱き式、両抱き式があります。制輪子やライニングの摩耗による制輪子から摩擦しゅう動面までの隙間を調整する隙間調整機構（スラックアジャスター）を備えています。

(2) 自動空気ブレーキとフェールセーフ

自動空気ブレーキ²⁾は1872年にアメリカで実用化されました。編成車両に引き通されているブレーキ管（BP：Brake Pipe, BP管）を介してブレーキ指令を伝達する方式で、ブレーキ緩め時にはBP管に490kPa（約5気圧）の圧縮空気が込められています。運転台のブレーキ弁を操作してBP管圧力を減圧することで各車両の制御弁を動作させ、予め各車の補助空気タンクに貯えられている圧縮空気をブレーキシリンダー（BC：Brake Cylinder）に送ることでブレーキを作用させます。この構成なら列車分離時にはBP管圧力が抜けて自動的に各車両にブレーキが作用するのでフェールセーフとなります。

なお、補助空気タンクが所定圧力に達していない場合は所要ブレーキ力が

作用しないことがあり、これを込め不足と言います。連続してブレーキを扱うと込め不足状態になるので、ブレーキ扱いには熟練が必要でした。

(3) 指令方式の変遷－ブレーキ応答の高速化

空気を指令媒体かつ圧力伝達媒体として用いた初期の空気指令式（直通空気ブレーキ、自動空気ブレーキ）から、引き通し電線を介して運転台からの電気指令で各車の電磁弁を動作させる、同期性と迅速性を確保した電磁併用形（電磁自動空気ブレーキ、電磁直通空気ブレーキ）に移行しました。

1960年代後半以降さらに、運転台からのブレーキ指令を全て電氣的に行って各車で電気指令を空気圧指令に変換し、中継弁を動作させて空気ブレーキをかける「電気指令式空気ブレーキ」が登場し、現在の新製車の主流となっています。この方式は応答性、同期性、制御性および電気ブレーキとの協調性に優れ、また運転台への配管引き込みがない、引き通し空気管も元空気ため管だけで良いなどぎ装を簡素化できます。運転台からの常用ブレーキ指令方式には、電圧または電流値で

ブレーキ制御装置に伝える「アナログ指令」、数本の指令線を介した交番2進コードなどで段階的なブレーキ力指令を伝える「デジタル指令」があります。また近年ではさらに5V級デジタル多重伝送による「制御伝送指令」と変遷し、高応答化、機器小型化や電線数削減などに効果を挙げています。なお、非常ブレーキ指令線は常時加圧の往復ループで、列車分離時には無電圧となって全車に非常ブレーキがかかるフェールセーフ構成です。

(4) 電気車のダイナミックブレーキ

発電抵抗ブレーキ：主電動機をブレーキ時に発電機として動作させ、電気抵抗器に接続することでブレーキエネルギーを抵抗によるジュール熱として放散させる方式です。電気抵抗値を変化させて所要電動機トルクを得る制御を行います。抵抗制御車両ではそのまま主抵抗器を使用できました。

回生ブレーキ：もともとは下り勾配の抑速用に開発されました。主電動機をブレーキ時に発電機として動作させ、自列車の運動エネルギーを電気エネルギーに変えて架線を介して近傍の他列車に供給することで自列車のブレーキ力を得る方式です。回生負荷の状況でブレーキ力が影響を受けませんが、エネルギーを他列車が有効再利用できる、抵抗器を排除できる、などインバーター車両に適したブレーキです。

(5) 内燃車のダイナミックブレーキ

エンジン（機関）ブレーキ：液体変速機を直結段に入れて、推進軸を介して車軸の回転をエンジンに伝えることでエンジンを外部から回転させる状況を作り、エンジンの回転抵抗をブレーキ力とするものです。自動車のエンジンブレーキと同じ原理です。最近の新製気動車では排気ブレーキで代替されていますが、抑速ブレーキなど弱めのブレーキ力を得やすいので、有効活用が

望まれるブレーキです。

排気ブレーキ：エンジンブレーキと同様に直結段でエンジンを外部からの強制回転とした状態において、排気管出口の遮断弁を閉じてエンジンを圧縮機として作動させると、ピストン上面に圧力が作用しクランク軸の回転抵抗が増します。この間、燃料噴射は停止状態となります。エンジンブレーキの2倍近いブレーキ力が得られます。

コンバーターブレーキ：液体変速機内にあるトルクコンバーターに満たされた油の中で、羽が回転する際に発生する油のかくはん抵抗により運動エネルギーを熱エネルギーに変えることでブレーキ力を得るものです。ただし、油の冷却が前提です。排気ブレーキを装備しない車両に搭載することが多いようです。

(6) 電気指令式空気ブレーキによる電空協調制御

現在新製される鉄道車両では、電気ブレーキと空気ブレーキの協調制御（以下、電空協調と称します）を行う電気指令式空気ブレーキが事実上の標準となっています。

低いブレーキノッチで編成全体のブレーキ力が弱くて済む間は、付随車のブレーキ力をも電動車の電気ブレーキ力で負担する「遅れ込め制御」を併用して電気ブレーキの分担率を上げることが多く行われます。一方で回生失効や回生絞り込みによって電気ブレーキ力だけでは不足する場合、空気ブレーキ力を補足して所要ブレーキ力を確保する制御が行われます（図2）。

補足手順にも数通りあり、空気ブレーキを付随車から先に動作させてその後に電動車の空気ブレーキを補足する「空制T車優先制御」が多く採用されています。このような演算をブレーキ受量器（BCU：Brake Control Unit）を介して行います。

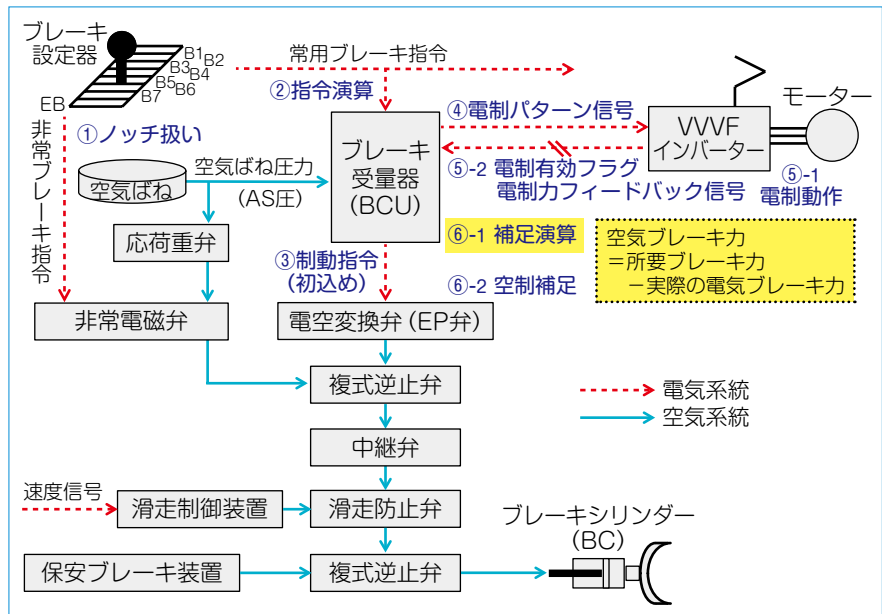


図2 電気指令式空気ブレーキにおける電空演算

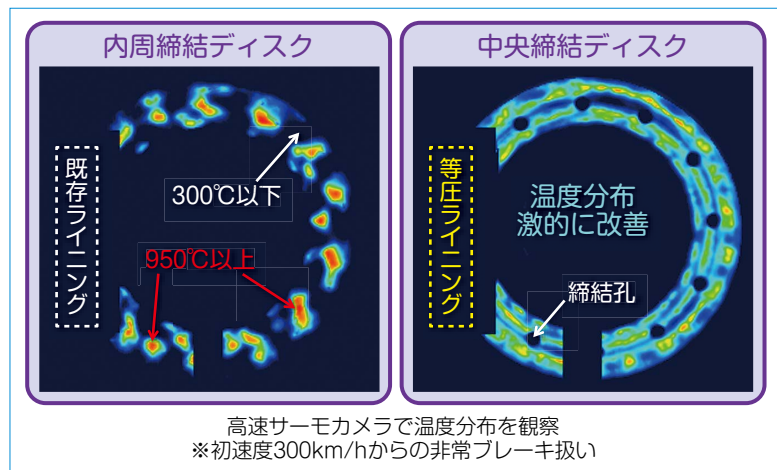


図3 内周締結ディスクと中央締結ディスクの温度分布

なお、電気指令式空気ブレーキは電磁直通空気ブレーキなどとの互換性がなく、併結時にはブレーキ読替装置が必要です。広い意味での異種ブレーキの協調制御と言えます。

ブレーキ技術に関する国内外の動向

(1) ブレーキディスクの締結方法

車輪埋め込み型のブレーキディスク（車輪ディスクと称します）はこれまで内周締結型でした。これはブレーキライニングとの摩擦しゅう動面のハブに近い内周でディスクを車輪にボルト

締結し、ボルトにかかる遠心力を少しでも下げるものです。しかし摩擦熱によってディスクが反り、ブレーキライニングとの当たり面が点在し局所的に高温になる箇所が発生するなどの課題がありました。

これに対し近年、ディスクしゅう動面の中央付近円周にボルト締結を行う中央締結ディスクが採用されはじめました。熱変形を抑制でき（図3）、より強いブレーキ押付力を許容でき停止距離短縮につながります。最新の新幹線であるE5系、E6系、E7系には海外製の中央締結ディスクが、N700A系には

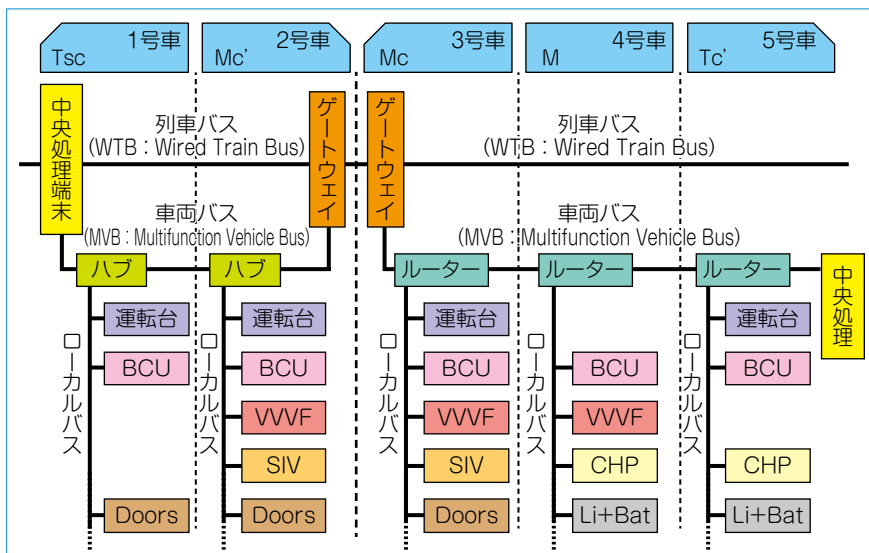


図4 列車内情報伝送系における階層構造の例 (IEC31675準拠)

国産の中央締結ディスクが、各々搭載されています。

(2) 制御伝送を用いたブレーキ力配分制御と自動状態診断

1990年代後半以降に採用が増えてきた制御伝送は、編成に引き通したイーサネットケーブルなどで5Vや3.3Vなどのデジタル信号列を送受信する技術です。列車内ネットワークに接続された各機器の状態量や各機器への制御指令を、ソフトウェアを介したシリアル伝送で伝達します(図4)。そのため以前なら伝送信号ごとに必要とした引き通し電線の数を大幅に削減でき、軽量化に寄与しました。一般にTCN(Train Communication Network)と呼ばれ、最近では「INTEROS(Integrated Train control/communication networks for Evolvable Railway Operation System)」³⁾などのシステムが具現化されています。

制御伝送を用いた電空協調制御により、これまでユニット(例えば電動車1両と付随車2両で1単位など)ごとにブレーキ受量器を介して行っていた協調制御を、編成全体に拡げて適用できます。滑走し易い先頭車両のブレーキ力を若干下げておくなどの静的なブレーキ力配分がまず可能です。さらに

主電動機トルク指令の生成ルーチンについても従前はインバーター装置(下位系)の制御部で演算していたものを、制御伝送系(上位系)に移行することで、より広域で安定した動的なブレーキ力配分を実現し得るシステムハードウェアが用意されたわけです。

制御伝送を用いた状態監視の取り組みも始まっており、ブレーキ受量器の制御基板の温度、圧力センサーのオフセット、電磁弁の動作回数などを監視して予防保全を行うことができます。比較的故障が多い電源回路などの自己診断にも使え、故障コードと故障推定箇所情報から区所などの保守要員が故障原因を特定するのを容易にすることができます。

(3) ブレーキ技術に関する国際規格化の動向

ISO-TC269(鉄道分野専門委員会)のキックオフが2012年10月末にベルリンで開催され、AHG04「Preparation for a new work item proposal (NWIP) for a standard on brake calculation(ブレーキ計算標準)」なるAd-Hoc-Group(アドホックグループ:「特定目的集団」の意味)が立ち上がっています。8ヶ国での審議が既に3回行われ、日本か

らは3名のエキスパートメンバーが各回とも出席し、うち1名は鉄道総研のブレーキ担当者です。今後、内容の議論が本格化していくようです。

ブレーキ技術の今後の研究開発とまとめ

鉄道総研ではこれまでに、「だ円形ダイヤフラムを用いた空圧式フローティングキャリパーブレーキ」、「ねじ形推力変換機構と内接揺動式減速機を用いた電動ブレーキ装置」、「踏面ブレーキ用の弾性構造型合成制輪子」、「プラズマアーク溶接法での表面改質による熱緩和形ブレーキディスク」、「連結車両のブレーキ推定の新しい評価方法」、「固着余裕時間の概念導入による滑走制御」、「永久磁石のハルバツハ配置によるリニアレールブレーキ」、「トルクバランス展開方式による屋根上設置空力ブレーキ」、「停止までの電気ブレーキ(純電気ブレーキ)」、「回生蓄電ブレーキ」などの新しいブレーキ技術の開発を行ってきました。「ブレーキ滑走時における制御伝送などを介した電空協調滑走抑制制御」も今後の重要なトピックです。

これらの中からいくつかを本号の以下ページで紹介します。

引き続き安全と信頼を第一とした、速達利便性や環境適合性にも優れたブレーキ技術を開発していきます。RRR

文献

- 1) 鉄道技術推進センター: ブレーキ装置、わかりやすい鉄道技術(鉄道概論・車両編・運転編), pp.45-51, 2011
- 2) 中澤伸一: 鉄道技術来し方行く末第3回-空圧ブレーキの制御, RRR, Vol.69, No.6, pp.28-31, 2012
- 3) 河野洋一・佐藤真哉・川崎淳司: 次世代車両制御システムINTEROSに対応した車両機器機の開発, JR East Technical Review, No.36, pp.51-56, 2011