

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：53901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22760216

研究課題名（和文） 脱レアアースを目指す自動車用高出力密度モータの研究開発

研究課題名（英文） Research and development of Non Rare-Earth Permanent Magnet Design-Oriented Electric Machines for Electric Vehicles

研究代表者

加納 善明 (KANO YOSHIAKI)

豊田工業高等専門学校・情報工学科・助教

研究者番号：80456714

研究成果の概要（和文）：本研究では、市販ハイブリッド車（HEV）の主機用モータを想定し、プリウスなどに搭載される埋込磁石同期モータ（IPMSM）に匹敵する性能を維持した上で、脱レアアースで出力重量密度の向上が期待できる新しい界磁巻線型同期モータを提案・検討している。さらに、三次元有限要素非線形磁場解析を用いて電磁設計を行い、現行HEVに搭載されている最大出力123kWのIPMSMとほぼ同等の出力性能を満たした上で、出力重量密度を1.44倍に向上できることを示した。設計モータの妥当性を確認するため、ダウンスケール機的设计・試作を行い、実験的に設計モータの原理的有用性を確認した。

研究成果の概要（英文）：This paper presents drive performance possibilities of brushless synchronous machine with wound-field excitation using SMC core for HEV applications. The proposed machines have no brush or slip ring, rare-earth magnet and employs only wound-field excitation. The structures and the basic working principles for the machine are overviewed. The design target is the motor with maximum power more than 123kW and maximum power density more than 3.5kW/kg. The performance analyses of the designed machines based on 3D-FEA show that the machine meet the target requirements. Finally, some experimental results using a tested down scale machine are demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000円	240,000円	1,040,000円
2011年度	2,300,000円	690,000円	2,990,000円
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000円	930,000円	4,030,000円

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器

## 1. 研究開始当初の背景

現代の我々の生活は、モータ無くしては成

立しない。古くは直流モータ、交流の単相／三相誘導モータ、交直両用のユニバーサルモ

ータなどが知られるが、小型・軽量、高効率、広い可変速範囲という観点で飛躍的な性能向上を遂げたのが、1990年代中頃に民生用エアコン圧縮機駆動装置に搭載された図1に示す埋込磁石形同期モータ(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 以下 IPMSMと略記)である。その原点は、直流モータの整流子とブラシの機械的な整流作用を半導体スイッチング作用で置き換えたブラシレス

DCモータであり、IPMSM 実用化の土台の一つは、ベクトル制御理論の発展、パワーデバイスの技術革新、電力変換器の回路技術・実装技術ならびに制御用MPUの技術成熟による低コスト化である。しかしながら、実質的に小型・軽量・高効率化をもたらしたのは、最大エネルギー積がアルニコ/フェライト磁石の10倍を超える30MG0e超の希土類系磁石(Nd-Fe-B)であり、この希土類系磁石の技術発展無くして、世界の自動車市場で牽引的な役割を果たす日本メーカによるハイブリッド自動車(以下、HEVと略記)は存在しないといっても過言ではない。現在、IPMSMを筆頭に希土類系磁石を用いたモータの普及は著しく、必然的に希土類系磁石の使用量も増加の一途を辿っている。独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源情報センター発行の金属資源レポート(2006年5月号, Vol. 36, No. 1, pp. 11-16, [http://www.jogmec.go.jp/mric\\_web/kogyo.joho/2006-05/MRv36n1-02.pdf](http://www.jogmec.go.jp/mric_web/kogyo.joho/2006-05/MRv36n1-02.pdf))によれば、2010年におけるHEV用のネオジ磁石の使用量は1500t(国内使用量の2割程度)、高耐熱性を与える添加剤である重希土のジスプロシウム(Dy)は70tに及ぶと推定されている。その生産シェアは、全世界比で中国が9割以上に達し、一極集中状態となっており、原材料の高騰や将来にわたる資源確保が深刻な問題である。このため、HEV駆動用モータの脱レアアース化は重要かつ喫緊の課題である。

## 2. 研究の目的

以上の背景の下、国内では脱レアアースモータとしてクローポール回転子を持つ巻線界磁型同期モータ(図2参照)が改めて注目され開発が進んでいる。しかし、クローポール回転子を持つ巻線界磁型同期モータは、

- ・界磁巻線に電流を給電するためのスリップリングを有し、モータが大形化する
- ・回転子の機械強度が弱く、高出力重量密度化の必須技術である高速回転ができない

等の問題点を有する。本研究では、上記の問題を解決する新構造の巻線界磁型同期モータ

を提案する。現在、特許申請中のため、電磁

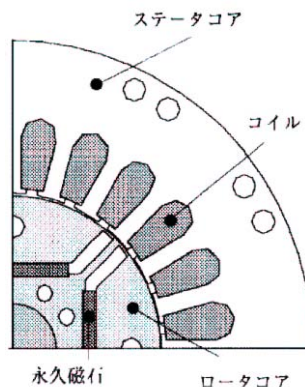


図1 埋込磁石同期モータの1/4断面図

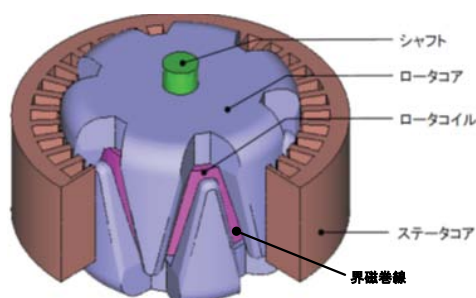


図2 クローポール回転子を持つ巻線界磁型同期モータ

構造については開示できないが、提案する界磁巻線型モータは、以下の特徴を有する。

- ・磁石レスロータ構造により極めて堅牢で高速回転に適する
- ・従来モータのコイルエンドに伴うトルクデッドスペースが存在せず、高トルク密度化に適する
- ・電機子巻線・界磁巻線が全てステータに集約される、熱冷却性に優れている

本研究では、このモータを出発点に、界磁調整能力ならびに最大トルク密度、最大出力密度を三次元有限要素非線形磁場解析(以下、3D-FEMと略記)により評価し、出力重量密度: 3.5kW/kg以上、効率: 市販HEV駆動モータと同等以上を目標にその実現可能性を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、市販 HEV 主駆動モータを想定し、プリウス、ハリアーなどに搭載される IPMSM に匹敵する性能を維持した上で、トルク重量密度  $6 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{kg}$  出力重量密度  $3.5 \text{ kW}/\text{kg}$  以上を実現する最高回転数  $25,000 \text{ r}/\text{min}$  の界磁巻線型同期モータを設計対象とし、具体的には以下の手順で研究を進める。

- (1) HEV 主駆動用モータの設計要件をベースに、界磁調整機能をフルに引き出す具体的

な設計指針の確立を行う。

(2) (1)で得られた設計指針を元に、出力重量密度 3.5 kW/kg 以上を実現する実スケールモータの最適設計を行い、計算機実験によりその実現性を評価する。

(3) (2)で得られた最適設計実スケールモータとの互換性を維持したダウンスケール機の試作試験評価を通じて、開発性能目標の実現可能性を明示する。

(4) (3)で得られた実機結果をフィードバックして、設計策の見直しを行い、実スケールモータの再設計ならびに計算機実験評価を行って、提案巻線界磁型同期モータの可能性を明確にする。

#### 4. 研究成果

##### (1) HEV 主駆動用モータの設計要件

設計対象は現行ハリアーHV に搭載する Toyota Hybrid System II の分布巻 IPMSM (LEXUS EX400h)で、本研究で取り扱う新構造界磁巻線形同期モータを適用することで分布巻 IPMSM と同等のモータ性能を得ることを本設計における目標とする。表 1 に新構造界磁巻線形同期モータの設計上での形状寸法・材料制約、システム条件、そして目標性能を分布巻 IPMSM 仕様と併せて示す。

新構造界磁巻線型同期モータでは固定子鉄心内に直流界磁のための界磁巻線ならびに巻線界磁束経路を必要とするため、分布巻 IPMSM に比べモータ鉄心の磁気飽和が顕著となり、低速大トルク性能が劣ると想定される。この観点からリダクションギア比を増加させることで目標最大トルクを 165Nm とし、必要車軸トルクを同程度に維持している。なお、この際の最高回転速度は 25,000r/min に増速される。そして、熱的制約条件として巻線電流通電に伴うコイル発熱に対応できるように、最大電流密度においても  $30A_{rms}/mm^2$  と制限される。以上の制約条件下で新構造界磁巻線形同期モータの大トルク・高出力特性を検討する。

##### (2) 設計結果

設計の出発点としたモータ形状をもとに 3D-FEM 解析から得られたトルク電流特性を図 3 に示す。図中の赤線は要求トルク 165Nm を示している。最大トルクは、124Nm と要求トルク 165Nm に対し 41Nm 小さい。そこで、まず、界磁調整機能に影響を及ぼすモータ形状パラメータの抽出を 3D-FEM により行った。

次に、抽出されたパラメータを単独および同時に変化させた場合の界磁調整能力および最大トルクを評価指標に、パラメータを系

統的に整理し、設計指針の確立を行った。

次に、得られた設計指針をもとに、要求条件

表 1 設計制約条件と要求性能仕様

	分布巻 IPMSM	提案モータ
ステータ外径 $D_{s,o}$ [mm]	264	270
軸長 [mm]	150	
ギャップ長 $g$ [mm]	0.8	
積層電磁鋼板材料	35H-210	
永久磁石材料	NEOMAX-35AH	—
永久磁石使用量 [kg]	1.1	0
巻線占積率 $\alpha$	0.5	0.5-0.65
モータ冷却方式	液冷(ATF)	
インバータDCバス電圧 $V_{dc}$ [V]	650	
インバータ素子耐圧 $[V_{0,p}]$	900@12.4krpm	900@25krpm
最大電流 $I_{max}$ [ $A_{rms}$ ]	360	
巻線最大電流密度 $J_m$ [ $A_{rms}/mm^2$ ]	30	
最大トルク [Nm]	333	$\geq 165$
リダクションギア比	2.478	5.16
車軸トルク [Nm]	825	$\geq 825$
最大出力 [kW]	123@3~4krpm	$\geq 123$ @6~7krpm
出力密度[kW/kg]	3.5	$\geq 3.5$

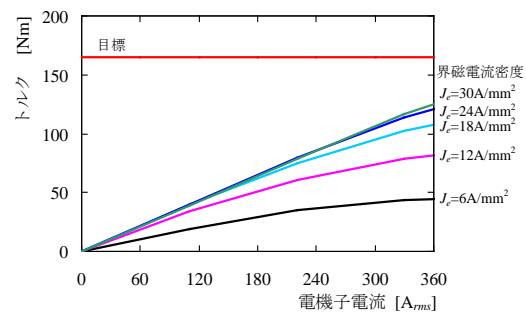


図 3 初期設計モータのトルク電流特性

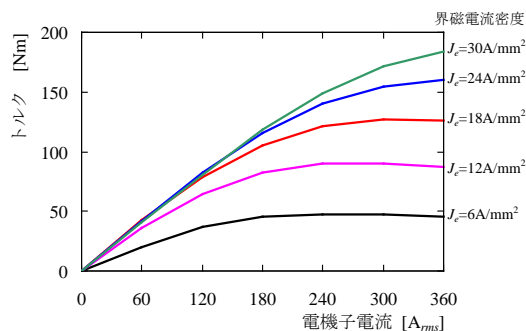


図 4 設計モータのトルク電流特性

性を満足するモータ形状設計を行い、結果として図 4 のトルク電流特性、図 5 の最大速度-トルク特性と速度-出力特性が得られるモータ設計を実現した。図 4 より、最大トルクは界磁電流密度  $30A_{rms}/mm^2$ 、電機子電流  $360A_{rms}$  通電時に 184Nm を出力しており、目標の 165Nm を満足していることがわかる。

図 5 より、6,000~7,000r/min で目標出力 123kW を満たしている。最大出力は 162.9kW@14,800r/min で、出力密度は 5.06kW/kg (162.9kW, 32.2kg) となり、現行 HEV 駆動用モータと比較すると 1.44 倍を実現し

ている。

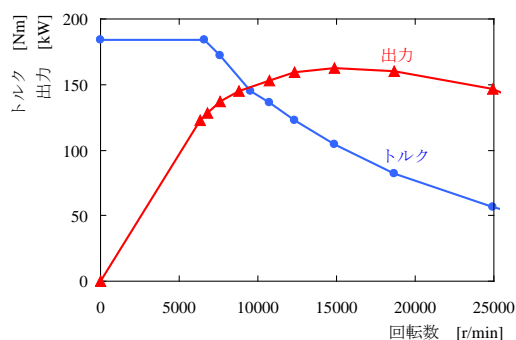


図5 速度-トルク特性, 速度-出力特性

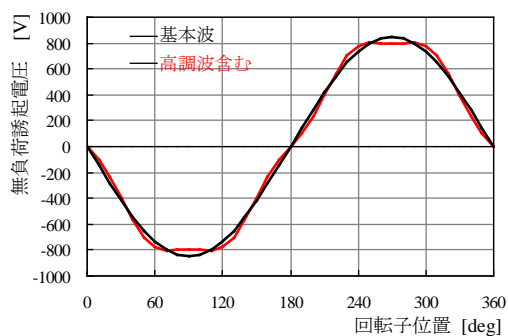


図6 無負荷誘起電圧波形 (25,000r/min)

一方、図6は、25,000r/min時の無負荷誘起電圧波形である。同図から無負荷誘起電圧は回転数25,000r/min時804V<sub>0-p</sub>で余裕をもって制限値900V<sub>0-p</sub>を満たしている事がわかる。

以上より、設計モータは表1に示す設計要件をすべて満たし、脱レアアースで出力重量密度を大幅に向上でき、小型・軽量・低コスト化を実現できることがわかる。この研究成果は、資源供給問題を解決する極めて有効な手段となり、我が国が先導する当該モータ技術の世界的競争力向上に貢献できると予想される。

### (3) ダウンスケール機による試験結果

提案する巻線界磁型同期モータの3次元電磁構造設計を支える3D-FEMによる性能予測評価の妥当性を検証すべく、最適設計モータの相似形ダウンスケール機を設計し、試作機性能評価試験を行った。図7は試作モータの外観写真である。

図8は、試作モータの誘起電圧波形(300r/min)を界磁電流を変化させて測定した結果である。界磁電流の変化によって誘起電圧を可変することができ、提案モータの可変界磁の原理を確認できる。また、同測定結果を3D-FEMによる解析値と比較した結果、誘起電圧の基本波振幅の誤差は7%未満で高

い解析精度を有し、設計したフルスケール機の性能実現性が確認できる。



図7 試作機外観写真

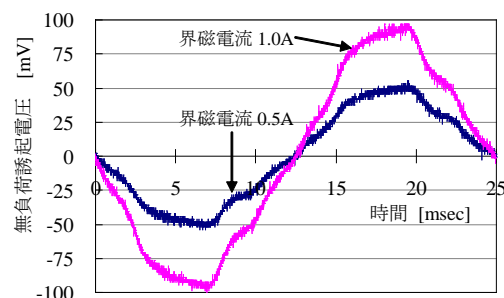


図8 無負荷誘起電圧波形 (300r/min)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計0件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等 なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

加納 善明 (KANO YOSHIAKI)

豊田工業高等専門学校 情報工学科・助教

研究者番号：80456714