

# キャリア高調波を界磁エネルギー源とする共振結合形モータと その最適制御手法の創生

## Study on Self-Excited Wound-Field Synchronous Motor Utilizing Carrier Harmonics with LC-Resonance Technique

研究代表者 静岡大学工学部 助教 青山真大  
Masahiro Aoyama

This study proposes a technique applying LC resonance in self-excited wound-field rotor rectifier circuit which is utilizing space harmonic and carrier harmonics for its performance improvement in low speed region. The rotor magnetomotive force can be improved by setting a resonance frequency of the LC resonance circuit to the carrier harmonics. Its usefulness was shown by FE-analysis. Then, the basic experiment was conducted on the prototype to demonstrate that the drive characteristics can be improved by the resonance principle. The actual machine drive test was conducted with the fundamental frequency in the low speed range as the resonance frequency. The adjustable speed drive characteristics and efficiency maps are demonstrated via prototype.

### 要旨

地球温暖化対策として世界的に CO<sub>2</sub>削減の取り組みが行われている。産業界や自動車産業、エネルギー発電分野など様々な用途でモータは幅広く使われており、それらの用途は年々増加の傾向にある。今日、高トルク密度で高効率な永久磁石式同期モータが広く採用されているが、それらに用いられているネオジム磁石は Dy や Tb などの重希土類が添加されていることが多い。それらのレアアースは価格の高騰や供給不安定性が懸念され、ネオジム磁石使用量を低減できる技術開発が産業界から強く望まれている。本研究では従来損失として消費されていたモータ構造上または制御上不可避に発生する空間高調波およびキャリア高調波を利用した磁石使用量削減技術を企図するものである。磁石の 50%を電磁石に代替し、その電磁石はダイオード整流回路と LC 共振回路にロータ上で結線されている特長を有する。ロータ巻線回路に前述の高調波磁束が鎖交することで起電力を得ることができ、自己励磁原理によって界磁起磁力を自励できる。電磁界解析による原理構築および試作による実機基礎検証を行い、基盤技術の確立を行うことができた。

### 1. まえがき

今日の省エネルギー化社会に向けた動向において、産業界や自動車業界、エネルギー発電分野など様々な用途において用いられるモータの高効率化が

望まれている。今日では高トルク密度且つ高効率駆動が可能という観点から永久磁石式同期モータが広く採用されている<sup>(1)-(3)</sup>。それらに用いられるネオジム磁石は Dy や Tb などの重希土類が添加されることが多い。それらのレアアースは価格高騰や供給不安定性が懸念され、ネオジム磁石使用量を低減できる技術開発が産業界から強く望まれている。同期モータのステータ構造は大別すると分布巻構造と集中巻構造の 2 タイプあり、小型化の観点においては集中巻構造に優位性がある。一方、集中巻構造は構造上、不可避に空間高調波が発生してしまうという課題があり、従来技術ではその高調波磁束による損失を如何に低減するかという視点で磁性材料の改良や磁気回路の改良で研究が行われてきた<sup>(4)-(6)</sup>。ドライブの観点からは可変速駆動を実現するためにインバータ駆動されることが多いが、PWM 制御時にキャリア高調波磁束が不可避に発生してしまうという問題があった<sup>(7)</sup>。先行研究では空間高調波に対するアプローチと同様に、制御方式を改良することでキャリア高調波を低減する試みや、磁気回路または磁性材料の改良によってキャリア高調波に起因した損失を低減する研究が広く行われてきた<sup>(4)-(7)</sup>。

本研究では、従来の研究手法とは視点が異なり、モータ構造上またはモータ制御上不可避に発生してしまう高調波磁束を磁石使用量半減に利用することを企図するものである。具体的には永久磁石の 50%を電磁石に置き換えた巻線界磁併用のロータ構造と

し、そのロータ巻線はダイオード整流回路と電磁共振回路で構成される。従来、巻線界磁技術はロータ巻線に給電するためにスリップリングなどの機械的摺動接点を用いて給電していたが、本研究では自己励磁原理によって非接触給電を行う特長を有する。ロータ側の巻線は受電コイルと見立てることができ、ステータ側の巻線は送電コイルと見立てることができる。本モータは同期駆動に分類されるため、ステータで発生する回転磁界に対してロータは同期回転するが、非同期の高調波成分がロータ巻線に鎖交した場合はそれによって誘導起電力が発生する。その誘導起電力はロータ巻線に接続された整流回路によって整流されることで自励的に電磁石を形成するための界磁電流を得ることができる。

次節以降、本研究のモータ構造の説明および電磁界解析による駆動特性予測を行った結果を示す。そして原理検証機を用いて実機基礎検証を行った結果を示す。

## 2. 提案モータ

### 2.1 自己励磁原理

電機子に発生する第2次空間高調波を可変界磁のエネルギー源として利用する自己励磁原理について述べる。自己励磁原理について簡単に表した図を図1に示す。集中巻ステータにおいて電機子に発生する第2次空間高調波はロータの回転に同期しておらず、逆相である。そのため、第2次空間高調波によりロータ上で磁束密度変動が生じる。ここで、図1に示すようにロータに励磁コイル(I-coil: Induction coil), 界磁コイル(F-coil: Field coil), ダイオード整流器を設ける。I-coilでは第2次空間高調波による磁束密度変動により起電力が生じる。その起電力をダイオード整流器を用いて整流することでI-coilとダイオード整流器は疑似的に直流電源を形成する。これをF-coilに接続することでF-coilには直流の界磁電流が流れ、巻線界磁を形成する。以上が自己励磁原理である。

### 2.2 提案モータの構造

提案モータの径方向断面図を図2に示し、主要諸元を表1に示す。ロータの磁気回路は1極対毎に磁石磁極と自励巻線界磁極が交互にある構造となって

いる。これにより、極対間でバランスがとれた界磁、パーミアンス分布を実現し、電機子誘起電圧の偶数成分を抑制している。自励巻線界磁ではF-coilの内側にI-coilを配置する構造により、I-coilに第2次空間高調波が多く鎖交し、大きな起電力が得られる設計としている。提案モータは原理検証機として試作したため、最大出力が400 W以下の小型モータとしている。

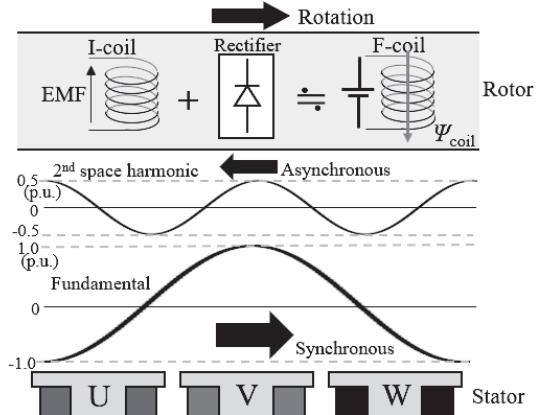


図1 自己励磁の原理

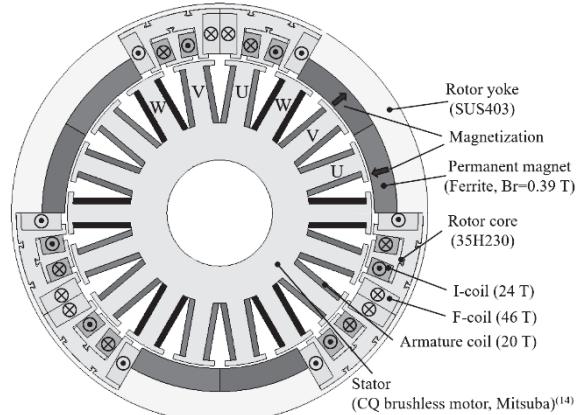


図2 提案モータの径方向断面図

表1 提案モータの主要諸元

Number of poles and slots	12 poles, 18 slots
Armature winding connection	All-series, Y-connection
Stator outer diameter	95 mm
Rotor outer diameter	130 mm
Stack length of stator	27 mm
Axial length of magnet	40 mm
Armature coil resistance	210 mΩ/phase
I-coil resistance	70 mΩ/coil
F-coil resistance	203 mΩ/coil

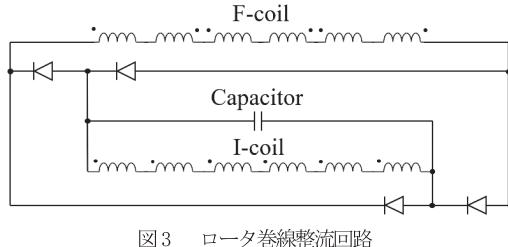


図3 ロータ巻線整流回路

## 2.2 ロータ巻線整流回路

図3にロータ巻線回路を示す。図3においてコンデンサCがない場合、I-coilによる内部インピーダンスにより電圧降下が発生し、負荷(F-coil)へ電力供給が阻害される。内部インピーダンスをもつ電源から最大の電力を取り出す方法として、負荷インピーダンスの整合をとることが良く知られている。インピーダンスの整合条件は負荷インピーダンスが内部インピーダンスの複素共役となることである。つまり、リアクタンスの整合については回路の合成リアクタンスが0であることが条件になっている。提案モータのロータ巻線回路の内部インピーダンスは誘導性である。したがって、負荷モータのロータ巻線整流回路にコンデンサを追加してインピーダンス整合をとることで負荷(F-coil)への電力供給を増加させることができる。

## 3. 電磁界解析

### 3.1 キャリア高調波自励の検証

キャリア高調波の利用技術の検証として、図2とは異なる磁石を用いない自励式巻線界磁同期モータを用いる。永久磁石がキャリア高調波自励に及ぼす影響を除外して検証を行うためである。ロータ巻線回路においても基礎検証として、図3に示すロータ回路ではなく、図4に示すロータ回路で検証を行う。最終的には空間高調波とキャリア高調波による自励を1つのI-coilで行うが、本稿ではキャリア高調波自励技術確立を目的に、空間高調波とキャリア高調波による自励をそれぞれ別のI-coil(2種類のI-coil)を用いて行った。図5に電磁界解析によってモータ構造上不可避に発生する第2次空間高調波と、モータ制御上不可避に発生するキャリア高調波を可視化した結果を示す。同図に示すように、ロータ巻線を備えたロータ突極部に両高調波磁束が鎖交していることを確認できる。ここで、キャリア周

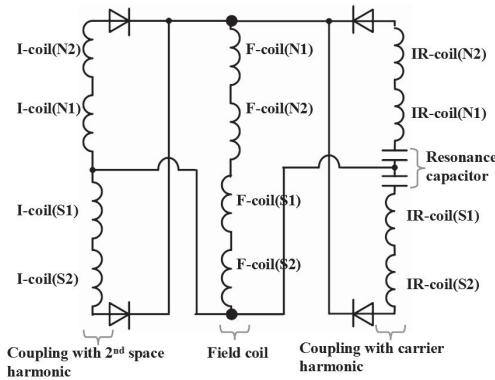
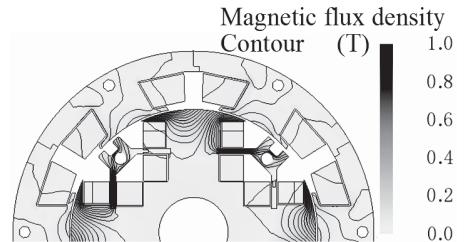
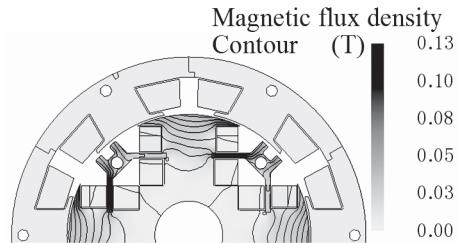


図4 空間高調波とキャリア高調波を利用できるロータ巻線回路



(a) Second-order space harmonic.



(b) Carrier harmonic (2 kHz).

図5 電磁界シミュレーションによる高調波磁束の可視化

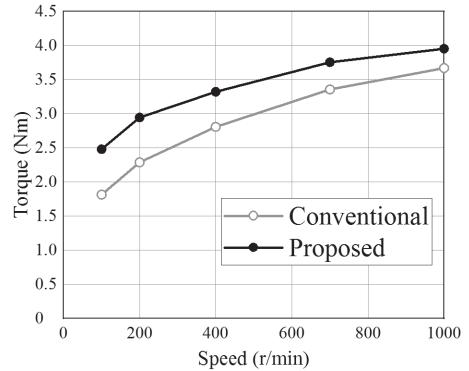


図6 キャリア高調波利用によるトルク特性向上

波数は2 kHzの場合を示している。図4の回路において、LC直列共振回路の共振周波数をキャリア周波数の2 kHzとすることでキャリア高調波と共に共振して多くの起電力を得ることができる。その結果、図6に示すようにキャリア高調波との共振回路を有しない場合(Conventional)に対して、キャリア高調波

との共振回路を有すること (Proposed) でトルク特性の向上を確認できる。

### 3.2 キャリア高調波励磁に適した制御検討

キャリア周波数はモータ制御側で任意に変更できるため、キャリア周波数およびそれに合わせて共振周波数を変化させたときにキャリア高調波による自己励磁性能がどのように変化するのかの検証を行った。起電力および回転速度を一定としたときのキャリア周波数に対するトルク特性を図 7、界磁電流特性を図 8 に示す。両図よりキャリア周波数の増加とともにトルク特性が向上していることがわかる。これはロータ共振回路に鎖交するキャリア高調波が高周波化することで起電力が増加するためである。一方、電機子インダクタンスによってキャリア高調波振幅が減少していくため、キャリア周波数の増加に対して線形増加にはならなかった。このことから電機子インダクタンスも重要な設計パラメータになると言え、その最適化検討は今後の課題といえる。

## 4. 実機検証

### 4.1 試作機

実機検証では将来的なキャリア高調波による強め界磁効果を評価することを見据えて、まずは図 3 のロータ巻線回路構成で共振周波数近傍における駆動特性向上の実証を試みる。実機検証で使用するコンデンサは 140  $\mu\text{F}$  と 308  $\mu\text{F}$  の 2 種類を用意した。実際に使用するコンデンサの外観を図 9 に示す。コンデンサはロータに取り付けるため、スペースの制限があることから小型で大容量の積層セラミックコンデンサを整列させたコンデンサアレイを採用した。このコンデンサアレイは図 9 に示すように積層セラミックコンデンサを基板の表裏に合計 28 個整列させている。これによりおよそ 1 cm 角の大きさで 100  $\mu\text{F}$  以上の大容量が得られる。次に、コンデンサ回路構成を図 10 に示す。1 つのコンデンサアレイ内において 28 個のコンデンサを全並列としている。そのコンデンサアレイを 2 直列にして所望の 140  $\mu\text{F}$ , 308  $\mu\text{F}$  の容量且つ耐圧 50 Vdc を確保している。

図 11 に試作機を示す。モータ背面にてロータ巻線整流回路を結線している。コンデンサアレイは 3D プリンターで製作した専用のカバーを被せ、ロータヨ

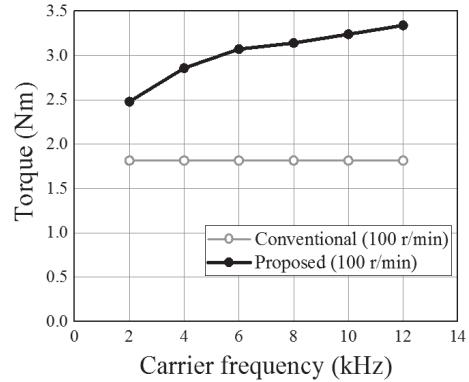


図 7 起電力一定時のキャリア周波数に対するトルク特性

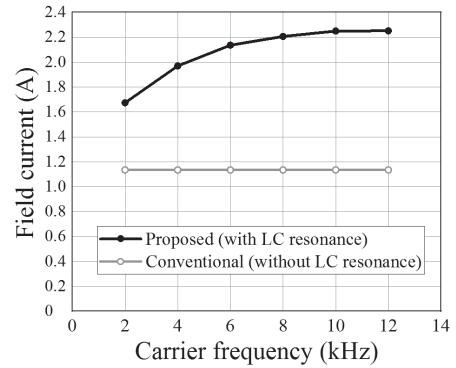


図 8 起電力一定時のキャリア周波数に対する界磁電流特性

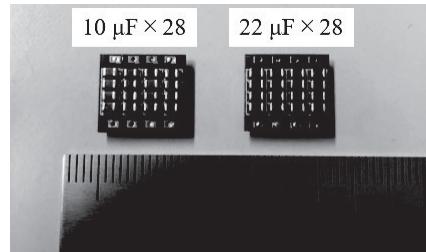


図 9 実機に搭載した共振用コンデンサアレイ

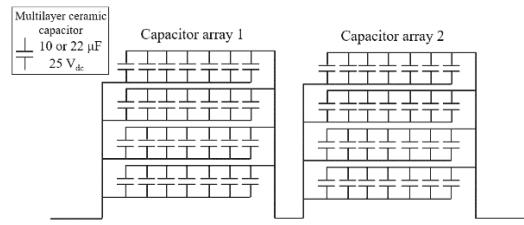


図 10 図 9 のコンデンサアレイ回路

ークにねじ止めして取り付けている。コンデンサアレイとロータヨーク間は絶縁しを用いて絶縁している。

### 4.2 検証結果

実機試験環境を図 12 に示す。Myway プラス製の汎用インバータ、コントローラを用いて試作機を PMSM のベクトル制御で駆動した。キャリア周波数は 10

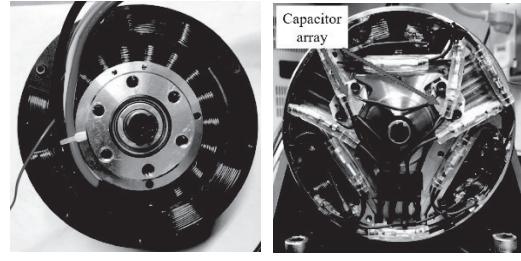
kHz としている。今回比較するモデルは次の4つとし、全て同一のモータでロータ巻線整流回路のみを変更している。

- ・整流回路を開放したベンチマーク
- ・整流回路をコンデンサなしで結線した提案モータ1
- ・整流回路に 140 uF のコンデンサを追加した提案モータ2
- ・整流回路に 308 uF のコンデンサを追加した提案モータ3

この4種類のモデルにおける  $i_d = 0$ ,  $i_q$  一定時の回転速度-トルク特性を図13に示す。ベンチマークに対して他の提案モデルはトルクが向上しているが、これは空間高調波によって自励する巻線界磁によるものである。同図より、電流値が小さい場合はトルクの変化がみられないが、電流値の増加とともにトルクの変化が大きくなっていることがわかる。これは、電機子起磁力が増加したことにより電機子起磁力に重畠する第2次空間高調波も受動的に大きくなり、I-coil の起電力がおおきくなるからである。コンデンサを接続した場合と接続しない場合で比較すると、コンデンサを接続した方が低速回転域のトルクが大きくなり、高速回転域のトルクが小さくなっていることが確認できる。これは 140 uF の場合は共振周波数を約 1000 r/min, 308 uF の場合は共振周波数を約 1500 r/min になっていることに起因する。

以上より、コンデンサを用いてロータ巻線回路力を調整し共振原理を利用して駆動特性の向上を確認することができた。

次に MTPA 制御駆動した場合の可变速特性を比較する。直流バス電圧 48 Vdc, 最大電機子電流 12 Arms (電流密度 15 A/mm<sup>2</sup>) の条件における可变速特性を図14に示す。図14において低速回転域におけるベンチマークに対する各提案モータのトルク増加量を表2にまとめる。表2より提案モータ1に比べてコンデンサを追加した提案モータ2, 3 は低速回転域のトルク増加量が大きくなっている。低速回転域のトルク特性が向上したことがわかる。一方、回転速度 1500 r/minにおいて提案モータ1と提案モータ3を比較すると提案モータ3ではトルクが低下している。これはコンデンサ容量が 308 uF と大きく、基底回転速度から大きく外れた低速回転域に共振周波数がある影響と考えられる。



(a) Front view.  
(b) Back view.

図11 試作機外観

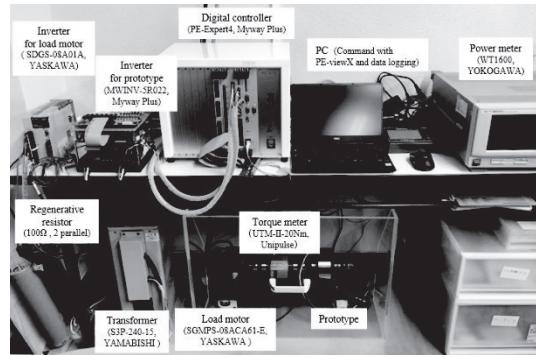
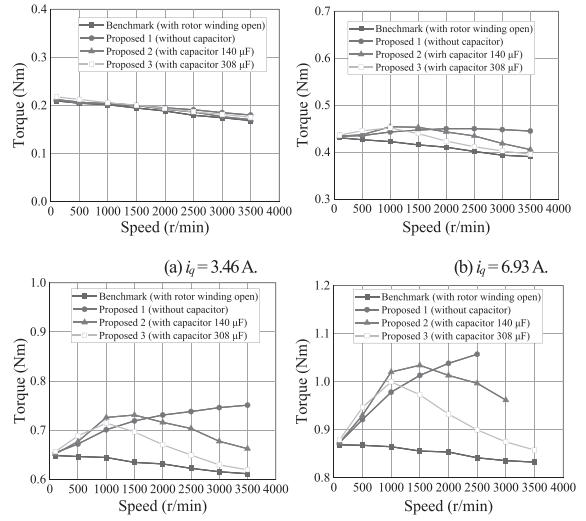


図12 実機評価環境



(a)  $i_q = 3.46$  A.  
(b)  $i_q = 6.93$  A.  
(c)  $i_q = 10.39$  A.  
(d)  $i_q = 13.86$  A.

図13  $i_d=0$  制御時の電機子電流に対する可变速特性

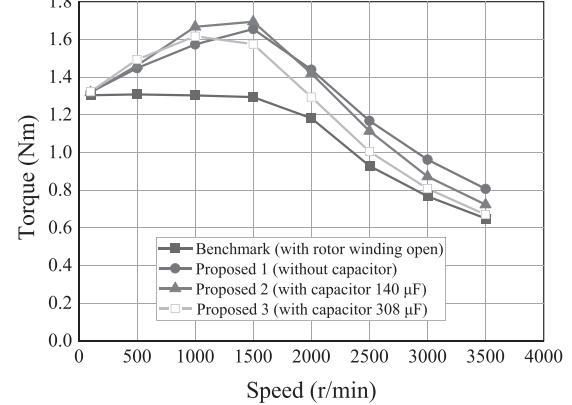


図14 可变速特性

本結果から、ロータ巻線回路で設計した共振周波数近傍で界磁量を強めることができ、結果としてトルク特性が向上することが明らかになった。さらに磁石式同期モータの場合、高回転域で界磁量を弱める弱め界磁制御が用いられることが一般的であるが、提案モータの場合は共振周波数の設計に回転速度に対してロータ巻線リアクタンスが受動的に変化する。よって自動的に界磁量を低減させることが可能になり、新たな自動可変界磁という技術分野を確立することが可能になる。

表2 トルク増加量比較

	Increased torque (Nm)		
	500 r/min	1000 r/min	1500 r/min
Proposed 1 (without capacitor)	0.14	0.27	0.36
Proposed 2 (with capacitor 140 $\mu$ F)	0.15 (+7 %)	0.36 (+33 %)	0.40 (+11 %)
Proposed 3 (with capacitor 308 $\mu$ F)	0.19 (+36 %)	0.31 (+15 %)	0.28 (-22 %)

## 5.まとめ

本研究では電磁界解析によるキャリア高調波自励の検証および試作機にて共振回路適用による駆動特性向上を実証した。本研究成果を基盤として、今後は試作機によるキャリア高調波自励による駆動特性（トルク特性や可变速特性）を明らかにする予定である。加えて、電動車車載サイズ（10 kW）の試作機を作成し、実用化の検証を行っていく予定である。

## 6. 謝辞

本研究は、公益財団法人 マツダ財団の第35回研究助成を受けて行ったものであり、同財団に深く感謝いたします。

## 発表論文

### 【査読付き学術論文】

- [1] 熊井巧・青山真大：「空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータの提案と実機検証」、電気学会論文誌D, Vol. 141, No. 4, pp. 1-12, 2021年4月号掲載予定。
- [2] 熊井巧・青山真大：「空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータへのロータ巻線回路率調整適用の実機検証」、電気学会論文誌D, Vol. 141, No. 6, pp. 1-10, 2021年6月号掲載予定。

## 【口頭発表】

- [3] 熊井巧・青山真大：「空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータの提案と可变速特性」、電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, MD-20-096, 2020年9月4日
- [4] 熊井巧・青山真大：「空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータの実機検証」、電気学会マグネティックス/モータドライバ/リニアドライブ合同研究会, MD-20-167, 2020年12月11日
- [5] 熊井巧・青山真大：「空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータへのLC共振利用における低速域性能向上」、電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, MD-21-024, 2021年1月21日
- [6] 青山真大・熊井巧：「空間高調波自励巻線界磁同期モータにおける可变速特性的考察」、電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, MD-21-025, 2021年1月21日
- [7] 熊井巧・青山真大：「空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータへのLC直列共振適用と実機検証」、電気学会モータドライバ/家電民生合同研究会, MD-21-070, 2021年3月3日
- [8] 熊井巧・青山真大：「空間高調波を利用した受動可変界磁PMモータへのLC共振利用による可变速特性的拡大」、電気学会令和3年全国大会, No. 5-031, 2021年3月9日

## 参考文献

- (1) Y. Sato, S. Ishikawa, T. Okubo, M. Abe, and K. Tamai: “Development of High Response Motor and Inverter System for the Nissan LEAF Electric Vehicle”, SAE Technical Paper 201101-0350, 2011年.
- (2) 岩井明信・岡澤俊雄・本庄聰・鈴森洋史：「新ゼロエミッション車における主駆動用モータの開発」、電気学会論文誌D, Vol. 139, No. 10, pp. 832-837, 2019年10月.
- (3) 貝森正明・立花武・小坂卓・道木慎二・太田豊：「自動車の電動化における最新技術動向」、電気学会論文誌D, Vol. 139, No. 6, pp. 535-542, 2019年6月.
- (4) 榎本裕治：「ラジアルギャップ型アモルファス金属鉄心モータの基礎検討」、電気学会論文誌D, Vol. 139, No. 6, pp. 606-611, 2019年6月.
- (5) 北尾純士・高橋康人・藤原耕二・阿波根明・松尾哲司・大穀滉裕：「永久磁石同期モータのヒステリシス特性を考慮した有限要素磁界解析」、電気学会論文誌D, Vol. 139, No. 5, pp. 513-522, 2019年5月.
- (6) 中野正嗣・引原隆士：「永久磁石モータのインピーダンスを用いたキャリア高調波による回転子漏電流損の計算手法」、電気学会論文誌D, Vol. 137, No. 8, pp. 663-672, 2017年8月.
- (7) 高畑良一・涌井真一・宮田健治・野間啓二・妹尾正治：「インバータの変調方式が永久磁石同期モータの特性に及ぼす影響」、電気学会論文誌D, Vol. 134, No. 12, pp. 997-1005, 2014年12月.