

# リニア技術を適用した交流励磁レールブレーキの基礎特性

柏木 隆行\* 坂本 泰明\* 笹川 卓\*

田中 実\*\* 狩野 泰\*\*\*

## Basic Characteristics of Rail Brake Systems Using Linear Motor Technology

Takayuki KASHIWAGI Yasuaki SAKAMOTO Takashi SASAKAWA

Minoru TANAKA Yasushi KARINO

The eddy current rail brake system is effective for the stabilization of the braking ability of the train, because braking force of the system does not depend on adhesion of the wheel and the rail. But when the existing rail brake system using DC electromagnet is used, it causes the rail temperature rise and there is a possibility of bending of the rail. So it isn't in practical use in Japan. We have applied AC electromagnet (the same as linear induction motor) to the rail brake system, which can reduce the rail temperature rise. We investigated the basic characteristics of this new rail brake system by using the rotary type test machine.

キーワード：レールブレーキ，リニアインダクションモータ，レール発熱

### 1. はじめに

列車の高速化に伴い、車両を停止させるブレーキ装置の役割は益々大きなものとなっている。鉄道車両のブレーキ装置には様々な形態・方式があるが、その大半が最終的に車輪とレールの間の摩擦により生じる粘着にブレーキ力を依存している。ところで、車輪とレールの摩擦係数は変動しやすく、また走行速度や雨などの気象条件それに車輪やレールの表面状態（表面粗さや錆など）にも大きく影響される。そのため安定したブレーキ力を得るために、摩擦係数の推定<sup>1)</sup>や増粘剤の散布<sup>2)</sup>など種々の方法が考案され、また実用化されている。

一方、車輪・レール間の摩擦によらないブレーキ装置として渦電流型レールブレーキ<sup>3)</sup>などがある。従来主として検討されてきた直流励磁方式の渦電流型レールブレーキではレール発熱が大きくなるという問題等があり、現時点で日本国内では実用化に至っていない。しかし、渦電流型レールブレーキにリニア技術を適用した交流励磁方式を用いることで、レール発熱を低減できると考えている。本研究では、この交流励磁方式の渦電流型レールブレーキの基礎特性について、回転型基礎試験装置を用いて検証を行った。また、制御電源程度の小電力で動作可能となる制御方式についての起動試験も実施した。さらに、台車へ搭載する構成の基礎検討として、巻

線方式についての比較・検討を行った。これらについて以下に報告する。

### 2. 渦電流型レールブレーキ

レールブレーキには、(1) 磁界でレールに渦電流を誘起し、非接触でブレーキ力を発生する渦電流型レールブレーキ、(2) 磁界でレールにブレーキ装置を吸着し、摩擦材によりブレーキ力を発生する吸着型レールブレーキ、そして両者を併せた(3) 吸着渦電流型レールブレーキ<sup>4)</sup>がある。(2)、(3)の方式では、ブレーキ装置がレールに吸着するため摩擦・摩耗の問題があり、本研究では摩擦によらない渦電流型レールブレーキを取り上げる。この渦電流型レールブレーキ（以下レールブレーキ）について、従来検討されてきた直流励磁方式と今回取り上げるリニア技術を適用した交流励磁方式の違いを中心に以下に述べる。

なお、非接触でブレーキ力を得られる渦電流型レールブレーキ共通の課題として、レールとレールブレーキ間にある程度の空隙（メカニカルギャップ）を介して磁界を発生させる必要から、励磁に必要な総電流値と巻線径が比較的大きくなり、電磁石にエネルギーを供給する励磁電源の容量も増大することが挙げられる。

#### 2.1 直流励磁方式レールブレーキ

図1に直流励磁方式レールブレーキの概念図を示す。これは従来から主として開発されてきたレールブレーキ

\* 浮上式鉄道技術研究部（電磁力応用）

\*\* 総務部（JR 東日本出向中）

\*\*\* 車両制御技術研究部（ブレーキ制御）

特集：浮上式鉄道技術とその応用

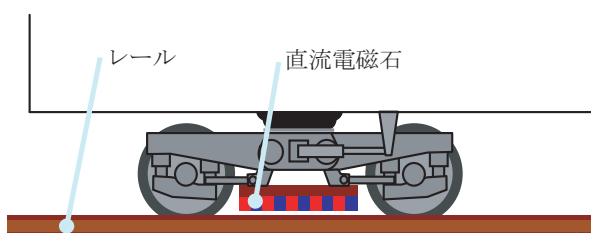


図1 直流励磁方式レールブレーキ

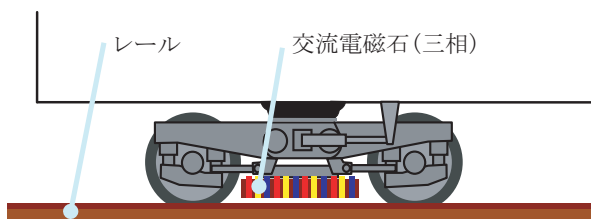


図2 交流励磁方式レールブレーキ

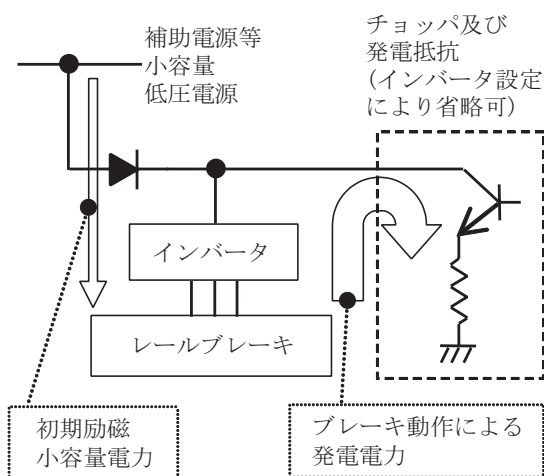


図3 レールブレーキ回路構成例

であり、レールに対向する形でS極とN極を交互に配置した電磁石を並べ、ブレーキ動作時に電磁石に直流を印加する。電磁石によって作られた磁界が車両の走行と共にレール上を移動することでレールに渦電流が誘起され、車両の運動エネルギーをレールの発熱に変換してブレーキ力を得る。古くは山陽新幹線開業前の国鉄でも検討され、東海道新幹線で走行試験も実施された。国内ではレール温度上昇の問題等から実用例は無いが、ドイツの高速電車ICE3では条件付きながら実用化されている。後述する交流励磁方式に比べ、電源装置や構成が単純である。

2.2 交流励磁方式レールブレーキ

一方、図2に交流励磁方式レールブレーキの概念図を示す。レールに対向する形で交流励磁する電磁石を並べ、ブレーキ動作時に電磁石に三相交流を印加する。交流励磁の電磁石とレールによりリニアインダクションモータ（以下リニアモータ）が構成されるため、レール

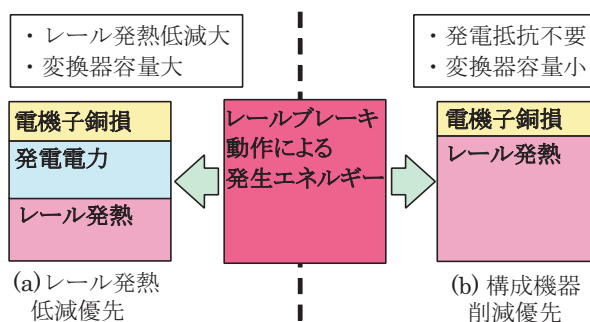


図4 制御方法によるエネルギーフロー変化

ブレーキをリニアインダクション発電機としても機能させることができる。そのため、発電ブレーキとして走行エネルギーをレールブレーキ側（車上側）で回収することが可能となり、同じブレーキ力を得るのに直流励磁方式よりもレール発熱を抑える事が原理的には可能となる。また、回収したエネルギーをレールブレーキの励磁エネルギーとして利用できるため、初期励磁に必要な僅かな電源を用意すれば、レールブレーキ動作に必要なエネルギーを外部から供給する必要が無いという利点も見込める。他方、インバータが必要となる。具体的な構成例を図3に示す。

本方式では、補助電源等の小容量・低圧電源から供給される僅かなエネルギーにてレールブレーキを初期励磁することで、ブレーキ動作により減少する運動エネルギーの一部が発電電力としてレールブレーキから取り出される。動作のインバータの設定により、

- (a) 発電電力を大きく取り、レール発熱をより抑えること
- (b) 発電電力を抑えることで、発電電力を処理するための発電抵抗やチョップを不要として搭載機器の削減を図ること

などの目的に応じた構成を選択することができる（図4）。特に後者（b）の構成においては、駆動用主回路電源やキ電系に依存しないレールブレーキ用電源システムを実現できる可能性がある。

一方、交流励磁方式レールブレーキで構成されるリニアモータは、通常のリニアモータと比較し、

- (1) 二次導体（レール）が抵抗率の高い鉄塊のみで構成されている
- (2) レールブレーキ用電磁石の構成にもよるが、一次側（車両側）の電磁石の極ピッチに比較して、二次側（レール）の幅が非常に狭い特異な形をしている

といった特徴がある。(1)により、二次導体における誘導電流表皮厚さが薄くなり、電流や磁束がレール表面に集中すること(表皮効果)による影響や、二次導体の抵抗率が高いことによる低すべり域での効率の低下がある。また(2)によりレール表面誘導電流の枕木方向成分の制限による推力(ブレーキ力)低下の影響が考えられる。そして全般的には低力率による電源設備容量の増大が懸念される。そこで、これらの基本特性の確認を目的として以下の試験を実施した。

### 3. 基礎試験装置による基本特性検証

2章で述べたように、交流励磁方式レールブレーキは基本的にリニアインダクションモータとしての構成を有する。インダクションモータは一次側の移動磁界と二次側導体の相対運動により推力を発生する。そこで、定置でレールブレーキの基本特性測定試験を行うため、インダクションモータのかご型回転子が無垢鉄の回転子と交換した回転型レールブレーキ試験機(以下回転型試験機)を製作した。回転子としては、2.2節で述べた(1)の影響を評価するために、幅寸法を元のモータと同様のままとした幅広二次導体型と、(2)の影響を評価するために、幅寸法をレールを模擬したものとしたレール模擬二次導体型の2種類を用意した。なお、通常モータと比較し、リニアモータには端効果が存在し特性に大きな影響を与えるが、端効果については別途製作する試験装置にて確認することとし、今回はレールブレーキに特有な構成の影響把握に焦点を当てた。また、通常モータではメカニカルギャップは1~2mm程度であるが、レールブレーキの実装を想定すると、レールとレールブレーキ装置間のメカニカルギャップはあまり小さくは出来ないため、回転型試験機では5mmを採用した。

#### 3.1 試験装置構成

図5に試験装置全体構成及び外観を示す。交流励磁方式レールブレーキを模擬した回転型試験機の電機子(レールブレーキ装置本体に当たる)にはVVVFインバータから任意の電圧・周波数の三相交流が印加される。また、回転用モータで回転型試験機の回転子(レールに相当)を回転させ、任意の速度の走行状態を模擬する。回転型試験機への電流・電圧を測定し、電力を求める。また、回転型試験機の軸にはトルクメータ、回転数計が接続されており、入力トルク・回転数を測定し、機械入力を求める。これら電力と機械入力の計測結果から、ブレーキ力・レール発熱低減率を計算した。レール発熱低減率の計算式を以下に示す。回転型試験機の電力には電機子損失等による一次側損失に対する補正を行う。

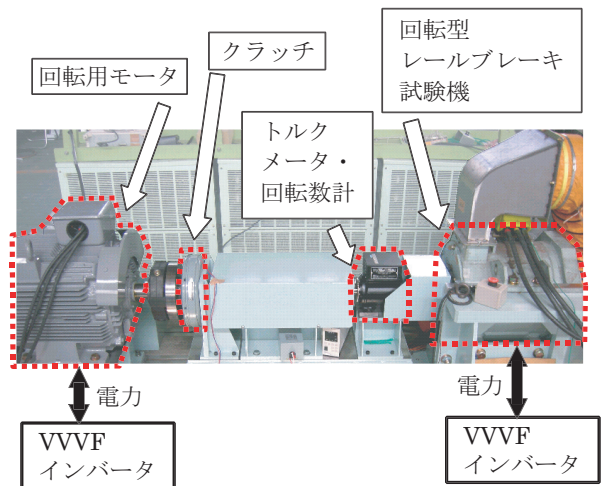


図5 レールブレーキ試験装置構成及び外観

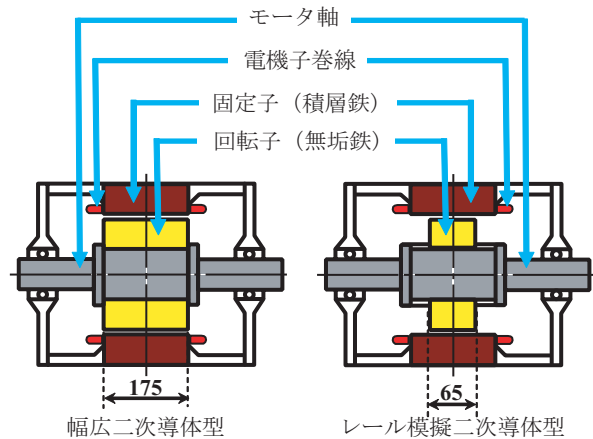


図6 回転型レールブレーキ試験機内部構成

表1 回転型レールブレーキ試験機諸元

出力	255 [kW] (改造前)
極数	4
固定子(一次鉄心)幅	175mm
回転子幅	175mm [幅広二次導体型] 65mm [レール模擬二次導体型]
メカニカルギャップ	5mm
固定子内径	270mm
回転子径	260mm

$$\text{レール発熱低減率} = \text{電力} / \text{機械入力}$$

回転型試験機の諸元を表1に示す。極ピッチは212mmであり、台車に装備される際の実機極ピッチに近い値である。回転子幅は改造前のモータと同幅の175mmのもの(幅広二次導体型)と、レール頭頂部幅を模擬した65mmのもの(レール模擬二次導体型)の2種類を用意した。回転型試験機の内部構成を図6に示す。

特集：浮上式鉄道技術とその応用

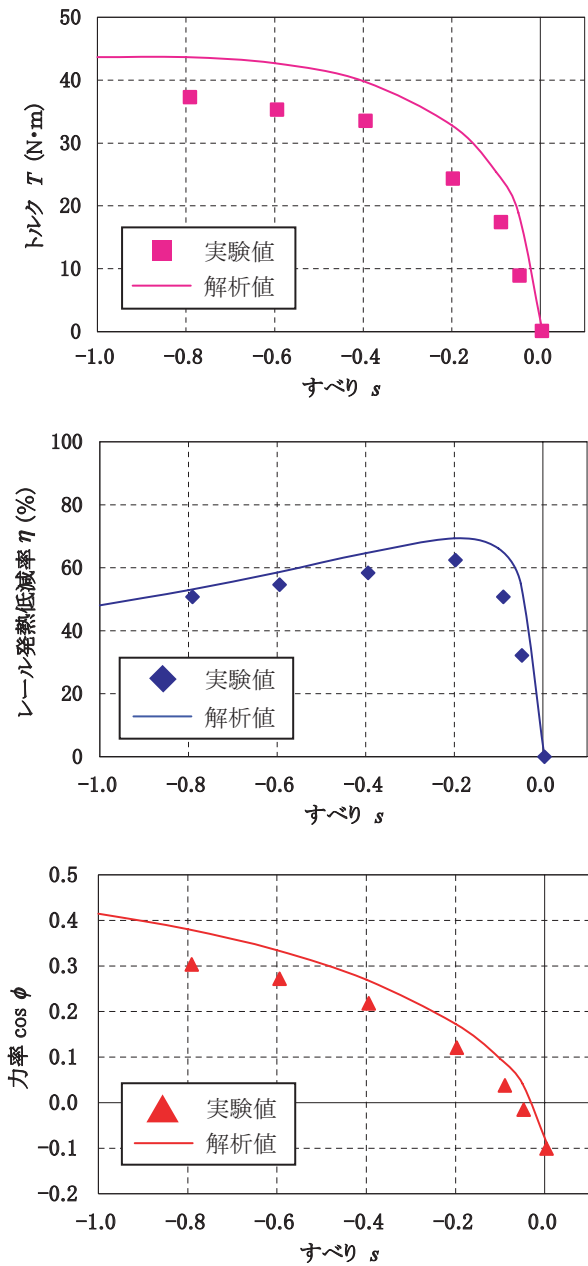


図7 すべり特性  
(幅広二次導体型・33.4Hz・48A)

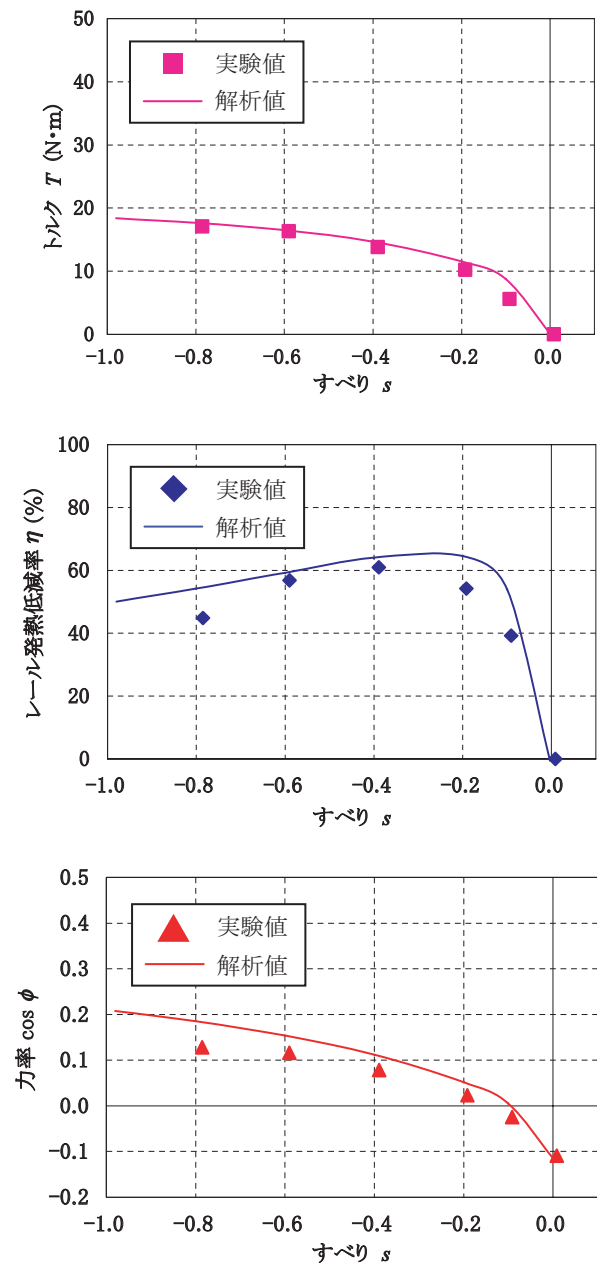


図8 すべり特性  
(レール模擬二次導体型・33.4Hz・48A)

3.2 ブレーキ動作試験結果

誘導機における回生動作時のすべり特性測定と同様の方法で、回転型試験機をブレーキ動作させた時のすべり特性を測定した。印加周波数 33.4Hz(同期速度：時速 50km 相当)時のブレーキ動作時のすべり特性について、幅広二次導体型の結果を図7に、レール模擬二次導体型の結果を図8に示す。

トルク値は、二次導体幅の違いによる差異が見られるが、単位長さに換算した場合の変化としては顕著な差は見られない。レール発熱低減率にも目立った違いは無い。力率に関してのみ二次導体幅が狭くなった影響が見られる(なお本装置は一次側の電機子をレール幅の縮小

に合わせて狭くしていないため特に幅狭の場合に低力率となっている)。

以上からレール(二次導体)の幅が極ピッチに比べ狭いことによる悪影響は、力率に対するものを除き大きくないと考えられる。また各試験結果に対し、フーリエ級数を用いた理論解析<sup>5)</sup>による解析結果も合わせ示すが、概ね一致しており、この理論解析により交流励磁レールブレーキを設計可能であることが予想される。

更に図7,8とも、トルク-すべり特性はすべりの増大と共にトルクが単調に増加し最終的には飽和している。一方レール発熱低減率は、すべりが増加すると次第に低下する。従って本レールブレーキ装置は、必要なブレー

キ力を得るため所定のレール発熱低減率を下回らない範囲ですべりを大きくとるのがよいと考える。すべりを大きくすることは、変換器の皮相容量を低減する上でも効果的である。

またこれらの特性は、電力変換器の制御系を設計する上でも重要なものである。

### 3.3 起動模擬試験結果

2章の2案 (a), (b) のうち、構成機器削減優先案 (b) の低容量の直流電源を用いて制動動作を開始した後、発電電力を用いて直流電圧を自己確立させる方法を実証した結果を図9に示す。

低い直流電圧（インバータの電源電圧である）から初期励磁を実施し、ブレーキ動作に伴って発電電力により直流電圧が上昇、その後電機子銅損と発電電力が均衡し、直流電圧が安定したままブレーキ動作を行った。

交流励磁方式の渦電流型レールブレーキの電源システムは「レール発熱低減効果を大きく設定する場合、低力率に起因して皮相容量が大きくなる」ことや、「発電電力の処理方法の選択によって（き電停止・主回路異常などの）異常時への対応性が変わる」ことに留意する必要がある。2章の2案 (a), (b) はこれらの留意点を踏まえて検討した案であり、既存の車両ブレーキシステムに対して付加できる価値が異なる。即ち端的に言えば構成機器削減優先案 (b) はブレーキシステムの信頼性向上を提供するものであり、レール発熱低減優先案 (a) は交流励磁方式の渦電流型レールブレーキに特有な機能を最大限

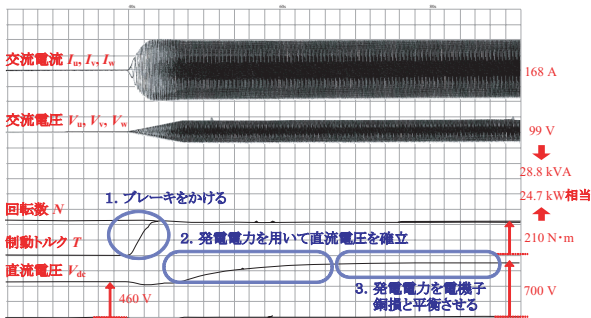


図9 起動模擬試験

活かすことを重視した構成である。交流励磁方式の渦電流型レールブレーキは電源システム次第で異なる付加価値を有することになる。

今回の試験では、ブレーキシステム信頼性向上に資する事が可能となる構成機器削減優先案 (b) の基本動作を確認し、今後の開発ではこのようなシステムの制御構成を更に検討する予定である。

### 3.4 端効果の影響について

一般にリアインダクションモータでは回転機には存在しない端効果が存在し、それらが電気機器としての

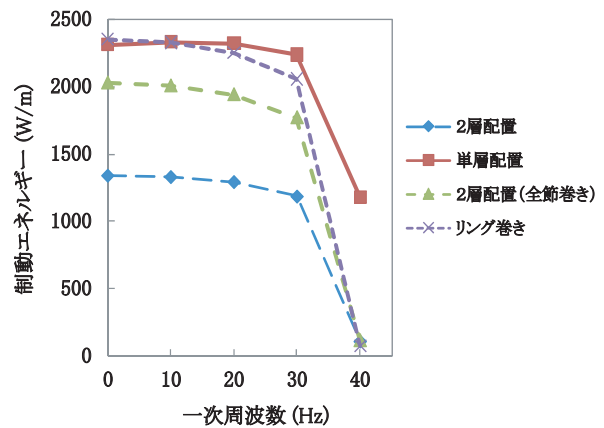


図10 制動エネルギー（ブレーキ力）

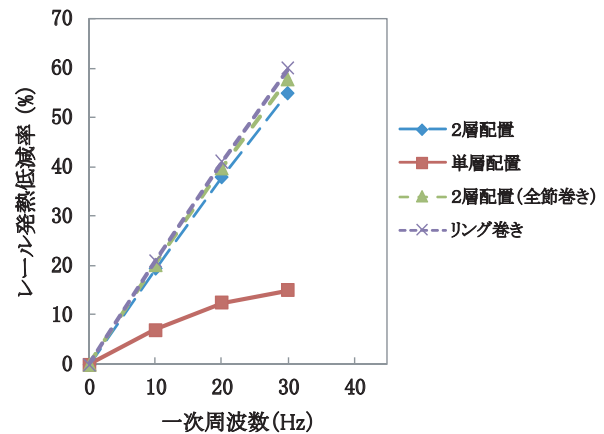


図11 レール発熱低減率

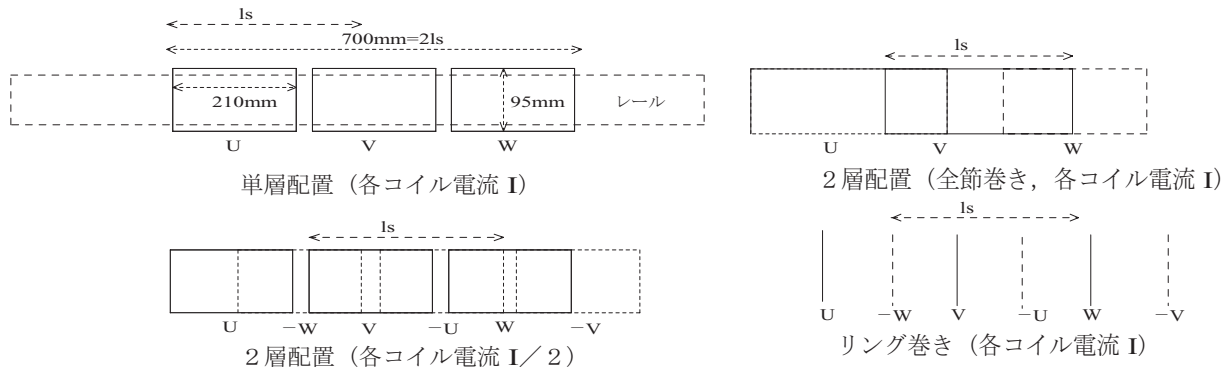


図12 各方式の巻線配置

## 特集：浮上式鉄道技術とその応用

種々の特性に悪影響を与えるとされる。しかし本装置では、以下の理由からそれらの影響は深刻ではないと考えている<sup>6)</sup>。

- ・端効果により電力回生率（レール発熱低減率）などの低下が考えられるが、本装置は端効果の影響が比較的少ない大すべり領域での運転を想定している
- ・二次導体（鉄）の抵抗率が高いので元々端効果の影響が顕著ではないと予想される

### 4. 巻線方式の予備検討

前述の回転型試験機では、通常の誘導機を改造しており、電機子巻線は回転機で一般的な2層配置となっている。しかしながら、レールブレーキの実機設計に際しては、2層配置ではコイルエンド部が大きくなるなど台車への搭載に困難が伴うことが予想される。そこで今後検討する実規模電機子の設計に先立ち、有限要素法による電磁解析を用いて電機子巻線の基本方式を検討した。巻線方式は単純化した4方式（単層配置、2層配置、2層配置（全節巻き）、リング巻き）により比較検討を行った。具体的な配置方法を図12に示す。比較に当たり、各巻線断面と電流密度を共通として解析を行った。制動エネルギー（速度と運動エネルギーの積）の解析結果を図10に、レール発熱低減率の解析結果を図11に示す。

これらの結果からブレーキ力（制動エネルギー）向上とレール発熱低減率の向上を両立できる巻線方式としてはリング巻が有用であることが分かる。機装性についても、台車下部の限られた空間において高起磁力に対応した2層配置（全節巻き）は工夫を要するため、単層配置又はリング巻が有利である。以上の総合的判断からリング巻きを当面の検討主体として選択した。

### 5. 結論

本報告では、交流励磁渦電流レールブレーキの基礎特性について検討した。その結果、レール発熱低減率はすべりにもよるが30%以上の達成が原理的には可能であること、ブレーキ力に関しても解析と比較的一致すること、などがわかった。また実機用巻線の対象としては、ブレーキ力とレール発熱低減の両立が可能と考えられるリング巻きを主たる候補として選定した。

なお今回の試験は比較的軽負荷（低磁束密度）での試

験であり、実機の正確なブレーキ力の推定には電気装荷を増やした（電機子の総電流値を実機相当に増やした）試験が必要と考えている。

また、電源設備容量に直結する力率に関しては、実機相当での試験を経ないと不明な点はあるものの、あまり高くないものと予想される。電機子構成の最適化とともに、電源設備自体の工夫による、必要電源容量の低減化についても検討していく。

### 6. おわりに

本報告ではリニア技術の応用展開として取り組んでいる、交流励磁方式の渦電流型レールブレーキの基本特性について検討し、原理的には本装置が構成可能であることを示した。今後は車両限界等を考慮したうえで、レールブレーキ本体や電力変換装置の具体的な仕様検討を行っていききたい。それらの結果も踏まえ、10kN/台車程度のブレーキ力の達成を目指していく。

今後とも関係各所の本レールブレーキ装置開発へのご理解とご援助をお願いする次第である。

### 文献

- 1) 南京 政信, 中澤 伸一: 制輪子摩擦係数の実時間推定とブレーキ制御への活用, 鉄道総研報告, Vol.19, No.5, pp. 39-44, 2005
- 2) 大野 薫, 伴 巧, 小原 孝則, 川口 清: セラミックス粒子による高速域の増粘着, 鉄道総研報告, Vol.9, No.1, pp. 31-36, 1995
- 3) 小原 孝則, 丸岡 昭, 由川 透, 蔭山 朝昭, 滝口 敏: 在来線用非常ブレーキシステム, 鉄道における国際サイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, pp. 252-256, 1991
- 4) 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基本特性, 鉄道総研報告, Vol.12, No.1, pp. 11-16, 1998
- 5) 坂本 泰明, 村井 敏昭, 笹川 卓: 交流励磁渦電流ブレーキの基礎検討, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-04-34, 2004.6
- 6) 坂本 泰明, 柏木 隆行, 笹川 卓, 田中実: LIM型レールブレーキの基礎特性, 電気学会半導体電力変換・リニアドライブ研究会資料, SPC-07-139, LD-07-66, 2007.12