

軌条輪を用いたリニアモータ型 レールブレーキの性能試験

長谷川 均* 柏木 隆行* 坂本 泰明*
笹川 卓* 狩野 泰**

Roller Rig Dynamic Bench Test of Rail Brake using Linear Induction Motor

Hitoshi HASEGAWA Takayuki KASHIWAGI Yasuaki SAKAMOTO
Takashi SASAKAWA Yasushi KARINO

We have been studying the rail brake using LIM (Linear Induction Motor). This brake system is capable of generating brake force without contact. In addition, the temperature rise of the rail can be decreased, and no on-board supply is required by using a linear motor. On the other hand, it is necessary to install this brake between front and rear wheels in the bogie. Then we have manufactured a prototype rail brake system and examined its electromagnetic characteristics in a roller rig dynamic bench test equipment. By this examination, it has been found that this linear rail brake system can be expected to be applicable in the practical use.

キーワード：レールブレーキ，渦電流ブレーキ，リニア誘導モータ，発電制動，レール発熱

1. はじめに

渦電流方式のレールブレーキ¹⁾は、レールと車両間に直接制動力を発生することができるため、車輪・レール間の粘着に頼ることなくブレーキを働かせることができる。これにより、天候やレールの表面状態に左右されることなく、想定した制動力を得ることが可能である。さらに、通常の車輪踏面ブレーキなどでは車輪-レール間の粘着力が高速域で大きく減少する傾向に対し、レールブレーキでは電磁力を利用し粘着に頼らないため、高速域でも大きな制動力が得られる特徴がある。

一方で、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）は、電源喪失時の励磁電源の確保、制動時にレールの温度上昇が大きいなどの課題もあった。

筆者らは、これらの課題を勘案し、レールブレーキの励磁に、交流を使用することを検討している。これは、車上に搭載したレールブレーキを一次電機子とし、レールを二次側とした、リニア誘導モータに他ならない（LIM型レールブレーキ）。リニア誘導モータを採用することで、その励磁電流を制御し、レール温度上昇を抑制することができる。また、制動開始時に誘導発電し、その電源をもってさらに制動力を発生する電源不要のシステム

（零出力発電制動）も構築することができる。

図1にDC型レールブレーキとLIM型レールブレーキにおけるエネルギーの収支についての概念を示す。DC型レールブレーキでは、主回路もしくは主電動機の回生発電電力を励磁電源とし、これにより電機子を励磁、電機子からの磁界によりレールに渦電流を発生し、車両の運動エネルギーを消費する。このため、主回路の停電時や主電動機用電力変換装置の故障時には、励磁電源を喪失し、ブレーキが動作しない。さらに、車両の運動エネルギーは、大部分がレール発熱となり、レール温度上昇となる。一方で、LIM型レールブレーキは、自身で発電した電力により電機子を励磁するため励磁電源が不要であり、車両の運動エネルギーは、この励磁電力と電気出力においても消費される。このようにエネルギーの消費を車両側でも受け持つため、この分については、DC型に比べてレール発熱が低減できることとなる。

このようなレールブレーキを在来方式の鉄道車両へ適用するためには、既存の台車内に艤装することが必要で、地上側は従来のレールを変更することなく使用しなければならない。これは、艤装容積や電気的な特性に制約を受けることとなる。筆者らは、このような特徴を把握すべく、回転モータを利用した試験や、静止時での特性試験を行ってきた^{2) 3)}。

本報告では、これらの知見をもとに実機大の電機子を試作し、軌条輪を使用した回転試験装置にて、その特性試験を行い、その結果について述べた。この軌条輪試験

* 浮上式鉄道技術研究部（電磁力応用）

** 車両制御技術研究部（ブレーキ制御）

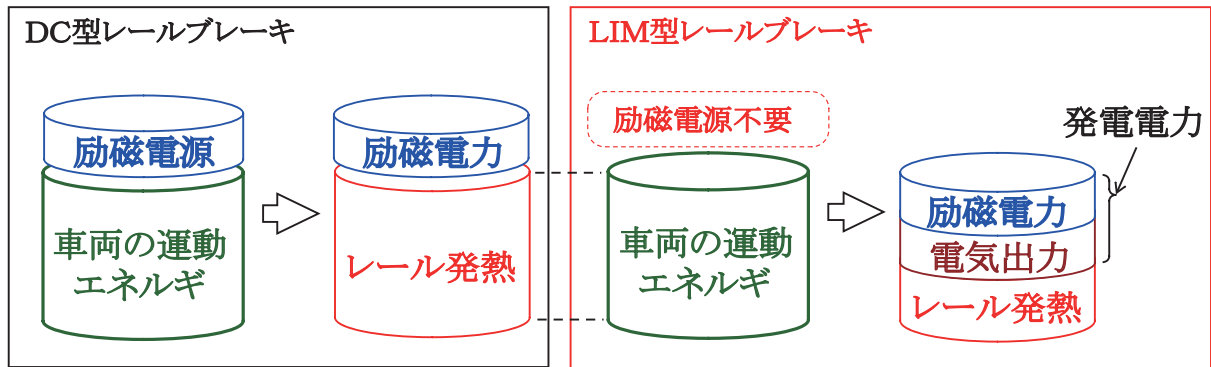


図1 レールブレーキにおけるエネルギーの収支

により、十分な制動力が得られるレールブレーキが設計可能なこと、零出力発電制動により主回路電源喪失時においてもブレーキが動作可能なこと、レール温度上昇の抑制に対して効果があることが検証できた。

2. LIM型レールブレーキ

2.1 レールブレーキの構成

LIM型レールブレーキでは、図2に示すように、電機子を台車下部に搭載し、地上設備であるレールについては、在来のものを一切変更することのない構成とする。台車に搭載された電機子は、一次鉄心とコイルからなり、コイルを励磁する電力変換装置として、車上にインバータ装置を設置する。一次コイルの巻線は、環状巻きとして、電気装荷を大きく取るような設計とした⁵⁾。これは、既存のレールを二次導体として使用するため、二次導体の設計の自由度はなく、限られた大きさで最大限の制動力を得るためである。

実用時に想定されるLIM型レールブレーキの電機子の要求仕様を表1に示す。この要求仕様は、短時間使用S2⁶⁾を前提としたもので、定格時間は編成重量360,000kg、9両編成の6両の台車にレールブレーキが搭載されたことを想定し、160km/hから減速するまでの時間より定めた。

表1 実用LIM型レールブレーキ要求仕様

使用速度	160 km/h (最大)
制動力	10 kN / 台車 以上
レール発熱低減率	15% 以上
鉄心 長さ	約 1200 mm
幅	65 ~ 130 mm
ギャップ	6 mm 以上
定格時間	120 秒

2.2 励磁回路の構成と零出力発電制動

LIM型レールブレーキシステムは、主として、レールブレーキ本体である電機子と電力変換器により構成される。図3に励磁回路の詳細を示す。電機子は1両につき2台車、各台車につき左右に1電機子ずつ、計4個取り付ける。電機子1及び2、3及び4がそれぞれ前後各台車に対応する。これらの電機子は3相結線され、車上の電力変換器へと接続される。電力変換器には、平滑コンデンサが並列に接続され、制御電源及び直流回路には、車両の補助回路によりDC100Vが供給される。図の補助回路は列車編成全体で無停電の構成を想定した回路で描かれているが、各車両のレールブレーキについて個別に小型の無停電電源装置(UPS)を搭載することも考えられる。いずれにせよ、車両駆動用の主回路とは切り離れた構成になり、独立したブレーキ装置が実現可能となる。

この励磁回路を用いることで、下記の原理で零出力発電制動が行われる。

- 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

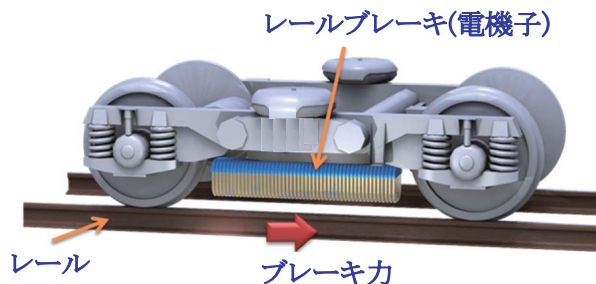


図2 LIM型レールブレーキの構成

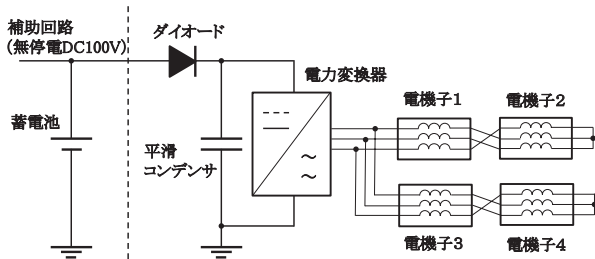


図3 励磁回路の構成

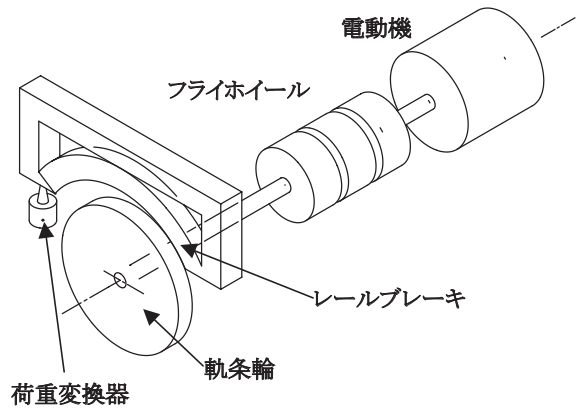


図4 軌条輪試験装置の概要

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、2秒以下であり、列車のブレーキ装置の応答性としては問題ないものと考えられる。

なお、提案しているLIM型レールブレーキは、その励磁する周波数により、零出力発電制動、発電制動、励磁電力低減、直流励磁の各モードで動作することができる。ただし、この各モードの中で、まったく主回路電源に頼らずに定常制動力を得るモードは、零出力発電制動である。主回路電源が確立している場合は、他の零出力発電制動以外の3つのモードでも定常制動力を得ることができる。

3. 軌条輪試験

3.1 軌条輪試験装置

レールブレーキ装置の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)

地上側のレールブレーキは荷重変換器を介して回転方向に自由度を持ち、軌条輪とレールブレーキ間の反力を直接測定することができる。軌条輪は、フライホイールを通して、電動機と軸で直結されている。試験時には、電動機によりフライホイールと軌条輪を回転させ、回転状態でレールブレーキを励磁し、走行時と同じ特性を測定できるようになっている。

軌条輪の直径は、1,110mm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。

3.2 軌条輪試験用電機子

軌条輪試験装置に取り付けるレールブレーキ装置の電

機子は、軌条輪に合わせ、回転方向(制動力が得られる方向)に湾曲した扇形をしている。図5にレールブレーキを軌条輪試験装置に取り付けた様子、図6に電機子を示す。また、表2に電機子の諸元を示す。

実台車への艤装空間の制約等を勘案し、電機子の基本構成は、銅平角線材を用いた環状巻きを採用した。軌条輪の直径に対してギャップ面における周方向の鉄心長は軌条輪全周の1/4程度としてある。

一次鉄心は、その剛性を高めるため、かつコイルエンドの発生する磁束による鉄心の磁気飽和を緩和するため、鉄心の背面と側面に無垢の鉄板(SS400、厚さ7mm)で囲った。電機子は定置試験であることを考慮し、制動力を最大限得るために軽量化等は考慮していない。

最大電流を通電した状態では、コイル導体同士に直接ローレンツ力が働くため、コイル上部(図5の青い部分)を樹脂で固定している。

コイルは環状巻線であるため、コイル端子の接続を変更することで極数を変更することができる。本報告では、最大制動力が得られる4極で行った試験結果について述べる。

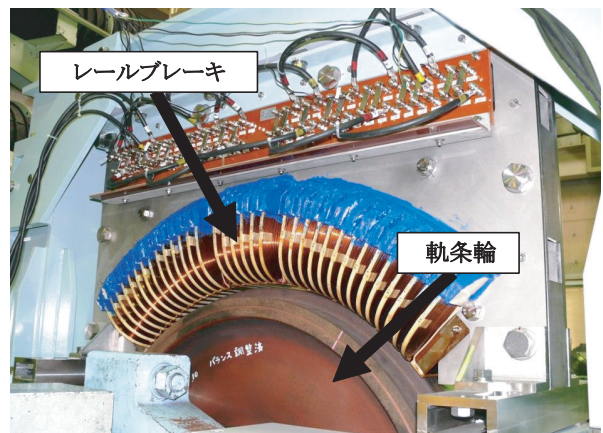


図5 軌条輪試験装置

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

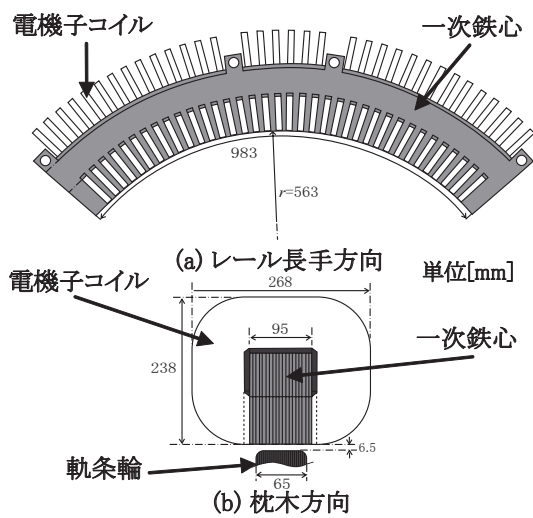


図6 LIM型レールブレーキ電機子

表2 供試電機子の仕様

電機子	長さ	983 mm
	幅	95 mm
	高さ	150 mm
スロット	数	36
	幅	14 mm
	深さ	79.5 mm
コイル	断面	2.6 × 12 mm
	巻数	28 ターン
	極	4
絶縁種別	数	4
	間隔	229.5 mm
絶縁種別		H種
重量		278 kg
空隙		6.5 mm

制動力が発生すると、軌条輪とレールブレーキ間に大きな垂直力も発生する。この垂直力に関しては、軌条輪の軸に対して回転方向のみに自由度があり、ギャップは変化しないような構造となっている。

またレールブレーキには、荷重変換器のほか、温度センサ、電流計、電圧計などが設置されている。

3.3 電力変換装置及び制御装置

装置の都合上、零出力発電制動モードでの電力変換器は、定格容量90kVA、定格直流電圧600Vのものを使用した。前述のように、定格出力300W、定格電圧100Vの補助回路からの入力に対して、ダイオードにより逆流防止を施し、電力変換器の直流回路とその制御電源とした。図7に零出力発電制動時の制御ブロックを示す。外

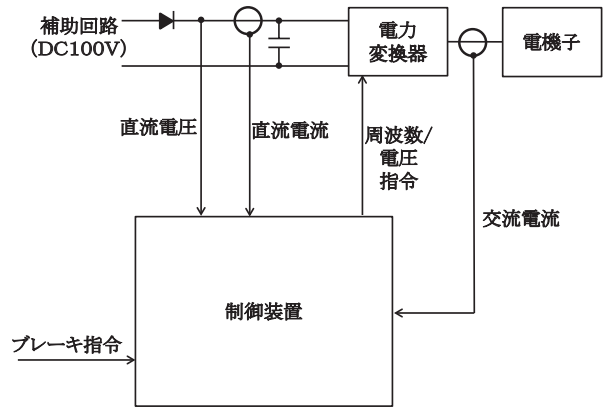


図7 零出力発電制動制御装置の制御ブロック図

部に設けた制御装置はアナログ信号により周波数指令と出力電圧指令を出力し、電力変換器は指令に応じたPWMパルス電圧を発生する。なお、ここで使用した電力変換器の出力電流100Aである。

零出力発電制動モード以外での制動試験では、制御装置が必要でなく、かつ、最大制動力を得るため、350A以上が出力可能な汎用のインバータを使用した。

4. 試験結果

4.1 制動力測定試験

軌条輪試験装置により各速度における制動力を測定した試験結果を図8に示す。実車での目標値は、10kN/台車(5kN/片台車)であり、速度50km/h以上で目標を達成していることが分かる。図中には、粘着制動力の限界値も併載した。湿潤時の粘着制動での制動力が速度と共に減少する、すなわち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徴もわかる。

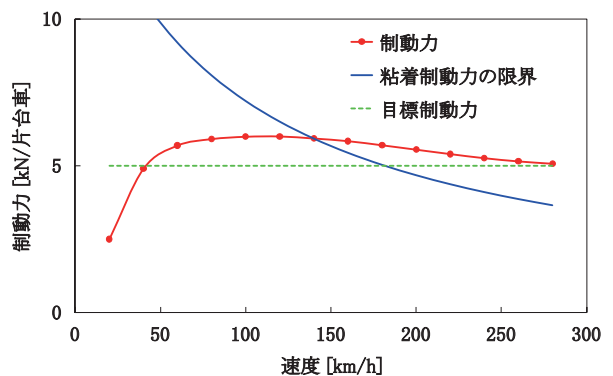


図8 制動力測定試験結果

4.2 零出力発電制動試験

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図9に示す。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秒となっており、要求仕様を満たしていることがわかる。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、種々の条件で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。

実際に軌条輪に直結されたフライホイールの慣性モーメントを鉄道車両の慣性質量に相当する値に設定し、零出力発電制動により、軌条輪速度が十分に減速するまでの試験を行った結果を図10に示す。慣性モーメントは質量40,000kgの車両において1つの電機子が負担する慣性質量を模擬する969kg・m²とし、速度300km/hのフライホイールがフリーランの状態から時刻1秒後において電流指令100Aの制動指令を入力した。試験結果より、起動後は出力電流100A、制動力1.5kN程度、直流電圧約600Vを維持し、ほぼ一定の減速度で制動動作が行われていることが分かる。本レールブレーキの制動力は速度100km/h付近に緩やかなピークがあり、減速と共に制動力は若干大きくなる。軌条輪が減速し、50km/h以下になると、十分な発電電力が得られなくなるため、直流電圧の低下とともに制御を終了する。実際の車両においては、この後車輪踏面ブレーキなどの機械ブレーキにより停止することになる。

この制動試験では、速度160km/hにおける電機子のイ

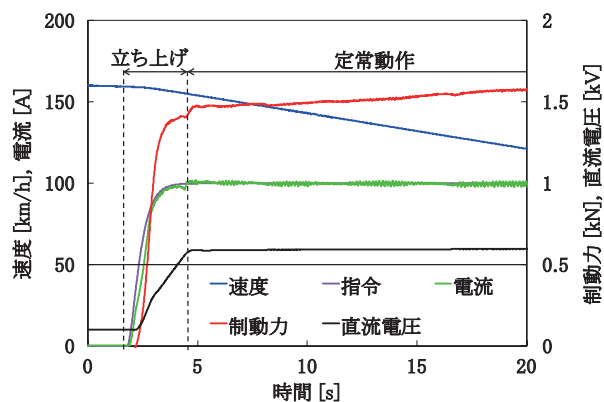


図9 零出力発電制動試験結果

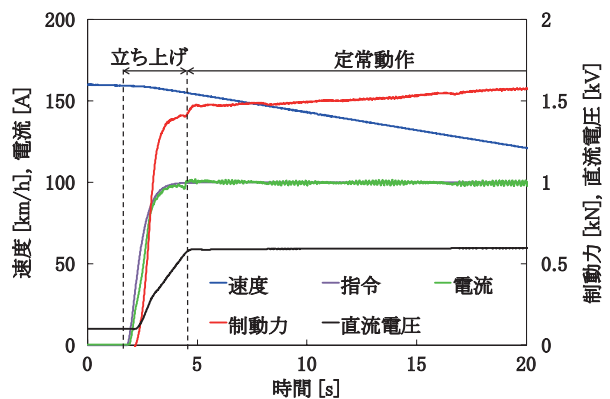


図10 制動試験結果

ンピーダンスに対応する制御定数を用いて制御を行い、速度センサ等の外部からの情報は使用していない。すなわち、少なくとも50～300km/hの速度域においては、この定数により零出力発電制動の速度センサレスの制御系が構築できていることも実証された。

4.3 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。フライホイールは前述と同様に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とし、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11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同じ箇所を繰り返し加熱することになり、温度上昇が大きくなるため試験速度を制限し行った。また、同様の理由で温度上昇の絶対値は意味の無い数字である。そこで、レール温度上昇が最も大きくなると予測される、直流励磁による渦電流ブレーキの場合を基準とした相対値で表わすことにした。ちなみに、試験に供した電力変換器の都合上、直流励磁モードは、周波数1Hzの電流をもって模擬をした。

図より、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ことが確認できる。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。

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

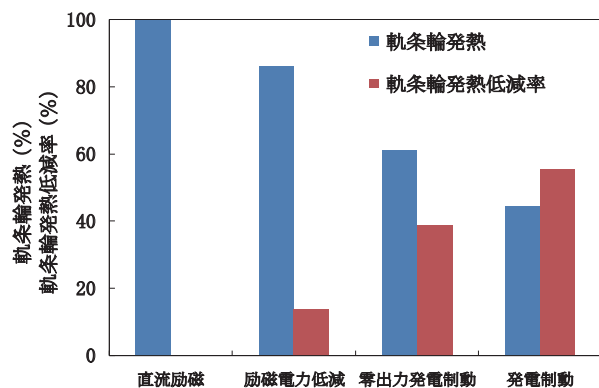


図 11 レール発熱低減率

5. まとめ

筆者らは、“主回路電源喪失時の電源確保”，“制動動作時にレール温度上昇が大きい”といった，直流励磁方式の渦電流レールブレーキの課題の解決を目指して，交流励磁方式のLIM型レールブレーキを提案した。この方式は，車上に搭載したレールブレーキを一次電機子とし，レールを二次側とした，リニア誘導モータを発電動作させるシステムと見ることができる。リニア誘導モータをレールブレーキに採用することで，その励磁電流を制御し，レール温度上昇を抑制することができる。また，制動開始時に誘導発電し，その電源を持ってさらに制動力を発生する電源不要のシステム（零出力発電制動）も構築することができる。直流励磁方式の課題の一部を緩和することができる。

提案のレールブレーキ装置の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試験を行った。軌条輪試験装置では，レールに相当する軌条輪を回転させ，レールブレーキ装置を地上に固定し，レールブレーキと軌条輪間に実際に相対速度がある状態を模擬した。

試験に供した電機子としては，限られた容積で最大の制動力を出すために環状巻構成を採用し，実機と同規模のものを試作した。この電機子により，最高速度300km/hまでの試験を行い，下記の結果を得ることができた。

- ① 速度160km/hにおいて，要求仕様である10kN/台車の制動力を発生できることが実証された。
- ② 補助電源のみにより，2秒以内で制動力が所定の状態まで立ち上がる制御方法を確立した。
- ③ この制御方法により，速度センサなどの外部からの情報や主回路からの電源を必要とせずに，レールブレーキシステム単独で速度300km/h～50km/hまで所定の制動力を維持することが実証された。
- ④ 軌条輪の温度上昇測定結果より，直流励磁方式のレールブレーキに比較して15～50%程度のレール温度上昇低減効果が得られることが分かった。

一方で，電力変換器容量が大きくなるなどの課題も残されている。

今後，本試験により得られた知見により，機装等を含め，実台車に実装可能なLIM型レールブレーキの検討及び開発を進めていく予定である。

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
- 4) 坂本泰明・柏木隆行・長谷川均・笹川卓・藤井信男：「リニアレールブレーキ用電機子の設計検討」，電気学会リニアドライブ研究会資料，LD-08-83, 2008
- 5) 坂本泰明・柏木隆行・長谷川均・笹川卓・狩野泰：「リニアモータ型レールブレーキの等価回路による特性評価」，鉄道総研報告，Vol. 24, No. 1, Jan. 2010
- 6) 電気学会 電気規格調査会標準規格，JEC-2137（誘導機）