

# リニア技術を用いたレールブレーキの基礎検討

浮上式鉄道技術研究部 電磁力応用

副主任研究員 坂本 泰明

## 1. はじめに

鉄道車両の制動技術の1つに渦電流レールブレーキがあり、過去に国内でも開発が行われていた<sup>1)</sup>。非接触で制動力を発生できるという特長を有しているが、動作原理上の理由からレールの発熱が不可避であり、それによるレールの熱膨張が座屈安定性に影響する可能性があった。更にレールブレーキはき電停止などの主回路系の異常時でも動作可能であることが望ましいが、所定の制動力を得るためには比較的大きな励磁電力が必要であったため、その電源確保も課題となっていた。

そこで、我々はレールブレーキにリニア技術を応用し、制動時に消費すべき運動エネルギーの一部を発電制動によってレール発熱以外に変換可能な新たなレールブレーキ（以降、リニアレールブレーキ）を提案し、開発を行なっている。本発表ではリニアレールブレーキの概要を説明すると共に要素技術に対する取組み及び基礎試験を行った結果を報告する。

## 2. リニアレールブレーキのコンセプト

リニアレールブレーキは図1のように従来のレールブレーキの励磁極をリニア誘導モータ（LIM）の電機子と置き換え、発電制動による制動動作を行う。これにより下記のメリットを得る。

(1) 同等の制動力発生時において、従来型と比較してレールの発熱を低減することができる

(2) 励磁に必要な電力を車両の運動エネルギーから確保することができる

これらの概念図を図2に示す。ここで、レール発熱低減効果を表す指標「レール発熱低減率」を「制動時に減少した運動エネルギー」に対する「レール発熱以外に変換されたエネルギー」の割合として定義する。従来型の検討結果などから最高速度160km/hまでの範囲において単機当りの制動力5kN以上、レール発熱低減率15~40%程度をリニアレールブレーキの開発目標の目安としている。

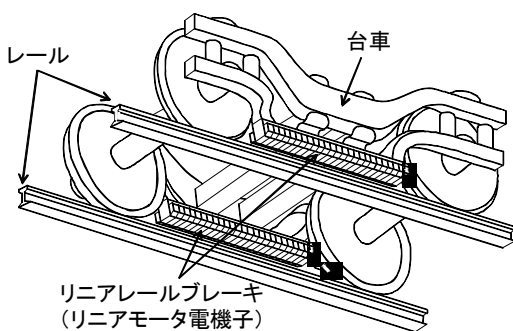


図1 リニアレールブレーキの構成図

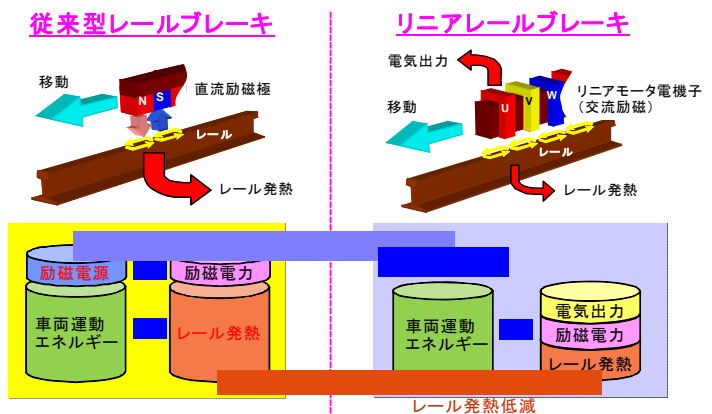


図2 動作時のエネルギー変換のイメージ

### 2. 1 リニアモータ電機子

図1に示されるように車輪間の限られた空間に設置されるため、在来線仕様では鉄心長は最大でも1.2m程度と想定される。これに対して在来線の幹線区間で使用されるレールの頭部幅は65mmであり、LIMとしてのギャップ面積は非常に幅狭で小さい。

## 2. 2 電源構成

電源システムとその制御方法についてはVVVFインバータを使用した発電制動を想定している。主回路系故障や回生失効などが波及する可能性を排除し、ブレーキシステムとしての信頼性を重視する主旨より、主回路系から完全に分離し、制御電力や初期励磁のみに補助回路等を利用する構成を実用形態の1候補として検討している。図3に1両2台車当りの構成例を示す。

## 2. 3 動作の概要

図3においてインバータはブレーキ指令を受けると低圧で起動し、直後に発電電力を利用して直流電圧を上昇させる。所定の直流電圧に到達後は制動力を保ちつつ、発電電力と電機子銅損（励磁に必要な電力）が平衡するような電力制御を併用し、インバータの定常動作に必要な直流電圧を維持し続ける。本発表ではこの制御方法を零出力発電制動と呼ぶ。図4に零出力発電制動の基本的なエネルギーフローを示す。零出力発電制動においてはレール発熱低減率の向上ために電機子銅損を高く設定した設計を選択できるため、電機子自身を制動抵抗器として兼用したシステム設計思想を導入することができる。

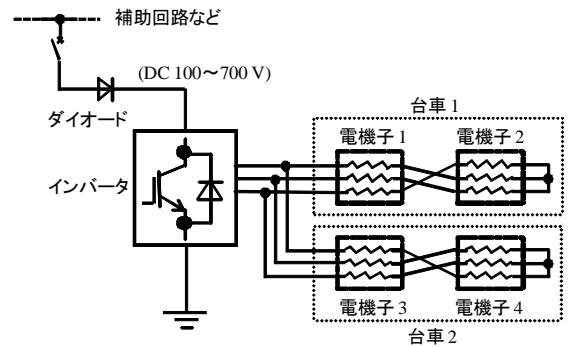


図3 電源システムの構成例

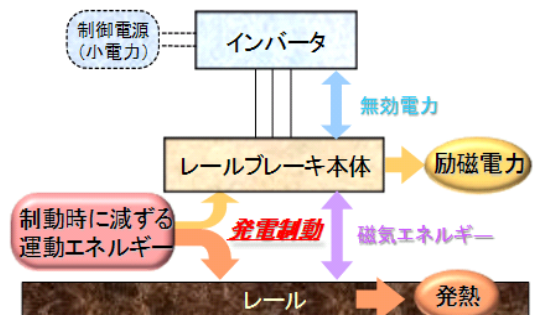


図4 零出力発電制動

## 3. 試験装置を用いた基礎的調査

### 3. 1 回転型基礎試験機による基本性能の確認

レールを用いたLIMにはレールの非線形磁性、表皮効果、端効果、縁効果などが複雑に影響するため、これら物理現象の詳細な評価は容易ではない。そこで初めに二次側がレールのような幅狭鉄塊である誘導モータとしての特徴に絞った調査を実施することとし、誘導電動機の回転子を幅狭鉄塊と入れ替えた回転型基礎試験機を製作した。図5に回転型基礎試験機の断面モデルを示す。回転子幅はレール頭部幅を模擬した65mm、電機子の周方向の磁極ピッチは212mmである。強い表皮効果によって磁界は回転子周表面に集中するので、所定の磁極ピッチとモータ幅を有する円弧状のLIMが模擬される。

図6に定回転速度・定電流において周波数を変化させた場合のブレーキ力とレール発熱低減率を示す。横軸の滑り  $s$  とは「回転速度」と「磁界が回転子上を進行する速度」の比を表す。ここでブレー

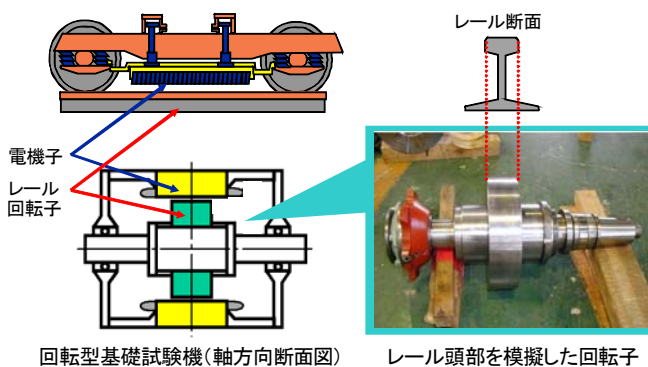


図5 回転型基礎試験機

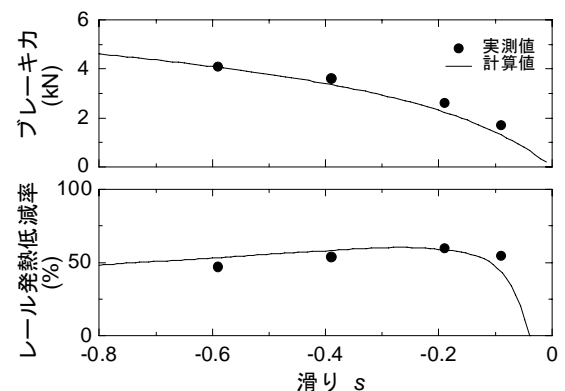


図6 ブレーキ力とレール発熱低減率

キ力についてはギャップ面積比のみを考慮して実機リニアレールブレーキの想定値に換算している。ブレーキ力 5kN 程度を発生させた場合のレール発熱低減率は最大で約 60% となることが確認された。

### 3. 2 静止型試験装置によるリニアモータ電機子の設計検討

限られたモータ長の中で制動力密度を高くとる必要性や発電動作の実現、機装の寸法制約などを勘案し、電機子の基本構成はリング巻を候補として検討している。一般にリング巻を採用したリニアモータ或いはレールブレーキは実施例が少ないため、基礎調査用のリング巻電機子を試作し、静止型試験装置（図 7）を用いて拘束試験体系における電磁特性を調査した。この試験装置

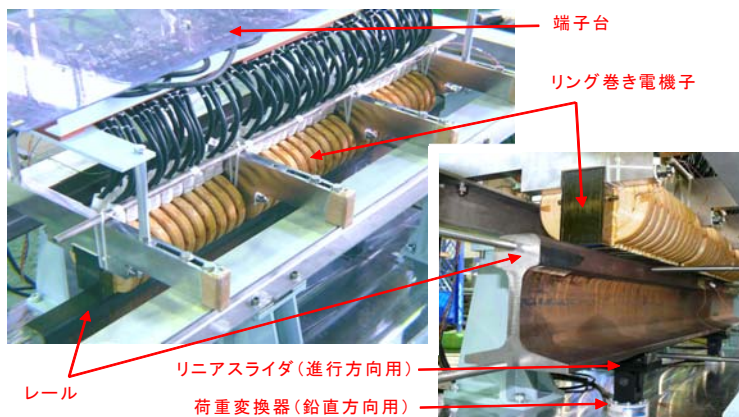


図 7 リング巻電機子を用いた静止型試験装置

は定置状態で磁界のみを進行させてレールに推力を発生するが、磁界の進行速度と走行速度の関係を換算することで、この推力値から実走行時に発生するブレーキ力特性を推定することができる。

図 8 にギャップ部の磁界分布と磁界の進行速度を変化させた場合の推力を示す。一般にリング巻はリニアモータの動作に必要な磁界も発生させる懸念があるが、実測結果にはその問題は無く、良好な磁界波形が確認された。また、磁界の進行速度が概ね 100km/h 程度で推力（ブレーキ力）のピークに達することなども確認された。これらよりリング巻電機子に特有な問題等はないことが確認された。

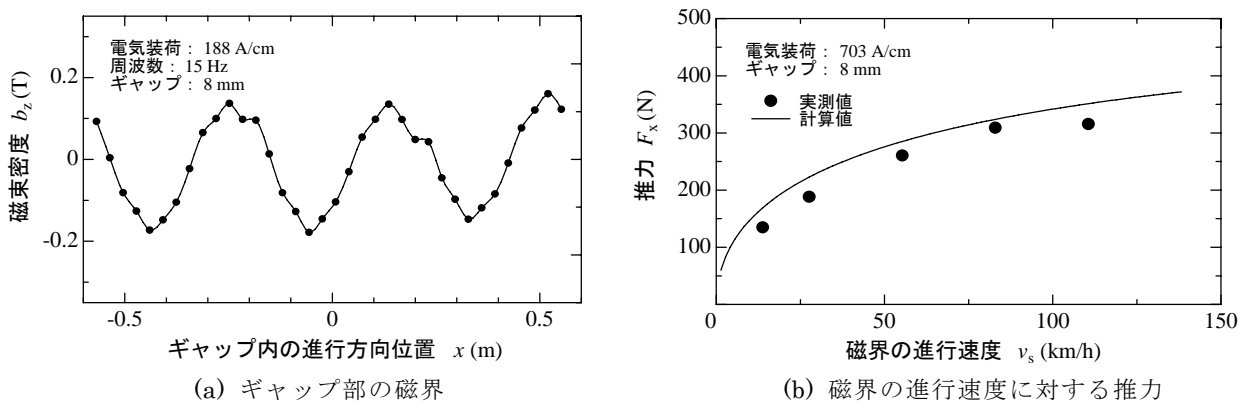
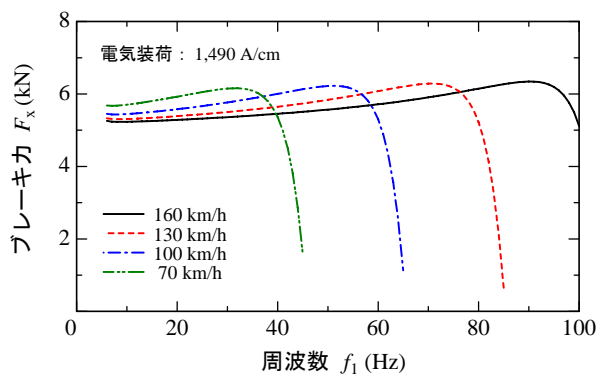


図 8 静止型試験装置の試験結果

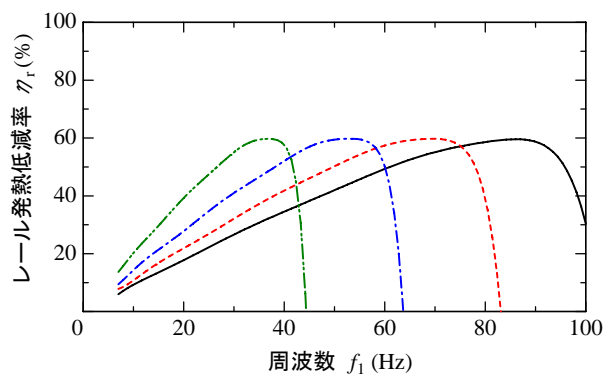
## 4. 概念モデルによる特性推定及び基本動作の確認

### 4. 1 概念モデルの推定特性

前述の回転型基礎試験機の試験結果から得られた等価電気回路を用いて、リニアレールブレーキの特性を概算した。ここでは、仮想的に回転型基礎試験機を直線状に展開したリニアレールブレーキを想定し、端効果を見捨ててギャップ面積比のみを考慮して特性算定を行った。ブレーキ力 5kN 程度を発生させた場合の周波数特性の計算結果を図 9 に示す。後述のようにリニアレールブレーキは低い周波数での運転が想定されているが、その低い周波数領域においてブレーキ力は速度や周波数に殆ど依存しないこと、同領域においてレール発熱低減率は周波数に対して一次関数的に変化することなどが確認できる。尚、別途解析によって端効果の影響を評価した結果、周波数の低い領域においては速度



(a) ブレーキ力



(b) レール発熱低減率

図 9 ブレーキ力とレール発熱低減率の周波数特性（計算結果）

や周波数に殆ど依存せずに制動力を一律に約 10%程度減少させる程度であった。

#### 4. 2 基本動作の確認

零出力発電制動を実現する誘導機の動作点は、或る速度において周波数が高い領域（滑り周波数が低い領域）と周波数が低い領域（滑り周波数が高い領域）の 2 ヶ所に存在するが、リニアレールブレーキでは大きな制動力が期待でき、且つ、インバータの容量低減が図れる後者的を選択する。図 10 は前述の回転型基礎試験機を用いてその原理確認を行った結果である。制動トルク  $T$  を立ち上げると発電電力によって直流電圧  $V_{dc}$  は 460V から 700V まで上昇するが、その後は周波数を調整することで 700V を保持している。この状態で一次側へ誘起される電力と電機子銅損（約 6.2kW）などが平衡している。機械的入力 は 24.7kW に相当するため、レール発熱低減率は約 25%となる。本試験より周波数の低い領域における零出力発電制動が実証された。

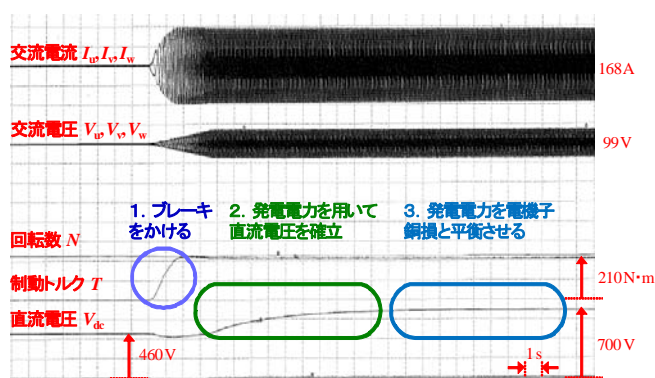


図 10 零出力発電制動の検証

図 11 に零出力発電制動のように発電電力を一定に保つように制御した場合の走行速度に対する特性の計算結果を示す。基本的には速度に係わらずほぼ周波数を一定とすることで定電力発電が行われている。制御の実装に際しては図 3 の電源上流側の直流電圧を検知することによって発電電力を観測できるので、図 11 の特性並びに直流電圧の観測値を利用することで零出力発電制動の自制制御は比較的容易に構築される。

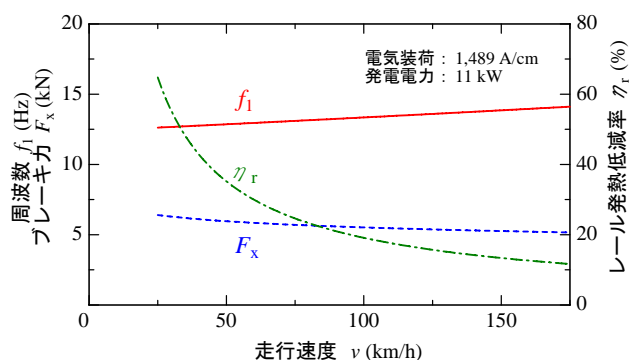


図 11 定電力発電制御時の速度特性

#### 5. まとめ

リニア技術を応用したレールブレーキの開発における要素技術に対する取組み及び基礎的な試験結果を紹介した。これらの結果を通じて、提案するリニアレールブレーキのコンセプトに適う機能と性能を得られる目途が立ったと言える。今後は実機開発に向けて検討を深度化する予定である。

参考文献 1) 松村他, 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)