

コンデンサ自励現象を用いた渦電流ブレーキにおける 速度低下およびギャップ拡大時の起動特性

坂本 泰明* 浮田 啓悟*

Startup Characteristics of an Eddy Current Brake Using Capacitor Self-Excitation Phenomenon under Low-Speed and Large-Gap Conditions

Yasuaki SAKAMOTO Keigo UKITA

To explore the potential of electric braking in railway vehicle trailer cars, this study investigates capacitor self-excitation in eddy current brakes (ECBs) with the aim of enabling regenerative braking. While the characteristics under favorable conditions for self-excitation—such as high speeds and small air gaps—have been examined, the behavior under less favorable conditions, including low speeds and large air gaps, remains unclear. This study focuses on analyzing the behavior of the ECB under such less favorable conditions. Anomalous sustained excitation with small currents was observed, deviating from conventional behavior. From experimental and theoretical analyses, this phenomenon is presumed to be caused by the nonlinear magnetic properties of the secondary cores, including initial magnetization and magnetic saturation.

キーワード：コンデンサ自励現象，渦電流ブレーキ，非線形磁気特性

1. はじめに

高速鉄道では、停車直前を除く中・高速走行時の常用ブレーキとして、主に電気ブレーキが使用される。電動機が搭載されていない付随車については、電気ブレーキの一種である渦電流ディスクブレーキ（Eddy Current disc Brake: ECB）が用いられてきた。ECBは非接触で動作するため、機械ブレーキで見られるライニングの摩耗が生じず、その保守作業が不要などの利点を有する。しかし、電力回生ができない、ディスクの発熱が大きい、停電時に使用できないなどの課題が指摘されてきた。

これらの課題を解決するアプローチとして、ECBの電磁石を円弧状のリニア誘導発電機の固定子に置き換え、インバータによる交流励磁により電力回生を可能とする方式が検討された¹⁾。しかしながら、この方式は実用に供されていない。以上の背景から、ECBは近年の車両には搭載されていないのが現状である。電動車の電力回生ブレーキを優先的に使用する前提のもとで、編成中の電動車比率を高めて付随車のブレーキを用いない、または付随車に軸マウントディスクブレーキ（機械ブレーキ）を搭載して電動車の制動力が不足する場合に補助的に用いるなどの方式が採用されている²⁾。

このような状況を踏まえ、筆者らは付随車における電気ブレーキの可能性を改めて追求し、その実用化を目指すため、上記のECBの課題の解決に向けた新しいECBを提案した³⁾。提案したECBは、付随車向けとして構成の簡素化と低コスト化を重視し、コイルとコンデンサの共振による自己励磁、すなわち誘導機におけるコンデンサ自励現象と同様の原理を利用して交流励磁と電力回生を実現するものである。インバータや歯車装置などを用いずに、付随車における簡易的な電力回生ブレーキを実現できる点に特長がある。これが可能になれば、例えば最高速度から付随車を含む全軸で常用ブレーキを負担させるなど、制動方式の選択肢も広がると考えられる。これまでに筆者らは、高速度・小ギャップのようなコンデンサ自励現象の発現条件が十分な状況下における特性を主に明らかにしてきた^{4) 5) 6)}。

* 超電導応用技術研究部 電磁システム研究室

本研究では、提案 ECB の使用可能な速度範囲およびギャップ範囲を把握し、その拡大可能性を検討することを目的として、未検討であった速度低下およびギャップ拡大時のような自励現象の発現条件が不十分な状況下における起動特性を調査した。その結果、高速度・小ギャップの条件下とは異なり、低速度・大ギャップ条件下では初期励磁電流の大きさによっては、所期の励磁状態に至らない場合があることなどを確認した。提案 ECB をより低速域まで、またはギャップを拡大して使用するためには、この挙動のメカニズム解明と対策が不可欠である。本稿では上記の調査結果を報告するとともに、そのメカニズムについて検討する。なお、初期励磁電流の閾値の定量化等は検討対象外とし、稿を改めて論じることとする。

2. コンデンサ自励現象を用いた渦電流ブレーキの概要

2.1 動作原理

本節では、提案 ECB の動作原理について説明する。提案 ECB は、磁界を生成する固定子側（一次側）の鉄心およびコイルと、その磁界と電磁相互作用を行う回転子側（二次側）の鉄心および導体から構成される。この基本構成は従来の ECB と同様である。一次側が形成する磁界中で二次側が回転すると、二次側導体に誘導電流が流れ、その誘導電流が作る磁界と一次側電流との相互作用によってブレーキ力が発生する。提案 ECB は、従来 ECB とは異なり、一次側を 3 相交流で励磁する。これにより、ブレーキ動作と同時に発電電力を得ることが可能となる。以上の基本的な構成および動作原理は、一般的な回転型誘導機と多くの共通点を有する。提案 ECB、従来 ECB、誘導機の基本的な構成・機能の違いを表 1 に示す。

表 1 提案 ECB、従来 ECB、誘導機の比較

項目	提案 ECB	従来 ECB	誘導機（一般的なもの）
固定子 （一次側）	3 相交流励磁の電磁石 （積層鉄心、3 相コイルを円弧状セグメントに配置）	直流励磁の電磁石 （塊状鉄心、直流コイルを円弧状セグメントに配置）	3 相交流励磁の回転機の固定子 （円環・楕円状の積層鉄心のスロット部に 3 相コイル巻線を配置）
回転子 （二次側）	鋼材ディスク （短絡導体を兼ねる円盤状鉄心）	同左	かご型回転子（円形・楕円状の積層鉄心のスロット部に導体棒を入れ、両端を短絡環で接続し、かご型導体を形成）
固定子と回転子の間のエアギャップ	アキシアル方向（回転軸方向） 大（約 12 mm）	同左	ラジアル方向（半径方向） 小（約 1 mm）
誘導電流の流れ方	ディスク表面付近に渦状に流れる	同左	導体に沿ってかご状に流れる
機能	ブレーキ（自己励磁と発電が可能）	ブレーキ（電力供給が必要）	力行、ブレーキ（自己励磁と発電が可能）

次に、誘導機で知られるコンデンサ自励現象の原理について述べる。

- (1) 電動機または発電機として使用された履歴のある回転子鉄心には、微弱な残留磁化がある。外部動力によりその回転子を回転させると、この残留磁化が回転することによって固定子回路（一次回路）に交流電圧が誘起される。
- (2) 上記の交流電圧により一次回路に微弱な交流電流が流れる。この段階までの動作は、永久磁石を用いた同期発電機と同じような原理に基づく。
- (3) 一次回路にコンデンサが接続されている場合、上記の交流電流は、一次回路のコイルとコンデンサの共振周波数において進み電流として流れ、誘導機は励磁され、誘導発電機として動作を開始する。
- (4) 発電電力により電流が増加するが、鉄心の磁気飽和により、電流増加は次第に飽和し、増加割合が抑制される。
- (5) 最終的に、発電電力と回路全体の損失が平衡する電流値に収束し、定常状態に至る。

提案 ECB においても、原理的には上記と同様のコンデンサ自励現象を発現させることができる。しかし、提案 ECB はブレーキ用途を目的としているため、ブレーキ距離に直結する電流の立ち上がり時間を短縮することが重要となる。そこで本方式では、上記 (1) に示した回転子鉄心の微弱な残留磁化 (ECB ではディスクの残留磁化) を用いずに、上記 (3) の交流電流を初期励磁電流として強制的に通流する方式を採用する。具体的には、ブレーキ待機時にコンデンサを直流電源により予め充電しておき、ブレーキ指令時にその電力を用いて初期励磁電流を通流することで、電流の立ち上がりの高速化を図る。この詳細については、2.3 節にて述べる。

2.2 構造および特徴

図 1(a)に提案 ECB の全体構成、図 1(b)に鉄心、コイル、ディスクの主要構造³⁾を示す。台車枠に取り付けた鉄心とコイル (一次側) と、車軸に取り付けた鋼材ディスク (二次側) で構成される。この構成は直流励磁の従来 ECB と同様である。ただし、一次側は 3 相の交流励磁に対応する。一次側は円弧状 (周長約 1 m) に形成され、台車の組み立て時に輪軸、ディスクを分解することなく、その脱着を可能とする。二次側の直径は約 700 mm、回転速度は最大で約 2000 min⁻¹ を想定している。一次側と二次側は、車両動揺による相対変位が発生する。アキシアルギャップ構造のため、ラジアル方向 (鉛直・前後方向) の相対変位に対しては一次側と二次側は接触しない。一方、アキシアル方向 (まくらぎ方向) の相対変位に対しては、約 12 mm のギャップを設けて接触を回避する。ブレーキトルクの目標値は、高速走行時の電動車におけるブレーキ力と同等から半分程度に相当する約 1.6~1.0 kNm を目安とする。

本構造は表 1 に示した誘導機と比較して、二次側が鋼材ディスクである、ギャップが大きい、一次側が円弧状セグメントのリニアモータ形状である、空間高調波が大きい、などの構造的特徴の相違がある。これらの相違があることで、二次抵抗や漏れリアクタンスが誘導機よりも大きくなるなど、電気的特性にも差異が生じる。その結果、所定のブレーキトルクを得るためには、比較的低い共振周波数 (例えば 50 Hz 程度) で一次側を励磁するとともに、高い滑り周波数 (例えば 100~200 Hz) で動作させる必要がある。高い滑り周波数下では、鋼材ディスクにおける表皮効果が顕著となり、鋼材ディスクが持つ非線形磁気特性と相まって、電流の大きさに対するインピーダンスの非線形性が強く現れる。

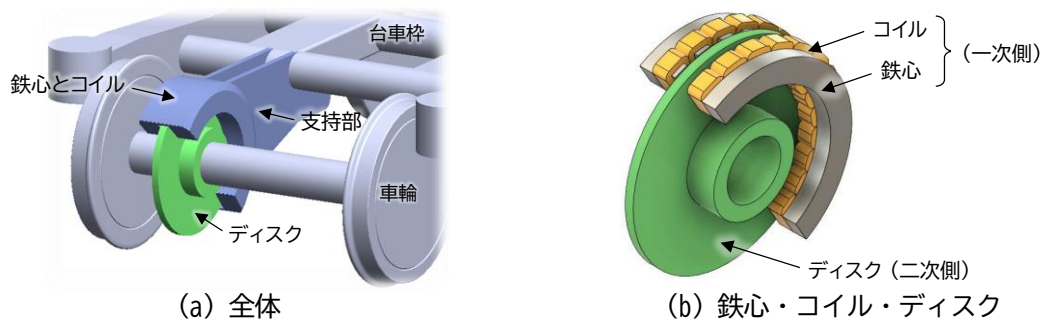


図 1 提案ブレーキの構成例

2.3 回路構成および励磁動作

図 2 に基本的な回路構成を示す。ここでは、デルタ結線で接続されたコンデンサと整流器による構成例を示している。コンデンサの容量は、最高速度時に所定の電圧・電流・ブレーキトルクで動作する共振周波数になるように設定する⁶⁾。共振周波数は速度に依存せずにほぼ一定なので、速度が低下すると滑り周波数が低下する。これに対し、速度に応じたコンデンサの切り替えなどは行わず、設定された共振周波数のままで可能な限り自励現象を継続する。

ブレーキ待機時からの基本的な励磁動作としては、図2中の接触器2が開いた状態で接触器1を閉じてコンデンサを充電し、充電完了後に接触器1を開いて待機する。ブレーキ指令時に接触器2を閉じると初期励磁電流が流れ、自励現象が発生して発電動作が開始される。通流初期には、電流は3相回路内を単相交流のように流れるが、すぐに正相成分が増加し、逆相成分が減衰することで、短時間で正相成分のみの3相交流へ移行する(図3)。発電電力が一次側の損失を上回っていればコンデンサの電圧が増加し、電流も増加する。コンデンサ電圧が直流側の電圧に到達すると、整流器を介して直流側へ電力が回生され、電圧と電流は増加せずに一定値になる。

一方、停電などにより直流側回路を切り離した場合は、電流のさらなる増加により磁気飽和が生じる。この磁気飽和の結果、発電電力と一次側の損失が均衡するようになり、最終的に電圧と電流は一定値に収束する。このように、停電時でも回生を行わずに自己励磁によるブレーキ動作の継続が可能である。

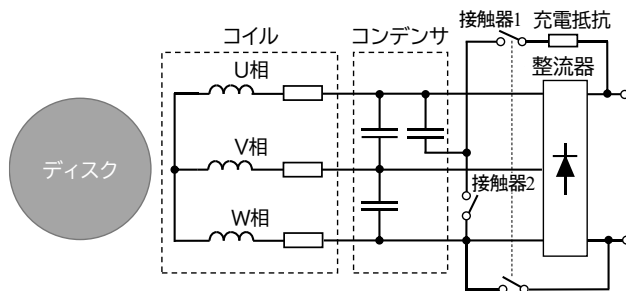


図2 回路の構成例

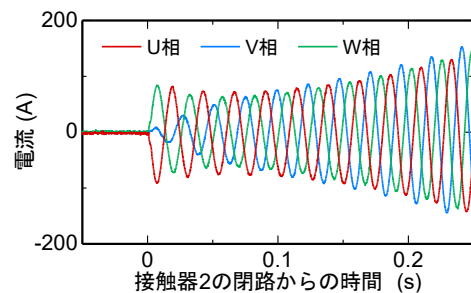


図3 通流初期の電流波形（実験結果例）

2.4 先行研究と課題

コンデンサ自励現象に関しては、一般的な誘導機を対象とした研究が多数報告されている⁷⁾。一方、鉄道車両の渦電流ブレーキに本現象を応用した研究事例はきわめて限られ、リニアレールブレーキを対象とした研究^{4) 5) 6)}が数少ない報告例の一つである。リニアレールブレーキは提案ECBと構造的特徴を共有することから、提案ECBの先行研究として位置づけられる。

本稿の検討前までの調査では、高速度（例：約200 km/h以上）・小ギャップ（例：約10 mm以下）の条件下で、微弱な初期励磁電流からでも自己増幅により励磁電流が磁気飽和レベルまで増大し、コンデンサ自励現象が容易に成立することを確認している。一方、速度が十分に高くない場合やギャップが大きい場合など、自励現象の発現条件が不十分と考えられる状況下については、十分な検討が行われていない。とりわけ、そのような状況下での起動時の特性は未解明であり、提案ECBの適用可能な速度域・ギャップ域の拡大に向けて解明が必要である。

2.5 試験系

本研究では、2.2節で述べた構造的特徴を有する提案ECBについて、供試機における電気特性を測定し、その結果から等価回路（回路定数）を同定して、速度低下およびギャップ拡大時の定数変化等を定量的に把握する。このため、先行研究に引き続き、提案ECBと同様の構造的特徴を持つ既存のリニアレールブレーキ試験機を供試機として用いることとした。図4(a)に試験系の全体構成、図4(b)に拡大写真を示す。一次側は、防護カバーなどを含めて直線形状換算で長さ1.5 m以下、幅125 mm以下、高さ130 mm以下であり、提案するブレーキにおいて想定される寸法に近い。構造は3相集中巻で、磁極ピッチは約200 mm、標準的なギャップは8~10 mm程度、最大で15 mm程度まで拡大可能である。二次側には、円周部の断面形状がレール頭部と同様である鋼製軌条輪を用いている。直径は約1.1 mであり、電動機によって回転する。軌条

輪の外周部に円弧状の一次側が対向配置される。ブレーキトルクは一次側を固定する架台に生じる反力をロードセルで測定した。

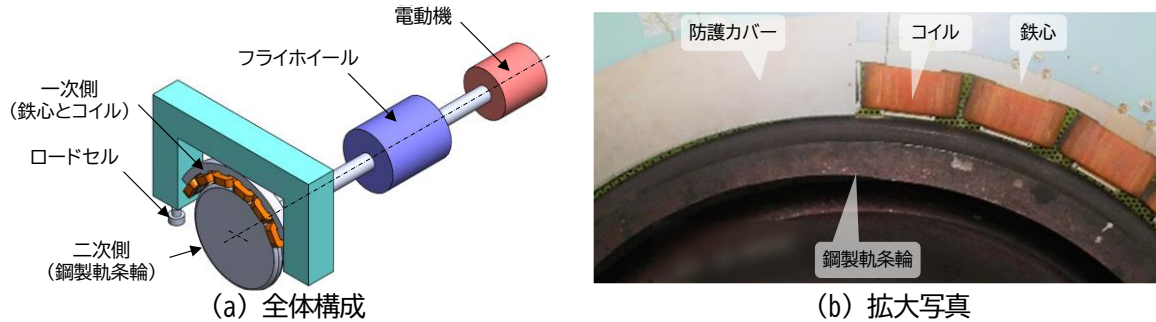


図4 試験系

3. 等価回路および特性図に基づく解析手法

本章では、提案 ECB の解析に用いる等価回路の定式化と、非線形磁気特性を考慮した特性図の構築、ならびに収束条件（安定点）の導出手順を説明する。なお、本章で示す解析手法は、本稿の検討以前に高速度・小ギャップ条件下の検討に用いてきた手法^{5) 6)}と同一である。

3.1 等価回路および非線形磁気特性を考慮した特性図

3.1.1 等価回路

図5に提案 ECB の等価回路（整流器などは除く）を示す^{5) 6)}。提案 ECB は電気機器としては誘導機に類似するが、本研究では以下の理由により、一般的に用いられる T 型等価回路を用いない。

- ・二次側の構造：二次側が無垢の鋼材ディスクであるため、表皮効果と非線形磁気特性の影響が顕著である。そのため、T 型等価回路における励磁リアクタンスおよび二次回路定数が、滑り周波数および電流の大きさに依存する。
- ・巻線構造：集中巻により低次の空間高調波が大きく、トルクおよびエネルギー伝達に影響を及ぼす。そのため、基本波の滑りのみを用いて二次回路抵抗を定量的に表現することが困難である。
- ・モータ構造：リニアモータ構造であるため、端効果の影響を受ける。これにより、励磁リアクタンスと二次回路定数は滑りのみならず速度にも依存する。

以上の点を踏まえ、本研究ではリニア誘導モータの旧来の理論解析^{8) 9)}で用いられる等価回路を準用する。この回路は、一次側と二次側間の複素ポインティングベクトルに着目したものであり、T 型等価回路における励磁回路と二次回路を分離せず、これらを等価二次回路として一括で表現する。表皮効果、空間高調波、端効果を考慮したうえ、速度と周波数の2つのパラメータに基づき等価回路定数を定める。滑りが負で発電状態の場合は、等価二次抵抗 r_{2e} および入力抵抗 r_{in} は負値で表される。

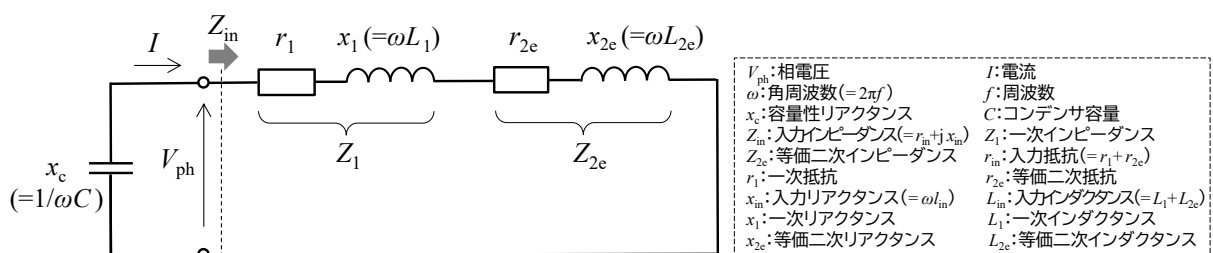


図5 提案ブレーキの等価回路

本研究では非線形磁気特性も考慮する必要があるため、パラメータとして新たに電流を加え、速度、周波数、電流の3つのパラメータに基づき等価回路定数を定める。これらのうち、速度については、ブレーキ力が重視される高速域（約200 km/h以上）では等価回路定数の変化が小さいため、本稿の検討前まではあまり議論の対象とされてこなかった。

自励現象が発現して収束状態にあるとき、等価回路定数は共振や電力等のつり合いから次式を満たす。

$$r_{in} = r_1 + r_{2e} = 0 \quad (\Omega) \quad (1)$$

$$\omega(L_1 + L_{2e}) - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (\Omega) \quad (2)$$

$$V_{ph} = \omega(L_1 + L_{2e})I = \frac{I}{\omega C} \quad (V) \quad (3)$$

3.1.2 非線形磁気特性を考慮した特性図

前述の試験機の等価回路定数などについて、周波数 f と電流 I に対する特性図として整理した結果⁶⁾を図6に示す。本図では、コンデンサ自励現象での動作範囲に限らず、周波数 f と電流 I を強制的に変化させた場合を表している。速度は最高速付近の300 km/h、ギャップは提案ブレーキとしては小さい7.7 mmであり、本稿の検討以前に主に対象としてきた、自励現象が発現しやすい条件である。図6より、入力抵抗 r_{in} や等価二次抵抗 r_{2e} が周波数のみならず、電流に対しても非線形磁気特性の影響で変化している様子が分か

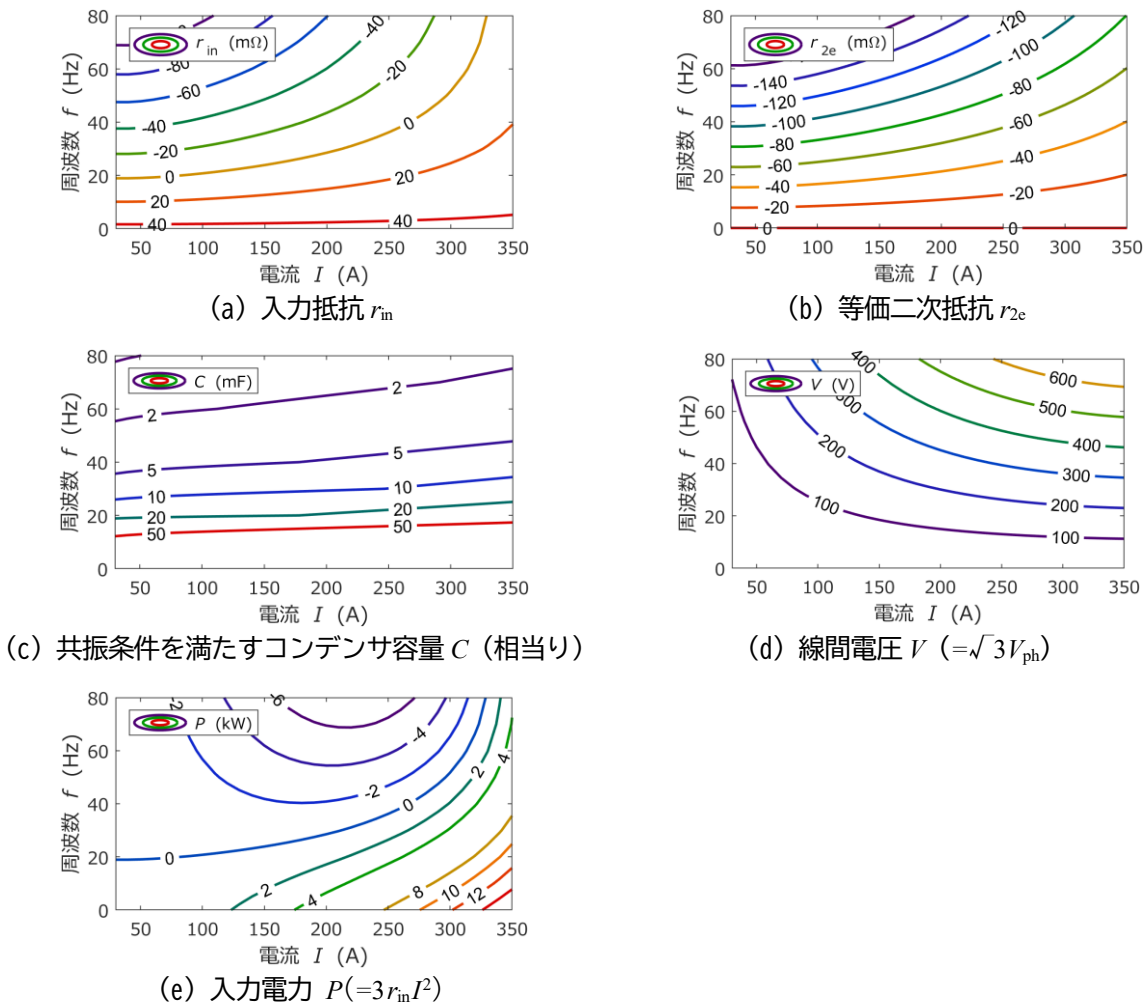


図6 非線形磁気特性を考慮した特性図（速度300 km/h，ギャップ7.7 mm）

る。また、同様の非線形磁気特性の影響により、共振条件を満たすためのコンデンサ容量 C も電流に応じて変化している。但し、コンデンサ容量の変化量は大きなものではない。

なお、ここでは省略しているが、一次抵抗 r_1 は周波数の増加に対して曲線的に増加し、電流に対しては殆ど変化しない。一次インダクタンス L_1 は周波数に対して殆ど変化せず、電流の増加に対して鉄心が磁気飽和するまで（約 150 A 以下）は概ね一定であり、飽和後は曲線的に減少する。入力インダクタンス L_{in} と等価二次インダクタンス L_{2e} は周波数に対して殆ど変化せず、電流の増加に対して単調減少する⁶⁾。

3.2 自励現象の発現と収束

自励現象の発現と収束について、容量 5 mF のコンデンサを接続した場合を例に挙げて説明する。本稿では自励現象の基本的な起動特性を議論するため、それとは無関係の整流回路は無視する。図 7(a)に前節の特性図における入力抵抗 $r_{in} = 0$ の曲線と共振条件を満たすコンデンサ容量 $C = 5$ mF の曲線を重ねて示す。直流側回路により初期充電されたコンデンサの電力を用いて初期励磁電流が流れる際、その周波数 f は式(2)に従い、入力インダクタンス L_{in} とコンデンサ容量 C で決定される共振周波数となる。すなわち、動作点は図 7(a)の $C = 5$ mF の曲線上に位置する。このとき、電流 I が領域Ⅰにあれば、入力抵抗 r_{in} が負なので発電電力が生じる。これによりコンデンサ電圧が上昇し、電流 I も増加する。電流 I は増加を続けて領域Ⅱに到達する。領域Ⅱでは入力抵抗 r_{in} が正となるため、前記とは逆に電流 I が減少する。このような動作を経て、最終的に電流 I は $r_{in} = 0$ の曲線と $C = 5$ mF の曲線の交点 A に収束し、式(1)を満足する。

ここで、コンデンサ容量 $C = 5$ mF の曲線上における入力抵抗 r_{in} の挙動を概観するため、周波数 $f = 40$ Hz における電流 I に対する入力抵抗 r_{in} を図 7(b)に示す。収束点 A が満たす条件として $r_{in} = 0$ に加え、収束点 A の近傍における電流 I に対する r_{in} の変化率が正であることが確認できる。

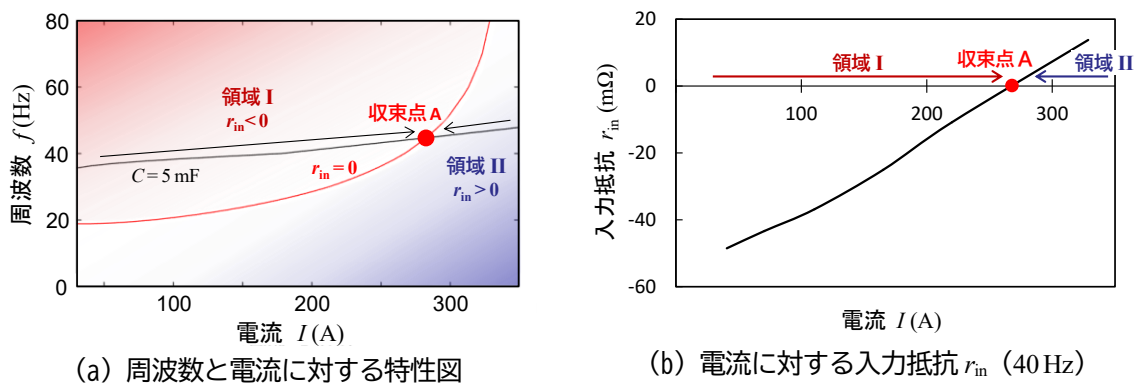


図 7 自励現象の説明（速度 300 km/h、ギャップ 7.7 mm）

4. 速度低下・ギャップ拡大時の起動特性：実験結果と等価回路に基づく考察

4.1 起動時の挙動

前述の試験系において、速度が十分ではない、またはギャップが大きい条件で起動させると、図 8 のような挙動が確認された。これらの挙動は速度が十分に高く、ギャップが小さい条件下では見られなかったものである。同一の速度およびギャップ条件下でも、初期励磁電流の大きさによって挙動が下記の 3 パターンに分かれる場合があることが確認された。すなわち、速度やギャップによっては、収束点が初期励磁電流の大きさに依存することが明らかとなった。この事象は図 7 では説明ができない。

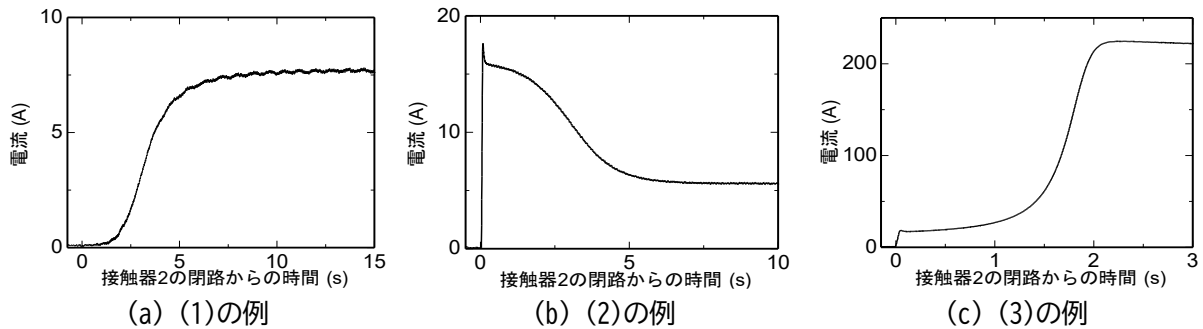


図8 速度が十分ではない場合の起動時の挙動（実効値表示）
（速度 150～160km/h，ギャップ 7.7 mm，コンデンサ容量 6 mF）

- (1) 微小な初期励磁電流を流した場合，電流は僅かに増加し，収束点 A とは異なる小さな値に収束。
- (2) 初期励磁電流が大きくない場合，電流は減少し，収束点 A とは異なる小さな値に収束。
- (3) 初期励磁電流が大きい場合のみ，電流は増加し，収束点 A の大きな値に収束。

4.2 等価回路から見た特性の変化

前節で述べた事象について，等価回路定数を用いて考察する．速度が低下した場合やギャップが拡大した場合について，前出の図 7(b)と同様に，電流 I に対する入力抵抗 r_{in} を実験で取得した結果を図 9 に示す．速度について 5 種類，ギャップについて 2 種類を示している．本図から下記の特徴が読み取れる．

- ・電流 I の増加に対して，入力抵抗 r_{in} の値は「増加→減少→増加」のような挙動を示し，極大値と極小値をそれぞれ 1 回示す曲線となる．
- ・速度が低下するほど，上記の「増加→減少」の挙動が顕著となる．但し，特に速度が低く，かつギャップが大きい条件（図 9(b)の 100 km/h）では当該挙動は弱まる．
- ・速度低下とギャップ拡大により，曲線全体がグラフ内で上方へ移動する．また，ギャップ拡大時は，速度低下に伴う上方への移動がより高速側から現れる．
- ・条件によっては，入力抵抗 r_{in} が零となる電流値が 3 点存在する場合がある．

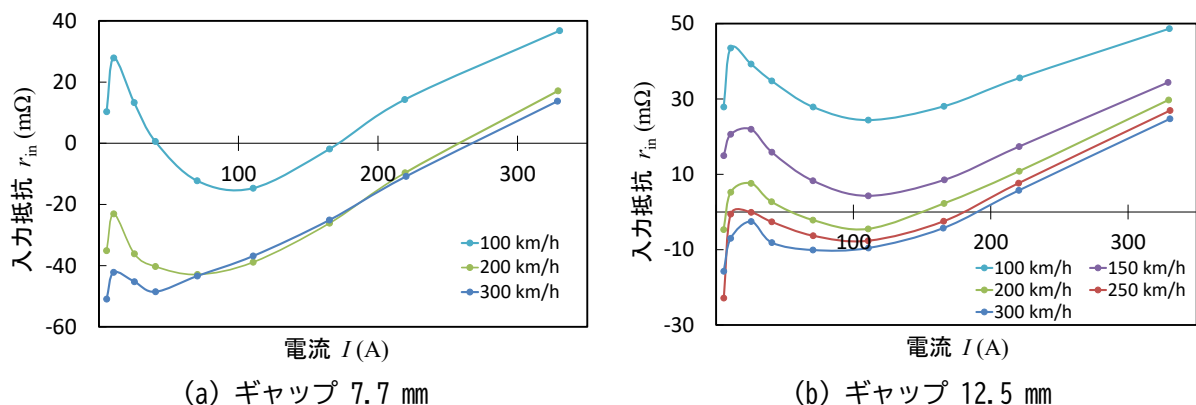


図9 速度・ギャップ変化時における入力抵抗の電流特性（周波数 40 Hz）

図 9(b)における 200 km/h の曲線の拡大図を図 10 に示す．この条件下では，入力抵抗 r_{in} が零となる電流値が 3 点存在している．これにより，初期励磁電流の大きさに応じて収束点が異なる場合がある理由について，以下のように解釈できる．これは 4.1 節に示した 3 つの挙動パターンと一致する．

- (1) 初期励磁電流が領域Ⅲにあるとき、入力抵抗が負なので、電流は僅かに増加し、収束点 B に至る。
 - (2) 初期励磁電流が領域Ⅳにあるとき、入力抵抗が正なので、電流は減少し、収束点 B に至る。
 - (3) 初期励磁電流が領域Ⅰにあるとき、入力抵抗が負なので、電流は増加し、収束点 A に到達する。
- 速度低下やギャップ拡大で現れた新たな収束点 B は、収束点 A と同様に式(1)を満たすため、動作点となり得る。一方、不安定平衡点 C においても式(1)を満たすが、電流 I に対する r_{in} の変化率が負であるため、不安定点となり動作点にならない。

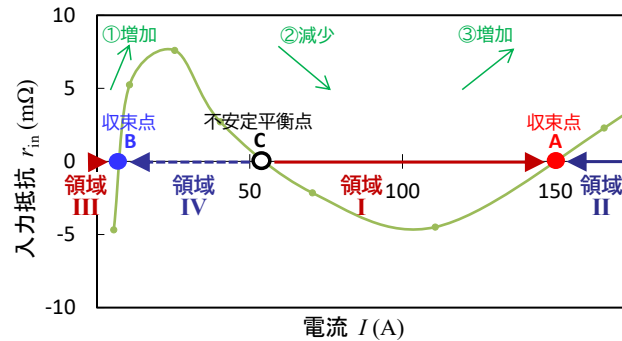


図 10 入力抵抗の電流特性 ～ 入力抵抗が零となる電流値が 3 点存在する場合
(速度 200 km/h, ギャップ 12.5 mm, 周波数 40 Hz)

4.3 二次側の非線形磁気特性による影響

電流 I の増加に対して、入力抵抗 r_{in} が「①増加→②減少→③増加」といった挙動を示すメカニズムについて考察する。このような等価回路定数の電流依存性は、構成部材が有する非線形磁気特性に起因すると考えられる。本ブレーキにおける非線形磁気特性としては、鉄心の磁気飽和、軌条輪表層の初期磁化特性、軌条輪表層の磁気飽和の 3 点が挙げられる。このうち、鉄心の磁気飽和は電流が大きい場合に発電能力を低下させ、入力抵抗を増加させる要因となる。したがって、「③増加」は鉄心の磁気飽和によるものと考えられる。他方、「①増加」と「②減少」は残りの軌条輪表層の初期磁化特性と磁気飽和に起因すると推定される。この仮説を検証するため、前述のリニア誘導モータの理論解析^{8) 9)}を用いて確認を試みた。

図 11(a)に理論解析による入力抵抗 r_{in} の概算値を示す。本図は線形磁気特性を前提とする理論解析において、二次側の比透磁率 μ_r を変化した場合の結果を示している。なお、簡単化されたモデルを扱う理論解析の計算精度には限界があるため、比透磁率 μ_r に依存しない一次抵抗 r_1 の交流損失を補正し、入力抵抗 r_{in} の平均的なレベルを調整している。解析の結果、比透磁率 μ_r が適度に低い場合 ($\mu_r=50$ 程度) に入力抵抗 r_{in} が最小となり、発電能力が最大化されることが分かった。滑り周波数が高い条件下では、二次側の比透磁率 μ_r が適度に低いほうが二次側回路の力率が向上するためと考えられる。図 11(b)に磁界強度 H に対する二次側(レール鋼)の比透磁率 μ_r の測定値¹⁰⁾を示す。磁界強度 $H=1$ kA/m 付近を境として、初期磁化特性と磁気飽和によ

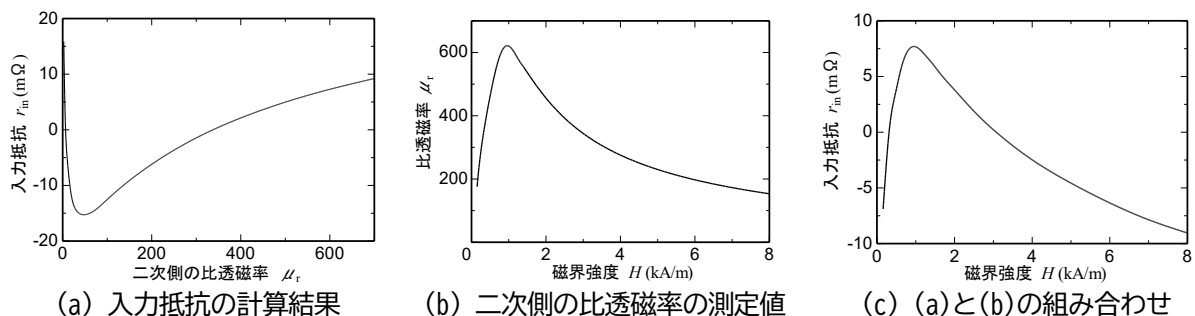


図 11 二次側の非線形磁気特性による入力抵抗への影響 ～ 理論解析による概念検討
(速度 200 km/h, ギャップ 12.5 mm, 周波数 40 Hz)

る比透磁率 μ_r の低下が見られる。図 11(b)の比透磁率 μ_r に図 11(a)の入力抵抗 r_{in} を対応させたものを図 11(c)に示す。図 11(c)は電流 I に対する入力抵抗 r_{in} の挙動を概念的に表現したものである。電流 I と正の相関がある磁界強度 H の増加に伴って入力抵抗 r_{in} の「①増加→②減少」の挙動が現れている。

以上の結果から、入力抵抗 r_{in} における「①増加→②減少」の挙動は、軌条輪表層の初期磁化特性と磁気飽和に起因するものであると推定される。なお、図 9(a)に示すように、この入力抵抗 r_{in} の増減挙動は、高速度・小ギャップの条件下においても生じている。しかしながら、当該条件では入力抵抗 r_{in} の増減が負の領域内に留まっていたため、起動時の電流波形には顕著な影響を及ぼさなかったものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、提案するコンデンサ自励現象を活用した付随車向け電気ブレーキにおいて、自励現象の発現条件が十分ではない速度低下およびギャップ拡大時における起動特性を調査した。その結果、初期励磁電流の大きさに応じて、電流が（１）僅かに増加して小電流に収束、（２）減少して小電流に収束、（３）増加して大電流に収束、のように３つの挙動パターンおよび２つの収束点に分かれる場合があることが確認された。このような挙動が生じる直接的な理由として、電流の大きさに対して、入力抵抗が零を挟んで正負の両側で極大値および極小値を示す特性を有することが明らかになった。さらに、そのメカニズムについて、リニア誘導モータの理論解析を用いて概念的に検討した結果、鉄心の磁気飽和に加え、二次側鋼材の初期磁化特性および磁気飽和に起因するものであると推定された。これらの事象は、自励現象の発現条件が十分に満たされる高速度および小ギャップにおいても内在しているが、入力抵抗が負領域に留まっているので、本稿の検討前までは顕在化しなかったものと考えられる。

今後は、本研究で得られた知見を基に、低速度域やギャップ拡大時でも確実に起動できる最小限の初期励磁電流の推定手法、およびそれに応じた初期充電電圧の設定方法などを検討し、提案 ECB の使用可能な速度範囲およびギャップ範囲の拡大を図る予定である。なお、本稿は起動特性の理解に主眼を置き、初期励磁電流の閾値の定量化等は対象外とした。これらは別稿にて体系的に報告する。

文 献

- 1) 山下誠, 加藤宏和, 石川栄, 高原英明: 新幹線付随車用電力回生ブレーキシステムの開発, 第 42 回鉄道サイバネティクスシンポジウム講演論文集, No.525, 2005
- 2) 望月旭: 新幹線電車のブレーキシステムの経緯, R&M, Vol.19, No.5, pp.44-49, 2011
- 3) 浮田啓悟, 坂本泰明, 佐藤光秀, 水野勉: 鉄道車両用コンデンサ励磁型渦電流ディスクブレーキの検討, 第 35 回電磁気関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集 (SEAD35) 講演論文集, No.OS3-4-4, 2023
- 4) 坂本泰明, 浮田啓悟: リニアレールブレーキに向けたインバータレス励磁方法の開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.6, pp.5-11, 2022
- 5) Ukita, K., Sakamoto, Y., Sato, M. and Mizuno T., "Characteristics of Self-Excited Rail Brake Using Capacitors," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic engineering, Vol.18, No.3, pp.463-469, 2023.
- 6) 浮田啓悟, 坂本泰明, 佐藤光秀, 水野勉: 自己励磁形レールブレーキのギャップ変化の諸影響を考慮したコンデンサ容量の選定方法, 電気学会論文誌 D, Vol.144, No.9, pp.654-661, 2024
- 7) M. Godoy Simões, Felix A. Farret, "Modeling and Analysis with Induction Generators 3rd Edition," CRC Press, 2021.
- 8) Nonaka, S. and Fujii, N., "Simplified Two-Dimensional Analysis of Linear Induction Motors," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.23, No.5, pp.2832-2834, 1987.
- 9) 野中作太郎: 片側式リニア誘導モータの等価回路定数と特性計算式の検討, 電気学会論文誌 D, Vol.115, No.3, pp.223-232, 1995
- 10) Sakamoto, Y., Kashiwagi, T., Hasegawa, H., Sasakawa, T. and Fuji, N., "A Study on the Transverse Edge Effect of an Eddy Current Brake with a Solid Steel Secondary," IEEJ transactions on electrical and electronic engineering, Vol.7, No.3, pp.322-328, 2012.