



永久磁石同期モータの高トルク密度化に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2019-06-19 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 吉川, 祐一 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00000228

永久磁石同期モータの高トルク密度化
に関する研究

2017年1月

吉川 祐一

目次

主要記号

第1章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の位置付け	3
1.3 論文の構成	6
第2章 デュアルロータ構造の永久磁石同期モータ	7
2.1 諸言	7
2.2 デュアルロータモータの基本原理	8
2.2.1 トロイダル巻線デュアルロータモータ	8
2.2.2 デュアルロータモータの巻線配置	11
2.3 解析を用いた設計	16
2.3.1 設計目標	16
2.3.2 フェライト磁石適用に向けた検討	18
2.3.3 解析結果	21
2.3.4 コギングトルクの低減検討	26
2.4 試作機を用いた実験結果	30

2.5 結言	32
第3章 3次元折り曲げ鉄心を用いた永久磁石同期モータ	33
3.1 緒言	33
3.2 3DBCを用いたモータの基本構成	34
3.2.1 3DBCを用いたモータの構造と特徴	34
3.2.2 3DBCの詳細構造	37
3.3 解析を用いた設計	42
3.3.1 設計目標	42
3.3.2 解析結果	44
3.4 試作機を用いた実験結果	50
3.5 結言	54
第4章 希土類ボンド磁石を用いた埋込磁石形同期モータ	55
4.1 緒言	55
4.2 希土類ボンド IPMSM の構造と特徴	56
4.2.1 希土類ボンド IPMSM のロータ構造	56
4.2.2 希土類ボンド IPMSM に適した磁性材料	59

4.2.3	成型によるクリアランスレス化	61
4.2.4	希土類ボンド IPMSM の特徴まとめ	63
4.3	解析を用いた最適形状の検討	63
4.3.1	10 極 12 スロット構造の解析結果	63
4.3.2	8 極 12 スロット構造の解析結果	68
4.3.3	希土類焼結 IPMSM との比較	72
4.4	試作機を用いた実験結果	73
4.5	結言	75
第 5 章	結論	77
	参考文献	80
	謝辞	84

主要記号

P_m	:	モータ出力
T	:	トルク
P	:	極数
S	:	スロット数
P_n	:	極対数 $P/2$
ω_r	:	機械角速度
L_d	:	d 軸インダクタンス
L_q	:	q 軸インダクタンス
i_d	:	電機子電流 i_a の d 軸成分
i_q	:	電機子電流 i_a の q 軸成分
φ_a	:	d-q 座標軸上の永久磁石による電機子鎖交磁束
T_{total}	:	モータ出力トルク
T_i	:	インナーロータより発生するトルク
T_o	:	アウターロータより発生するトルク
α_o	:	アウター側ティース先端角
α_i	:	インナー側ティース先端角
T_{cog}	:	コギングトルク
T_{cog-i}	:	インナーロータ側に発生するコギングトルク
T_{cog-o}	:	アウターロータ側に発生するコギングトルク
N	:	スロット数と極数の最小公倍数
θ	:	ロータ位置
φ	:	位相
W_{fe}	:	鉄損
W_{hy}	:	ヒステリシス損
W_{edd}	:	うず電流損

- f : 周波数
- a : 2周波法で求められる磁束密度における係数
- B_k : 磁束密度の各成分
- V_e : 要素体積
- τ : 1周期の時間
- J_e : うず電流損密度
- σ : 導電率

第1章 緒論

1.1 研究の背景

東日本大震災以降、地球環境保護の観点や二酸化炭素排出規制の影響により、国内全消費電力の約半分を消費しているモータに対して、省エネルギー化の要求が非常に高まってきた。この流れによって、家電製品に使用されるモータだけでなく、産業用、車載用などの様々なモータにおいて、高効率化が求められており、回転子に永久磁石を用いた永久磁石同期モータ（PMSM：Permanent Magnet Synchronous Motor）の普及が加速している。

また、日本国内においては、PMSM の一つである埋込磁石形同期モータ（IPMSM：Interior Permanent Magnet Synchronous Motor）の研究開発^{(1)・(3)}による技術進化によって、コンプレッサ用モータや HEV 用のモータなどで 95%を超える効率を実現している^{(4)・(7)}。しかしながら、効率を向上させるためには、モータ内部で強い磁束を発生させる希土類焼結磁石を使用する必要がある。希土類焼結磁石は、ネオジウム（Nd）と鉄（Fe）とボロン（B）を主成分とした永久磁石であり、モータに用いることで高効率、高出力化が実現できる。しかし、希土類磁石に含まれる成分の中でも重希土類と呼ばれ、永久磁石の保磁力を高めるために添加されるジスプロシウム（Dy）やテルビウム（Tb）などは、採掘できる個所が世界でも限られていることから、非常に高価になるため、高級な家電製品に用いられるモータや自動車用の主機モータでしか使用されていないのが実情である。

さらに、尖閣諸島問題に端を発した希土類元素の供給問題によって、Nd や Dy などの希土類元素を多く含む希土類焼結磁石は、価格が高騰するなどの供給リスクが発生した。これにより、脱重希土類や省希土類をコンセプトとしたモータの開発が様々な研究機関で進められている。例えば、希土類焼結磁石の代替として、安価で安定供給可能なフェライト磁石を用いたスポーク状 IPMSM^{(8)・(10)}、ダブルステータ型のアキシシャルギャップモータ⁽¹¹⁾、アモルファスモータ^{(12)・(14)}、ハイブリッド界磁モータ⁽¹⁵⁾などが提案されており、希土類焼結磁石を用いた IPMSM（以下、希土類焼結 IPMSM）と比較して、同等程度の特性が確認されている。しかしながら、アモルファス金属や圧粉磁心などの高価な材料を使用することや、構造が複雑になること、ロータ強度が悪化するなど、希土類焼結 IPMSM と置き換わるためには、課題が残されている。また、希土類焼結磁石ではなく、比較的安価

1.2 本研究の位置付け

PMSMにおいて、永久磁石によって発生する巻線鎖交磁束の方向を d 軸と仮定し、 d 、 q 軸インダクタンスを L_d 、 L_q とした場合、出力トルク T は、極対数 P_n と永久磁石による電機子鎖交磁束 φ_a を用いて(1.2)式で表される。ただし、電機子電流の d 軸成分を i_d とし、電機子電流の q 軸成分を i_q としている。

$$T = P_n \{ \varphi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \quad \dots \dots \dots (1.2)$$

(1.2)式の右辺第1項は永久磁石によるマグネットトルクを示し、第2項は d 軸インダクタンス L_d と、 q 軸インダクタンス L_q の差によって生じるリラクタンストルクを示している。この式より、同一電流の条件下で PMSM の出力トルクを向上させるためには、永久磁石による鎖交磁束を大きくするか、 d 軸インダクタンス L_d と q 軸インダクタンス L_q の差を大きくすることが必要である。また、表面磁石形同期モータ (SPMSM : Surface Permanent Magnet Synchronous Motor) の場合、 d 軸インダクタンス L_d と q 軸インダクタンス L_q が等しくなるため、(1.2)式の第2項が無くなり、第1項のマグネットトルクだけになる。

以上の事から、PMSM の高トルク密度化には、以下に示す3つの方法があると考えられる。まず、マグネットトルクを向上させる方法として、永久磁石による鎖交磁束を大きくするために、残留磁束密度 B_r の大きい永久磁石を有効的に用いることと、エアギャップの面積を拡大することが考えられる。次に、リラクタンストルクを活用することである。

まず、永久磁石を有効的に用いて高トルク密度化していく方針について説明する。図 1.1 に、様々な種類の永久磁石における B_r と永久磁石コストの関係を示している。 B_r が大きくなると共にコストが高くなるのが分かる。同図より B_r が最も大きい希土類焼結磁石を用いることが、最も PMSM の高トルク密度化に効果的であることが確認できる。しかしながら、希土類焼結磁石は、更なる高 B_r 化や高保磁力化を目的に、新たな元素を用いることや製造方法を含めた研究開発がされているが、現時点ではコストの観点で課題が多い。さらに、コストの観点から歩留まり悪化につながるような形状を構成することが難しいため、平板形状で用いることが多くなっている。

一方、フェライト磁石と希土類ボンド磁石は、希土類焼結磁石に比べると B_r は約 50% 程度から 30%程度と低いが、コストが大幅に安くなっている。希土類ボンド磁石は、希土

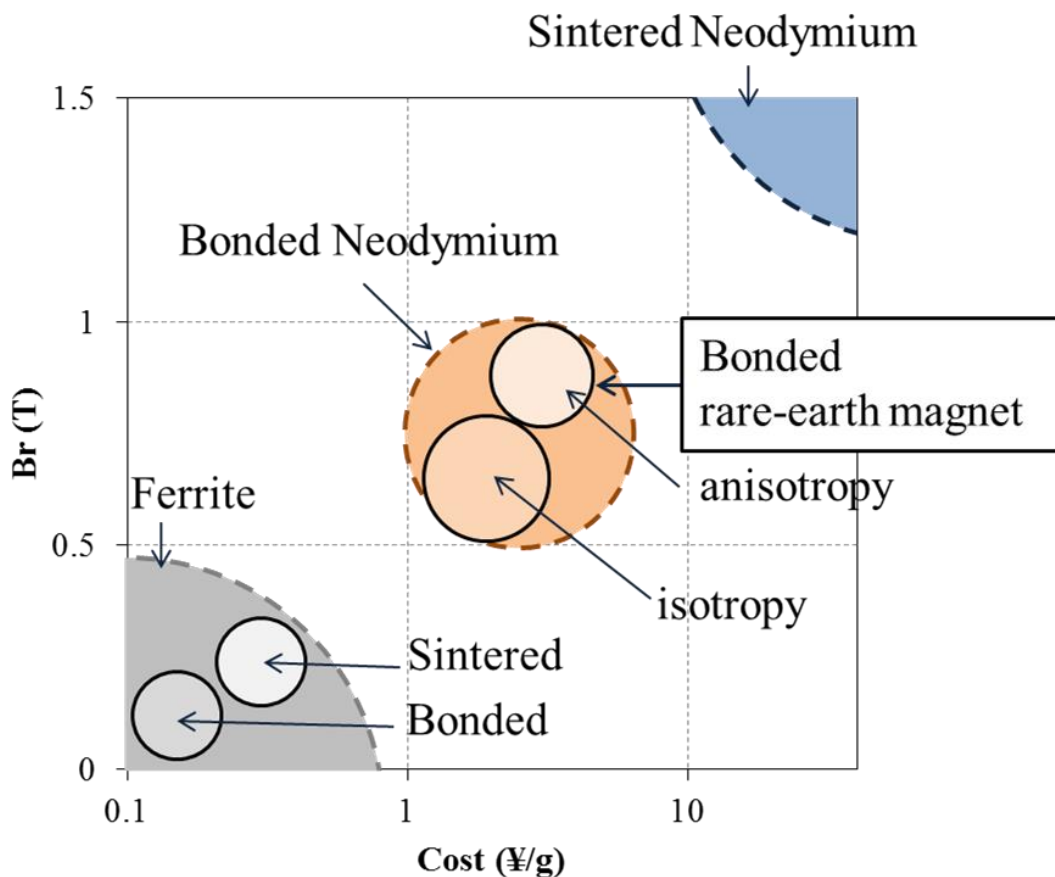


図 1.1 永久磁石のコストと性能の関係

類磁石の磁粉と樹脂等を混練して成形するため、樹脂材料や樹脂との配合比を工夫するなどによる永久磁石の高密度化が進められていることや、既に Dy レスの希土類ボンド磁石用の磁粉が、市場に流通していることから、今後の研究開発による進化が期待できる。また、フェライト磁石は、主要な原材料が酸化鉄であるため、コストが安く資源リスクも低いため、非常に有用な永久磁石であると考えられる。これらの事から、本研究の対象とする永久磁石は、フェライト磁石と希土類ボンド磁石とし、これらの永久磁石を有効的に活用することに着目し、検討を行っている。

次に、エアギャップ面積の拡大について説明する。(1.2)式に示すように、マグネットトルクは永久磁石による鎖交磁束に比例する。鎖交磁束はロータの永久磁石からステータ巻

線に鎖交する磁束であるため、ステータとロータの隙間であるエアギャップに依存する。すなわち、エアギャップでのロスを小さくするためには、エアギャップを短縮するか、エアギャップ面積を拡大することが必要であり、これらの対策を実施することによって、永久磁石による鎖交磁束は大きくなると考えられる。しかしながら、エアギャップの面積は一般的なラジアルタイプの PMSM の場合、ステータ、ロータの径とコア積厚によって一意的に決定されるため、新たなモータ構造が必要となる。

最後にリラクタンストルクの活用については、IPMSM を始めとした様々なモータ形式において研究開発が進んでいる。リラクタンストルクは、極数とスロット数の組み合わせや、巻線方式、モータの形状によって大きく変化する。しかしながら、本研究においては、補助的な位置付けとして、リラクタンストルクを活用している。

以上の事から、本研究では PMSM の構造や形状に着目し、トルク密度の向上を図るために、モータの限られたスペースの中で、永久磁石の磁束を有効的に活用し、鎖交磁束を大きくする方法を提案している。

1.3 論文の構成

本論文は、緒論、結論を含め全5章で構成される。

まず第2章では、モータの構造を2次元的に捉え、ギャップ面積を最大限に拡大するために、ステータの内側と外側にロータを配置したデュアルロータ構造のPMSMを提案している⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。ステータにトロイダル巻線を施すことによって、ステータの内側と外側に配置したロータに同時にトルクを発生させることができる。これにより、永久磁石を配置できる箇所が大幅に拡大されるため、従来のフェライト磁石を用いたPMSMに比べて、高トルク密度化が実現できることを明らかにする。フェライト磁石を用いたデュアルロータ構造のSPMSMと希土類焼結磁石を用いたIPMSMを比較し、シミュレーションと試作機による実験の両面から総合的に評価している。

第3章では、第2章とは異なるアプローチでギャップ面積の拡大について検討している。ステータコアの上下面の電磁鋼板を折り曲げることにより、ギャップ面積を拡大するSPMSMを提案している⁽²⁰⁾⁽²²⁾。電磁鋼板を折り曲げることによって発生するうず電流損と、エアギャップ面積拡大による効果を、シミュレーションと試作機による実験の両面から総合的に評価している。

第4章では、低コストで高効率を実現するモータとして、従来の希土類焼結磁石を用いたIPMSMに対して、希土類ボンド磁石をロータ内部に直接成形することによって、ロータを構成する希土類ボンド磁石を用いたIPMSMを提案している⁽²³⁾⁽²⁴⁾。特に、ロータの永久磁石挿入部の最適形状をシミュレーションにより明らかにし、希土類ボンド磁石の磁石材料と、希土類ボンド磁石をロータの永久磁石挿入孔に直接成形することによる効果を示している。また、希土類焼結磁石を用いたIPMSMと希土類ボンド磁石を用いたIPMSMの試作機を作成し、シミュレーションと実験の両面から総合的に評価している。

最後に、第5章では、結論として本論文についての総括を述べる。

第2章 デュアルロータ構造の永久磁石同期モータ

2.1 緒言

減速機などを用いないダイレクトドライブ方式などで使用されるモータは、高いトルクが求められるため、高トルク密度化が必須の課題となっている。そこで高トルク密度化を目的に、Lipoらによって、デュアルロータ構造のモータの基本原理や応用検討が報告されている⁽²⁵⁾⁻⁽²⁹⁾。また、筆者らは、希土類焼結磁石を用い、トロイダル巻線を施したデュアルロータ構造のIPMSMを提案してきた⁽³⁰⁾⁻⁽³²⁾。デュアルロータ構造のIPMSMは、ステータの内側と外側にロータを配置する構造であるため、永久磁石を有効的に配置することが可能となり、トルク密度を大幅に向上できる特徴を持っている。しかしながら、その構成上、永久磁石の使用量が多くなるため、永久磁石量の低減、又は低コスト磁石材料への変更が課題であった。さらに、ギャップ内の磁束密度が向上することに伴い、コギングトルクが増大することも、課題となっていた。

本章では、トルク密度を最大化する観点から、デュアルロータモータの巻線方式と、巻線スロット数と極数の最適な関係を検討している。更に、ロータがステータの内側と外側に配置されることを有効活用したモータ構造について提案している⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

希土類元素の供給問題によって、NdやDyなどの希土類元素を多く含む希土類焼結磁石は、価格が高騰するなどの供給リスクが発生した。また、希土類焼結磁石だけでなく、Brの高いフェライト磁石には、希土類元素であるランタン(La)が含まれており、脱希土類化を実現するためには、Brの低いフェライト磁石を用いたモータが必要である。そこで、本章では、脱希土類の高トルク密度モータとして、フェライト磁石を用いたデュアルロータモータを提案している。先行研究の希土類磁石を用いたトロイダル巻デュアルロータのモータを単純にフェライト磁石のモータに応用しただけではトルクが低下するだけであるため、極数とスロット数の最適化や、永久磁石のオーバーハングによる永久磁石面積を拡大する方策を提案している。提案したフェライト磁石を用いたデュアルロータモータと希土類磁石を用いたアウターロータ構造のIPMSMとの特性比較を行う。

2.2 デュアルロータモータの基本原理

2.2.1 トロイダル巻線デュアルロータモータ

モータは巻線方式の違いにより、ステータコア形状・モータ構造・適用用途が異なり、また、利点と課題も異なってくる。集中巻巻線と分布巻巻線の利点を併せ持つトロイダル巻線の利点と課題について説明する。

集中巻は、各ティースに集中して巻線が施され、分布巻に対して、コイルエンドが短縮されるため、モータの薄型化が可能である。しかし、分布巻においては、磁極ピッチが等間隔であるのに対し、集中巻は、磁極ピッチが等間隔とならないため、集中巻は、分布巻に対し、ラジアル力が増大する傾向にある。ラジアル力は、トルクに寄与する成分ではないため、ステータコアを吸引し騒音の原因となる。

トロイダル巻は、ステータヨーク部に直接、集中巻で巻線が施されるためコイルエンドが短縮でき、なおかつ、分布巻の巻線配置を再現できるため、ラジアル力が低減できる。これより、トロイダル巻は、集中巻と分布巻の両方の特徴を併せ持つ巻線方式であると言える。しかしながら、ステータの内側と外側に磁束が発生するため、シングルロータ構造では、巻線に電流を流した際に発生する磁束がトルクに 100% 寄与せず、効率の低下やモータの大型化を招いていた。

図 2.1 に、本章で提案するトロイダル巻線デュアルロータのモータ構造を示す。図 2.1 に示すように、トロイダル巻線デュアルロータは、1 つのステータを持ち、ステータの内側と外側に、フェライト磁石が表面に貼り付けられたアウターロータとインナーロータの 2 つのロータを配置している。また、アウターロータとインナーロータは共に、ステータと微小なエアギャップを持っている。そして、アウターロータとインナーロータは 1 つの出力軸を持つようにロータフレームなどにより連結されている。ロータを 2 つ持つことによって、デュアルロータモータのトルク式は、デュアルロータモータのトルクを T_{total} 、デュアルロータモータのインナーロータより発生するトルクを T_i 、デュアルロータモータのアウターロータより発生するトルクを T_o とすると、(2.1)式のように表現できる。

$$T_{total} = T_i + T_o \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

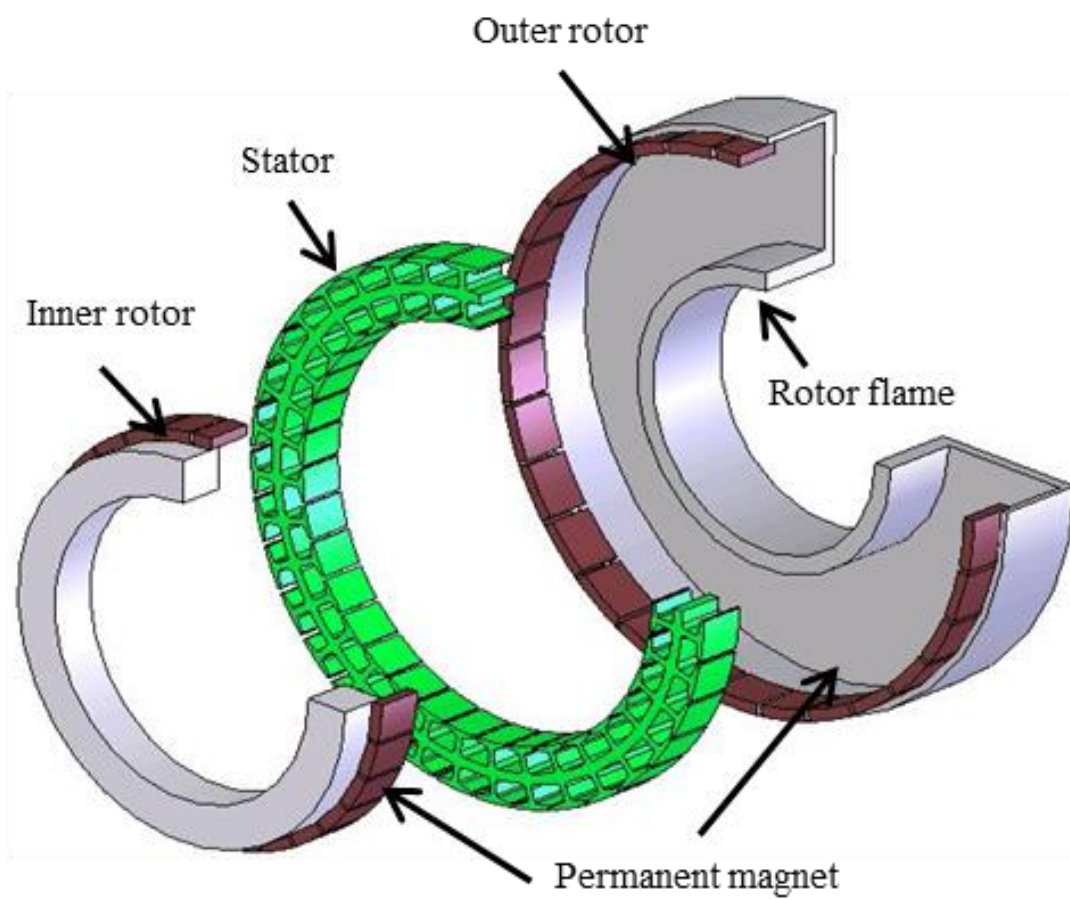


図 2.1 デュアルロータモータの構造

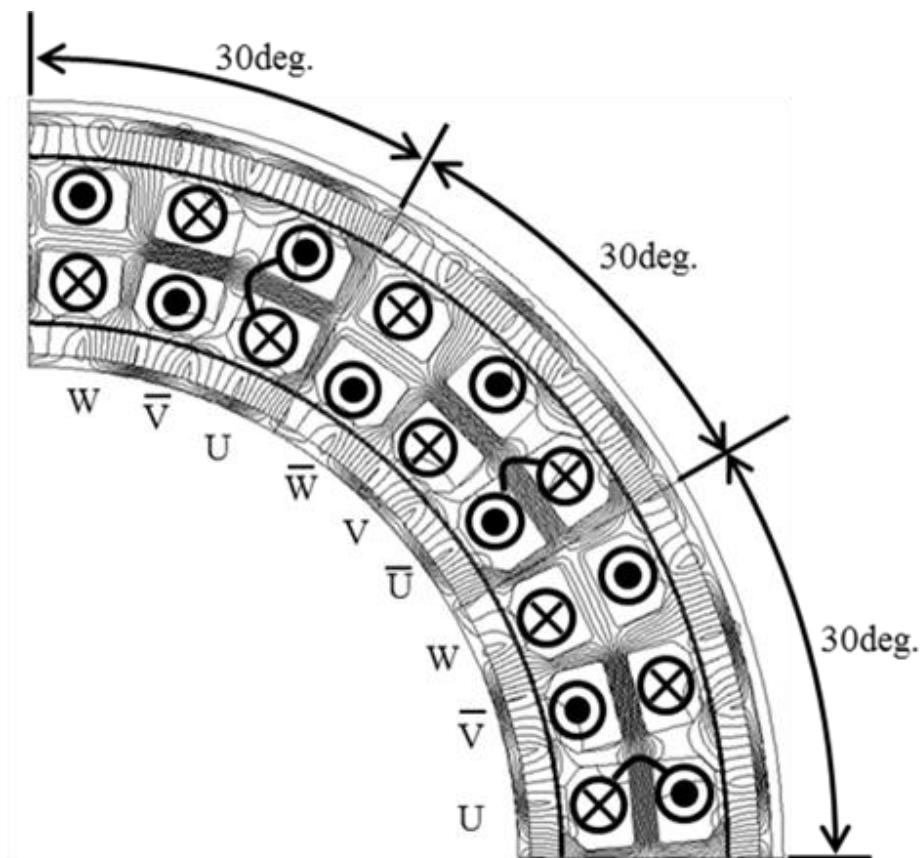


図 2.2 トロイダル巻の磁束分布

(2.1)式より、デュアルロータモータはアウターロータとインナーロータの 2 つのトルクが利用できるため、従来のシングルロータのモータに対して、トルク密度を高くすることが可能である。更に、詳細は次節にて説明するが、(2.1)式と同様に、コギングトルクやトルクリプルもインナー側とアウター側を足し合わせた形になるため、インナーロータで発生するトルク脈動成分とアウターロータで発生する脈動成分の位相を反転させることによって脈動成分のみを打ち消しあうことが可能である。

図 2.2 に、トロイダル巻線デュアルロータの磁束分布と巻線配置を示す。デュアルロータ構造とすることで、ステータの内側と外側に磁束が鎖交し、巻線磁束をトルクに 100% 寄与させることが可能となる。また、図 2.2 に示した磁束分布より、巻線電流による磁束分布が従来の分布巻と同様に、30 度ずつに整列していることが確認できる。トロイダル巻線を採用することにより、分布巻の巻線配置となるため、ラジアル力が分布巻と同等になると考えられる。以上のことから、トロイダル巻デュアルロータ構造のモータの利点を以下にまとめる。

- (1) 出力密度が大幅に向上するため、小型化や高出力化が容易となる。
- (2) 集中巻の巻線方法で巻線されるため、コイルエンドが分布巻に比べて大幅に短縮できる。これによって、銅損が低減され効率が向上し、コイルエンドを含めたモータ体積を低減できる。
- (3) 磁束分布が分布巻と同じになるため、ラジアル力が低減でき、振動・騒音を抑制することが可能である。

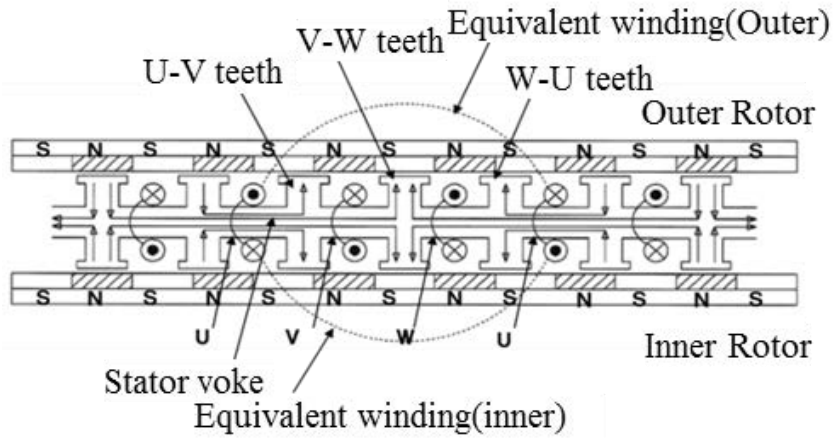
トロイダル巻線を利用したデュアルロータ構造の PMSM は、従来の集中巻モータや分布巻モータの利点を併せ持ち、なおかつ、シングルロータに比べて、トルク密度の観点から、有利であると考えられる。

2.1.2 デュアルロータモータの巻線配置

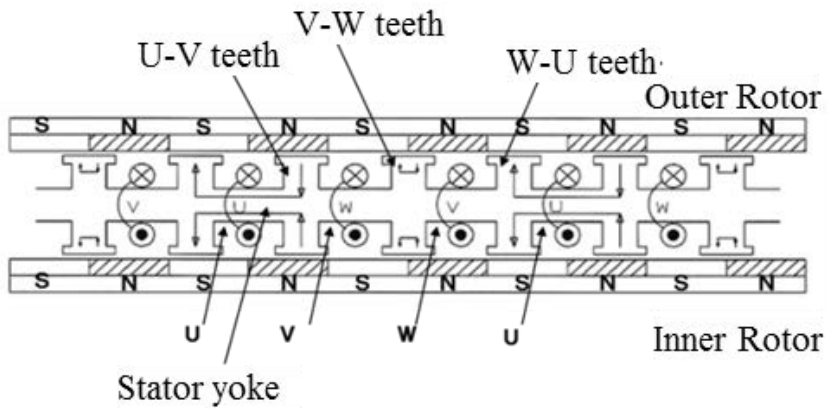
図 2.3 に巻線配置の概念図を示す。図 2.3(a)は、極数 P とスロット数 S の組み合わせが $P : S = 5 : 3$ の時の巻線配置と磁束の流れを示している。図 2.3(a)より、トロイダル巻はステータの内側と外側に巻線電流による磁束が発生することが分かる。トロイダル巻線を採用す

ることにより、インナーロータとアウターロータでトルクを発生させるための巻線を一体化できる。また、アウターロータ側とインナーロータ側を分けて見てみると、巻線としてはステータのヨーク部分に集中巻で巻線されているが、等価的には、分布巻の巻線配置と同じになっていることが分かる。図 2.3(b)に、 $P : S = 4 : 3$ の時の巻線配置と磁束の流れを示し、図 2.3(c)に、 $P : S = 4 : 3$ で巻線をアウターロータ用とインナーロータ用に別々に集中巻巻線した時の巻線配置と磁束の流れを示す。図 2.3(b)より、集中巻の磁束配置となっており、永久磁石とステータとの位置関係にもよるが、ティース先端を通過して永久磁石に戻る磁束の流れが確認できる。図 2.3(c)は、アウターロータ用とインナーロータ用に別々に集中巻巻線していることにより、それぞれの巻線間に巻線ノズルを入れるためのデッドスペースが発生していることが分かる。

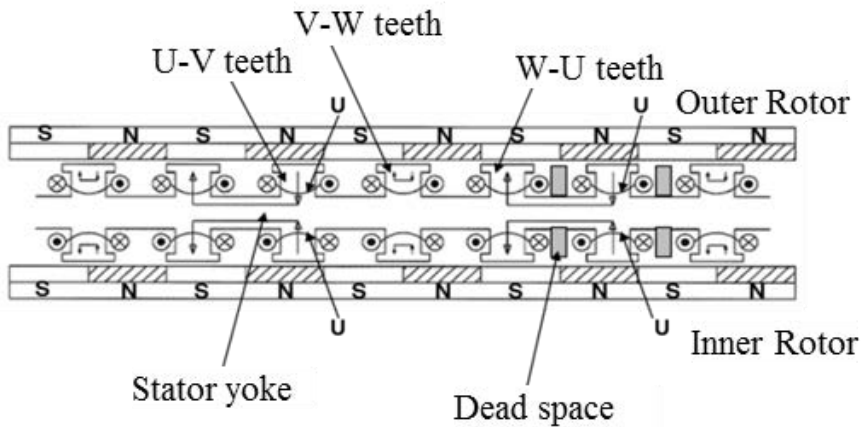
図 2.4 に解析に用いたデュアルロータモータの形状を示す。図 2.4 のモデルを用いて有限要素解析法(FEA : Finite Element Analysis)でモータの体積、永久磁石量、ステータ形状、アンペアターンが同一条件の基、極数 P とスロット数 S の組み合わせと巻線方式を変化させ、トルク解析を行った。ただし、この解析には、表 2.3 に示している寸法等を用いている。図 2.5、図 2.6 に、図 2.3(c)の組合せのモータを基準に正規化した場合のトルク密度と誘起電圧波形の比較を示す。図 2.5 では、図 2.3(b)のトルク密度が図 2.3(a)のトルク密度と同等程度であるが、図 2.6 より、誘起電圧が大きく歪んでいることが分かる。なお、図 2.6 の誘起電圧の歪率を算出したところ、図 2.3(a)が 9.1%、図 2.3(b)が 76.3%、図 2.3(c)が 2.5%であった。図 2.3(b)のような極数 P とスロット数 S の組み合わせは、シングルロータモータでは一般的であるが、トロイダル巻のデュアルロータモータにおいては、有効ではないと考えられる。これは、図 2.3(a)が分布巻の磁束配置となるのに対し、図 2.3(b)が集中巻の磁束配置になっていることが要因であると推察する。さらに、図 2.3(c)に対して、図 2.3(a)の場合では、トルク密度が 1.4 倍程度に向上していることが分かる。これは、永久磁石の磁束を有効的に使えることと、巻線のデッドスペースが発生しないことに起因していると考えられる。以上のことから、トロイダル巻デュアルロータモータの極数 P とスロット数 S の組み合わせは、 $P : S = 5 : 3$ が最適であると考えられる。また、生産性を考慮しなければ、分布巻で一般的に用いられる $P : S = 1 : 3$ の組み合わせや、 $P : S = 1 : 6$ の組み合わせも可能と考えられる。これより、本章では、 $P : S = 5 : 3$ の組合せである 60 極 36 スロットを採用し、検討を行っている。



(a) $P : S = 5 : 3$



(b) $P : S = 4 : 3$



(c) $P : S = 4 : 3$ (Concentrated winding)

図 2.3 巻線配置の比較

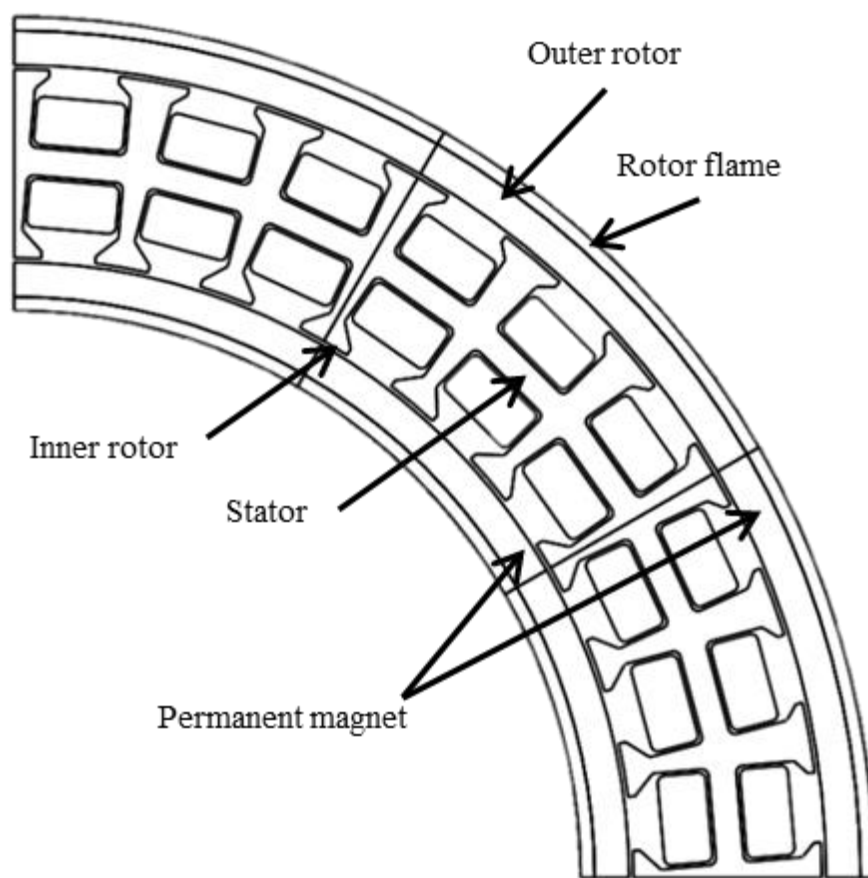


図 2.4 解析に用いたデュアルロータモータの形状

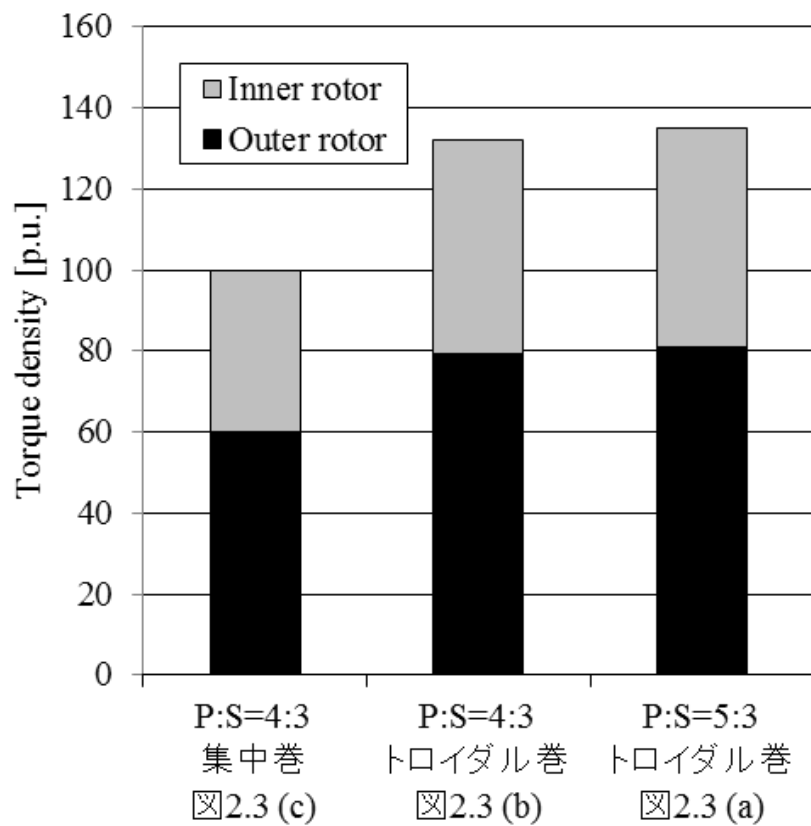


図 2.5 極数スロット数の違いによるトルク密度の比較

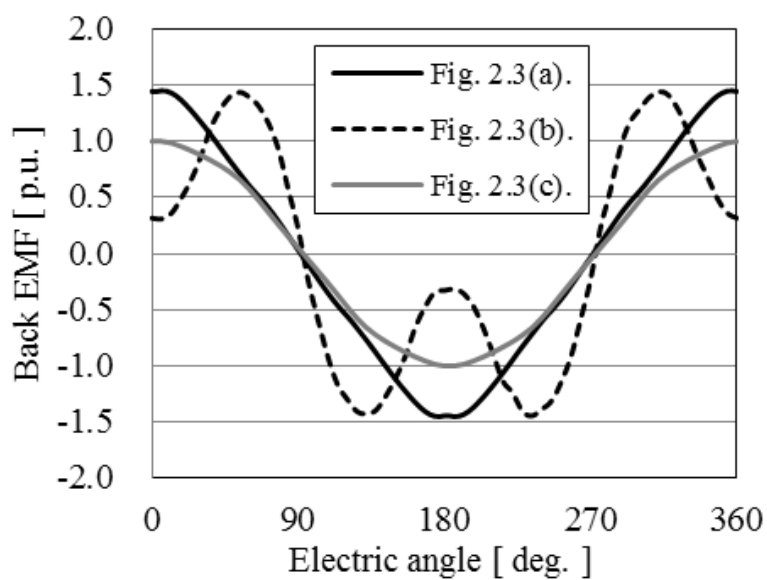


図 2.6 極数スロット数の違いによる誘起電圧波形の比較

2.3. 解析を用いた設計

2.3.1 設計目標

設計目標を表 2.1 に、比較対象とするアウターロータモータの形状を図 2.7 に示す。この比較対象機は、希土類焼結磁石を用いたアウターロータの IPMSM で、48 極 36 スロットの集中巻のモータである。本章での目標は、表 2.1 に示したとおり比較対象機の希土類焼結磁石を用いたモータと同等のトルク密度を、提案するフェライト磁石を用いたモータで実現することである。

表 2.1 設計目標

	Design target
Max Torque	35 Nm
Speed	50 min ⁻¹
Torque	20 Nm
Power	100 W
Outer diameter	250 mm
Core length	20 mm
Motor height	30 mm
Motor volume	1,472,621 mm ³
Torque density	2.38×10 ⁻⁵ Nm/mm ³

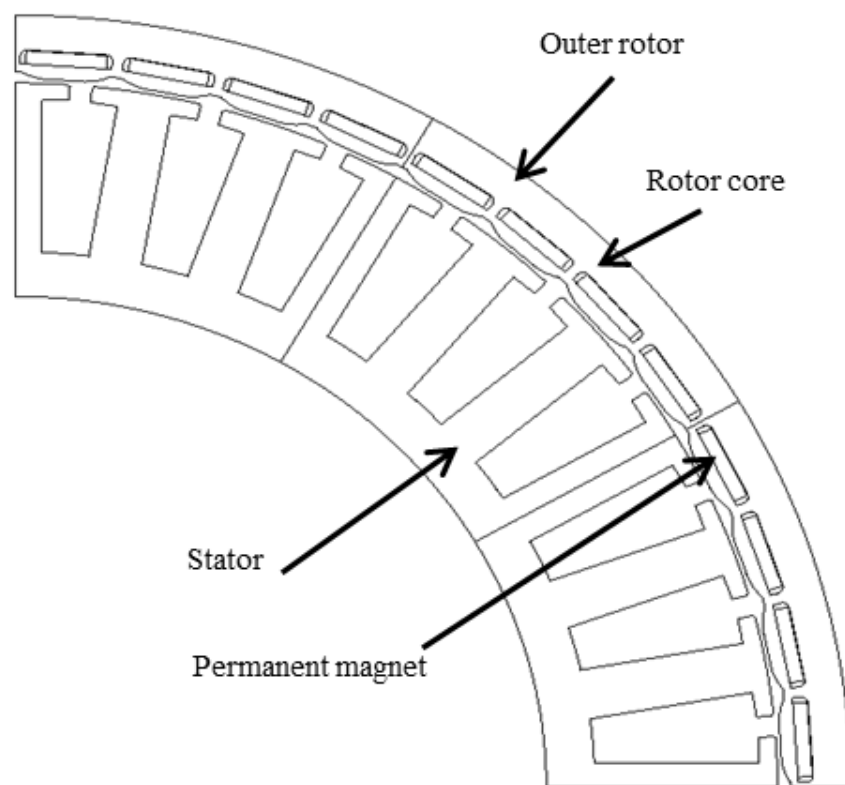


図 2.7 解析に用いた希土類焼結アウターロータ IPMSM の形状

2.3.2 フェライト磁石適用に向けた検討

フェライト磁石は、希土類焼結磁石に対して B_r が低いため、フェライト磁石を使用するためには、永久磁石の表面積を可能な限り大きくすることと、トルクに寄与する有効磁束を増加させることが必須であると考えられる。表 2.2 に本章の検討で用いた永久磁石の特性比較⁽³³⁾⁽³⁴⁾を示す。本章で検討したフェライト磁石は、成分に希土類元素 (La 等) を含まないフェライト磁石である。表 2.2 より、希土類焼結磁石とフェライト磁石を比較すると、 B_r に約 3 倍の差がある。この差を埋めるためには、単純計算では、永久磁石の表面積を 3 倍にすれば、同等レベルのトルク密度になると想定できるが、同一体格の中で永久磁石の表面積を 3 倍にすることは、非常に困難であると考えられる。そこで、フェライト磁石を適用するに当たり、以下の方法で磁石面積、すなわち有効な磁束量の確保を図った。

- (1) デュアルロータ化による永久磁石表面積の拡大
- (2) 表面磁石型モータ (以下 SPMSM) 化による漏れ磁束の低減とアウターロータの内径拡大
- (3) ステータの積厚に対し、永久磁石をオーバーハング

表 2.3 に、アウターロータモータとデュアルロータモータの寸法等を示す。まず、デュアルロータ構造を用いることによって、永久磁石の表面積は、約 2.2 倍にすることが可能である。さらに、永久磁石をオーバーハングさせることで、永久磁石表面積は最大で 3.3 倍まで拡大することが可能である。ここで、オーバーハングについて説明する。オーバーハングとは、ステータの積厚に対して、永久磁石の高さを大きくすることで、磁束量を増加させ

表 2.2 永久磁石の特性比較

	Rare earth magnet	Ferrite magnet
Remanence B_r	1.24 T	0.42 T
Coercivity H_{cJ}	960 kA/m	266 kA/m

る手法のことであり、コイルエンドによって発生するデッドスペースを有効的に活用するため、比較的安価なフェライト磁石を用いたモータでは、一般的に用いられている方法である。ただし、投入した永久磁石量に対して、全ての磁束がステータに鎖交することはない。また、アウターロータモータとデュアルロータモータで巻線面積は異なるが、比較の簡易化のために、巻線ターン数と占積率は同一としている。一方 IPMSM の場合、永久磁石をロータ内部に埋め込むため、強度部材でもあるブリッジ部が必要となる。ブリッジ部は永久磁石の極間部分に設けられるため、永久磁石の N 極から S 極へと漏れ磁束が発生し、永久磁石の磁束を最大限に活用することはできない。また、アウターロータの IPMSM の場合、ロータの内径側を円にすると、希土類焼結磁石は平板形状となることから、不等ギヤップ形状にする必要がある。

以上のことから、フェライト磁石の永久磁石表面積を希土類焼結磁石の 3 倍以上にしていることと、IPMSM での漏れ磁束の影響等を考慮すると、希土類焼結磁石のフェライト磁石での置き換えが可能であると考えられる。

表 2.3 モータ諸元

	Outer Rotor IPMSM	Dual Rotor SPMSM
Pole number	48	60
Slot number	36	36
Motor diameter	250 mm	250 mm
Inner diameter (outer rotor)	230 mm	236 mm
Outer diameter (inner rotor)	—	179 mm
Core length	20 mm	20 mm
Magnet height	20 mm	30 mm
Magnet length	12 mm	—
Magnet surface area	11,520 mm ²	39,085 mm ²
Magnet volume	24,768 mm ³	195,422 mm ³
Magnet weight	183 g	958 g
Load point of outer magnet	0.95 T 148 kA/m	0.35 T 50 kA/m
Load point of inner magnet	—	0.32 T 78 kA/m
Ampere-turns	1140 AT	1140 AT
Winding turns	190 / Coils	190 / Coils
Winding area	113 mm ²	144 mm ²
Current density	9.35 A/mm ²	9.35 A/mm ²

2.3.3 解析結果

図 2.3(a)と図 2.4 で示したデュアルロータモータと図 2.7 に示したアウターロータモータの形状を用いて、磁界解析を用いたシミュレーションにより検討を行った。図 2.8 に、アウターロータモータとデュアルロータモータの永久磁石によるコイルへの鎖交磁束を示し、図 2.9 に誘起電圧波形を示す。図 2.8 と図 2.9 より、アウターロータモータの誘起電圧に対して、デュアルロータモータの誘起電圧が 5%程度高くなっていることが分かる。これにより、フェライト磁石の永久磁石面積を希土類焼結磁石の 3.3 倍にし、漏れ磁束を低減したことの効果が確認できた。また、図 2.10 にアウターロータモータとデュアルロータモータの無負荷時の磁束密度分布を示している。図 2.10 より、極端な磁気飽和などが起こっていないことが確認できる。さらに、この時のエアギャップ内の磁束密度分布を図 2.11 に示す。

図 2.11 より、希土類焼結磁石を用いたアウターロータモータのエアギャップ内の磁束密度に対して、フェライト磁石を用いたデュアルロータモータのエアギャップ内の磁束密度が半分以上になっていることが分かる。また、巻線に 6A の電流を流した時のデュアルロータモータとアウターロータモータのトルク波形を図 2.12 に示す。図 2.12 より、アウターロータモータとデュアルロータモータのトルクがほぼ同一であるため、トルク定数が等しいことが分かる。これにより、モータの体積が等しく、トルク定数も同等であることから、トルク密度も同等であることが言える。表 2.4 に定格運転時の損失および効率の試算結果を示す。表 2.4 より、効率も同等程度であることが確認できる。以上のことから、希土類焼結磁石を用いたアウターロータモータのトルク密度を、フェライト磁石を用いたデュアルロータモータで実現でき、効率も同等程度になると推察できる。

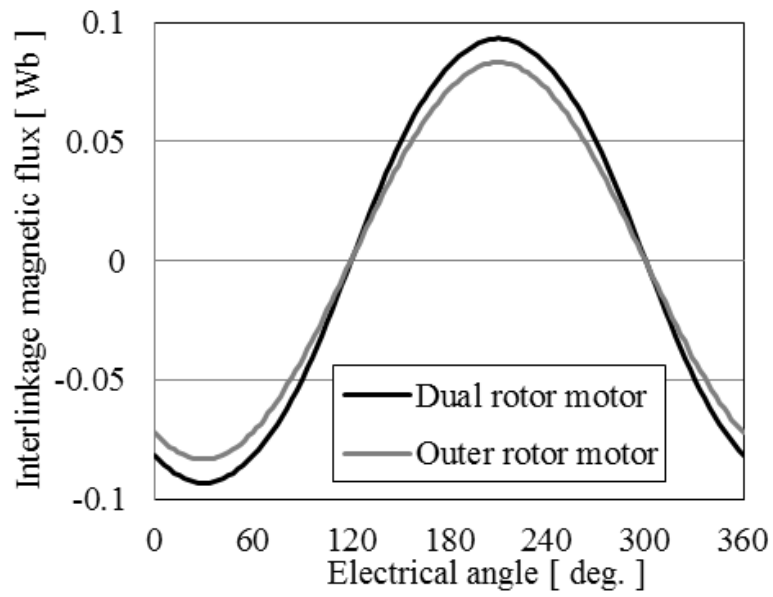


図 2.8 永久磁石によるコイルへの鎖交磁束

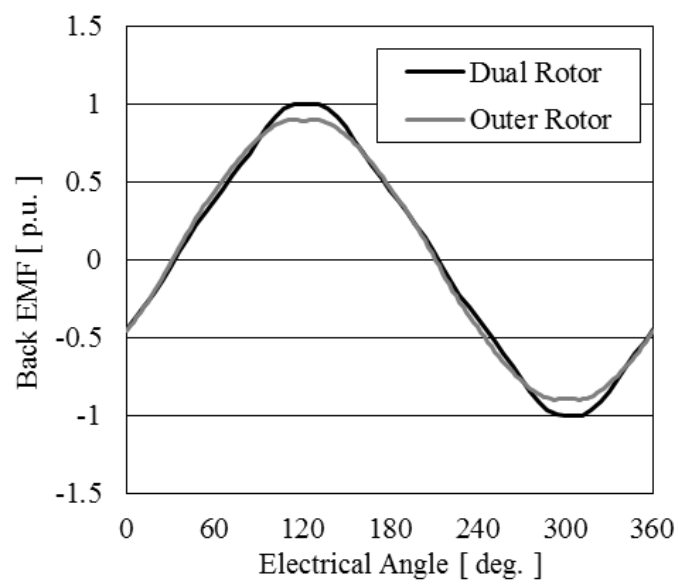
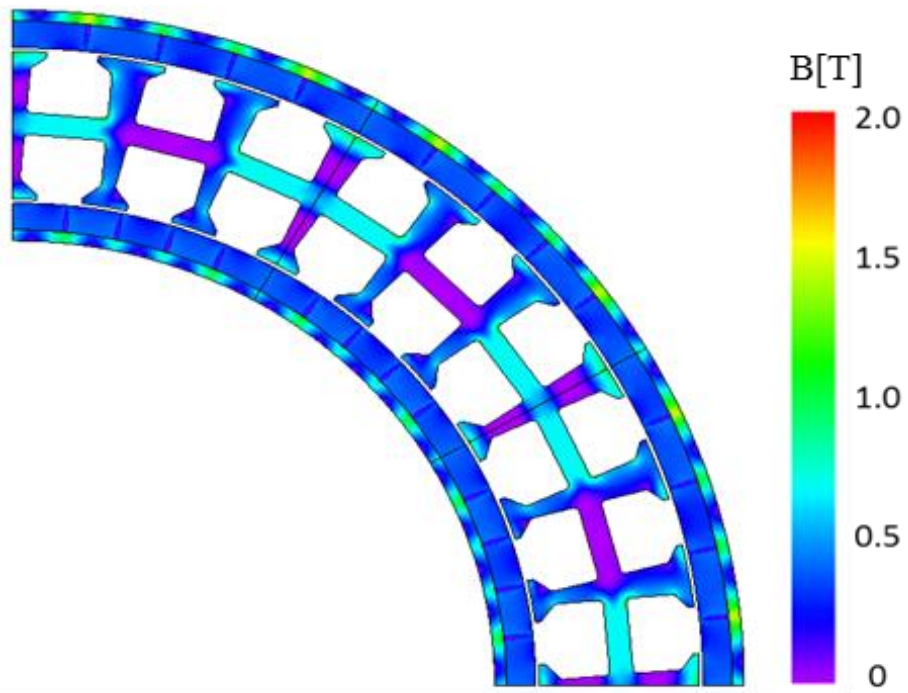
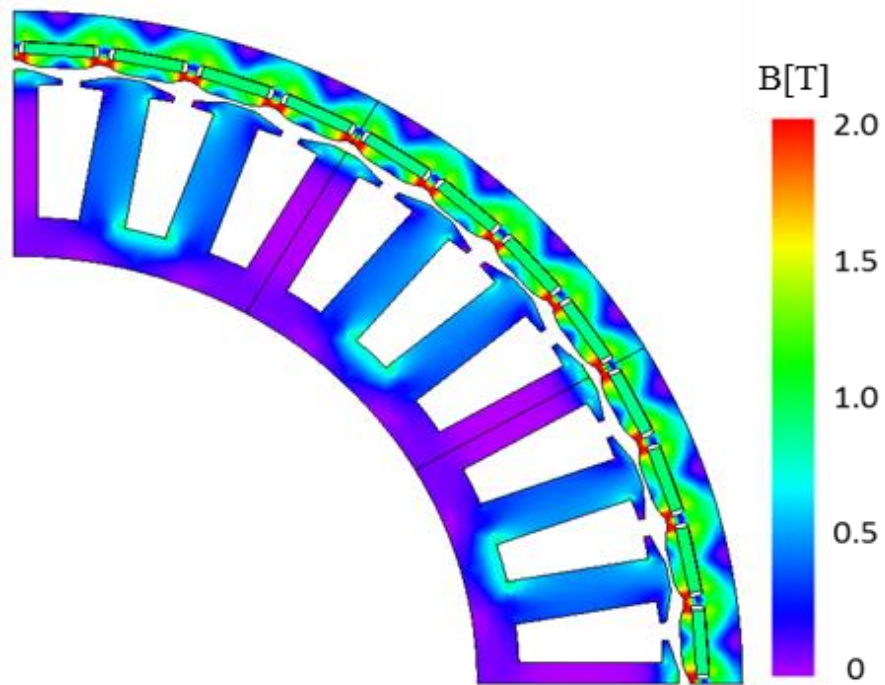


図 2.9 誘起電圧波形



(a) デュアルロータモータ (60P36S)



(b) アウターロータモータ (48P36S)

図 2.10 磁束密度分布

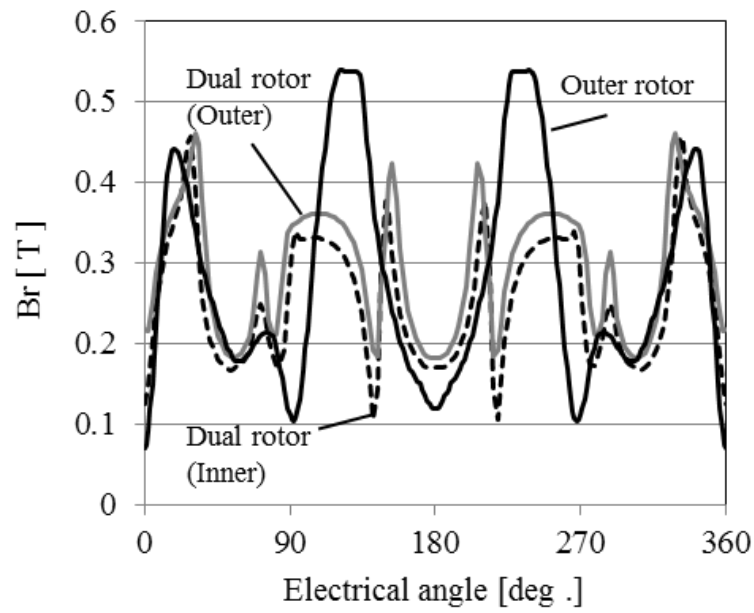


図 2.11 エアギャップ内の磁束密度分布

表 2.4 定格運転時の効率試算結果

	Outer rotor motor (Rare earth magnet)	Dual rotor motor (Ferrite magnet)
Speed	50 min ⁻¹	50 min ⁻¹
Torque	20 Nm	20 Nm
Power	104.7 W	104.7 W
Copper loss	111.5 W	113.2 W
Iron loss	2.9 W	4.6 W
Efficiency	47.8 %	47.0 %

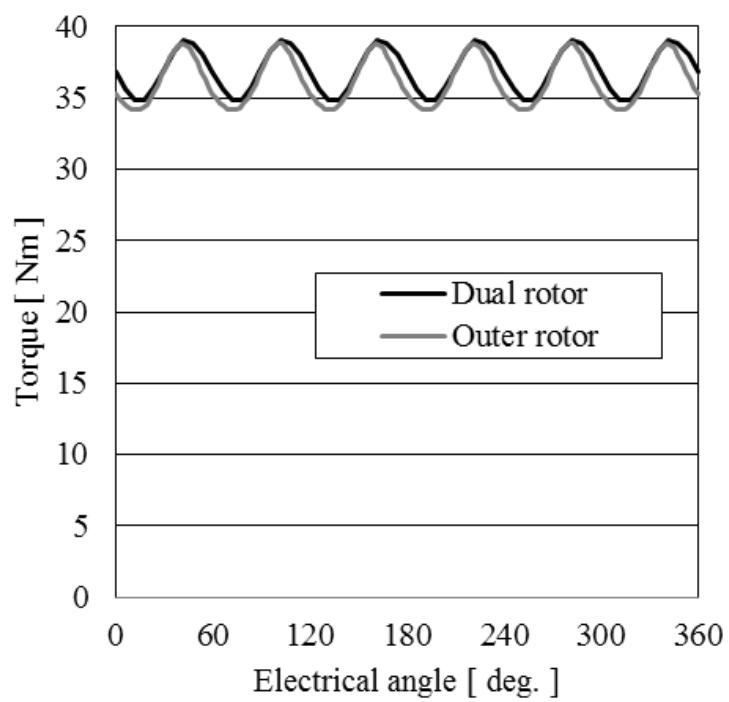


図 2.12 トルク波形

2.3.4 コギングトルクの低減検討

デュアルロータモータの場合、出力トルクと同様にステータのアウト側とインナー側のティース先端角度を組み合わせることによって、アウトロータとインナーロータで発生するコギングトルクをキャンセルすることが可能であると考えられる。デュアルロータモータのコギングトルク T_{cog} の式は(2.2)式のように表される。スロット数と極数の最小公倍数 N で表されるコギングトルク T_{cog} の基本波成分のみを検討の対象としている。

$$T_{cog} = T_{i-cog} + T_{o-cog} \\ = T_i \sin N\theta + T_o \sin N(\theta + \varphi) \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

ただし、 T_i はインナーロータのコギングトルク T_{i-cog} の振幅、 T_o はアウトロータのコギングトルク T_{o-cog} の振幅としている。(2.2)式より、モータのコギングトルク T_{cog} はインナーロータのコギングトルク T_{i-cog} とアウトロータのコギングトルク T_{o-cog} の合計で表されると考えられるため、 $T_i = T_o = T_c$ で、なおかつ、位相が反転する T_{i-cog} と T_{o-cog} の組み合わせ、すなわち、 $\varphi = \pi$ とすることで、(2.3)式に示すように、コギングトルク $T_{cog} = 0$ とすることが可能であると考えられる。

$$T_{cog} = T_c \sin N\theta + T_c \sin N(\theta + \pi) = 0 \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

また、コギングトルク T_{cog} に、高調波成分を多く含む場合は、本章で提案している方法と同様に、高調波成分同士が打ち消しあうように、ティース先端角度を組み合わせればよい。

図 2.13 に、ステータコアのティース形状を示す。ステータコアは、ステータヨーク内外にアウトティースとインナーティースを配置しており、アウト・インナーのティース先端角度を α_o 、 α_i としている。図 2.14 に α_o 、 α_i を変化させた時のコギングトルク T_{cog} と位相 φ の変化を示している。なお、位相 φ の変化は、アウト・インナー共に同じ変化の仕方であったため、一体にして示している。図 2.14 より、コギングトルク T_{cog} はティース先端の角度を変化させることによって、位相 φ を反転させながら波高値の大小を繰り返していることが確認できる。図 2.15 に、 $\alpha_i=6.8\text{deg}$ 、 $\alpha_o=9.2\text{deg}$ の時のデュアルロータモータのコギングトルク波形を示している。図 2.15 より、インナーロータのコギングトルク T_{i-cog} と

アウターロータのコギングトルク T_{o-cog} が、位相が反転しつつ波高値がほぼ同等となっているため、コギングトルク同士が打ち消しあってトータルのコギングトルク T_{cog} は非常に小さくなっていることが確認できる。図 2.16 に比較対象としたアウターロータモータとデュアルロータモータのコギングトルクの比較を示している。これより、デュアルロータの方がコギングトルクのキャンセル効果によって、コギングトルクは小さくなっていることがわかる。ただし、図 2.16 で示したアウターロータのコギングトルクに対して、図 2.15 で示したデュアルロータの各ロータでのコギングトルクは大きくなっているが、デュアルロータモータはそれぞれ単独で駆動しないため、問題ないことを確認している。

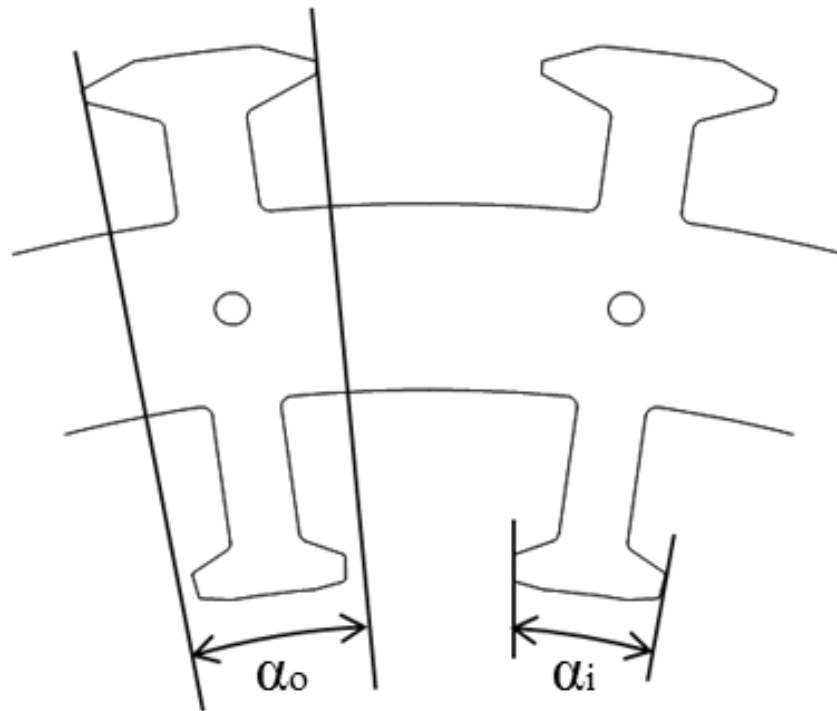


図 2.13 解析に用いたティース形状

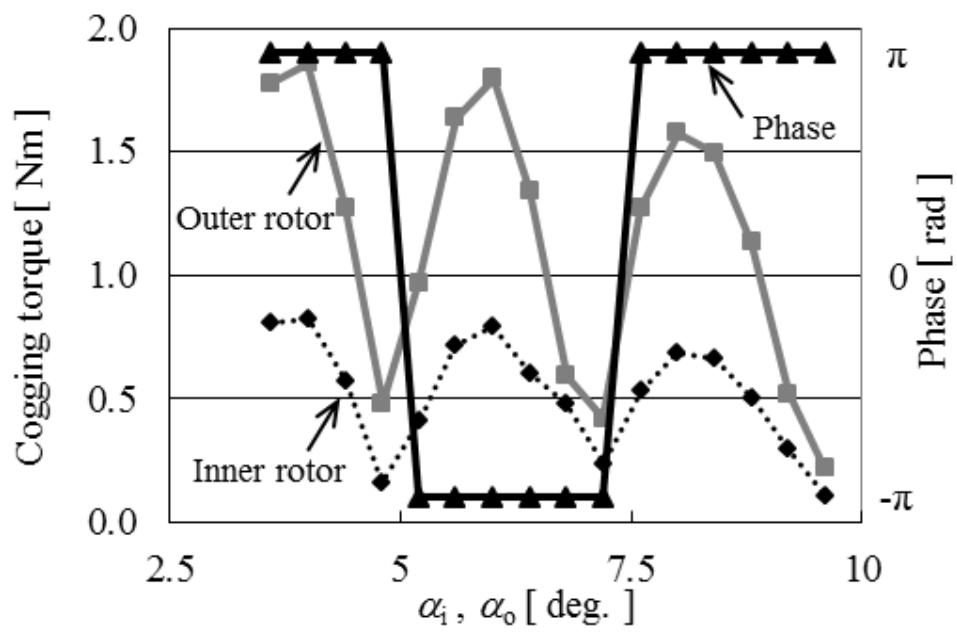


図 2.14 コギングトルクと位相の関係

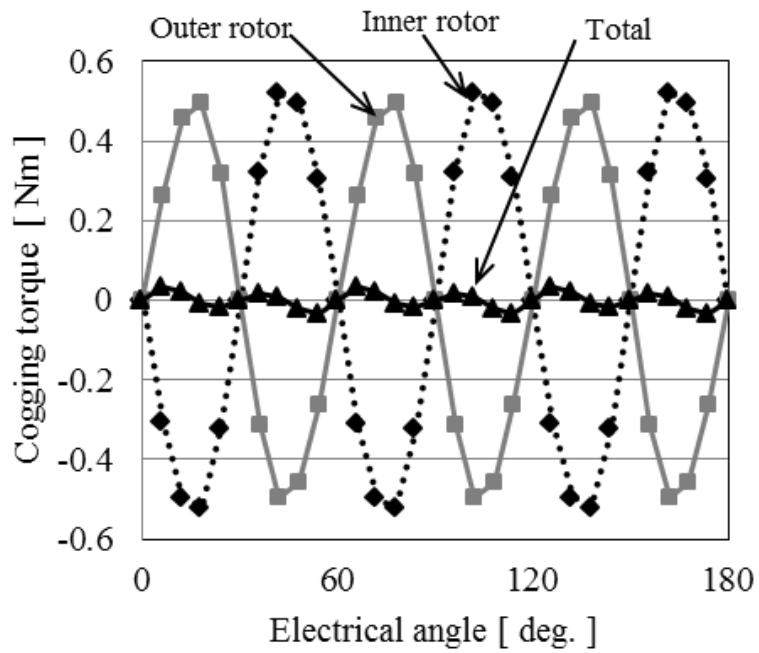


図 2.15 デュアルロータモータのコギングトルク波形

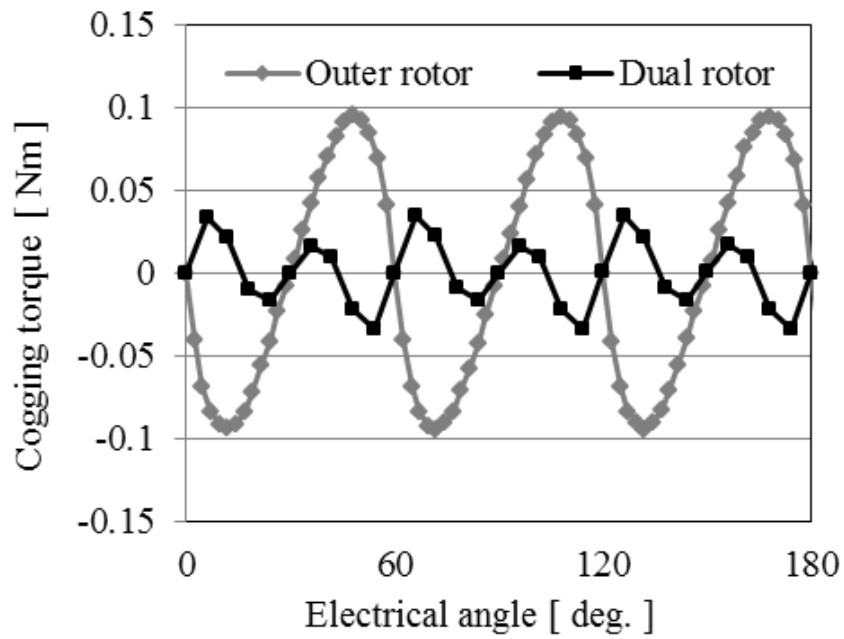


図 2.16 コギングトルクの比較

2.4 試作機を用いた実験結果

フェライト磁石を用いたデュアルロータモータを試作し、評価を行った。図 2.17 は試作機の外観写真を示している。デュアルロータモータとアウターロータモータのトルク-電流特性を図 2.18 に示す。図 2.18 のトルク-電流特性は、図 2.17 に示すデュアルロータモータと、基準としたアウターロータモータに対して、回転数 50min^{-1} の同一条件で実験を行った時の結果である。また、巻線温度上昇の影響をなくするため、スポットクーラー等で冷却しながら実験している。

図 2.18 から、希土類元素を含まないフェライト磁石を用いたデュアルロータモータが、希土類焼結磁石を用いたアウターロータモータと同等のトルク-電流特性を実現していることが確認できた。また、デュアルロータモータは、ステータヨークが磁気飽和しやすい特徴を持つが、最大トルクである 35Nm 付近でも、線形性を保っていることが分かる。表 2.5 にトルク密度と、回転数 50min^{-1} 、トルク 20Nm の定格運転時の効率の比較を示す。表 2.5 より、フェライト磁石を用いたデュアルロータモータで希土類焼結磁石を用いたアウターロータモータと同等のトルク密度を実現することが可能であることが実験により確認できた。また、効率については、試作機の巻線抵抗がシミュレーション時に比べて低くなったことにより、若干銅損が低くなっており、鉄損の増加分を抑えて効率が向上していることが確認できた。



(a) Dual rotor

(b) Stator

図 2.17 デュアルロータモータの試作機外観

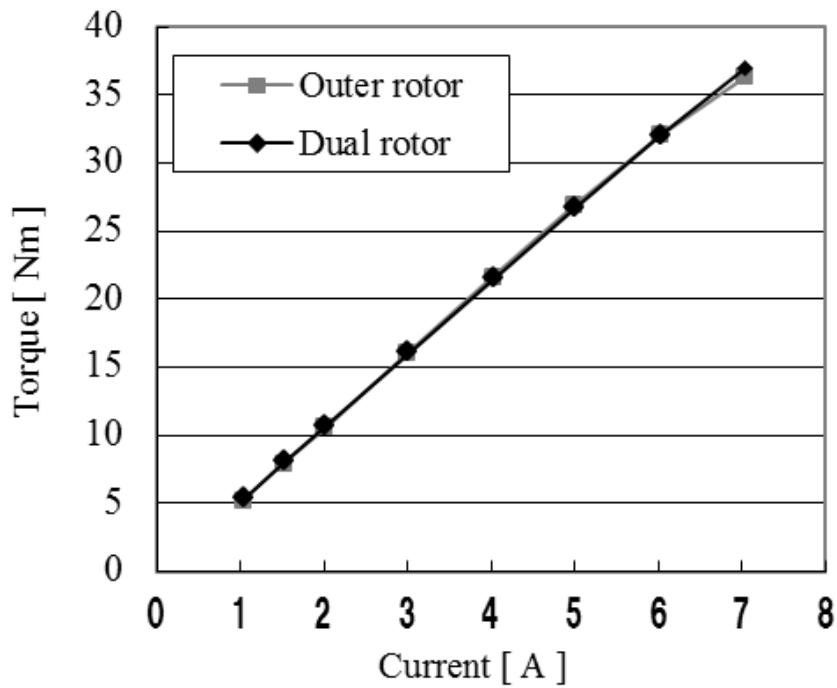


図 2.18 トルクー電流特性

表 2.5 効率測定結果

	Outer rotor motor (Rare earth magnet)	Dual rotor motor (Ferrite magnet)
Max torque	35 Nm	35 Nm
Motor volume	1,472,621 mm ³	1,472,621 mm ³
Torque density	2.38×10 ⁻⁵ Nm/mm ³	2.38×10 ⁻⁵ Nm/mm ³
Copper loss	101.6 W	91.9 W
Iron loss	9.1 W	12.4 W
Efficiency	48.7 %	50.0 %

2.5 結言

本章では、高トルク密度化を目的にフェライト磁石を用いたデュアルロータモータについて検討した。モータのエアギャップ表面積を拡大し、高トルク密度化するために、ステータにトロイダル巻を採用し、ステータの内側と外側にそれぞれインナーロータとアウターロータの 2 つのロータを持つデュアルロータ構造を提案し、シミュレーションと試作機による実験によって、比較を行った。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) トロイダル巻デュアルロータ構造とすることで、インナーロータとアウターロータの 2 つのトルクが利用できるため、シングルロータ構造のモータに対して、高トルク密度化が可能となる。
- (2) ダイレクトドライブ駆動などで用いられる回転数が低く、トルクの高い領域において、デュアルロータモータは、鉄損の増加に対して、銅損の低減効果が高いため、高効率化することが可能である。
- (3) トロイダル巻デュアルロータ構造の極数とスロット数の組み合わせを最適化することによって、トルク密度が向上するため、フェライト磁石を用いたデュアルロータ SPMSM と希土類焼結磁石を用いた IPMSM を比較した結果、同等のトルク密度が実現できる。
- (4) インナーロータとアウターロータにそれぞれ発生するコギングトルクの位相を反転させ、コギングトルクの振幅を同等に調節することによって、コギングトルクをキャンセルすることが可能である。また、本研究では、対象としなかったが、コギングトルクのキャンセルと同様に、インナーロータとアウターロータの発生トルクの振幅と位相を調整することによって、トルクの脈動を低減することが可能と考えられる。

デュアルロータ構造を用いることによって、トルク密度は従来の希土類焼結を用いたアウターロータの IPMSM と同等に高めることが可能であることが検証できた。

第3章 3次元折り曲げ鉄心を用いた永久磁石同期モータ

3.1 緒言

近年、車載用やロボット駆動用モータは、高いトルクが求められ、高トルク密度化や高効率化を目的に、フェライト磁石を用いたスポーク状 IPMSM⁽⁹⁾⁻⁽¹⁰⁾、ダブルステータ型のアキシシャルギャップモータ⁽¹¹⁾、立体ギャップ構造のモータ⁽³⁵⁾、圧粉磁心を用いたクローテイスモータ⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾、3次元磁路と環状巻線を用いたモータ⁽³⁸⁾などの3次元構造のモータが提案されている。しかしながら、3次元構造のモータは優れた性能を発揮する反面、生産性の悪化や、高価な材料を使用することによるコストの増加が課題と考えられる。そこで、本章では高トルク密度モータとして特殊な材料を使用することなく、広く一般的に使用されている電磁鋼板を3次元的に折り曲げてステータ鉄心を構成する3次元折り曲げ鉄心(3DBC : Three-Dimensional Bent Core)を用いたモータを提案する⁽²⁰⁾⁻⁽²²⁾。本章では、Dyレス化がすでに実現しており、なおかつ希土類焼結磁石に対して比較的低コストである等方性の希土類ボンド磁石を用いた SPMSM を対象として検討を行う。

一般に SPMSM では、モータの体格を大きくすることなく、トルク密度を向上させるために、ロータ表面に配置された永久磁石をステータの積厚よりも大きくするオーバーハングを採用することが多い。オーバーハングすることによって、ステータのコイルエンド部分のデッドスペースを有効的に活用することができる反面、ステータと対向していない永久磁石磁束が漏れ磁束となって有効活用されていないため、永久磁石量に対するトルク密度は低下する。3DBC を用いることで、従来は有効的に活用できていなかった永久磁石磁束を有効活用することができ、高トルク密度化が実現できると考えられる。そこで、ステータに鎖交する磁束を増加させてトルク密度を向上させる検討を、シミュレーションと試作機による実験により行う。さらに、3DBC に発生するうず電流をシミュレーションによって可視化し、鉄損の増加と銅損の低減効果から最適な運転範囲についても検討を行う。

3.2 3DBC を用いたモータの基本構成

3.2.1 3DBC を用いたモータの構造と特徴

3DBC を用いたモータの構造図を図 3.1 に示し、図 3.2 に 3DBC を用いたモータと従来のモータの概念図を示す。図 3.1 は 1/4 断面を表しており、実際のモータ形状は、上下両面に 3DBC を配置している。

図 3.1 と図 3.2 の(b)に示すように、3DBC を用いたモータは、3DBC を積層された電磁鋼板と同じ形状で、ロータ磁石の対向する部分だけスラスト方向に折り曲げて構成している。図 3.2 の(a)より、従来のモータでは、オーバーハングさせた部分の永久磁石磁束の一部がステータ鉄心に鎖交せずに漏れ磁束となっていると考えられる。そこで、本章では、漏れ磁束の度合いを確認するために、ロータ積厚 10mm、ステータ積厚 10mm の試作機 A と、ロータ積厚 15mm、ステータ積厚 10mm の試作機 B と、ロータ積厚 15mm、ステータ積厚 15mm の試作機 C を作成し、予備実験を行った。表 3.1 に予備実験に用いた試作機の諸元と実験結果を示す。

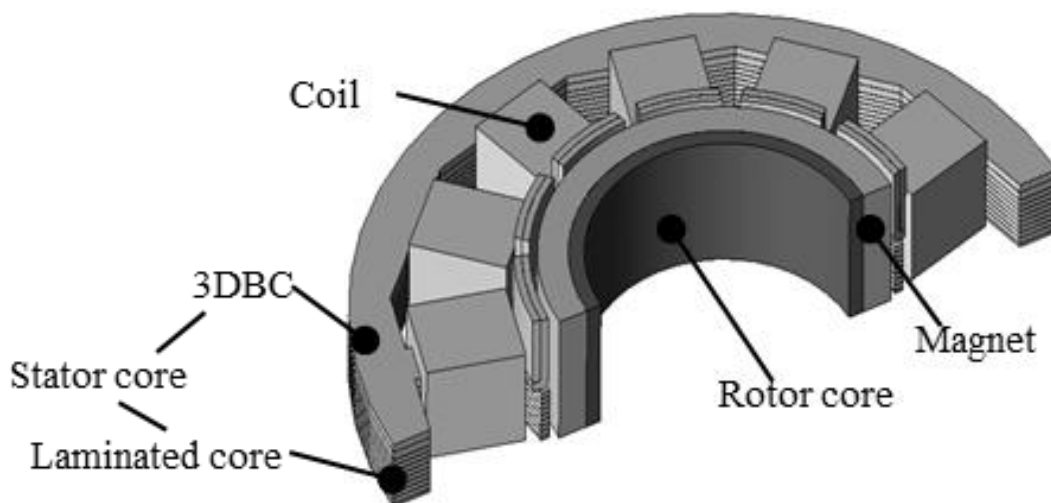
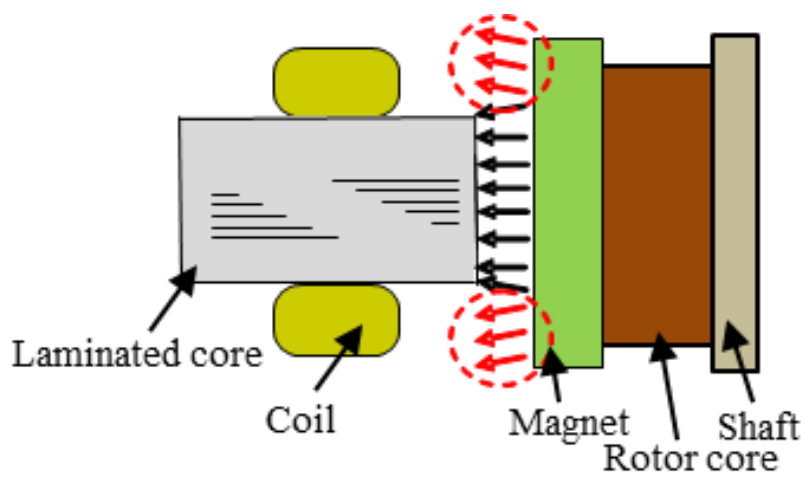
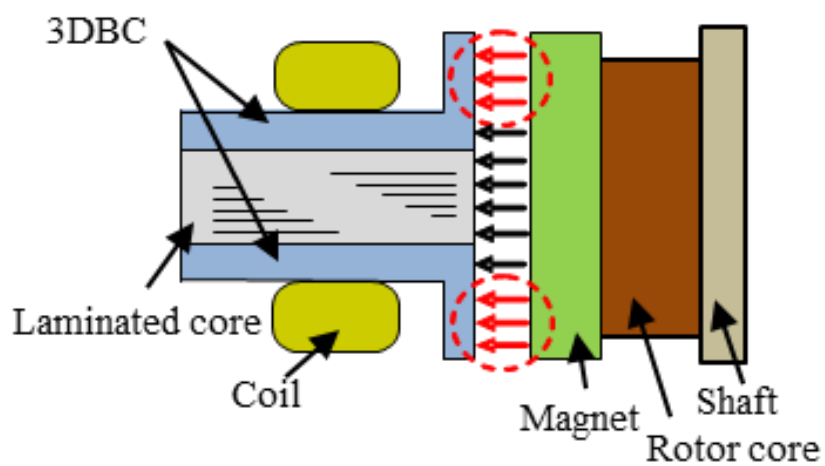


図 3.1 提案するモータの構造図



(a) 従来のモータ断面



(b) 提案モータの断面

図 3.2 従来モータと提案モータの断面の概念図

表 3.1 試作機の諸元と予備実験結果

	A	B	C
Stator diameter	50mm	50mm	50mm
Rotor diameter	25mm	25mm	25mm
Stack length	10mm	10mm	15mm
Magnet length	10mm	15mm	15mm
Coil end length	5mm	5mm	5mm
Motor height	20mm	20mm	25mm
Back EMF	100%	130%	150%

表 3.1 より、試作機 A に対して、試作機 B の誘起電圧は 30%程度向上していることが確認できる。さらに、試作機 B に対して試作機 C の誘起電圧が約 20%程度向上していることが確認できた。また、試作機 C では、永久磁石とステータ鉄心が対向することによって永久磁石動作点が 1 割程度上がっている。これらの結果より、試作機 B において、オーバーハンク量に対して約 6 割がステータの積層方向に磁束が鎖交し、約 3 割程度が漏れ磁束となっていると考えられる。以上のことから、ロータをオーバーハンクさせた際に発生する漏れ磁束と永久磁石動作点の向上を有効に活用することができれば、モータ体格を大きくする事無く、モータのトルクを向上することが可能であると推測される。

図 3.2(b)より、ロータ磁石のオーバーハンク部分に対向するように電磁鋼板があるため、従来は漏れていた磁束は、3DBC に集められ、有効磁束が増加すると考えられる。これにより、トルク定数が向上できると推察できるため、同一トルクであれば、ステータ積厚を短縮することが可能となる。しかしながら、3DBC には、永久磁石磁束が垂直に鎖交するため 3DBC 内でうず電流損が発生し、鉄損が大幅に増加することが推察できる。さらに、鎖交磁束が増加することによって、ステータのティースやヨークの磁束密度も高くなり、鉄損が増加することも容易に想像できる。そこで、うず電流解析を用いて、3DBC 内のうず電流を可視化し、鉄損を求めることで、有効な運転範囲を検討した。

3DBC を用いたモータの特徴を以下に示す。

- (1) 一般にモータのステータコアとして用いられる電磁鋼板を、スラスト方向に折り曲げステータを構成しているため、安価に3次元形状の作成が可能である。
- (2) オーバーハンクしている永久磁石の漏れ磁束を有効活用することができるため、高トルク密度化が可能と考えられる。
- (3) 3DBC 内にうず電流が発生し、鉄損が増加するため、高速運転の領域では効率が低下すると考えられる。

3.2.2 3DBC の詳細構造

電磁鋼板は圧縮応力に対しては磁束が通りにくくなり、引張応力に対しては磁束が通りやすくなる特性を持っている⁽³⁹⁾。3DBC の断面観察図を図 3.3 に示す。



図 3.3 3DBC の断面観察図

図 3.3 より、3DBC の曲げ部分のロータ側の表面付近は引張応力が加わり、反対側は圧縮応力が加わっていることが分かる。永久磁石と対向する側が引張応力によって磁束が通りやすくなっているため、3DBC を用いたモータの場合、急峻に曲げるよりも、緩やかに曲げることが望ましいと考えられる。また、図 3.4 に 3DBC の拡大図を示している。

図 3.4 より、3DBC は垂直方向に 3 次元的に折り曲げられており、ロータと一定のギャップを保って円弧状に構成されている。単純に折り曲げだけを考えて場合、円弧状ではなく垂直に直線的に折り曲げる方が簡易である。しかしながら、コイルからの応力などが、3DBC 部分に印加された場合に、折り曲げ部分に応力が集中するため、強度が確保できなくなる可能性がある。そこで、円弧状に絞り加工を行いながら 3DBC を構成することで、応力が分散されるため、応力に対する強度を向上できると考えられる。

次に、3DBC の材質や、折り曲げ枚数を検討するために実験を行った。3DBC の枚数を変更し、3DBC の材質を電磁鋼板の 50A1300 と 35A300 とした場合における、相間誘起電圧の実効値の比較結果を図 3.5 に示す。ただし、50A1300 は、0.5mm の板厚と、1.5T で 50Hz 時の鉄損の特性が 13W/kg であることを示し、35A300 は、0.35mm の板厚と、1.5T で 50Hz 時の鉄損の特性が 3 W/kg であることを示している。この時のモータ諸元を表 3.2 に示す。表 3.2 に示すように、ステータコアの材質には 35A300 を用いており、3DBC とステータコアを合わせた積厚を 10mm 程度になるよう調整している。図 3.5 より、3DBC に



図 3.4 3DBC の拡大図

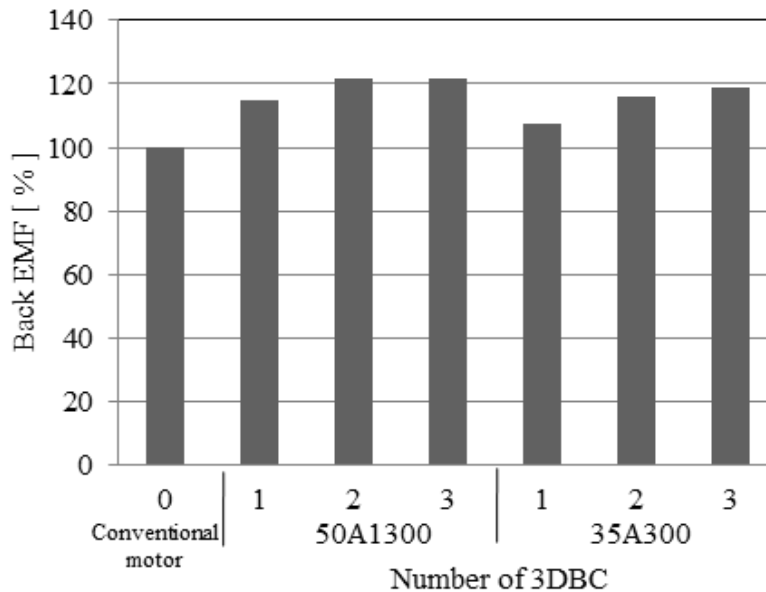


図 3.5 相間誘起電圧の比較

50A1300 を用いた場合、3DBC の枚数が 2 枚の時と 3 枚の時の相間誘起電圧の実効値は等しいことがわかる。また、3DBC が 1 枚の時に対して 2 枚の時は 6% の相間誘起電圧の向上が確認できる。

さらに、3DBC に 35A300 を用いた場合、2 枚の時に対して、3 枚の時の方が相間誘起電圧の実効値が向上していることが確認できる。35A300 の厚みが 0.35mm であるのに対して 50A1300 の厚みが 0.5mm であるため、2 枚の時の厚みが 0.7mm と 1.0mm となり、50A1300 の方が厚くなる。また、35A300 を 3 枚重ねにすると厚みは 1.05mm となるため、50A1300 の 2 枚重ねよりも厚くなる。

このことから、本章で対象としたモータ形式の場合、3DBC の厚みは 0.7mm 以上でなければ、磁気飽和の影響が出てくることによって相間誘起電圧の実効値が十分に向上しないことが分かる。また、50A1300 を 2 枚重ねにして 3DBC を構成した場合に対して、35A300 を 3 枚重ねにして 3DBC を構成した場合の方が相間誘起電圧の実効値が低下していることが確認できる。これは、1 枚目と 2 枚目と 3 枚目の 3DBC の間に僅かではあるがギャップが存在しているため、ロータ表面にある 1 枚目の 3DBC に、垂直に鎖交した磁束が、2 枚目とのギャップを乗り越えられずに 1 枚目の 3DBC 内を通り、同様のことが 2 枚目と 3 枚目の間でも起こり、局所的な磁気飽和が起こっていることが原因であると考えられる。

表 3.2 モータ諸元

	Conventional motor	Proposed motor					
Pole number	10	10					
Slot number	12	12					
Stator diameter [mm]	50	50					
Rotor diameter [mm]	25	25					
Magnet length [mm]	15	15					
Air gap [mm]	0.3	0.3					
Coil end length [mm]	5	5					
Core material	35A300	35A300					
3DBC material	—	50A1300			35A300		
Number of 3DBC	—	1	2	3	1	2	3
3DBC length [mm]	—	2.95	3.475	4.0	2.775	3.125	3.475
Core stack length [mm]	10.15	9.1	8.05	7.0	9.45	8.75	8.05
3DBC stack length [mm]	—	1.0	2.0	3.0	0.7	1.4	2.1
Stack length [mm]	10.15	10.1	10.05	10.0	10.15	10.15	10.15

次に、3DBC 部分の材質の検討を行った。ステータの積層部分の材質は 35A300 材を使用し、3DBC 部分の材質のみを変更し、冷間圧延鋼板 (Steel Plate Cold Commercial 以下 SPCC) と電磁軟鉄と 50A1300 材でそれぞれ 3DBC を構成した場合の界磁鉄損の比較を図 3.6 に示す。ステータを 3 次的に構成するには圧粉鉄心 (Soft Magnetic Composites 以下 SMC) を用いることが一般的であると考えられるが、本章で対象とした小型モータにおいては、0.5 mm~1.0 mm 程度の厚みであり、強度的に構成が困難であることから、検討の対象外としている。SPCC と電磁軟鉄は板厚 1.0mm にしており、50A1300 材は板厚 0.5mm であるため 2 枚を重ねている。また、35A300 材も同様に 2 枚を重ねて 3DBC を構成した。図 3.6 より、電磁鋼板の 50A1300 にすることで、鉄損が SPCC や電磁軟鉄の半分程度に低減できることが確認できる。さらに、35A300 を用いることによって鉄損の低減が可能と思われる。以上のことから、トルク密度の向上を目的としたとき、提案するモータ形式においては、3DBC を電磁鋼板の 50A1300 の 2 枚重ねで構成することが望ましいと考える。

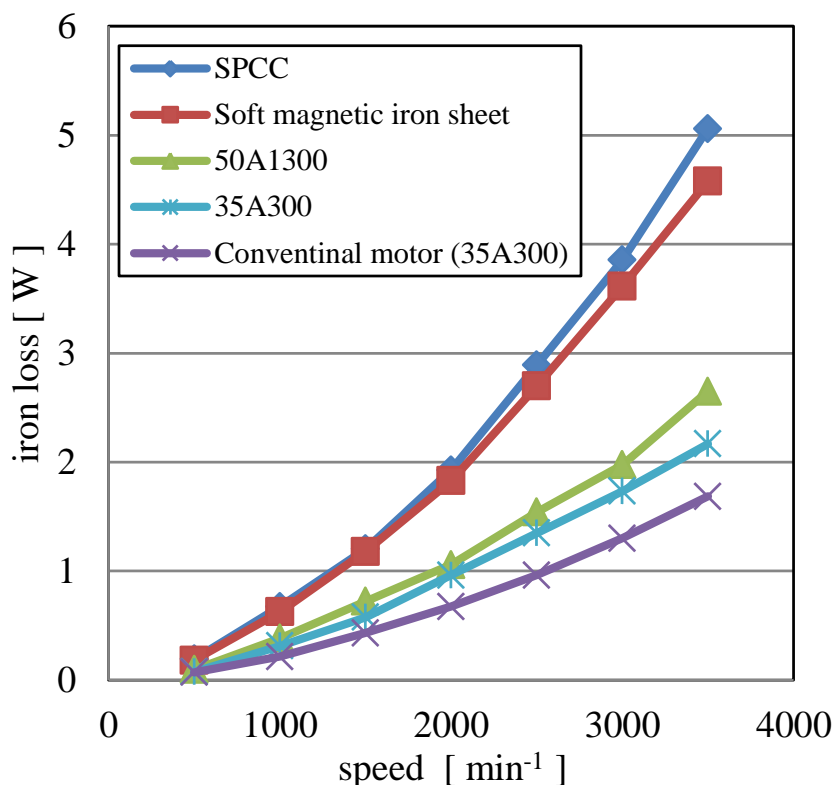


図 3.6 3DBC の材料と無負荷鉄損の関係

3.3 解析を用いた設計

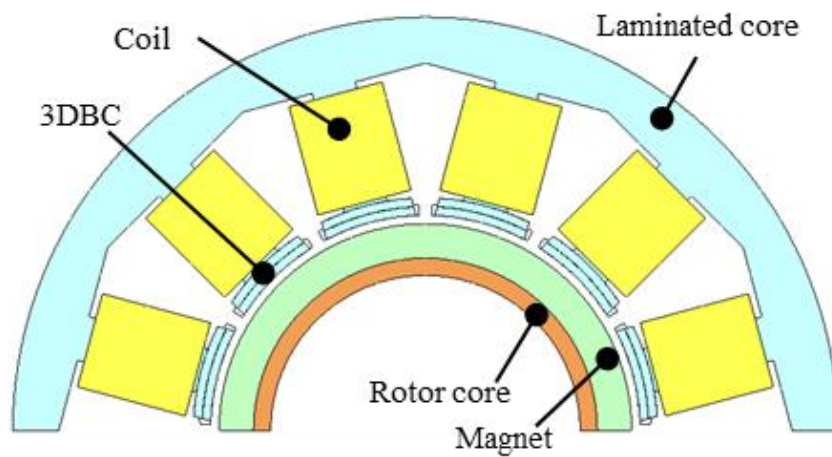
3.3.1 設計目標

設計目標を表 3.3 に示し、解析に用いたモータの形状を図 3.7 に示す。また、モータの諸元は表 3.2 に示したように、ステータコアに 35A300 を用い、3DBC に 50A1300 を 2 枚用いたものを使用している。

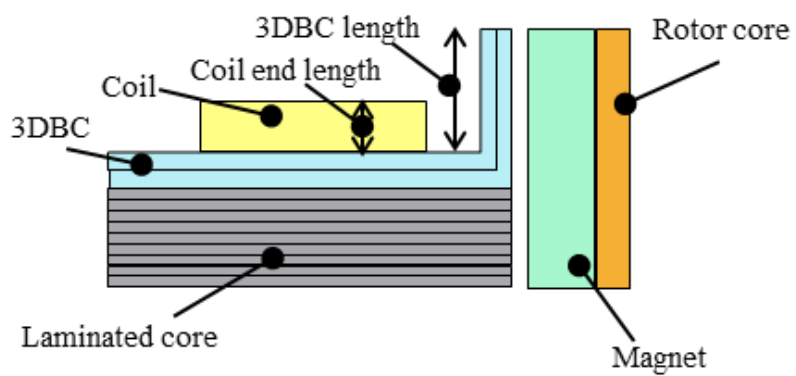
今回の比較対象機は、希土類ボンド磁石を用いたインナーロータの SPMSM で、10 極 12 スロットの集中巻のモータである。本章での目標は、3DBC によって有効鎖交磁束を向上させて、ステータの積厚を低減し、トルク密度を向上させることである。図 3.7(b) に示すように、3DBC と永久磁石は等ギャップで 2 枚の 50A1300 を用いた 3DBC を重ねて構成している。また、表 3.3 に示すように、3DBC を用いたモータのステータ積厚を従来モータに比べて、2mm 短縮させている。これは、予備実験で求めたように 20% の漏れ磁束を有効活用することによって、20% 程度のトルク密度向上を見込んだものである。

表 3.3 モータ設計目標

		Design target
Max torque		100 mNm
Load point 1	Torque	100 mNm
	Speed	2,000 min ⁻¹
	Power	21 W
Load point 2	Torque	60 mNm
	Speed	3,200 min ⁻¹
	Power	20 W
Outer diameter		50 mm
Stack length		Max 8 mm
Motor height		Max 18 mm
Motor volume		35,342 mm ³
Torque density		2.8×10 ⁻⁶ Nm/mm ³



(a) 上面图

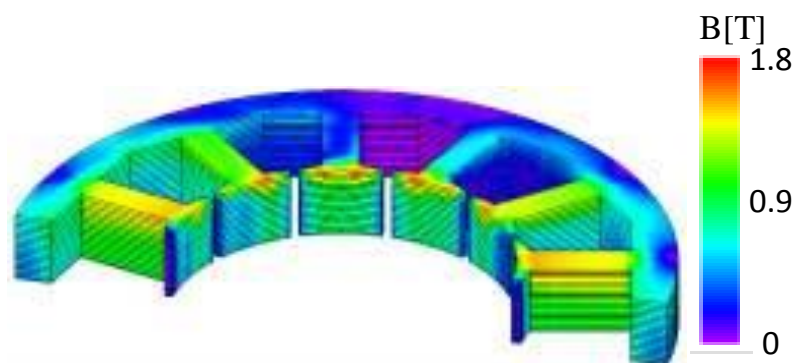


(b) 断面图

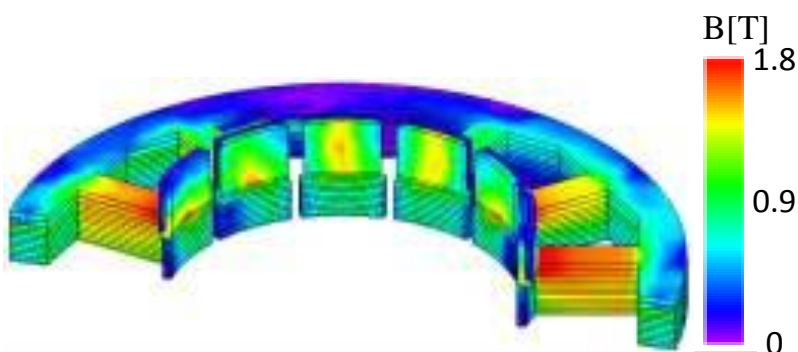
图 3.7 解析形状

3.3.2 解析結果

図 3.8 に無負荷時の磁束密度分布、図 3.9 に無負荷時と、負荷点 1 に対して回転数が高く鉄損の比率が大きい負荷点 2 でのうず電流解析結果を示す。図 3.8(a)より、従来のモータにおいて、ステータコア中心部に対して、ステータコアの上面の方が、磁束密度が高くなっていることが確認できる。このことから、永久磁石をオーバーハンクしているために、ラジアル方向だけでなくスラスト方向にも磁束が鎖交していることがわかる。図 3.8(b)と比較すると、提案するモータのティース部の磁束密度が 0.2~0.3T 程度高くなっている。3DBC の磁束を集める効果によって、鎖交磁束が増加していることが確認できた。

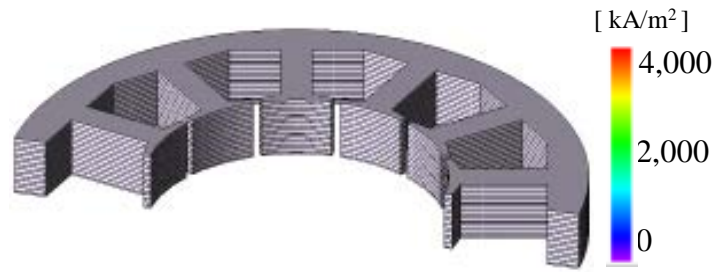


(a) 従来のモータ

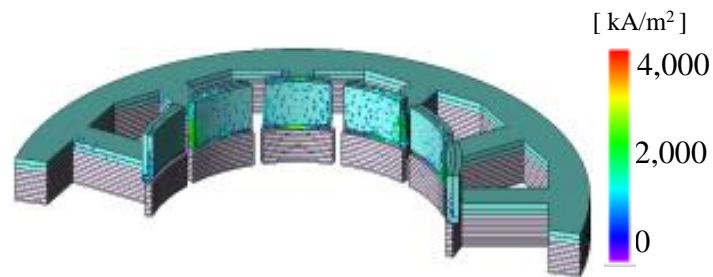


(b) 提案するモータ

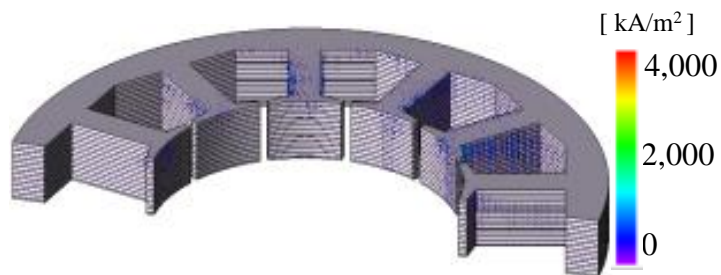
図 3.8 磁束密度分布



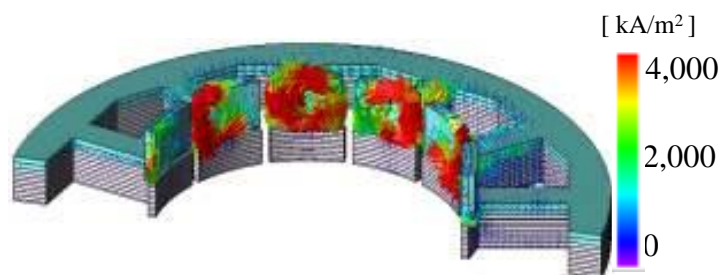
(a) Conventional motor (at no load)



(b) Proposed motor (at no load)

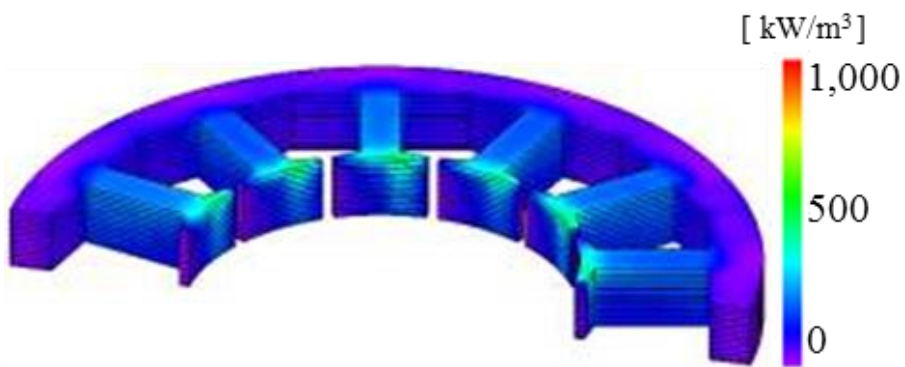


(c) Conventional motor (at load point 2)

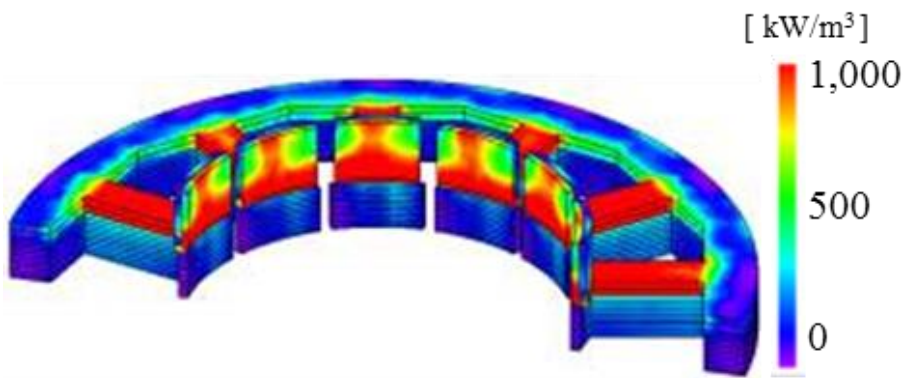


(d) Proposed motor (at load point 2)

図 3.9 うず電流解析結果の比較



(a) 従来のもータ



(b) 提案するもータ

図 3.10 鉄損密度分布

次に、図 3.9 より、従来モータに対して、提案モータの 3DBC 部分にうず電流が発生していることが確認できる。さらに負荷が印加されることによって 3DBC 内でのうず電流損が大幅に増加していくことが分かる。

図 3.10 に鉄損密度分布を示す。一般的に鉄損 W_{fe} は、(3.1)式に示すようにヒステリシス損 W_{hy} とうず電流損 W_{edd} の和である。鉄損解析には、JMAG-DesignerV14.0 を用いており、ヒステリシス損 W_{hy} は(3.2)式のように、磁束密度の各成分 B_k と要素体積 V_e と 2 周波法で求められる磁束密度における係数 a を用いて表される。次に、うず電流損 W_{edd} の計算式は、(3.3)式のように、うず電流損密度 J_e と導電率 σ と 1 周期の時間 τ を用いて表される。

$$W_{fe} = W_{hy} + W_{edd} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

$$W_{hy} = \sum_{e=1}^{nelem} \left\{ f \sum_{k=1}^{nloop} a(B_k) \times V_e \right\} \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

$$W_{edd} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} \left\{ \int_{V_e} \frac{(J_e)^2}{\sigma} dV \right\} \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

図 3.8～図 3.10 の結果より、3DBC の磁束を集める効果によって、ティース部分の磁束密度が増加することと、3DBC 部分にうず電流が発生することにより、鉄損が増加していることが確認できる。無負荷状態で回転数 $3,200\text{min}^{-1}$ の時の鉄損解析による試算結果を表 3.4 に示す。表 3.4 より、従来のモータに対して、3DBC を用いたモータは、うず電流損が 4 倍に増加し、ヒステリシス損が 2.5 倍に増加するため、鉄損が 3.4 倍に増加していることが分かる。

図 3.11 に、表 3.2 に示した設計目標の負荷点での効率試算結果を示している。図 3.11 より、負荷点 1($100\text{mNm}\cdot 2,000\text{min}^{-1}$)では、効率が同等レベルであるのに対して、負荷点 2($60\text{mNm}\cdot 3,200\text{min}^{-1}$)では効率が低下しているのが確認できる。また、負荷点 1 と負荷点 2 共に、銅損が低下していることがわかる。これは、巻線ターン数を等しくしているが、積厚が短縮されたことによって、巻線の周長が短くなり抵抗値が下がったためである。3DBC を設置することにより、漏れ磁束が 3DBC に鎖交するため、ダイレクトに巻線に磁束が鎖交することを防ぐことになり、銅線に磁束が鎖交した際に発生するうず電流による AC 銅損

を低減できる可能性があるが、本解析においては、AC 銅損の計算を考慮していない。

さらに、負荷点 1 と負荷点 2 とともに、うず電流損に対してヒステリシス損の増加が大きくなっていることが確認できる。これは、巻線電流によって発生した磁束により磁束密度が大幅に向上したためであると考えられる。これらの結果より、3DBC は鉄損が増加する特徴を持つため、銅損が支配的な負荷点では効率が維持できるが、鉄損が支配的な負荷点では効率が低下すると考えられる。

表 3.4 鉄損解析結果

		Eddy current loss	Hysteresis loss	Iron loss
Proposed motor	Laminated core	0.31 W	0.20 W	0.51 W
	3DBC	0.83 W	0.34 W	1.17 W
	Total	1.14 W	0.54 W	1.68 W
Conventional motor		0.28 W	0.21 W	0.49 W

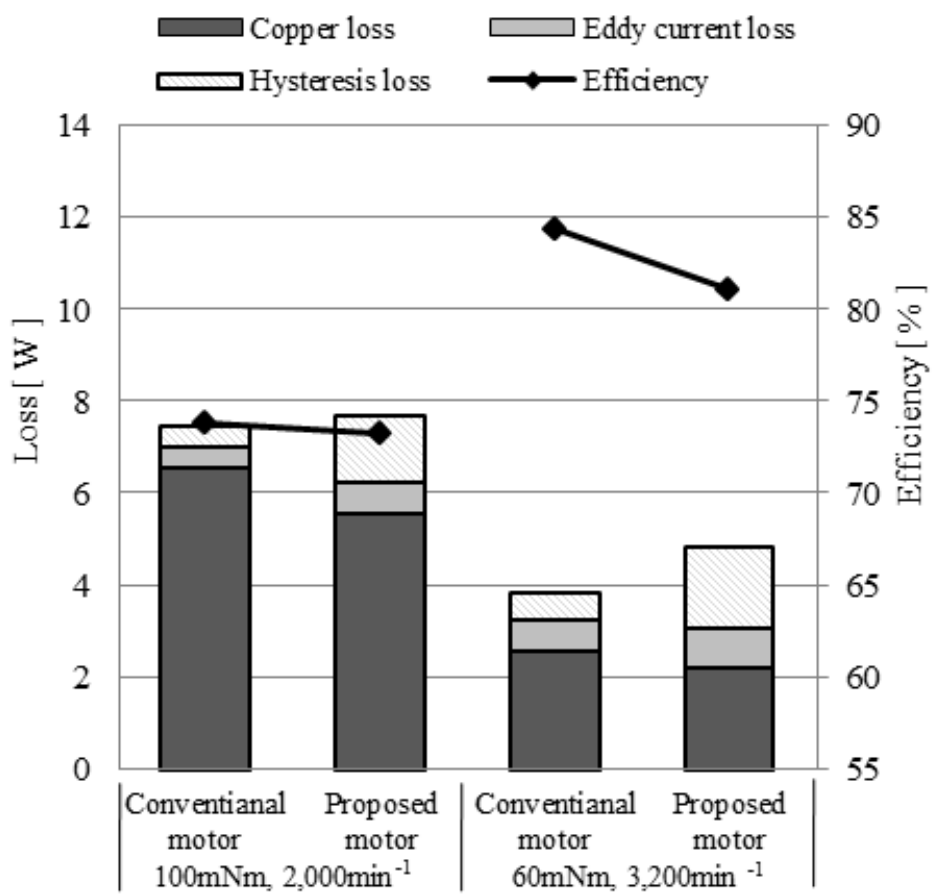
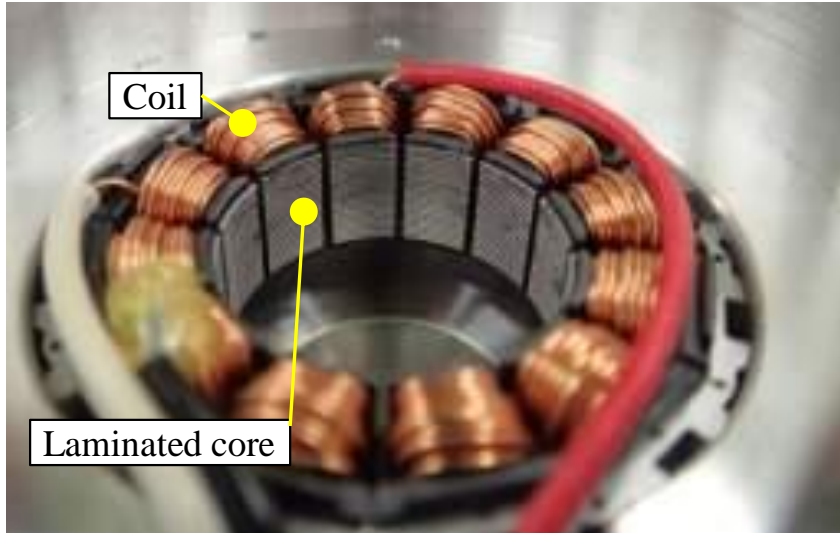


图 3.11 效率試算結果

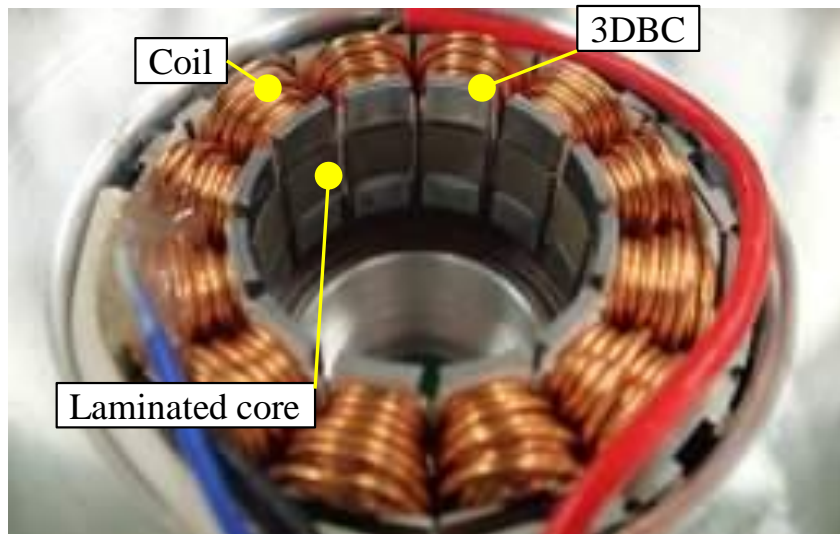
3.4 試作機を用いた実験結果

従来のモータと提案する 3DBC を用いたモータの試作を行い、誘起電圧と効率を実験により比較した。なお、実験に用いたモータの諸元は表 3.2 に示した。図 3.12 に試作機の外観を示す。また、図 3.12 の試作機の回転数 $1,000\text{min}^{-1}$ における誘起電圧を図 3.13 に示し、各負荷点での効率測定結果を、図 3.14 に示している。図 3.13 より、誘起電圧の波形がほぼ同等であることが確認できる。また、図 3.14 より、図 3.11 で示した解析による試算結果と同様に、負荷点 1(100mNm 、 $2,000\text{min}^{-1}$)では、効率が同等レベルであるのに対して、負荷点 2(60mNm 、 $3,200\text{min}^{-1}$)では効率が低下しているのが確認できる。さらに、負荷点 1、負荷点 2 共に、銅損が低下し、鉄損が増加していることが確認できた。本実験における鉄損は、全体の損失より、銅損と機械損を差し引いた値としており、効率は機械損を無視して計算を行っている。そのため、鉄損にはその他の損失も含まれている。図 3.11 の効率試算結果と比較すると、銅損は概ね合致しているが、鉄損が大幅に増加していることがわかる。特に、従来モータの鉄損での差異が大きくなっている。おそらく、うず電流損とヒステリシス損ともにビルディングファクタの影響が大きかったためであると推察する。特に折り曲げた際の磁気特性の劣化や応力の分布などが影響していると考えられるが、論理検証までには至っておらず、今後の研究課題であると考えられる。3DBC を用いたモータは、銅損が支配的な領域の負荷点では効率が維持できるが、鉄損が支配的な負荷点では効率が低下する。

表 3.5 にトルク密度の比較を示す。回転数が低くトルクが大きい運転範囲において、効率を維持しながらステータ積厚を 20%低減することが可能であると考えられる。また、モータのコイルエンドまで含めた体格で比較すると 10%の低減が可能であるため、トルク密度を 10%向上させることが可能である。図 3.15 にトルク-電流特性を示す。図 3.15 より、最大トルク(100mNm)までは線形性を保っているが、最大トルクの 1.5 倍以上のトルクでは、3DBC の磁気飽和の影響により、線形性を保てなくなっている。以上のことから、3DBC を用いたモータは、トルク密度を向上することが可能であるが、うず電流損の増加や磁気飽和の影響を受けやすいため、使用する運転範囲を考慮して設計していくことが望ましいと考えられる。



(a) 従来のモータ



(b) 提案するモータ

図 3.12 試作機の外観

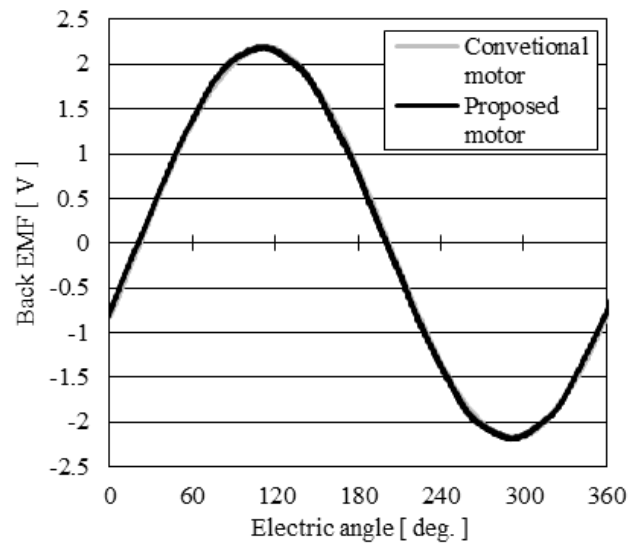


図 3.13 誘起電圧波形

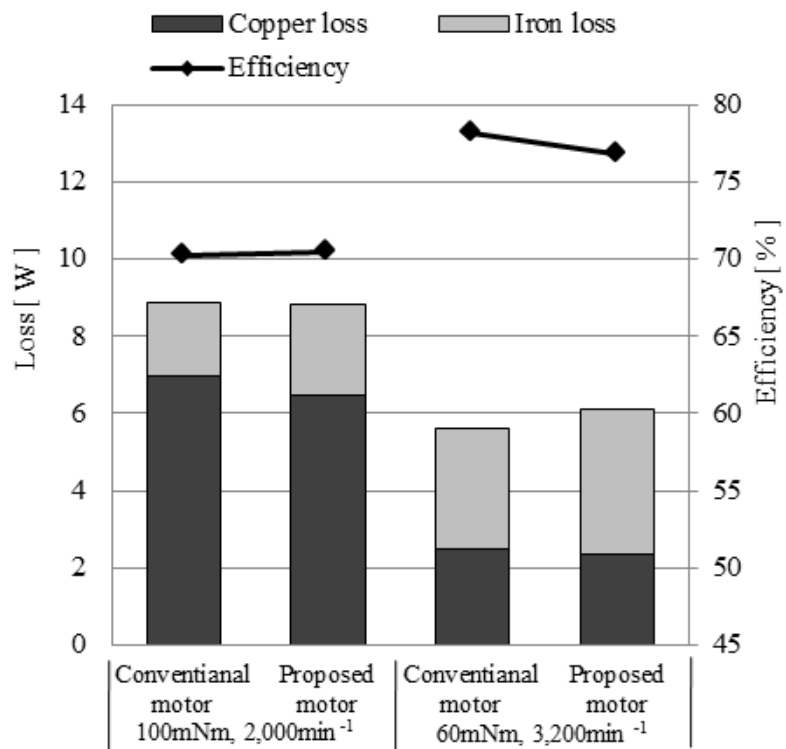


図 3.14 効率測定結果

表 3.5 トルク密度の比較

	Conventional motor	Proposed motor
Max torque	100 mNm	100 mNm
Motor volume	39,270 mm ³	35,343 mm ³
Torque density	2.55×10 ⁻⁶ Nm/mm ³	2.82×10 ⁻⁶ Nm/mm ³

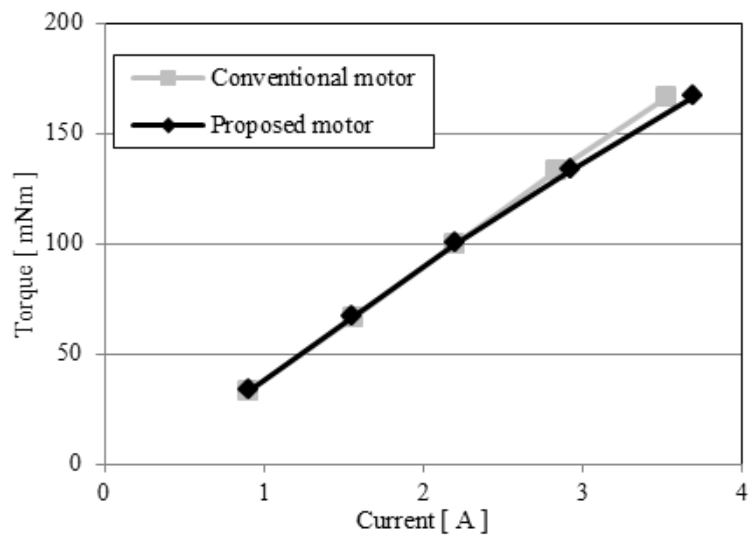


図 3.15 トルクー電流特性

3.5 結言

本章では、高トルク密度化を目的に、3DBC を用いたモータについて検討した。モータのエアギャップ表面積を拡大し、高トルク密度化するために、ステータの両端の電磁鋼板をスラスト方向に折り曲げて 3DBC を構成する SPMSM を提案し、シミュレーションと試作機による実験によって、特性評価を行った。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) オーバーハンクしたモータにおいては、従来漏れ磁束となっていて利用できていなかった永久磁石の磁束が有効活用され、漏れ磁束が約 3 割低減できた。その結果、トルク密度を 10%向上することが可能であることが明らかになった。
- (2) 3DBC に対して永久磁石の磁束が垂直に鎖交するため、3DBC には大きなうず電流損が発生することをシミュレーションにより可視化し、数値化した。これにより、銅損に対して鉄損の比率が多くなる回転数の高い領域では、うず電流損の増加によって効率は低下するが、逆に鉄損に対して銅損の高い範囲に関しては、効率が同等のまま小型化できることが明らかになった。
- (3) 3DBC に使用する材料は、加工性の良い SPCC や電磁軟鉄より、ステータコアと同じ材質の電磁鋼板が鉄損の増加を抑制するため、最も適していることが分かった。また、3DBC を構成する枚数も、磁気飽和の影響を鑑みて枚数を増やしていくことで、オーバーハンクした永久磁石の磁束を有効的に活用することができる。

以上のことから、3DBC をステータコアの両端に構成することによって、オーバーハンクした永久磁石の磁束を有効的に活用できるようになるため、モータの小型化が可能となり、トルク密度を向上することができる。ただし、第 2 章で提案したフェライト磁石を用いたデュアルロータモータと同様に、低速でトルクの大きい運転領域で性能を発揮するため、運転する範囲全体での高効率化を目的とするようなモータには適していない。そのため、今後は適用範囲の拡大と、うず電流損の低減手法の開発が必要であるといえる。

第4章 希土類ボンド磁石を用いた埋込磁石形同期モータ

4.1 緒言

第2章と第3章において、モータの構造面に着目し、エアギャップ面積の拡大によるモータの高トルク密度化の検討を行った。第4章では、ギャップ面積の拡大とは異なるアプローチで、永久磁石による鎖交磁束を増加させることによる高トルク密度化に関して、検討を行う。永久磁石による鎖交磁束を増加させるためには、永久磁石の投入量を効果的に増やすことも効果があると考えられる。しかしながら、永久磁石の投入量を単純に増やすことは、モータの構造上困難であり、永久磁石材質の変更や形状の最適化だけでは、トルク密度を向上させることは不十分であると考えられる。また、希土類焼結磁石には、Dy等の資源問題があるため、永久磁石の投入量を増やすためには、コストの観点から非常に困難である。これらの課題に対して、希土類ボンド磁石を用いたモータ⁽¹⁶⁾、希土類ボンド磁石を用いたIPMSM（以下、希土類ボンドIPMSM）⁽¹⁷⁾も提案されているが、希土類焼結磁石を用いたIPMSM（以下、希土類焼結IPMSM）と同等の特性を満足させるためには、極数の変更や、回転数の向上などの条件が必要となる。

そこで、本章では、低コストで高トルク密度を実現するモータとして、従来の希土類焼結IPMSMに対して、希土類ボンド磁石をロータ内部に直接成形することによって、ロータを構成する希土類ボンドIPMSMを提案している⁽²³⁾⁽²⁴⁾。特に、ロータの永久磁石挿入部の最適形状をシミュレーションにより明らかにし、希土類ボンド磁石の永久磁石材料と、希土類ボンド磁石をロータの永久磁石挿入孔に直接成形することによる効果を示している。また、希土類焼結IPMSMと希土類ボンド磁石IPMSMの試作機を作成し、実験により効果を検証している。その結果、希土類焼結磁石に対してBrが半分程度の希土類ボンド磁石でも、モータ形状の最適化と工法の進化によって同等のトルク密度が実現できることを示している。

4.2 希土類ボンド IPMSM の構造と特徴

本節では、希土類ボンド IPMSM の構造について、基本的な考え方を示し、次に、磁性材料的な観点と、工法面について説明する。一般的に希土類ボンド磁石は、希土類焼結磁石に比べて、 B_r が約半分程度であるため、同じ形状、同じ永久磁石体積でトルク密度を比較すると、比較が成り立たない。そこで、希土類ボンド磁石の特徴を活かすために、希土類ボンド磁石の永久磁石体積を、ロータ形状の範囲内で増加させて検討を行った。

4.2.1 希土類ボンド IPMSM のロータ構造

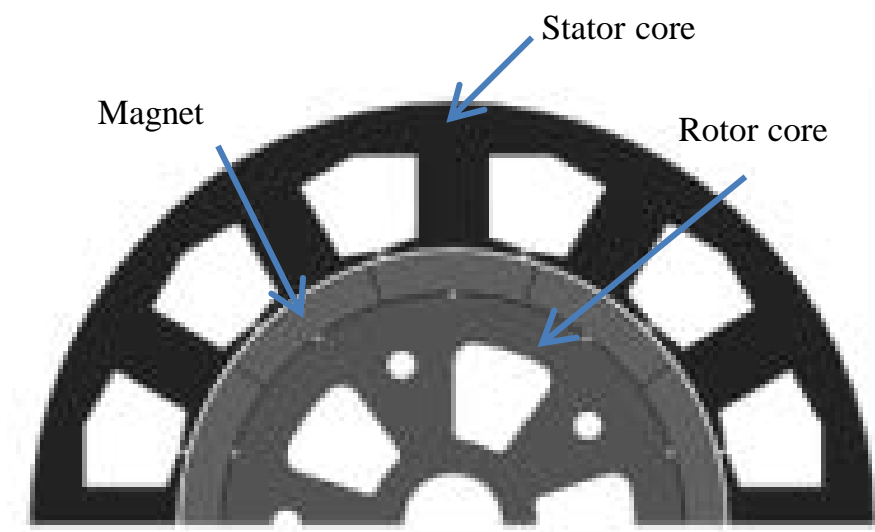
図 4.1 に従来の SPMSM と IPMSM のロータ構造図を示す。永久磁石同期モータの発生トルクにはマグネットトルクとリラクタンストルクの二つがあるが、SPMSM はマグネットトルクのみを用いるのに対して、IPMSM はマグネットトルクとリラクタンストルクの二つのトルクを用いて回転する。マグネットトルクは、永久磁石の特性、特に B_r と永久磁石の表面積によって決定され、リラクタンストルクはロータの形状や永久磁石の配置の仕方によって決定される。

また、モータに使用される永久磁石は、フェライト焼結磁石、希土類焼結磁石、希土類ボンド磁石等に分類される。希土類焼結磁石は、 Dy 等の重希土類を含むため、高価であり、平板形状以外では、加工時の材料歩留まりが悪くなる。そのため、特殊な用途以外では、平板形状を用いることが多い。そこで本章では、希土類ボンド磁石を用いた SPMSM（以下、希土類ボンド SPMSM）と平板形状の希土類焼結 IPMSM を比較対象としている。

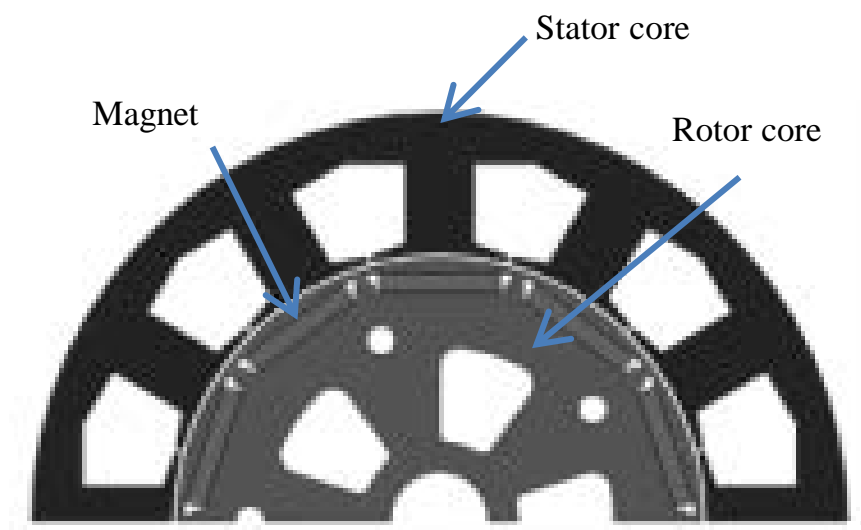
さらに、希土類ボンド磁石には、等方性と異方性がある。等方性の希土類ボンド磁石は、異方性とは異なり、 B_r が低下する反面、磁粉の配向等を考慮しなくても良いため、着磁が安易である。希土類ボンド IPMSM は永久磁石表面積の拡大や、リラクタンストルク拡大を目的に磁石をロータ内径深くに挿入するため、着磁が大きな課題になる。そこで、本研究では、等方性の希土類ボンド磁石を採用して検討を行っている。

希土類ボンド磁石を用いて、希土類焼結 IPMSM と同等のトルク密度を実現することが本検討の目的である。本章で提案する希土類ボンド IPMSM は、従来の IPMSM の永久磁石穴に希土類ボンド磁石を流し込んだ構造である。希土類ボンド IPMSM のロータ構造図例を図 4.2 に示す。図 4.2 に示すように、希土類ボンド IPMSM は、ロータの永久磁石挿入

穴に希土類ボンド磁石が埋め込まれる構造となっている。また、成形機によって射出成形されるため、永久磁石挿入穴の形状によって様々な永久磁石形状を作成することが可能となる。これにより、従来の希土類焼結磁石では困難であった形状が構成できるため、理想的な磁気回路設計が構成でき、リラクタンストルクの積極的な活用や、永久磁石表面積を拡大するための特殊な形状が可能となった。



(a) 希土類ボンド SPMSM (Type-S)



(b) 希土類焼結 IPMSM (Type-I)

図 4.1 従来モータの形状

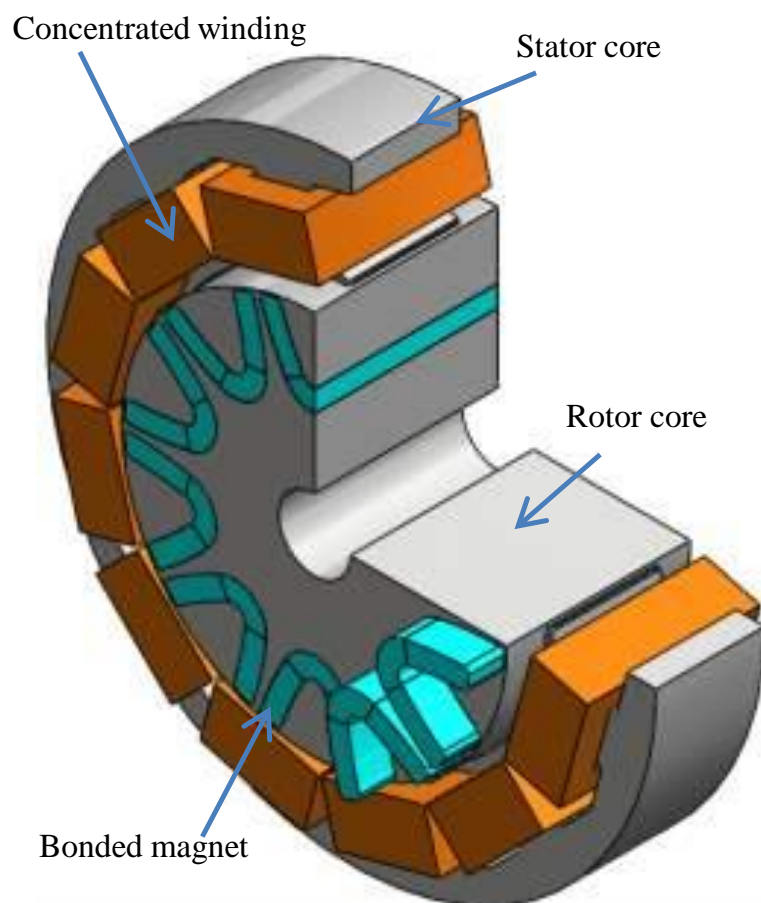


図 4.2 提案するモータの構造図

4.2.2 希土類ボンド IPMSM に適した磁性材料

希土類ボンド SPMSM とは異なり、希土類ボンド IPMSM はロータコア内に設けられた永久磁石挿入穴に永久磁石を埋め込む構造であるため、希土類ボンド IPMSM 用の永久磁石は、構造体としての強度や遠心力に耐え得る強度が低くても永久磁石が破損して飛散するなどの不具合が発生しにくいと考えられる。これにより、希土類ボンド SPMSM では不可能であった樹脂量を低下させて、永久磁石粉末の充填量を最大化するなどの方法が検討できる。永久磁石粉末充填量を最大化することは、単位体積あたりの永久磁石粉末の量を増やすことを意味し、永久磁石成形体としての密度を向上させ高い磁力を得ることが可能となる。今回検討した希土類ボンド IPMSM においては、永久磁石挿入穴に射出成形で直接成形するプロセスを用い、前述の永久磁石粉末充填量を最大化する材料とプロセスの検討を行っている。永久磁石粉末の充填量を最大化するためには、射出成形用材料（以下ペレット）中の永久磁石粉末の粒度調整を最適化し、ペレットに含有される樹脂量を極小化する必要がある。

ペレット中の永久磁石粉末粒度分布調整に関しては、大粒径粉末と、その隙間を埋める小粒径粉末の配合比を最適化することで成形体密度を向上できる。大粒径粉末の平均粒子径は $100\mu\text{m}$ であり、小粒径の平均粒子径は $5\mu\text{m}$ の材料を用いた。小粒径粉末の配合比率を変化した時の永久磁石粉末の充填状態を確認するために、電子顕微鏡写真を図 4.3 に示す。小粒径粉末の添加量を 30%まで増やすことで、大粒径粉末間の空隙を埋めて充填率が向上している状態が観察できる。しかし、小粒径粉末が過剰になると、粉末間で発生する摩擦抵抗や、粉末間に残留した空気により成形圧力を高めても空気層が圧力伝播を阻害するため高充填化されない。このように、大粒径と小粒径の永久磁石粉末の粒度調整を行うことで、高充填の成形体を得ることができる。ただし、本章で検討した希土類磁石粉末は酸化し易い性質を持つため、小粒径化に伴い表面活性が増し、粒径 $5\mu\text{m}$ では、永久磁石粉末の酸化劣化が増加し磁気特性が著しく劣化した。そこで、 $5\mu\text{m}$ の永久磁石粉末に対しては、磁性成分の減少を最小に抑えたサブミクロンオーダーのリン酸系無機被膜処理を永久磁石粉末粉碎過程で施すことで、大気に触れることなく表面処理し、酸化劣化を防止した。磁気特性を損なうことなく永久磁石の高密度化を実現したことにより、希土類ボンド IPMSM で使用する永久磁石の B_r を 0.65T から 0.70T に向上することが可能となった。

また、希土類焼結 IPMSM において、高速回転駆動などで課題となる永久磁石内部のう

ず電流損が、希土類ボンド IPMSM では、磁粉を樹脂で覆っているために、磁粉間を絶縁しているようになっており、うず電流のループが小さくなり、うず電流損が低減できると考えられる。

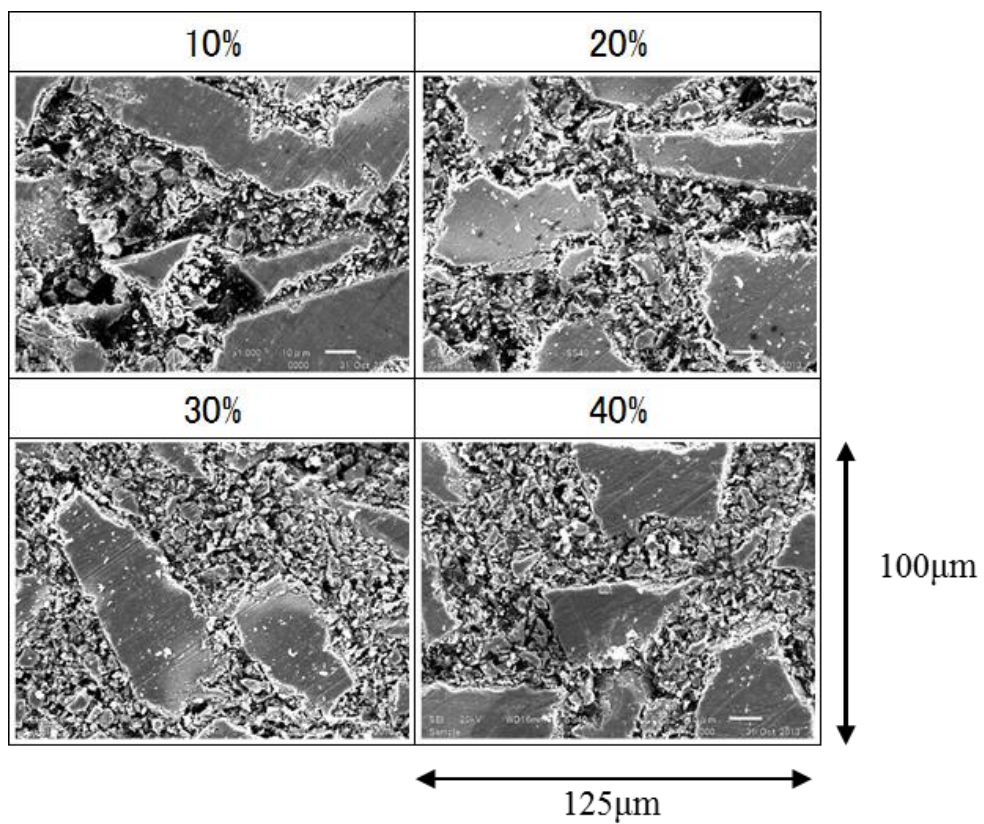


図 4.3 小粒径粉末添加量の違いによる磁石粉末の電子顕微鏡写真

4.2.3 成型によるクリアランスレス化

IPMSM のロータコアは、一般的には電磁鋼板を積層して構成されるが、従来の希土類焼結 IPMSM では、それぞれの寸法公差の関係上ロータコアの永久磁石穴と永久磁石の間に 0.05 mm から 0.1 mm 程度のクリアランスが発生し、これによって、誘起電圧が 3~5% 程度低下する問題があった。さらに、永久磁石穴との隙間があるために、永久磁石が回転中に動くことや、接着剤固定時の塗布量のバラツキによってロータに機械的・磁気的なアンバランスが発生し、振動や騒音の要因になっていた。しかし、希土類ボンド IPMSM は、永久磁石を直接永久磁石穴に流し込むため、図 4.4 に示すように永久磁石と電磁鋼板の接合面が密着し、クリアランスレス化が可能となり、誘起電圧の低下を抑制することが可能となった。さらに、ロータのアンバランスを極小化することが可能となるため、振動騒音の抑制にも効果を発揮すると考えられる。

また、金型プレスによって積層されたロータコアの場合、積層した一枚一枚の断面には、打ち抜き時の変形等により、若干の隙間が発生する。この隙間に射出成型によって充填された希土類ボンド磁石が密着することによって、ロータコアと永久磁石が一体化しロータの剛性が向上する。ロータが遠心力により変形しようとする際に、希土類ボンド磁石とロータコアの間で摩擦力が加味されることによって、遠心力による強度が向上すると考えられる。

図 4.5 に同一形状の希土類ボンド IPMSM のロータコアに、希土類焼結磁石を挿入した場合と、希土類ボンド磁石をダイレクト成形した場合の回転数に対するロータの変形量を示す。図 4.5 より、ロータの回転数に対して、希土類焼結磁石を挿入したロータコアが変形していくのに対して、希土類ボンド磁石を挿入したロータコアは変形していないことが分かる。このことより、ロータコアと希土類ボンド磁石の密着性によって、ロータ強度が向上したことが確認できる。このロータ強度向上の効果をトルク密度向上に転換する方法について考察する。ロータ強度が向上しているため、遠心力による応力が集中しロータ強度の根幹となるブリッジ部の厚みを短縮することが可能と考えられる。これにより、ブリッジ部を通る漏れ磁束が低減し、ステータに鎖交する磁束が増加するため、マグネットトルクが向上する。また、ブリッジ部を短縮しない場合においては、ロータ強度の面で制限がかかっていたモータの最大回転数を向上することができ、最大出力を向上することが可能となる。

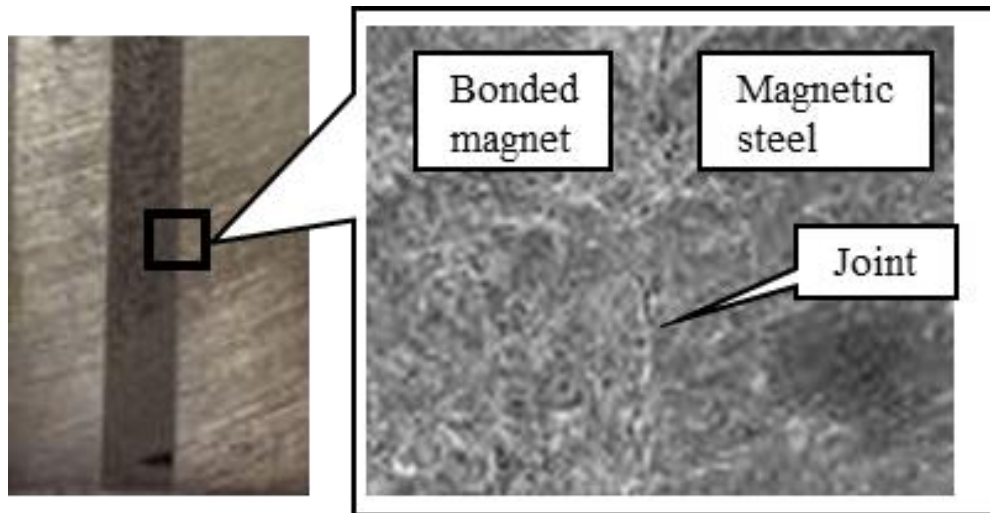


図 4.4 希土類ボンド IPMSM 内の希土類ボンド磁石と電磁鋼板の接合部の断面図

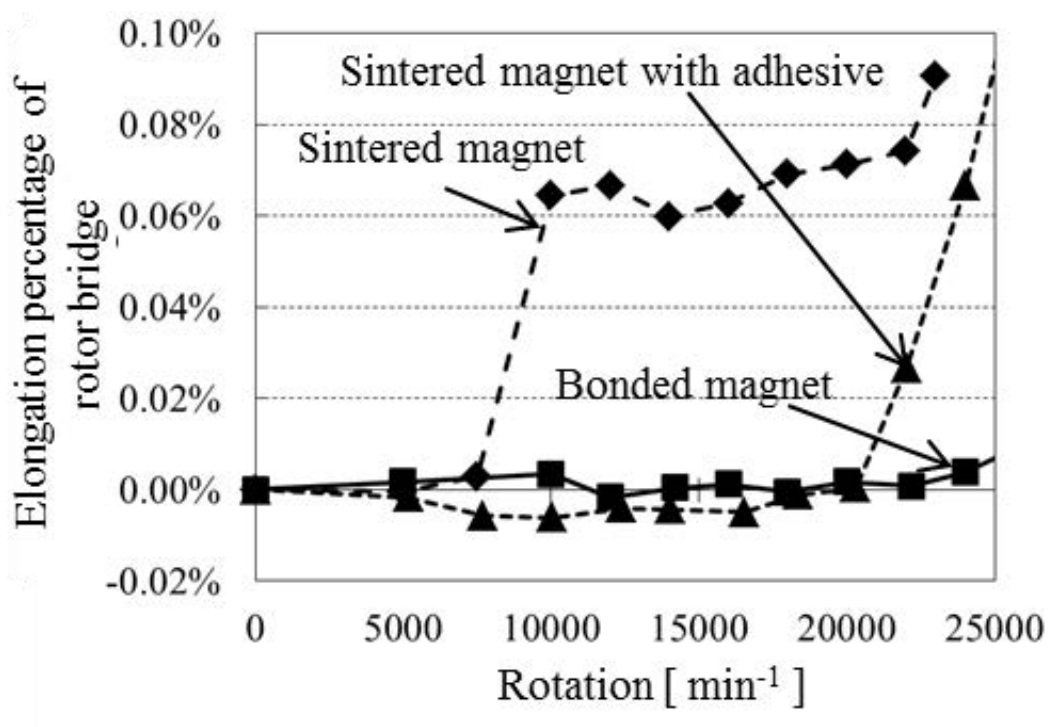


図 4.5 強度試験結果

4.2.4 希土類ボンド IPMSM の特徴まとめ

希土類ボンド IPMSM は、磁石材料をロータコアに成型することにより、材料・構造・性能面で、以下の特徴を持つと考えられる。

- (1) 形状自由度が高く、様々なロータ形状の構成が可能
- (2) 永久磁石の強度を無視できるため、希土類ボンド磁石の高密度化が可能
- (3) 磁粉を樹脂で覆っているため、永久磁石内部のうず電流損が低減可能
- (4) クリアランスレス化により、希土類ボンド磁石とロータコアの隙間が無くなるため、誘起電圧が向上
- (5) クリアランスレス化により、希土類ボンド磁石とロータコアの密着性が増すため、ロータ強度が向上

4.3 解析を用いた最適形状の検討

本章では、家電用や車載用小型モータとして広く使用されている 10 極 12 スロットと 8 極 12 スロットのモータを対象に、ロータ形状の最適化の検討を行った。

4.3.1 10 極 12 スロット構造の解析結果

解析に用いたモータの諸元を表 4.1 に示している。本研究で対象としたモータは、定格負荷点の 0.5Nm 、 $2,800\text{min}^{-1}$ で運転され、この時の Type-I のモータ電流は、 12.5Arms である。これより、希土類ボンド IPMSM の Type-A~TypeH8 においては、モータ電流 12.5Arms で 0.5Nm 、 $2,800\text{min}^{-1}$ を実現することが、同等のトルク密度を達成できるかの指標となる。表 4.1 に示すようにステータの積厚に対して、ロータ積厚を大きくすることにより、モータ体格を大きくすることなくトルク密度を向上させるオーバーハングを採用している。ただし、希土類焼結 IPMSM (Type-I) に関しては、永久磁石コストの増大を鑑み、オーバーハングを採用していない。

解析に用いたロータの形状を図 4.6 に示す。検討した解析モデルは、図 4.6 の Type-A から Type-H に示すように、永久磁石の挿入形状を様々な形状で構成しており、ステータは、

図 4.1 の Type-S、Type-I と同じ形状で、極数とスロット数は、10 極 12 スロットとしている。さらに、Type-A から Type-H は、永久磁石量が一定となるように永久磁石厚みを調整している。Type-A は、U 字と V 字の合形状としており、永久磁石の厚みを一定として、ロータの内径側を円弧で構成し、極間を直線で構成している。Type-B は、Type-A の永久磁石端部を切り落とした形状とすることで、若干ではあるが表面積を広げ、永久磁石開角を拡大した構成としている。Type-C と Type-D はコの字形状の厚みと深さ違いであり、Type-D の方が、表面積が拡大している構成となっている。Type-E は U 字形状をベースとしているが、永久磁石端部を厚くし、極中央部を薄くすることで、減磁耐力の向上を図った。Type-F は 3 層構造としており、リラクタンストルクの向上を図った構成としている。Type-G は、表面積の最大化を狙い、永久磁石表面を波型にしている。Type-H は、回転方向を CCW とした場合に、回転方向に永久磁石を偏らせる構成とした。

図 4.7 に Type-A から Type-H の無負荷時の磁束密度分布を示している。また、図 4.8 に、12.5Arms の電流を流した時のトルク解析結果とマグネットの表面積の関係を示している。図 4.8 に示すマグネットの表面積は Type-A のロータコア内側部分を 1 とした場合の比率として表している。

表 4.1 モータ諸元

	Type-S	Type-I	Type-A ~ Type-H8
Torque [Nm]	0.5		
Speed [min ⁻¹]	2800		
Rotor diameter [mm]	54.4		
Stator diameter [mm]	90		
Motor height [mm]	20		
Stator stack length [mm]	10		
Rotor stack length [mm]	15	10	15
Air gap [mm]	0.5	0.3	0.3
B_r [T]	0.65	1.36	0.7
H_{cb} [kA/m]	426	1032	426

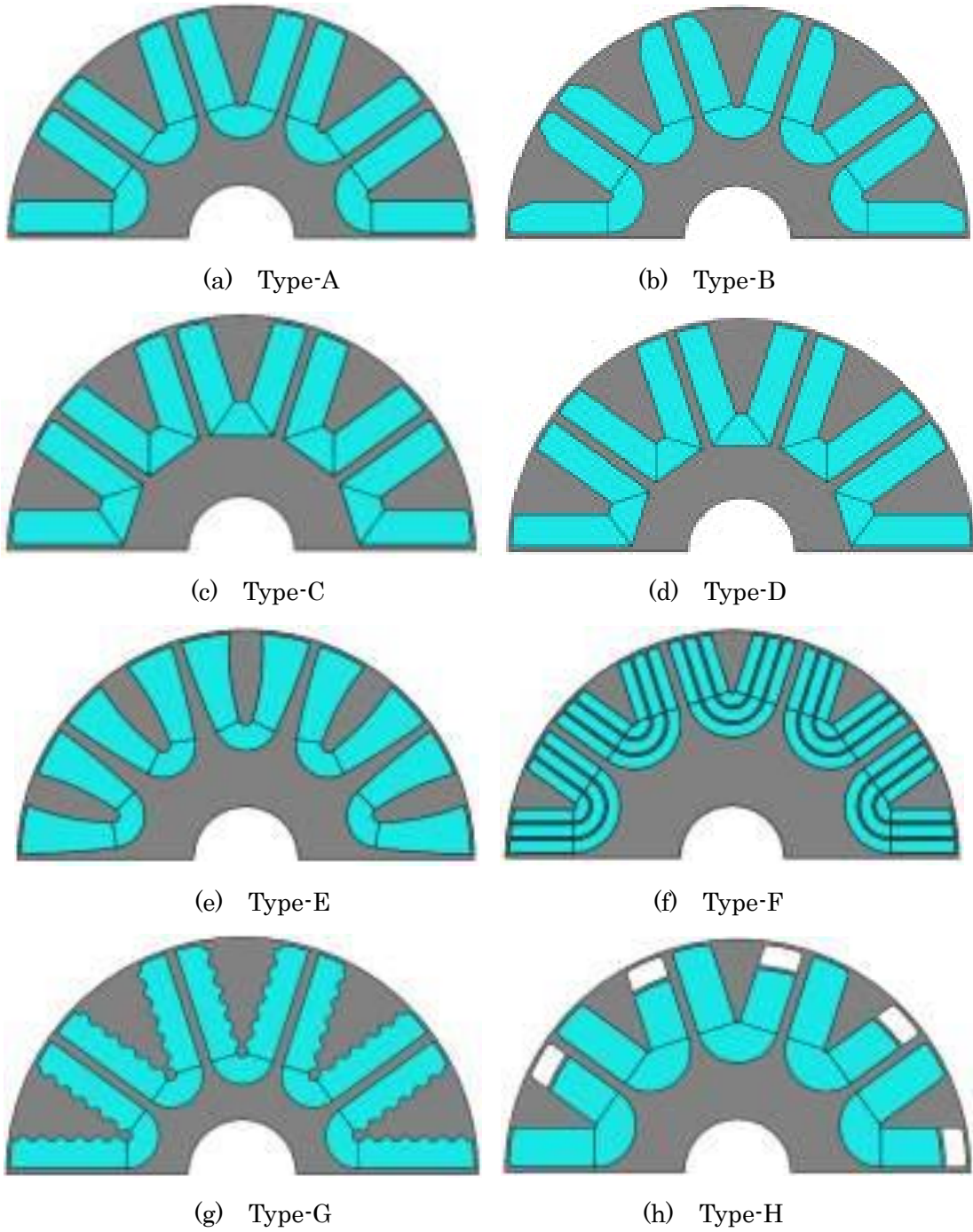


図 4.6 解析に用いたロータ形状

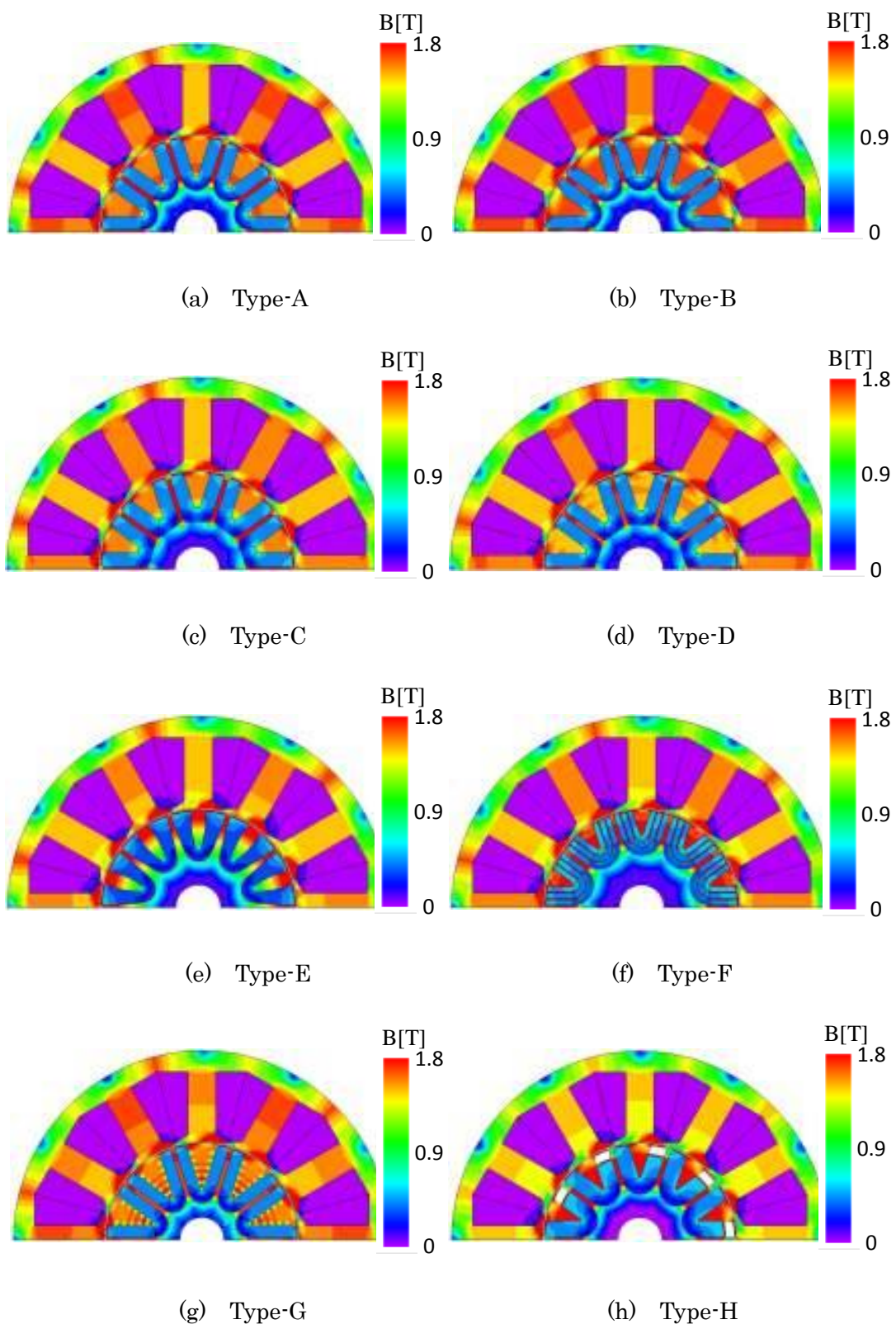


图 4.7 磁束密度分布

図 4.7 より、Type-A と Type-B と Type-G のステータティース部の磁束密度が高くなっていることがわかる。さらに、図 4.8 より、リラクタンストルクがほとんど発生せず、マグネットトルクが主であることがわかり、マグネット表面積と相関関係があることが確認できる。これは、ステータが集中巻で極数とスロット数の組み合わせが、10 極 12 スロットであるために、リラクタンストルクが発生しにくいためであると思われる。

図 4.9 に 0.5Nm、2,800min⁻¹時の損失分析結果と効率の解析結果を示す。図 4.9 より、本負荷点においては、銅損が主流であるため、Type-A と Type-B と Type-G の効率がトルク解析結果と同様に、高くなっていることがわかる。

以上のことから、10 極 12 スロットの希土類ボンド IPMSM においては、永久磁石表面積を最大化する形状がトルク密度、効率の面において最適であると考えられる。

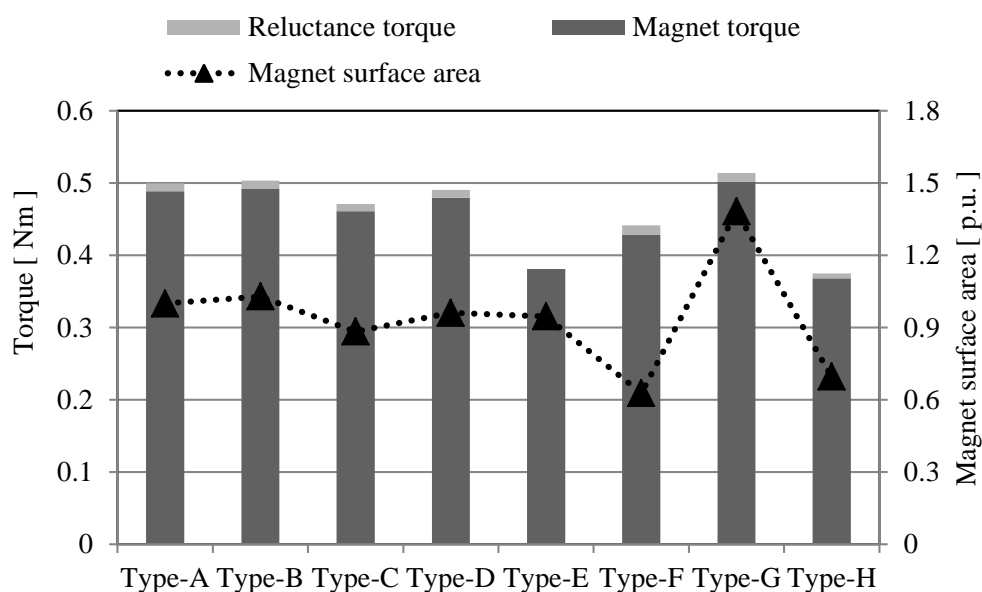


図 4.8 トルク解析結果と永久磁石表面積の関係

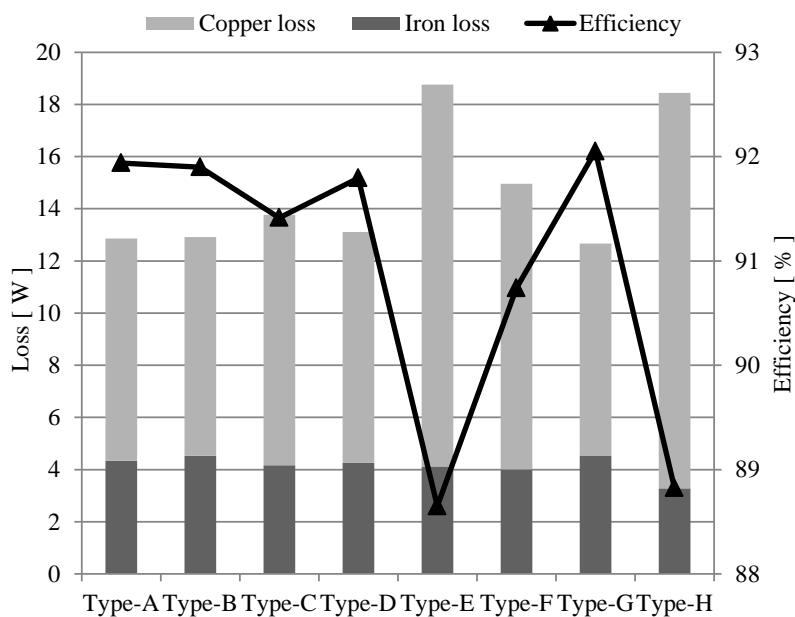
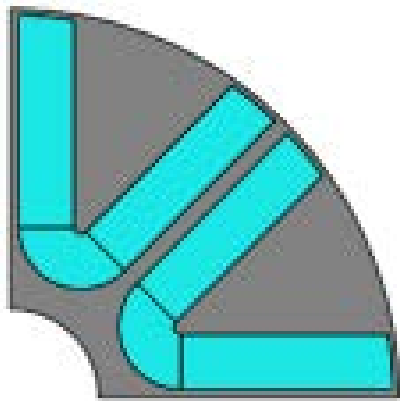


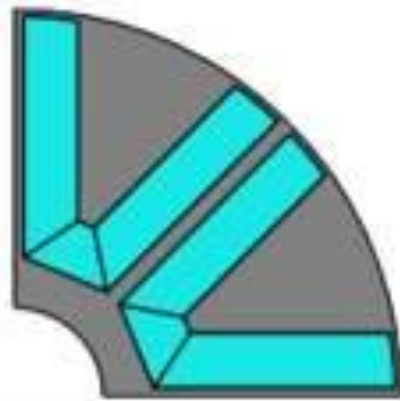
図 4.9 損失分析結果と効率の比較

4.3.2 8極12スロット構造の解析結果

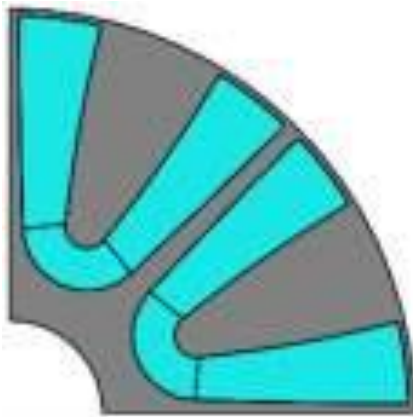
10極12スロットでは、リラクタンストルクが利用しにくいいため、極数とスロット数を8極12スロットにした場合における検討を行った。ただし、ステータの形状は同じとしているが、巻線方向は8極用に変更している。図4.10に解析に用いたロータ形状を示す。Type-A8とType-D8からType-H8は、前節で説明したType-AとType-DからType-Hの極数変更モデルであり、設計思想も同様である。図4.11にType-A8からType-H8の無負荷時の磁束密度分布を示す。図4.12に、8極12スロット時の同一電流条件でのトルク解析結果とマグネットの表面積の関係を示す。図4.12に示すマグネットの表面積も図4.8と同様にType-Aのロータコア内側部分を1とした場合の比率として表しているため、比較対象として、図4.12には10極12スロットのType-Aを載せている。



(a) Type-A8



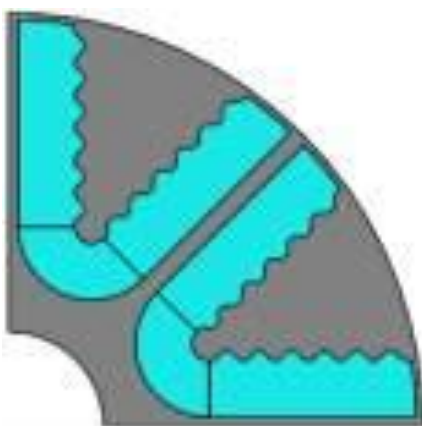
(b) Type-D8



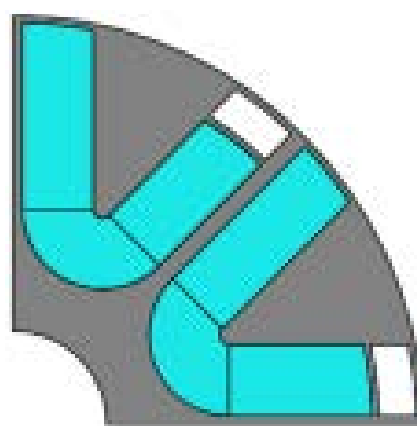
(c) Type-E8



(d) Type-F8



(e) Type-G8



(f) Type-H8

図 4.10 解析に用いたロータ形状(8P12S)

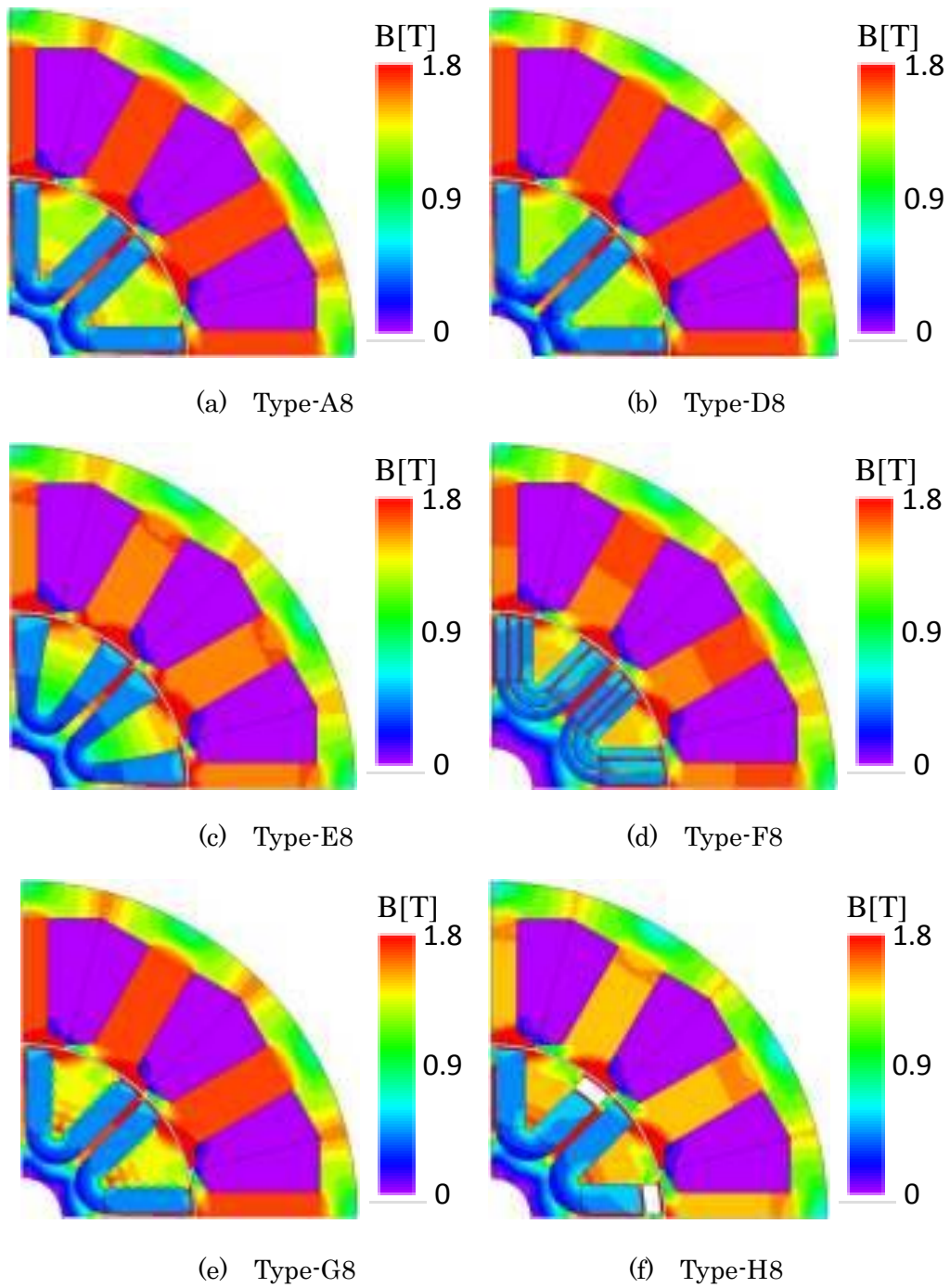


图 4.11 磁束密度分布(8P12S)

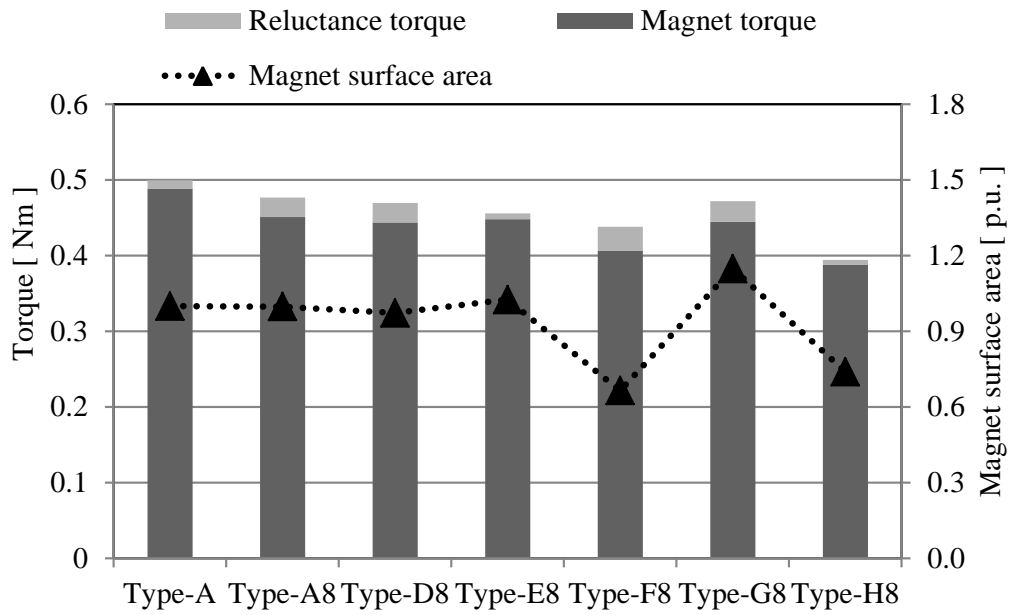


図 4.12 トルク解析結果と永久磁石表面積の関係(8P12S)

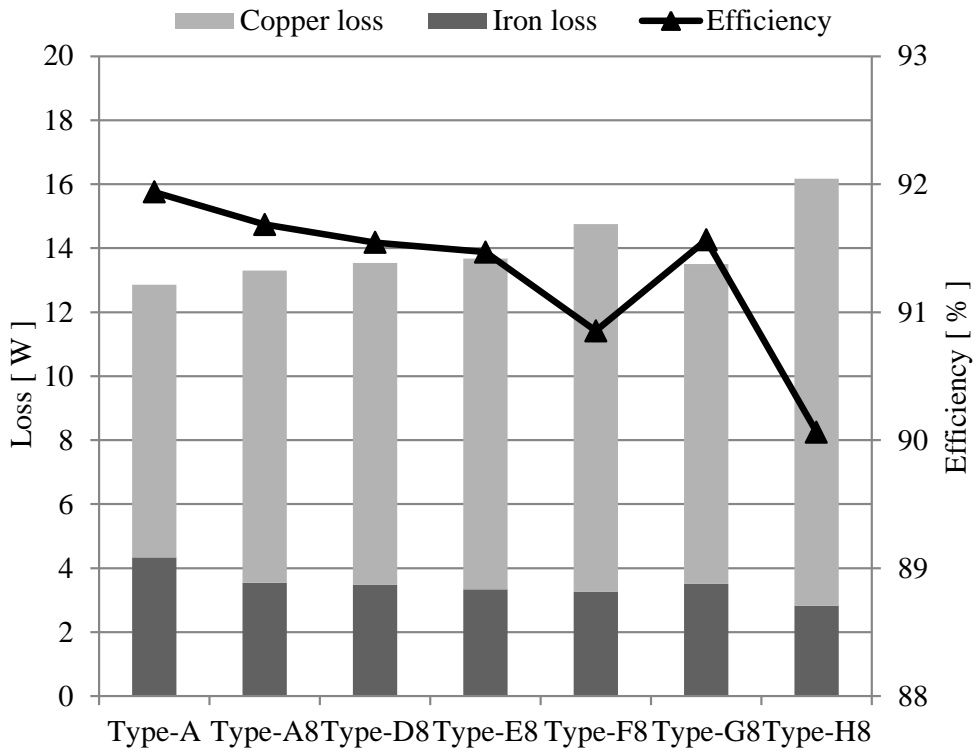


図 4.13 損失解析結果と効率の比較(8P12S)

図 4.11 より、Type-A8 と Type-G8 のステータティース部の磁束密度が高くなっていることがわかる。図 4.12 より、永久磁石の極数を 8 極にすることによって、10 極 (Type-A) に比べて、リラクタンストルクが増加していることが確認できる。しかし、10 極と 8 極の巻線係数の違いから、マグネットトルクが全体的に低下しているため、同一電流条件においては、トルクが低下していることが確認できる。図 4.13 に図 4.9 と同様に 0.5Nm、2800min⁻¹時の損失分析結果と効率の比較を示しているが、図 4.12 の結果と同様に、10 極 (Type-A) に比べて、効率が低下していることが確認できる。この結果から、集中巻 IPMSM においては、リラクタンストルクを積極的に活用するよりも、マグネットトルクの最大化を狙って設計することが望ましいと考えられる。

4.3.3 希土類焼結磁石との比較

10 極 12 スロットの組合せにおいて、希土類ボンド SPMSM (Type-S) と希土類焼結 IPMSM (Type-I) と、本章で提案する希土類ボンド IPMSM (Type-A) の比較を行った。表 4.2 に、1000min⁻¹時の誘起電圧と、図 4.9 と図 4.13 と同様に 0.5Nm、2800min⁻¹時の効率の比較を示す。表 4.2 より、Type-S に比べて、Type-I と Type-A の誘起電圧が高く、銅損が低減され効率も同等以上となっていることがわかる。また、Type-A の誘起電圧と効率が希土類焼結 IPMSM を上回っていることから、誘起電圧を合わせるように積厚を削減した Type-A2 を設計し、解析を行った。その結果、Type-A2 と Type-I が同等程度の効率となることが確認できる。

表 4.2 解析結果の比較

	Type-S	Type-I	Type-A	Type-A2
Rotor stack length [mm]	15	10	15	12.5
Back EMF [%]	100	115	130	115
Copper loss [W]	9.7	8.8	6.2	8.9
Iron loss [W]	2.9	3.9	5.6	4.1
Efficiency [%]	92.0	92.0	92.5	91.9

4.4 試作機を用いた実験結果

本章で提案する希土類ボンド IPMSM を試作し、評価を行った。図 4.14 は試作機のロータの外観写真を示している。ステータは同一とし、ロータを入れ替えて実験を行っている。図 4.15 に Type-I と Type-A2 の 0.5Nm 、 2800min^{-1} 時の損失分析と効率測定の結果を示す。解析結果と同様に、同等効率を実現できていることが確認できた。

また、表 4.3 に実験により確認した希土類ボンド IPMSM と希土類焼結 IPMSM のトルク密度の比較を示す。また、参考として、希土類ボンド SPMSM の Type-S も試作作成し、実験を行っている。表 4.3 より、 D_y を用いない希土類ボンド SPMSM ではトルク密度が低下するが、希土類ボンド IPMSM で希土類焼結 IPMSM と同等のトルク密度を実現することが実験により確認できた。

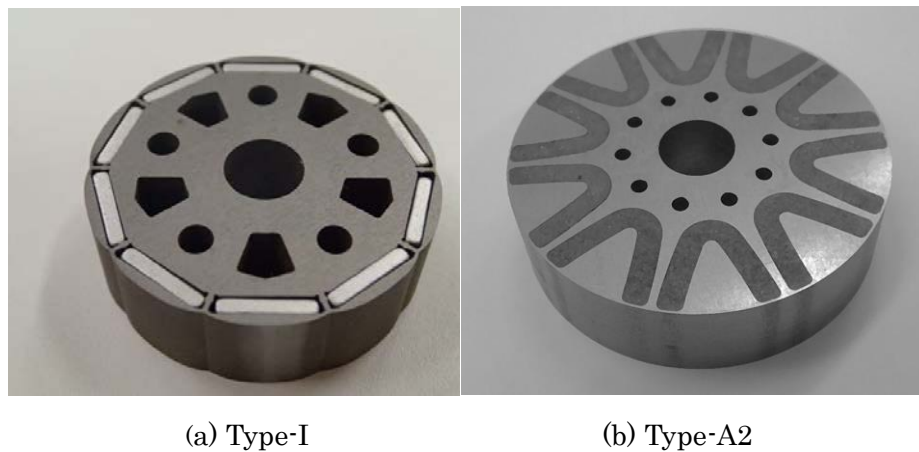


図 4.14 試作機の写真

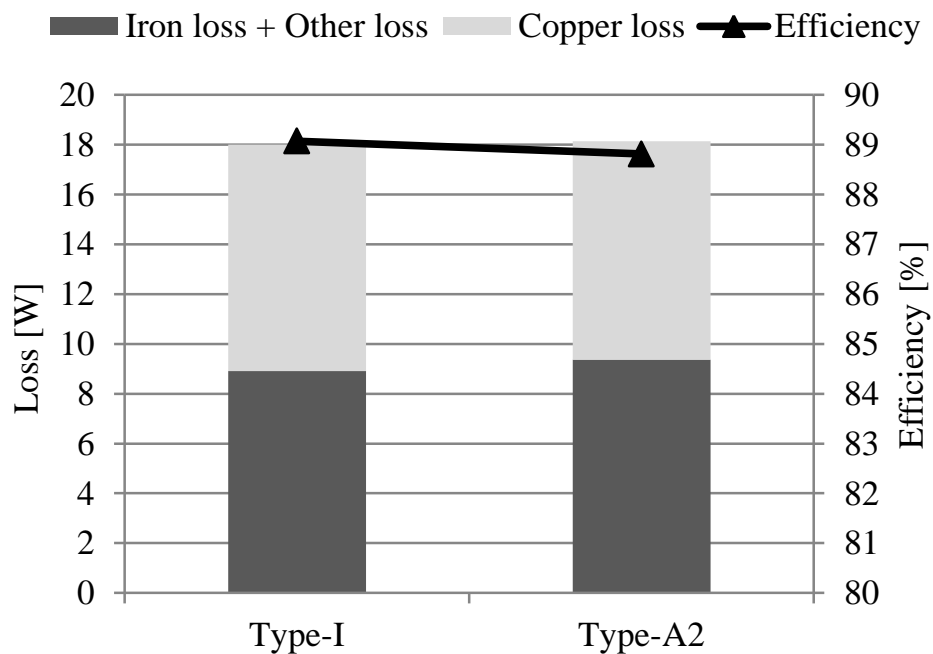


図 4.15 効率測定結果

表 4.3 トルク密度の比較

	Type-S	Type-I	Type-A2
Max torque [p.u.]	0.87	1.0	1.0
Motor volume [p.u.]	1.0	1.0	1.0
Torque density [p.u.]	0.87	1.0	1.0

4.5 結言

本章では、希土類ボンド磁石をロータコアに直接成形した希土類ボンド IPMSM を提案した。希土類ボンド IPMSM の最適形状の設計と製造工法を考慮した検討をシミュレーションと試作機を用いた実験により行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 希土類ボンド磁石を射出成形でロータ内部に埋め込むことによって、ロータの形状を様々な形状にすることが可能となるため、今まで、永久磁石の製造上、不可能であった形状を作成することができるようになった。これにより、シミュレーションを用いた最適化設計が非常に有効となり、10 極 12 スロットの組み合わせの集中巻のモータの場合、リラクタンストルクの利用率が悪化するため、マグネットトルクを最大限に増加させる形状、すなわち、永久磁石の表面積を最大化させることが有効であることが明らかになった。
- (2) 希土類ボンド磁石を射出成型でロータ内部に埋め込む工法を用いることによって、永久磁石とロータコアの間に隙間が無くなり、永久磁石の磁束を有効的に活用できるようになった。さらに、ロータコアと永久磁石が機械的に密着することによって、ロータが高速回転する際に遠心力に対して強度が向上するため、ロータブリッジ部の厚みを低減させることも可能となる。
- (3) 希土類ボンド磁石はリング形状などで用いられる場合においては、強度確保のために、樹脂量を多くして永久磁石の密度や B_r を低下させて使用する。しかしながら、本章のように、ロータ内部に埋め込む構造とすることで、永久磁石自体の強度は必要ではなくなるため、永久磁石の密度を、強度を無視して向上させるようにすることで、永久磁石の B_r を向上することが可能となる。

上記の効果によって、希土類ボンド IPMSM は希土類焼結 IPMSM を比較すると、同等の効率とトルク密度を実現することが明らかになった。以上のことから、従来まで多極化や高速回転化無しでは不可能であった希土類焼結磁石 IPMSM と同等のモータサイズを、希土類ボンド IPMSM で実現できることが確認できた。高出力・高効率モータとして、PMSM は、SPMSM から IPMSM に進化してきたが、希土類ボンド IPMSM は、次の進化を期待できるモータであると考えられる。また、提案するモータではロータをオーバーハ

ングしているが、形状等の工夫によって更なる小型化の検討が必要である。

第 5 章 結論

本論文は、永久磁石モータの高トルク密度化をモータの構造、形状面で実現する方法に関しての研究をまとめたものである。本研究で得られた結果を要約すれば、次のようになる。

まず第 2 章では、モータのエアギャップ表面積を拡大し、高トルク密度化するために、ステータにトロイダル巻を採用し、ステータの内側と外側にそれぞれインナーロータとアウターロータの二つのロータを持つデュアルロータ構造を提案した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) トロイダル巻デュアルロータ構造とすることで、インナーロータとアウターロータの二つトルクが利用できるため、シングルロータ構造のモータに対して、高トルク密度化が可能となる。
- (2) トロイダル巻デュアルロータ構造の極数とスロット数の組み合わせを最適化することによって、トルク密度が向上するため、フェライト磁石を用いたデュアルロータ SPMSM は希土類焼結磁石を用いた IPMSM と同等のトルク密度を実現できる。
- (3) インナーロータとアウターロータにそれぞれ発生するコギングトルクの位相を反転させ、コギングトルクの波高値を同等に調節することによって、コギングトルクをキャンセルすることが可能である。

次に第 3 章では、モータのエアギャップを 3 次元的に拡大する方法として、電磁鋼板をスラスト方向に折り曲げて構成させる 3DBC を提案している。従来の一般的な希土類ボンド磁石 SPMSM と 3DBC を用いた希土類ボンド磁石 SPMSM との比較を、シミュレーションと試作機による実験を通して検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) ステータ積厚より、ロータ高さの方を長くオーバーハンクしたモータにおいては、従来漏れ磁束となって利用できていなかった永久磁石の磁束が有効活用され、漏れ磁束が約 3 割低減できた。その結果、トルク密度を 10%向上することが可能であることが明らかになった。

- (2) 3DBC に対して永久磁石の磁束が直角に鎖交するため、3DBC には大きなうず電流が発生することをシミュレーションにより可視化し、数値化した。これにより、銅損に対して鉄損の比率が多くなる回転数の高い領域では、うず電流損の増加によって効率が低下するが、逆に鉄損に対して銅損の高い範囲で、効率が同等のまま小型化できることが明らかになった。
- (3) 3DBC に使用する材料は、加工性の良い SPCC や電磁軟鉄より、ステータコアと同じ材質の電磁鋼板が鉄損の増加を抑制するため、最も適していることが分かった。また、3DBC を構成する枚数も、磁気飽和の影響を鑑みて枚数を増やしていくことで、オーバーハングした永久磁石の磁束を有効的に鎖交させることができることを確認した。

第 4 章では、希土類ボンド磁石をロータコアに直接成形した希土類ボンド IPMSM について述べた。希土類ボンド IPMSM の最適形状の設計と製造工法を考慮した検討を、シミュレーションと試作機を用いた実験により行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 希土類ボンド磁石を射出成形でロータ内部に埋め込むことによって、ロータの形状を様々な形状にすることが可能となるため、今まで、永久磁石の製造上、不可能であった形状を作成することができるようになった。これにより、シミュレーションを用いた最適化設計が非常に有効になり、10 極 12 スロットの組み合わせの集中巻のモータの場合、リラクタンストルクの利用率が悪化するため、マグネットトルクを最大限に増加させる形状、すなわち、永久磁石の表面積を最大化させることが有効であることが明らかになった。
- (2) 希土類ボンド磁石を射出成型でロータ内部に埋め込む工法を用いることによって、永久磁石とロータコアの間に隙間が無くなり、永久磁石の磁束を有効的に活用できるようになった。さらに、ロータコアと永久磁石が機械的に密着することによって、ロータが高速回転する際に遠心力に対して強度が向上するため、ロータブリッジ部の厚みを低減させることも可能となる。
- (3) 希土類ボンド磁石はリング形状などで用いられる場合においては、強度確保のために、樹脂量を多くして永久磁石の密度や B_r を低下させて使用する。しかしなが

ら、本章のように、ロータ内部に埋め込む構造とすることで、永久磁石自体の強度は必要ではなくなるため、永久磁石の密度を、強度を無視して向上させるようにすることで、永久磁石の B_r を向上することが可能となる。

最後に、本研究では、PMSM のトルク密度の向上に関して、永久磁石の有効的な活用に着目して、様々なモータ構造を提案した。その結果、使用する運転領域によって一長一短はあるが、モータ構造の創意工夫によって、安価な永久磁石を用いても、トルク密度を向上させ、希土類焼結磁石と同等のレベルまで高めることが可能であることを明らかにした。

省エネルギー化や省資源化が社会問題となる昨今においては、本研究で提案した PMSM は、その問題解決に非常に有用な手段であり、広く世間に普及していく使命があると考えている。今後も更なるトルク密度の向上に取り組み、省資源で高効率なモータを開発し続けていきたい。

参考文献

- (1) 松井信行、千葉明、武田洋次：「リラクタンストルクを利用した回転機」、電気学会論文誌 D、Vol. 114、No. 9、pp. 824-832(1994)
- (2) 武田洋次、森本茂雄、大山和伸、山際昭雄：「PM モータの制御法と回転子構造による特性比較」、電気学会論文誌 D、Vol. 114、No. 6、pp. 662-667(1994)
- (3) 武田洋次、松井信行、森本茂雄、本田幸夫：「埋込磁石同期モータの設計と制御」、オーム社(2001)
- (4) 村上浩、伊藤浩、浅野能成、檜崎和成、長谷川杉松：「高効率 2 層埋込み磁石型 (IPM) モータ」、Matsushita Technical Journal、Vol. 44、No. 2、pp. 149-154(1998)
- (5) 村上浩、本田幸夫、桐山博之、森本茂雄、武田洋次：「エアコン用コンプレッサモータにおける SPMSM、IPMSM、SynRM の特性比較」、平成 11 年電気学会産業応用部門大会、[I]、No. 24(1999)
- (6) 吉川祐一、檜脇英治、玉村俊幸、舟津哲司：「埋め込み磁石形集中巻ブラシレスモータの高効率化技術」、Matsushita Technical Journal、Vol. 51、No. 1、pp. 65-69(1998)
- (7) 堀洋一、寺谷達夫、正木良三：「自動車用モータ技術」、日刊工業新聞社(2003)
- (8) 太田智、松橋大器、沖津隆志、松尾圭祐：「高性能フェライト磁石モータの開発」、明電時報、通巻 341 号、No. 4、pp. 61-64(2013)
- (9) 松尾圭祐、松橋大器、藤原侍士、武田勇：「高性能フェライト磁石モータの実用化開発」、明電時報、通巻 345 号、No. 4、pp. 15-18(2014)
- (10) 柿原航、竹本真紹、小笠原悟司：「フェライト磁石を用いた自動車駆動用スポーク型 IPMSM の回転子形状の検討」、平成 24 年電気学会産業応用部門大会、[III]、pp. 179-184(2012)
- (11) 曾根広太、竹本真紹、小笠原悟司、竹崎謙一、秋山秀勝：「シティ通勤用モータのためのフェライト磁石を用いたインホイール型アキシシャルギャップモータの運転特性」、平成 24 年電気学会産業応用部門大会、[III]、pp. 193-198(2012)
- (12) 榎本裕治、床井博洋、今川尊雄、鈴木利文、小俣剛、相馬憲一：「国際高効率規格 IE5 レベルを達成したアモルファスモータ」、日立評論、Vol. 97、No. 6/7、pp. 368-373(2015)

- (13) 榎本裕治、相馬憲一：「省エネと省資源を両立するアモルファスモータの開発」、日本機械学会誌、Vol. 117、No. 1152、pp. 41-44(2014)
- (14) 榎本裕治、床井博洋、今川尊雄、鈴木利文、小俣剛、相馬憲一：「国際高効率規格IE5 レベルを達成したアモルファスモータ～IE3&IE4 高効率モータの開発に向けて～」、第24回MAGDAコンファレンス in Tohoku、pp. 393-398(2015)
- (15) 尾関慧、小坂卓、松井信行：「自動車用高効率ハイブリッド界磁モータの運転特性」、第24回MAGDAコンファレンス in Tohoku、pp. 399-404(2015)
- (16) 三嶋千里、野口健児、山崎理央、松岡 浩、御手洗浩成、本蔵義信：「Dy フリーNd-Fe-B系異方性ボンド磁石の開発と小型モータへの応用」、日本金属学会誌、Vol. 76、No.1、 pp. 89-95(2012)
- (17) 西浦弘貴、森本茂雄、真田雅之、井上征則：「希土類ボンド磁石を用いた埋込磁石同期モータの構造と特性」、電気学会論文誌 D、Vol. 134、No. 10、 pp. 863-869(2014)
- (18) 吉川祐一、村上浩、森本茂雄：「フェライト磁石を用いたデュアルロータモータの基礎検討」、電気学会回転機研究会資料、RM-14-040(2014)
- (19) 吉川祐一、村上浩、森本茂雄：「フェライト磁石を用いたデュアルロータモータの基礎検討」、電気学会論文誌 D、Vol. 136、No. 2、pp. 126-133(2015)
- (20) 吉川祐一、小川登史、岡田幸弘、村上浩、森本茂雄：「3次元折り曲げ鉄心を用いた高トルク密度モータの提案」、電気学会回転機研究会資料、RM-15-056(2015)
- (21) Y. Yoshikawa、 T. Ogawa、 Y. Okada、 H. Murakami、 S. Morimoto： “Study of Permanent Magnet Motor Using a Three-Dimensional Bend Core”、 The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems 、 pp. 26P1-26P5(2015)
- (22) 吉川祐一、小川登史、岡田幸弘、村上浩、森本茂雄：「3次元折り曲げ鉄心を用いた永久磁石モータの基礎検討」、電気学会論文誌 D、Vol. 136、No. 7、 pp. 494-500(2015)
- (23) 吉川祐一、小川登史、角治彦、堤慎一、村上浩、森本茂雄：「希土類ボンド磁石を用いた IPMSM の基礎検討」、平成 27 年電気学会産業応用部門大会、[Ⅲ]、pp. 209-212(2015)
- (24) 吉川祐一、小川登史、岡田幸弘、堤慎一、村上浩、森本茂雄：「希土類ボンド磁石

- を用いた IPMSM の最適形状に関する考察」、電気学会家電民生研究会資料、HCA-16-007(2016)
- (25) Ronghai Qu、 Thomas A. Lipo : “Dual-Rotor Radial-Flux Toroidally Wound Permanent Magnet Machines”、 IEEE Trans. Ind. Applicat、 Vol. 39、 No. 6、 pp. 1665-1673(2003)
- (26) Ronghai Qu、 M. Aydin、 and T. A. Lipo : “Performance Comparison of Dual-Rotor Radial-Flux and Axial-Flux Permanent-Magnet BLDC Machines”、 IEEE International Electric Machines and Drive Conference 2003、 Vol. 3、 pp. 1948-1954(2003)
- (27) Yu-Han Yeh、 Min-Fu Hsieh、 and David G. Dorrell : “Different Arrangements for Dual-Rotor Dual-Output Radial-Flux Motors”、 IEEE Trans. Ind. Applicat 、 Vol. 48、 No. 2、 pp. 612-622(2012)
- (28) 袈裟丸勝巳、徳永翔平 : 「デュアルロータ型環状巻 SPM モータの検討」、平成 24 年電気学会全国大会、No.5-021(2012)
- (29) 袈裟丸勝巳、徳永翔平 : 「アウターロータ式およびデュアルロータ式 SPM の設計について」、平成 24 年電気学会産業応用部門大会、[Ⅲ]、pp.137-138(2012)
- (30) 吉川祐一、李虎、中川幸典、村上浩、本田幸夫 : 「新構造ダブルロータ IPMSM の基礎検討」、電気学会回転機研究会資料、RM-06-44(2006)
- (31) 李虎、吉川祐一、中川幸典、村上浩、本田幸夫 : 「ダブルロータ IPMSM のホイールインモータへの適用検討」、電気学会回転機研究会資料、RM-06-44(2006)
- (32) Yuichi Yoshikawa、 Hu Li、 Hiroshi Murakami : ” Design of Ultra Low Acoustic Noise and High Power Density Direct Drive Machines with Double Rotor and Toroidally Wound Structure” 、 IEEE Industry Applications Conference Forty-first IAS Annual Meeting、 CD-ROM(2006)
- (33) 日立金属株式会社、「Permanent Magnets」カタログ(2016)
- (34) 日立金属株式会社、「Ferrite Magnet」カタログ(2016)
- (35) 真田雅之、伊藤圭祐、森本茂雄 : 「等価狭ギャップ効果の高い立体ギャップ構造の開発」、電気学会論文誌 D、Vol. 129、No. 12、pp. 1228-1229(2009)
- (36) 榎本裕治、床井博洋、小林金也、天野寿人、石原千生、安部恵輔 : 「高密度圧粉磁心を適用したクローティースモータの開発」、電気学会論文誌 D、Vol. 129、No. 10、

pp. 1004-1010(2009)

- (37) 床井博洋、川又昭一、榎本裕治：「圧粉磁心を適用した小型・高効率モータの検討」、電気学会論文誌 D、Vol. 132、No. 5、pp. 574-580(2012)
- (38) 牧田真治、高橋英介、梨木政行、道木慎二：「三次元磁路と環状巻線からなる簡素なステータ構造を有する新しいモータ」、電気学会論文誌 D、Vol. 134、No. 3、pp. 363-369(2014)
- (39) Y. Tani、 A. Daikoku、 M. Nakano、 H. Arita、 S. Yamaguchi、 and Y. Toide : “Magnetic Power Loss Characteristics of Non-oriented Electrical Steel Sheets under Stress” 、 J. Magn. Son. Jpn.、 Vol. 30、 No. 2、 pp. 196-200(2006)

謝辞

本論文は、永久磁石同期モータの高トルク密度化をモータの構造、形状面で実現する方法に関して一連の研究成果をまとめたものである。

本研究を遂行するにあたり、終始種々のご指導とご鞭撻を賜った大阪府立大学大学院工学研究科 森本茂雄教授、真田雅之准教授ならびに井上征則准教授に深甚なる感謝の意を表します。

また、本研究論文をまとめるにあたり、有益なご助言とご指導を賜りました大阪府立大学大学院工学研究科 石亀篤司教授ならびに小西啓治教授に深甚なる謝意を表します。

パナソニック（株）メカトロニクス事業部モータビジネスユニット 新宮領理ビジネスユニット長、加藤康司開発総括、生産技術本部生産技術研究所 村上浩所次長には本研究論文をとりまとめるにあたり、ご理解とご配慮をいただき、感謝の意を表します。

また、本研究を遂行するにあたり、実験・解析に絶大なるご協力を頂いた、パナソニック（株）黒河通広課長、小川登史主任技師、岡田幸弘主任技師、河村清美主幹技師、角治彦主任技師、堤慎一主任技師、川崎宏昭主任技師ほか職場の先輩、同僚、後輩の皆様からお礼を申し上げます。

最後に私事になりますが、妻香里、長女陽菜、次女優衣、三女莉音に深く感謝します。