

リニアモータ技術を応用したレールブレーキの開発

浮上式鉄道技術研究部 電磁力応用研究室

副主任研究員 柏木 隆行

1. はじめに

鉄道車両の非粘着ブレーキの一つに渦電流レールブレーキがある。これにリニアモータ技術を応用することで、これまでの直流励磁方式の渦電流レールブレーキ（DC型レールブレーキ）¹⁾で課題となっていた、停電時の動作不能や過度なレール温度上昇を解決できる可能性がある。ここでは、これまでのレールブレーキ開発の経緯や海外の動向を解説するとともに、開発した交流励磁方式の渦電流ブレーキ（LIM型レールブレーキ）の定置試験による試験結果などを紹介する。

2. 渦電流レールブレーキ

2.1 これまでの経緯

鉄道車両の制動力は、一般的には何らかの方法で車輪を減速させることで得ており、最終的にはレール-車輪間の摩擦力である粘着力に依存している。そのため、天候やレール・車輪の状態により得られる制動力は大きく変化する。また、列車速度が増大すると制動力は小さくなってしまふ。粘着力を無視して車輪を減速させると車輪の滑走を招き、過度な場合には固着により車輪フラットが発生し、車両・軌道に悪影響を与える。

粘着に依存しない非接触のブレーキとして古くから渦電流レールブレーキは注目されており、1900年代にはすでに渦電流ブレーキの構想は持たれていたが、具体的な開発が見られるようになったのは1960年代後半からのことである。海外ではドイツで走行試験が、日本でも東海道新幹線で951系試験車による走行試験が行われている。当時は優れた電力変換器がなく、1970年頃にフランスで交流励磁方式の試験が行われた他は直流励磁方式ばかりであった。その後、日本では1990年代にも在来線で試験が行われたが、動作に必要な電力が大きく非常時に使用できないことや、レール発熱の問題などにより実用化には至らなかった。一方、ドイツでは高速鉄道向けに試験が続けられ、2000年に登場したICE3で非接触のDC型レールブレーキが実用に供され、EUのTSI (Technical Specification for Interoperability, 相互運用性に関する技術仕様書) の高速鉄道・車両部門に渦電流レールブレーキの規定が設けられるまでに至った。こうした中、鉄道総研では、従来のDC型レールブレーキで課題となった動作用電力の問題とレール発熱の問題を解決するべく、回転型基礎試験装置や静止型試験装置を用いてLIM型レールブレーキの開発を進めてきた。^{2), 3)}

2.2 LIM型レールブレーキ

LIM型レールブレーキは従来のDC型レールブレーキが直流励磁による磁極（直流電磁石）を有するのに対し、三相巻線を有する電機子（交流電磁石）からなり、対向するレールと合わせてリニアモータを構成する（図1）。この構成により、制動時に発電制動を行うことが可能となり、動作に必要な励磁電力をレールブレーキ自身で発生することが可能になる。また、発電した電力分だけレール発熱が低減される。DC型レールブレーキとLIM型レールブレーキのエネルギー収支を図2に示す。

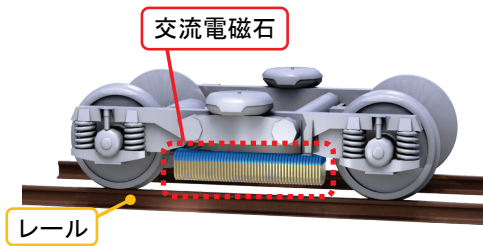


図1 LIM型レールブレーキ

2.3 零出力発電制動

LIM型レールブレーキを用いると、自身の動作に必要な励磁電力を車両の運動エネルギーから発電制動を通して得られるようになるが、ここでは図3に示す回路構成を用いた零出力発電制動を用いる。零出力発電制動とは、発電制動による電力と励磁に必要な電力をバランスさせ、外部に電力を出力しない制動を指す。この構成を用いることで、下記の原理で零出力発電制動が行われる。

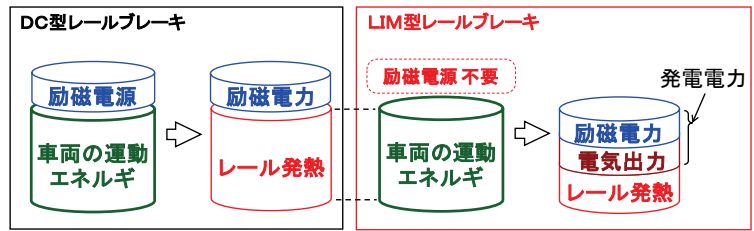


図2 レールブレーキのエネルギー収支

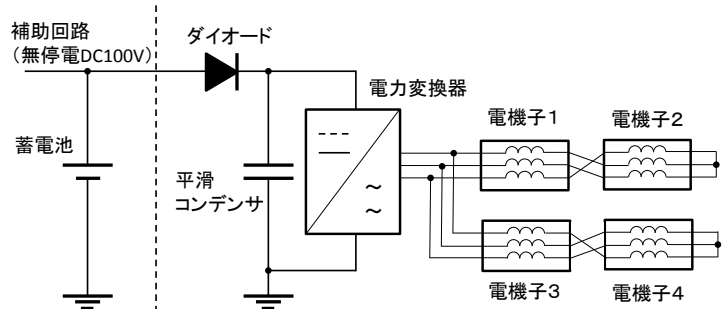


図3 零出力発電制動に用いる回路構成

- ① ブレーキ指令を受けた電力変換器は、制御電源の一部（200W程度）を使用して、電機子の初期励磁を行う。
- ② 励磁された電機子からの磁束により、レールに渦電流が生じ、誘導発電が開始される。
- ③ ②により生じた電力が平滑コンデンサを充電し、直流回路の電圧が上昇する。充電した電力により電機子を励磁する。これが繰り返される。

なお、直流回路の電圧が100V以上になるが、ダイオードにより阻止されるため、補助回路には逆流しない。

- ④ 電力変換器は、設定した直流電圧に上昇した状態で、直流電圧が一定になるように電機子への励磁電流を制御し、定常の制動力を得る。

この初期励磁から定常制動力を得るまでの時間は充分短く、列車のブレーキ装置に必要な応答性を確保していると考えられる。

この回路構成をとる利点は以下の3点にある。

1. 初期励磁は補助回路からの極小容量の電力で賄える程度であり、必要とあれば電力変換器に小型蓄電池を内蔵すれば補助回路からの電力すら不要となり、起動・動作に外部のエネルギー源が不要である。
2. 機器構成が電力変換器と電機子本体のみとなり、シンプルな構成となる。
3. 他のブレーキ装置と動作原理・動作源とも異なり、独立したブレーキ装置が構成される。

他方、車両の運動エネルギーから励磁電力を得るため、発電電力が低下する低い速度域では動作が出来ないという欠点もある。

3. 軌条輪試験装置を用いた定置試験

3.1 軌条輪試験装置

これまでの検討を基に、LIM型レールブレーキの動的な特性を定置にて試験するために、軌条輪試験装置を使用した。本来この試験装置は、車輪踏面ブレーキなどの摩擦ブレーキを試験する

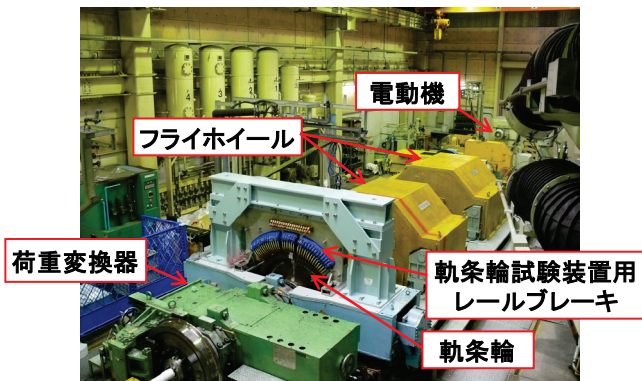


図4 軌条輪試験装置

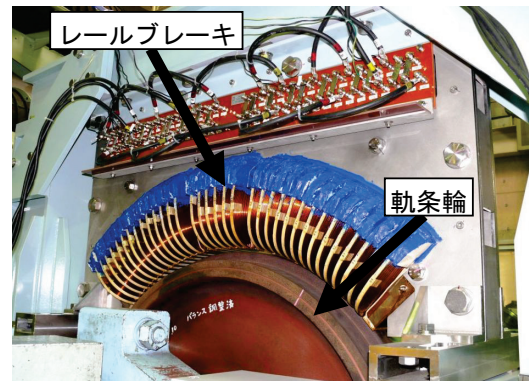


図5 軌条輪試験装置用レールブレーキ

ためのものである。この試験装置の地上側にレールブレーキを固定し、車輪を設置する部分に、レールを模擬した回転する軌条輪を取り付けたものとした（図4）。試験に用いたレールブレーキの外観を図5に示す。

軌条輪の直径は1,110mm、レールブレーキと対向する面の幅は60kgレールと同じ65mmであり、周速度で300km/hまでの走行模擬ができるものとした。レールブレーキは実際に台車に搭載される寸法を概ね模擬したものであるが、レール方向のみ軌条輪の大きさの関係から短くなっており、ギャップ面での全長983mm、鉄心幅は95mm、軌条輪とのギャップは6.5mmである。

この試験装置を用いて、制動力測定、零出力発電制動、レール発熱低減の各試験を実施した。試験回路構成は、基本的には先述の零出力発電制動に対応した回路を用いたが、変換器容量の都合から、制動力試験に限り汎用インバータを用いて試験を実施した。

3.2 制動力測定

ブレーキとしての基本性能である制動力について測定を行った。試験結果を図6に示す。制動力は、実測値を実装時の長さに換算し、台車片側（電機子1本）あたりで表したものである。実車での目標値は、10kN/台車（5kN/台車片側）であり、速度50km/h以上で目標を達成していることがわかる。図中には、粘着制動力の限界値も併記した。粘着制動での制動力が速度と共に減少してしまい、高速での制動力が期待できないのに対し、レールブレーキでは高速でも制動力が大きく減少しないという特長もわかる。動的な試験において、制動力が目標を達成できることと、非粘着ブレーキが高速において粘着ブレーキに比して有利なことがこの試験により検証された。

3.3 零出力発電制動

図7に軌条輪を回転させて160km/hの走行速度を模擬した状態において、零出力発電制動を行ったときの立ち上りの様子を示す。図は、制動力指令を電流指令100Aとした場合でのレールブレーキの起動の様子である。

図を見ると、ほぼ指令に追従して電流が立ち上がり、制動力も働いている。またその定常動作までの時間は約1.4秒である。直流電圧についても問題なく立ち上がっており、零出力発電制動が安定して動作している様子がわかる。

さらに、補助回路の出力を測定したところ、立ち上げの最初の瞬間の電力は、50～250Wで0.2～0.4秒程度であり、この程度の電力は補助回路もしくは、小型の蓄電池で十分賄うことができる範囲である。

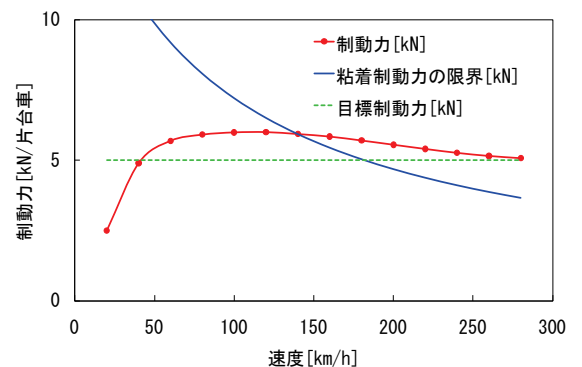


図6 制動力測定試験

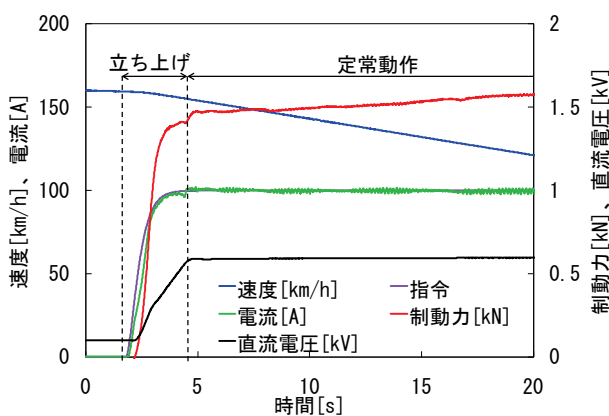


図7 零出力発電制動

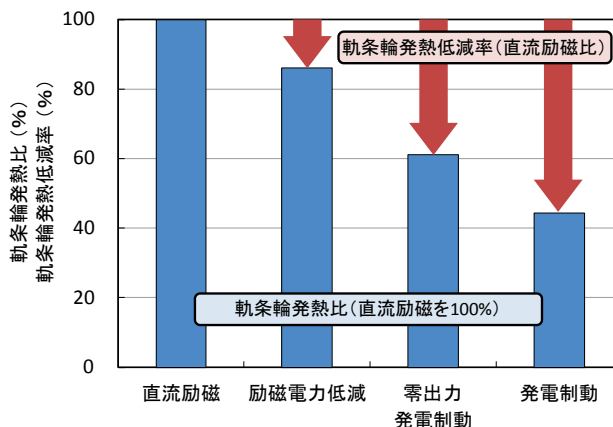


図8 レール発熱低減

3.4 レール発熱低減

レールブレーキを動作させた場合のレール発熱の影響について、軌条輪の温度上昇から検討を行った。フライホイールには40,000kg車両を想定した場合に1つの電機子が負担する慣性質量を設定し、速度65km/hから30km/hまで減速させたときの軌条輪の温度上昇を比較した。図8は減速時の平均制動力を同じとし、励磁周波数のみを変化させて、動作モードを変えていったときの最大温度上昇を示したものである。実走行時のレールが長手方向に無限であるのに対し、軌条輪では回転体であるため、比較は絶対値ではなく、最大発熱となる直流励磁（今回は1Hz交流励磁で模擬している）を100%とした相対値で表している。また、直流励磁からの軌条輪発熱低減率も合わせて示している。

図をみると、発電制動により実際に軌条輪の温度上昇が低減されている様子が確認できる。零出力発電制動では、電機子側で消費されるエネルギーを電機子銅損と平衡させるように低い周波数が選択されるが、積極的に発電動作を行う場合、この電機子の性能としては軌条輪の温度上昇を50%以下まで低減可能であることが分かった。LIM型レールブレーキがレール発熱の低減についても有効なことが実証された。

4. まとめ

DC型レールブレーキで課題となった、動作に大電力が必要となることやレール温度上昇の問題を解決しうるLIM型レールブレーキについて、軌条輪試験装置を用いた定置試験で制動力、零出力発電制動、レール発熱低減を確認した。今後は試験電車に組み込むレールブレーキを製作し、鉄道総研構内で走行試験を実施する予定である。

参考文献

- 1) 松村省吾・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)
- 2) Y. Sakamoto, T. Kashiwagi, T. Sasakawa and N. Fujii: “Linear eddy current brake for railway vehicles using dynamic braking”, in 2008 International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, Portugal (2008-9)
- 3) 坂本泰明・柏木隆行・田中実・長谷川均・笹川卓・藤井信男：「リニア誘導モータを用いた発電制動型レールブレーキシステム」, 電気学会論文誌D, 129, 3, pp. 342-349 (2009-3)