

高速車両に向けた リニアレールブレーキの小型軽量化の検討

依田 裕史* 坂本 泰明*
浮田 啓悟* 笹川 卓**

Study on the Miniaturization and Weight Reduction for the Application of
LIM-type Eddy-Current Rail Brakes to High-speed Trains

Hiroshi YODA Yasuaki SAKAMOTO
Keigo UKITA Takashi SASAKAWA

To apply LIM-type eddy-current rail brakes to high-speed trains, it is necessary to miniaturize the size and reduce the weight of its armatures that are mounted on bogies. In this paper, for this purpose, we consider reducing the volume of the iron core, because we take account of maintaining the braking performance in high-speed regions, which have a great effect on braking distance. Moreover, by electromagnetic field analysis, we verify the braking performance of such miniaturized armatures by comparing them with the armature developed that has fine performance in low-speed regions.

キーワード：高速鉄道，レールブレーキ，リニア誘導モーター（LIM），電磁界解析，有限要素法

1. はじめに

鉄道の高速化において、ブレーキ性能の向上は必要不可欠である。台車に搭載した電磁石と、それによりレールに発生する渦電流との電磁相互作用でブレーキ力を生じる非接触式渦電流レールブレーキは、レールと車輪との間の粘着条件によらず安定したブレーキ力を発揮でき、粘着係数の低下する高速域において特に有用となる装置である。一方、このレールブレーキによる減速分の運動エネルギーは、すべてレールに生じる渦電流のジュール発熱となって消費されるため、レールが加熱され軌道へ影響を与える可能性がある。そこで、この課題を解決するために、著者らは三相交流によって励磁される電機子を用い、リニア誘導モーター（発電機）として発電動作させ、運動エネルギーの一部を電機子自身で消費することでレール発熱を低減可能なブレーキシステム「リニアレールブレーキ」の開発を行っている^{1)~5)}。このシステムは、自身の励磁電力をその発電により賄うことで、外部からの電力供給なしに動作でき、架線停電となっても使用可能である（図1）。

鉄道総研におけるこれまでのリニアレールブレーキの開発では、在来線車両の160km/h走行時の制動距離短縮を適用対象としてきた。そのため、電気ブレーキや機械ブレーキと同程度のブレーキ力を発揮しつつ、大きな制動エネルギーによるレール発熱を低減するため、発電性能を重視した設計としてきた。そのような特性を得る

ために、十分な寸法と質量による電機子の開発を行い、定置での軌条輪試験および鉄道総研所内試験線での走行試験によって、計画通りの性能を確認した^{1) 2)}。

本稿では、このリニアレールブレーキを高速鉄道車両へ適用することを目的とし、電機子の小型軽量化を検討する。その設計の指針として、鉄心の減量を重視する手法を挙げ、電磁界解析によりその妥当性を確認する。

2. リニアレールブレーキの概要

2.1 システムの構成と特徴

本システムは台車に搭載される電機子（図2）と励磁用VVVFインバーター装置から構成される。システムの全体概要を図3に示す。これまで研究開発を行ってきた電機子は、リング巻構造（図4）を特徴としている。リング巻構造の電機子は、鉄心ヨーク部に各相のコイルを巻きつける構造となっており、異なる相のコイル同士

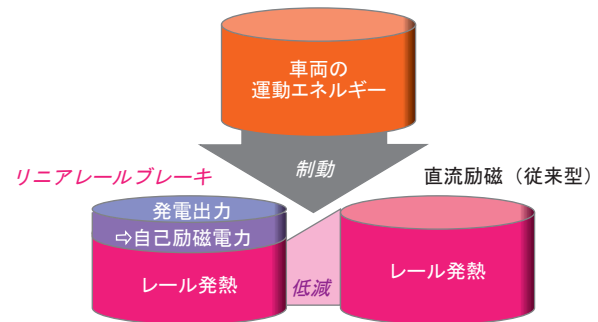


図1 リニアレールブレーキによるレール発熱低減効果と発電電力による自己励磁の概念

* 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

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

が干渉しないため、外形寸法に影響されずに、電機子の発電性能に影響を与える毎極毎相当りのスロット数を自由に設定できる利点がある。一方、励磁インバーターは汎用品を用いることができるが、その制御に特徴がある。前述の通り、本システムは外部からの電源供給なしに継続的な動作を行うことが可能であるが、その際、インバーターは出力周波数を制御することで電機子の発電能力を調整し、常にシステムの消費電力と釣り合わせるように動作する（零出力発電制動）。詳細な回路構成及び制御則については文献1)を参照されたい。

2.2 これまでの開発成果

(1) 軌条輪試験

リニアレールブレーキ電機子の性能評価と上記の零出力発電制動の安定制御実証のため、軌条輪による定置試験を行った²⁾。本試験で用いた電機子は直線状ではなく、軌条輪に合わせた円弧状となっている（図5）。また、試行的に目標以上のブレーキ性能まで検証できるよう、実台車への搭載を考慮しない大型な設計となっている。本電機子により、使用が想定される全速度域で試験を行い、良好な結果を得た。

(2) 所内走行試験

次に、実台車に電機子を搭載し、ブレーキ性能の試験を行った¹⁾。搭載した電機子は軌条輪試験用をベースとし、台車へ搭載するための改良と、防護カバー設置や防水措置を行った試作機である（図2、図6）。実台車への搭載にあたっては、電機子を軸箱体へ装架する等の仕組みにより、レールとのギャップを保持する必要があるが、本試験では、その機構を簡略化して台車枠からの直接懸架とした。所内走行試験線では高速での走行を行うことができないため、低速でのブレーキ性能について評価を行い、設計の妥当性を確認した。

3. 小型軽量化の検討

3.1 小型軽量化の指針

高速車両への適用に向け、これまで研究開発を行ってきたリング巻構造電機子の小型化を検討した。リニアレールブレーキ電機子は、レールとの間の磁気ギャップが比較的大きいため、十分な性能を発揮するには、大きな起磁力が必要となる。一方、台車へ搭載するため、その寸法は大きく制約を受ける。従って、その鉄心は磁気飽和に近い領域で、コイル導体の電流密度も実運用で許容される熱的限界に近い領域で励磁する必要がある。このような励磁条件下では、リング巻構造のリニアレールブレーキ電機子の性能は、基本的に鉄心ヨーク部の断面積とコイル導体の総断面積に比例すると考えることができる。鉄心ヨーク部の断面積は、ブレーキ力の源となる

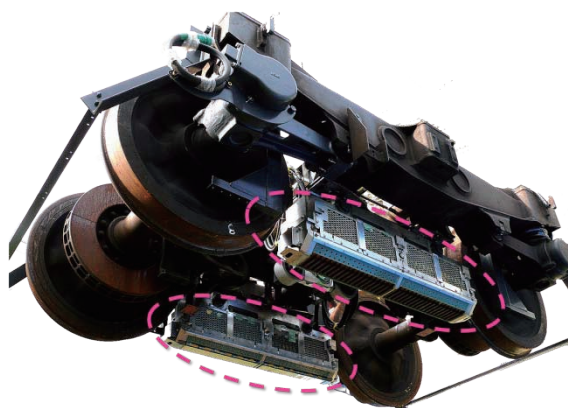


図2 台車に搭載されたリニアレールブレーキ電機子

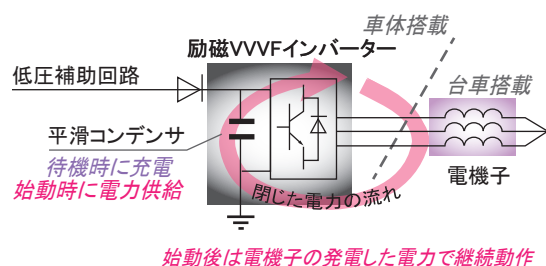


図3 システム構成の概要

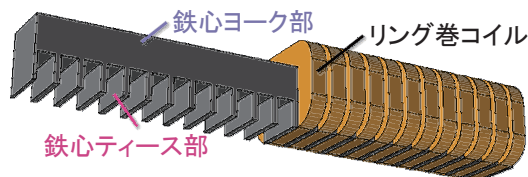


図4 リング巻構造電機子

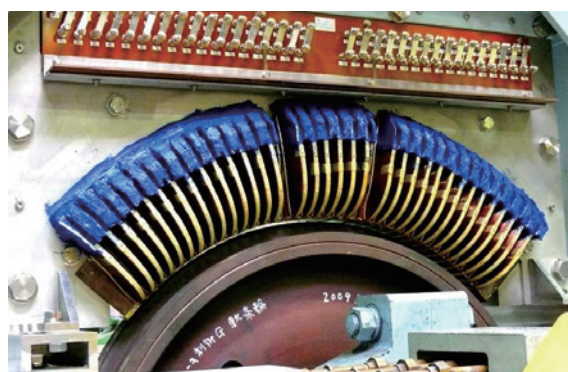


図5 軌条輪試験用電機子



図6 所内走行試験用電機子
(防護カバーを取り外した状態)

電機子とレールを磁気結合させる磁束の総量(磁気装荷)を決定し、一方、コイル導体の総断面積は通電電流による起磁力(電気装荷)を決定する。また、これら2つの指標には、電機子の外形制約やレールの電氣的・磁氣的特性に応じた適切な配分比⁶⁾が存在する。

既製作の軌条輪試験用および所内走行試験用電機子では、前述の配分比の適正化を意識した設計が行われている。しかしながら、粘着ブレーキとの併用を前提として、より高速域からの使用を考慮した場合には、これらと比較し、より鉄心の割合を少なくする方向で配分比を適正化できる可能性がある。これは以下の理由による。高速域ではレール上の渦電流がより大きくなるために強い反作用磁界が生じ、ギャップ磁束密度が低下する。従って、鉄心ティース部の断面積を減じたとしても、高速域でのブレーキ力は大きく低下しないと予想される(図7)。一方、低速域でのブレーキ力はティース部断面積の減少に従い低下するが、低速域では併用する粘着ブレーキ力も大きいいため、高速域からの制動距離の観点からは大きな影響を及ぼさない可能性がある(図8)。また、ティース部断面積とヨーク部断面積の比は、ヨーク部の貫通磁束が十分に通るための条件から決定され、既製作電機子の設計時に適切な値が設定されており、ティース部断面積を減じることはヨーク部断面積縮小を伴い、結果的に

一律に鉄心全体を減じることになる。ここで、ヨーク部断面積の減少は発電性能低下の要因となるが、高速域において、大きな制動エネルギーに対し低速域と同等の発電効率(レール発熱低減率)を確保した場合には電気容量が大幅に増大することから、一定のヨーク部断面積縮小も、電気容量の適正化の視点において重要な要件である。以上より、鉄心の減量を重視した小型化設計は、電機子外形寸法縮小だけでなく、システム全体の小型軽量化に対して有効であると考えられる。

3.2 軌条試験用電機子を基準とした鉄心減量設計

既製作の軌条輪試験用電機子の基本諸元をそのままに、まくらぎ方向の全幅と鉄心幅(積厚)に制約を設け、鉄心量削減によるリング巻構造電機子の小型化を検討した。4通りの鉄心量削減率に対応する小型軽量電機子の各部寸法を表1に、また、各寸法の対応とコイル相配置を図9にそれぞれ示す。ここで、各部寸法は以下の手順に従い決定している。

本検討では、リニア誘導モーターとしての性能に大きな影響を与える次のパラメーターを同一とした。

- (1) レールとのギャップ
- (2) 鉄心スロットピッチ
- (3) 毎極毎相あたりのスロット数

従って、鉄心極ピッチも同一となる。また、鉄心ティース下部余裕高、鉄心および導体の材質(電磁鋼板及び銅)、電流密度についても同一とした。

一方、全幅の制約は軌条輪試験用電機子の半分の126.0mm、鉄心幅の制約はJIS60レールの頭部最大幅に合わせて65.0mmとした。従って、鉄心からのコイル導体のまくらぎ方向張出幅は30.5mmとなる。リング巻構造では、この張出幅はコイル巻厚と等しいため、まくらぎ方向断面内の寸法制約が、レール方向断面内寸法にも影響を与える。以上の制約下で基準となる軌条輪試験用電機子から鉄心量を減じた設計とすると、鉄心のヨーク高とティース幅が等しい比率で減少し、鉄心のスロット幅が拡大する。そのため、コイル総断面積は鉄心の減少に対し増加する。このことにより、結果的に電機子の全高と重量は低減される。

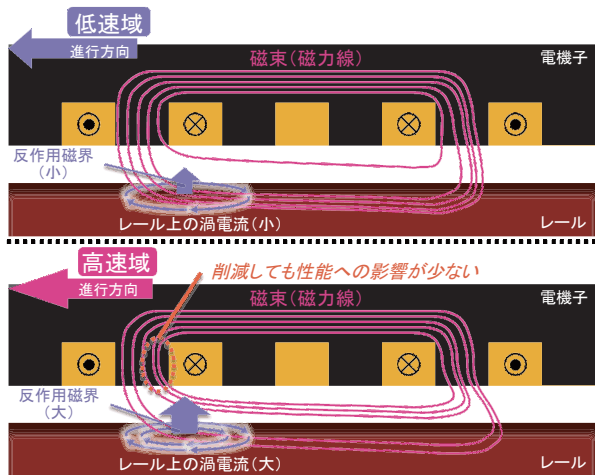


図7 低速域と高速域でのギャップ磁束の差異と鉄心ティース部削減の考え方

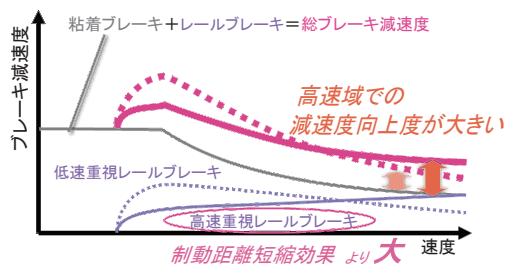


図8 高速域での性能を重視した設計としたレールブレーキによる制動距離短縮の概念

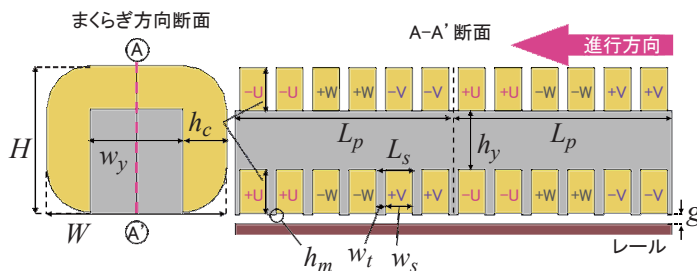


図9 リング巻構造電機子の各部寸法と相配置

表1 小型軽量化各ケースの寸法

	軌条輪試験用 (基準)	小型軽量 ケースA	小型軽量 ケースB	小型軽量 ケースC	小型軽量 ケースD
鉄心量 削減率 (比)	1	0.68	0.6	0.5	0.4
コイル導体総断面積 削減率 (比)	1	0.39	0.43	0.47	0.52
概算質量 削減率 (比)	1	0.339	0.336	0.310	0.291
全高 H [mm]	228.5	123.82	113.52	103.22	92.91
全幅 W [mm]	252.0	126.0 (小型化制約条件)			
鉄心幅 (積厚) w_y [mm]	95.0	65.0 (小型化制約条件)			
コイル張出幅 = コイル巻厚 h_c [mm]	78.5	30.5			
鉄心ヨーク高 h_y [mm]	70.5	70.5	61.82	51.52	41.22
鉄心ティース幅 w_t [mm]	11.5	11.5	10.08	8.4	6.72
鉄心スロット幅 w_s [mm]	14.0	14.0	15.42	17.1	18.78
巻線抵抗 (1 スロット) [mΩ]	6.04	1.32	1.38	1.39	1.61
スロットピッチ L_s [mm]		25.5			
每極每相あたりのスロット数		2			
極ピッチ L_p [mm]		153.0			
鉄心ティース下部余裕高 h_m [mm]		1.0			
レールとのギャップ g [mm]		6.5			
電流密度 [A/mm ²]		12.0			

4. 電磁界解析による検証

4.1 解析の概要と有限要素モデル

前章で決定した小型軽量電機子の諸元を用い、有限要素法による電磁界解析により、その性能を評価した。解析には、株式会社 JSOL 製ソフトウェア「JMAG」を使用した。一般にリニア誘導モーターの性能には、進行方向端部の存在が影響を及ぼすが、本解析は絶対的な性能評価を目的としないため、端部を省略したレール長手方向についての1極対並進周期対称モデルで計算を行った。また、レール中心軸に対して対称形であることから、まくらぎ方向に対しても半モデルとし、対称境界条件とすることで、計算負荷を低減している。有限要素メッシュモデルの全体図を図10に示す。また、その他解析条件の概要は表2の通りである。

4.2 解析結果

4.2.1 解析条件でのブレーキ力

ブレーキ力の解析結果を図11に示す。低速域でのブレーキ力に関して、鉄心量の多いケースA、Bでは大きな差は見られないが、より鉄心量を減じたケースC、Dでは鉄心量の削減に伴って低下する傾向が読み取れる。一方、それと比較して、高速域でのブレーキ性能は大きく変化していない。以上より、3章における議論を裏付ける結果が得られたといえる。次に、電機子質量お

よび電機子占有体積（外形を囲むの直方体体積）あたりのブレーキ力を評価した。軌条輪試験用電機子の速度300km/hでの結果に対する比で表したものを図12、図13に示す。これらの図より、質量もしくは体積あたりの評価とすると、鉄心量を削減したケースは高速域で優位となること分かる。

図14に速度ごとのブレーキ力の鉄心量依存性の傾向を示す。同図より、鉄心の削減量が多い領域においては、高速域では鉄心削減量ほどブレーキ力が低下せず、逆に低速域では鉄心削減量以上にブレーキ力が低下していることが見て取れる。これは図7に示した効果と、鉄心量削減に伴うコイル導体断面積（電気装荷）の増加による結果であるといえる。

4.2.2 発電能力と零出力発電制動時の想定皮相容量

解析条件での発電電力（本稿では電機子に誘起される電力）と電機子での消費電力（励磁に必要な電力）を図15に示す。図11と比較すると、各ケースの発電電力量はブレーキ力と同様の傾向となっていること分かる。一方で消費電力は導体断面積の増加に伴って増大するため、鉄心を多く削減したケースでは、発電電力に対して消費電力が増大する傾向となる。

本解析と同じ電流値の状態では、2章で述べた零出力発電制動を行う場合を考える。発電電力はほぼ励磁周波数に比例する特性をもつため、発電電力<消費電力となっている場合には、励磁周波数が高く調整される。従って、

電機子モデル(1極対・まくらぎ方向鏡面对称)

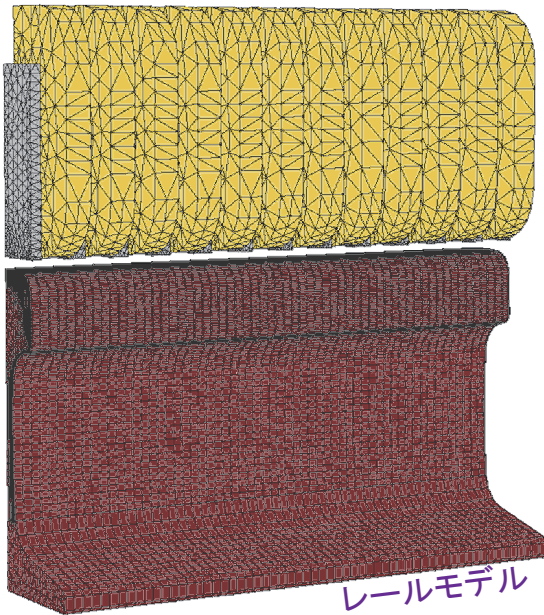


図 10 有限要素メッシュモデル (空気領域を除く)

表 2 直流解析条件の概要

解析法	モデル規模
A-φ法 過渡応答解析	約25万~35万要素
走行速度	励磁周波数
100km/h, 300km/h	30Hz
時間ステップ	励磁電流値とコイル巻数
0.09ms (100km/h) 0.03ms (300km/h)	380Arms前後となるよう 各ケース毎巻数を調整
鉄心電磁鋼板 電磁特性	レール鋼 電磁特性
※鉄損・渦電流損無考慮	抵抗率: $2.2 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$

同一電流条件を保つためには、より高い励磁電圧が要求され、システムの皮相容量は解析結果よりも大きくなる。逆に、発電電力>消費電力となっている場合には、皮相容量は小さくなる。この変化割合は周波数の変化割合にほぼ等しく、またそれは発電電力の不足量から概算することが可能である。以上の様な手順で求めた零出力発電制動時の推定皮相容量を図 16 に示す。鉄心を削減するほど電機子は小型軽量化されるが、必要なインバーター容量は増大する傾向が読み取れる。

4.2.3 実システムの想定性能

実際のリニアレールブレーキシステムを構成する際には、電機子の設計だけでなく、励磁インバーターの容量

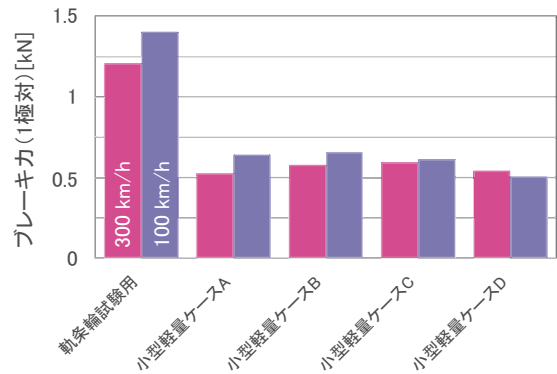


図 11 解析結果 ブレーキ力 (1 極対)

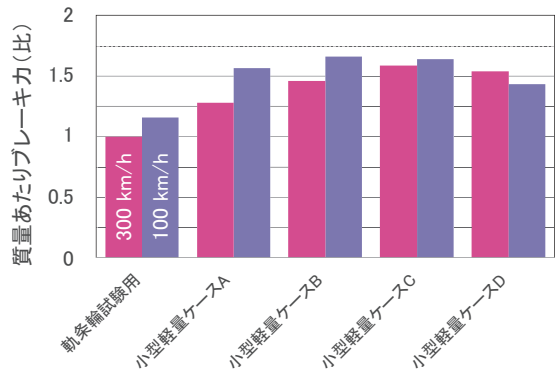


図 12 電機子質量あたりのブレーキ力

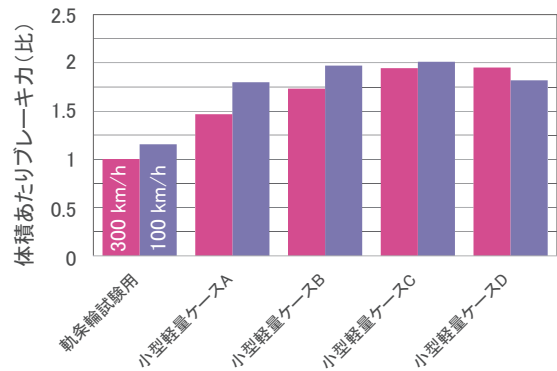


図 13 電機子 (占有) 体積あたりのブレーキ力

設定も重要である。図 16 に示した通り、必要な皮相容量は速度に応じて変化するため、本節ではケースごとに、速度 300km/h で必要となる皮相容量を実システムでの容量と想定し、その皮相容量一定条件下での性能を比較した。速度 100km/h 時の性能は、その容量に応じた電流の増減に伴う変化を概算した。その結果を図 17 に示す。図 11 と比較すると、インバーターの容量を考慮したことにより実際のブレーキ力では、4.1.2 項で述べた鉄心減量による高速域に特化した特性が明瞭となっている。これらより、今回示した設計例 (特にケース B, C, D) においては、高速走行時のブレーキ力に顕著な差異はなく、小型軽量化に重点を置く場合には、鉄心および

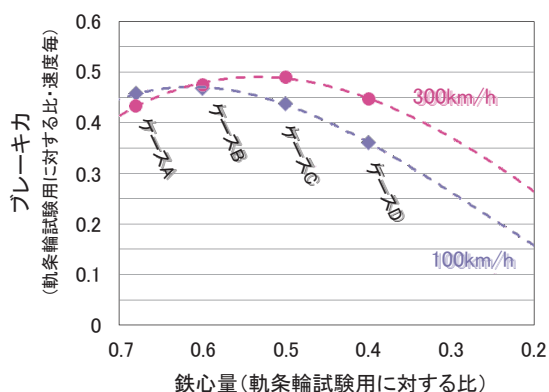


図 14 速度によるブレーキ力の鉄心量依存性

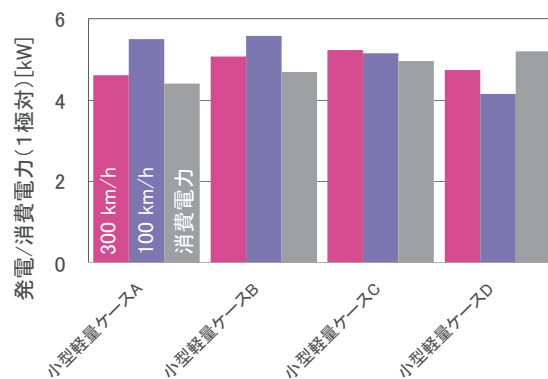


図 15 解析結果 発電電力と消費電力（1極対）

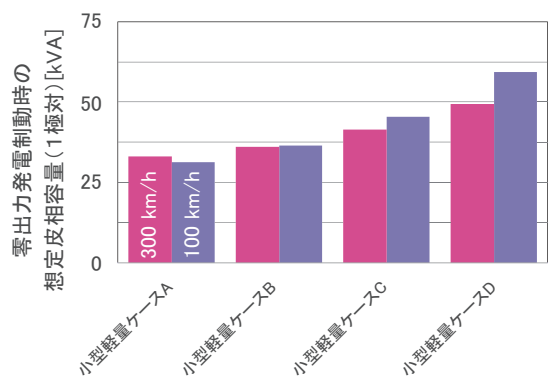


図 16 零出力発電制動時の想定皮相容量

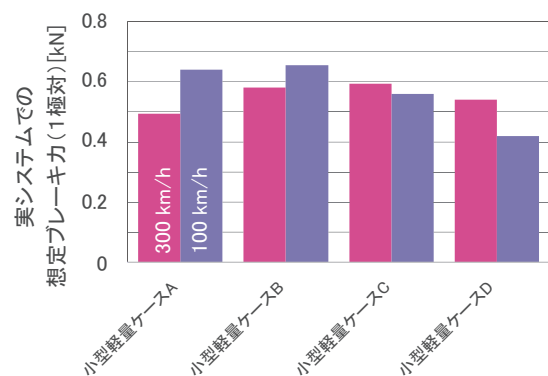


図 17 実システムでの想定ブレーキ力

電機子質量の削減率を高くしたケース C や D が適当であると言える。但し、小型軽量化と皮相容量（インバーター容量）にはトレードオフの関係（図 16）があることに留意する必要がある。

5. まとめ

本稿では、リニアレールブレーキを高速鉄道車両に適用するため、その電機子の小型軽量化に向けた検討を行った。小型軽量化にあたっては、低速域と高速域でのギャップ磁束の差異に注目した鉄心量の削減方針の下で、より高速域での性能を重視した小型軽量電機子の具体的な設計例をまとめた。次に、それら設計例の特性を電磁界解析によって評価した。その結果、高速域では鉄心減量の影響が低速域に比して小さいことを確認し、鉄心減量による小型化設計の妥当性を示した。

文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 柏木隆行, 坂本泰明, 笹川卓, 田中実, 狩野泰: リニア技術を活用した交流励磁方式レールブレーキの基礎特性, 鉄道総研報告, Vol. 22, No. 11, pp. 29-34, 2008
- 4) 坂本泰明, 柏木隆行, 長谷川均, 笹川卓, 藤井信男: リニア誘導モータを応用したレールブレーキの設計と実験的検証, 電気学会論文誌, Vol. 131-D, No. 1, pp. 127-134, 2011
- 5) 坂本泰明, 柏木隆行, 長谷川均, 笹川卓, 藤井信男: 零出力発電制動を用いたリニアモータ型レールブレーキの励磁電源レス運転, 電気学会論文誌, Vol. 131-D, No. 2, pp. 219-226, 2011
- 6) 竹内寿太郎: 「電機設計学 (改訂 2 版)」, オーム社, 1993