

鉄道一般

車両

施設

電気

運転・輸送

防災

環境

人間科学

浮上式鉄道

リニア技術を応用したブレーキを開発する

台車に搭載した電磁石によって、電磁的なブレーキ力をレールに非接触で作用させる渦電流レールブレーキは、地震などの緊急時に高速鉄道の停止距離を短縮するために、通常の車輪の回転を止める力によるブレーキを補助するものとして有用であると考えられます。このブレーキの実用性を高めるために、リニア技術を応用したブレーキ（リニアレールブレーキ）の研究・開発を行っています。ここでは、このリニアレールブレーキの動作原理や最近の開発状況について紹介します。



坂本 泰明
Yasuaki Sakamoto
浮上式鉄道技術研究部
電磁システム研究室
主任研究員



浮田 啓悟
Keigo Ukita
浮上式鉄道技術研究部
電磁システム研究室
副主任研究員



笹川 卓
Takashi Sasakawa
浮上式鉄道技術研究部
上席研究員



嵯峨 信一
Shin-ichi Saga
車両制御技術研究部
ブレーキ制御研究室
主任研究員

ブレーキの物理的作用

「ブレーキとは何ですか？」と問われると、皆さまはどう答えるでしょうか。動いているものを止めるものなどと答える方が多いのではないのでしょうか。もちろん、そのとおりなのですが、ここではあえて別の解釈をしてみたいと思います。

たとえば、ディスクブレーキで走行中の車両にブレーキをかけると、速度が低下するとともに、ブレーキディスクが発熱します。同様に、モーターで回生ブレーキをかけると、速度の低下とともに発電電力が発生します。このように、ブレーキをかけると必ず、発熱（熱エネルギー）や発電電力（電気エネルギー）などのエネルギーが発生します。一方、車両は速度の低下により、その運動エネルギーが減少します。この時、発生したエネルギーと減少したエネルギーの量は等しいことが知られています。つまり、ブレーキは「動いているものの運動エネルギーをほかのエネルギーに変換するもの」になります。このことから、どのようなブレーキにも共通して、「変換後のエネルギーの受け皿」となるものがあります。こ

こで紹介するリニア技術を応用したブレーキは、このエネルギーの受け皿を工夫するものとして考案されました。

渦電流レールブレーキ

リニア技術を応用したブレーキの説明の前に、その原型となる渦電流レールブレーキについて説明します。このブレーキは、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電磁石を配置したものです（図1）。走行時にこの電磁石をレールに近づけると、電磁的な作用でレールに渦電流（※参照）が発生し、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が発生します。一般的なブレーキは車輪とレール間の摩擦力（粘着力）に依存するため、ブレーキ力は走行速度、気象条件などの影響を受けますが、このブレーキは非接触動作なので、天候などによるレールの状態に左右されず、安定したブレーキ力を発生することができます。つまり、粘着力

※ 渦電流

周囲の磁界の時間変化を妨げるように導体内に流れる渦状の電流。

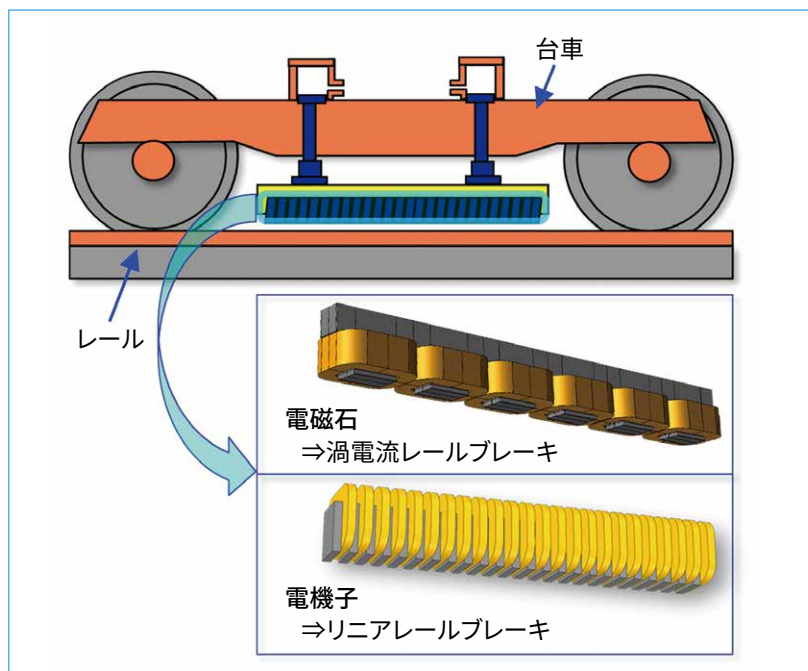


図1 渦電流レールブレーキとリニアレールブレーキの基本構成

を超えられないという制約を受ける一般的なブレーキに対して、このブレーキは安定したブレーキ力を上乘せすることができます。さらに、この安定したブレーキ力が高速走行時もあまり低下しないという特長も備えています。このことから、高速走行時に低下する粘着力を補うことが、このブレーキの合理的な使用形態であると考えられます。

ここで、このブレーキは、車両の運動エネルギーを渦電流によるレールの発熱（熱エネルギー）に変換しています（図2）。つまり、ブレーキ動作時のエネルギーの受け皿はレールになります。レールは地上に連続的に敷設されているので、車両が停止するまでに電磁石が通過するレールはかなりの長さとなります。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は比較的大きなものと見積もられます。たとえば、600mの60kgレール（2本で計72トン）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、これはたとえば、編成質量350トン（9両程度）の車両が速度

50km/h程度で走行する時の運動エネルギーに相当します。レール発熱を許容内に管理することが前提となりますが、車載のブレーキ装置と比べると長尺で重厚なレールに運動エネルギーを分散消費させることで、新たなエネルギーの受け皿を得ることができます。

リニアモーター技術の応用による電源レス化

新たなエネルギーの受け皿を得られる渦電流レールブレーキですが、実用化に際しては、「レール発熱を管理すること」と「停電を含めた緊急時でも動作できること」が課題となります。前者は、渦電流レールブレーキによる編成全体の制動力に上限を設けて、レールで消費するエネルギーを制限すればレール発熱を抑えることができるため、ある程度は対応できます。しかし、後者の課題を解決するためには電磁石を励磁（図3参照）するために比較的大きなバッテリーなどの電源を備えておく必要があるのですが、これは重量や容積がかさむなどの理由で、その対応は容易ではありません。このよう

な理由もあって、日本では実用化されていません。

そこで、鉄道総研ではこれらの2つの課題を解決するために、車両を非接触で走行させるリニア技術を、車両を止めるブレーキに応用したりニアレールブレーキを考案しました¹⁾。これは渦電流レールブレーキにおける電磁石を三相交流（図4参照）で励磁する電機子（図5参照）に置き換えたものです（図1）。この電機子とレールとでリニアレールブレーキを構成し、走行時に三相交流を使って電機子を励磁すると、次のような電磁的な作用を働かせることができます。

- ①渦電流レールブレーキと同様に、レールに渦電流が発生し、電磁力によってブレーキ力が発生する。
- ②上記と同時に、レールの渦電流によって、電機子が発生する磁界とは別の新たな磁界が発生し、それが電機子に加わる。
- ③電機子に加わった新たな磁界が、時間とともに繰り返し変動する交流なので、電機子内のコイルに電

図3 励磁

電磁石や電機子に電流を流して磁界を発生させること。

図4 三相交流

時間とともにプラスマイナスが繰り返し変化する交流の電圧や電流を、3系統組み合わせたもの。一般には、3系統（U相、V相、W相）の交流のプラスマイナスの変化の大きさが同じで、変化のタイミングに等間隔の時間差があるものを指します。

図5 電機子

モーターや発電機の内部構造のうち、電源と接続されて、力や発電電力を発生させる部位。主として鉄芯とコイルで構成されます。三相交流の電源が接続されている場合は、この電機子から時間とともに変動する波状の磁界が発生します。

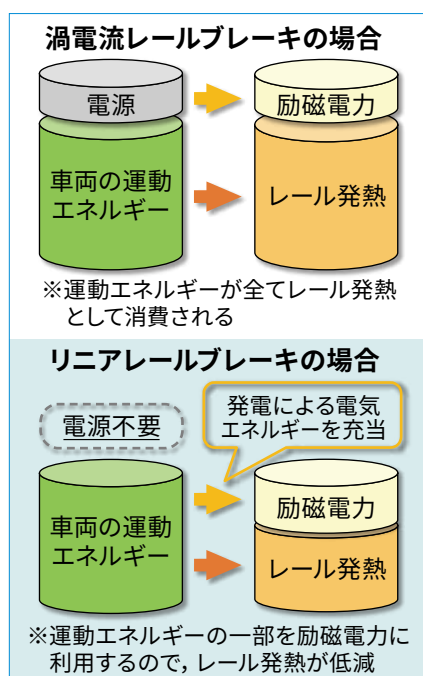


図2 レールブレーキのエネルギー変換

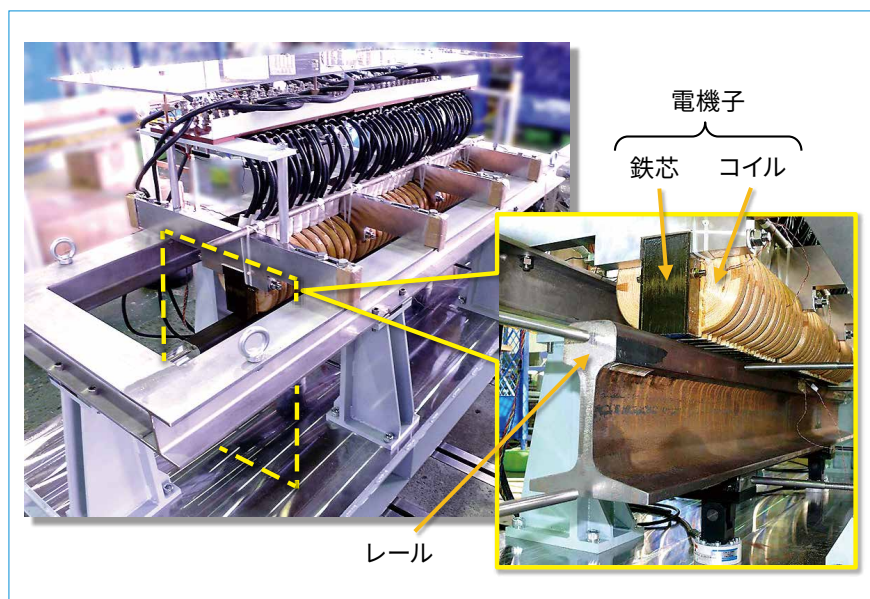


図3 静止型の試験装置

圧が誘導されて、発電電力が生じる。

④上記の発電電力は、電機子の励磁に再利用し、増大させることができるため、一度、励磁を開始した後は電源レスで励磁を継続し（自己発電）、ブレーキ力を発生させ続けることができる。

これらの①～④を開始する最初の励磁の瞬間だけはわずかな電力が必要なのですが、これは小さなバッテリーなどで容易に対応できます。これにより停電時などの緊急ブレーキとしても利用できます。

なお、渦電流レールブレーキの電磁石の場合は、渦電流によって発生する新たな磁界が、電磁石から見ると時間とともに変化しない直流なので、③のように発電電力が生じることがなく、励磁中は電源から電力を供給し続ける必要があります。

ここで、図2に示すように、リニアレールブレーキの場合、車両の運動エネルギーは、レール発熱による熱エネルギーと、発電電力として得られると同時に励磁電力に充当される電気エネルギーに変換されるため、発電量を増やすことで電気エネルギーの割合が増

えて、結果としてレールの発熱を抑えることが可能となります。つまり、リニアレールブレーキは、ブレーキ動作で発生した電気エネルギーの受け皿に電機子自身を充電ることにより、前述の渦電流レールブレーキの2つの課題を同時に解決に導くものとなります。これを実用的なものとするため、①万一の電氣的な故障が走行に影響しないように、車両を動かすためのモーターの回路とリニアレールブレーキを励磁する回路が電氣的に分離されていること、②リニアレールブレーキが故障しにくい回路となっていること、③停電時でも確実にブレーキがかけられること、などを考慮した回路構成と制御方法を考案しました。

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では、まず、性能把握のためにブレーキ力や発電電力の解析などを実施しました。また、レール上に電機子を静止させて、設計どおりの磁界や電磁力が発生することを確認しました（図3）。そして、実際の台車に電機子を取り付け

て鉄道総研の所内試験線での走行試験を行い、速度40km/hまでの発電動作とブレーキ力を確認しました（図4）。これらより、過去の国内で検討された渦電流レールブレーキと同程度のブレーキ力が得られること、同程度のブレーキ力が得られる渦電流レールブレーキと比べてレール発熱を50%程度まで低減できること、停電状態で自己発電の励磁が可能であることなどを確認しました。

次に高速走行時のブレーキ力を確認するため、円弧状の電機子を設計・試作して、レールを模擬する円盤を高速回転させ、時速300km/h超からブレーキをかけた際の発電電力とブレーキ力を測定しました（図5）。その結果、計画どおりのブレーキ力が得られることを確認しました。その後、さらにブレーキ力を高めるための改良などを経て、新幹線に搭載することを想定した設計を取りまとめました。

実用性を高める制御レス化

実用性を高めるために、低コスト化や信頼性向上の研究開発も進めています。このなかで、励磁について、従来

はブレーキ力の大きさや発電電力を調整するために、コンピューターが組み込まれたインバーター（※参照）とよばれる装置を用いて、電機子に加える電圧などを制御していましたが、これに代えて、汎用の基本的な電気部品であるコンデンサー（※参照）のみで励磁する方法を新たに考案しました。この方法は、基本的には走行中の電機子にコンデンサーを接続するだけのシンプルな回路で自然に自己発電による励磁が行われるため、インバーターが行うような制御が不要となり、制御レス化が実現できます。これにより、飛躍的な低コスト化と信頼性向上が期待できます。すでに原理の実証試験に成功しており、現在はこの方式のリニアレールブレーキを新幹線に搭載するための検討を進めています。

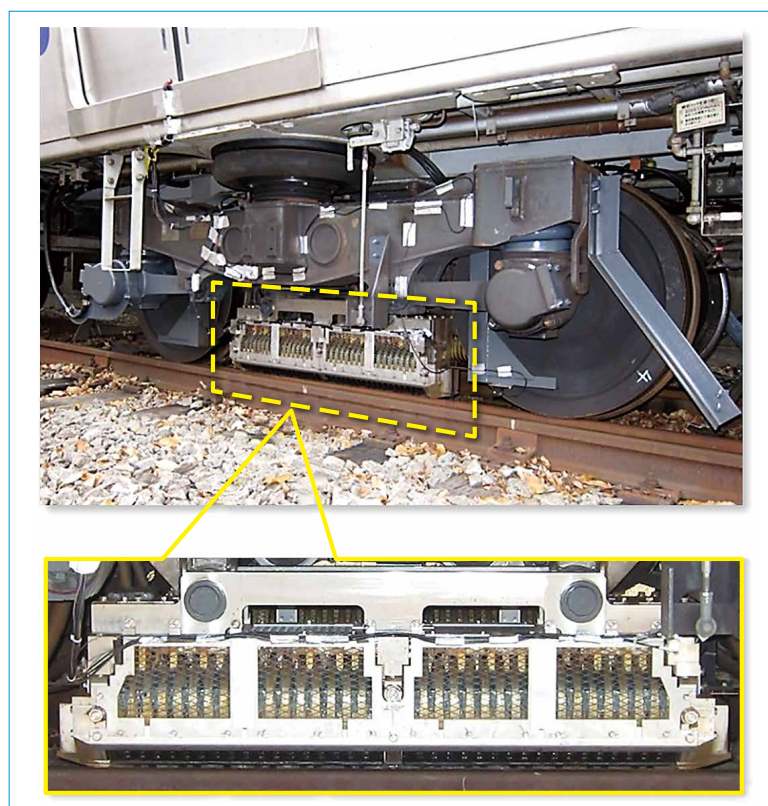


図4 所内試験線用のリニアレールブレーキ搭載台車

おわりに

ここではリニアレールブレーキの研究開発について紹介しました。最新の研究では、開発初期からの特長である電源レスに加えて、制御レスも実現しようとしています。他方で、台車への付加質量をいかに低減するかなどの検討項目もありますが、実用化した場合、高速車両の緊急時の停止距離を短縮することができると考えます。鉄道総研では、今後もリニアレールブレーキが次世代ブレーキシステムの選択肢の1つとなるように、研究を進めていきます。**RRR**

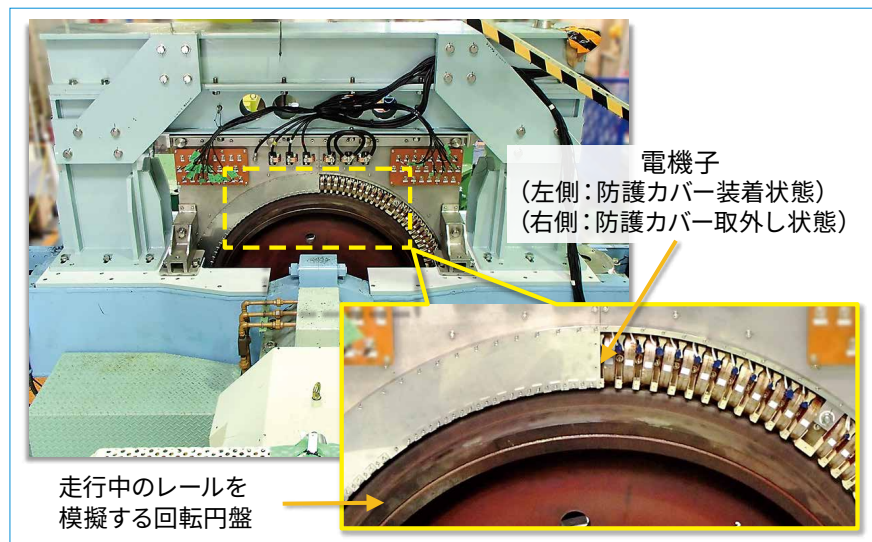


図5 高速走行を模擬する台上試験装置

※ インバーター

直流を交流に変換する電力変換装置。交流の電圧と周波数を制御する装置のことを指す場合が多いです。複数の電子的なスイッチなどで構成され、そのオンとオフをコンピューターなどで瞬時に切り替えることで、所定の交流の電圧と周波数を出力します。モーターや発電機の制御などに用いられます。

※ コンデンサー

電気を蓄えたり、放出したりする電気部品。充電や放電を制御する機能がない受動的な部品です。

文 献

- 1) 坂本泰明, 渡邊晃秀, 米山崇, 嵯峨信一:
リニアレールブレーキの実用化に向けて, RRR, Vol.71, No.8, pp.16-19, 2014