

# リニアモータ技術の レールブレーキへの応用

柏木 隆行

浮上式鉄道技術研究部(電磁力応用 副主任研究員)

狩野 泰

車両制御技術研究部(ブレーキ制御 副主任研究員)



かしわぎ たかゆき



かりの やすし

## 1. 列車を止める

列車の運転は、加速・惰行・減速・停止の繰り返して行われます。この中で重要な事柄は何でしょうか？加速・惰行の不具合に比較して、減速・停止ができないと人命に関わる大きな事故に結びつきます。

鉄道には、減速・停止の手段として色々な方式がありますが、鉄道のブレーキとして用いられているものを表1に示します。現在用いられているほとんどのブレーキは、車輪・レール間の摩擦力(以下、「粘着力」といいます。)を用いた粘着ブレーキです。一方非粘着ブレーキの中でも電磁吸着ブレーキはレールとの摩擦力を用いるという観点からは粘着ブレーキの一種ともいえ、直流レールブレーキ、LIM(Linear Induction Motor；直線型誘導電動機)レールブレーキ、空力ブレーキのみが真の非粘着ブレーキとすることができます。以下、これらのブレーキについて簡単に紹介します。

## 2. 安定したブレーキを目指して

1.項で述べたブレーキの中で、粘着ブレーキは何らかの手段で車輪の回転を減速させ(=ブレーキ力)、粘着力の範囲内で制動力(列車の減速)を得ます。車輪・レールは

共に硬度が高く、転がり抵抗が小さい反面、その間に発生できる粘着力は非常に小さなものとなります。乾燥した鉄同士との摩擦係数は最大0.15程度とも言われています。これは、自動車でのタイヤ・路面間(乾燥時)の摩擦係数が最大0.8程度と言われていることと比較して、非常に小さい値であると言えます。鉄道での滑りにくさを表す粘着係数は天候・軌道の状態等により変動するもので、確実に見込める制動力は理論値よりも小さなものとなります。また、粘着限界を超えたブレーキ力を作用させると車輪の滑走が発生して車輪踏面を傷め、さらに滑走から固着に至った場合は車輪フラットが発生し、車両のみならず軌道側にも種々の問題を引き起こす原因となります。

踏面ブレーキやディスクブレーキは摩擦材を動体(車輪・ディスク等)に押し付けることで運動エネルギーを熱エネルギーとして消費し、ブレーキ力を発生します。摩擦材を工夫することで、動体との摩擦を増加させてブレーキ力を向上させることが可能ですが、前述の通り粘着力を超えることはできません。電気ブレーキ、ディスク渦電流ブレーキは車輪のブレーキ力を摩擦によらず電磁気的な作用で得ますが、同じく粘着力を超えることはできません。

近年では滑走防止として、摩擦材の散布による粘着向上

表1 鉄道のブレーキ種別

原理	種類	実用例	備考
粘着ブレーキ	踏面ブレーキ	在来線	
	ディスクブレーキ	新幹線・在来線	
	電気ブレーキ	新幹線・在来線	動力車用
	ディスク渦電流ブレーキ	新幹線	付随車用
非粘着ブレーキ	直流レールブレーキ	ICE3(ドイツ)	国内でも新幹線・在来線で試験例有
	LIMレールブレーキ	無	現在開発中
	電磁吸着ブレーキ	登山鉄道・停留ブレーキ(欧州)	国内でも在来線で試験例有
	空力ブレーキ	無	浮上式鉄道・新幹線で試験例有

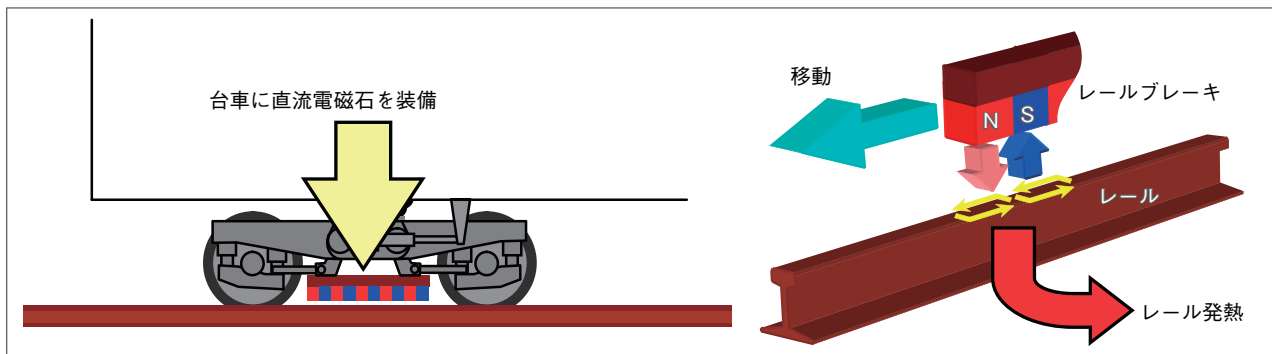


図1 直流レールブレーキの装着イメージと動作原理

策や、車輪の回転速度を検知して滑走を抑制する滑走防止制御が導入され、以前よりも安定性は向上したものの、粘着限界を超える制動力が得られるわけではありません。

非粘着ブレーキの中で、直流レールブレーキ、LIMレールブレーキではブレーキ力をブレーキ装置とレールの間で直接発生させるため、軌道状況等によらず安定した制動力を得ることが可能です。

電磁吸着ブレーキはブレーキ装置とレールの間で直接ブレーキ力を得ることが可能ですが、レール表面を摩擦材が擦るために、軌道への悪影響が避けられません。そのため、登山鉄道での非常用途や、停止時の停留ブレーキと言った限られた範囲での実用化にとどまっています。

空力ブレーキは非接触ではありますが、原理的には空気との摩擦を用いるブレーキであり、他のブレーキとは異なった特徴を持っています。ただし、摩擦抵抗の観点からみた場合、空気の密度は大変薄く、350km/h以上の高速域でないと十分な制動力を得ることができません。

このようにブレーキには種類によってそれぞれ特徴があり、その特徴を有効に利用することで、より安定した制動力を確保することができるようになります。

### 3. レールブレーキ

2.項で述べたように、現在の鉄道のブレーキシステムは制動力の大部分を粘着力に依存しています。この粘着力は、自然環境や曲線区間でのレール塗油などの影響により大幅な変動があり、その最悪値を以て列車の制動力を決定する必要があります。一方、レールブレーキは非接触であるため、どのような条件でも一定の制動力を得ることができるという利点があります。

ここで、従来研究されてきた直流レールブレーキの動作

原理を図1に示します。レールに対向する形で台車に電磁石を配置し、制動力が必要になった時に電磁石に直流電圧を加えます。すると、レールには台車と共に移動する電磁石の磁力によって電流が発生し、見かけ上レールにも電磁石が有ることと同様になります。このレールに発生した「見かけ上の電磁石による磁力」と台車の「電磁石の磁力」の相互作用によりブレーキ力を得ることができます。この時、列車の運動エネルギーは最終的にレールに発生した電流によるレール発熱に変化します。この時の発熱量は、レールに許容される温度上昇量を上回ってしまう可能性もあります。このため、日本国内で過去開発されてきた直流レールブレーキでは、制動力に関して十分な性能を得ることが可能であっても、実用に至ることはありませんでした。ドイツ新幹線・ICE3(図2)では使用条件を制限(高温時は使用不可)することで実用化を図りましたが、このような制限が無く使用できる方が望ましいことは言うまでもありません。



図2 直流レールブレーキを装備したドイツ新幹線・ICE3の台車

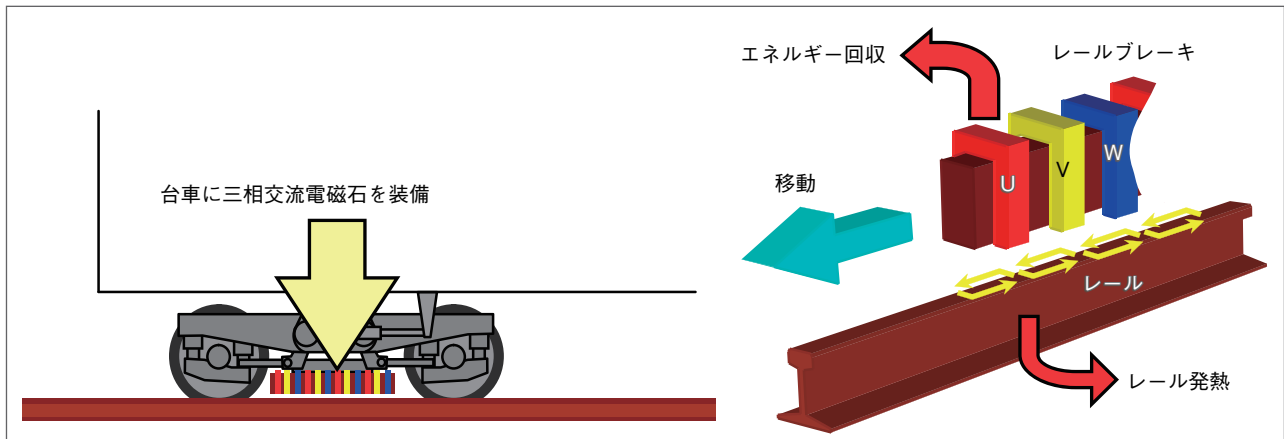


図3 LIMレールブレーキの装着イメージと動作原理

そこで、レールブレーキの非接触で制動力を発生できる利点を生かしながらレール温度上昇を抑える手段として、鉄道総研では直流レールブレーキの電磁石をLIMとするLIMレールブレーキの開発を行っています。

#### 4. LIMレールブレーキ

LIMレールブレーキの動作原理を図3に示します。レールに対向する形で台車に電磁石を配置するのは直流レールブレーキと同様ですが、直流電圧を加える代わりに三相交流電圧を加えます。単純化して考えれば、リニア地下鉄のモータ部分を台車に取り付けたものと同様です。ここで、LIMは「モータ」と名乗っていますが、列車でモータがブレーキ時に回生ブレーキを行うように、リニア回生ブレーキとして用いることが可能です。その結果、LIMレールブレーキによって列車の運動エネルギーは回生（回収）され、回収した分だけレール発熱を抑えることが可能となります。なお、LIMレールブレーキは1970年代初頭、フランス国鉄でも検討されたことがありました。現在では当時と比較して電力変換器技術が大きく進歩しているため、変換器技術の観点からも新しい発想で研究開発を進めたいと考えています。

具体的な適用例としては、例えば地方線区での優等列車がターゲットになると考えています。近年の車両は軽量化・高性能化が進み、動力車の比率が小さくなり、編成としての制動力を大きく取るには、相対的に機械ブレーキの作用

割合が大きくなってしまいます。また、列車密度によっては動力車の回生ブレーキも回生失効してしまうため、車上に発電抵抗器を積む必要がありました。さらに前述のようにいずれのブレーキも天候・線路条件等によって制動力の変化が避けられません。そこで、付随車にレールブレーキを搭載することにより、機械ブレーキの比率が小さくなると共に、条件によらず安定した制動力を得ることができるようになるのではないかと考えています。

さて、LIMレールブレーキの特徴として

- (1) モータとして形状が特異である（非常に細長い）
- (2) 回転モータでは銅やアルミで構成されている回転子に相当する部材（＝レール）が鉄のみで構成されており、

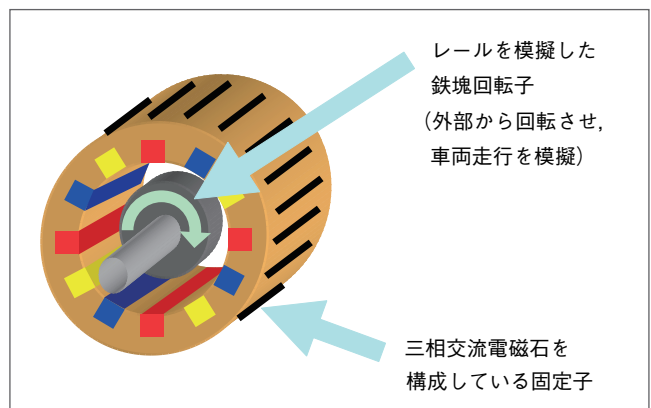


図4 レールブレーキ試験機概念図

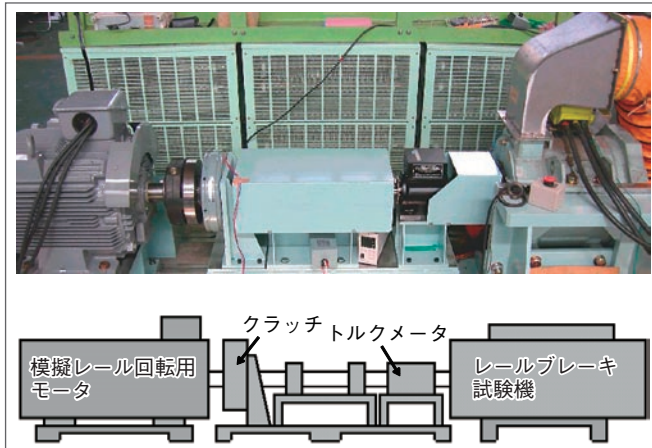


図5 回転型LIMレールブレーキ基礎試験装置

通常のモータと電磁気的特性が大きく異なる

(3) 通常、台車に装荷されるため、重量・寸法の制約が厳しい

(4) レールとの間に吸引力を発生する  
といったことがあげられます。

(1) により、回転モータではほぼ問題とならない固定子側の端効果(レール方向の影響)、縁効果(枕木方向の影響)の影響が考えられます。これらはいずれもモータとしては特性を低下させるものでありますが、ブレーキとしての特性への影響について、今後検証を進めていきます。(2) については、通常のモータより必要となる電流量が大きくなるため、導体断面積を極力大きく取れるような構成を検討しています。(3) については、(2) との兼ね合いもありますが、材質の変更も含め、発生力と重量のバランスを取る方法を検討しています。(4) で発生する力は、列車の安定走行に寄与できる可能性もあるため、有効利用についても検討します。

現在は、LIMレールブレーキ実用化検討への前段階として、レールブレーキ試験機を製作し、試験を実施しています。図4にレールブレーキ試験機概念図を示します。LIMレールブレーキではブレーキ装置とレールとの相対運動によりブレーキ力が発生するため、三相交流電磁石を構成している固定子内でレールを模擬した鉄塊回転子を回転させ、主に(1)、(2)の影響による通常モータとの特性の違いについて、電流とブレーキ力の関係やエネルギー回

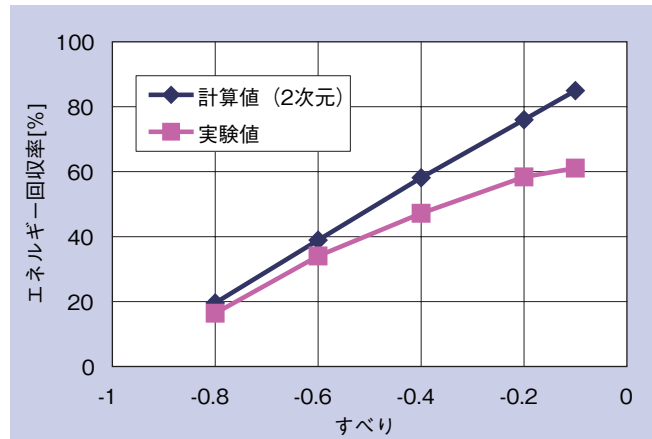


図6 回転型LIMレールブレーキ基礎試験装置試験結果 (エネルギー回収率・90km/h相当)

収率等の測定・検討を行っています。

このレールブレーキ試験機を用いた回転型LIMレールブレーキ基礎試験装置を図5に示します。左側の模擬レール回転用モータを用いてレールブレーキ試験機の鉄塊回転子を回転させ、トルクメータによりブレーキ力を、レールブレーキ試験機の出力電力からエネルギー回収率を測定しています。

図6に試験結果の一例を示します。このグラフは定速走行時にブレーキ動作を行った場合を模擬したもので、ブレーキ動作条件を変化させた時のエネルギー回収率(レール発熱の低減率と等価)を示しています。

今後、これらの結果や電磁界解析を元に静止型のLIM試験装置を製作し、(1)の影響を評価し(3)、(4)についての評価を行いたいと考えています。

## 5. おわりに

鉄道総研では、より安定した制動力を得るための一手法としてLIMレールブレーキに着目し、現在基礎的試験を実施し、その発生力や発熱等について確認を行っています。将来的には実車両への適用を目指して開発を続けてまいります。RRR