

# 圧粉鉄心材料の加工方法の違いに着目した 電氣的磁極反転形可変界磁 PM モータの実機検証

青山 真大\*, 中島 一清(スズキ), 野口 季彦 (静岡大学)

Experimental Verification of Electrically Reversal Magnetic Pole Type Variable Magnetic Flux PM Motor  
Focusing on Manufacturing Process of Soft Magnetic Composites Material

Masahiro Aoyama\*, Kazukiyo Nakajima (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

## 1. はじめに

近年、欧州を中心に 48V マイルド HEV システムの技術開発が盛んに行われている。48V システムは高電圧のフル HEV システムに比べ燃費改善効果が劣るが、一方で車両重量が軽い B セグメント以下のコンパクトカーにとっては小型軽量で安価な HEV システムとなり、コストメリットと燃費改善効果を得やすい。このようなシステムに埋込磁石式同期モータ (IPMSM) を採用した場合、低電圧駆動のため可変速特性が狭まるという問題がある。それらの課題に鑑みて近年、電機子巻線に鎖交する界磁磁束を可変にする可変界磁技術が盛んに検討されている。代表的な研究として磁石磁力を可変にするメモリーモータやロータスキュー角を機械的に調整するモータが提案されている<sup>(1)(2)</sup>。しかし、前者は磁石を駆動中に着滅磁するためにパルス電流を電機子電流に重畳しなければならず、モータ出力よりもインバータ容量が増大する問題があり、後者はスキュー角を調整する外部アクチュエータが必要になる。それらの課題に対して、筆者らはマルチギャップ構造で純電磁氣的に極低回転域は高トルク化を実現し、回転速度の増加とともに自動的に電機子鎖交磁束を低減できる可変界磁 PM モータを提案した<sup>(3)(4)</sup>。

本稿では 2 種類の圧粉鉄心材料を用いて異なるコア成形方法で小型原理検証機を試作し、実験的に駆動特性を明らかにしたので報告する。

## 2. 提案モータの構造と小型試作機

図 1(a), (b)に提案モータの構造を示す。集中巻結線されたトロイダル巻ステータを用いてラジアルギャップ面に固定界磁の PM ロータ、アキシヤルギャップ二面に巻線界磁ロータ (WF ロータ) を配置したマルチギャップ構造である。同図(c)に示す集中巻構造で不可避に発生する非同期回転磁界 (第 2 次空間高調波) が同図(d)に示す WF ロータの突極に巻いた誘導コイル (I-coil) に鎖交することで誘導起電力が発生し、ダイオードで整流することで界磁コイル (F-coil) に自励電磁石が形成される。特長として PM ロータと WF ロータの磁極は極性反転 (磁極相対角 180 deg) している。

誘導起電力が WF ロータ巻線抵抗で消費されて自励しない極低回転域では WF ロータは順突極リラクタンスロータとなり、PM ロータのトルクと合算してマルチギャップモータとして高トルク化を実現する。一方、回転速度が増加するに従い、WF ロータの磁化量が増加していき、磁極反転の位

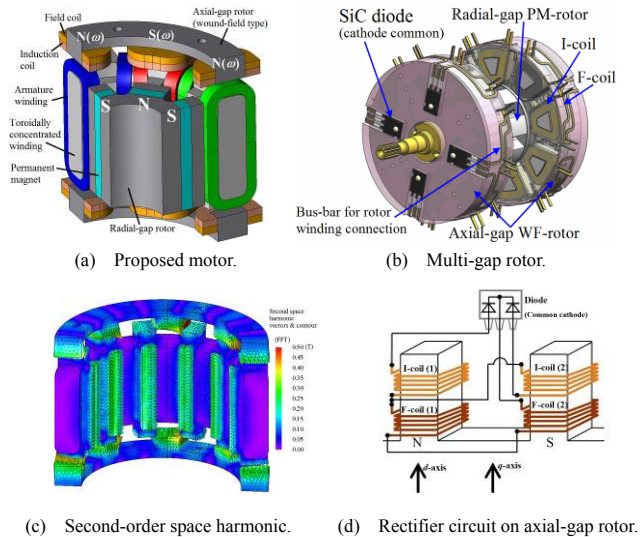


Fig. 1. Proposed variable magnetic flux PM motor.

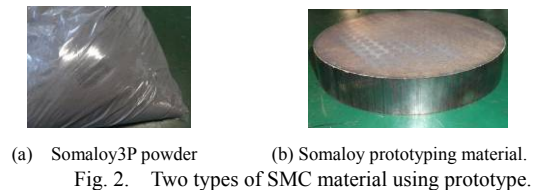


Fig. 2. Two types of SMC material using prototype.

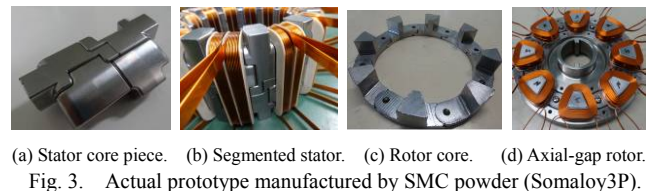


Fig. 3. Actual prototype manufactured by SMC powder (Somaloy3P).

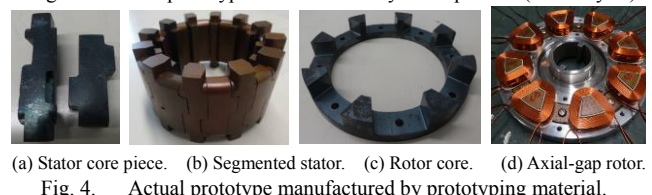


Fig. 4. Actual prototype manufactured by prototyping material.

置関係から PM ロータの界磁磁束を打ち消して電機子鎖交磁束を低減させるはたらきをする。

原理検証機は図 2(a)の軟磁性複合材 (SMC : Soft Magnetic Composites) 粉末 (ヘガネス製 Somaloy 3P) を金型成形したコア (図 3) と同図(b)のヘガネス製 Prototyping 材を切削加工して試作したコア (図 4) を用いて 2 種類試作した。

### 3. 小型原理検証機による実機駆動評価

図 5 に実測した各電機子起磁力下における電流位相-トルク特性を示す。電流位相基準は PM ロータの N 極が U 相電機子巻線方向を向く位置で調整 (電流位相 0 deg が + $q$  軸, -90 deg が + $d$  軸) している。同図より低回転域 (500 r/min) では Somaloy3P 材と Prototyping 材で試作した両者に大きな差は見られないが, 2000 r/min では Somaloy3P 材の方が 630A<sub>rms</sub>T においてトルクの低下が確認できる。次にパワーメータ (WT1800) で測定した線間電圧を電流位相指令値で  $dq$  軸電圧に換算し,  $dq$  軸電圧楕円を 2 種類の試作機で比較した結果を図 6 に示す。同図(d)の Reference は WF ロータ巻線を開放 (リラクタンسロータ状態) で測定した結果である。同図より, Somaloy3P 材の方がどの電機子起磁力下においても  $dq$  軸電圧楕円が小さく, 結果として電機子鎖交磁束を低減できていると言える。電機子起磁力別に比較すると高負荷 (630 A<sub>rms</sub>T) よりも中負荷 (360 A<sub>rms</sub>T) の方が 2 種類の試作機で  $dq$  軸電圧楕円の差が大きい。Somaloy3P 材の重量密度が 100 トンプレス機で 7.4~7.5 g/cm<sup>3</sup> になるように分割コアで試作しているのに対して, Prototyping 材 (重量密度が 7.3 g/cm<sup>3</sup>) は, 円柱ブロックからフラットエンドミルやラジラスエンドミル等の工具を用いて, 切込量や送り, 平面研削盤での加工条件等を調整して割れや欠けが発生しにくい条件で試作している。SMC は重量密度が磁気特性を左右するため両材料で透磁率が異なるが, 図 5(a)の結果から基本波に対する磁気抵抗に大きな差は見られないと言える。WF ロータ巻線の抵抗値やエアギャップは共通であるため, Somaloy3P 材の方が可変界磁量が大きい結果から界磁エネルギー源となる第 2 次空間高調波に対する磁気抵抗が Prototyping 材の方が大きいことが推察される。図 7 に Prototyping 材の切削加工表面付近を SEM 分析した結果を示す。この加工面において鉄粒子の絶縁膜が破壊されて第 2 次空間高調波が鎖交したときに渦電流が生じ, 磁気遮蔽効果ははたらいっている可能性がある。今後, Somaloy3P と Prototyping 材で電気抵抗を測定し原因について分析する。

### 4. まとめ

本稿では小型原理検証機を用いて提案モータの自動的な可変界磁効果を実証した。また, SMC 材を 2 種類の異なる加工方法で試作したモータの性能差について実測比較を行った。その結果, 円柱状のバルク材からコアを切削加工するよりも圧粉鉄心粉末を金型成形した方が空間高調波に対

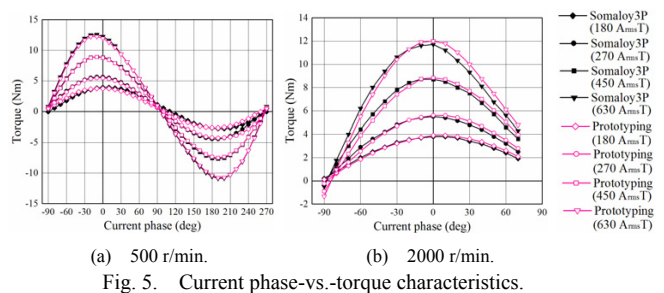


Fig. 5. Current phase-vs.-torque characteristics.

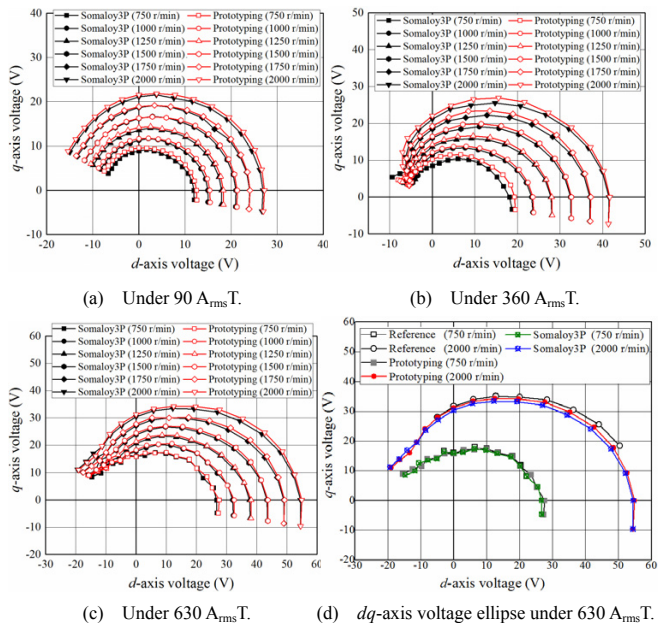


Fig. 6.  $dq$ -axis voltage ellipse with respect to armature magnetomotive force and comparison between somaloy3P and prototyping material.

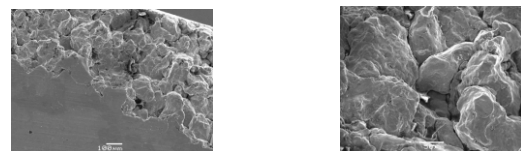


Fig. 7. Surface observation of prototyping manufactured by machining with SEM analysis.

する磁気抵抗が低く, 可変界磁特性が優れることがわかった。今後は実際のアプリケーションのサイズで各起磁力の最適化と可変界磁幅拡大の検討を行う予定である。さらにワンショット成形できる圧粉鉄心材料の加工方法と高効率化を実現する磁気回路の両立について考究する。

### 文献

- (1) 堺・結城・橋場・高橋・安井・ゴウウテックランシー:「可変磁力メモリモータの原理と基本特性」, 電学論 D, Vol. 131, No. 1, pp. 53-60 (2011)
- (2) 野中・大賀・大戸:「可変界磁モータの駆動に関する考察」, 電学論 D, Vol. 135, No. 5, pp. 451-456 (2015)
- (3) 青山・中島・野口:「電氣的磁極反転形可変界磁 PM モータの提案」, H28 電気学会全国大会, No. 5-043, pp. 77-78 (2016)
- (4) 青山・中島・野口:「電氣的磁極反転形可変界磁 PM モータの実機検証」, 電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会資料, SPC-17-010/ MD-17-010, (2017)