

論説



Paper

圧粉コアを用いたハイブリッド界磁モータ

小坂 卓*

Hybrid Excitation Motor using Powdered Iron Core

Takashi Kosaka

Synopsis

This paper presents a hybrid excitation motor which enables to realize both high torque capability at low speed and wide speed operating range employing field-strengthening and weakening control by mmf of field winding excitation. The origin of the proposed machine construction is from a hybrid stepper machine, but the uniqueness lies in the utilization of powdered iron core as magnet flux bypass core and filed-pole core with toroidal coil. Because of the magnetically three-dimensional isotropic nature of powdered iron core, the magnet flux bypass core makes it possible to avoid unnecessary magnet mmf loss due to a passage through inter-lamination airgap. For the same reason, the field pole core can deliver three-dimensional flux and the mmf of the fitted field toroidal coil can theoretically contribute to providing independent field strengthening/weakening capability. Using an existing prototype of 300 rpm-12.7Nm-hybrid stepper machine as a point of departure, the basic working principle how to achieve both the field strengthening and weakening in the proposed machine is described. The performance predictions of the proposed machine based on three-dimensional finite element analysis are demonstrated.

1. 緒 言

地球温暖化の指標となっている大気中の CO_2 濃度は 19 世紀の産業革命以降上昇し、特に 20 世紀に入ってから急増は深刻さを増している。世界的に見たときのエネルギー消費と CO_2 排出の現状は、世界エネルギー消費の半分を OECD（経済協力開発機構）先進国が、とりわけ 1/4 を米国が消費している。さらに OECD 国の CO_2 排出の内訳を見ると、その 1/4 が運輸・自動車関係での消費であり¹⁾、このため自動車業界で種々の取組が展開されている²⁾。

乗用車の実路走行での負荷は広範囲に渡り時々刻々変化し、エンジンは熱効率の低い部分負荷で使われる頻度が多く、加えてエンジンで作られたエネルギーは減速時にブレーキ熱として放散されることから、エンジン搭載車の実路走行の熱効率はせいぜい 10 % 程度と大幅に低下する³⁾。したがって、エンジンを常に最高熱効率点近傍で運転し、減速時に放散されているエネルギーを回生す

れば、実路走行時の燃費を大幅に改善できる。その一つとして、パワートレインにバッテリーとモータ／発電機を組み込んだハイブリッド車 (Hybrid Electric Vehicles, HEV) の開発・実用化が精力的に進められており、その中枢を担うトラクションモータの小型軽量・高性能・高効率化が重要な課題の一つとなっている。

小形軽量化のためにトランスミッションを省略あるいは極力簡略化する HEV 駆動用モータの場合、従来エンジン車の 1 速レンジに相当する低速・大トルク特性、2 速レンジ以上に相当する中高速・高出力特性をできる限りそれ単体で実現することが望まれ、現在国内では永久磁石同期モータ (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) が主に採用されている⁴⁾。しかし、低速大トルクを効率よく発生させるための強い永久磁石固定界磁磁束による高速回転時の高逆起電力が高速高出力化へのボトルネックとなっている。現状はインバータによる弱め界磁制御により実用に供しているものの、銅損増加による効率低下が不可避である。これは PMSM の本質として、

2008 年 1 月 21 日受付

* 名古屋工業大学大学院 工学研究科 おもひ領域、工博 (Dr., Eng., Omohi College, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology)

トルク発生効率に優れる低速大トルク性能と高効率高出力性能との間の背反問題を意味するもので、この問題を克服し、かつ小型・軽量化を実現する新しいモータ構造の開発研究が望まれている。

本稿では、上述の背景の下、ハイブリッドステッピングモータ (Hybrid stepping Motor, HBM) と類似構造を持ち、低速大トルクバーニヤモータの原理を組み合わせた多極永久磁石モータ⁹⁾を出発点に、圧粉コアとトロイダル界磁コイルを組み合わせたハイブリッド界磁モータを提案する。その原理的有用性、期待される自在な弱め/強め界磁調整性能について、3次元有限要素磁場解析 (3 Dimensional Finite Element Analysis, 3D-FEA) による性能シミュレーション結果を報告する。

2. ハイブリッド界磁モータの構造と原理

2. 1 モータ構造

ハイブリッド界磁モータの概観図を Fig.1 に示す。図中央部は、従来 HBM と類似構造の主電動機部、左右両端部は N 極/S 極界磁極である。両端面の界磁極圧粉コアとロータ内周バイパス圧粉コアとステータ外周バイパス圧粉コアを配している点が特徴である。各部の役割と動作原理は次節以降で述べる。

Fig.2 は主電動機部を N 極側端面から見た断面図であり、見やすさのためコイル部分は除去している。同図に示すように、外側から円筒状ステータバイパス圧粉コア、電機子巻線を収納する 24 スロットステータ積層コア、25 の小歯を持つロータ積層コア、円筒状ロータバイパス圧

粉コア、シャフトの順で配置されている。詳細は後述するが、従来 HBM に対し、ステータ外周/ロータ内周に 3 次元磁気等方性のバイパス圧粉コアを付与して、磁石磁束を軸方向へより流しやすくしている。

Fig.1 の両端界磁極は、ステータ外周バイパス圧粉コアと連結する凸形界磁極圧粉コア、巻線界磁磁束を発生するトロイダル界磁コイル、界磁極とロータ間のギャップで構成される。界磁極外周圧粉コア厚は主電動部分のステータ外周バイパス圧粉コア厚と等しく、界磁極凸部の内外径はロータ内周バイパス圧粉コアと同一とする。界磁極凸部に巻かれるトロイダル界磁コイルは、主電動機部コイルエンドに接触しない範囲でできる限りコイル格納有効面積を確保するように設計する。

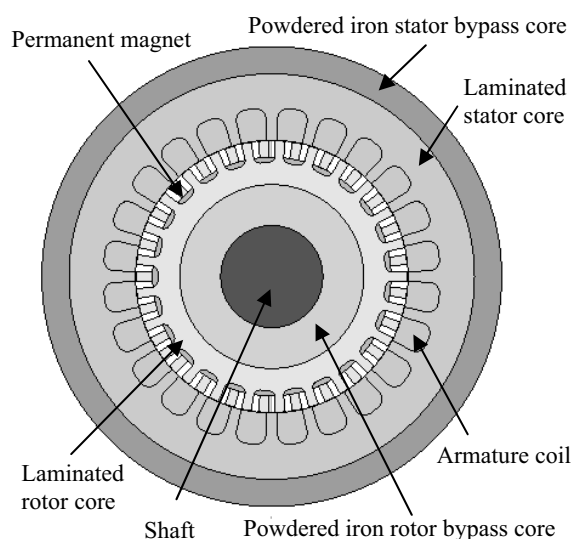


Fig.2. Cross section of main part of the proposed motor.

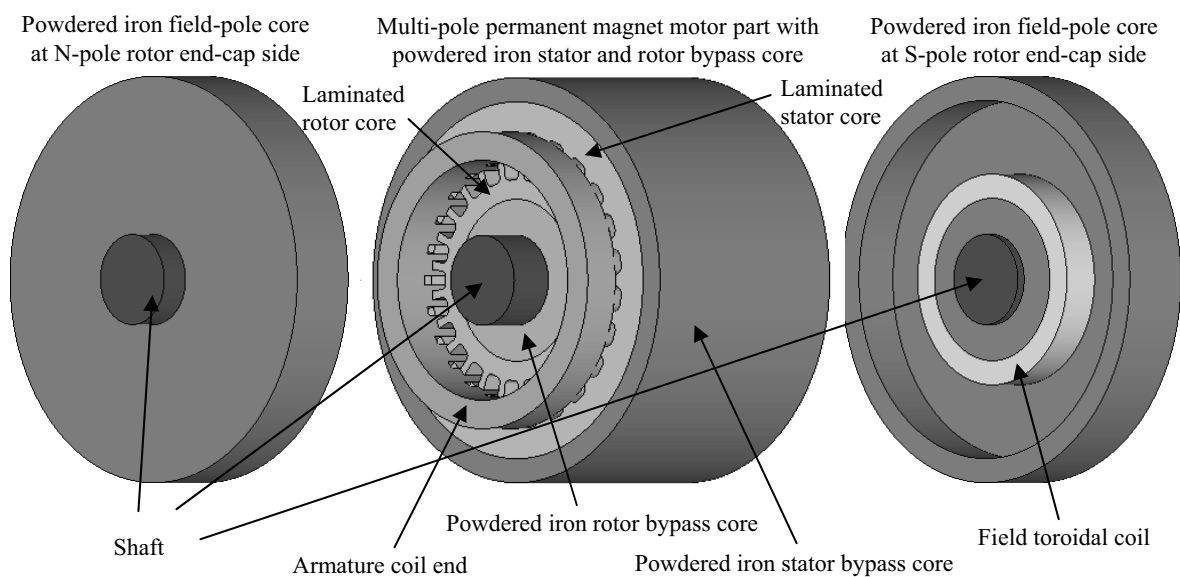


Fig.1. External view of the proposed hybrid excitation motor.

2. 2 動作原理Ⅰ—ステータ／ロータバイパス圧粉コアの働き

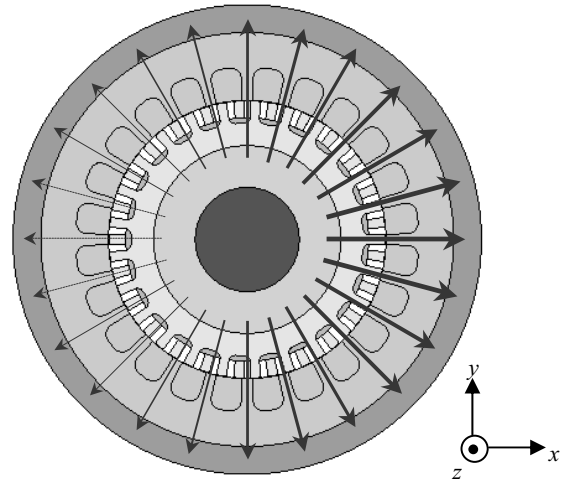
ステータ／ロータバイパス圧粉コアの役割は、従来 HBM 構造における磁石磁気エネルギーロスの低減である。従来 HBM 構造における N 極側の永久磁束磁石の経路は、N 極ロータ積層コアを軸方向、すなわち積層板面に対し垂直方向に流れ、ロータ積層板面平面で径方向に分流し、エアギャップを通過して、ステータ積層板面平面で径方向に流れると同時に、ステータ積層コアを再び軸方向に流れて S 極側へ向かう。積層コアでは、銅板と磁的に空気層と等価な絶縁層が積層方向に交互に配されるため、積層方向の等価比透磁率が低下し、永久磁石起磁力が絶縁層で消費される。絶縁層に働く永久磁石起磁力は、モータ出力、すなわちトルクに一切寄与しないため、結果、永久磁石の磁気エネルギーロスを生じる⁶⁾。

一方、ハイブリッド界磁モータにおける電機子巻線およびトロイダル界磁コイルをとともに無通電状態とした永久磁石磁束の流れを見たものが Fig.3 である。同図 (a) は N 極ロータ端の X-Y 平面断面で見た永久磁石磁束の流れ、(b) はシャフト中心を通過する Y-Z 平面断面で見た永久磁石磁束の流れを示す。同図 (a) に見るように、永久磁石磁束はロータ内周バイパス圧粉コアから、積層ロータコア、積層ステータコアと渡ってステータ外周バイパス圧粉コアに到達して、電機子巻線に鎖交する。すなわち、ハイブリッド界磁モータでは、3 次元磁気等方性のバイパス圧粉コアが永久磁石磁束の積層板直交方向へ向かって流れるのを防ぎ、磁石磁気エネルギーロスの問題を解消する。これにより、永久磁石が発生する磁束を、ロータエンド終端まで均一に分配できる。

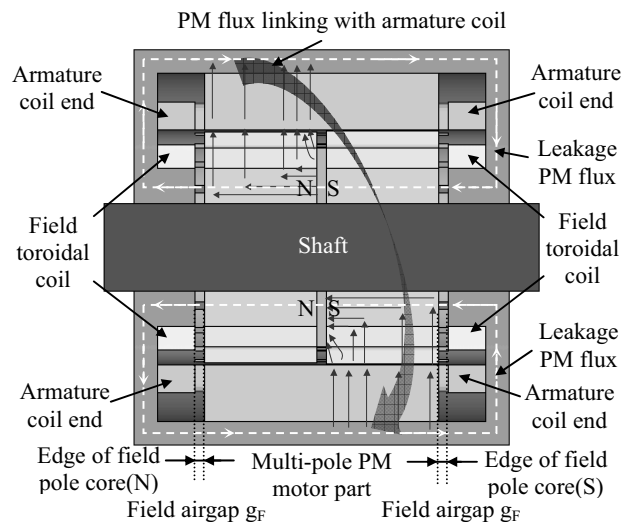
2. 3 動作原理Ⅱ—界磁極圧粉コアとトロイダルコイル励磁の働き

Fig.4 は、電機子巻線は無通電とし、両端界磁極に配したトロイダル界磁コイルのみを通電した場合の永久磁石磁束の流れをみたものである。同図 (a) は、永久磁石起磁力と同一方向に N, S 側両界磁コイル起磁力を生じるように通電した場合で、界磁コイル起磁力によって永久磁石磁束がロータ内周バイパス圧粉コア—界磁極—ステータ外周バイパス圧粉コアを介した磁気短絡パスへ引き抜かれ、電機子巻線へ鎖交する永久磁石磁束が減少する。すなわち、この場合の界磁コイル電流は、従来の PMSM の弱め界磁電流に相当する。この効果を従来の 2 次元 PMSM と比較すると、

- ① 電機子巻線とは独立に弱め界磁制御が可能
- ② 永久磁石起磁力と逆方向の電機子巻線起磁力を発生



(a) Flux paths on X-Y plane.



(b) Flux paths on Y-Z plane.

Fig.3. Magnet flux paths in the proposed motor.

させ、合成起磁力を下げて等価的に磁石磁束を弱める。従来の弱め界磁制御方式とは異なり、本方式では磁石起磁力と界磁コイル起磁力方向が同一となるため、永久磁石減磁が不問で、減磁耐量の小さな磁石を使用可能などの点で、優れた点を有する。設計上の焦点は、いかに少ない界磁コイル銅損で高い弱め界磁能力を得るかどうかであり、永久磁石の起磁力ならびに磁気抵抗に対する界磁極—ロータ端間エアギャップ g_F と界磁アンペアタンのバランス配分設計がポイントとなる。

一方、同図 (b) は、電機子巻線は無通電のまま、永久磁石起磁力と逆方向に起磁力を生じるように、N, S 両界磁コイルを通電した場合の永久磁石磁束の流れを見たもので、この場合、界磁コイル起磁力は強め界磁電流に相当し、以下の効果が期待できる。

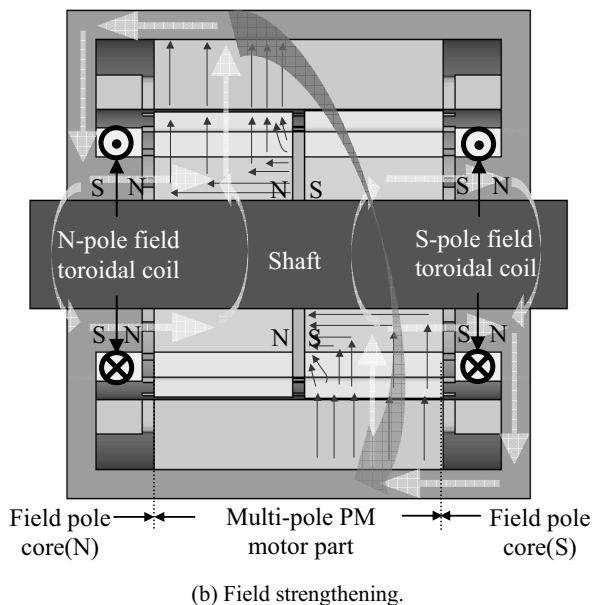
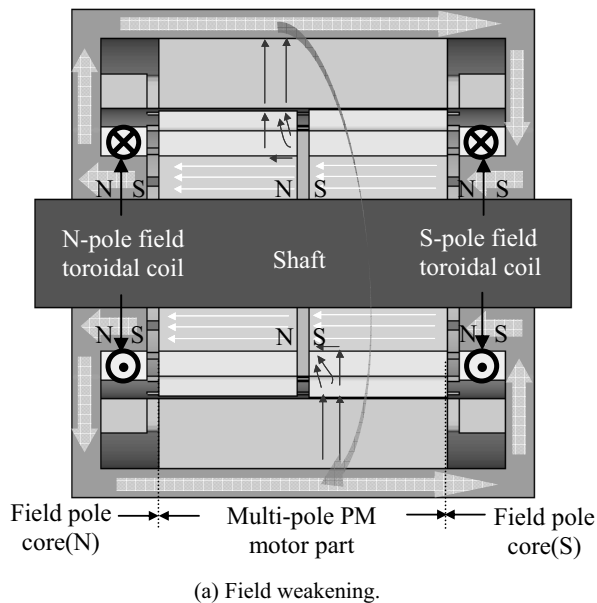


Fig.4. Flux paths in the proposed machine under field weakening and strengthening toroidal coils excitation.

③ 界磁極-ロータ端面間エアギャップ g_f を短ギャップ長とした場合に増加する界磁電流無通電時の界磁極短絡漏れ永久磁石磁束を界磁起磁力による磁気シールドで遮断し、永久磁石磁束を完全にモータ部へ封じ込め、電機子巻線に 100% 鎖交させることが可能

④ 通常、片側ロータ全体からステータを見たロータ-ステータ間エアギャップの磁気抵抗は、永久磁石磁気抵抗に比して十分小さいため、強め界磁電流によって発生する界磁コイル起磁力は、ほぼロータ-ステータ間エアギャップに働く。この結果、図中白色矢印で示すように界磁コイル磁束は、界磁極-N or S 極ロータバイパス圧粉コア→積層ロータコア→ロータ-ステータ

間エアギャップ→積層ステータコア→ステータバイパス圧粉コア→界磁極圧粉コアというループで流れ、永久磁石磁束と界磁コイル磁束の合成磁束が電機子巻線に鎖交して、トルク定数の増加が可能

しかしながら、この場合の界磁コイル起磁力は永久磁石起磁力と逆方向となるため、設計時に永久磁石減磁に対して留意しなければならない。また、界磁コイル磁束の流れの中で、ステータバイパス圧粉コア→界磁極圧粉コアの磁束経路内では、回転子位置によって変化する交流分を含むため、フルループを描くことはないものの、ヒステリシス損の観点から、交流分振幅については設計上の注意を要する。設計上の焦点は、いかに少ない界磁コイル銅損で磁気シールド効果および強め界磁効果を得るかであり、前述同様、永久磁石の起磁力ならびに磁気抵抗に対する界磁極-ロータ端面間エアギャップ g_f と界磁アンペアターンのバランス配分設計に集約される。

3. 3次元有限要素磁場解析による性能シミュレーション

3D-FEA の解析ソルバーに日本総研ソリューション社製 JMAG-Studio Ver.8.2 を用いて、ハイブリッド界磁モータにおけるロータ/ステータバイパス圧粉コアの効果、界磁極トロイダルコイルによる強め界磁/弱め界磁調整性能について、シミュレーションを行った。

3.1 評価対象ハイブリッド界磁モータ諸元と解析条件

Table 1 に評価対象モータの設計寸法諸元を示す。ロータ/ステータに配したバイパス圧粉コアによる永久磁石の磁気エネルギーロス低減効果の比較検証のため、評価対象モータの主電動機部は文献 5) の多極永久磁石モータの形状寸法のままとしている。界磁極圧粉コア形状およびトロイダル界磁コイルの仕様については、簡易磁気等価回路に基づいた設計により決定している。

評価対象モータモデルでは、主電動機部の N/S 極ロータエンドキャップを軸方向に均等分割 6 層、磁石を均等分割 2 層の計 14 層の要素分割を採用している。片側界磁極部分は、軸方向にロータ-界磁極間ギャップを 1 層、凸形界磁極コア部を 3 層 (2.7 mm, 3 mm, 4 mm)、界磁極端部のバイパス圧粉コアを均等分割 2 層の計 6 層モデルとしている。全モデルは軸方向に計 26 層 (= 6 + 6 + 2 + 6 + 6) で、最終的な提案モータフルモデルの節点数は 344871、要素数は 315562 である。

ハイブリッド界磁モータの原理的妥当性を検証するため、3D-FEA では、線形磁場解析ならびに磁気飽和を考

Table 1. Design specifications of hybrid excitation motor.

Multi-pole permanent magnet motor part	
Shaft diameter [mm]	30
Outer diameter of laminated rotor core [mm]	79.7
Airgap length [mm]	0.15
Outer diameter of laminated stator core [mm]	119
Outer diameter of ring magnet [mm]	70
Ring magnet thickness [mm]	3
Residual flux density of magnet [T]	1.16
Coercive force of magnet [kA/m]	884
Stack length [mm]	80
No. of stator/ rotor teeth	24/25
No. of turns/phase	80
Outer diameter of powdered iron rotor bypass core [mm]	54
Outer diameter of powdered iron stator bypass core [mm]	135
Powdered iron field-pole core (one side)	
Inner diameter of toroidal coil [mm]	54
Total field-pole core length in axial direction [mm]	43
Field airgap length g_F [mm]	0.3
No. of turns/toroidal coil	536
Outer diameter of toroidal coil [mm]	79.1
Width of toroidal coil [mm]	9.7

慮した非線形磁場解析による2つの解析評価を行っている。線形磁場解析における磁性材料特性の取扱いは、圧粉コアおよび積層電磁鋼板のX-Y平面方向における比透磁率を無限大とし、Z方向、すなわち積層方向については、積層コア（占積率0.975）の磁気抵抗モデルに基づいて算出したZ軸方向比透磁率を使用している⁶⁾。一方、非線形解析では、電磁鋼板にS14相当のB-H曲線データ、圧粉コア部にHoganas社製Somaly500相当のB-H曲線データを採用している。

3. 2 ロータ／ステータバイパス圧粉コアによる永久磁石磁気エネルギーロス低減効果シミュレーション

Fig.1の主電動機部のみ解析モデルとし、ハイブリッド界磁モータのステータ外周バイパス圧粉コアとロータ内周バイパス圧粉コアを積層電磁鋼板（S14）に置き換えて得られる文献5)の多極永久磁石モータとの性能評価結果と比較することで、バイパス圧粉コアによる永久磁石磁気エネルギーロスの低減効果を検討する。Fig.5は、現有する多極永久磁石機をN極側ロータ端面から見た写真である。現有多極永久磁石モータとハイブリッド界磁モータの主電動機部単体モデルを対象に、電機子巻線を非通電とした非線形磁場解析によって得られた電機子巻線への永久磁石磁束鎖交数解析値の比較をFig.6に示す。同図から明らかなように、バイパス圧粉コアを採用したハイブリッド界磁モータの磁束鎖交数の基本波振幅 $\phi_1 = 85.6[\text{mwb}]$ は、バイパス圧粉コアを電磁鋼板へ置き換えた多極永久磁石モータの磁束鎖



Fig.5. Photograph of original multi-pole permanent magnet motor.

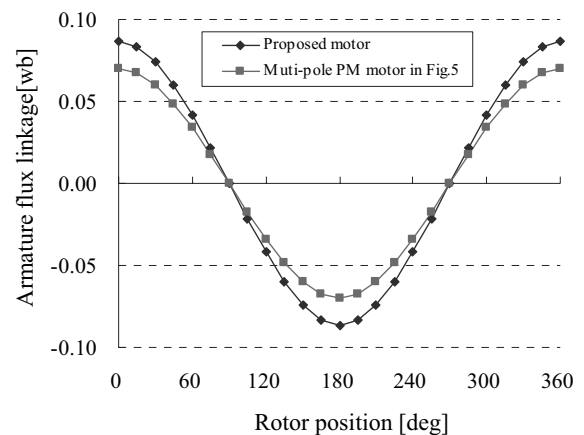


Fig.6. Comparison of armature flux linkage distribution of the proposed and the original multi-pole permanent magnet motors.

交数の基本波振幅 $\phi_2 = 69.7[\text{mwb}]$ に比べ、22.8 % 磁束鎖交数を向上できる。これがバイパス圧粉コアによる永久磁石の磁気エネルギーロス低減効果で、トルクの向上が期待できる。Fig.7 は、提案モータと多極永久磁石機における電流-トルク特性の解析結果を比較したもので、定格電流 3.75 A 通電時で、提案モータは 18.8 % のトルク向上が実現できる。以上の解析結果から、バイパス圧粉コアの採用により、提案モータは永久磁石の磁気エネルギーロスを低減できることが確認できる。

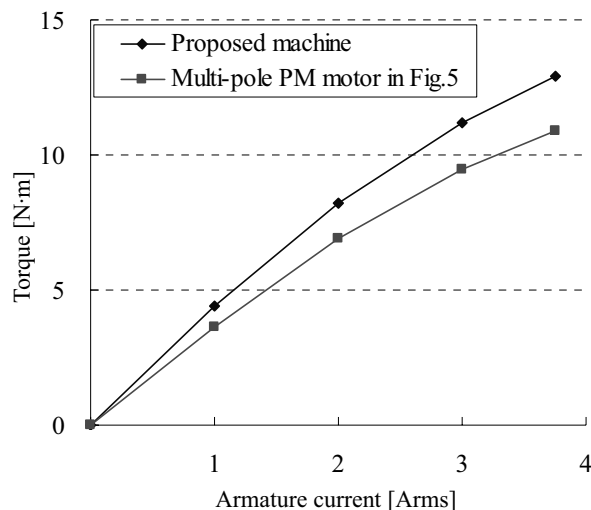


Fig.7. Comparison of torque vs. armature current characteristics of the proposed and the original multi-pole permanent magnet motors.

3. 3 線形磁場解析による強め／弱め界磁調整機能の原理妥当性の検証

提案モータの強め／弱め界磁調整性能の原理的妥当性を検証するため、線形磁場解析によりトロイダル界磁コイルのアンペアターンに対する界磁調整量を評価した。解析結果を Fig.8 に示す。同図で、縦軸の基準である界磁調整量 0 % とは前節で得たハイブリッド界磁モータにおける磁束鎖交数の基本波振幅 85.6[mwb] を指す。同図から、損失・電流密度の点でリーズナブルな界磁アンペアターンレンジで、強め界磁 +100 % ~ 弱め界磁 -100 % まで線形的に調整できることが確認でき、ハイブリッド界磁モータによる強め／弱め界磁調整機能の原理的妥当性が確認できる。

3. 4 非線形磁場解析による強め／弱め界磁調整機能の実現性の検証

使用磁性材料の磁気飽和を考慮したハイブリッド界磁モータの界磁調整機能の実現性を検討するため、各磁性材料の非線形 B-H データを用いた非線形磁場解析による評価を行った。解析結果を Fig.9 に示す。同図で、ステータとロータの歯幅を多極永久磁石モータと同一の 2.92

mm とした場合の界磁アンペアターンと界磁調整量の関係から、-900AT で 83.6 % の弱め界磁効果が得られることがわかる。Fig.8 に比較して弱め界磁性能が低下している要因は、圧粉コア部の磁気飽和によるもので、圧粉コア部の形状最適設計による磁気飽和の回避、あるいは飽和磁束密度のより高い圧粉コア材の使用による改善策が考えられる。一方、強め界磁調整時では、界磁調整量が 5 % を超えず、+500AT 以降では逆に減少して +900AT では界磁調整量がマイナスになっている。この要因は、ステータとロータ歯部での磁気飽和である。これを改善するため、歯幅を 1.4 倍の 4.09 mm に変更した場合の解析結果を同図に併せて示した。歯幅の 4.09 mm への変更で、強め界磁調整量を 12 % に改善でき、同時に -900AT 時の弱め界磁調整量を 86 % に改善できる。

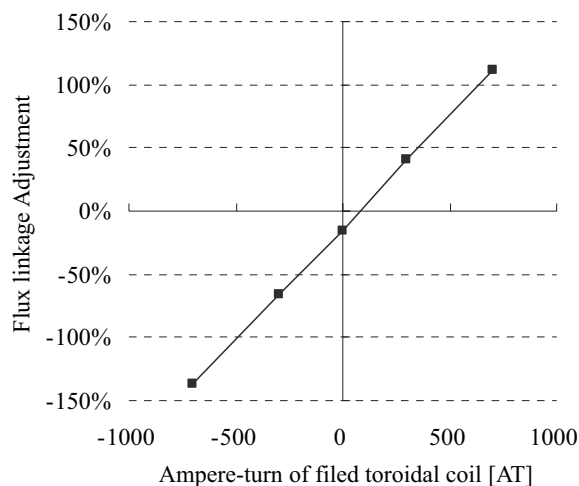


Fig.8. Linear 3D-FEA calculated ampere-turn vs. flux linkage adjustment characteristic of the proposed motor.

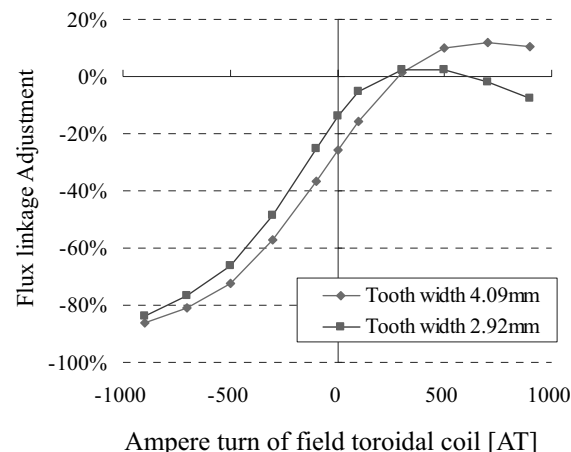


Fig.9. Non-linear 3D-FEA calculated ampere-turn vs. flux linkage adjustment characteristics of the proposed motor with different tooth width design.

4. 結 言

本論文では、低速大トルク性能と高効率高出力性能との間の背反問題を克服して小型・軽量化が期待できる新たなモータ構造として、圧粉コアを利用したハイブリッド界磁モータを提案し、その特長として期待される独立自在な弱め／強め界磁調整性能について、3D-FEAにより評価シミュレーションを行った。線形磁場解析により提案モータ構造の原理的有用性を確認した。しかし、現実の磁性材料の磁気飽和特性を考慮した非線形磁場解析の結果、特にステータ／ロータ歯部での磁気飽和により、強め界磁調整性能については期待する性能が得られないことを確認しており、これを改善する設計策について明らかにする必要がある。Fig.10は、異なる形状寸法で試作した界磁極圧粉コアにトロイダル界磁コイルを装着したもので、今後は試作実機試験を通じて実験による妥当性検証を進めるとともに、主電動機部の最適設計による性能改善を目指したい。

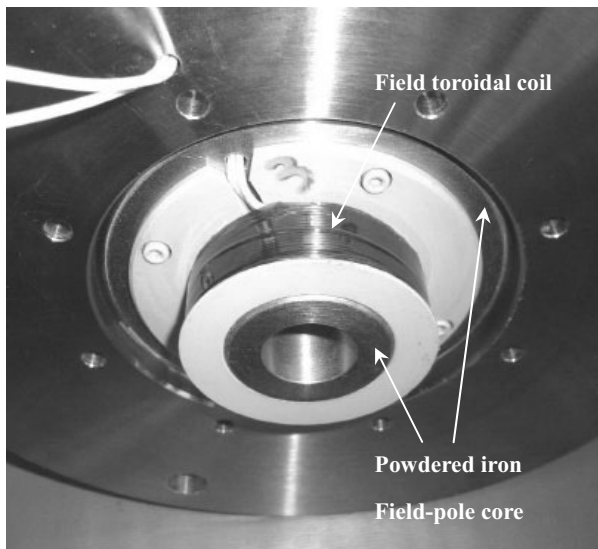


Fig.10. An example photograph of trial piece of powder iron field-pole core with toroidal coil.

(文 献)

- 1) 寺谷達夫, 大熊繁: 電気学会論文誌, 127-D (2005), 887.
- 2) 電気学会・電気自動車駆動システム調査専門委員会: 電気自動車の最新技術, オーム社, 1999.
- 3) 木原良治, 大聖泰弘: 高性能ハイブリッド自動車の研究, 山海堂, 2005.
- 4) M. Kamiya: Proc. of International Power Electronics Conference, 5 (2005), 2, 1478.
- 5) 加納善明, 小坂卓, 松井信行: 電気学会論文誌, 123-D (2003), 196.
- 6) T. Kosaka, C. Pollock and N. Matsui: International Conference on Power Electronics, Machines and Drives IEE Publication, 498 (2004), 2, 534.