

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# リニアレールブレーキの実用化に向けて

鉄道総研では、車輪とレールの間の摩擦力に依存しない非粘着ブレーキの1つとしてリニアレールブレーキの研究・開発を行っています。このブレーキは、交流電磁石をレールに非接触で対向させ、電磁誘導現象によりブレーキ力を得るものです。ブレーキ動作に必要な電力を自己発電する機能を備えているため、停電時でも動作可能であるという特長を有しています。本稿では、リニアレールブレーキについて概説し、その特長やこれまでの研究開発の経緯を紹介します。また、今後の実用化に向けた展望を述べます。



**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  
[専門分野] 電磁機器、  
リニアモーター



**渡邊 晃秀**  
Teruhide Watanabe  
車両構造技術研究部  
走り装置研究室  
主任研究員  
[専門分野] 台車構造



**米山 崇**  
Takashi Yoneyama  
車両制御技術研究部  
動力システム研究室  
副主任研究員  
[専門分野] 燃料電池・  
バッテリーハイブリッド  
車両



**嵯峨 信一**  
Shinichi Saga  
車両制御技術研究部  
ブレーキ制御研究室  
副主任研究員  
[専門分野] 制輪子、研  
磨子、車輪/レールの  
粘着問題

## レールブレーキとは

リニアレールブレーキのお話をする前に、「レールブレーキ」と聞いても、ご存じの方はそう多くないかも知れません。もっとも、ほとんどの方が目にした機会が無いのではないのでしょうか。日本国内の新幹線や在来線鉄道にはほとんど採用されておらず、現在では一部の路面電車などに搭載されるのみの希少なブレーキ(?)だからです。

レールブレーキは、車輪とレールの間の摩擦力(以降、粘着力と呼称)によらずに、直接、レールに対してブレーキ力を発生する装置です。粘着力によらないため、ブレーキ動作時に車輪の回転速度が過大に低下してレール上を滑ってしまう「滑走」を起こさずに、安定したブレーキ力を発生することができます。そのため、レールブレーキは、粘着力に制限されるブレーキ力を上回る大きなブレーキ力が要求される場合などに応えられる手段となります。前述の路面電車も、道路上で急ブレーキをかける必要があることなどが、その採用の理由となっています。

## レールブレーキの種類

レールブレーキには幾つかの種類があります。大別すると、ブレーキシューをレールに接触させて摩擦力によってブレーキ力を得るタイプ、電磁石をレールに近づけて電磁誘導現象でレール内に渦電流(☞参照)を生じさせることで、電磁力によってブレーキ力を得るタイプ(渦電流ブレーキ、図1(a))、両者を併用するタイプ(吸着渦電流ブレーキ、図1(b))があります。ブレーキシューをレールに接触させるタイプについては、油圧などの機械的な力を用いるタイプと、電磁石がレールを吸引する電磁的な力を用いるタイプ(電磁吸着ブレーキ)があります。前述の路面電車では、ブレーキシューをレールに接触させるタイプが用いられています。

### 各タイプの課題

これらのタイプにはそれぞれ幾つかの課題があります。

渦電流ブレーキでは、電磁石を停電

#### ☞ 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。

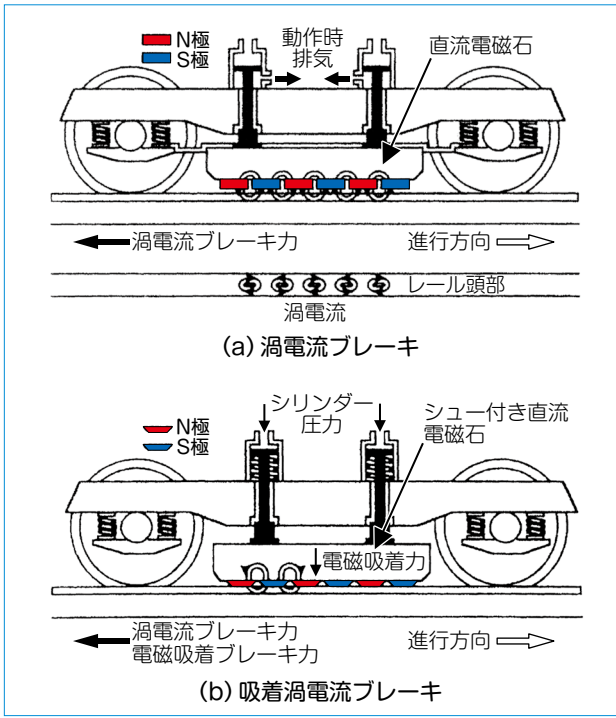


図1 レールブレーキの種類

時でも使用できるようにするための方策を要すること、レールの温度上昇が少なくないなどが挙げられ、吸着渦電流ブレーキや電磁吸着ブレーキでは、シューの接触によってレールの表面を傷めてしまうことなどが挙げられます。また、どのタイプにも共通して、決して軽いとは言えないレールブレーキを台車に搭載すること自体が、歓迎されるものではないのが実情です。これらより、日本国内では急ブレーキの必要性が高い路面電車ではレールブレーキの採用があるものの、その他の車両では普及に至っていません。一方、海外では高速鉄道用途を含めて、レールブレーキが実用に供されている事例があります<sup>1)</sup>。

### リニアレールブレーキの提案

鉄道総研では非粘着ブレーキの検討の一環として、このレールブレーキに着目し、これに浮上式鉄道の研究開発で培ったリニアモーター関連技術を応用することで、前述の短所を改善できる可能性があるリニアモーター型渦電流レールブレーキ(リニアレールブレー

キと呼称)を考案しました(☞参照)。図2にリニアレールブレーキの基本構成を示します。前に述べたようにレールとの接触はレールの表面を傷めてしまう

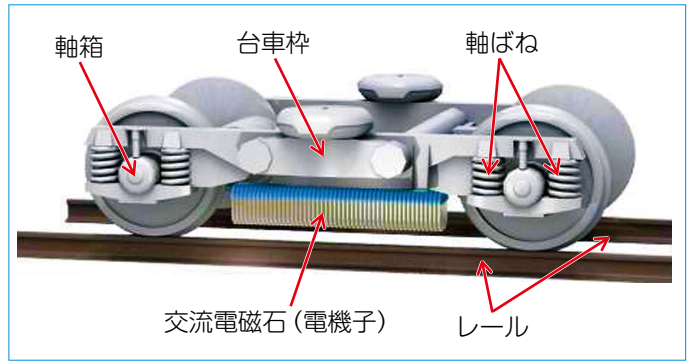


図2 リニアレールブレーキの基本構成

ため、レールとの接触がない渦電流ブレーキと類似の動作をするものとして

ここで、電磁石の部分について、従来の渦電流ブレーキでは直流励

磁でしたが、これを三相の交流励磁に変更することで、レールをリアクシ

ョンプレートとするリニア誘導モーター(☞参照)の電機子(☞参照)として機能するようにしました。これをインバーター(☞参照)から適切に制御することによって、通電するために必要な電力を電機子自身で発電することが可能となります。この発電動作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ーの回生ブレーキの原理を応用したものです。実際の動作は

#### ☞ レールの物理的性質に着目した一考

鉄道におけるレールは言うまでもなく鋼材でできています。その物理的性質には、適度な強度がある、電気伝導性があるなどが挙げられます。前者の性質を利用することで、比較的少ない体積で重たい車両の支持・案内の機能を担うことが可能となっており、また、その上を転がる車輪に対する転がり抵抗を低く抑えています。また、後者の性質を利用することで、電化する場合の帰線としての機能を担うことが可能となっています。ここで、これまであまり利用されてこなかったもう1つの物理的性質として、磁性があることが挙げられます。電磁力を利用するレールブレーキでは、この磁性の存在がブレーキ力の発生に大きく貢献します。『レールブレーキを導入することで、走行に関わる機能に対して、レールが持つ物理的性質を余すところ無く利用できるようになる』という見方をするのも面白いかも知れません。

#### ☞ リニア誘導モーター

回転形誘導電動機を半径方向に切り開いてへん平形とした直線運動をする電動機。鉄道の主電動機に応用された例として、リニア地下鉄や磁気浮上式鉄道リニモがあります。電機子からの反力を受ける地上に設置された部分をリアクションプレートと呼びます。

#### ☞ 電機子

電動機の構成のうち、誘導起電力や力を発生させ、電力を授受する部分のこと。主として鉄芯とコイルで構成されます。

#### ☞ インバーター

直流を交流に変換する電力変換装置。電気エネルギーは双方向に伝達できるので、交流の周波数を制御する機能のことを指す場合が多いです。電動機の制御などに用いられます。

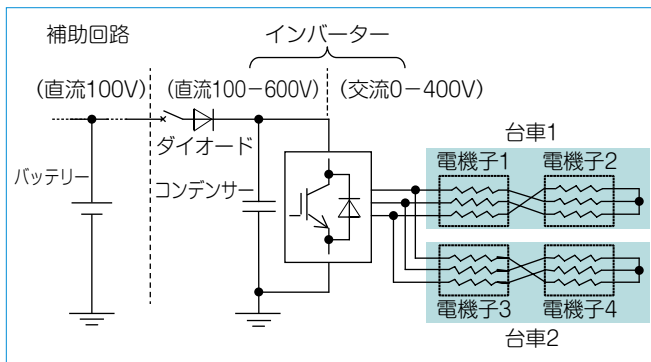


図3 考案した励磁システム

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 車輪踏面	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)

リニア誘導モーターのそれとは大きく異なります。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。さら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、外部から電力を供給する必要がなくなります。これらの特長により、前述の渦電流レールブレーキの短所が改善されることになります。

### 励磁システムとその特長

積極的に発電を行えばレールの温度上昇はそれに依り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(参照)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3)を考案しました。

図3において、インバーター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(参照)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、ブレーキ力の立ち上げと

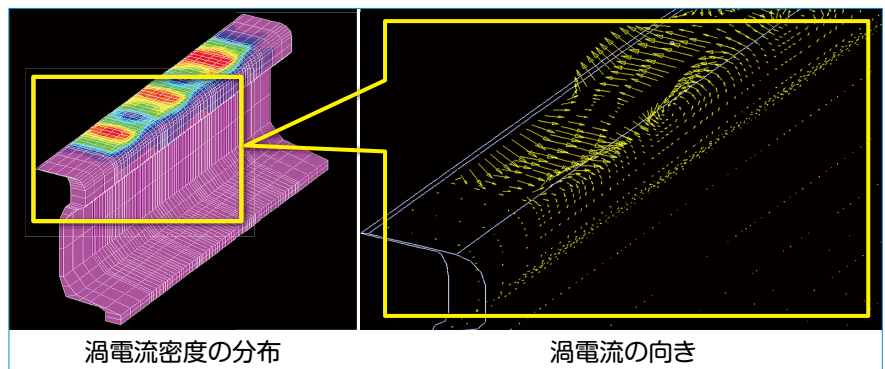


図4 レール内の渦電流解析の例

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ー内部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平衡するように制御しながら、ブレーキ力とインバーター内部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、電源や付帯回路を伴わずにインバーターだけでブレーキ動作を行うことができます。このように構成することで、リニアレールブレーキはブレーキ動作時のエネルギーの消費先、動作源、特長のすべてが既存の機械ブレーキや電気ブレーキと異なることになり、フェイル要因を共有することのない完全に独立したブレーキシステムとなります(表1)。

### 研究・開発

リニアレールブレーキの研究・開発では、ブレーキ性能の追求のみならず、発電動作を行う電気機器としての性能評価や、それを制御する励磁システム

の検討などを行う必要があります。これらについて、初期は解析(図4)やベンチ試験によって検討を進めました。基本的な特性と設計方法を整理した段階で、円周がレール頭頂面形状をしたローラーによって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ました。0~300 km/hの軌条輪試験を実施し、速度50 km/h以上において目標とする5 kN(台車当り10 kN)のブレーキ力が得られること、レールの発熱が速度や発電電力の設定に応じて20~50%低減されること、補助回路さえあればインバーターのみでブレーキ動作を実現できることなどを確認しました<sup>1)</sup>。

### 構内走行試験

軌条輪試験に続く次のステップとして、実際の台車に搭載し、走行に供するための検討に着手しました。検討すべき項目は多岐に渡りますが、初めはこれらの中でも、最も基本的な項目である電機子の小型・軽量化とその支持

#### 主回路と補助回路

車両を駆動するための電力を供給する回路を主回路、その他の機器に電力を供給する回路を補助回路と呼びます。重要な装置につながる補助回路は停電時でも電源喪失しないようになっています。

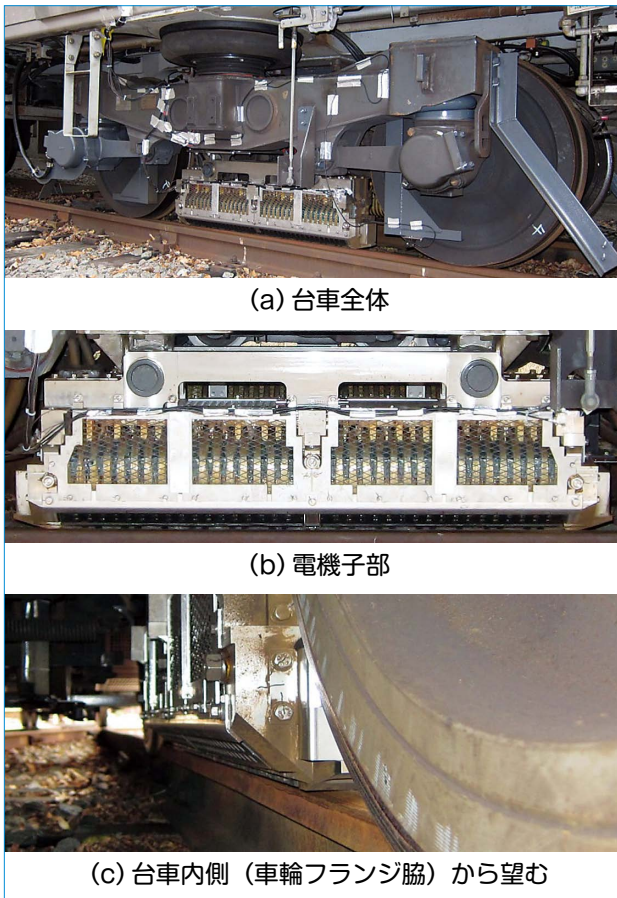


図5 構内走行試験用プロトタイプ

方法に絞ることとしました。これらの検討を実施し、鉄道総研の構内試験線での走行に供するプロトタイプとそれを搭載するための試験台車を設計・製作しました<sup>2)</sup>。

図5に製作した構内走行試験用のプロトタイプと試験台車の外観を示します。電機子の質量は1機当たり164 kgであり、さらなる軽量化が望まれるものの、軌条輪試験用のプロトタイプと比較すると軽量化が図られました。支持方法については、磁気吸引力による電機子鉄芯のひずみを防ぐとともに、万一のレールとの接触時における中間部防護などを目的として、鉄芯の長手方向の両端と中間部の3箇所できり下げの構造を採りました。この時、中間支持部を設けることによって電機子コイルの一部の配置が乱れますが、その影響を小さくするために不等な磁極ピッチ(☞参照)を採る方法などを考えました。

ることを前提として実用化時とは異なる単純なものとしてしました。

#### 試験結果

構内走行試験の結果を図6に示します。リニアレールブレーキは自己発電が可能である程度の高速度域のみで使用することを想定しています。一方、構内試験線は速度45 km/h以下の制限があり、想定する使用速度に満たない低速での試験であったため、自己発電のみでは不足する必要電力を電源から補給する試験体系としました。この時、この電源からの補給電力を測定することで発電性能を評価しました。同図に示されるように、低速域ながらもブレーキ力と発電電力が設計値とおおむね一致することを確認しました。

#### ☞ 磁極ピッチ

隣接したN極とS極の間の長手方向の距離。

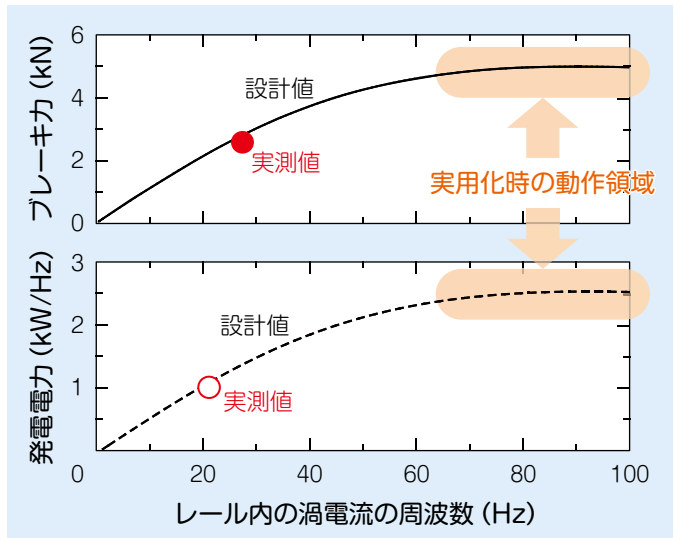


図6 構内走行試験の結果

なお、今回は上述のように電機子とその支持部材の取り付け構造について検討を行いました。支持部材と台車の取り付け構造については、構内走行のみに供す

#### 実用化に向けて

リニアレールブレーキの研究開発は、基本的な電機子の設計方法が整理され、軌条輪試験と構内走行試験を経て、「励磁電源を用いずに非接触でブレーキ力を発生する」という所期の機能と性能が実証されるに至りました。そして、構内走行試験をもって研究段階から開発段階にフェーズが進んだとも言えます。今後は実用化に向けて、支持・防護機構、耐久性、台車強度、走行安全性、軌道への影響、信号・通信設備への影響など、実使用を想定した検討を行いたいと思います。

実際の導入については、粘着によるブレーキを限界まで向上させた上でさらなるブレーキ性能が望まれる場合に、その導入のメリットと質量増加などのデメリットとを勘案した上で可否が判断されるものと考えます。今後も、リニアレールブレーキが次世代のブレーキの選択肢の1つとなるように努力して参ります。[RRR]

#### 文献

- 1) 坂本泰明：リニア技術をレールブレーキに応用する，RRR, Vol.69, PP.14-17, 2012
- 2) 坂本泰明ほか：リニアモータ型レールブレーキの開発，鉄道総研報告, Vol.27, No.7, pp.23-28, 2013