

# 誘導電動機の回転子スロット内空隙による 損失低減効果の解析

宮部 実\* 近藤 稔\*

**Analysis of Loss Reduction Effect of Space Provided in Induction Motor Rotor Slots**

Minoru MIYABE Minoru KONDO

Induction motors are widely used as traction motors of railway vehicles. The loss of the traction motors contributes to a large portion of energy consumption in trains. Therefore, improving the efficiency of the induction motors is very important for saving energy. In this paper, we have proposed a new rotor design for reducing the harmonic loss generated near the surface in the rotor and we have estimated the efficiency of the rotor newly designed from the result calculated based on the electro-magnetic field analysis. The result indicates that the loss of the new design rotor is lower by 3.4% than that of conventional one.

キーワード：電車，誘導電動機，損失，回転子導体，空間高調波，時間高調波

## 1. はじめに

現在，電車用の主電動機として，誘導電動機が広く用いられている。この誘導電動機とインバータで構成される駆動システムの効率は90%程度であるが，電車の省エネルギー化のためには，効率を100%に近づけていく努力が必要である。

誘導電動機の効率を向上する方法として，まず，低損失な材料を使用する方法があり<sup>1)</sup>，最近の誘導電動機では，導電率の比較的高い銅クロム合金を回転子導体を使用して損失の低減を図っている例が見られる<sup>2) 3)</sup>。

一方，誘導電動機の構造を改良することによる効率向上の可能性も考えられる。特に近年，有限要素法による電磁界解析技術の向上により，誘導電動機内での損失発生メカニズムが詳細に把握されつつあり，回転子における高調波損失が軽視できない大きさであることが明らかにされている<sup>4)</sup>。そして，電磁界解析を用いて回転子構造を最適化することで高調波損失を低減する研究も行われている<sup>5)</sup>。

しかしながら，これまで電車用の誘導電動機で発生する高調波損失に着目した研究開発に関する文献は，著者らの知る限り見受けられない。そこで著者らは，電車用の誘導電動機における高調波損失の実態を把握するため，定置試験と電磁界解析を行い，定格出力の2%程度の高調波損失が発生していることを明らかにした<sup>6)</sup>。そして，回転子スロット内に空隙を設けることにより高調

波損失を低減する新構造を考案し提案している<sup>7)</sup>。

そこで本報告では，この新構造による損失低減効果を詳細に検証するため電磁界解析を行い，発生損失の分析を行う。解析にあたっては，後述するインバータ駆動による損失増大効果も考慮するため，正弦波駆動の場合とインバータ駆動の場合それぞれについて解析を行う。また，低損失材料の使用による損失低減効果についても検証するため材料を変更した解析も行い，これらを併用して，回転子スロット内空隙による誘導電動機の損失低減効果の解析を行う。

## 2. 誘導電動機の高調波損失

### 2.1 誘導電動機内で発生する基本的な損失

誘導電動機内で発生する基本的な損失は，発生部位や発生原理により分類され，それらを表1に示す。

表1 誘導電動機内の基本的な損失成分

発生部位	損失成分
固定子巻線	固定子銅損
固定子鉄心	固定子鉄損
回転子かご形巻線	回転子銅損
回転子鉄心	回転子鉄損
軸受・通風ファン等	機械損

主な損失としては，固定子巻線において電気抵抗により発生する固定子銅損，鉄心内の渦電流やヒステリシス特性により発生する固定子鉄損および回転子鉄損，回転子のかご形巻線において電気抵抗により発生する回転子

\* 車両制御技術研究部（動力システム）

特集：鉄道車両技術

銅損、軸受や通風ファン等の機械要素で発生する機械損があり、誘導電動機の効率を算出する際には損失分離法により、試験結果を用いてこれらの損失を算出して効率を算出する方法<sup>8)</sup>が用いられる。また、その際には漂遊負荷損として、上記の基本的な損失として計算されない損失を計算する。

2.2 誘導電動機内で発生する高調波損失

電車用の誘導電動機は高電圧と振動に耐える必要性から固定子巻線は型巻コイルが用いられており、固定子スロット形状は開放スロットが用いられている。その結果、固定子と回転子の間のギャップに生じる回転磁界には多くの後述する空間高調波が重畳することが知られている<sup>9)</sup>。また、インバータによって誘導電動機は駆動されるため、後述するインバータによる時間高調波も、固定子と回転子の間のギャップに生じる回転磁界に重畳する。このことから、電車用の誘導電動機では基本的な損失以外に、空間高調波と時間高調波によって回転子に生じる高調波損失も比較的大きいことが予想される。そこで、空間高調波と時間高調波について以下に述べる。

2.3 空間高調波

誘導電動機の基礎理論では、固定子巻線に流れる電流により、固定子と回転子間のギャップにおいて、周方向に正弦波状に磁束密度が変化する磁界が形成されることを仮定している。しかし、実際には巻線を構成する一つ一つのコイルが発生する起磁力分布は方形波状であり、高調波成分を含んでいる。また、コイルは固定子鉄心のスロットに収められるため、スロットの存在によっても高調波成分（スロット高調波）が発生する。

このように、起磁力分布と固定子スロットによって発生する高調波を空間高調波と呼ぶ。図1に電磁界解析によって得られたギャップ中の磁束密度分布の例を示す。図1から顕著な高調波の重畳を確認できる。

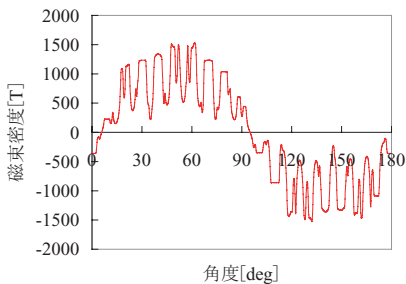


図1 ギャップ中の磁束密度分布（周方向成分）

2.4 時間高調波

インバータ駆動時には、誘導電動機に印加される電圧に高調波が含まれるため、流れる電流にも高調波成分が含まれる。図2に電磁界解析によって得られた誘導電動

機の固定子コイルに流れる電流波形の例を示す。図2から顕著な高調波の重畳を確認できる。このインバータによって発生する高調波を時間高調波と呼ぶ。

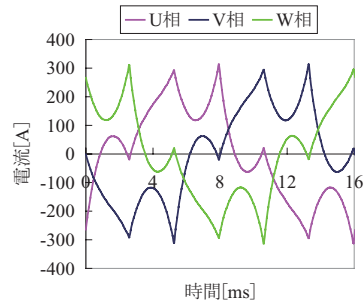


図2 インバータ駆動時の電流波形

2.5 高調波二次銅損

前述の通り、電車用の誘導電動機では空間高調波と時間高調波が存在し、損失が増える。電車用の誘導電動機では、特に空間高調波によって回転子かご形巻線に電流が流れることにより発生するジュール損失が顕著<sup>6)</sup>であり、これを本報告では高調波二次銅損と呼ぶ。

本報告で紹介する回転子スロット内空隙は、この高調波二次銅損を低減するための構造である。そこで本報告では、回転子のかご形巻線に流れる電流によって発生する損失を、基本波成分によるもの（回転子銅損）と高調波成分によるもの（高調波二次銅損）に分類する。

3. 誘導電動機の損失低減手法

3.1 低損失材料の適用

誘導電動機の損失低減手法としてまず考えられるのが低損失材料の適用である。低損失材料の適用による損失低減効果については文献1)で報告されており、定格点における効率が2.5%向上するという計算結果が得られている。本報告ではその低損失材料を適用した誘導電動機に、新構造も併用した場合の損失低減効果を解析するものであるため、ここで、低損失材料の適用について簡単に紹介する。

低損失材料の適用において、材料を変更する対象としたのは鉄心・固定子巻線・回転子導体についてである。

まず、鉄心では交番磁界により、渦電流損とヒステリシス損からなる鉄損が発生する。誘導電動機では元々鉄損を低減するために、電磁鋼板を積層して鉄心を構成している。誘導電動機では厚さ0.5mmの50A800という電磁鋼板が用いられることが多いが、電磁鋼板には様々な種類があり、さらに低損失な電磁鋼板も存在する。そこで、誘導電動機でも容易に使用可能な電磁鋼板の中で最も低損失であると考えられる厚さ0.35mmの35A300に鉄心材料を変更した。

次に、固定子巻線については、巻線の素線絶縁材料を変更した。在来線用誘導電動機ではガラス繊維による絶縁が施された電線を使用することが多いが、これを、新幹線用誘導電動機等で使用されている高耐熱樹脂を用いた電線を用いることとする。この電線は素線絶縁のための絶縁層が薄いため、同一スロット寸法に巻線を収める場合に、銅線の断面積を大きくすることができる。このため、電気抵抗を少なくでき、銅損を低減できる。

さらに、回転子導体については、導電率が高い材料に導体材料を変更した。誘導電動機では車輪径差を許容する目的等から導電率が低い黄銅等の銅合金を回転子導体に使用している。しかし、駆動システム構成の前提によっては導電率が高い材料も使用可能である。そこで、回転子導体として使用可能な材料のうち最も導電率が高い銀入り銅を材料とした。

以上の材料変更を本報告では低損失材料の適用と呼ぶ。

### 3.2 回転子スロット内空隙

次に、高調波二次銅損を低減するために回転子スロット内空隙を設けた新しい回転子構造について説明する。

前述の通り、誘導電動機における高調波二次銅損は、主に磁束密度分布に含まれるスロット高調波によって発生する。電磁界解析により損失の発生状況を確認したところ、高調波二次銅損は回転子導体中の回転子表面付近の部分で集中して発生していることが確認された。その様子を図3に示す。

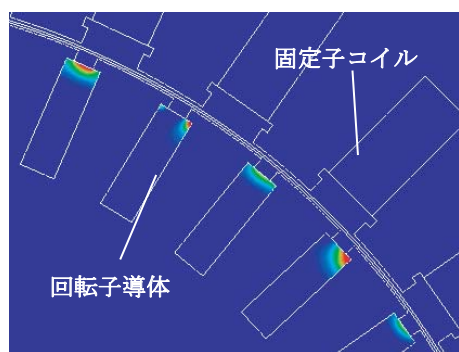


図3 高調波二次銅損の発生箇所

この原因は、スロット高調波は磁極ピッチが短く、スロット高調波による磁束線は回転子内部に深く入らず回転子表面のみを通過していくため、回転子表面付近で高調波二次銅損が発生すると推定できる。そこで、回転子表面付近の導体を取り除けば、高調波二次銅損の低減が期待できる。そこで、著者らは、図4に示すように、回転子鉄心の形状は従来のままとし、回転子導体の高さを小さくすることにより、回転子スロット内に空隙を設けた構造を考案した。

考案した新構造では回転子表面付近には導体が無くな

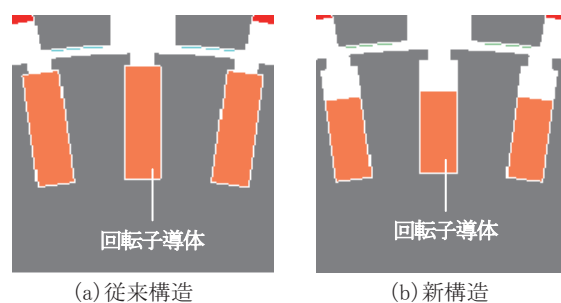


図4 回転子構造

るため、高調波二次銅損の低減が期待できる。また、回転子鉄心の寸法は変更していないため、誘導電動機の特徴はほぼ従来どおりのままとすることができる。ただし、大幅に導体高さを小さくした場合、導体断面積の縮小により回転子銅損が増大する可能性が懸念される。そこで、導体高さの短縮は必要最小限とすることが望ましい。そこで、図3の解析結果や過去の解析結果を参考に、表面から3mm 導体高さを小さくすれば十分な損失低減効果が得られると考え、本報告ではスロット寸法を従来どおりとして回転子導体の高さを3mm 小さくした構造を新構造と呼ぶ。

## 4. 誘導電動機の仕様と電磁界解析方法

本報告で解析対象とする誘導電動機の仕様、および電磁界解析方法について以下に述べる。

### 4.1 解析対象とする誘導電動機の仕様

本報告で解析対象とする誘導電動機は、標準的な通勤電車を想定した。誘導電動機の共有部分の仕様は、表2に示すように、日本鉄道車輛工業会規格に基づいている。なお、本誘導電動機は文献1)で低損失材料による高効率化の検討の際に用いたものと同一である。一方、誘導電動機の変更部分の仕様を表3にまとめる。表3に示すように、一般的な通勤形電車に用いられている仕様を仕様A、低損失材料のみを適用したものを仕様B、低損失材料と回転子スロット内空隙を併用したものを仕様Cとした。

また、誘導電動機の要目の一部を表4に示す。

表2 誘導電動機の仕様（共通部分）

電動機方式	三相かご形誘導電動機
装荷方式	台車装荷式（3点片持ち支持）
冷却方式	自己通風方式（ろか器通風式）
駆動方式	たわみ軸継手式平行カルダン方式
定格出力 (1時間定格)	190kW-1825/min-1100V
絶縁種別	H種

特集：鉄道車両技術

表3 誘導電動機の仕様（変更部分）

		仕様 A	仕様 B	仕様 C
鉄心	50A800	○		
	35A300		○	○
固定子巻線	ガラス繊維	○		
	高耐熱樹脂		○	○
回転子導体	黄銅	○		
	銀入り銅		○	○
回転子構造	従来構造	○	○	
	新構造			○

表4 誘導電動機要目（単位：mm）

相数/極数	3相/4極
固定子スロット数	36
回転子スロット数	46
固定子鉄心外径-内径	φ 530-340
鉄心長	180
ギャップ長	1.7
固定子スロット寸法	回転子スロット寸法

4.2 電磁界解析方法

低損失材料の使用による損失低減効果および、回転子スロット内空隙による損失低減効果の検証のため、有限要素法による電磁界解析を行った。電磁界解析の計算にあたって用いた電磁界解析ソフトは、JMAG-Studio9.0である。計算モデルでは対称性を考慮し、1/2モデルを用いて計算負荷の軽減を図った。

メッシュの作成にあたって、計算精度と計算時間の両方を考慮する必要がある。そこで、磁束密度変化の激しいギャップ近傍の回転子導体表面、および高調波二次銅損の発生する回転子導体表面から3mmまでの領域について、特にメッシュの細分化を図ることとした。その結果、回転子導体断面(7.8mm×25mm)に対してメッシュサイズは、ギャップ近傍の回転子導体表面で0.5mm、回転子導体表面から3mmまでの領域は0.8～1.0mmとし、それ以外の領域(固定子コイル・固定子鉄心・回転子鉄心など)は2.0～10mmとした。以上のことを踏まえ、実

際にメッシュ分割した計算モデルの概略図を図5に示す。また、時間刻みは、1電気周期を180分割したものを1ステップとした。

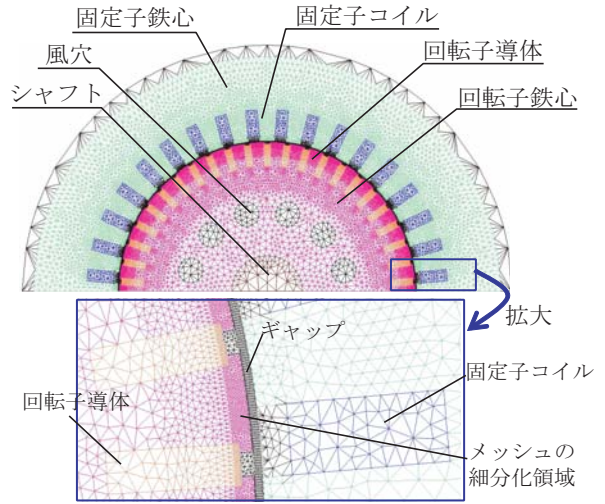


図5 計算モデルの概略図（1/2モデル）

回路モデルを検討するため、二次元モデルと誘導電動機の構造との比較を行った。誘導電動機の構造を図6に示す。二次元モデルでは、図5に示したように誘導電動機の鉄心内の固定子コイルや回転子導体について考慮されているが、図6に示すコイルエンド部とエンドリング部については考慮されないため、これらの部分を回路モデルに組み込む必要がある。

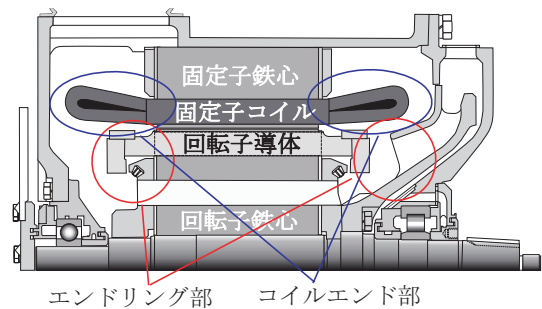


図6 誘導電動機の内部構造

まず、コイルエンド部では漏れ磁束(コイルエンド漏れ)が発生することから、この漏れリアクタンスを回路モデルに組み込むこととした。この漏れリアクタンス(X)は、固定子および回転子の構造から次式で表される<sup>10)</sup>。

$$X = fK' S_{n1}^2 2pq_1 l_n \times 10^{-8} \left( 2.36 \frac{l_1}{l_n} q_1 \right) \quad (1)$$

ただし、 $f$ : 周波数、 $K'$ : 巻線ピッチ係数、 $S_{n1}$ : 有効導体数、 $p$ : 極対数、 $q_1$ : 毎相毎極スロット数、 $l_n$ : 鉄心長、 $l_1$ : 固定子コイル端長さである。

一方、エンドリング部では、この部分の抵抗を二次元モデルに組み込む必要がある。エンドリング部と回転子

導体とを合わせた回転子全体の抵抗値 ( $r_2$ ) は、次式で表される<sup>11)</sup>。これにより求められた回転子全体の抵抗値を回転子導体断面積で除算して求められる抵抗率は、エンドリング部の抵抗も考慮したものになる。このようにして求めた抵抗率を回転子導体の抵抗率とし、エンドリング部の抵抗を考慮した。

$$r_2 = K \times \rho \times \frac{4m_1}{N_2} (k_{\omega 1} \omega_1)^2 \times \left( \frac{l_b}{A_b} + \frac{N_2 \pi D_r}{2\pi^2 p^2 A_r} \right) \quad (2)$$

ただし、 $K$ ：換算係数、 $\rho$ ：回転子導体の抵抗率、 $m_1$ ：一次相数、 $N_2$ ：バーの数、 $k_{\omega 1}$ ：一次巻線係数、 $\omega_1$ ：一次一相のコイル巻数、 $l_b$ ：バーの長さ、 $A_b$ ：バー断面積、 $D_r$ ：エンドリングの直径、 $p$ ：極対数、 $A_r$ ：エンドリングの断面積である。

正弦波駆動時とインバータ駆動時の電磁界解析を行うため、電源モデルとして正弦波電源とインバータ電源を用いた。正弦波電源は端子間電圧をAC1100[V]の三相正弦波交流とした。またインバータ電源として、入力電圧をDC1500[V]とし、1パルスモードでのインバータ駆動とした。図7に例としてU-V間での出力電圧波形を示す。

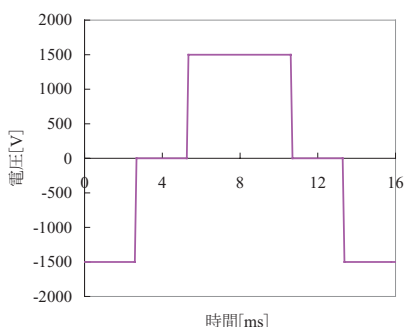


図7 インバータ出力電圧波形 (1パルスモード)

### 4.3 高調波二次銅損の分離方法

4極機の誘導電動機の場合、回転磁界は電源の基本周波数の1/2で回転する。そして、この回転磁界に対して、回転子が少し遅れて回転 (すべり) することによって誘導電動機内でトルクが発生する。特にすべりが零の場合、回転磁界と同期して回転子が回転し、この状態を無負荷同期回転と呼ぶ。無負荷同期回転では、すべりが零なので回転子側に基本波成分の電流は流れず、この基本波成分の電流による回転子銅損は発生しない。すなわち、無負荷同期回転時に発生する回転子銅損は、高調波による損失 (高調波二次銅損) と考えることができる。これらのことから、無負荷同期回転時に発生する回転子銅損を高調波二次銅損とし、定格回転時に回転子で発生する銅損から高調波二次銅損を減算したものを回転子銅損とした。

これらにより、解析対象とした誘導電動機に対して、それぞれ無負荷同期回転の場合と定格回転の場合について電磁界解析を行った。

## 5. 損失低減効果の解析結果

### 5.1 回転子スロット内空隙の効果

回転子スロット内空隙による高調波二次銅損の低減効果を確認するため、無負荷同期回転時に正弦波駆動によって回転子導体に発生する損失について、仕様Bと仕様Cで比較を行った。その結果を図8に示す。

図8において (a) には仕様B、(b) には仕様Cにおける損失の発生状態を示している。両者のカラー表示レベルは同一であり、表示が赤いほど損失が大きいことを示している。この図から、仕様Bに比べて仕様Cにおける回転子導体表面での損失が低減しており、回転子スロット内の空隙により、高調波二次銅損が大幅に低減された。



図8 回転子スロット内空隙の効果

### 5.2 正弦波駆動時の損失比較

解析対象の仕様A、仕様B、仕様Cの誘導電動機について、正弦波駆動時の損失計算を行った。評価にあたって、出力と各損失を合計した入力電力に対する各損失の割合を計算し、比較を行った。その結果を図9に示す。

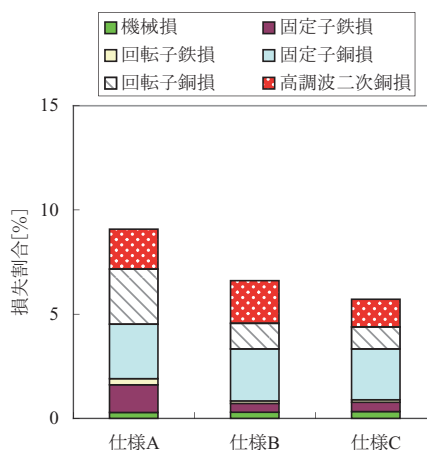


図9 正弦波駆動時の損失比較

正弦波駆動時の合計損失は、仕様Aが9.1%、仕様Bが6.6%であり、低損失材料の使用によって損失が2.5%減少する。その中でも特に、固定子鉄損・回転子銅損の減少が顕著であり、固定子鉄損では1.0%、回転子銅損では1.4%減少する。

一方、仕様Cの合計損失は5.7%であり、仕様Bに比

特集：鉄道車両技術

べてさらに合計損失が0.9%減少する。これは図8で示した高調波二次銅損の減少によるものであり、回転子スロット内空隙による効果が確認できる。

以上のことから、正弦波駆動時は、一般的に用いられる仕様（仕様A）のものに比べて、低損失材料と回転子スロット内に空隙を設ける回転子の新構造の併用（仕様C）により、3.4%の効率向上の可能性が示された。

5.3 インバータ駆動時の損失比較

次に、インバータ駆動時の合計損失について比較を行った結果を図10に示す。

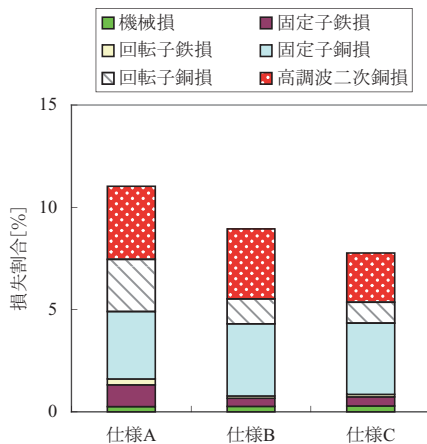


図10 インバータ駆動時の損失比較

この図によれば、正弦波駆動時と比較して、インバータ駆動時の損失の増加が示され、特に高調波二次銅損の増加が顕著である。これはインバータ駆動による時間高調波の影響と考えることができる。特に仕様Aの合計損失は、正弦波駆動時には9.1%であったが、インバータ駆動時には11%まで増加している。これに対して、仕様Cの合計損失は8%程度に抑えられることが示された。

以上のことから、インバータ駆動時においても、一般的に用いられる仕様（仕様A）のものに比べて、低損失材料と回転子スロット内に空隙を設ける回転子の新構造の併用（仕様C）により、3.3%の効率向上の可能性が示された。

6. まとめ

誘導電動機の高効率化を図るために、誘導電動機の中

で発生する損失の中でも高調波二次銅損に着目し、その損失低減のために、回転子スロット内に空隙を設ける構造を提案した。そして、この新構造と低損失材料との併用による損失低減効果を電磁界解析により検討した。

その結果、定格回転時、正弦波駆動・インバータ駆動のいずれの場合でも低損失材料と回転子の新構造と併用により、一般的に用いられる仕様のものよりも3.4%程度の効率向上が図れることを確認した。

今後は、実際に回転子スロット内に空隙を設けた誘導電動機を試作し、この計算結果と比較し、そして各運転ポイントでの損失計算結果をもとに走行シミュレーション時の損失評価を行っていききたい。

文献

- 1) 近藤稔：主電動機の高効率設計による電車の省エネルギー効果，鉄道総研報告，23巻，11号，pp.29-34，2009
- 2) 萩原善泰，古屋政嗣，森俊弘：東海道・山陽新幹線直通用次世代車両N700系量産先行試作車の概要（3），R&M，Vol.13，No.8，pp.4-8，2005
- 3) 板垣匡俊，木島裕之，他：小田急電鉄4000形の低騒音化技術，J-Rail 2007，2007
- 4) 山崎克巳：固定子及び回転子の高調波電磁界を考慮した誘導電動機の損失算定，電気学会論文誌D，Vol.123，No.4，pp.392-400，2003
- 5) H. P. Nee：Rotor slot design of inverter-fed induction motors, Seventh International conference on electrical Machines and Drives (conference Publication No.412), pp.52-56, 1995.
- 6) 近藤稔，海老塚龍次，安永晃：鉄道車両駆動用誘導電動機の高調波二次損失，電気学会 回転機研究会資料，RM-08-124，2008
- 7) M. Kondo, R. Ebizuka, and A. Yasunaga：Rotor Design for High efficiency Induction Motors for Railway Vehicle Traction, ICEMS2009, DS1G3-9, 2009.
- 8) 日本工業規格：JIS E 6102 鉄道車両用—交流電動機—試験方法（1999）
- 9) 松岡孝一，近藤圭一郎，小林芳隆，白石茂智：鉄道車両駆動用車輪一体形主電動機の開発，電気学会論文誌D，Vol.121，No.11，pp.1176-1184，2001
- 10) 電気学会：電気機器設計，第二次改訂版，p.347，1998
- 11) 電気学会：電気機器設計，第二次改訂版，p.359，1998