

特集：浮上式鉄道技術と関連技術の在来方式鉄道への応用

# 励磁用インバータによるリニアレールブレーキ の状態監視方法

坂本 泰明\* 浮田 啓悟\* 笹川 卓\*\*

State Monitoring Method for a Linear-Motor-Type Rail Brake using an Excitation Inverter

Yasuaki SAKAMOTO Keigo UKITA Takashi SASAKAWA

So far, studies have been carried out on a rail brake applying linear induction motor technology. This brake is capable of generating braking forces without contact. In addition to the non-contact brake, no on-board power supply for energizing this brake is required by using dynamic braking. A practical application of this brake however desires a self-diagnosis method of the soundness of the device. Therefore, a state monitoring method for this brake using an excitation inverter was considered and examined on a test bench with a roller rig. These works clarified that the devised method is useful for self-diagnosis.

キーワード：レールブレーキ，リニアモータ，インバータ，状態監視

## 1. はじめに

鉄道車両における渦電流方式のレールブレーキは、車輪とレールの間の摩擦力（粘着力）に依らないブレーキ力を非接触で発生でき、速度の増加と共に減少傾向を示す粘着力に比べて高速域でのブレーキ力の減少が小さいなどの特長を持つ。この非接触のブレーキ力を粘着力に加えることで、走行中の車両をより短距離・短時間で停止させることが可能となるため、突発的な自然災害などの緊急事態における安全性を高める手段として期待される。このブレーキについて、筆者らはこれまでの課題であった停電などの電源喪失時の対応策として、リニア誘導モータ (LIM) の発電制動の原理を応用したリニアレールブレーキを考案し、その研究開発を行っている。これはブレーキ動作に必要な電力を装置自体が自己発電で賄うものであり、これまでに在来線特急車両や新幹線の速度域までを含めた高速車両への適用を想定した検討を行い、所期の機能と性能が得られることを確認している<sup>1)2)</sup>。

リニアレールブレーキは、基本的な構成要素として、ブレーキ力を発生する電機子、電機子を台車下部にて昇降支持するための搭載機構、電機子に通流される交流電流と自己発電を制御するための励磁用インバータから成る。これらを実用に供するにあたっては、基本的な機能と性能に加えて、不具合の有無などを自己診断するための状態監視方法を備えていることが求められる。電機子に関して言えば、コイルの温度、レールとのギャップ、走行方向などの各状態を監視することが望まれる。特にギャップに関して「非使用時に意図せず電機子が降下していないこと」などは、システムの健全性の重要な判断に関わることであるため、その監視意義は大きい。

\* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

\*\* 浮上式鉄道技術研究部

そこで、本稿では状態監視用のセンサを追設せずに、ブレーキ非動作時に待機している励磁用インバータを、上記の状態推定・監視に活用することを検討した結果について述べる。実車での使用を想定して、停車状態の準備作業でキャリブレーションが完結する状態監視方法を考案し、具体的な実施手順を整理するとともに、供試インバータの制御器に実装し、軌条輪試験<sup>1)</sup>でその有用性を検証した。

## 2. リニアレールブレーキの基本構成

### 2.1 電機子と搭載機構

リニアレールブレーキは、渦電流方式のレールブレーキの直流電磁石を3相の交流電磁石に置き換え、これをレールと対向するLIMの電機子として用いるものである。図1にその構成例を示す。電機子は台車前後の車輪間の限られた空間に設置され、その長さは最大で1.2～1.5m程度となる。これに対して幹線区間で使用されるレールの頭部幅は65mmであり、LIMとしては非常に細長い形状となる。また、二次側が鉄塊レールであるため、表皮効果によって、比較的低い滑り周波数から、磁束や渦電流がレールの断面内部に侵入し難い状態となる。これらに起因して、リニアレールブレーキをLIMとして見た場合の特徴は、漏れリアクタンスや二次抵抗が大きいこと、電流大きさに対してインピーダンスの非線形性が強いことなどが挙げられる。

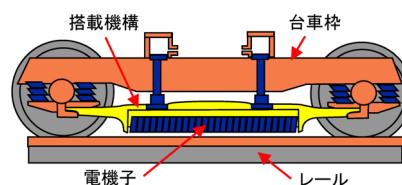


図1 リニアレールブレーキの構成例

搭載機構は、ブレーキ非動作時は電機子を台車枠直下に上昇させておき、動作時に降下させて、レールとのギャップを最小6～8mm程度に保持する。この搭載機構の信頼性を高めるためにも、状態監視が求められる。

### 2.2 励磁用インバータ

励磁システムの基本的な動作としては、インバータを用いた発電制動を行う。ここで、インバータの動作電力や発電電力の処理を車上の主回路に依存した構成にすると、き電系故障や再生失効などが励磁システムに波及する可能性を排除できなくなり、ブレーキシステムとしての信頼性を損なう。そこで、主回路から完全に分離し、バッテリーで給電される制御回路（DC100V）などで予め加圧された平滑コンデンサの充電電力を、初期励磁に利用する方法を提案している。図2に1台車当りの構成例を示す。制御回路とインバータの直流回路の間にダイオードを挿入することで、インバータは低圧（DC100V）で起動した後に発電電力を利用して平滑コンデンサを更に充電し、その電圧を上昇させると共に制動に必要なエネルギーを得る。所定の平滑コンデンサ電圧に到達後はブレーキ力を保ちつつ、滑り周波数の高い（インバータ周波数の低い）動作点で発電電力と電機子銅損などを平衡させ、制動抵抗器などを用いずに平滑コンデンサ電圧を一定に保ち続ける。これを零出力発電制動と呼ぶ。高い滑り周波数（低いインバータ周波数）を動作点としている理由は、所定のブレーキ力に対して、インバータ容量を極力低減するためである。

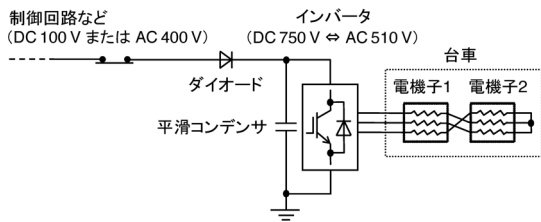


図2 励磁システムの基本的な構成例  
(初期充電回路などは省略)

### 3. 具備すべき監視機能

電氣的な故障（断線、短絡、地絡など）の検知の他に、励磁用インバータが具備すべきと考えられる主な監視機能を表1に挙げる。本表の監視機能を実施するために必要な要素技術は、コイル温度とギャップの推定に集約されるため、本稿では主にこれらの推定方法を検討する。また、検討における必要条件として、ギャップ推定量をキャリブレーションするための参照データの取得など、監視機能の実行に必要な準備作業が、実機において、車庫内などの停車状態で完結できることを課すものとする。

表1 励磁用インバータが具備すべき監視機能

動作の状態	走行の状態	電機子の上下位置	具備すべき監視機能
非動作	停車又は走行	正常時は上昇位置	①コイル温度（推定値）のモニタ ②動作位置付近への異常下降の有無
ギャップ測定動作	停車又は走行	下降位置	③ギャップ（推定値）のモニタ
ブレーキ動作開始	正常時は走行	正常時は下降位置	④電機子の下降、走行方向と相順の一致、速度が十分であること、などの判定
ブレーキ動作	走行	下降位置	⑤コイル温度が許容範囲であるかの判断 ⑥ギャップが許容範囲であるかの推定

### 4. 電気等価回路定数に着目した状態推定・監視方法の検討

#### 4.1 リニアレールブレーキの電気等価回路とその特徴

リニアレールブレーキをLIMなどの誘導機と同様に電気等価回路で表現し、その各パラメータの変化を観測することで、状態監視を実施することを検討する。ここでは、リニアレールブレーキの電気等価回路を図3で表現する。記号の意味は、 $V_1$ ：一次電圧（入力電圧）、 $I_1$ ：一次電流（入力電流）、 $Z_{in} (= r_{in} + jx_{in})$ ：入力インピーダンス、 $Z_1$ ：一次インピーダンス、 $Z_{2e}$ ：等価二次インピーダンス、 $r_{in}$ ：入力抵抗、 $r_1$ ：一次抵抗、 $r_{2e}$ ：等価二次抵抗、 $x_{in} (= \omega l_{in})$ ：入力リアクタンス、 $x_1$ ：一次リアクタンス、 $x_{2e}$ ：等価二次リアクタンス、 $l_{in}$ ：入力インダクタンス、 $l_1$ ：一次インダクタンス、 $l_{2e}$ ：等価二次インダクタンス、 $\omega$ ：角周波数である。同図は、一般的な誘導機の等価回路と似た概念で構成しているが、下記の点が異なっている。

$x_1 (l_1)$ ：レールに接近させずに電機子単体で測定されるリアクタンス（インダクタンス）を表す。

$r_{2e}$ ：レールに接近させた場合の入力抵抗  $r_{in}$  の内訳のうち、電機子単体の一次抵抗  $r_1$  に加算された変化分  $r_{in} - r_1$  を表す。一般的な誘導機で言えば、励磁回路と二次回路の合成回路の抵抗成分を表している。

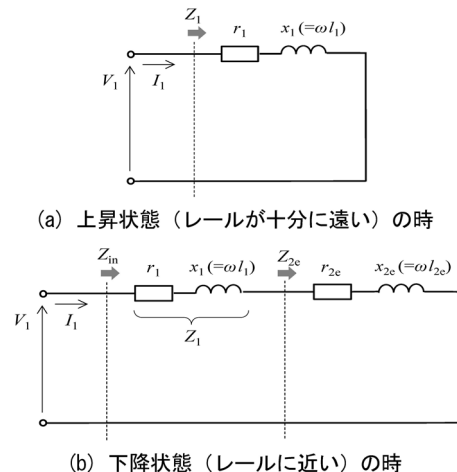


図3 リニアレールブレーキの電気等価回路

$x_{2c}$  ( $l_{2c}$ )：レールに接近させた場合の入力リアクタンス  $x_{in}$  (入力インダクタンス  $l_{in}$ ) の内訳のうち、電機子単体の一次リアクタンス  $x_1$  (一次インダクタンス  $l_1$ ) に加算された変化分  $x_{in} - x_1$  ( $l_{in} - l_1$ ) を表す。一般的な誘導機で言えば、励磁回路と二次回路の合成回路のリアクタンス (インダクタンス) に近いものを表している。

ここで、これらの等価回路パラメータの特徴を表2に示す。本表より、コイル温度を推定できるのは一次抵抗  $r_1$  のみであること、ギャップを推定できる可能性があるのは、等価二次抵抗  $r_{2c}$  と等価二次インダクタンス  $l_{2c}$  であることが分かる。また、コイル温度やギャップを推定する場合には、電流の大きさ、電流の周波数、速度、滑り周波数に対して一定の条件が課せられることが分かる。

#### 4.2 状態監視通電によるコイル温度とギャップの推定

ブレーキ非動作時の励磁用インバータで、消費電力を抑えた小電流を状態監視通電として通流することを想定した場合、コイル温度とギャップの推定方法として以下が考えられる。

##### 4.2.1 推定方法の概要

###### (1) コイル温度

電機子を上昇位置にした状態で、低い周波数で通電した時に観測される一次抵抗  $r_1$  から抵抗法で推定する。

###### (2) ギャップ

・方法 A：等価二次抵抗  $r_{2c}$  とギャップの相関を近似式で表して推定する。等価二次抵抗  $r_{2c}$  は周波数への依存性が強いので、周波数を固定して観測する。この時、速度が変化しても、滑り周波数が高い領域内のみで変化するように、高い周波数で逆相通電を行うようにする。

この方法のメリットは、速度信号が不要であること、電機子が下降位置にあれば、周波数を高めることで等価二次抵抗  $r_{2c}$  を一次抵抗  $r_1$  より大きくできるので、一次抵抗  $r_1$  の誤差による等価二次抵抗  $r_{2c}$  の算出誤差を小さくできることが挙げられる。他方、デメリットとして、上記の一次抵抗  $r_1$  について、コイル温度への依存性を含めて、測定に用いる周波数における特性を予め把握しておく必要がある。また、ギャップ測定のための状態監

視通電の直前にコイル温度を把握 (推定) しておく必要がある。そして、この方法の有用性を判断するための着目点として、高い周波数の逆相通電によって影響を抑える「速度の変化に対する滑り周波数の変化」が、速度変化時のギャップ推定精度にどの程度の影響を与えるかが挙げられる。即ち、停車時と最高速度時で同じギャップ推定値を得ることができるかの検証を要する。

・方法 B：等価二次インダクタンス  $l_{2c}$  とギャップの相関を近似式で表して推定する。等価二次インダクタンス  $l_{2c}$  は滑り周波数への依存性が強いので、速度に応じた同期周波数付近において、一定の小さな滑り周波数を正確に保った通電を行いながら、観測する。

この方法のメリットは、滑り周波数を小さくすると、入力インピーダンス  $Z_{in}$  において、抵抗成分に対してリアクタンス成分が支配的になるので、観測されたインピーダンスの位相角に対する等価二次インダクタンス  $l_{2c}$  の精度を高められることが挙げられる。他方、デメリットとして、走行速度と励磁周波数を正確に対応させる必要がある。そして、この方法の有用性を判断するための着目点として、一般的に滑り周波数が低くなると大きくなる端効果の影響が、速度にどの程度依存するかが挙げられる。

##### 4.2.2 実施手順

###### (1) 一次インピーダンスデータの取得

電機子を上昇位置にした状態で、走行前に状態監視用の3相の小電流を通電し、電機子単体の一次インピーダンス  $Z_1$  における以下の各成分を基礎データとして取得する。

- ・コイル温度推定：コイル温度  $T_0$  (任意の実測値、使用開始時であれば雰囲気温度に概ね等しい) において、低い周波数  $f_{1T}$  で一次抵抗  $r_{10}$  を取得する。
- ・ギャップ推定方法 A：ギャップ推定に用いる高い周波数  $f_{1gap}$  において、コイル温度  $T_1$  (実測値) の関数として一次抵抗  $r_1$  ( $T_1$ ) を取得する。
- ・ギャップ推定方法 B：小電流を通電する際の電圧が適度な PWM 変調率を超える低い周波数から、走行時の最大同期周波数の範囲の任意周波数において、一次インダクタンス  $l_1$  を取得する。

表2 リニアレールブレーキの等価回路パラメータの特徴

等価回路パラメータ	各パラメータの下記項目に対する依存性						各パラメータ値の測定精度が高まる条件
	コイル温度	ギャップ	電流の大きさ	電流の周波数	滑り周波数	速度	
一次抵抗 $r_1$	依存性あり (周波数が低い場合は比例)	無関係	無関係	依存性あり (交流抵抗)	無関係	無関係	周波数：低
一次インダクタンス $l_1$	無関係	無関係	依存性あり (強い)	ほぼ無関係	無関係	無関係	電流値：小
等価二次抵抗 $r_{2c}$	無関係	依存性あり	依存性あり (弱い)	依存性あり* (強い)	依存性あり* (滑り周波数が高い時は弱い)	ほぼ無関係* (端効果あり)	周波数：高 滑り周波数：高
等価二次インダクタンス $l_{2c}$	無関係	依存性あり	依存性あり (強い)	ほぼ無関係*	依存性あり* (滑り周波数が高い時は強い)	ほぼ無関係* (端効果あり)	電流値：小 滑り周波数：低

\* 周波数、滑り周波数、速度の各変化に伴う相互影響を概念的に除いた場合

(2) コイル温度の推定と電機子の下降検知

電機子を上昇位置にした状態で、コイル温度推定用の低い周波数  $f_{IT}$  で通電して一次抵抗  $r_1$  を求める。走行時であれば、相順は正とする。一次抵抗  $r_1$  より、コイル温度推定値  $T_c$  は式 (1) で求められる。

$$T_c = (r_1 / r_{10} - 1) \cdot (234.5 + T_0) + T_0 \quad (1)$$

ここで、仮に意図せずに電機子が下降位置となっていた場合は、実際には起こらないコイル温度（走行時であれば、入力抵抗が下がるので雰囲気温度よりも低い温度）を示すので、このコイル温度の異常な指示値を用いて、電機子が下降位置付近にあることを検知する。

(3) ギャップの推定

電機子を下降位置にした状態で、状態監視用の3相の小電流を通電し、入力インピーダンス  $Z_{in}$  を観測する。

- ・ギャップ推定方法 A：ギャップ推定に用いる高い周波数  $f_{1\_gap}$  で等価二次抵抗  $r_{2c}$  を求める。走行時であれば、相順は逆とする。このとき、電流値は前記した“(1)一次インピーダンスデータの取得”と同じとする。一次抵抗  $r_1$  ( $T_1$ ) を計算するためのコイル温度  $T_1$  は、電機子を下降させる直前に推定した  $T_1$  を用いる。
- ・ギャップ推定方法 B：停車時は小電流を通電する際の電圧が適度な PWM 変調率を超える低い周波数で、走行時は同期周波数付近（停車時に用いた低い周波数が滑り周波数となる周波数）で通電し、等価二次インダクタンス  $l_{2c}$  を求める。このとき、電流値は前記の“(1)一次インピーダンスデータの取得”と同じとする。
- ・ギャップ推定方法 A, B 共通：準備作業時は停車状態において、実測ギャップを等価二次抵抗  $r_{2c}$ 、またはインダクタンス  $l_{2c}$  の近似式に同定する。以降の推定時は、その近似式を用いて等価二次抵抗  $r_{2c}$ 、または等価二次インダクタンス  $l_{2c}$  からギャップを算出する。以上の手順を模式的に表したものを図 4 に示す。

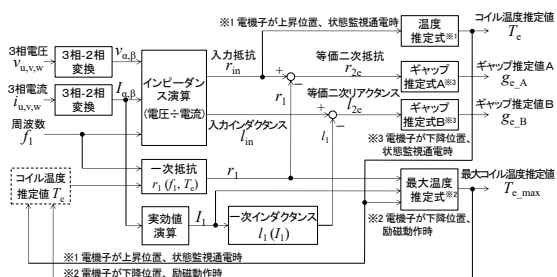


図 4 状態監視通電時の基本的な処理手順

4.3 ブレーキ動作開始時の状態監視

ブレーキ動作の零出力発電制動の開始時は、表 1 の④の監視機能を総括して、発電電力が得られる状態であるかを判定する必要がある。これは一次抵抗  $r_1$  と等価二次抵抗  $r_{2c}$  の大小関係を観測することで実施できる。他方、

仮に発電電力が得られない場合は平滑コンデンサ電圧が低下するため、これの観測によっても容易に実施できる。

4.4 ブレーキ動作時の状態監視

ブレーキ動作における零出力発電制動の実施中は、多くの場合、励磁用インバータは最大電圧を出力し、できる限り大きな電流を通流することが求められる。これに加えて、リニアレールブレーキは電流の大きさに対するインピーダンスの非線形性が強いこともあり、ブレーキ動作の電流に前節の状態監視用の電流を重畳する方法などは適さない。この場合に考えられる推定方法について述べる。

(1) 最大コイル温度の推定

ブレーキ動作直前の状態監視通電で求めたコイル温度推定値  $T_c$  に、零出力発電制動の周波数  $f_{lz}$  における一次抵抗  $r_1$ 、一次電流  $I_1$ 、コイルの熱容量  $C_{coil}$ 、通電時間  $t$  から計算される温度上昇を加算し、ブレーキ動作中のコイル温度を推定する。この時、正確な温度上昇の計算には、正確な放熱能力の把握が必要であり、これは走行風、気象条件、通電直前の鉄心温度などが複雑に関係するため容易ではない。そこで、式 (2) のように、最も温度上昇が大きくなる断熱発熱モデルを仮定し、コイルの熱容量のみで温度上昇した場合の温度上昇値に補正係数  $K$  を乗じたものを  $T_c$  に加えて、これを最大コイル温度推定値  $T_{c\_max}$  として監視に用いる。

$$T_{c\_max} = T_c + \frac{K}{C_{coil}} \int_0^t r_1(f_{lz}, T_{c\_max}) I_1^2 dt \quad (2)$$

補正係数  $K$  については、初期値を 1 とし、零出力発電制動終了後の状態監視通電で得られるコイル温度推定値  $T_c$  の試験結果と比較し、適正值に引き下げることを想定する。

(2) ギャップの推定

零出力発電制動では、発電電力と消費電力を平衡させるために、発電能力の大小に応じて周波数を操作する。最大ブレーキ力を得るために最大電圧を出力している場合は、これに伴って出力電流が変化する。ここで、発電能力の大小は、零出力発電制動を実施可能な速度域であれば、主としてギャップに依存する。このため、零出力発電制動の実施中は「標準ギャップにおける周波数または出力電流と任意ギャップにおけるそれらとの差分」と「ギャップ変化量」の相関を参照データとして得れば、原理的にはギャップ推定が可能である。しかし、この方法は参照データを得るために、別手段によるギャップ測定を行いながらの零出力発電制動を伴う走行試験が必要となる。これは停車状態における準備作業でキャリブレーションできるものではないため、本稿では扱わないこととする。

5. 軌条輪試験による検証

前章の状態監視方法について、供試インバータの制御

器に図4の信号処理を実装し、軌条輪試験<sup>1)</sup>で検証を行った。リニアレールブレーキ電機子は、軌条輪試験のため円弧形状とした試作機(図5)を用いた。これは防護カバーなどを含めて直線形状換算で長さ1500mm以下、幅125mm以下、高さ130mm以下で設計された実機大のプロトタイプである。状態監視通電における共通条件として、電圧は定格の約5~100%、電流は定格の約3~10%とした。

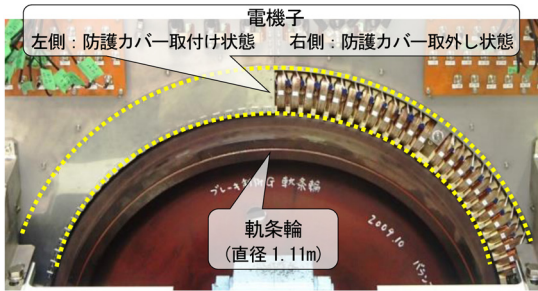


図5 軌条輪試験用リニアレールブレーキ電機子

### 5.1 一次インピーダンスデータの取得

電機子単体(上昇位置)において、図4の手順で取得した一次抵抗のモニタ値を図6に示す(本図は離散時間処理による誤差などの可能性を含む)。同図より、周波数が低い場合はコイル温度の増加とともに一次抵抗は増加し、周波数が高い場合はその逆の傾向を示していることが分かる。ここで、コイル温度推定時の低い周波数 $f_{IT}$ を10Hz、等価二次抵抗によるギャップ推定の高い周波数 $f_{I\_gap}$ を200Hzとする。この時、周波数 $f_{I\_gap}$ における一次抵抗 $r_1$ をコイル温度 $T_1$ の近似式 $r_1(T_1)$ (単位mΩ)で表現すると式(3)となる。

$$r_1(T_1) = 1.52376 \times 10^2 - 3.29613 \times 10^{-1} \times T_1 + 8.44586 \times 10^{-4} \times T_1^2 \quad (3)$$

同様に取得した一次インダクタンスのモニタ値を図7に示す。本図では様々な周波数(10~200Hz)で取得したデータを同一グラフ上に纏めて表示している。この一次インダクタンス $l_1$ を電流 $I_1$ の近似式 $l_1(I_1)$ (単位mH)で表現すると式(4)となる。

$$l_1(I_1) = 2.66836 - 8.14565 \times 10^{-4} \times I_1 + 5.40178 \times 10^{-6} \times I_1^2 \quad (4)$$

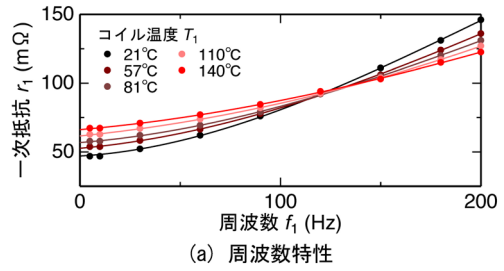
等価二次インダクタンスによるギャップ推定時の電流値を10Aとすると、式(4)による一次インダクタンス $l_1$ は2.65mHとなる。

### 5.2 状態監視通電によるコイル温度推定と下降検知

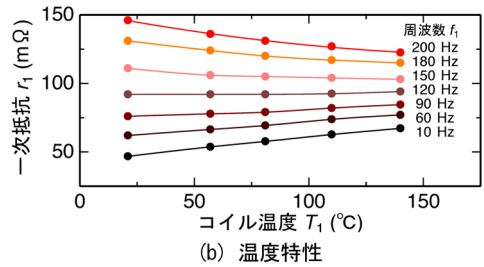
図6の $f_{IT}=10$ Hzのデータについて、一次抵抗に対するコイル温度の関係を図8に示す。ここで、実測結果の一次抵抗 $r_1 = 46.8$ mΩ、コイル温度 $T_1 = 21^\circ\text{C}$ を基準データ $(r_{10}, T_0)$ とした場合の式(1)によるコイル温度推定

値 $T_e$ を同図内に示す。コイル温度の推定値と実測値が一致している様子が確認できる。

次に、周波数 $f_{IT} = 10$ Hzでコイル温度を推定中に、電機子が意図せず下降した場合を想定して、ギャップ6.8mm(下降位置)にて正相10Hzでコイル温度推定を行った場合の速度特性を図9に示す。同図より、速度12.5km/h程度( $f_{IT} = 10$ Hzの同期速度)を除く全ての速度において、コイル温度推定値 $T_e$ が実際の値( $T_1 \approx 30^\circ\text{C}$ )から大き



(a) 周波数特性



(b) 温度特性

図6 一次抵抗のモニタ値

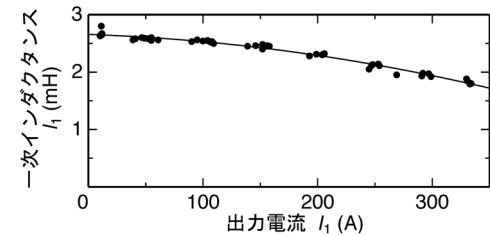


図7 一次インダクタンスのモニタ値

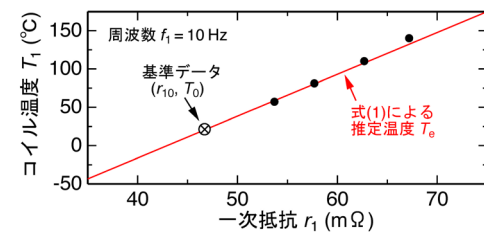


図8 コイル温度の推定値と実測値の比較

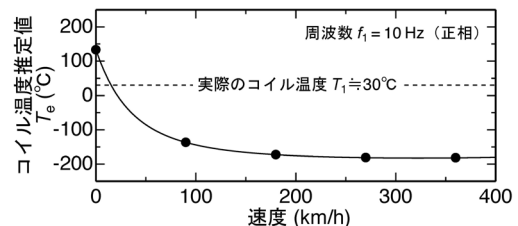


図9 コイル温度推定中に電機子が下降した場合

く乖離している様子が分かる。このコイル温度推定値  $T_e$  の異常指示値により電機子の下降を検知できる。但し、このままだと同期速度において検知できないため、上昇位置では零となる等価二次インダクタンス  $l_{2e}$  が閾値を超えていることをOR条件に加えることで、全速度域での検知が可能となる。

### 5.3 状態監視通電によるギャップの推定

電機子と軌条輪とのギャップを変更した場合の、等価二次抵抗  $r_{2e}$  (方法A) と等価二次インダクタンス  $l_{2e}$  (方法B) のモニタ値を図10に示す。本図において、両者はギャップに対して概ね同程度の相関を示している。ここで、速度を変化させた場合の等価二次抵抗  $r_{2e}$  と等価二次インダクタンス  $l_{2e}$  を図11に示す。等価二次抵抗  $r_{2e}$  は速度に依らずにギャップのみに依存しており、前出の着目点であった速度変化に伴う滑り周波数の変化による影響は殆ど見られないことが分かる。一方、等価二次インダクタンス  $l_{2e}$  については、速度の増加と共に若干低下する傾向が見られる。これは前出の着目点であった端効果の影響と見られる。これらより、速度の影響を受け難いギャップ推定方法としては、等価二次抵抗  $r_{2e}$  を用いる方法Aが適することが分かる。

図10のデータより方法Aのギャップ推定式を同定した様子を図12に示す。これは速度0km/hにおけるデータを近似式化することで得たものである。

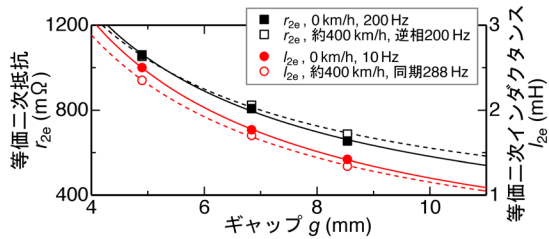


図10 ギャップと等価二次インピーダンスの関係

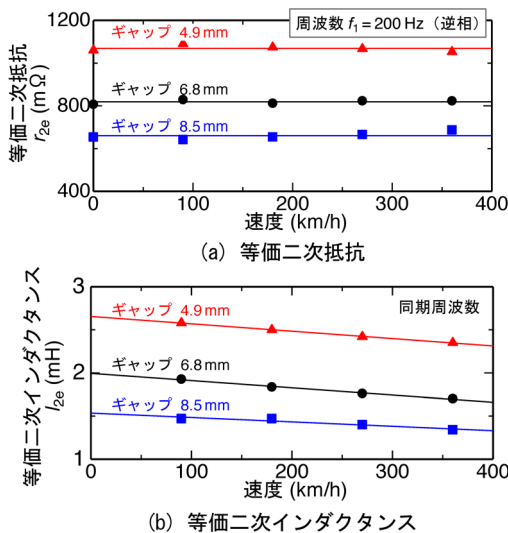


図11 等価二次インピーダンスの速度特性

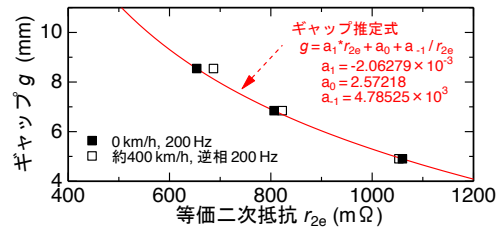


図12 ギャップ推定式 (方法A)

### 5.4 ブレーキ動作中のコイル温度推定

初速度400km/hからの零出力発電制動において、式(2)で求めた最大コイル温度推定値  $T_{e,max}$  と実測値  $T_1$  を比較したものを図13に示す。式(2)の補正係数は  $K=1$  としている。この試験では、最大コイル温度推定値  $T_{e,max}$  は実測値  $T_1$  に対して、4割程度の余裕をもっていることが分かる。軌条輪試験のデータにおいては、補正係数を  $K=0.68$  とすると両者は概ね一致する。

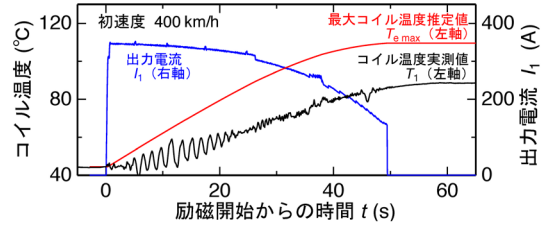


図13 ブレーキ動作時の最大コイル温度の推定

## 6. まとめ

本稿では、リニアレールブレーキにおける健全性の自己診断を目的として、励磁用インバータによる状態監視方法を検討した。それを供試インバータの制御器に実装して軌条輪試験で検証した。これより下記の知見を得た。

- ・低周波数(10Hz)、正相、小電流の状態監視通電で入力抵抗を監視することで、抵抗法によるコイル温度推定とともに、意図しない電機子の下降を検知できる。
- ・高周波数(200Hz)、逆相、小電流の状態監視通電で等価二次抵抗を監視することで、ギャップを推定できる。
- ・上記2つの方法は、停車状態の準備作業でキャリブレーションを実施することで、走行状態でも適用可能である。
- ・ブレーキ動作時のコイル温度上昇を断熱発熱モデルで推定する方法について、今回の軌条輪試験では補正係数を0.68とすると実測値に一致させることができる。

## 文献

- 1) 長谷川均, 柏木隆行, 坂本泰明, 笹川卓, 狩野泰: 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, 鉄道総研報告, Vol.25, No.3, pp.35-40, 2011
- 2) 坂本泰明, 柏木隆行, 米山崇, 嵯峨信一: 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