

リニア技術をレールブレーキへ応用する

坂本 泰明

浮上式鉄道技術研究部(電磁力応用研究室 副主任研究員)



さかもと やすあき

はじめに

鉄道車両のブレーキには動作原理が電気的作用のものや機械的作用のものがありますが、そのほとんど全てが最終的には車輪とレールの間の摩擦力(粘着力)に依存しています。この粘着力を超過するブレーキ力を発生させると車輪がレール上で滑ってしまい、制動距離が延びるばかりでなく、車輪が局所的に摩耗するなどの弊害を生じてしまいます。そのため、ブレーキ装置の性能向上と併せて、如何に粘着力を高めるか、或いは如何に粘着力を限界まで活用するかといった研究が続けられています。

一方、粘着力を用いない、全く別方式のブレーキとして「レールブレーキ」があります。レールブレーキは粘着に起因した諸問題から脱却できる利点がありますが、過去の開発過程において幾つかの課題が指摘され、日本国内では一部の路面電車などを除けばほとんど実用に供されていません。

鉄道総研では再びこの「レールブレーキ」に着目し、磁気浮上式鉄道の開発過程で培ったリニアモータ技術を応用することで過去の課題を解決しようと取り組んでいます。ここでは、このリニア技術を応用したレールブレーキの研究開発について、その経緯を含めて紹介します。

レールブレーキの開発経緯

レールブレーキは粘着に依らないブレーキとして古くから考案されているブレーキです。その歴史は比較的長く、海外では1900年頃から開発がなされ、1905年には既に現車試験に供された実績があります。日本国内でも山陽新幹線延伸の1969～1971年にかけて高速域のブレーキ力を補うために開発が行われ、また、その後も暫くの間、研究開発が続けられていました。レールブレーキには使用形態に合わせて幾つかのタイプがあります。代表的な実用例として、ドイツの高速鉄道ICE3にレールと接触しないタイプ(渦電流レールブレーキ)、フランスの高速鉄道TGV-POSなどにレールと接触するタイプ(吸着渦電流レールブレー

キ)が搭載されています。

渦電流レールブレーキは台車下部のレール対向位置にレールとの空隙を保った状態で直流電磁石を配置したものです(図1(a))。走行時に電磁誘導現象を用いてレールに渦電流(近づいてくる電磁石の磁場を排斥し、その運動を妨げるような磁極を発生する電流)を発生させ、一時的に電磁石となったレールとの間に働く電磁力によってブレーキ力を得ます。非接触動作を特長としており、気象条件や車両動揺による車輪とレール間の接触状態によらない安定したブレーキ力を発生することができます。また、粘着力によるものと異なり、高速になってもブレーキ力があまり低下しないという特長もあります。しかしながら、渦電流によるレールの温度上昇が軌道に影響を与える可能性があることや、電磁石を通電するために必要な電力がバッテリーで賄えないほど大きいため、その電力を停電時などにおいてどのように確保するかといったことなどが課題となり、

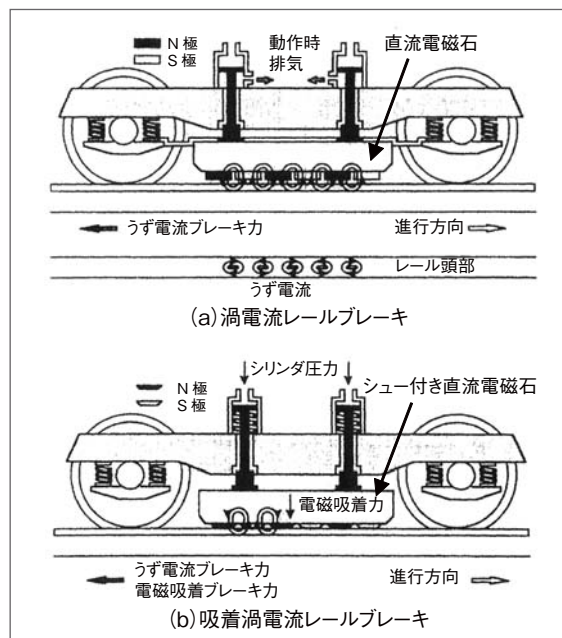


図1 従来のレールブレーキ¹⁾

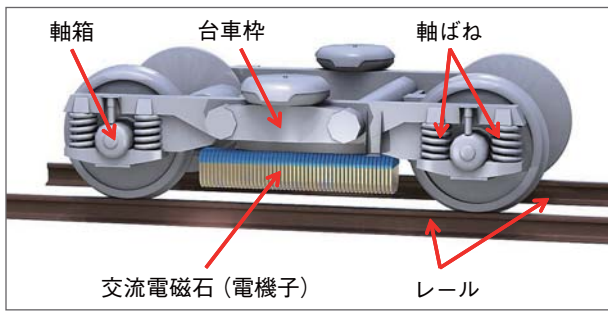


図2 リニアレールブレーキの基本構成

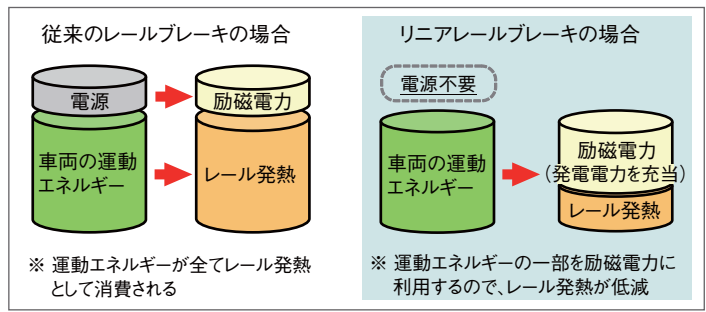


図3 エネルギー変換の比較

日本では実用化に至りませんでした。海外の実用事例では軌道側を強化し、電力には主電動機を用いた発電ブレーキの発電電力を充てるなどの方法が採られています。

吸着渦電流レールブレーキは電磁石表面にシューを設けてレールと接触させてブレーキ力を得る装置です(図1 (b))。前述の渦電流レールブレーキと同様に渦電流によるブレーキ力を発生させると共に、磁気吸引力を用いて電磁石をレールに吸着させ、その接触による摩擦力を活用するものです。この方式は日本でも1990年前後に積極的に研究されました。レールの温度上昇が渦電流レールブレーキと比べると低く、電力も少なくて済むという利点がありました。しかし、シューとレールの接触によってレールの表面に白色層と呼ばれる変質層を生じる問題などが判明し、実用化に至りませんでした。

レールブレーキの物理的効果

元来、ブレーキの物理的作用は「走行車両の運動エネルギーを他のエネルギーに変換すること」にあります。ディスクブレーキや踏面ブレーキなどの機械ブレーキは摩擦によって運動エネルギーを熱エネルギーに変換するものです。その熱エネルギーによってブレーキディスクや車輪の温度が上昇します。一方、主電動機を用いた電気ブレーキは運動エネルギーを電気エネルギーに変換するものです。電気エネルギーはき電線に戻して他の電車で再利用されたり(回生ブレーキ)、車載の抵抗器で熱エネルギーに変換されたりします(発電ブレーキ)。このようにブレーキには共通して「運動エネルギーから変換されたエネルギーの受け皿」となるものが必要となります。

一方、レールブレーキの物理的作用は「走行車両の運動エネルギーをレール内の熱エネルギーに変換すること」にあります。着目すべきこととして、「レール」という他のブレーキとは異なるエネルギーの受け皿が利用されています。このエネルギーの受け皿としてのレールは車両に付帯するものではなく地上に連続的に敷設されているので、総質量や総表面積がかなり大きなものとなります。そのため、許容される温度上昇値や周囲への放熱にもよりますが、

レールが受け入れられるエネルギーの総量は比較的大きなものと見積もられます。例えば、600mの60kgレール(2本)を1℃だけ温度上昇させるエネルギーは放熱を無視すると約33MJですが、これは概ね編成質量350トンの車両が速度50km/hで走行する時の運動エネルギーに相当します。

以上のように、レールブレーキは粘着力に依存しないばかりでなく、エネルギーの新たな受け皿を確保するものとなります。原理的な面でブレーキ手法の選択肢を増やすものと言えます。これらは従来のブレーキと排他関係がないので、現行のブレーキシステムに対してブレーキ容量を上乘せして増やせる可能性を持っています。

リニア技術の渦電流レールブレーキへの応用

前述のようにレールブレーキの期待効果には魅力がありますが、開発経緯から分かるように現実には解決すべき課題があります。これらの内、原理的な事項としては下記が挙げられます。

- ① レールの温度上昇を低減する必要がある
- ② 停電時でも動作できるようにする必要がある
- ③ レールに接触させない

これらを考慮して、非接触の渦電流レールブレーキ(③を解決)に再び着目し、リニアモータ関連技術を応用することで、①と②の課題を解決できる可能性があるリニアモータ型渦電流レールブレーキ(以下、リニアレールブレーキ)を考案しました。

リニアレールブレーキはレールと空隙を介して交流電磁石(電機子)を配置したものです(図2)。大きな特長として、通電するために必要な電力を電機子自身が発電するという機能を持たせています。この発電はリニア地下鉄などで実用化されているリニア誘導モータの回生ブレーキの原理を応用したものです。ここで、ブレーキ動作時において、発電した電気エネルギーに相当する分だけレールで消費される熱エネルギーが減るので、レールの温度上昇が低減されます。更に発電した電気エネルギーを電機子自身に必要な電力に充当できるので、外部から電機子に電力を供給する必要がなくなります(図3)。これらによって前述の①と②

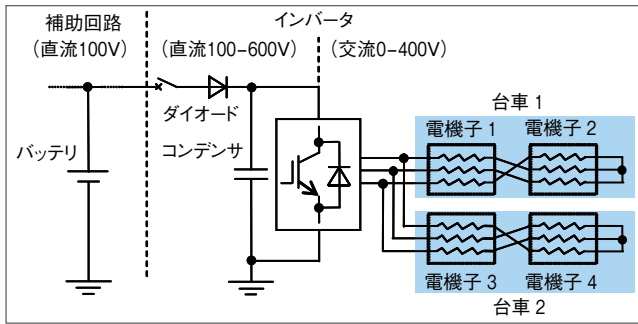


図4 停電でも使用可能な励磁システム

の課題が解決されます。一方、積極的に発電を行えばレールの温度上昇はそれに応じて大幅に低減されますが、仮に余剰な発電電力の処理を主回路（主電動機との電力授受を行う電気回路）に依存させると、その主回路に異常があった場合にリニアレールブレーキも使用できなくなってしまいます。そこで、主回路から完全に独立した励磁システム（図4）を考案しました。

図4において、インバータはブレーキ指令を受けるとバッテリーから供給される補助回路（制御機器などの電源に用いられる直流100Vの回路）から一瞬だけ電力供給を受けて、電機子に交流電流を通電し、ブレーキ力を立ち上げます。同時に周波数を制御し、発電動作を開始します。得られた発電電力を用いてインバータの直流電圧を所定値まで立ち上げます。その後は発電電力と電機子自身に必要な電力とが過不足無く平衡するように制御することで、ブレーキ力とインバータの直流電圧を所定値に保ち続けます。この方法を用いると発電電力が得られなくなる低速度では使用が制限されますが、初期通電を除けば外部との電力授受が不要となり、電源や付帯機器を伴わずにインバータだけでブレーキ動作を行うことができます。また、初期通電についてもその電力は非常に小さく、小容量のバッテリーで十分に賄うことができます。つまり、制御電源を兼ねた小容量バッテリーをインバータ毎に備えることで、停電や編成分離事故が起こっても動作可能な励磁システムを構築できるのです。

どのようなブレーキとして提供できるか？

リニアレールブレーキはブレーキ時のエネルギーの消費先、ブレーキ動作に必要な動力源（動作源）、特長の全てが他のブレーキとは異なるため、フェイル要因を共有しない、完全に独立したブレーキシステムとして提供できます（表1）。また、渦電流レールブレーキと同様に高速になってもブレーキ力があまり低下しないという特長を備えています。さらに、ブレーキ力に加えて電機子とレールの間に磁気吸引力が作用し、車輪とレールの間の接触圧を増加させるので、粘着によるブレーキ力を向上させる効果もあります。

表1 ブレーキシステムの比較

	機械式 ブレーキ	電気式 ブレーキ	リニアレール ブレーキ
エネルギー消費先	ブレーキディスク 車輪	き電回路 車載抵抗器	電機子コイル レール
動作源	圧縮空気	主回路	不要（補助回路）
主な特長	信頼性 停留動作	省エネルギー 省メンテナンス	非粘着・非接触 磁気吸引力 （増粘着、吸着作用）

ここで、電機子は普段は台車枠下に引き上げておき、動作時だけレールとの空隙を保持するために軸箱に荷重を載せることを想定しています（図2はその機構は省略しています）。そのため、磁気吸引力は軸箱と台車枠の間の軸ばねに影響を与えることなく、直接、車輪をレールに吸着させるように働きます。試算によると、これにより地震時に脱線防止効果が得られることもわかっています。

リニアレールブレーキの研究開発

リニアレールブレーキの研究開発にあたっては、ブレーキ力のみならず電気機器としての特性を把握するとともにそれに応じた励磁システムの検討を行う必要があります。

始めはリニアモータの解析に特有な理論計算や、有限要素法による数値計算などの電磁界解析を用いてそれらを検討しました。また、解析検討と平行してベンチ試験装置を製作し、電磁界解析の妥当性を検証するためのデータや、概念設計モデルの基礎データなどを蓄積しました。特に電機子についてはリニアモータでも特殊な環状巻と呼ばれる構成を採用し、励磁システムも一般的なりニア誘導モータとは異なる制御手法を適用することから、ベンチ試験装置はその目的に応じて体系的に整備しました。その例として図5は環状巻電機子の特性を調査するために製作した静止型基礎試験装置です。静止状態で磁界だけを模擬走行させて、発生力や電気的特性を測定することができます。これ

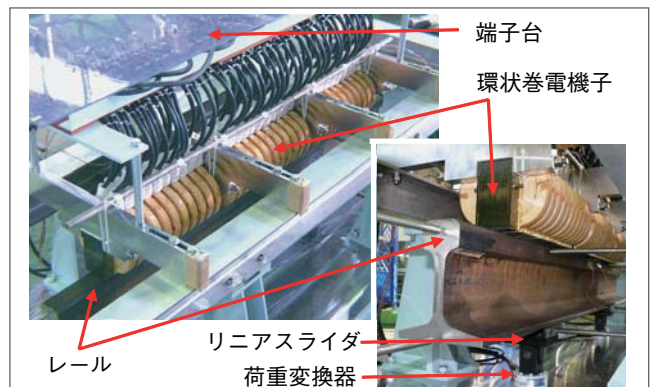


図5 静止型基礎試験装置

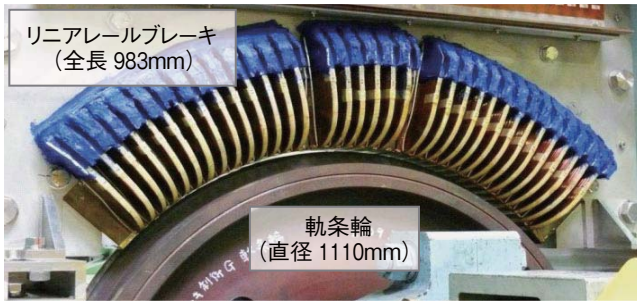


図6 軌条輪試験用プロトタイプ

らの解析的検討と実験的検証を経て、リニアレールブレーキの予測性能、設計方法、励磁システムの仕様およびその制御器の設計等の実機開発に向けた知見を整理しました。

この段階で走行状態を模擬した試験が行える軌条輪試験装置用のプロトタイプおよび励磁システムを試作し、0～300km/hの模擬走行試験を実施しました(図6)。その結果、速度50km/h以上において目標とする5kN(台車当り10kN)のブレーキ力が得られること(図7)、レールの発熱が速度や発電電力に応じて20～50%程度低減されること、制御電源さえあればインバータのみでブレーキ動作を実現できること(図8)などが確認されました。そして、総合的な試験として、1両当り40トンの車両を初速度300km/hからリニアレールブレーキおよびその励磁システムで制動する模擬試験を行い、自己発電が可能な最低速度の50km/h程度まで想定通りに制動動作が行えることを実証しました(図9)。(図8と図9では試験機材の都合によりブレーキ力は1.5kN程度に制限しています。)一方、磁気吸引力については速度に応じて約10～25kNでした。これは、台車当り約2～5トンに相当する力でレールにしがみついているような状態を作り出します。

なお、今回実証された台車当り10kNのブレーキ力は、仮に新幹線や在来線特急列車の編成内の全台車にリニアレールブレーキを搭載した場合、最高速度からの制動距離を現在の約半分～3分の2程度まで短縮する能力があります。

おわりに

リニアレールブレーキは粘着によらないブレーキの追究として着手したのですが、非粘着に加えて新たな付加価値を提供するブレーキ装置を目指して研究を進めています。現状、その導入意義は下記のように考えられます。

- ① 高速域の制動力を補うことで制動距離を短縮(高速域の粘着力低下や摩擦熱フェードの対策)
- ② 悪天候時などの制動力を補償することで制動距離増大を防止(湿潤条件や異物による粘着力低下の対策)
- ③ 停電を含む異常時のブレーキの多重系化

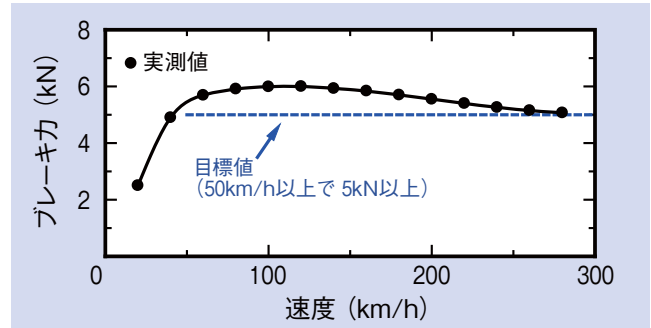


図7 ブレーキ力の測定結果

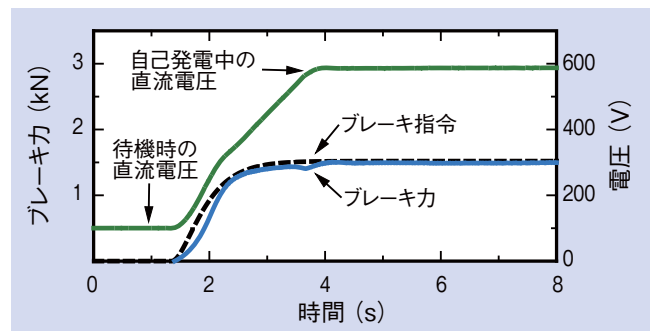


図8 自己発電の様子

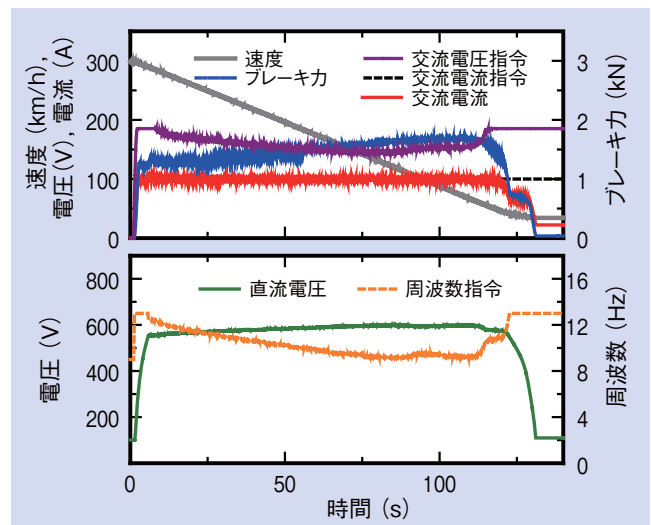


図9 模擬走行制動試験

④ 地震などに有効な脱線防止効果のあるブレーキ装置

導入に際しては台車質量が増加するなどのデメリットもありますが、上記のメリットとの得失により判断されるものと考えます。今後も次世代のブレーキの選択肢として適うように努力して参りますので、皆様のご理解、ご協力を賜れば幸いです。**RRR**

文献

- 1) 松村吾吾・内田清五・熊谷則道・小原孝則: 新幹線用レールブレーキの構成, 第34回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, pp.287-290, 1997