

新幹線のブレーキシステム

小林 秀之

車両制御技術研究部
(ブレーキ制御 研究室長)

狩野 泰

同
(同 主任研究員)



こばやし ひでゆき かりの やすし

はじめに

新幹線は開業以来、最高速度を着実に向上してきました。速度向上は、車両を止める技術の向上でもあり、ブレーキ条件が厳しくなるなかで新幹線のブレーキシステムには、列車を高速から着実に止めることが求められてきました。さらに、最高速度が向上しても災害などの緊急時にはブレーキ距離を限りなく短くすることが望まれます。新幹線のブレーキシステムに関する研究開発の一端について紹介します。

安全を支えてきた新幹線のブレーキシステム

鉄車輪と鉄レールを用いて走行する鉄道車両は、走行抵抗が小さいという利点がある反面、加速やブレーキ時に過大な力を加えると車輪が大きく滑り、計画した加速度や減速度を得ることができなくなります。ブレーキ時に所期の減速度が得られない場合は、列車はオーバーランとなり最悪の場合に衝突などに発展することが懸念されるので、安全を第一に留意しなければなりません。

新幹線のブレーキシステムは、種々の条件を考慮して、車輪とレール間に働く粘着力を基にした減速度パターンによりブレーキ量を決めています(図1)¹⁾。さらに、車輪が大きく滑った場合でもなるべく早く停止させる滑走時の

制御や、列車の分離や機器の不具合にも対応するためのフェールセーフ機構を備えています。

(1) 新幹線のブレーキ方式

新幹線のブレーキとして、営業列車では車輪とレール間の粘着力を利用する粘着方式が採用されています(図2)。レールブレーキや空力ブレーキなど車輪とレール間の粘着力に依存しない非粘着方式も検討されていますが、ほとんどが研究段階にあります。

粘着方式は、電気ブレーキと機械ブレーキに分類されます。新幹線では、通常は高速からの電気ブレーキと低速時の機械ブレーキが組み合わされています。これらは列車の運動エネルギーを熱や電流などに変換して吸収しています。電気ブレーキは、初期の直流電動機の抵抗制御による発電ブレーキ方式から、誘導電動機のインバータ制御による電力回生ブレーキ方式になっています。機械ブレーキは、電氣的なブレーキが失効することを考慮して、電気ブレーキと同等な減速度で列車を停止できる性能を持つ必要があります。高速から列車を停止させるため、車輪への影響などを考慮し踏面ブレーキ方式ではなくディスクブレーキ方式が当初から採用されました。このディスクブレーキ方式も、高速化や信頼性の向上のため、ブレーキ機構、材料などが様変わりしてきています。

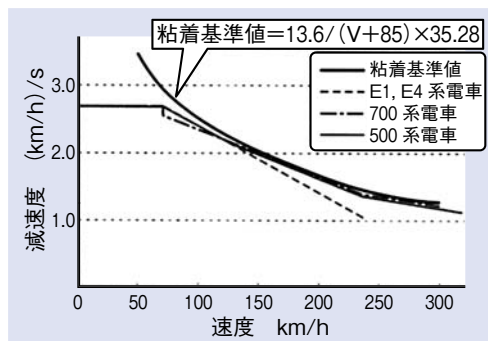


図1 粘着基準値と設定減速度
(ブレーキフノッチ, 走行抵抗考慮無し)

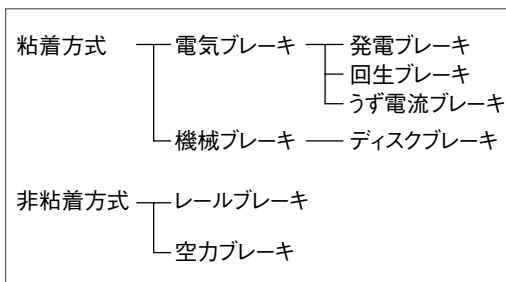


図2 新幹線のブレーキ方式
(開発段階のものを含む)

ブレーキ性能の向上

これまでにブレーキ性能の向上に関して取り組んできた研究開発について、少し古い話からになりますが紹介します。

(1) 粘着力の確保

車輪とレール間の粘着力を利用するブレーキ方式では、ディスクブレーキ

によって強いブレーキ力を得られても、それだけでは車両を止めることはできません。特に営業車では、降雨などの様々な条件下での高速走行や定時運行が必要になります。そのためには、常に一定以上の粘着力を確保するような方策が求められます(図3)。

その方策の一つとして、新幹線には開業時から、車輪踏面の状態をできるだけ一定に保つことを目的として、弱い押付力で摩擦材を車輪踏面に作用させる「踏面清掃子」が採用されています。この踏面清掃子の改良の過程で、実験室環境だけでなく実車も含み、車輪踏面の状態やレールとの接触状況と粘着力の関係を綿密に把握してきました。そして、踏面清掃子をさらに発展させ、粘着を向上させるような車輪踏面状態を積極的に作る「増粘着研磨子」が開発されました。この増粘着研磨子は、その後も様々な改良を経て、高速化の進んだ現在の新幹線においても、全車両の全車輪に備えられています。

近年では、さらに粘着を向上させる方法として、従来の砂撒きの原理を応用し、粒径 $300\mu\text{m}$ のアルミナ粒子を車輪とレール間に噴射する「セラジェット」を開発し、営業列車にも採用されています。

(2) 滑走防止機能を活かした粘着力の有効利用

このような研究を進めながらも、環境によって大きく変動しやすい粘着力を完全に把握することは非常に困難です。実車においては、図1に示すような粘着を考慮して決定した減速度パターンによるブレーキでも、車両の対地速度に対して車輪の回転速度が大きく低下してしまう「滑走」が発生することがあり、ブレーキ力を制御する必要があります。空気圧を油圧に変換する「増圧シリンダ」には、滑走から固着に至って車輪踏面が損傷するのを防ぐ機能も備えられ、滑走時のブレーキ力を制御することが可能でした。鉄道総研では、これまでの滑走制御技術の発展もふまえて、油圧に変換する前の空気圧を細かく制御することができる新方式の増圧シリンダを開発しました。この増圧シリンダは、レール面の粘着状態に合った圧力制御が可能であるとともに、長さ質量ともに65%程度に小型・軽量化され、JR東日本E2系、E3系車両に搭載されています(図4)²⁾。

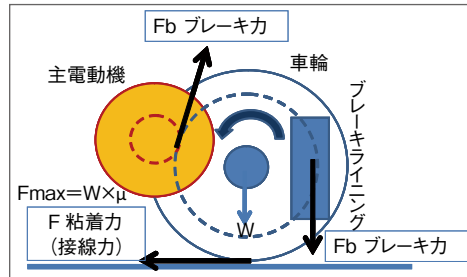


図3 プレーキ力と粘着力の関係



図4 増圧シリンダ

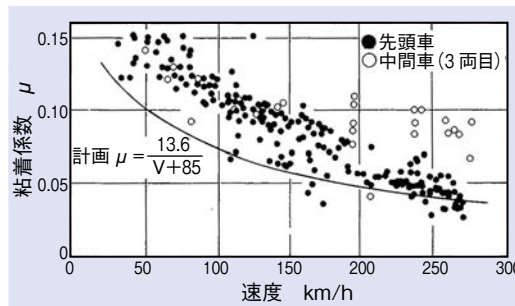


図5 速度と粘着係数の関係

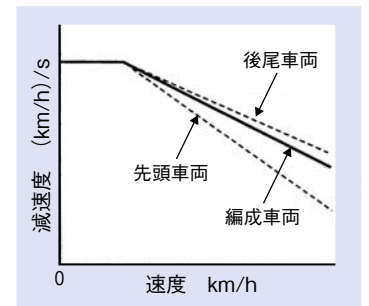


図6 編成車両の減速度パターン例

(3) 制御を活かした粘着力の有効利用

当初のブレーキ制御は、粘着を考慮したブレーキ力を全車両均一に設定していました。ブレーキ時に滑走が発生するため、現車において編成車両毎にブレーキ扱い時の滑走件数を調査し、また模型粘着試験装置により散水状態などでの粘着力の変化を調べました(図5)。その結果、中間車ではもう少し高い粘着力が期待できることが分かりました。ブレーキ力を向上させるため、粘着係数を有効利用するブレーキパターンを提案し、現車で効果を確認しました(図6)³⁾。

(4) 基礎ブレーキ装置の進歩と変遷

ブレーキシステムの基本である基礎ブレーキ装置(機械ブレーキ)について、少し詳しく進歩と変遷を述べます。新幹線の動力車では輪軸に電動機を持たせる必要があることから、輪軸の車輪間にブレーキディスクを配置する軸ディスク方式の構成ができませんでした。そこで車輪側にブレーキディスクを取り付けて、摩擦材で挟むことでブレーキ力が得られる車輪側ディスク方式の採用に至りました。

油圧技術を礎として開発された新幹線の基礎ブレーキ装置ですが、新幹線0系、100系、200系電車までは、在来線の軸ディスクブレーキで用いられていたハサミ装置をベースに開発されてきました。この装置は、2本のブレーキテコの中央をつないだH型の装置で、その一端に油圧シリンダを配置し、他端のブレーキライニングでブレーキディスクを挟むテコ倍力方式の押し付け機構となっていま

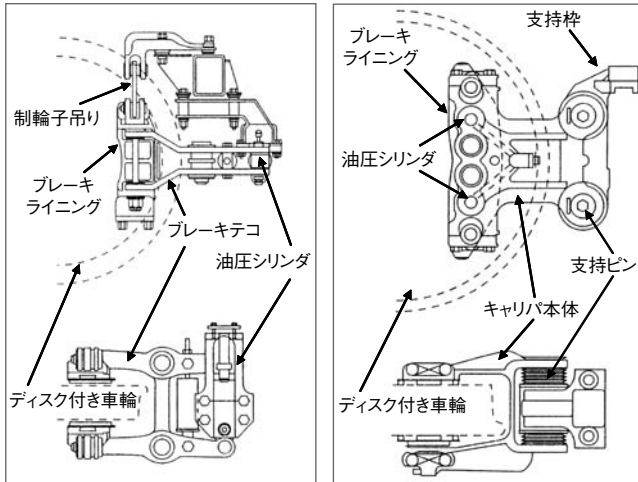


図7 テコ式押し付け装置

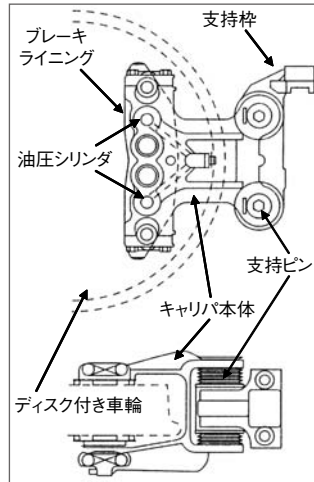


図8 油圧式フローティングキャリパ

す。ブレーキ時は、油圧シリンダとブレーキテコの作用により、油圧に比例した押し付け力（挟み力）が働き、緩め時は、油圧シリンダの圧力低下と緩めばねの力によりブレーキライニングがブレーキディスクから離れるものです。なお、ブレーキライニングは台車端ばりに取り付けられた制輪子吊りで反力を受ける構成としてあり、この方式ではリンク部品の摩耗対策が課題でした（図7）。

1992年に投入された新幹線300系電車では、台車重量を軽減するため端ばりのないボルスタレス台車が採用されたことから、上記の制輪子吊りが廃止され、基礎ブレーキ装置本体でブレーキ反力を受け持つ構造に変更されています。また押し付け機構においても、小径（φ38～45mm）の油圧シリンダを本体に複数内蔵することで、テコと同等の倍力効果が得られる直動式の押し付け機構が実用化され、テコ式押し付け装置に比べて大幅な摩耗部品の削減が達成されています。更に、図8および図9に示す油圧式フローティングキャリパでは、新幹線の基礎ブレーキ装置として留意すべき機能を、最小の艤装スペースで達成する方式が試みられました。キャリパ本体が支持ピン部をスライドするフローティングと呼ばれる機構は、走行中に生じる車輪の傾きや輪軸の左右移動への対策として提案されたものです。また、フローティング動作中の摺動抵抗を隙間調整機能の内部抵抗よりも遙かに小さく設計することで、ブレーキ動作の繰り返しによって拡大するディスクとライニングの隙間を常に規定値に調整し、ブレーキ扱いから制動力が得られるまでの空走時間が一定に保たれ、速やかな動作が約束されます。油圧シリンダを本体に内蔵した直動式の押し付け機構とフローティング機構を組み合わせた「油圧式フローティングキャリパ」は、小型で軽量の基礎ブレーキ装置として、既存の新幹線で最も多く採用されています。

2011年に東北新幹線でデビューする最新のE5系電車では、新幹線で初となる空圧式キャリパが採用されました。

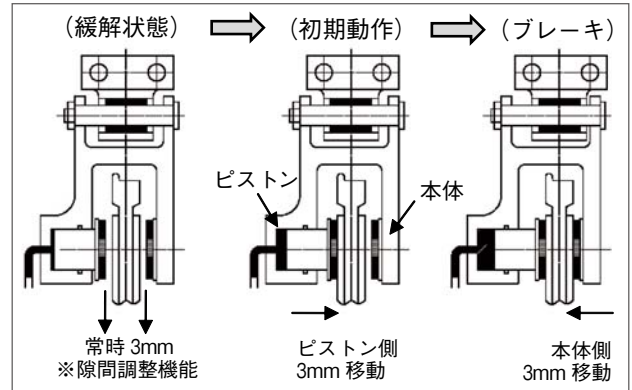


図9 油圧式フローティングキャリパの動作説明

近年の技術開発により、これまで培ってきた新幹線の油圧ブレーキシステムと同等の制御性と安全性を、空気圧のみで構成し確保できることを示した一例と言えます。圧縮空気によってブレーキを制御することの大きなメリットとして、空圧変換装置が不要となりメンテナンス性能の向上と軽量化が期待されます。

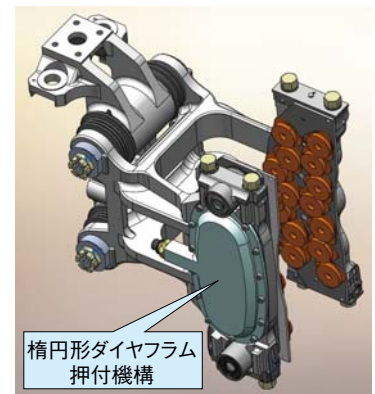


図10 空圧式フローティングキャリパ(重量70kg)

空圧式フローティングキャリパ

鉄道総研では、空気圧だけで動作する新たな押し付け機構を用いた、小型で軽量の「空圧式フローティングキャリパ」を開発しましたので紹介します（図10）。新たに開発した空圧式フローティングキャリパでは、テコや歯車といった仕組みを用いず大きな力を直接伝えることができる「楕円形ダイヤフラム押付機構」を作動アクチュエータとして用いています。ダイヤフラムは空気圧を押し付け力に直接変換できる単純な機構で、薄くて気密性の高いゴム膜を用いるため製作形状の自由度が大きいという特徴があります。そのため、限られたスペースを有効に利用できる楕円形状のアクチュエータとすることで、既存の新幹線で用いられている油圧式フローティングキャリパと同等の大きさに構成することができました。また、ブレーキ時の摩擦熱によるダイヤフラムへの温度影響は、ダイヤフラムとライニングの間に断熱ピストンを配置することで防いでいます（図11）。

空圧式フローティングキャリパ用のダイヤフラムは、1.3mmと極めて薄い作動膜ですが、強靱なアラミド繊維で重ね織られた基布を、耐寒性および耐熱性に優れたシリ

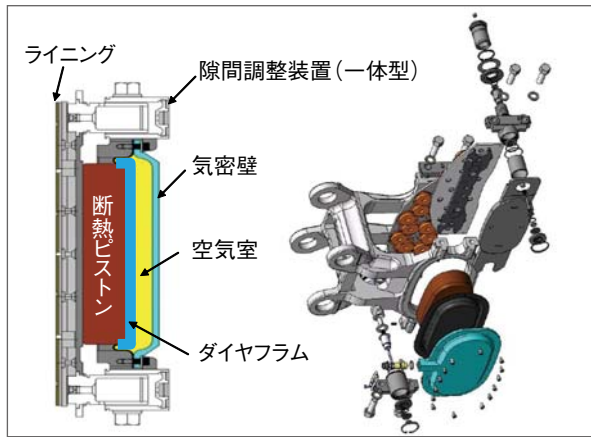


図 11 キャリパ本体の詳細構造

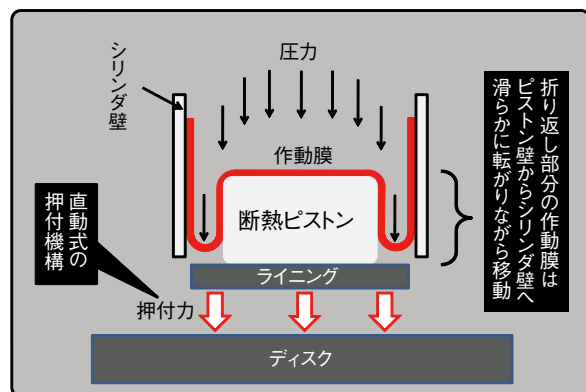


図 12 楕円形ダイヤフラム押付機構の動作原理

コンゴムで被覆した構造により、その限界耐圧は3MPaに達し、想定する最大制御圧力720kPaに対して約4倍の強度を有しています。なお作動膜は、図12に示す動作概念のように、ピストンとシリンダの間に折り返し部分を設けながら介在しており、空気源から圧縮空気が供給されると、折り返し部分がピストン壁からシリンダ壁へと摩擦することなく滑らかに転がりながら移動し（以下、ローリング作用）、空気圧に比例した押し付け力がライニング背面に直接作用することで、ブレーキ力の発生機構として働きます。この極めて自然な作動膜のローリング作用と高い限界耐圧により、ダイヤフラムを用いた押し付け機構は優れた耐久性と高い機械効率を得ることができます。このような、楕円形ダイヤフラム押し付け機構は構成部品が少ないことも魅力の一つであり、新幹線で培われた信頼性の高い油圧式フローティングキャリパの本体構造と組み合わせることで、メンテナンス現場で求められる作業の簡素化と低減についても期待できる装置となっています(表1)。

新幹線の基礎ブレーキ装置は、安全と信頼性に十分留意しながら、小型化と軽量化に関する開発や改良が進められてきました。ここで紹介した空圧式フローティングキャリパを既存の新幹線に適用することで、更にシンプルで信頼性の高い堅牢な機械ブレーキシステムにすることができま



図 13 ブレーキディスク試験機

表 1 主要部品の交換周期

部品名称	交換規定		
	走行距離または期間	時期	時期
キャリパ本体	—	15年	—
ダイヤフラム	120万km	3年	1全検
断熱ピストン	120万km	3年	1全検
隙間調整装置	240万km	6年	2全検

す。なお現在、新幹線の性能向上に適用する基礎ブレーキ装置として、ブレーキ力を1.3倍に増強した「高負荷型装置」の開発にも着手しています。平成23年度には現車試験を予定しており、実用化に向けた最終段階として性能評価や保守性などを検証する予定です。

おわりに

開業時200km/hの夢の超特急と言われた新幹線の営業最高速度は、東北新幹線で320km/h運転が予定されています。ブレーキ制御研究室では、さらなる高速走行にも対応するため、車輪・レール間の粘着状態の改善や、高速走行時の滑走制御、ブレーキ時に発生するディスクとライニング間の熱影響の低減方策や、その熱影響が細かく評価できる新しい温度評価システムの開発などに取り組んでいます。実物大の試験が行えるブレーキディスク試験機(図13)をフル稼働して、これからも新幹線のブレーキシステムの安全性や信頼性を維持向上していくために、研究開発を進めていく所存です。RRR

文献

- 1) 内田清五：新幹線電車でブレーキの研究開発，交通新聞，2000
- 2) 熊谷則道，他：新幹線用すべり率滑走制御システムの開発，第4回鉄道技術連合シンポジウム講演会，1997
- 3) 内田清五，他：粘着力有効利用による新幹線高速化のためのブレーキ制御，鉄道総研報告，1993
- 4) 狩野泰，他：空圧フローティングキャリパの開発，第16回鉄道技術シンポジウム講演論文集，2009