

鉄道車両のブレーキ技術の動向

小原 孝則*

Recent Trend of Brake System Technology for Railway Vehicles

Takanori OBARA

New Shinkansen trains have been developed by JR companies recently, and new technologies of brake system have been applied to them. Brake disks attached to wheels by a new method, and brake calipers operated by air pressure have been applied to E5 series for Tohoku Shinkansen of JR East Japan. New type anti skid brake systems controlling a pair of axles of each bogie by air pressure have been applied to N700 series for Tokaido and Sanyo Shinkansen of JR Central Japan and JR West Japan. Advanced brake control systems have been also developed for meter gauge trains. In this paper, these new technologies and recent developments of brake system are introduced.

キーワード：ブレーキ，ディスクブレーキ，滑走再粘着制御，ブレーキディスク，ブレーキキャリパ

1. はじめに

鉄道車両のブレーキのうち、機械的に制輪子を車輪やディスクに押し付け、そこに生じる摩擦力で減速あるいは停止させる空気ブレーキは安全を担保する装置として位置づけられており、技術革新が行われにくいとされていた。ところが近年、新幹線に新しいディスクブレーキシステムが採用されるなど、大きな変革の兆しが見える。

そこで本稿では、最近特に注目すべき新幹線のディスクブレーキを中止とした基礎ブレーキ関係の技術と、一部実用化されているものもあるが、研究開発が進んでいるブレーキの制御に関する技術を紹介しながらブレーキ技術の動向を展望する。

2. 基礎ブレーキ装置

2.1 新幹線のディスクブレーキ

2.1.1 ブレーキディスク

日本の新幹線では、0系新幹線以来ブレーキディスク（以後、ディスクという）で車輪板部をはさみこむよう内周部をボルトで締結する構造をとっている（図1(a)）¹⁾。この構造を一般的に内周締結構造とよんでいる。一方ドイツのICE等ではディスクの中央部にボルトを通し固定している（図1(b)）¹⁾。これを一般的に中央締結構造とよんでいる。日本では、JR東日本の高速試験電車FASTECHで初めて採用し、同社の最新の新幹線電車であるE5系等にも用いられている^{2), 3)}。

そもそも、新幹線では、高速からブレーキが作用するため、車輪踏面ブレーキではなく、当初よりディスクブ

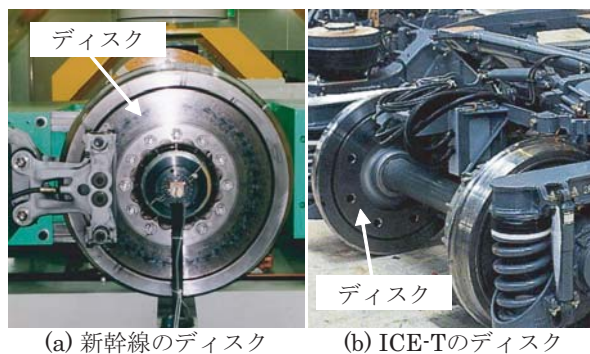


図1 新幹線とICE-Tのディスク [出典：文献1)]

レーキが検討されてはいたが、摩擦面をボルト穴分だけ小さくし、ボルトに直接熱影響を与えそうな中央締結構造は候補にも上らなかったものと考えられる。

新幹線の高速化とともにディスクの材質や構造（締結手法は内周締結のまま）が変遷し、現在は一部を除き鍛鋼一体型

ディスクが用いられている。このディスクでは、長期間使用するとブレーキ作用の繰り返しの繰り返しにより外周部が外側に反るように変形してしまい（図2）、ブレーキライニング（以後、ライニングという）との局所的な接触やそれによるライニングの偏摩耗を進行させることにつながっていた⁴⁾。

中央締結構造にすると、入熱部分を直接抑え込むので、変形が起りにくくなり、内周締結よりもライニングと

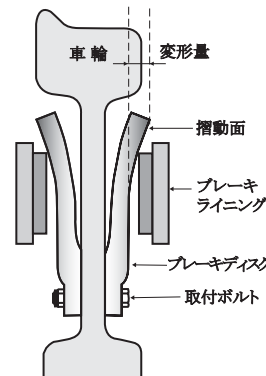


図2 ディスク変形の模式図 [出典：文献4)]

* 車両制御技術研究部 部長

特集：車両技術

の平行を維持できるものと考えられる。また、それによりライニングの偏摩耗の抑制が期待できる。

当然、摩擦面内（いわゆる入熱部）にボルト穴が存在することの短所も考えられるが、そこに対して工夫を加えて中央締結構造を適用することで、ディスクブレーキ性能を大きく変えることになると考えられる。

2.1.2 プレーキライニング

新幹線では板状のライニング（図3 (a)）が使用されている¹⁾。これは可能な限り大きな接触面積を確保するという観点で設計されたものと思われる。それに対しフランスやドイツの高速鉄道のディスクブレーキでは小さなブロックの集合体（図3 (b)）となっている¹⁾。JR東日本では先に紹介したディスクとともに高速試験電車 FASTECH で同様のライニングが採用され、E5系で実用化されている^{2), 3)}。このタイプは、各ブロック一つ一つがある程度の自由度を持ち、それぞれがディスクに平行に接触しようとする特徴を持つ。また、比表面積が大きいため放熱性に優れているといえる。

従来から国内で使用されている板状のライニングでは、ディスクの熱変形等で全面が均等に接触せず、局部的に強く接触するような状態になり、その部分の温度が特に上昇するような現象がみられた。

このようにライニング全体でディスクとの平行を確保するような構造よりも、ブロックタイプの方が各々のブロックでディスクとの平行を保ち、見かけの接触面積は小さくとも、真実接触面積が板状のライニングより大きくなる可能性がある。また、それによりライニングの偏摩耗が抑えられる可能性もある。そういった意味で今後はブロックタイプのライニングが多用されるようになると思われる。



(a) 新幹線のライニング (b) TGVのライニング
図3 新幹線とTGVのライニング [出典：文献1]

2.1.3 プレーキキャリパ

ディスクブレーキはディスク、ライニング、そしてライニングを押し付けるはさみ装置からなる。新幹線のはさみ装置には、押し付け力を発生するアクチュエータ部分とライニングを支えブレーキ力を受ける部分が一体となったブレーキキャリパ（以後、キャリパという）が用いられている。

現在の新幹線では一部を除き油圧式のキャリパが用いられている。運転台からの電気的なブレーキ指令等によりブレーキ制御装置が空気圧を制御し、その空気圧は増圧シリンダ（図4）とよばれる空-油圧変換装置で油圧に変換されキャリパを動作させる。当初はこの増圧シリンダに、滑走を検知すると空気圧はそのまま保持し、油圧のみを緩めるといった滑走制御機能を持たせていた（図4 (b) のタイプ）。ところが近年、在来線で培った空気圧を

制御する高度な滑走制御を新幹線にも適用されるようになり、増圧シリンダはその名の通り圧力変換装置としての機能のみを求められるようになってきた。

そのような背景で、直接キャリパを空気圧で動作させれば油圧系の装置や部品が不要となり、システムの簡略化ならびにメンテナンスの簡素化につながると考えられた。そこで登場したのがFASTECHで試験され、E5系等で用いられた空圧式のキャリパである^{2), 3)}。この空圧式キャリパは空圧シリンダの動きをテコを介してライニングがディスクを挟み込むような構造となっている。

一方、鉄道総研では現在の油圧式キャリパのアクチュエータの動きと同様、直接ライニングを背面から押す空圧キャリパを開発した。

このキャリパの最大の特徴は楕円形ダイヤフラムを用い、空気圧でピストンを押すという単純な構造になっている（図5⁵⁾）。ピストンに断熱性を持たせるなどの工夫により、ライニング温度が900℃を超えるような条件でも、ピストンの反ライニング側表面は30℃以下でダイヤフラムに悪影響を与えない温度に抑制されている。

また、ダイヤフラムの形状を楕円形にすることにより押しつけ面積を大きくでき、直動式の構成が可能となった。その結果、従来の油圧式フローティングキャリパと大きさ重量ともほぼ同等で、取り付け互換性を有する装置を実現した。

今後のこれらの空圧キャリパの適用により、増圧シリンダが不要となるため、1台車あたり60～100kg程度の軽量化が図れる。そういった観点からも今後新幹線で広く用いられるようになると思われる。

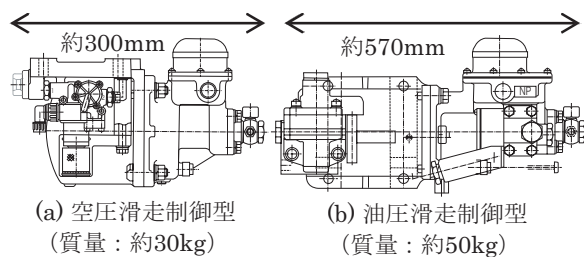


図4 増圧シリンダの概略図

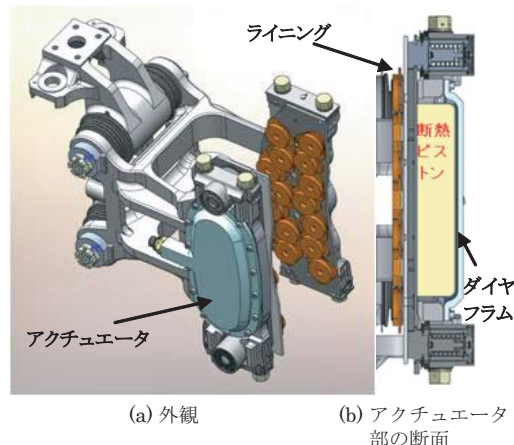


図5 だ円形ダイヤフラムを用いた空圧キャリパ

2.2 在来線や路面電車の基礎ブレーキ装置

在来線ではディスクブレーキが採用されている車両もあるが、車輪踏面ブレーキが主流である。近年はアクチュエータ部分と押し付け機構とを一体化したユニットブレーキが使用されており、大きく変化する傾向は見られない。特筆すべきは、路面電車に採用されている電動ブレーキである。

鹿児島市交通局の1000系、7000系超低床式で実用化された装置は、内蔵する電動機の力により制輪子を車輪に押し付ける機構で、通常時はばねに力を蓄えておき、無通電状態になるとそれを開放することで非常ブレーキをかけることができるフェールセーフ構造となっている⁶⁾。

また、鉄道総研では国土交通省からの国庫補助金を受け、上記と違ったタイプを開発している。この装置は、回転力を押し付け力に変換する推力変換機構と、遊星歯車を利用した内接揺動式減速機とを組み合わせた構造である(図6)⁶⁾。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、ねじ軸を直進運動させ、ばねに力を蓄える。ブレーキ動作時はクラッチを切り離して、ばねを開放することで押し付け力が得られるという構造になっている。

このような電動ブレーキは、電動圧縮機の大さを制限されたり、空気あるいは油圧の配管関係を簡素化が求められるLRVやその他軽量車両への適用が今後一層試みられてくるであろう。

3. ブレーキの制御

3.1 編成でのブレーキ力管理

在来線では制輪子などの摩耗を低減するために機械ブレーキの負担を減らす手法がとられている。つまり、可能な限り電動車の回生ブレーキにブレーキ力を負担させ、不足分を付随車や電動車の機械ブレーキに負担させるという「おくれ込め制御」といわれるものである。

当初おくれ込めは電動車と隣接する付随車あわせて2～3両単位でブレーキ力が不足しないよう制御されていたが、伝送技術の進歩により、近年は編成を通してブレーキ力を管理し、おくれ込めを制御するシステムとなっている。

また、東海道・山陽新幹線で走行している最新のN700系新幹線電車では通常のブレーキ時、両先頭の付随車では全くブレーキが動作せず、その分のブレーキ力を残りの14両の回生ブレーキで負担するシステムを導入している。それまでの700系では付随車にECB装置を搭載し、通常付随車ではECBのみを動作させ、不足分を他の電動車の回生ブレーキで負担するシステムとなっている^{7), 8)}。

N700系では電動車と付随車の比率やブレーキ力の分担率を見直すことにより、100系、300系、700系で使用されていたECB装置を搭載せずすむことになった。軽量化やメンテナンスの軽減にもつながるであろうし、画

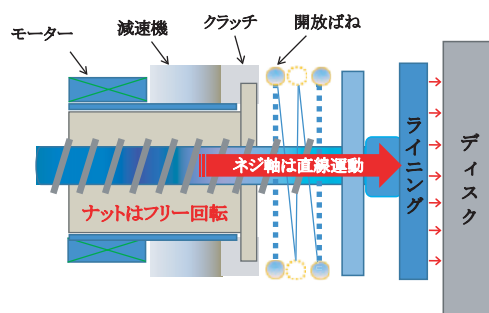


図6 推力変換機構と減速機を組み合わせた電動ブレーキ装置の原理 [出典：文献6)]

期的な変革と考えられる。

このような編成でのブレーキ力管理は、ICEなどの海外の鉄道でも一般的になってきている。在来線、新幹線問わずブレーキ関係の摩耗部品の省メンテナンス化にもつながり、今後ますます研究開発が深度化されるであろう。

3.2 滑走再粘着制御

3.2.1 在来線の滑走再粘着制御

滑走再粘着制御は単に滑走制御などとも呼ばれ、在来線で高度化している。特に最高速度130km/hの車両を中心に採用され、最近では通勤電車にも適用される例もある。初期の制御は、滑走を検知するとブレーキを緩解し、再粘着時にブレーキを復帰させるものであった。時代とともに高減速が求められ、ファジィ制御、すべり率制御、マルチモード制御等の高度な滑走制御が開発された。これらは、滑走の状況を見ながらブレーキ力を緩解する度合いを変えたり、滑走の大きさを予測しそれに見合ったブレーキ緩解量にするなどの手法をとり、ブレーキ力の無駄を極力小さくしようとするものである。最近では、これらをより高度化するための研究開発が行われている。

例えば野中らは、従来のファジィ制御による滑走再粘着制御を改良し、新ファジィ制御を開発した。その手法では、滑走の程度を判断するための一つの指標として見ていた車両速度と滑走軸速度との「速度差」をその「すべり率」に変更した。これにより低速での固着を低減している。また、滑走を検知した際、即座にブレーキを緩解させずに、ある程度まで滑走を許容する制御とした。この制御を実車に適用し、ブレーキ距離短縮効果を確認している⁹⁾。

また、鉄道総研では、従来のすべり率制御を改良し、ブレーキ距離短縮効果並びに固着防止効果を確認している。本手法は、滑走軸の速度と減速度から得られる固着に至るまでの時間(固着余裕時間)という概念を取り入れ、そこにしきい値を設けたことに特徴がある。固着余裕時間がしきい値以上の範囲では固着に至るまでの余裕時間が長いので、粘着力が大きくなるための目標すべり率を維持するような制御となっている。また、しきい値以下の範囲では固着までの余裕時間が少ないので、滑走

特集：車両技術

検知感度をあげ固着を防止する制御としている¹⁰⁾。

3.2.2 新幹線の滑走再粘着制御

もともと新幹線の滑走制御は、軸毎にある増圧シリンダに滑走防止弁を持ち、滑走を検知すると油圧側のみを緩解し、再粘着時に圧力を復帰させるという単純なものであった。新幹線で最初に空気圧での滑走再粘着制御を採用したのはJR東日本E2系新幹線電車で、軸毎に制御するものである。

N700系では、台車単位に空気圧で制御する滑走再粘着制御が採用された^{7), 8)}。

これまで、筆者らも種々の滑走現象を調べてきており、以下のようなことでN700系での滑走制御に妥当性があると考えられる。

滑走が発生するという事は粘着係数が小さくなっているということである。粘着係数はレールの表面状態に大きく左右されているので、滑走が起こる近傍の車輪の粘着係数も小さい可能性が非常に高く、滑走を起し易い状況にある。よって、同じ台車でどちらか片方の軸が滑走する際に同時に他方の軸もブレーキを緩めれば、次に起こる可能性のある滑走を防止する可能性がある。

在来線では高減速が求められるためきめ細かな制御手法がとられ、あまり大きくない滑走では完全にブレーキを緩めないようになっているため無駄になるブレーキ力が大幅に小さくなっている。新幹線でもそういった制御を検討する意義はある。また、空気圧の制御と前述の空圧式キャリパとを組み合わせることにより軽量化やメンテナンス性向上に寄与できる。

3.3 減速度制御

滑走制御とともに、ブレーキ時の減速度を制御するための研究開発も進められている。本制御は、速度、天候等にかかわらず目標とする減速度を維持させようというものである。ブレーキノッチ毎に目標減速度を設定すれば、天候や運転士の力量によるブレーキ距離の違いを小さくできる可能性がある。

鉄道総研では、実車の減速度を帰還情報とするフィードバック制御によりブレーキ力を制御し、天候等の環境条件によらず、目標値通りの減速度を発揮できるブレーキシステムの開発を行った。代表的な特徴は、制輪子の摩擦係数の変化ならびに、ブレーキ時の無駄時間を考慮するモデルを構築したことにある。そのシステムを、計算機シミュレーションと台上試験により検証し、実際の営業線で試験を行った。その結果安定した減速度並びにブレーキ距離が得られることを確認している(図7)¹¹⁾。

4. おわりに

以上、最近の車両に適用されている、あるいは研究開発が進んでいるブレーキ技術を紹介することによって今後の動向を展望した。特に、新幹線のディスクブレーキ

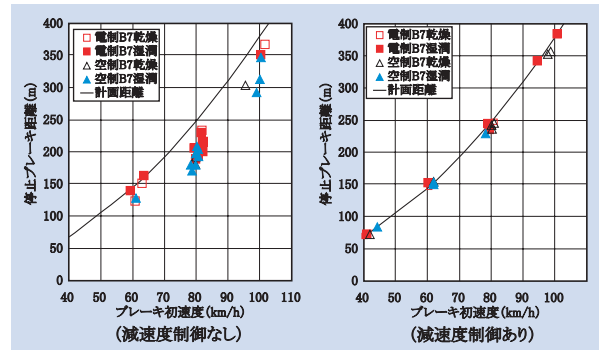


図7 減速度制御の有無によるブレーキ距離の差異 [出典：文献11)]

は空圧化、軽量化等をキーワードに大きく変革しようとしている。10年先には、見た目にもはっきりと違いが認識できるディスクブレーキシステムに変わっているかもしれない。また、ブレーキの制御もますます知能化して行くことは必至である。こういった技術革新により、一層の安全性向上に貢献していくことを期待したい。

文献

- 1) 小原孝則：新幹線高速化のためのブレーキシステム, RRR, Vol.62, No.5, pp.20-23, 2005
- 2) 堀内雅彦：JR東日本FASTECH360S (E954形式)の概要(2), 鉄道車両と技術, Vol.11, No.10, pp.32-39, 2006
- 3) 田島信一郎：E5系新幹線用台車, 鉄道車両と技術, Vol.15, No.9, pp.7-9, 2009
- 4) 内田清五：新幹線のブレーキシステム, レールアンドテック社, p.51, 2001
- 5) 狩野泰, 大河原義之：空圧式フローティングキャリパの開発, 第16回鉄道技術連合シンポジウム講演会論文集, pp.183-184, 2009
- 6) 南京政信, 狩野泰：停めるの基本, RRR, Vol.65, No.7, pp.10-13, 2008
- 7) 萩原善泰, 古屋政嗣, 森俊弘：東海道山陽新幹線直通用次世代車両N700系量産先行試作車の概要(3), 鉄道車両と技術, Vol.11, No.7, pp.32-37, 2005
- 8) 古屋政嗣, 田中英允, 森俊弘：東海道・山陽新幹線直通用次世代車両「N700系」量産車の概要(3), 鉄道車両と技術, Vol.13, No.6, pp.39-43, 2007
- 9) 野中俊昭, 中澤伸一, 遠藤靖典, 大山忠夫, 吉川広：編集車両としての滑走防止制御の性能向上, 鉄道総研報告, Vol.65, No.7, pp.10-13, 2008
- 10) 津留崎淳, 中澤伸一, 山岡郁雄, 加藤仁：すべり率滑走制御の最適化によるブレーキ性能向上効果の検証, 第16回鉄道技術連合シンポジウム講演会論文集, pp.117-120, 2009
- 11) 南京政信, 中澤伸一, 野中俊昭, 吉川広：減速度フィードバック機能を備えたブレーキシステムの開発, 鉄道総研報告, Vol.65, No.7, pp.10-13, 2008