修士学位論文要約（平成29年３月）

ダブルステータ型アキシャルギャップ SR モータと 電気自動車への応用に関する研究

高瀬　圭祐

指導教員：一ノ倉 理,　　研究指導教員：後藤 博樹

A Study on Double-Stator-type Axial-Flux SR Motor and Application to Electric Vehicle

Keisuke TAKASE

Supervisor: Osamu ICHINOKURA,　Research Advisor: Hiroki GOTO

SR motor is expected as in-wheel motor because of them robustness and inexpensive. Then, double-stator-type axial-flux SR motor is designed and manufactured to enhance torque density. Examination results indicate prototype is comparable with PM motor used generally in vehicular applications. In addition, we have developed exclusive drive unit and done driving test. Driving test results indicate enough acceleration performance.

1. はじめに

電気自動車(EV)の普及を妨げる要因の一つに二次電池のエネルギー密度の低さが挙げられる。そのため，少人数かつ近距離に焦点を当てた，電動シティコミュータが注目を集めている。電動シティコミュータは車体が小型であり，限られたスペースを最大限有効活用するためには，駆動方式はインホイールダイレクトドライブが理想的である。

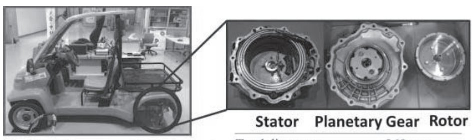
インホイールダイレクトドライブのモータには堅牢かつ安価なモータが要求されるため，スイッチトリラクタンス(SR)モータが適すると考えられる。SR モータは鉄心と銅線のみで構成されるため，安価で堅牢に製作することができる。一方で SR モータは EV 用に一般的に用いられる永久磁石(PM)モータと比べ，トルク密度が低いという欠点がある。そこで SR モータのトルク密度を改善するため，アキシャルギャップ構造に着目した。径方向に空隙を設けるラジアルギャップ構造では，インホイールモータのように扁平な形状においてギャップ面積が小さくなるが，軸方向に空隙を設けるアキシャルギャップ構造にすることでギャップ面積が確保でき，トルク密度の向上を見込める。

先行研究では，ダブルロータ型アキシャルギャップ SR モータを試作検討してきたが [1]，支持構造が複雑で騒音が大きく，放熱効率が悪いことが判明した。そこで，ダブルステータ型とすることで，支持構造を容易にし，放熱性を向上させつつ，トルク密度の高いインホイールモータ用のアキシャルギャップ SR モータの開発と走行試験を目標とした。

2. アキシャルギャップ SR モータの試作

図 1 に研究対象とした電動シティコミュータ及び標準搭載されていた PM モータ(以下，ベース PM モータ)の構成及び諸元を示す。ベース PM モータの諸元より，設計する SR モータの体格はベース PM モータ以下かつ，最大トルク 100 N･m を製作目標とした。

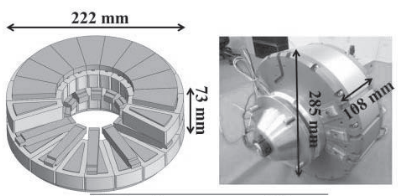
図 2 に実際に試作した SR モータの構成及び諸元，試作機外観を示す。SR モータの設計は先行研究によって得られた最適比率を用いて設計を行った。[2] なお，極数はベース PM モータと同一とし，同じバッテリの使用を想定して設計を行った。



Total length:	2365 mm
Total width:	995 mm
Total height:	1600 mm
Vehicle weight:	330 kg
Maximum speed:	50 km/h (580 r/min.)

Total diameter:	260 mm
Total length:	145 mm
Gear ratio:	1/6.267
Maximum torque	100 N･m
Battery voltage:	72 V
Weight (with housing):	11.5 kg

図 1　対象車体及びベース PM モータの構成



Gap length:	0.3 mm
Winding per pole:	99 turns
Winding space factor:	62%
Motor weight:	14.4 kg

図 2　試作 SR モータの構成及び諸元

3. 試作 SR モータの実証試験

実証実験により, SR モータ試作機の基本特性を評価する。また, 3 次元有限要素法 (3D-FEM)を用いて特性算定を行い, 結果を比較する。

図 3 に電流密度-トルク特性を，図 4 に回転速度-トルク体積密度特性を示す。電流密度-トルク特性において，計算値では，定格電流 15 A/mm^{2}時において最大トルク 100 N･m 達成できる見込みであった。一方，実測値では 100N･m 達成するためには巻線電流密度 19 A/mm^{2}必要となることが明らかとなった。一方，回転速度-トルク密度特性からは，全ての速度領域において実測値・計算値共にベース PM モータの特性を上回ることが確認できた。

特性低下の原因には機械的な製作誤差の他に，ケースや支持構造で発生する渦電流損失や，ベアリングに加わるアキシャル方向電磁力による損失があると考えられる。

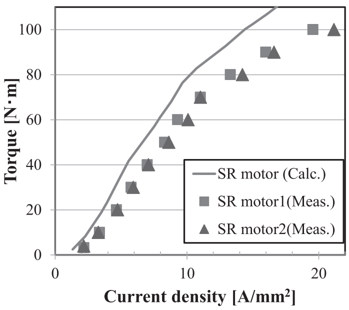


図 3　電流密度-トルク特性

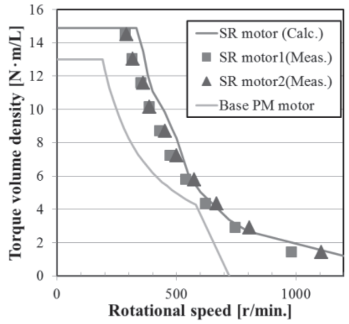


図 4　回転速度-トルク密度特性

4. 電動シティコミュータの車両走行試験

試作 SR モータを対象車両に搭載し，車両走行試験を行うためには，車載用駆動装置が必要となる。図 5 に開発した駆動装置の外観を示す。この装置は主にパワーエレクトロニクス回路と制御回路によって構成される。パワーエレクトロニクス回路は SR モータの駆動で一般的な非対称ハーフブリッジコンバータを採用した。制御回路は FPGA を中心として, 各種 IC や電流センサを用いることで，トルク指令値に追従する，瞬時相トルク分配制御 [1]を実装した。

図 6 に走行試験における，トルク指令-車速特性を示す。なお，3.5 %一定勾配 35 m の直線コースで走行試験を行った。結果より，上り坂でも約 5 s で最高時速 25 km/h 達成することが確認でき，十分な加速性能を確認することができた。

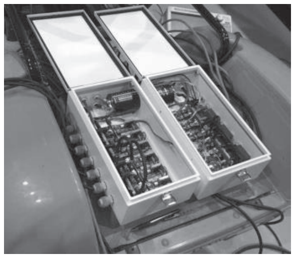


図 5　車載用駆動装置外観

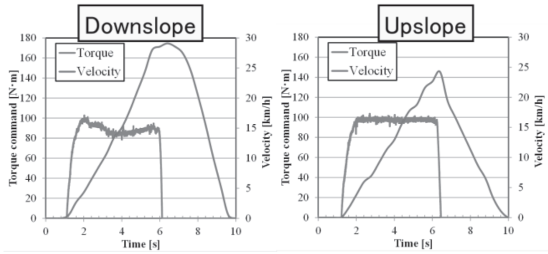


図 6　トルク指令値-車速特性

5. まとめ

本研究では，電動シティコミュータ用インホイールモータとして，ダブルステータ型アキシャルギャップ SR モータを検討した。回転速度-トルク密度特性では，比較対象としていたベース PM モータを上回るトルク密度を確認できた。また，車載駆動装置を開発し車両走行試験を行ったところ, 上り坂でも十分な加速性能を確認することができ, インホイールモータとしての実用性を確認することができた。

文献

1) 柴本亨,「電気自動車用アキシャルギャップ型インホイール SRM に関する研究」, 東北大学修士学位論文(2013)

2) 村上真哉,「アキシャルギャップ SR モータの小型軽量化に関する研究」, 東北大学修士学位論文(2015)