

# 永久磁石可変界磁モータ の研究

2018年3月

野中 剛

## 目次

第1章 緒論	．．． 1
1.1 まえがき	．．． 1
1.2 背景	．．． 2
1.3 目的	．．． 10
1.4 本論の概要	．．． 12
第2章 永久磁石可変界磁モータのしくみ	．．． 15
2.1 可変機構付可変界磁モータ	．．． 15
2.2 簡易可変界磁モータ	．．． 16
2.3 永久磁石可変界磁モータ構造の研究経緯	．．． 18
2.4 まとめ	．．． 22
第3章 付随する小形高出力広範囲高効率駆動化技術	．．． 23
3.1 小形高出力広範囲高効率駆動化の要望	．．． 23
3.2 磁束集中 IPM ロータ	．．． 25
3.3 加圧成形コイル	．．． 32
3.4 高強度鋼板ロータコア	．．． 40
3.5 まとめ	．．． 47
第4章 可変界磁モータ要素試作：10kW	．．． 48
4.1 目的	．．． 48
4.2 最大出力制御と最大効率制御に関する検討	．．． 49
4.3 検討結果の試作モータによる検証	．．． 56
4.4 まとめ	．．． 59
第5章 可変機構付可変界磁モータ：52kW	．．． 60
5.1 目的	．．． 60
5.2 提案する永久磁石可変界磁モータの構成と諸元	．．． 61
5.3 特性評価結果	．．． 64
5.4 提案する永久磁石可変界磁モータの制御方法	．．． 67
5.5 駆動システムの評価方法	．．． 69
5.6 制御評価結果	．．． 71
5.7 まとめ	．．． 73
第6章 簡易可変界磁モータ要素試作：24kW	．．． 74
6.1 目的	．．． 74

6. 2	試作モータの概要	・・・75
6. 3	試作モータの評価	・・・77
6. 4	まとめ	・・・83
第 7 章 結論		・・・84
謝辞		・・・86
文献		・・・87

## 第 1 章 緒論

### 1. 1 まえがき

筆者は、人類の歴史はアクチュエータの歴史であると思う。アクチュエータ容量の拡大と共に、我々の生活圏は拡大した。今、その主役にあるのがモータであると思う。

モータの小形高出力化，広範囲高効率駆動化は永遠の課題である。その課題克服の最先端が永久磁石同期モータである。同期モータはかつて巻線界磁式の可変界磁モータが主流で，未だに多くの者が「V 曲線」を学んでいる。しかしながら，希土類永久磁石の威力の大きさに，界磁調整機能を捨てても小形高出力化が優先されている現状である。つまり，永久磁石同期モータは，広範囲高効率駆動より小形高出力化を優先した進歩を遂げてきた。

ならば，希土類永久磁石を用いて可変界磁機能をもたせることができれば，上記課題に対し最高のモータができるであろう。本論文では，次世代を担う小形高出力広範囲高効率駆動化技術として，永久磁石可変界磁モータについて論じる。加えて，永久磁石可変界磁モータの研究に付随して開発した小形高出力広範囲高効率駆動化に貢献する個々の技術についても報告する。

## 1. 2 背景

### 1. 2. 1 小形高出力化と広範囲高効率駆動の要求

今日、永久磁石同期モータは、あらゆる産業機器に小形高出力高効率モータとして受け入れられている。その大きな要因として強力な永久磁石の採用がある。1980年頃の希土類永久磁石の発達によることが知られるところである。

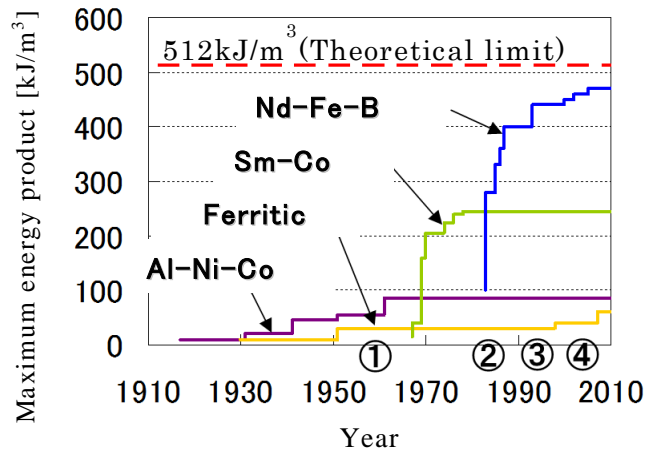
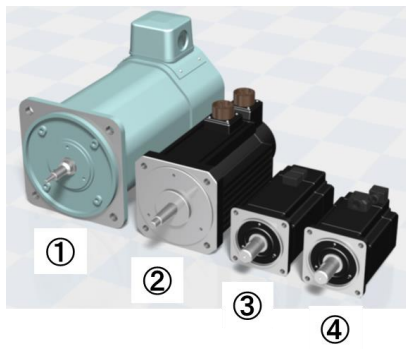
図 1.1 は産業用モータのアプリケーション例である。例えば、産業用ロボットの各関節部にはサーボモータが配置され、駆動源として機能している。これらのサーボモータの特性向上は、ロボットの性能向上と密接に関係している。サーボモータの性能を表す指標として、パワーレート密度（モータの加減速性能を表す指標）がある。質量（モータ質量）が小さく、パワーレート密度の大きいサーボモータは、高いサーボ性能を有し、ロボットの動作時間の短縮などに大きく貢献する。

図 1.2 (a)は、製品化された時期が異なる 4 台の同一出力のサーボモータである。①は 1959 年の製品で、アルミニウム-コバルト系永久磁石が使用されている。②は 1984 年のもので、サマリウム-コバルト系永久磁石が使われている。③と④はそれぞれ 1992 年と 2002 年の製品で、ネオジム-鉄-ボロン系永久磁石が使われている。

図 1.2 (b)は、これら 3 種類の永久磁石材料の最大エネルギー積が向上してきた経緯（日立金属の資料を基に作成）である。図 1.2 (a)に示した製品の登場時期と照らし合わせると、サーボモータの小形高出力化、すなわち、高パワーレート密



図 1.1 産業用モータのアプリケーション例



(a) (b)  
 図 1.2 磁石の最大エネルギー積とモータの外形状の推移

度化と軽量化は、より大きな最大エネルギー積を持つ永久磁石材料の登場に歩調を合わせて進展してきたことがわかる。これは、最大エネルギー積が大きい永久磁石を用いると、モータ内部の磁束密度が高くなり、モータの主要な損失である銅損の低減が可能となるためである<sup>(1)</sup>。以上より、サーボモータのさらなる小形高出力化のためには、より強力な永久磁石材料や界磁構造の登場が望まれる。

現代社会のためにモータは不可欠なものである。現在、日本の電力使用料の半分以上がモータで消費されており<sup>(2)(3)</sup>、省エネ、CO<sub>2</sub>削減技術として今も盛んにモータの高効率化のための研究開発が行われている<sup>(2)</sup>。近年、ハイブリッドカー（HEV）、電気自動車（EV）等これまで内燃エンジンが用いられてきた自動車の駆動用途にまで応用が広がっており、そこでは小形高出力化に加えて広範囲な駆動領域と高効率化が要求されている<sup>(4)</sup>。

また、低炭素社会を実現するための日本が誇る省エネ法の制度として、トップランナー制度がある。トップランナー制度とは、法令で指定する特定機器において、最も優れている機器を標準性能と位置づけし、その機器以上の性能に更新していくことを義務付けた制度である<sup>(5)</sup>。2011年8月、欧州委員会は自動車業界に対して、CO<sub>2</sub>排出量削減を評価する法案を採択した<sup>(5)</sup>。2017年8月、中国当局はEVやHEVの普及拡大の一環として、自動車メーカーに対してゼロエミッション車または低排出ガス車の売上げのノルマを設定する計画を発表した<sup>(6)</sup>。これらの法案は内燃エンジンからモータへのシフトを加速し、モータの小形高出力広範囲高効率駆動化を推進すべき背景を示す一例である。

### 1. 2. 2 モータ開発の歴史と近況

本研究の背景を理解するため、小形高出力化と広範囲高効率駆動化の観点からモータ開発の歴史を振り返ってみよう。モータの最初は、電磁石により鉄片が強力に引き付けられる現象、いわゆる磁気吸引力を利用してロータ鉄片を一定角度のステップずつ回転させるという単純な考え方からスタートしている。この励磁

コイルの切替えを順次に行うことから自動的に行う発明がなされ（整流子装置）、現在のブラシ付き直流モータの原型となった。また、整流子装置を半導体スイッチに置き換えてインバータ駆動装置が誕生した(7)。

現在の永久磁石同期モータに至る歴史については、文献(8)が詳しく、その一部を引用する。

巻線界磁同期機は 1870 年頃に出現する。外側からスリップリングを介して直流給電される電磁石からなるロータが、三相交流が給電されるステータの三相巻線に発生する回転磁界に同期して回転する構造が確立された。ロータの電磁石を永久磁石に替える試みは、1930 年代のアルニコ磁石の発明に遡る。その後、フェライト磁石、希土類磁石などの開発と共に、電磁石に替えてロータに永久磁石を用いる永久磁石同期モータが広く普及するようになった。

以下、小形高出力モータ、特に小形高出力同期モータの広範囲高効率駆動化に関する技術について復習する。同期モータの回転速度制御は、極数変換法と周波数制御法の 2 種類に限られる(2)。極数変換法はステータコイルの接続を替えることで極数を変化させる。モータ自体や切替機構にコストがかかる上、段階的な回転速度制御しかできないため、大形機以外ではほとんど採用されない。周波数制御法はインバータなどの可変周波数電源によって行われる。同期モータの電源周波数を調整することで回転磁界の速度を変化させる。現在ではこの方法が一般的である。

巻線界磁式同期モータにおいて、横軸を界磁電流、縦軸を電機子電流にして一定の負荷トルクでグラフを描くと V 曲線となる（1. 2. 3 節で詳述）。電圧と駆動周波数を一定とした場合、界磁電流を調整することで遅れ力率運転から進み力率運転まで自由に調整でき、力率 1 で運転することもできる。負荷トルクが変化しても最適な界磁電流にすれば、力率 1 で運転することも効率最大状態で運転することも容易である。

永久磁石同期モータは界磁起磁力が一定のため、回転数の上昇と共に増大する電源電圧が必要となる（ $V/f$  制御）。それを実現する方法としてチョップ制御が実用化された。降圧チョップ制御に昇圧チョップ制御が加わり、より広範囲の電源電圧を得ることが可能となった。半導体スイッチング素子の発達とともにパルス幅変調（PWM）制御が発達し、サイリスタ位相角制御等による連続的な電源電圧制御や、パルス振幅変調（PAM）制御も発達した。より大電力高電圧までの要求に対しては、多数のタップを備えた変圧器の先に整流回路を設けたタップ制御を基に、半導体スイッチング素子を用いた静止レオナード方式によって、直流可変電圧電源が達成された。個々の技術の詳細内容については、文献(9)が詳しい。

交流モータの駆動にはインバータの利用が一般的である。インバータは周波数制御機能を備えており、その登場以降回転数の上昇に応じて電圧を増加させる可変電圧可変周波数（VVVF）が一般的となった。擬似正弦波出力インバータでは、一般に PWM 制御でデューティ比を連続的に変化させることで擬似的に正弦波をつくり出す。スイッチング周波数を高くするほど滑らかな正弦波に近づけること

ができる<sup>(2)</sup>。周波数を変えることでモータの可変速運転を達成し、デューティ比を変化させ出力電圧を変化させることで、高効率となる位相角に近づけることができる。

モータの回転速度が上昇していくと、やがて擬似正弦波駆動の出力電圧が準備された電源電圧の最大値に達する。その回転速度を基底回転速度と呼び、永久磁石トルクが最大となる電流位相角による駆動（ $q$  軸駆動）では、これ以上の回転速度では最大出力を発揮できなくなる。永久磁石同期モータが理想的なベクトル制御の下に駆動されると仮定した場合、リラクタンストルクも考慮した最大トルク制御で駆動できる最大回転速度が基底回転速度となる。過変調 PWM 駆動や矩形波駆動は、擬似正弦波電圧を矩形波に近づけることで基本波電圧を 1, 2 割増大させ、基底回転速度を高める技術である。これらは、広範囲駆動化を図る技術として、EV モータに用いられている<sup>(10)</sup>。

最大回転速度の広範囲駆動化を図る技術として、より一般的には、基底回転速度以上の回転速度には弱め磁束制御が用いられる<sup>(11)</sup>。ベクトル制御は 1968 年頃 Hasse 氏および Blaschke 氏によって提案された<sup>(12)(13)</sup>が、パワートランジスタなどによる理想的な半導体電力変換装置が出現し、マイクロエレクトロニクスの進歩で、安価に大量の高速演算処理ができるようになった 1980 年代に入って、初めて本格的な実用期を迎えた。その技術がインバータに用いられ現在に至っている<sup>(12)</sup>。

同期モータのベクトル制御に関する歴史については、文献<sup>(13)</sup>が詳しく、その概要を引用する。

1979 年元吉氏らによって、界磁電流と電機子電流から主磁束を演算するベクトル制御法の適用例が報告されている。1983 年赤木氏らは、ダンパ巻線を持たない同期モータに対し、フィードフォワード制御により、過渡時にも常にベクトル制御を成立させる方式を提案している。また 1987 年大沢氏らは、ベクトル制御の 2500kW 大容量同期モータへの適用および無整流子モータへの応用法について報告している。さらに 1990 年、杉本氏らは励磁成分電流とトルク成分電流に対し、非干渉制御法を適用しその制御性を向上させている。

弱め磁束制御に限らず永久磁石同期モータのベクトル制御では、ロータの永久磁石の N 極の向きに  $d$  軸を定め、これより  $\pi/2$  進んだ方向に  $q$  軸をとる。この  $d$  軸方向を基準に電流位相角を操作することがベクトル制御の肝要である。前述の過変調 PWM 駆動や矩形波駆動が、最大出力発生可能回転速度を 2 割程度増大させる効果があるのに対し、弱め磁束制御は最大出力発生可能回転速度を基底回転速度の数倍にも増大できる。そのためにロータの位置（ $d$  軸位置）を把握するためのセンサ機能が必要となり、その達成手段として、センサ付きベクトル制御とセンサレスベクトル制御の 2 つの方式がある。ロータの位置を把握する精度に関してはセンサ付きベクトル制御が優れており、基底回転速度以上の最大出力可変速範囲をより広くするためには、センサ付きベクトル制御の適用が望ましい。

永久磁石同期モータでは基底回転速度以上の回転速度でのモータ誘起電圧を打



ち消すために、弱め磁束電流を流す弱め磁束制御が一般的に用いられている。しかし、この方法は、駆動トルクに寄与しない電流を流すために、モータの効率が低下する問題がある。

現在の HEV や EV は、モータの弱め磁束領域を少なくすることを目的として、車載バッテリーモジュールを多数直列接続することや昇圧回路を設けることによって、モータ電圧を高めることが一般に行われている<sup>(14)</sup>。

一方、2010 年頃現在までから、従来永久磁石モータの損失が大きかった電氣的弱め磁束制御の代わりに、広範囲高効率駆動の観点から、有効磁束を可変することができる可変界磁技術が注目されている<sup>(15)</sup>。文献(3)、(15)に定数可変モータや可変界磁モータとして詳しく説明されているが、文献(3)によれば、それらは以下のように分類されている。図 1.3 はそれら報告例を列挙したものである。

- 1) 電機子巻線の巻線数を可変するもの  
「巻線切替モータ」<sup>(16)</sup>
- 2) ロータに装着した永久磁石の磁化を可変するもの  
「可変磁力メモリモータ」<sup>(17)</sup>
- 3) 分割永久磁石ロータの相対位置をずらして総合磁束を可変するもの  
「可変磁束モータ」<sup>(18)</sup>、「可変界磁モータ」<sup>(19)</sup><sup>(20)</sup>
- 4) 漏れ磁束を受動的に変化させてステータ鎖交磁束を可変するもの  
「漏れ磁束制御型可変特性モータ」<sup>(21)</sup>
- 5) 永久磁石界磁と巻線界磁のハイブリッド励磁  
「巻線界磁式クローポールモータ」<sup>(22)</sup>、「半波整流ブラシなし同期モータ」<sup>(23)</sup>、  
「ハイブリッド界磁モータ」<sup>(24)</sup>

著者らが提案する永久磁石可変界磁モータは、上記分類の 3) に相当する。研究の目的とする小形高出力化に、前節で説明したような強力な永久磁石材料の使用は欠かせない。そのため、著者らは、界磁電流を利用するものや永久磁石自体の磁力を弱めるものを除外して、永久磁石可変界磁モータの新構造について検討を始めた。希土類永久磁石を用いた永久磁石可変界磁モータの歴史は浅い。試作検討を開始した 2004 年当時、実用化された製品はもちろん皆無で、試作評価を報告した永久磁石可変界磁モータの先駆としても文献(18)等を見るのみであった。それ等にしても研究のための頑丈で重い形態であり、実用的な小形高出力なものではなかった。

現在この方面の開発には多くの機関が携わっている。しかしながら、小形高出力広範囲高効率駆動の観点の優位性から、2011 年より一貫して提案してきた本研究の構造<sup>(37)</sup>について、未だ参考にできるものは少ないと考えている。

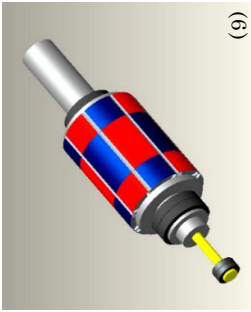

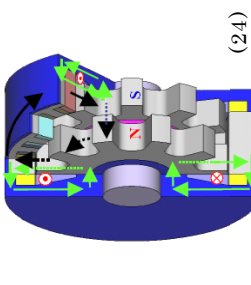

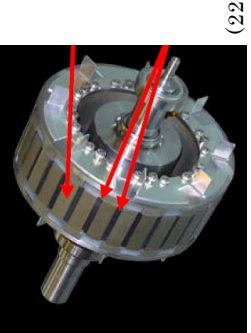
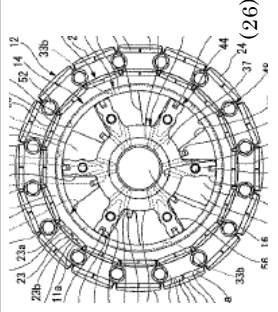
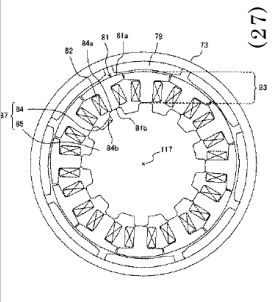
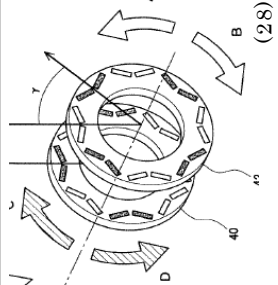
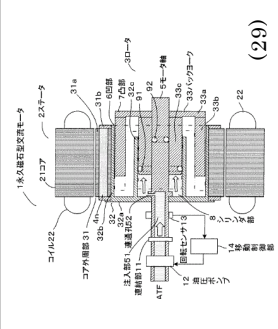
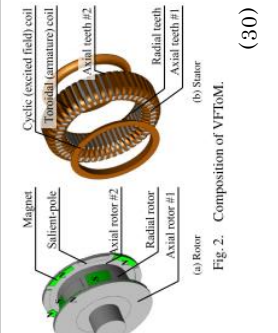
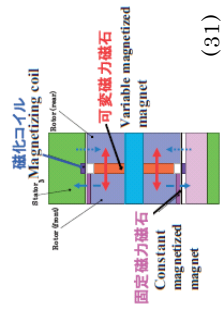
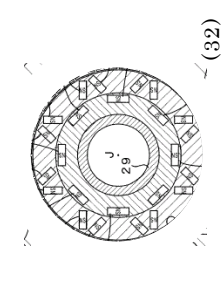
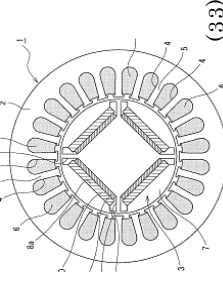
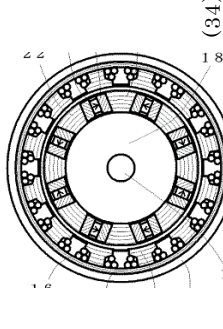
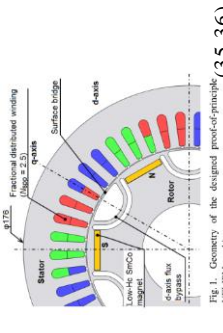
安川電機:磁石位置	 <p>(9)</p>	東芝:可変磁力磁石	 <p>(17)</p>	名工大:巻線界磁	 <p>(24)</p>	ミツバ:ロータ可動	 <p>(25)</p>	三菱:巻線界磁	 <p>(22)</p>
ホンダ:磁石位置	 <p>(26)</p>	ヤマハ:磁路可変	 <p>(27)</p>	トヨタ:磁石位置	 <p>(28)</p>	ダイハツ:磁性体位置	 <p>(29)</p>	トヨタ:巻線界磁	 <p>(30)</p>
東洋大: 可変磁力磁石	 <p>(31)</p>	エクオス・リサーチ: 補極	 <p>(32)</p>	富士電機: 巻線界磁	 <p>(33)</p>	クラ技術研究所: 巻線切替	 <p>(34)</p>	日産自動車: 強め界磁・漏れ磁束	 <p>(35,36)</p>

図 1.3 可変界磁モータの事例

### 1. 2. 3 同期モータのV曲線

今日、永久磁石同期モータは、あらゆる産業機器に小形高出力高効率モータとして受け入れられている。本項では、それ以前の同期モータの状況について説明する。

図 1.4 は巻線界磁式同期モータ(株式会社精工社製作所製 2.2kW)の例である。回転界磁形のためロータの外側に電機子巻線が配置され、ロータはスリップリングを介して界磁電流が通電される電磁石となっている。可変抵抗器 ( $R_f$ ) を調整することで、電磁石の磁力を自由に調整できる「可変界磁モータ」である。

巻線界磁式同期モータでよく知られている特性として図 1.5 に示す V 曲線がある。一定の出力状態において、効率が最大となる最適な界磁の強さがあり、効率は力率に大きく影響を受ける<sup>(38)</sup>。つまり、力率 1 に調整することは効率を最大にすることと同等に考えられていた。

図 1.6 に界磁の強さに対するベクトル図を示す。一定回転速度で回転するモータにとって、界磁電流を調整することは誘起電圧  $\dot{E}_0$  を調整することである。同図 (a) に示すように、巻線界磁式同期モータは印加された電源電圧  $\dot{V}$  に対し、界磁電流を調整することで誘起電圧  $\dot{E}_0$  を調整し、電源電圧の大小に係わらず V 曲線の最大効率状態を実現できる利点があった。つまり、世界各国や使用者の電源事情に対し融通性に優れていた。また、同図 (b) や (c) に示すように、誘起電圧が電源電圧に不足したり過剰な状態では、遅れ電流や進み電流が自動的に生じて界磁を増減することで、モータ端子電圧を電源電圧に一致させる機能を有していた。

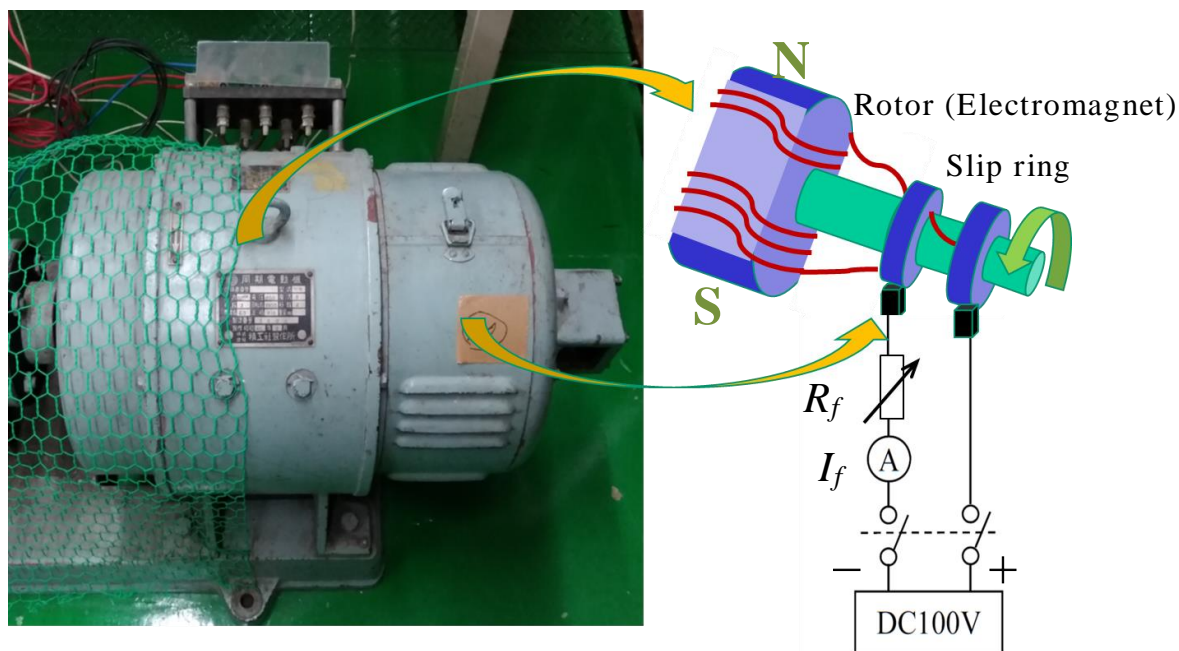
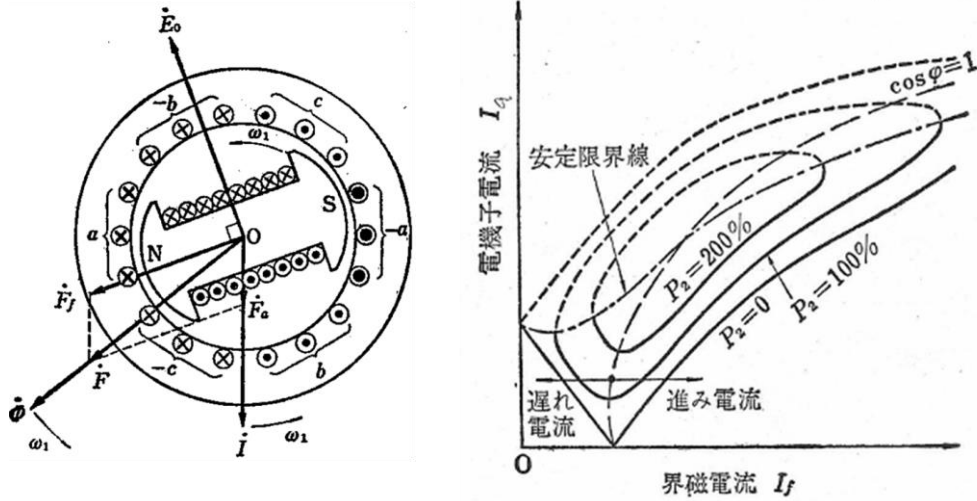


図 1.4 巻線界磁式同期モータ



(b)  $I_f$ と $I$ との関係(飽和の影響)

図 1.5 同期モータの V 曲線 (野中作太郎著,「電気機器 I」,p.286, 森北出版社)

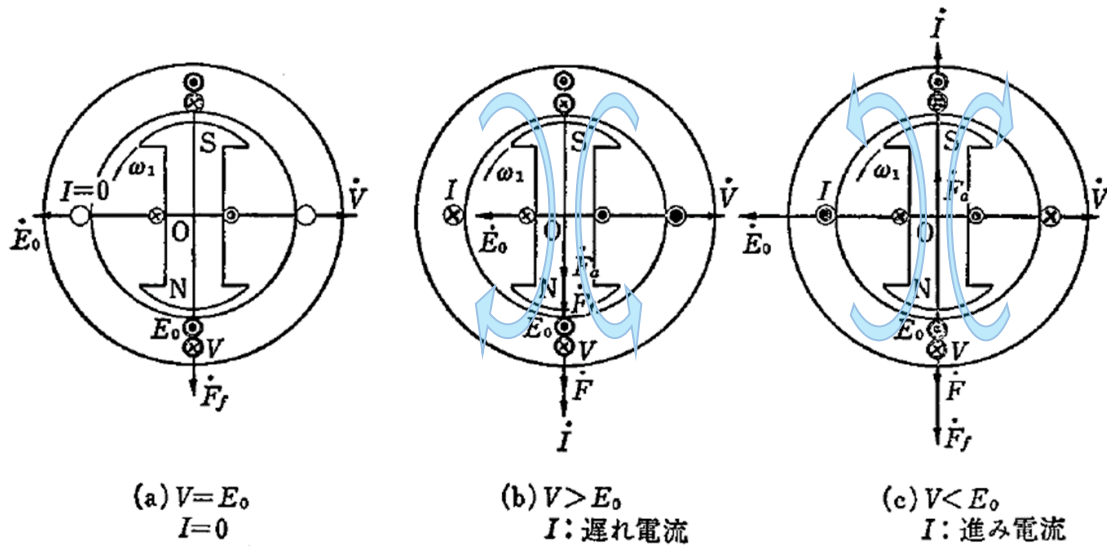


図 1.6 同期モータの無負荷の場合のベクトル図 (同 p.286)

## 1. 3 目的

### 1. 3. 1 現状の問題点

図 1.7 は、図 1.4 で紹介した巻線界磁式同期モータとネオジウム-鉄-ボロン系永久磁石が使われている最新の永久磁石サーボモータのサイズ比較の例である。モータのトルクの大きさは概略モータの体格に拠るものであるが、永久磁石サーボモータの定格トルクが約 1.5 倍大きいにも係わらず、体格（容積）は 1/6 程度に小形化されている。

小形で高出力な永久磁石同期モータを高速回転で駆動する場合、前述のように、基底回転速度以上の回転速度のモータ誘起電圧を打ち消すために、弱め磁束電流を流す弱め磁束制御が一般的に用いられる。しかし、この方法は、駆動トルクに寄与しない電流を流すために、モータの効率が低下する問題がある。また、弱め磁束領域を少なくすることを目的として、車載バッテリーモジュールを多数直列接続することや昇圧回路でモータ電圧を高めることは、モータの耐圧を見直すことも含めコスト増大を避けられない。しかも、モータ電圧を高め得る範囲は限定的である。

### 1. 3. 2 研究の目的と課題

EV モータを想定し、強力な永久磁石同期モータであって、効率が最大となる最適な界磁の強さに調整可能な可変界磁機能をもつ永久磁石可変界磁モータを提案し、モータの小形高出力広範囲高効率駆動を実現することを本研究の目的とした。そのための課題としては、以下を設定した。

(1) 可変界磁モータは界磁の大きさを可変できるモータであるため、界磁を従来の鉄損量の制限なく装荷することが可能となる。より大きな磁気装荷によりモータはより高出力化が可能となる。可変界磁化は小形高出力化に反するものではない。両立でもなく、促進できることを永久磁石可変界磁モータの試作と評価をもって実証することを目指した。

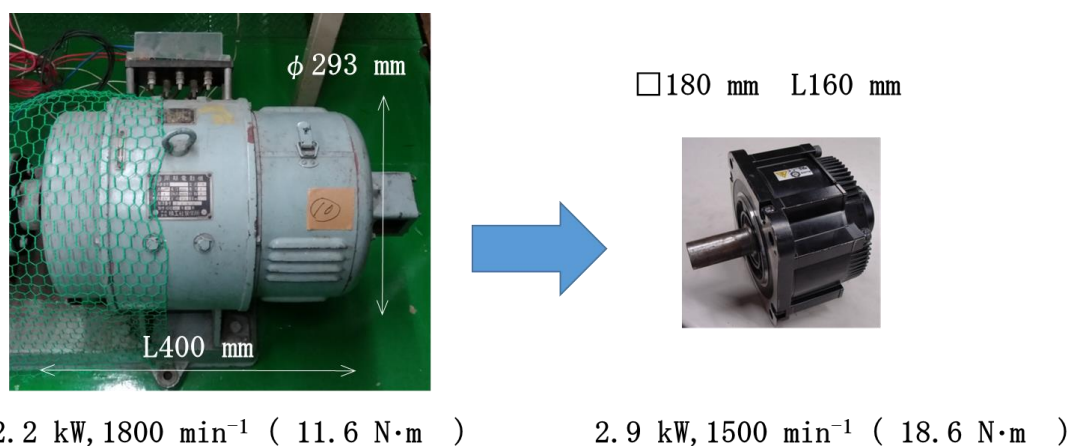


図 1.7 巻線界磁同期モータと永久磁石同期モータのサイズ比較

(2) インバータの容量制限の下で最適なモータを選ぶという話を聞く機会があるが、本筋ではないと考える。モータのポテンシャルに合ったインバータを準備することが本筋である。よって、モータのポテンシャルをフルに発揮できるインバータを準備した上で、モータが発生できる最大出力と最大回転速度の確認、そして理論と実測の一致を目指した。

(3) 可変界磁モータに関する従来文献の中には、「低速大トルク駆動時に高磁化し、高速駆動時には低磁化化する」等の記述が見られる<sup>(39)(40)(41)</sup>が、誤解を招き易いため、訂正されるべき文言である。つまり、電圧飽和を避けるために回転速度の上昇と共に界磁を弱めるのではない。弱めれば最大出力は低下する。電圧飽和をした回転速度以上の範囲で最大出力を得るためには、最大界磁のまま電流位相角を進め、弱め磁束制御によって鎖交磁束を減じる必要がある<sup>(42)</sup>。基底回転速度以上の回転速度でかつ最大出力以下の中間出力状態において、低出力であるほど界磁を弱めることで、より高効率の駆動状態が得られるのである。また、表面磁石同期モータ (SPM モータ) が基底回転速度以上の高速回転駆動に不適であるとの説がある<sup>(11)(8)</sup>が、正確なベクトル制御特に弱め磁束制御をなし得るインバータを用いる前提を考慮すれば、訂正されるべき文言である。同条件において、モータの最大回転速度を制限するものは電磁的にはなく、ロータの耐遠心力破壊強度で決定される。これらの理論と検証を目指した。

(4) インバータ開発は絶大な成果を上げてきたが、モータ開発において、電磁機械の設計はないがしろにされた感がある。永久磁石という強力な磁気装荷部品を用いて、可変界磁機能を達成するためには、新しい機構を生み出す機械設計的試みが要求される。その実現を目指した。

(5) 界磁の強さを正確に調整するアクチュエータは、広範囲高効率駆動を実現する永久磁石可変界磁モータには必要なものであったが、アクチュエータにかかる費用と搭載スペースが増大する欠点もあった。このためモータの駆動状態に応じて、界磁の強さがおのずから変化するような永久磁石可変界磁モータが望まれている。その実現を目指した。

#### 1. 4 本論の概要

本論文は、次世代を担う小形高出力広範囲高効率駆動化技術として、永久磁石可変界磁モータについて論じる。加えて、永久磁石可変界磁モータの研究に付随し開発した小形高出力広範囲高効率駆動化に貢献する個々の技術についても説明する。図 1.8 に、本論各章の構成を示す。

第 1 章では、研究の目的を述べ、本論文の概要の説明とともに本研究の位置付けについて言及した。永久磁石可変界磁モータに至るモータ開発の背景と現在の問題点を示し、本論文の目的と各章の概要を示した。

第 2 章では、小形で効率が良い埋込磁石同期モータ (IPM モータ) をベースに、様々な構造の永久磁石可変界磁モータを検討した。特に、界磁を弱めた状態において鉄損がより減少する構造を模索し、方向性としては、界磁を弱めた状態においてロータから出てゆく磁束自体が減少するような構造を検討した。その結果より、提案する 2 種類の新構造永久磁石可変界磁モータのしくみを考案し、本構造に至る研究の経緯を説明した。

第 3 章では、永久磁石可変界磁モータの研究に付随して生まれ、次章で説明する具体的な設計や試作に用いられた新技術として、「磁束集中 IPM モータ」、「加圧成形コイル」と「高強度鋼板ロータコア」について論じた。永久磁石可変界磁モータは界磁を自由に調整することが可能であることから、従来よりも大きな界磁を設定することが可能となる。永久磁石可変界磁モータを広範囲高効率化のみならずより小形高出力化する技術として「磁束集中 IPM モータ」を開発した。従来の永久磁石同期モータをより高出力化することは、各回転速度においてより高トルク化するということである。従来と同じ電磁部サイズで高トルク化するには磁気回路の磁路強化が必要となり、ステータコイルの占有スペースが圧迫される。コイルの占有スペースを縮小したにも係わらず、コイルの導体断面積を拡大する技術として「加圧成形コイル」を開発した。さらに、従来の電磁鋼板を用いたロータの耐遠心力を強化し、約 2 倍の高速回転化をなし得る技術として、「高強度鋼板ロータコア」を開発した。

第 4 章では、永久磁石可変界磁モータの広範囲高効率駆動について検討した結果を述べた。広い可変速範囲のそれぞれの回転速度において、界磁の強さや電流位相角をどのような値にすれば最大出力制御が達成できるのか、また、それぞれの出力状態において、界磁の強さや電流位相角をどのような値にすれば最大効率制御が達成できるのかを明らかにした。さらに、検討結果を確認するため、試験用永久磁石可変界磁モータを試作し、広範囲駆動に対する効率評価を行った。効率評価は、最大回転速度  $22000 \text{ min}^{-1}$ 、最大出力  $10\text{kW}$  の範囲内で行われ、固定界磁に対して最大 20% 以上の効率向上を確認し、検討結果を実証できた。

第 5 章では、EV 用  $52\text{kW}$  永久磁石可変界磁モータとして、可変機構付永久磁石可変界磁モータの設計と試作を行い、その基本特性について評価した。さらに、ベクトル制御における電流位相角をより広範囲に制御し、同時に界磁を調整する方法としてマップ制御を行い、その動作結果を検証した。永久磁石可変界磁モータ

タは界磁が変化すると誘起電圧定数やトルク定数などのモータ定数が変化するため、固定界磁モータを駆動するための従来インバータではベクトル制御の位相角を広範囲に制御できず、モータを駆動することができない。また、インバータには界磁を調整する機能がない。そのため、モータの駆動状態に合わせて界磁とインバータの指令が適切に制御される永久磁石可変界磁モータ駆動システムを開発した。

第6章では、界磁の強さがおのずから変化するような永久磁石可変界磁モータについて論じた。界磁の強さを正確に調整する可変機構は、広範囲高効率駆動を実現する永久磁石可変界磁モータには必要なものであったが、可変機構にかかる費用と搭載スペースが増大する欠点もあった。モータの駆動状態に応じて、界磁の強さがおのずから変化するような永久磁石可変界磁モータとして、筆者等は可変機構を有しない小形で低コストな簡易可変界磁モータを考案した。このモータでは、負荷トルクに応じて界磁の強さが、おのずから変化する。この簡易可変界磁モータは、外部からの機械的な可変機構を有しないだけでなく、電気的な操作も必要としないため、従来の永久磁石モータ用インバータのみで駆動できる。従来モータと同サイズで製作した試作機の構造と効率評価について説明した。

第7章では、以上得られた知見より結論を総括した。



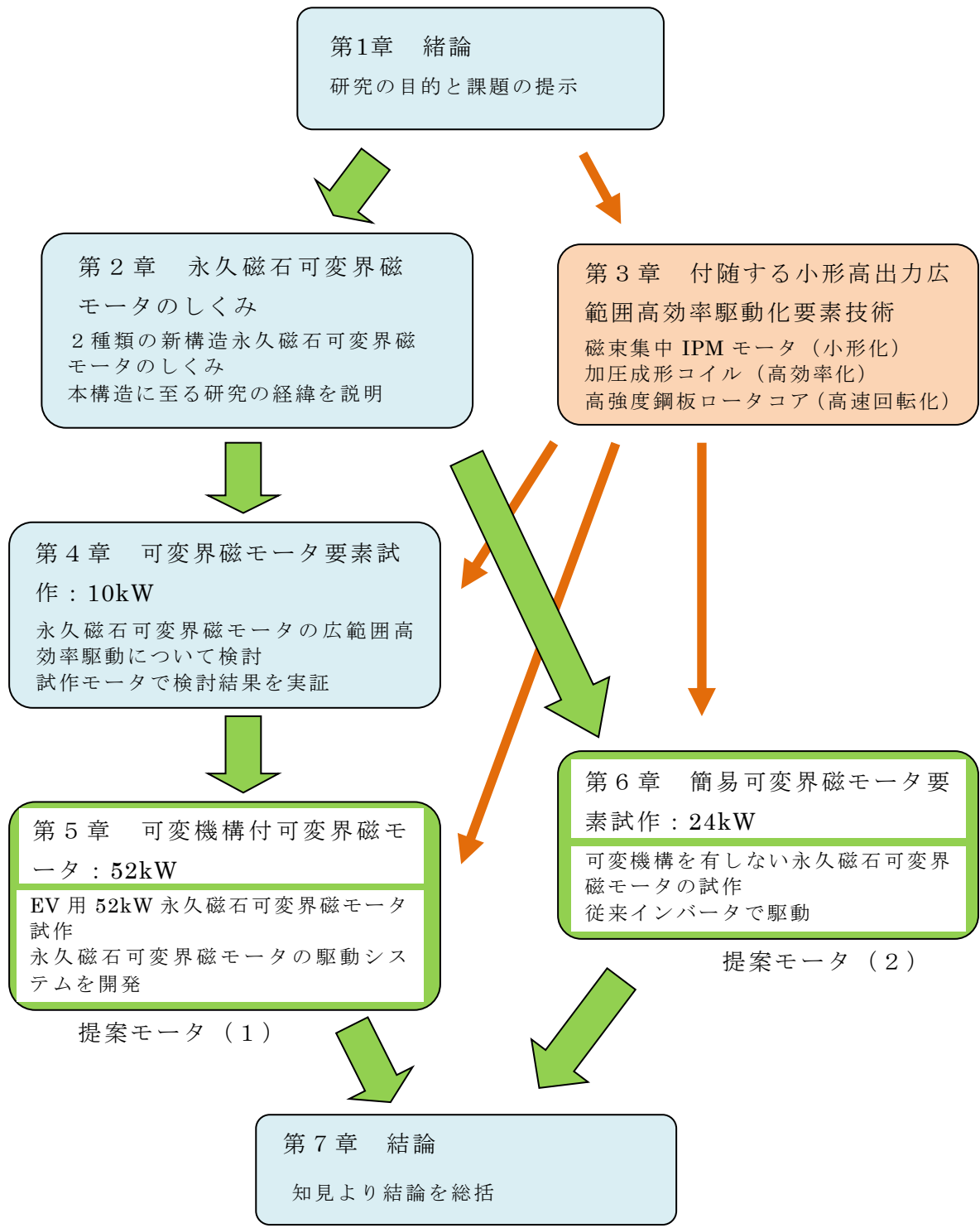


図 1.8 本論各章の構成

## 第2章 永久磁石可変界磁モータのしくみ

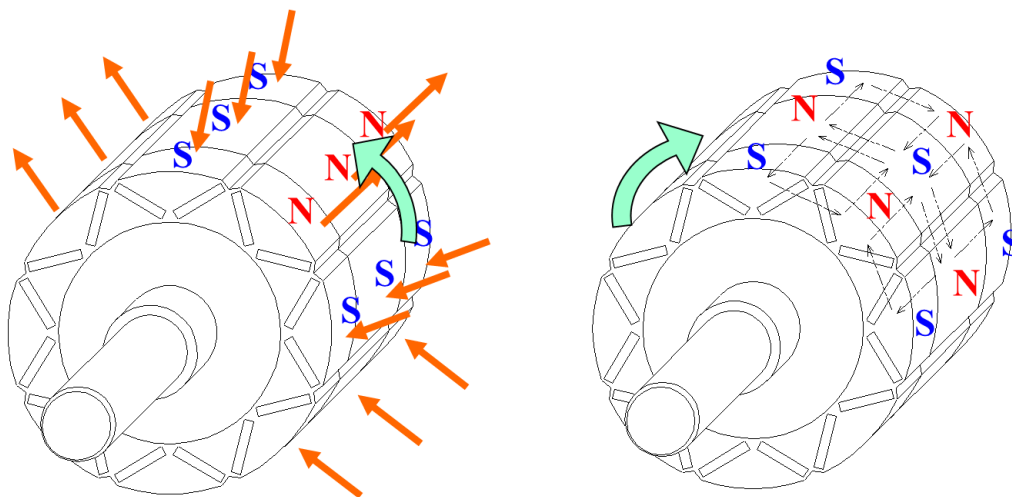
小形で効率が良い IPM モータをベースに、様々な構造の永久磁石可変界磁モータを検討した。特に、界磁を弱めた状態において鉄損がより減少する構造を模索し、方向性としては、界磁を弱めた状態においてロータから出てゆく磁束自体が減少するような構造を検討した。その結果より、提案する2種類の新構造永久磁石可変界磁モータを考案した。本章では、その2種類の永久磁石可変界磁モータのしくみを説明し、その構造に至る研究の経緯を説明する。

### 2.1 可変機構付可変界磁モータ

永久磁石をV字に配置したロータの磁極を軸方向に3分割し、両側の磁極はシャフトに固定し、中央の磁極が両側の磁極に対しシャフト上を回転する構造を考案した<sup>(37)(43)</sup>。

中央の磁極と両側の磁極の回転方向に対する相対的な電気角を相対角と呼ぶことにすれば、相対角が $0^\circ$ のとき中央の磁極と両側の磁極のN極やS極が軸方向に一直線上に並び、界磁の強さが最大となる。

図2.1(a)は、相対角 $0^\circ$ 状態における磁束の説明図である。また同図(b)は、相対角 $180^\circ$ 状態における磁束の説明図である。(a)に示すように、ロータから出入りするN極とS極の磁束の多くは、ステータコアを通過しステータコイルに鎖交する。(a)の最大界磁状態より相対角が大きくなるに従い、ステータコイルに鎖交するN極とS極の磁束が相殺し合って誘起電圧は減少する。(b)に示す相対角 $180^\circ$ 状態においては、N極とS極の磁束が相殺し合って誘起電圧は0となる。



(a) Rotor at  $0^\circ$  relative rotation angle (b) Rotor at  $180^\circ$  relative rotation angle

図 2.1 軸方向分割構造

永久磁石を V 字に配置した IPM モータでは、ロータ内において異なる磁極が軸方向に揃うことで、永久磁石から発した磁束がロータ内で軸方向に短絡し、その分ロータから出てゆく磁束自体が減少する。ステータコアを通過する磁束が減少するため、ステータコアに発生する鉄損を低減することができる。

界磁を可変するために高速で回転しているロータは、中央の磁極を相対的に回転させる必要がある。そのため、それを実現する可変界磁機構とアクチュエータが必要となる。その詳細は 5 章で説明する。

## 2. 2 簡易可変界磁モータ

界磁の強さを正確に調整するアクチュエータは、広範囲高効率駆動を実現する可変界磁モータには必要なものであったが、アクチュエータにかかる費用と搭載スペースが増大する欠点もあった。そのため、筆者等はアクチュエータを有しない小形で低コストな簡易可変界磁モータを考案した<sup>(44)</sup>。モータにかかる負荷トルクに応じて界磁の強さは、おのずから変化する。

簡易可変界磁モータは、負荷トルクを利用して界磁が変化するため、負荷トルクが界磁可変構造の移動部に作用しやすい構造を検討した。その上で、界磁を弱めた状態において鉄損がより減少する構造を模索し、界磁を弱めた状態においてロータから出ていく磁束自体が減少するような構造を検討した。

その結果として、図 2.2 に示すように、ロータを径方向に 2 分割しそれぞれに永久磁石を配置して、外側の磁極部が内側のシャフトに対し相対的に回転する構造とした。シャフトの外側には磁極と同じ 10 極の永久磁石が磁極を径方向に向けてリング状に装着されている。外側の磁極部には磁極と同じ数の永久磁石が磁極を周方向に向けて放射状に装着されている。

外側の磁極部が内側のシャフトに対し相対的に回転する電気角を相対角と呼ぶことにすれば、図に示した負荷トルクがない状態では、相対角が  $0^\circ$  となり最小界磁状態となる。永久磁石同士が吸引した位置となり永久磁石から発した磁束がロータ内で径方向に短絡し、その分ロータから出てゆく磁束自体が減少する。この状態ではステータコアを通過する磁束が減少し、ステータコアに発生する鉄損を低減することができる。

負荷トルクが増大すると、図 2.3 に示すように永久磁石同士の吸引による戻しトルクと負荷トルクが釣り合うまで相対角は増大し、ついには図 2.4 に示すように、相対角が  $180^\circ$  となり最大界磁状態となる。

相対角は負荷トルクに応じて、増大するように設計する。負荷トルクに最低限必要な界磁の強さに調整すれば、鉄損は最小限に留められて効率を向上できる。実際の製作では、相対角が無制限に増大しないように、相対的に回転は機械的に制限される必要がある。理想的には、電磁的な永久磁石の戻しトルクの調整に加え、戻しばね等の機械的な戻しトルクの調整を加えて検討すれば、負荷トルクに応じた最適な界磁の強さが実現でき、効率の良い簡易可変界磁モータが実現できると考える。

モータにかかる負荷トルクに応じて、おのずから界磁の強さを変化する永久磁石簡易可変界磁モータの詳細は 6 章で説明する。

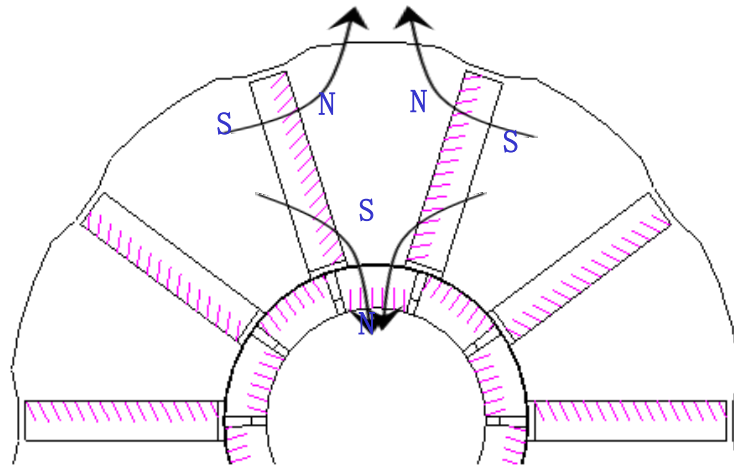


図 2.2 無負荷状態のロータ ( 相対角  $0^\circ$  )

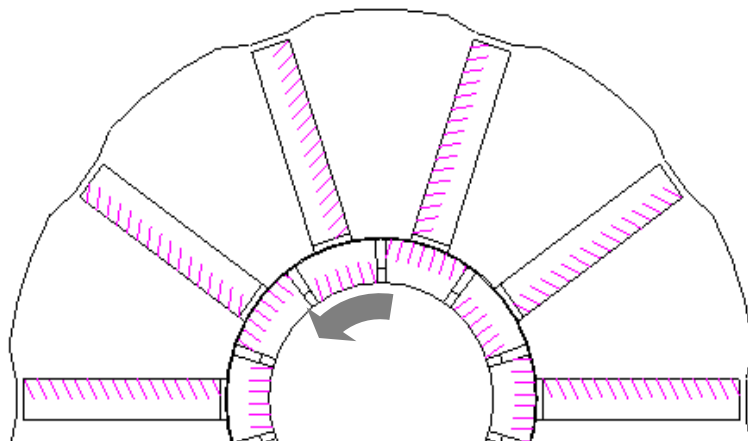


図 2.3 負荷が増大する状態のロータ

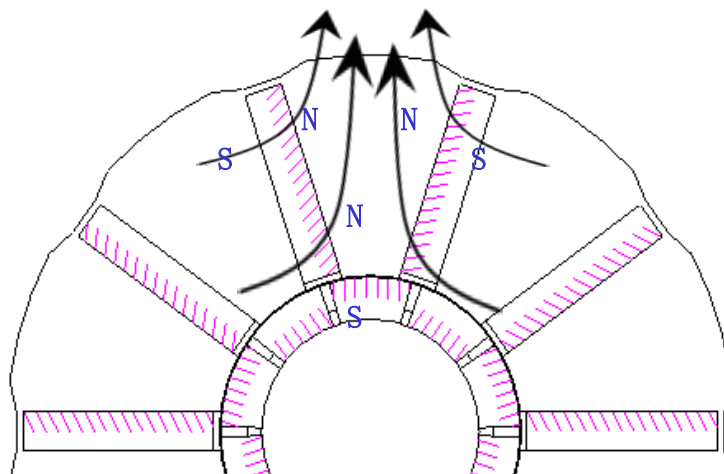


図 2.4 最大負荷状態のロータ ( 相対角  $180^\circ$  )

## 2. 3 永久磁石可変界磁モータ構造の研究経緯

### 2. 3. 1 目的

同期モータはかつて巻線界磁式の可変界磁モータが主流で、その後、小形高出力化のために永久磁石式に代替されてきた。次世代を担う小形高出力広範囲高効率駆動化技術として、界磁の強さを変化できる永久磁石可変界磁モータを開発してきた。

特に、界磁を弱めた状態においてロータから出てゆく磁束自体が減少するような構造を検討した。多くのモータは基底回転速度以上の回転速度にも最大出力を発生可能であることを要求される。最大出力は界磁の大きさに決定されるため、基底回転速度以上の回転速度においても界磁を最大に保つ必要がある。特に基底回転速度以上の回転速度において、界磁は出力の低下に応じて減じられるべきであり、回転速度の増大に応じて減じられる方式は検討から除外した。

本節では、2. 1 節で説明した軸方向分割構造の可変界磁モータ構造に至った検討の経緯と評価結果について説明する。

### 2. 3. 2 永久磁石可変界磁モータの構造検討

界磁を弱めた状態においてロータから出てゆく磁束自体が減少するような様々な構造の可変界磁モータのアイデアを検討し、図 2.5 から図 2.7 に示す 3 つの構造に絞り込んだ。図 2.5 の構造 1 はギャップ長を変化させることで、ステータコアを通る磁束を変化させる。図中の制御シャフトを回すことで 12 個に分割されたステータコアが半径方向に同時に移動する仕組みを示している。この構造は、可変機構を固定側に設け得る利点がある<sup>(45)</sup>。図 2.6 の構造 2 は IPM モータの磁極を軸方向に 3 分割し、中央の磁極を両側に対し相対的に回転させて界磁を変化させる。図は界磁の最大状態と最小状態を示している。図 2.7 の構造 3 は SPM モータの磁石を半径方向に 2 層に分割し、シャフトに固定する外側の磁石に対し、内側の磁石を相対的に回転させて界磁を変化させる。図は内側と外側のリング磁石を並べて示している。構造 2 と構造 3 は界磁の強さを 0% 近くまで小さくできる利点があるが、回転する磁極を相対的に変化させなければならない課題がある。

構造 2 と構造 3 の違いは磁極を半径方向に分割するか軸方向に分割するかである。両者の優劣を判断するため、ロータのサイズ、極数、誘起電圧を合わせ、2 組の磁極を相対的に回転させるために必要なトルクを磁界解析により調べた。

図 2.8 はその結果であり、2 組の磁極の相対的な電氣的回転角において発生するトルクを比較している。0° は最大界磁となる同じ磁極が揃った状態を、180° は最小界磁となる異なる磁極が揃った状態を電氣角で示している。磁極をずらそうとするトルクを正トルクとすれば、構造 2 は磁極をずらそうとするトルクが発生し、構造 3 は磁極を揃えようとするトルクが発生することがわかる。そして、構造 2 がより小さなトルクで界磁を変化できることが確認できたため、構造 2 を選択し、構造 1 とともに試作評価を行った。

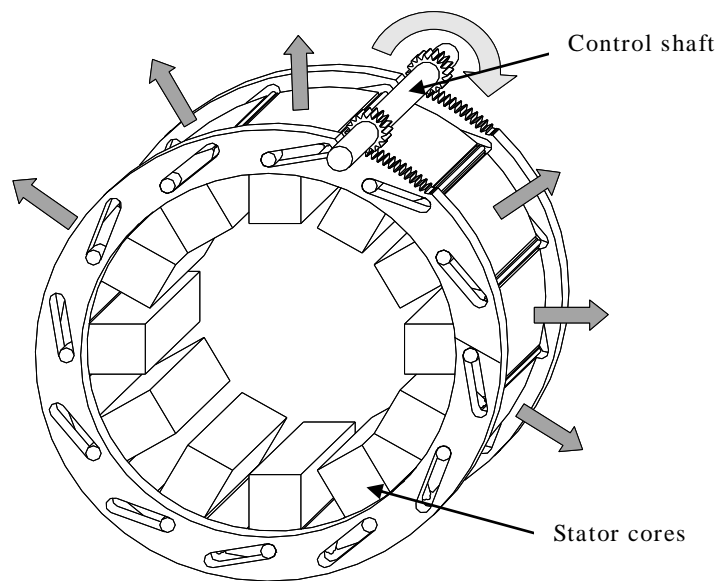


图 2.5 构造 1

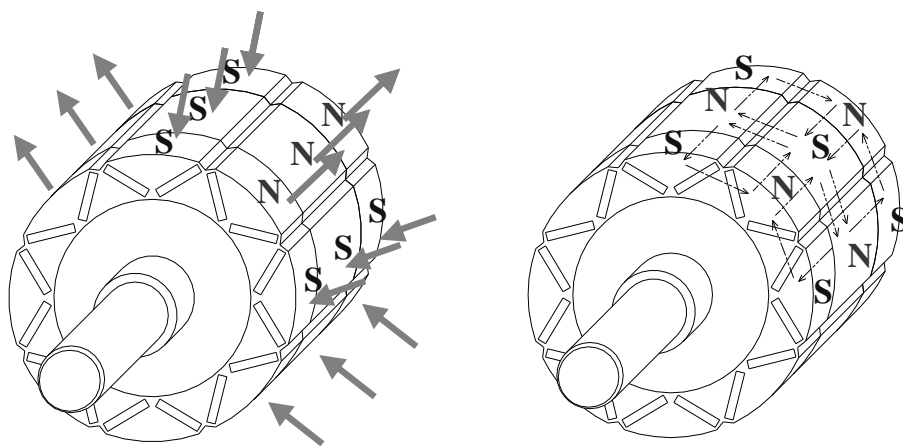


图 2.6 构造 2

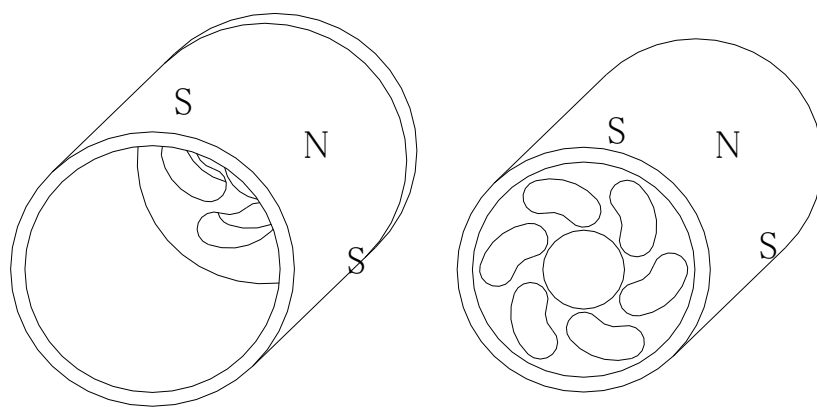


图 2.7 构造 3

### 2. 3. 3 試作モータと損失評価結果

試作モータの損失評価は図 2.9 に示す構造 1 の試作ステータと、図 2.10 に示す構造 2 の試作ロータを組み合わせて行った。試作ステータは制御シャフトを回すことにより、ギャップ長を 0.8 から 7.2mm まで変化できる。ギャップを大きくすれば損失は低減すると予想した。試作ロータは中央の磁極を 0 から 180° まで回転できる。角度を大きくすれば損失は低減すると予想した。

評価は外部からの駆動による損失比較により行った。図 2.11 は評価システムを示している。トルクメータを介して、試作モータを直流サーボモータで駆動し、駆動に要する回転速度毎のトルクをトルクメータで測定した。直流サーボモータの回転速度は、電圧を調整することで正確に調整し得る。このトルクメータは、回転速度を表示する機能を有するため、測定したトルクと回転速度から損失を計算した。損失は鉄損と機械損の合計であるが機械損は変化しないので、界磁の強さを変化させた場合の損失の違いは、鉄損の違いを示す結果となる。

図 2.12 はロータを最大界磁状態に保ったままギャップ長を 0.8 から 7.2mm まで変化させた場合 (0.8~7.2mm, 0°) と、ギャップ長を 0.8mm に保ったままロータの中央の磁極を 0 から 120° まで回転させた場合 (0.8mm, 0~120°) の損失

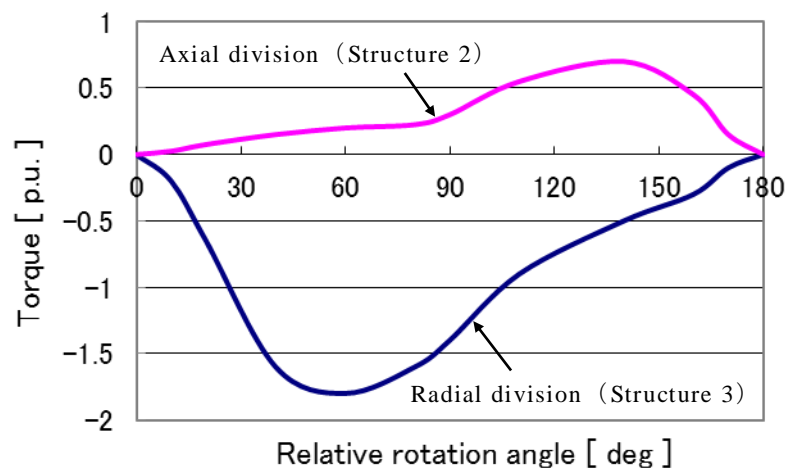


図 2.8 回転させるために必要なトルク (解析値)



図 2.9 構造 1 の試作ステータ



図 2.10 構造 2 の試作ロータ

の測定結果である。ギャップ長が  $0.8\text{mm}$  でロータの相対的な回転角を  $0^\circ$  とした最大界磁状態に対し，ロータを変化させて界磁を弱めた場合には予想したように損失は減少した。しかし，ステータを変化させて界磁を弱めた場合には予想に反して損失は増大した。この結果より，構造 2 の可変界磁モータが最も優れた構造であると判断した。

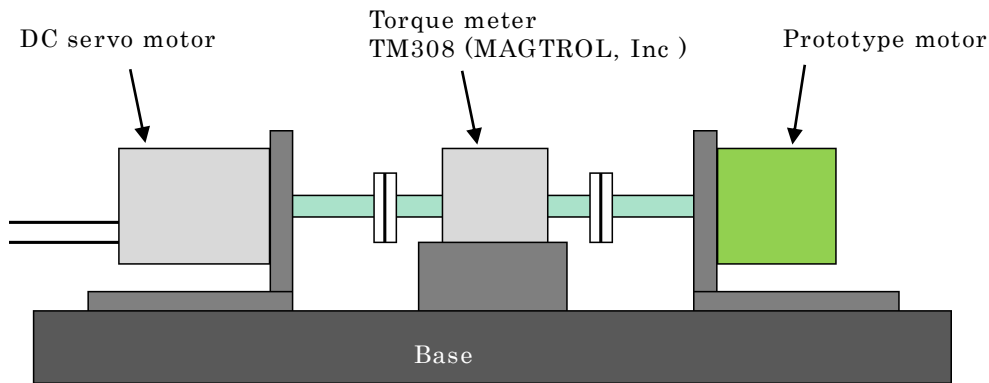


図 2.11 評価システム

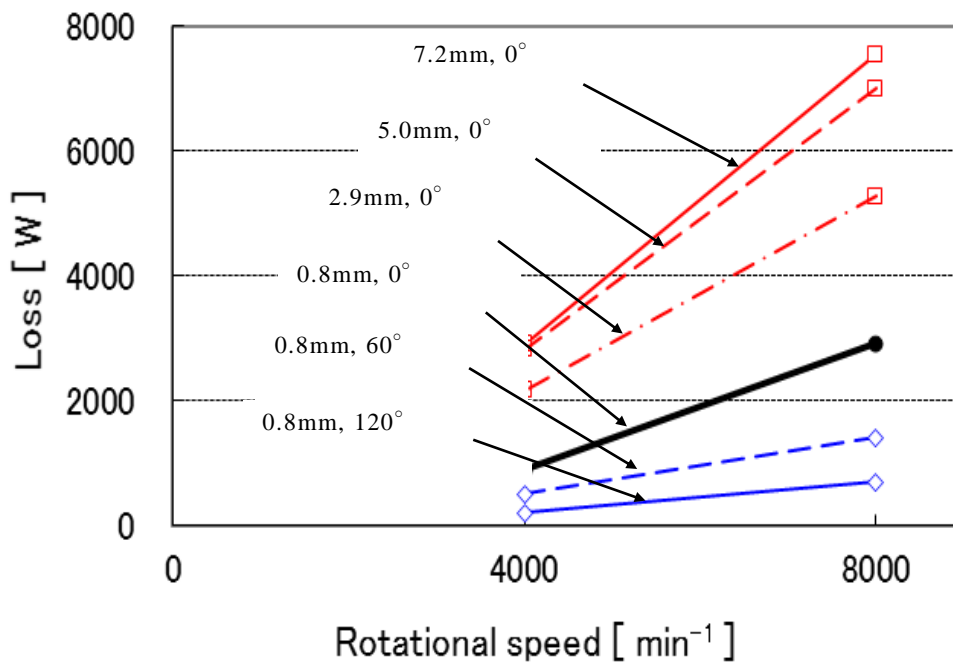


図 2.12 損失の測定結果



## 2. 4 まとめ

小形で効率が良い IPM モータをベースに、様々な構造の永久磁石可変界磁モータを検討した。特に、界磁を弱めた状態において鉄損がより減少する構造を模索し、方向性としては、界磁を弱めた状態においてロータから出てゆく磁束自体が減少するような構造を検討した。

その結果より、提案する 2 種類の新構造永久磁石可変界磁モータを考案した。2. 1 節では、可変機構付可変界磁モータのしくみを説明した。2. 2 節では、簡易可変界磁モータのしくみを説明した。2. 3 節では、永久磁石可変界磁モータ構造の研究経緯を説明し、IPM ロータの磁極を 3 分割し、中央の磁極を両側に対し相対的に回転させて界磁を変化させる構造が、界磁を弱めた状態において鉄損をより減少できる最も優れた構造であることを明らかにした。

そのため、このロータ構造を適用する EV 用永久磁石可変界磁モータの開発にとりかかった。その内容は 4 章で説明する。

### 第3章 付随する小形高出力広範囲高効率駆動化技術

永久磁石可変界磁モータの研究に付随して生まれ、次章で説明する具体的な設計や試作に用いられた新技術として、「磁束集中 IPM モータ」、「加圧成形コイル」と「高強度鋼板ロータコア」について論じる。永久磁石可変界磁モータを広範囲高効率化のみならずより小形高出力化する技術として「磁束集中 IPM モータ」を開発した。コイルの占有スペースを縮小したにも係わらず、コイルの導体断面積を拡大する技術として「加圧成形コイル」を開発した。従来の電磁鋼板を用いたロータの耐遠心力を強化し、約 2 倍の高速回転化をなし得る技術として、「高強度鋼板ロータコア」を開発した。以下、これらの技術について説明する。

#### 3.1 小形高出力広範囲高効率駆動化の要望

EV モータを変速機なしで用いたいという要望がある。図 3.1 に、平均的な 2 リッタークラス乗用車用 5 速変速機付エンジンの、車軸上におけるトルク-回転速度 (T-N) 特性を示す。1 速と 5 速の変速比は 5 : 1 である。この変速機付エンジンの特性をモータ単体で置き換えた場合、モータの特性は図示のようになり、1 速における大トルクと 5 速による高回転速度を両立しなければならない。このように、EV モータが変速機付エンジン車同等の特性を得るには、定出力範囲の広い特性が要求され、結果として高速回転化が求められる。具体的には、クランク軸上において最大トルク  $200\text{N}\cdot\text{m}$  (at  $4000\text{min}^{-1}$ )、最大回転速度  $8000\text{min}^{-1}$  のエンジン特性に対し、例えば、約  $2000\text{min}^{-1}$  でエンジンの 2 倍の最大トルク  $400\text{N}\cdot\text{m}$  を発生し、2.5 倍の最大回転速度  $20000\text{min}^{-1}$  のモータ特性が必要となる。

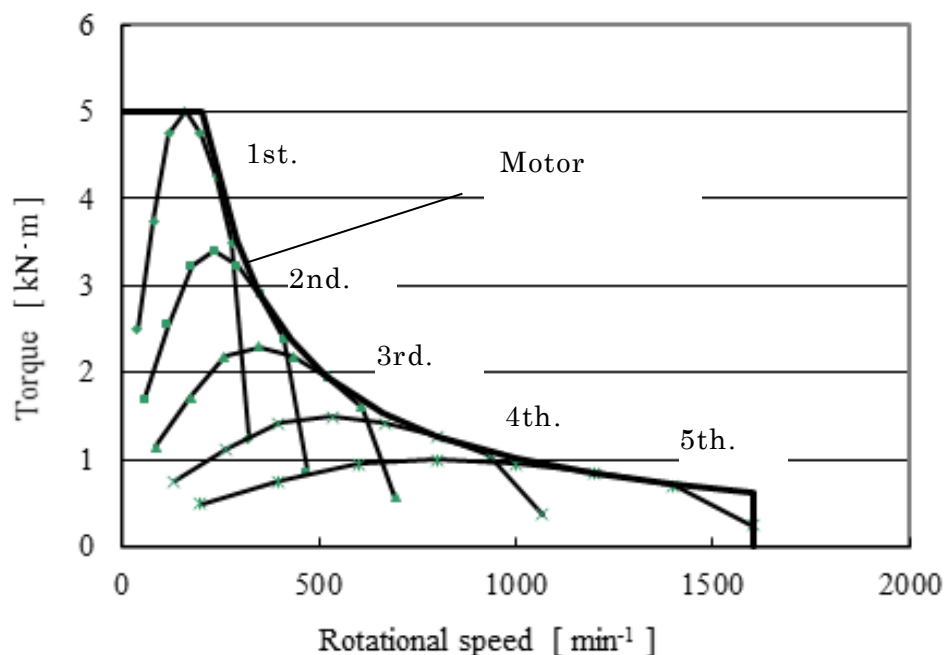


図 3.1 車軸上での T-N 特性

EV モータには、埋込磁石形モータ（IPM モータ）が多用されている。IPM モータを前記のような広い可変速範囲全域で高効率運転することは困難である。高速回転で駆動する場合、鉄損が増大し、また、モータの誘起電圧を打ち消すための大きな弱め磁束電流が必要となり、銅損が増大するためである。

鉄損や銅損の増大を防ぎ、広範囲高効率駆動を実現する方法の1つが、可変界磁モータである。可変界磁モータは、界磁の強さを変化させ、誘起電圧を調整することができるモータである。低出力状態で界磁を弱めた状態においては鉄損を減少でき、高速回転状態においては弱め磁束電流を減少できるため銅損を減少できる。低出力状態や高速回転状態で効率が向上することが可変界磁モータの利点である。自動車は低出力状態での走行頻度が高いため、可変界磁モータの適用により電力消費が軽減されることが期待される。

永久磁石可変界磁モータ化により広範囲高効率駆動を実現したものの、モータサイズが増大したり最大出力が低下したりすることを良としない。一面を改良し一面を低下させたと報告することは、その技術の欠点を晒し出した結果と考える。例えば、既存のモータにそのまま可変界磁機構を適用する場合などがそうなり易い。可変界磁モータは界磁を自由に調整することが可能であることから、従来よりも大きな界磁を設定することが可能となる。可変界磁モータは広範囲高効率化のみならず小形高出力化にも貢献する技術である。本章では、永久磁石可変界磁モータの研究に付随して生まれ、次章で説明する具体的な設計や試作に用いられた新技術について論じる。

これらの新技術には、小形高出力化のための磁気装荷あるいは電気装荷の増大、さらに広範囲駆動のためのモータの機械的強度、特にロータの耐遠心力強化が含まれている。まず、磁気装荷の増大方法としては、既に述べたレアアース永久磁石の採用があるが、その先の技術として開発した「磁束集中 IPM モータ」<sup>(46)</sup> を、3.2 節で論じる。次に、電気装荷の増大方法としては、より大きな通電を可能とするためコイルの占積率を 90% 以上として開発した「加圧成形コイル」<sup>(47)</sup> を、3.3 節で論じる。この2つの技術は小形高出力化に貢献するばかりでなく、モータの高効率化にも貢献する。さらに、ロータの耐遠心力強化については、従来の電磁鋼板の3倍以上の降伏点を有する高強度鋼板を適用して開発した「高強度鋼板ロータコア」<sup>(48)</sup> を、3.4 節で論じる。

## 3. 2 磁束集中 IPM ロータ

### 3. 2. 1 磁束集中 IPM ロータの目的

従来の永久磁石同期モータをより高出力化することは、各回転速度においてより高トルク化するということである。例えば、IPM モータの高トルク化の1つの方策としてリラクタンストルクの併用があるものの、本技術開発では永久磁石トルクを増大する方策に注目する。

永久磁石トルクを増大する方策としては磁束集中 IPM モータが多数報告されてきた<sup>(1)(49)(50)</sup>。例えば、文献(1)では、3つの永久磁石から発生する磁束をギャップに集中することにより、従来機の約1.4倍の定格トルクおよび出力を確認した例が報告されている。また、文献(49)では、永久磁石を放射状に配置したロータ構造により、出力密度を向上した例が報告されている。また、文献(50)では、立体的に配置された4つの永久磁石から発生する磁束をギャップに集中する例が報告されている。これらの報告は、各々永久磁石トルクを増大を達成しているが、永久磁石の使用量や耐遠心力等の総合的な観点から、提案構造の優位性が述べられていない。そのため、様々なモータに対する様々な提案構造の適用性を述べるのが望ましい。

本節は、磁束集中 IPM モータの技術開発において得られた3種類の磁束集中 IPM モータのロータ構造に関する適用性を論じる。サーボモータ用に試作した磁束集中 IPM モータの、高トルク化に対する課題と方策を述べる。

### 3. 2. 2 永久磁石トルク増大の利点

永久磁石トルクを増大する理由を明確にするために、リラクタンストルクを併用する利点を確認し、次いで、永久磁石トルクを増大する利点を明確にしたい。文献(51)では、ロータ断面にV字に配置された永久磁石の狭角とトルク特性の関係について報告されている。文献(52)では、様々な永久磁石配置とトルク特性の関係について報告されている。これらは限られた永久磁石使用量のもとで、リラクタンストルクを併用し、高トルク化が達成できることが利点として述べられている。また、文献(12)には、IPM モータの特性がベクトル制御を交えよく説明されている。文献には、リラクタンストルクを併用する利点として、高トルク化の他に、永久磁石コストの低減や広範囲駆動化に有利なことが述べられている。

しかしながら筆者は、これらの利点についてやや異なる意見を持っている。モータの高トルク化には、リラクタンストルクではなく永久磁石トルクを増大させる方が良いと考える。永久磁石の量を2倍にしても2倍の出力を達成すれば、コストの増大にはならないと考える。永久磁石トルクを増大する利点を、具体的に説明する。

図3.2はSPMモータ(A)とリラクタンストルクを併用したIPMモータ(B)のトルク特性を比較した図である。同じ体格のSPMモータとIPMモータを比較すると永久磁石トルク(B')にリラクタンストルクを併用したIPMモータの最

大トルクが勝ることを示している。永久磁石使用量を制限された比較ではこのような結果になり易い。永久磁石使用量を制限しない比較では、例えば永久磁石使用量を2倍にして永久磁石トルクを増大すれば、IPMモータを上回ることができると考える。達成できれば、リラクタンストルクを併用しなくても、高トルク化はなし得ることになる。モータの容量やトルクを2倍にするには鉄心の積厚を2倍にすることが一般的であるため、モータの単位出力当たりのコストは、そのままのサイズで2倍のトルクが得られれば、2倍の永久磁石を使用してもコストの増大はなく、小形化が達成されたことになる。

図3.3はSPMモータ(A)とリラクタンストルクを併用したIPMモータ(B)の、横軸を回転速度とした最大出力特性を比較した説明図である。IPMモータの永久磁石磁束量はSPMモータに対し7割程度であるが、永久磁石トルクと同等のリラクタンストルクを併用して約1.4倍のトルク定数を有する特性であることを想定している。EVモータのように電圧飽和領域に及ぶ広範囲駆動では、電圧飽和となる基底回転速度( $N_b$ )以下の領域ではトルク定数の大きなIPMモータの特性が勝る。逆に、高速になれば最大出力は永久磁石磁束量の大きなSPMモータが勝るようになる。高速での最大出力は永久磁石磁束量の大きさに決まるとは文献(42)で報告した。また、SPMモータに限らず、永久磁石トルクを増大した磁束集中IPMモータでも、高速での最大出力は永久磁石磁束量の大きさに決まり(A)のような特性になる。基底回転速度である $2000\text{min}^{-1}$ から $22000\text{min}^{-1}$ の広い可変速範囲における最大出力10kWの達成と、界磁の増大に伴い出力が増大することは文献(37)で報告した。つまり、基底回転速度以上の回転速度では定出力特性に対しリラクタンストルクは無効となり、永久磁石トルクのみが有効となる。

結局、永久磁石使用量を増大し永久磁石トルクを増大することは、高トルク化だけでなく「コスト/出力」の増加なしに小形化ができ、弱め磁束制御を駆使することにより広い可変速範囲も狭まることはない。

### 3. 2. 3 ロータ構造の選定

磁束集中IPMモータのロータ構造と永久磁石配置について検討する。高トルク化に直結する指標として、ギャップ磁束密度を比較する。永久磁石使用量を増

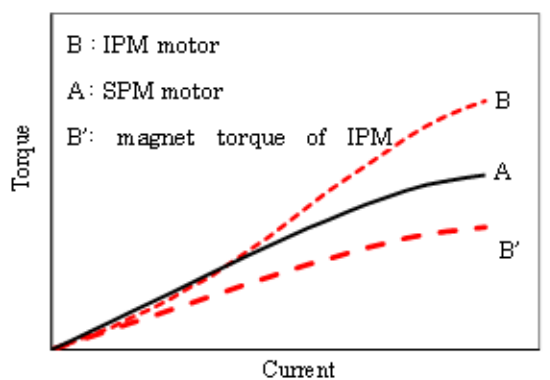


図 3.2 トルク特性比較

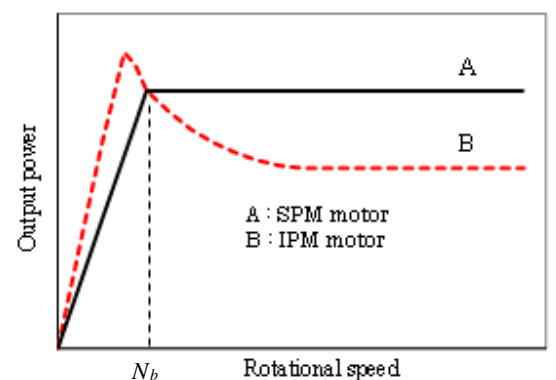


図 3.3 最大出力特性比較

大してギャップ磁束密度を増大するロータ構造の比較として、残留磁束密度 1.4T の永久磁石を用い以下に示す 3 つの構造を比較する。外周はスロットのない均一な鉄心とする。

図 3.4 は SPM 形ロータ構造とギャップ磁束密度の解析例を示している。図 3.4 (a) はロータの表面に永久磁石が配置された状態を示し、矢印は永久磁石の磁化方向を示している。磁極と磁極の間の磁束密度を漸次変化させるため、磁極の両端には中央に対し 80,60,40% の磁化力の永久磁石を漸次配置したことを矢印の長さで示している。図 3.4 (b) はギャップ磁束密度 ( $B_g$ ) の分布状態を示し、図 3.4 (c) は永久磁石内径を変化させて径方向の永久磁石厚みを増減させた場合の磁束密度の変化を示している。図 3.4 (c) より図 3.4 (a) に示した厚み (p.u.=1) におけるギャップ磁束密度の最大値が約 1.03T であるのに対し、永久磁石厚みを倍増しても約 1.1T にしか増大しないことがわかる。それ以上に厚みを増すと、ギャップ磁束密度はかえって減少することもわかる。これは永久磁石内側の磁束密度が残留磁束密度の 1.4T を超えてしまい、ギャップ磁束密度増大に抵抗するためである。

図 3.5 はハルバッハ形ロータ構造とギャップ磁束密度の解析例を示している。文献(53)に見るように、着磁された永久磁石の配列を工夫することで、永久磁石内で磁束を集中し磁束密度を向上させる。(b) に示すように、ギャップ磁束密度の最大値は約 1.7T に増大した。

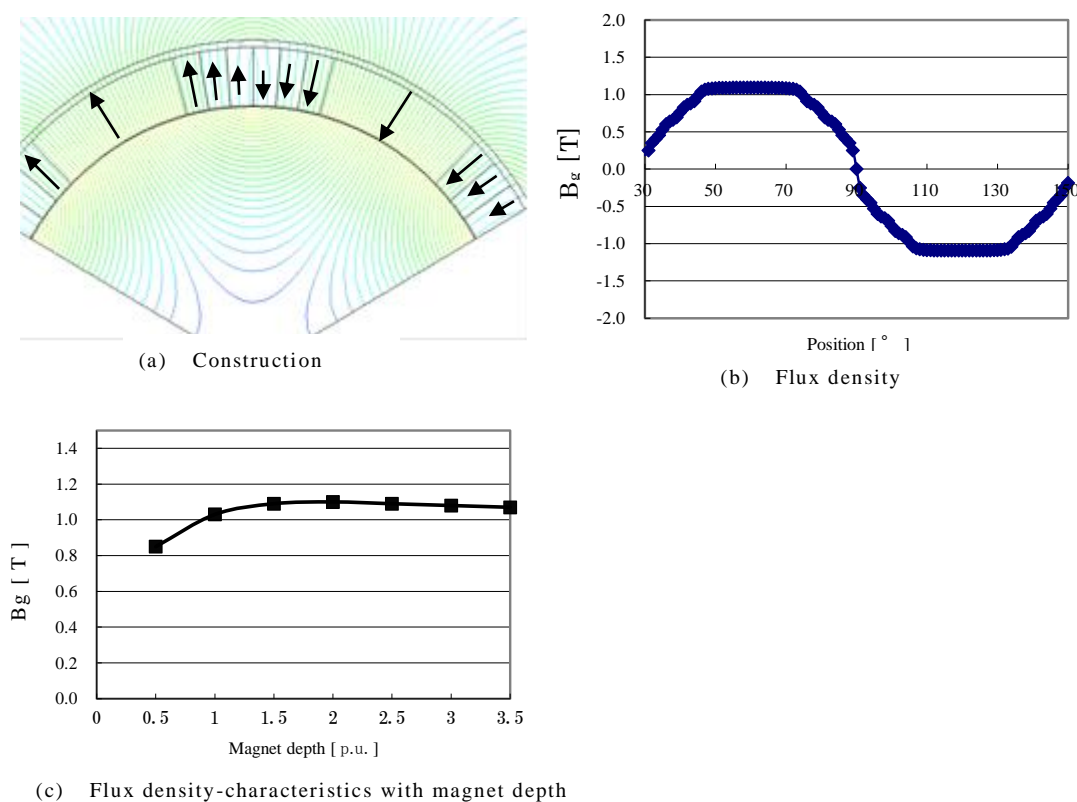


図 3.4 SPM ロータ形構造とギャップ磁束密度の解析例

図 3.6 は磁束集中 IPM 形ロータの一例として、永久磁石を放射状に配置したロータ構造とギャップ磁束密度の解析例を示している。(b)に示すように、ギャップ磁束密度の最大値は、さらに約 1.8T に増大した。磁束集中 IPM 形ロータがハルバッハ形ロータより高磁束密度であった結果より、ギャップの磁束密度を最大限に増大するには、ロータ外周には 1.4T 以上では磁気抵抗となる永久磁石より、飽和磁束密度の高い電磁鋼板を配置する方が適することがわかった。

また、図 3.7 に示すように、磁束集中 IPM 形ロータのポールシュー形状を変えて、磁束密度分布を自由に調整できることを確認し、コギングトルクや駆動時のトルクリップル対策に対応できることがわかった。

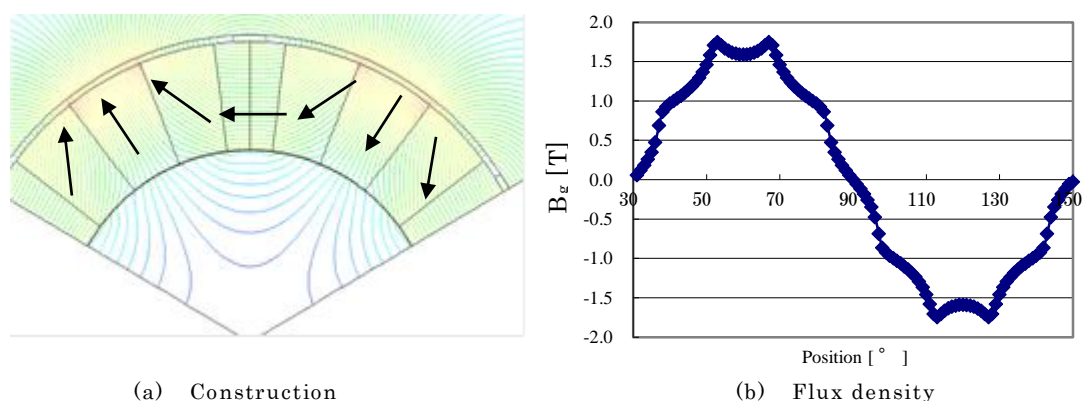


図 3.5 ハルバッハ形ロータ構造とギャップ磁束密度の解析例

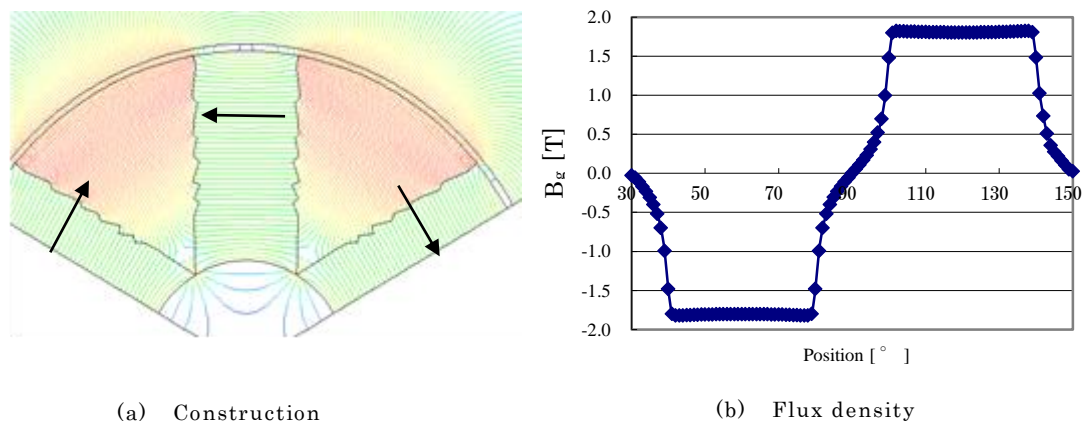


図 3.6 磁束集中 IPM 形ロータ構造とギャップ磁束密度の解析例

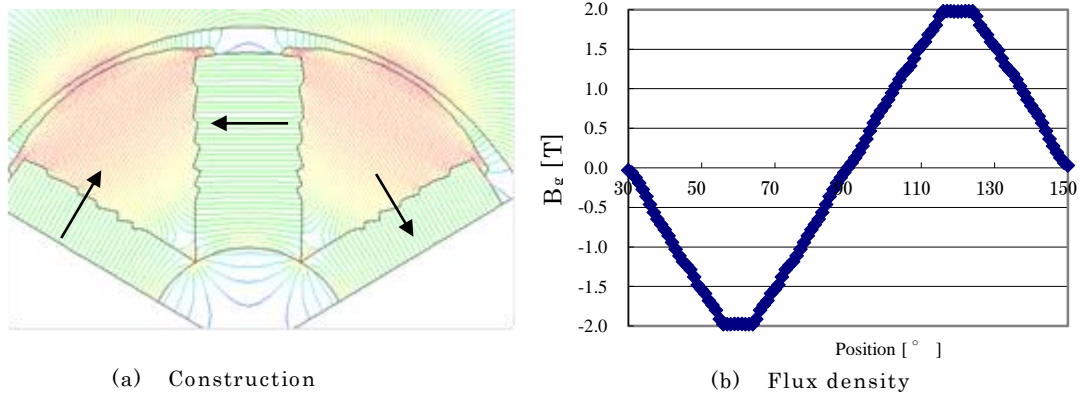


図 3.7 別の磁束集中 IPM 形ロータ構造とギャップ磁束密度の解析例

### 3. 2. 4 永久磁石配置形状の比較

図 3.4(b)～図 3.7(b)のギャップ磁束密度の解析結果を用いて、より大きなギャップ磁束密度が得られる永久磁石の配置について、様々な配置形状を検討した結果、シャフト径に制約がない場合には、図 3.6 に示した永久磁石を放射状に配置したロータ構造が、ギャップの磁束密度を最大限に増大できると考えられる。永久磁石から発生する磁束をギャップに集中するのであれば、永久磁石の表面積を大きくする配置形状が最も有効であるからである。

しかし、一般的には必要なシャフト径の制約があり、放射状に配置した永久磁石の内側が離れてしまうことが多い。その場合には図 3.8(a)に示すように、放射状に配置された永久磁石の間に別の永久磁石を配置した 3 面集中形 (3face-shape) がギャップの磁束密度を最大限に増大できる構造となる。

トルクや遠心力に対する強度や製造上の検討も加え、実用的な配置形状として、以下の 3 つの配置形状に集約した。

(1) 3 面集中形 最大の磁束集中が可能。シャフト径の大きさに対し融通が利く。図 3.8(a)に示すように、6 極以下のロータでは、他の 2 つの配置形状に比べ優位差が顕著になる。放射状に配置された永久磁石の間の永久磁石を円弧形にしてもよい。

(2) V 字形 (V-shape) 図 3.8(b)に示すように 2 枚の永久磁石を V 字形に配置して 1 極を構成する。3 面集中形に近い磁束密度がより少量の永久磁石で得られる。EV 用等高速回転を要求されるモータでは、耐遠心力構造とするために、図に示すように、1 枚のロータコアに永久磁石装着孔を設け、永久磁石を装着する構造が有効である。その場合、永久磁石の周りに磁束の漏れ磁路となるブリッジが 1 極に対し 3 ヶ所できるが、3 面集中形の 4 ヶ所に比べ少ないため、漏れ磁束を軽減できる。よって、最大トルクは、3 面集中形よりも V 字形の方が勝る場合も多い。実用的には第 1 に選択すべき配置形状と考えている。

(3) ブロック形 (Block-shape) 図 3.8(c)に示すように、永久磁石の個数が他の配置形状の半分となり、永久磁石使用量が小さく、配置が容易である。



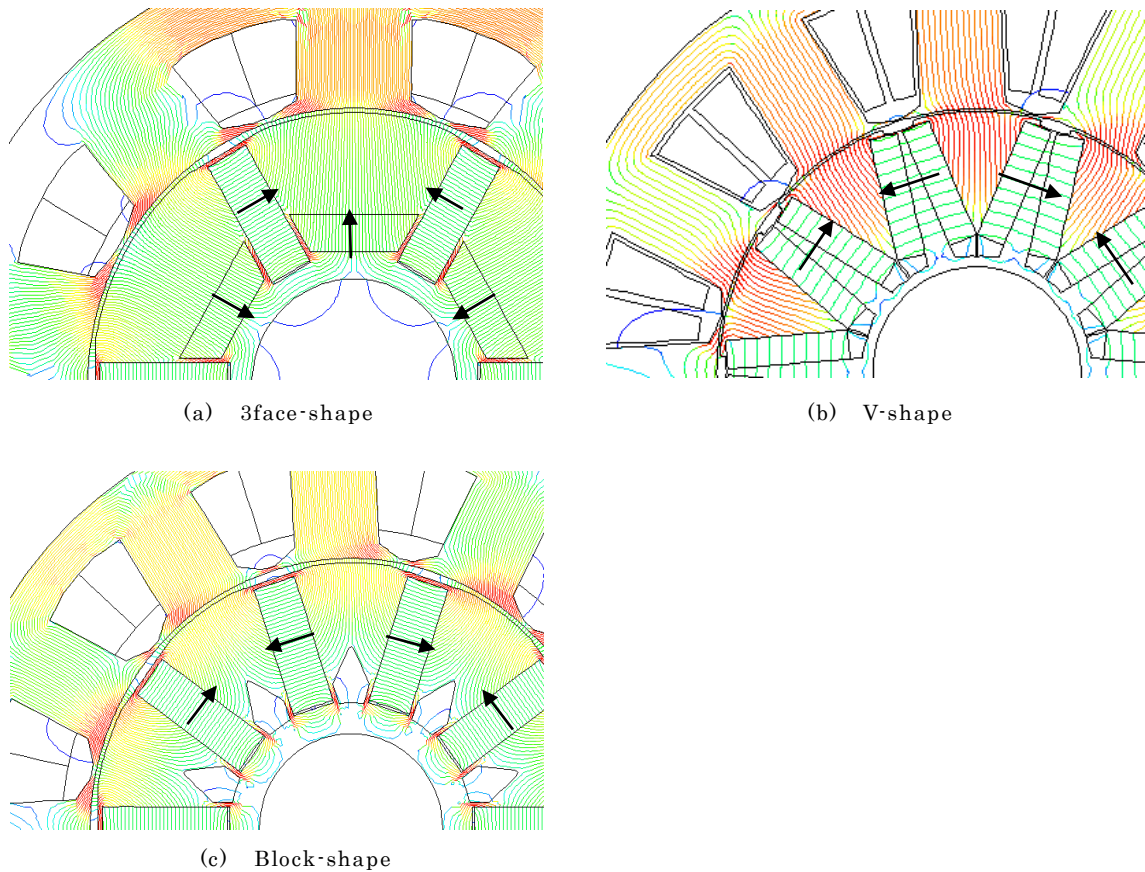


図 3.8 永久磁石配置形状比較

具体的に配置形状を考えてみる。例えば、 $\phi 40\text{mm}$  以下の 10 極ロータを V 字形で構成する場合、ロータに  $1\text{mm}$  程度の厚みの永久磁石を 20 枚装着するような設計となり、より単純な構造が望ましくなる。そのため、この配置形状は、小形のモータや多極のモータに有効である。永久磁石の内側が離れる場合には、図に示すようにフラックスバリアを設け内側への漏れ磁束を防ぐ。図 3.6 に示したように、内側の空隙がなくなるまで永久磁石を厚くすれば、大きな磁束集中が得られる。

これらの磁束集中 IPM モータのロータ構造を用いれば、図 3.4(a) に示した SPM モータに比べ、ギャップ磁束密度を向上し、高トルク定数化が可能となる。しかし一方では、SPM モータはトルク直線性に優れ、永久磁石量を少量に制限された場合には、発生し得る最大トルクも磁束集中 IPM モータに優れるという良い面もある。そのため磁束集中 IPM ロータの設計指針としては、SPM モータに対し、より多くの永久磁石を用いて、それに見合うトルクや出力を得ることとする。

### 3. 2. 5 課題と方策

磁束集中 IPM モータのロータ構造として、何れの永久磁石配置形状を選んでも、ギャップの高磁束密度化によりステータコアでの鉄損増大対策が課題となることが予想される。可変界磁モータ化により低出力時の鉄損を低減することは可

能であるが、それに頼らず鉄損を低減する努力は必要である。ステータコアの磁束密度を下げ鉄損を下げる方策として、ティース幅を増大できる案を検討した。スロットに収められた巻線の導体断面積を減らすことなしに、ティース幅を増大したい。そのため、次節で論じる占積率 92%に達する加圧成形コイルを用いることで、巻線抵抗低減とティース幅増大の両立を図った。

### 3. 3 加圧成形コイル

#### 3. 3. 1 加圧成形コイルの目的

EV モータ，産業用モータ等，モータの定格出力向上が求められている。モータの定格出力は，モータを構成する部品のいずれかが最初に許容温度に達する通電電流の値によって決定され，多くの場合，ステータコイル（以下コイルと略称）の温度がその対象となる<sup>(38)</sup>。そのため，モータの定格出力を向上するためには，コイルの温度上昇を低減することが課題となる。

コイルの温度上昇は，コイルで発生する銅損に起因する。コイルの抵抗を下げるために，例えば，コイルの占有スペースの拡大や，コイルの占積率の向上が試みられた<sup>(26)</sup>。また，コイルで発生した熱を効果的に放熱するために，例えば，集中巻コイルにおいては，ボビンの薄肉厚化や，より熱伝導性の良い絶縁材の使用が考えられる。コイルで発生した熱を効果的に放熱する試みとしては，通風冷却によるもの<sup>(54)</sup>や，油冷却によるもの<sup>(55)</sup>，水冷却と油冷却を併用するもの<sup>(56)</sup>もある。これらはコイルの熱を一旦空気や油に移し，移動してケース等に放熱している。筆者らは，放熱経路を単純化する理由から，コイルから直接ケース等に放熱する方法を検討した。

本節では，円筒形モータのコイルの温度上昇を低減できる新しい構造を提案し，従来構造に対する効果を評価する。また，その効果を高めるために工夫した加圧成形コイルについて説明する。

#### 3. 3. 2 提案構造

仮に銅損がコイル断面の中心で発生するとした場合，ボビンに巻かれたコイルをティース毎に装着した従来構造のモータにおいて，銅損によって発生した熱がコイルよりモータ外部に至る主な放熱経路は，図 3.9 に示すように，コイル，ボビン，固定子鉄心，フレーム，ブラケットの 5 種類の部品を通過することになる。しかし，提案構造の放熱経路では，図 3.10 に示すように，コイル，絶縁材，ブラケットの 3 種類しか通過しない。このように，放熱に係わる部品が少なくなり経路も短縮されるため，コイルとブラケットの温度差を小さくでき，コイルの熱を効果的に放熱することが期待できる。

提案構造において放熱を効果的に行うためには，対地絶縁を確保したうえで，コイルとブラケットを近づけることが重要になる。従来構造のモータでは，固定子鉄心のティース部に装着されるコイルは，通常表面が平坦になっていない。あるものは巻線機で高速に巻かれるために外形状が不整列であり，あるものは整列に巻かれていてもスロットのコイル装着部が扇形に近い断面形状であるため，コイルの外形状が階段状になっている。そのため，コイルとブラケット間の熱伝導経路の平均長が，例えば 1mm 以下のものは稀であろう。一方絶縁に必要な絶縁材の厚みを考えると，例えば 0.3mm で 3000V を絶縁できる絶縁材料はカタログ上で容易に探し得る。したがって，コイルエンドとブラケットを，例えば 0.3mm

まで近づけることができれば、3000Vの対地絶縁を確保しながら、コイルからブラケットへの熱伝導性を3倍以上改善できるように思われる。コイルとブラケットを近づける方策として、コイルの外形状を加圧成形する。加圧成形することにより、コイル表面の突出した部分が平坦に加工され、ブラケットに対面するコイルエンドのより広い面積を、ブラケットに近づけることができるようになる。

このような考えの下、従来構造と提案構造の放熱状態について検討する。放熱状態を正確に把握するには、図3.9と図3.10に示した伝達経路のほか、モータ全体の熱回路を考慮する必要があるが、ここではまず放熱性能の優劣を判断するに留める。従来構造と提案構造の主な放熱経路は、図3.9と図3.10に示した伝達経路であると想定し、熱伝導経路を構成するそれぞれの部品の温度がどのように分布するかを検討する。無限大の熱容量を有する一定温度のペDESTAL（台座）にモータが取り付けられ、コイルで同じ熱量が発生した場合を想定し、従来構造と提案構造において、それぞれの部品の温度分布とコイル温度の比較を行う。それぞれの部品の入口端と出口端の温度差 $\Delta T$ は、次式による熱回路計算で求めた。

$$\Delta T = (Q \cdot L) / (A \cdot \lambda) \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

ここで、

$Q$  : 熱量[W]

$L$  : 経路の長さ[m]

$A$  : 断面積[m<sup>2</sup>]

$\lambda$  : 熱伝導率[W/m/K]

仮に、コイルで発生する熱量が273Wで、そのすべてがペDESTALまで伝導するものとし、ペDESTALの温度を60℃とすれば、図3.11と図3.12に示すような結果が得られる。図には、出入りする熱量の入口端と出口端での温度を、それぞれの部品について示した。また、(3.1)式に用いたそれぞれの部品における $L$ 、 $A$ 、 $\lambda$ も示した。例えば、図3.11においてコイルの入口温度はコイルの軸方向中央におけるコイル断面の中央の温度を示し、出口温度はボビンに接する内周面での温度の計算結果を示している。コイルの入口温度と出口温度にほとんど差が見られないのは、コイル全体の温度差が小さいためである。一方、熱伝導性の悪い樹脂性ボビンは、コイルに接する入口温度と固定子鉄心に接する出口温度の落差が20℃以上もある。固定子鉄心ではフレームに至るまでの温度の落差が5℃程度生じる。フレームは熱伝導性の良いアルミ製であるが、固定子鉄心の装着部中央からブラケットに至る経路の長さが大きいため、約13℃の温度落差となる。ブラケットが装着されるペDESTALの温度を60℃と設定し計算したこの検討結果では、コイルの温度は約104℃である。

一方、図3.12に、提案構造のモータでの放熱経路となる、コイル、絶縁材、ブラケットの温度の計算結果を示す。放熱に係わる部品が少なく経路も短いため、コイルの温度は約75℃である。

両者をコイルの温度で比較すれば、提案構造のモータの温度上昇は小さく、より多くの電流を流せることになり、定格出力の増大が可能となる。

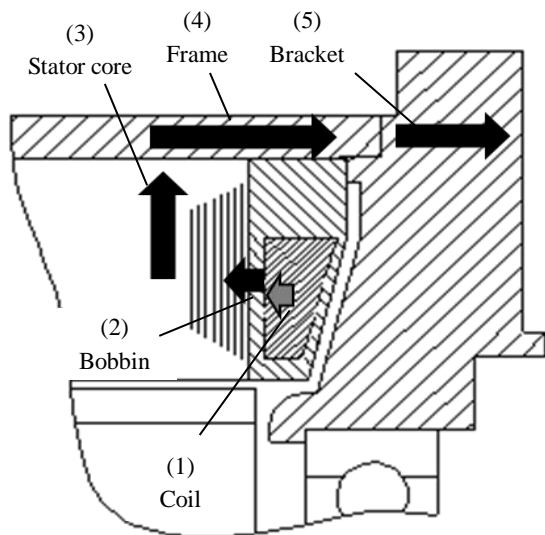


図 3.9 従来構造

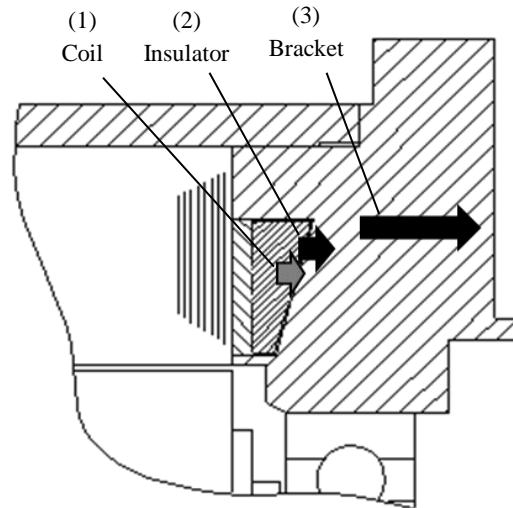


図 3.10 提案構造

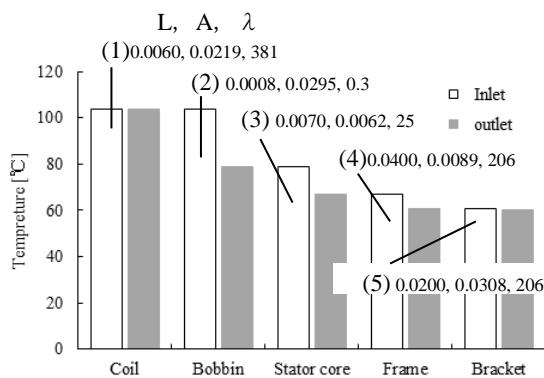


図 3.11 従来構造

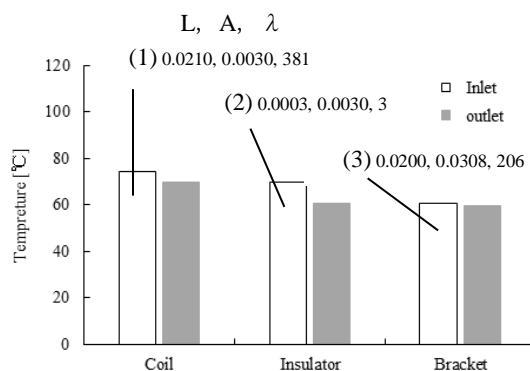


図 3.12 提案構造

### 3.3.3 製作上の課題

コイルを加圧成形することに関して類似の報告例として、磁気浮上式鉄道の上コイルを設計の厚み内に収めるために加圧成形を行うものがある<sup>(57)</sup>。提案構造のモータを製作する上では、試作コイルをコイルエンド端部などの外形状が十分に平坦になるまで加圧できるか否かが課題の1つであった。

図 3.13 に示すように、試作コイルは、絶縁皮膜を持つボンド線を巻回し、コイルの導体端部が設けられているコイルエンド側面を除くすべての外形状を加圧成形して製作した。導体径 1.3mm 融着層込み 1 種絶縁のボンド線を加圧成形し、加熱して融着させて空芯コイルとした試作コイルである。円筒形に装着されるコイルは、コイルエンドやスロット装着部が扇形に近い断面形状となるため加圧が困難に思われた。加圧が過ぎれば、ボンド線の導体より柔らかい絶縁皮膜が痛み絶縁不良にいたると考えられた。そこでコイルに均等な応力を作用させるために、加圧は1つの大きな面だけで行う方法を検討した。

どのように加圧するかを検討した結果として、図 3.14 に示すような加圧治具を用いることにした。図に示すコアピンに巻いたコイルをダイに装着後、上パン

チを下方に押し下げ，コイルを設計寸法まで圧縮する。圧縮した位置に固定したまま恒温槽で加熱して，ボンド線の融着皮膜を融着後冷却して完成する。また，コイルの巻線手順は，リードの一端がコイルの1層目にならないように，1層目より6層目まで両端で巻く通称「 $\alpha$ 巻」と言われる巻線方法を行っている。巻線のクロスオーバは，反負荷側コイルエンド部のみで行い，加圧する部分では，整列巻に巻線する。この巻線方法により，加圧される範囲ではコイルはすべて整列巻となっている。

図 3.15 は試作したコイルのコイルエンドの断面写真である。加圧により丸銅線の断面が変形し，コイルの外形状が平坦に成形されている様子がわかる。コイルエンドの内側や外側を正確な円筒面とし，特に端部を正確な円錐面として，ブラケットに対面する面積を増大し，「コイルとブラケットを近づける。」ことが可能になった。

図 3.16 は試作したコイルの円周方向の断面写真である。コイルエンドと同様に，加圧により丸銅線の断面が変形し，コイルの外形状が平坦に成形されている。コイルはコイルの占有スペースに合致するように，スロット形状の扇形に近い断面となっている。ここまで加圧成形することで，ブラケットに対面するコイルエンド端部ばかりでなく，円周方向に隣接するコイルとコイルの間についても，コイルの占有スペースを最大まで活用できることがわかった。



図 3.13 試作コイル

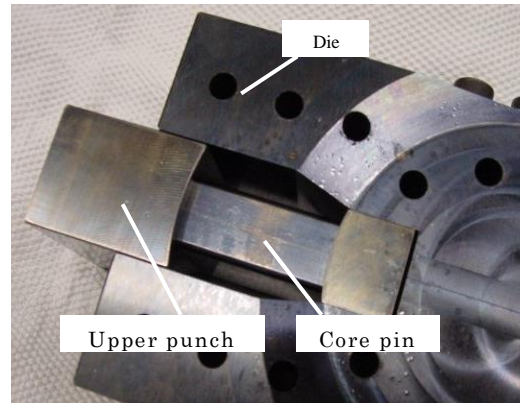


図 3.14 加圧治具

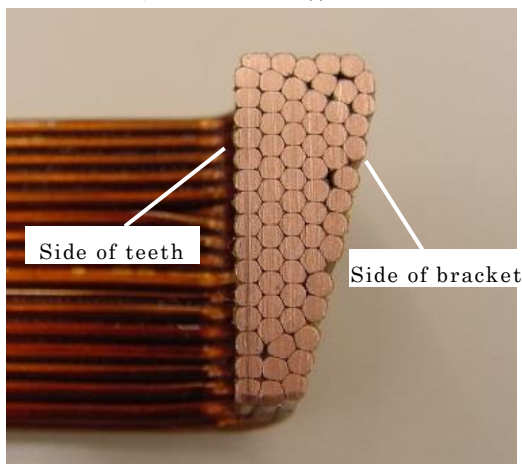


図 3.15 コイルエンドの断面写真

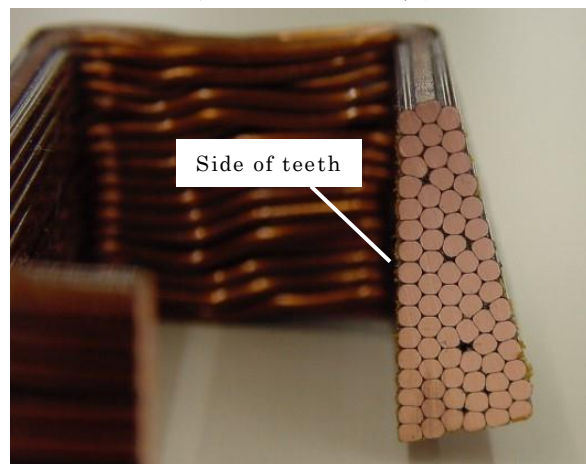


図 3.16 円周方向の断面写真

図 3.17 は加圧力に対する占積率とレアショート試験との関係性を評価した結果を示す。18 個のコイルを様々な加圧力で加圧し，規定電圧でのレアショート有無を評価した。結果として，黒丸で示す 27000kgf で加圧した 2 個のコイルのみがレアショート試験で不合格であり，占積率が 95%にいたるまでのコイルはすべて合格した。不合格となった 2 個のコイルは，リード端に近い巻線部の絶縁破壊が確認された。

また，14000kgf 以上の加圧力で目標の形状寸法に圧縮できることがわかった。この形状での占積率は 92%であり，外形状を加圧することで占積率も向上できた。そのため，より太い線材をコイルに用いて電磁設計を行うことで，コイル抵抗は約 20%低減できた。

### 3. 3. 4 試作モータの概要

図 3.18 は試作モータの外観である。新しい技術の効果を比較し易くするため，従来モータの部品を使用し，外形状や電磁部サイズを合わせて設計した。試作モータには提案構造以外にも定格出力やその他の特性向上のため，前節で説明した磁束集中 IPM ロータや次節で説明する高強度鋼板ロータコアが適用されている。そのため評価に関しては，本研究の提案構造による効果がどの程度なのかが明確になるよう，熱量を考慮して評価を行った。

表 3.1 に試作モータの仕様および測定値を，従来モータと比較して示す。試作モータの誘起電圧の測定値は，従来モータの誘起電圧より 3.5%程度小さい。また，試作モータの線間抵抗は従来モータの 1/3 程度である。ロータ構造は，従来モータの SPM ロータ形に対して磁束集中 IPM ロータ形であり，ギャップ磁束密度が増大されている。また，コイルを圧縮することで得られるスペースの一部により，ティース幅が広げられ磁束が通り易くなっている。鎖交磁束量を比較するために，試作モータのステータのみを用い，試作モータのロータ，従来モータのロータを装着してそれぞれ誘起電圧を測定したところ，前者は後者の約 1.5 倍の誘起電圧

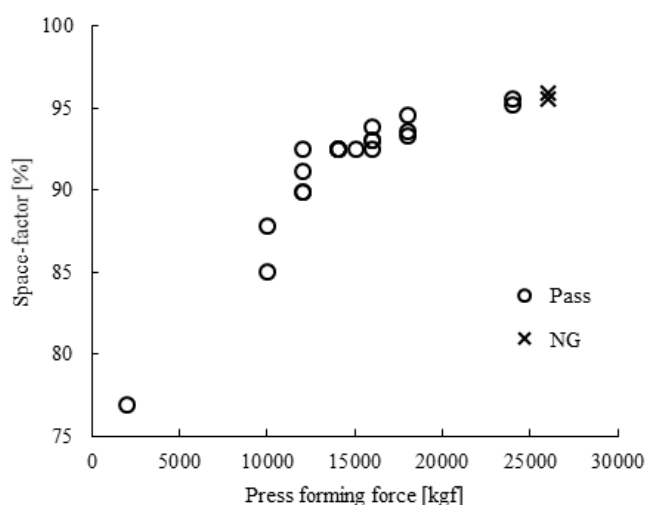


図 3.17 加圧力に対する占積率とレアショート試験との関係

であった。すなわち、前者は後者の約 1.5 倍の鎖交磁束量となっていた。つまり同一の誘起電圧を発生させるのであれば、磁束集中 IPM ロータでは鎖交磁束量が増大した分コイルの巻数を軽減できる。さらに、加圧成形コイルによる占積率の増大の効果により、コイルの抵抗は低減された。

### 3. 3. 5 通電による温度比較

コイルの温度上昇を低減することに対する提案構造の効果を調べるために、ロータを固定した状態でモータに直流電流を 1 時間流した時点で、試作モータと従来モータのコイル温度を抵抗法により比較した。具体的には、通電電流に対するコイルの両端電圧を測定し、抵抗値の変化から計算したコイル温度を測定値と称する。図 3.19 にその結果を示す。2 つのモータはコイル抵抗が異なるため、コイルへの通電による発生銅損に対する温度上昇の比較をおこなった。縦軸は、コイル温度の室温との温度差を示している。

図に示すように、例えば、発生銅損が 100W のとき、従来モータのコイルの温度上昇は約 41°C であるが、試作モータでは約 22°C と半分程度の値であった。したがって、コイルからブラケットへの熱伝導性は、提案構造により 2 倍近く向上したことを確認できた。図に示す破線は図 3.11 と図 3.12 で示した簡易な計算による計算値である。測定値の温度上昇が実測値より大きい理由は、計算では無視

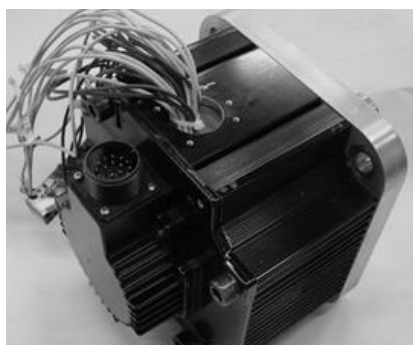


図 3.18 試作モータ

表 3. 1 試作モータの仕様

Item	Prototype	Conventional
Number of poles	8	8
Type of rotor	IPM	SPM
Outer diameter of stator	167 mm	167 mm
Stacking thickness of stator	42 mm	42 mm
Induced voltage / line	40.8 mV/min	42.3 mV/min
Resistance / line	0.039 Ω	0.122 Ω

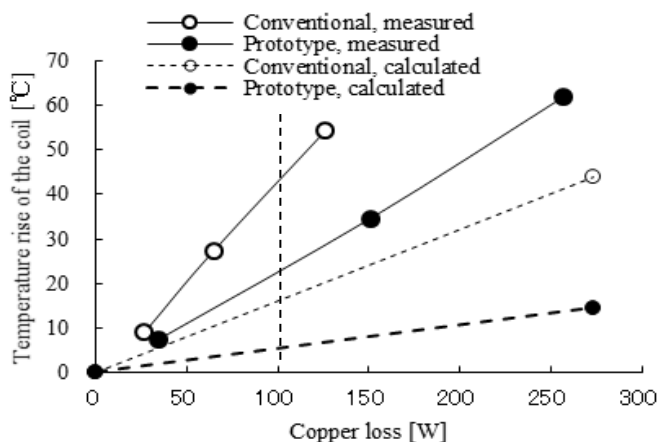


図 3.19 コイルの温度上昇比較



した接触抵抗の影響が大きかったものと推測される。熱伝導経路を構成する部品が少ないことも、提案構造のモータの温度上昇低減に貢献していると推測される。

### 3. 3. 6 運転時の温度比較

コイルの温度上昇を低減することに対する提案構造の効果を別に確認するため、試作モータと従来モータを負荷状態で駆動し、モータのコイルや各部位の温度を比較した。2つのモータを駆動周波数 100Hz で一定の出力状態で 1 時間運転し、ペDESTAL、ブラケット、フレーム前側（ブラケット側）と後側、およびコイルの温度測定結果を比較した。ペDESTAL、ブラケット、フレームの温度は熱電対を用い、コイルの温度は抵抗法によって測定した。熱電対はモータ表面のそれぞれの部品に取り付けた。2つのモータの温度比較については、放熱する熱量が同じになるよう配慮した。具体的には以下の通りである。試作モータと従来モータの放熱は、ペDESTALへの伝熱のほかには、モータ表面から外気への放熱と、外部への輻射熱による放熱が考えられるが、両者は外形状も色も殆ど同じため、これらによる放熱量は同じと見なせる。そのため、2つのモータはコイル抵抗が異なるが、ブラケットの温度が同じになるような状態を探して測定を行えば、放熱する熱量が同じ状態で比較できると考えた。

図 3.20 にその結果を示す。図において、縦軸は、試作モータと従来モータの各部位の温度の室温との温度差を示している。試作モータを 1890W 出力状態で運転した場合と、従来モータを 1258W 出力状態で運転した場合に、両者のブラケットとペDESTALの温度が同程度となっている。その状態において、従来モータのコイルの温度上昇は約 39℃であるが、試作モータでは約 21℃と半分程度の値であった。また、従来モータのコイルとブラケットの温度差が 21℃であるのに対し、試作モータのそれは 3℃と格段に小さい。前節で確認した試作モータのコイルからブラケットへの熱伝導性の向上による貢献が大きいと思われる。

図 3.21 は通電電流に対するコイルの温度上昇を、試作モータと従来モータとの比較で示したものである。例えば、コイルと室温との温度差が 20℃になる電流値で比較すれば、試作モータは従来モータの 3 倍近い電流を流せている。コイルからブラケットへの熱伝導性が 2 倍向上すれば、2 倍の銅損の発生を許容できるようになるため、3 倍近い電流値の向上のうち、1.4 倍程度が提案構造の貢献によると推測される。

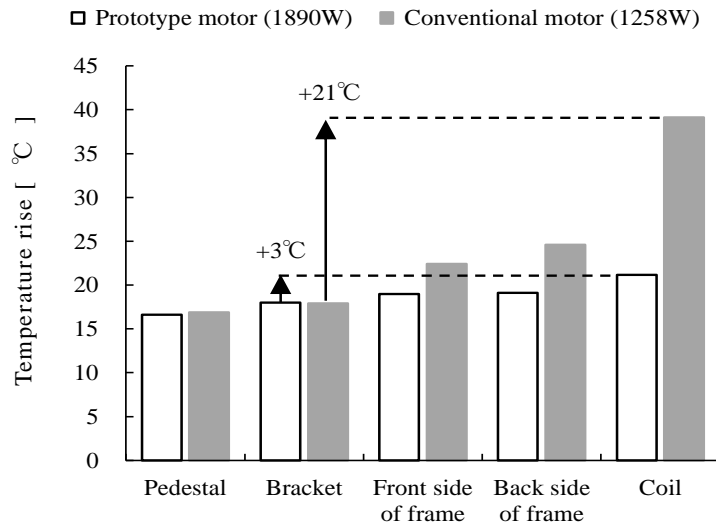


図 3.20 温度分布の比較

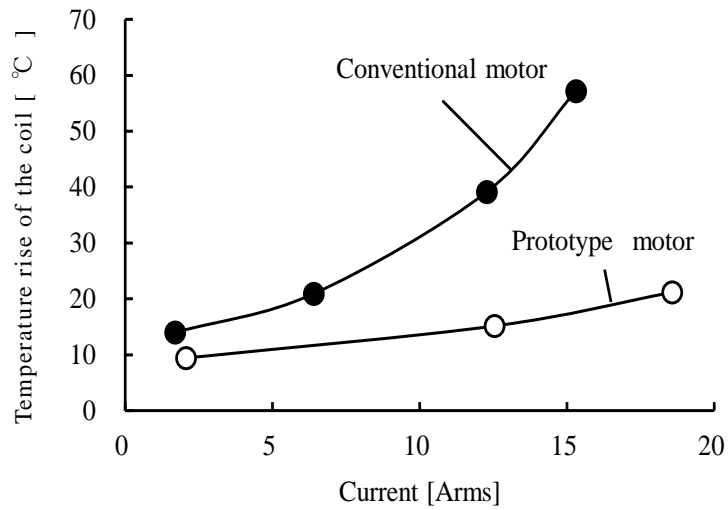


図 3.21 通電電流に対する温度比較

### 3. 4 高強度鋼板ロータコア

#### 3. 4. 1 高強度鋼板ロータコアの目的

近年 EV モータに多用されている IPM モータに対して、より高速回転化が求められている<sup>(11)(58)</sup>。高速で回転する IPM ロータの遠心力に対する限界は、ロータコアの形状が同じであれば、材質の機械的特性で決定される。そのため、従来用いられてきた電磁鋼板の範囲を越えた強度を有する高強度鋼板を用いれば、従来以上の高速回転が可能となる。一方、電磁特性が劣る鋼板であるため、鉄損の増大による効率の低下が懸念される。

本節では、 $20000\text{min}^{-1}$ の開発目標に対し、焼入れ処理により従来の電磁鋼板の3倍以上の降伏点を有する高強度鋼板の、IPM モータのロータコアへの適用と評価について述べる。ここで最大回転速度評価としては、従来の電磁鋼板を用いた場合とのロータの耐遠心力強度比較、モータの効率比較を行った。

#### 3. 4. 2 課題と方策

大きなトルクを発生できるとともに、 $20000\text{min}^{-1}$ の最大回転速度に耐える IPM モータを開発する。このような特性を有する IPM モータを実現するには、最大回転速度における遠心力に耐えるロータが必要となる。

図 3.22 に IPM モータのロータコアの形状を示す。V 字状に永久磁石を装着する IPM ロータにおいては、内側ブリッジと外側ブリッジの幅が重要となる。ブリッジの幅は、永久磁石の漏れ磁束を低減し最大トルクを大きくするためには小さく、ポールシューや永久磁石にかかる遠心力に対する強度を向上するためには大きくしたい。特に耐遠心力に対しては、W で示す内側ブリッジの幅が重要である。例えば、ポールシューに作用する遠心力は (3.2) 式で表されるので、2 倍の高速回転化を達成するには、W を 4 倍にしなければならない。

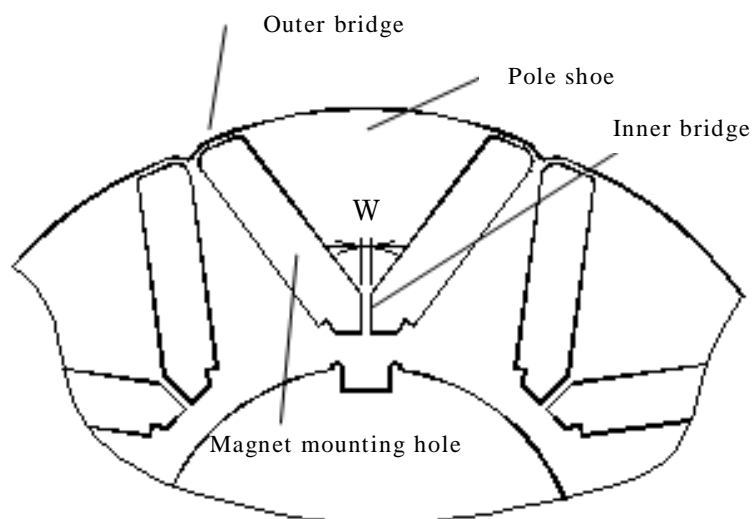


図 3.22 ロータコアの形状

$$F = mr\omega^2 \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

ここに、 $m$ : ポールシューの質量、 $r$ : ポールシューの慣性中心半径、 $\omega$ : 電気角速度である。

Wを小さくしたまま、高速回転化を達成する方策として、高強度鋼板をロータコアに適用する。本材料は、焼鈍状態では従来の電磁鋼板並みの低い強度であり、焼入れ処理により鋼板の範疇では最大に近いレベルの強度となるが、硬度も増大する。このため、ロータコアとして打抜き加工する場合、型寿命を低下させる欠点心配される。そのため、量産時では柔らかい焼鈍材として打抜き加工を行い、ブリッジ近傍のみを焼入れ硬化し、遠心力に対する強度を向上することを想定している。

### 3. 4. 3 高強度鋼板と電磁鋼板の特性

表 3.2 に、本評価で用いた高強度鋼板と電磁鋼板の特性比較を示す。残留磁束密度 ( $B_r$ )、飽和磁束密度 ( $B_s$ )、保磁力 ( $H_c$ ) は、磁気的特性を比較する項目として示した。降伏点は、材料の機械的強度を比較する項目として示した。

高強度鋼板の適用においては、ブリッジ近傍のみを焼入れ処理するロータコアの試作は行わず、焼鈍材と焼入れ材によるロータコアを別々に試作した。

鋼板の記号を説明する。

X : サンプル材 0.5t (X社製高強度鋼板の焼鈍材)

Y : サンプル材 0.5t (Y社製高強度鋼板の焼鈍材)

E : サンプル材 0.5t (X社製高強度鋼板の焼入れ材)

F : 50HST 0.5t (新日鐵住金製高張力電磁鋼板)

G : 50H250 0.5t (新日鐵住金製電磁鋼板)

X,Y は、従来板バネや剃刀の刃、その他多くに用いられる炭素鋼の冷延鋼板であり、高強度材料としては、安価な部類の鋼板である。指定の板厚に圧延後焼鈍を行い絶縁皮膜を施した。

E は、X を焼入れ後絶縁皮膜を施した高強度鋼板である。

F は、新日鐵住金製の高張力電磁鋼板 (商品名) であり、ロータの高速回転化に供する電磁鋼板である<sup>(59)</sup>。E に対し半分程度、一般的な電磁鋼板に対し 2 倍程

表 3.2 ロータコア材料の特性比較

略記号		X	Y	E	F	G
$B_r$	T	1.43	1.30	1.21	1.18	0.54
$B_s$	T	1.79	1.69	1.68	1.75	1.74
$H_c$	A/m	410	723	1584	240	40
抵抗率	$\mu \Omega \cdot \text{cm}$	18	18	22	—	59
降伏点	$\text{N} \cdot \text{mm}^2$	304	583	1590	841	480
硬度	Hv	—	186	480	234	213

度の降伏点を有する。

G は、新日鐵住金製のハイライトコア（商品名）である。一般的な電磁鋼板の代表として比較評価を行う。

高強度鋼板を用いた IPM モータの鉄損は、保磁力の増大に影響される場所が大きいと思われる。X, Y の保磁力は、G の 10 倍以上、F の数倍程度である。E の保磁力はさらに大きい。このようなヒステリシス特性の悪い高強度鋼板を用い、どの程度効率が低下するのかを評価する。また、E を用いたロータコアで高速回転化が可能になることを確認する。

### 3. 4. 4 過回転破壊評価

高強度鋼板を用いたロータコアが、従来の電磁鋼板を用いたロータコアより高速回転化できることを確認するため、E, F, G を用いたロータコアを試作し、過回転破壊評価を行った。乗用車用 EV モータへの適用可能性を広げるためには、より大きなロータ外径で評価したいため、サイズは  $\phi 160\text{mm}$  とした。

図 3.23 に、過回転破壊評価結果を示す。G, F はそれぞれ  $13000 \text{ min}^{-1}$ ,  $19000 \text{ min}^{-1}$  で破壊し、E は  $23000 \text{ min}^{-1}$  でも破壊しなかった。計算結果は、回転中のロータコアを応力解析し、いずれかの部位の応力が表 3.2 で示した降伏点を超える回転速度を示している。そのため、実際の破壊回転速度は計算結果より高い回転速度となっているが、降伏点の大きさの順位に従って破壊回転速度が決定し、E を用いたロータコアの高い耐遠心力強度が確認できた。

図 3.24 は、F を用いたロータコアの評価後の破壊状況である。8 と記載した磁極のように、内側ブリッジが破断寸前に塑性変形し、外側ブリッジが破断していないポールシューがあることから、内側ブリッジが破壊の起点であることがわかる。

### 3. 4. 5 試作モータ

高強度鋼板と従来の電磁鋼板との効率比較を行うため、最大出力  $12\text{kW}$  の IPM モータを試作した。ロータは表 3.2 で示した 5 種類の鋼板を交換可能とした。

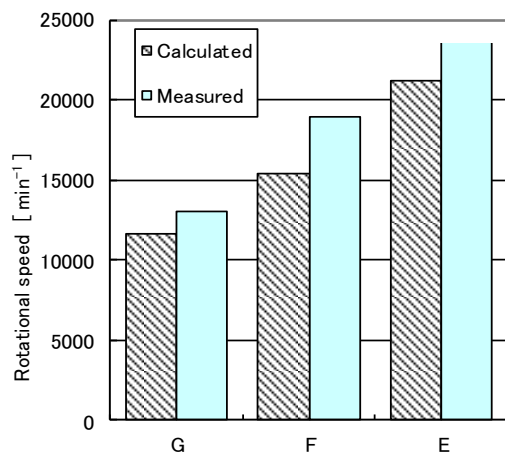


図 3.23 ロータコアの破壊回転速度

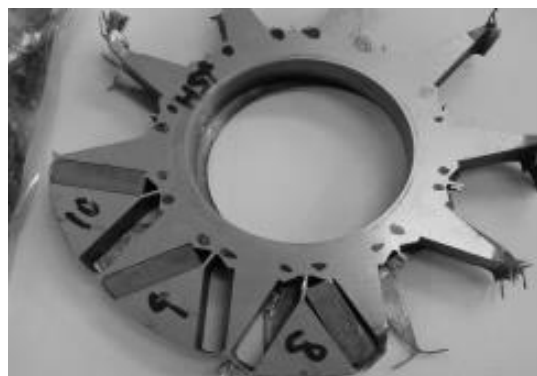


図 3.24 破壊したロータコアの様子

図 3.25 に、E を用い試作したロータコアの 1 枚を示す。永久磁石を V 字に装着した 8 極ロータである。高速回転が可能な割にはブリッジの幅を小さく設定している。そのため、ロータ表面における最大接線力は  $9.1\text{N/cm}^2$ 、トルク密度は  $4.1\text{N}\cdot\text{m/kg}$  であり、従来の IPM モータと比較して同等以上の十分に大きな最大トルクを発生できる。図 3.26 に、試作モータを示す。弊社製のサーボモータをベースにロータを新設計し、巻線仕様を変更した。表 3.3 に、試作モータの仕様を示す。

ロータコア内で発生する鉄損は、材料固有のヒステリシス特性のほかに、ヒステリシスループ上のマイナーループが描かれる動作点の位置で影響を受けると考えられる。そのため、ロータから発生する界磁を 3 段階に変え、各々の状態において比較評価を行った。試作ロータは、シャフト先端に装着されたボルトを回転させると中央の磁極部分が両側の磁極部分に対して任意の位置に移動できるしくみを備えている。図 3.27 から図 3.29 に、3 段階の界磁状態のロータを示す。磁界解析によれば、図 3.22 で示したポールシュー表面近い中央部での動作点最大値は、それぞれ  $1.53\text{T}$ ,  $1.23\text{T}$ ,  $1.10\text{T}$  の磁束密度であった。モータに組み込まれた状態において、図 3.27 の誘起電圧 (EMF) を 100% とすると、図 3.28, 図 3.29 ではそれぞれ 62%, 20% であった。

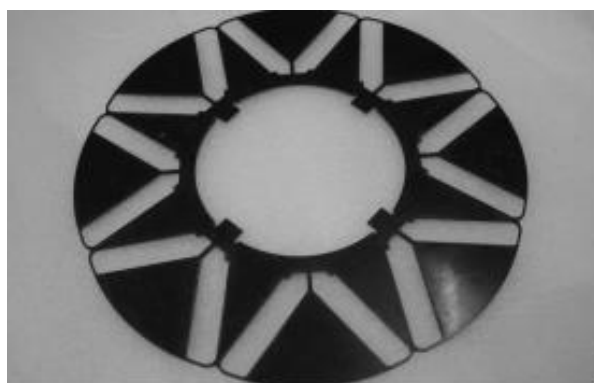


図 3.25 ロータコアの外観

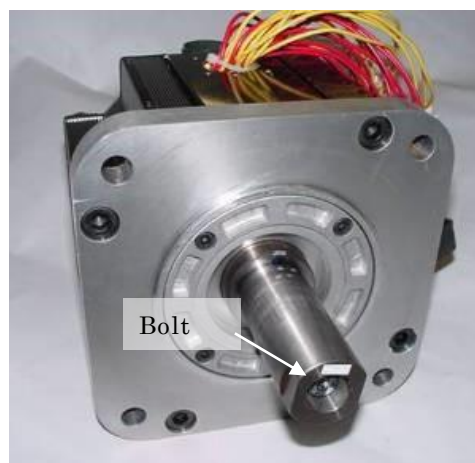


図 3.26 試作モータの外観

表 3.3 試作モータの仕様

Motor type	IPM
Number of Pole	8
Maximum torque	$58\text{ N}\cdot\text{m}$ ( at $2000\text{min}^{-1}$ )
Rotor size	$\phi 98.4\text{mm}$ , L42mm
Mass	14kg



図 3.27 EMF100%状態のロータ



図 3.28 EMF62%状態のロータ



図 3.29 EMF20%状態のロータ

#### 3. 4. 6 効率比較

3相 200V を電源として、弊社製の 22kW インバータを用い速度制御で、試作モータを駆動した。本インバータは磁極位置を回転角度上で任意に指令する機能を有する。2000 $\text{min}^{-1}$ 以上の回転速度では、磁極位置指令値を進み方向に修正し、弱め磁束制御と同様な駆動を行うことで、高速回転での効率評価を行った。

効率は、試作モータの機械的出力を電気的入力で除して算出した。機械的出力は速度計とトルクメータを用い、電気的入力は電力計を用いて測定した。

評価は、5種類の鋼板について、強度に応じた許容回転速度まで行った。そのため、X, Y, G は 12000 $\text{min}^{-1}$ まで、F は 16000 $\text{min}^{-1}$ まで、E は 22000 $\text{min}^{-1}$ まで駆動した。

図 3.30 に、それぞれ EMF100, 62, 20% 状態における最大効率-回転速度特性の比較を示す。モータを一定速度で回転しながら、接続した負荷機の負荷を 5 段階ほど上げてゆき、測定値より計算した効率のなかの最大値を回転速度に対して示している。最大効率となる弱め磁束電流の位相角を求めるため、各負荷状態で効率最大値とその前後計 3 種類の磁極位置指令値での測定値を得るようにした。図 3.30 に示した EMF100% 状態における 6000, 10000, 12000 $\text{min}^{-1}$ での最大効率はそれぞれ約 2.5, 7, 10kW で得られた。EMF62% 状態における 6000, 10000, 12000 $\text{min}^{-1}$ での最大効率はそれぞれ約 2.5, 5~7, 5~7kW で得られた。EMF20% 状態における 6000, 10000, 12000 $\text{min}^{-1}$ での最大効率はそれぞれ約 1.2, 1.3~1.8,

1.3～1.8kW で得られた。

5種類の鋼板すべてが比較できる  $12000\text{min}^{-1}$  までの効率を比較すると、全体的に大きな差が見られない。例えば、EMF100%では、 $2000\text{min}^{-1}$ において最大効率95%前後から  $12000\text{min}^{-1}$ にかけて88%前後まで低下するが、4つの回転速度でのすべての鋼板の効率の違いは2.5%であった。EMF62%も同様で、EMF20%では4%程度である。また、表3.2に示した特性から考えると効率は良い方から、G, F, X, Y, Eの順になると予想されたが、大きな差が見られなかった。強いて言えば電磁鋼板F, Gに対し、高強度鋼板X, Y, Eの効率の低下は、1～3%程度であった。効率に大きな差が見られなかった理由としては、特にロータコアで発生するヒステリシス損の寄与率が十分小さいことが考えられる。動作点の違いによる影響も大きな差が見られなかった。

X, Y, Eの効率は同等であり、製造メーカーの違いや焼入れ有無の違いが効率に与える影響も小さいことが確認できた。

図3.31に、それぞれEMF100, 62, 20%状態、 $12000\text{min}^{-1}$ における効率－出力特性の比較を示す。結果は同様に、F, Gに対し、X, Y, Eの効率の低下は、1～3%程度であった。

効率比較の結果は、全体的に測定誤差の範囲を出ないと考えられる。そこで、効率に影響を与える他の要因について述べる。試作モータは、負荷側と反負荷側のベアリングに開放形ベアリングを用いている。試作モータのベアリングサイズが大きく高速回転時のロスが大きかったため、応急的にグリスを除去し、鋼板の違いによる効率評価を実施した次第である。図3.31に示したHは、電磁鋼板Gに対しグリス封入形ベアリングを用いた場合の測定結果である。グリス封入形ベアリングは、図3.31のすべてのEMFにおいて効率の低下が見られる。EMFが小さい状態であるほど、出力が小さいほど効率の低下は大きい。ベアリングがグリス封入形か開放形ということに比べれば、鋼板の違いによる効率の差異は小さい。つまり、測定誤差はベアリングに起因するところが大きいものの、高強度鋼板のロータコアへの適用が効率を損なうことなく、高速回転化に有効な手段であることが実証できたと考える。

高強度鋼板をロータコアに用いることにより、伝達効率85%程度<sup>(60)</sup>と言われるオートマチックやCVT等の変速機を不要にできるため、15%の効率低下が1～3%程度の効率低下に改善できる。しかし、図3.30に示したように、少なくとも $15000\text{min}^{-1}$ 以上の回転領域では、効率が80%を下回り、オートマチックに劣る結果となっている。これは高強度鋼板の使用有無の問題ではなく、今後高速回転に適する適切なベアリングを使用するなどして改善できると考えている。



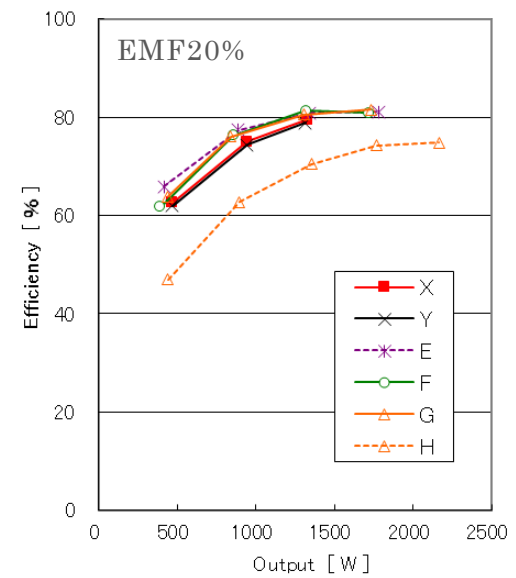
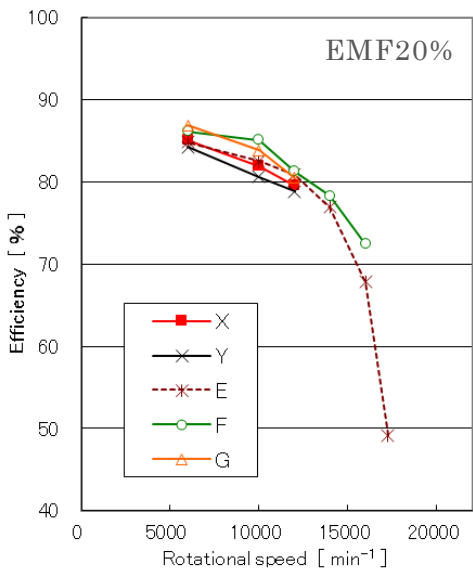
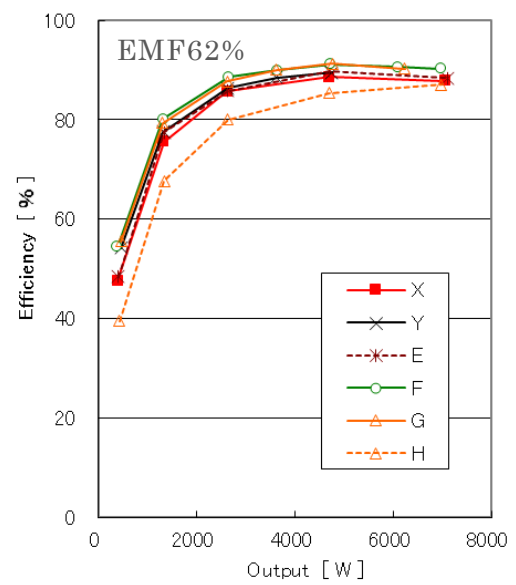
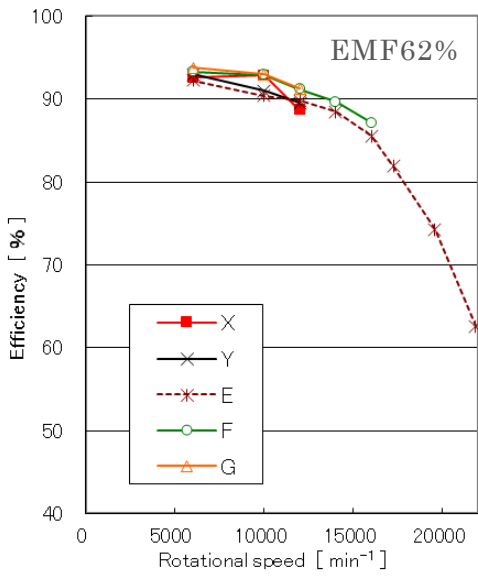
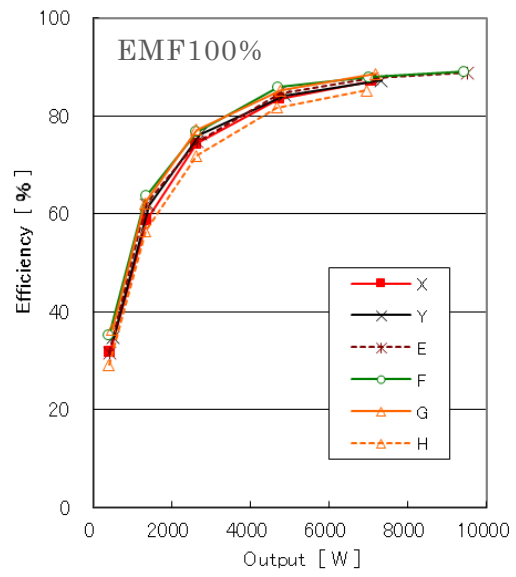
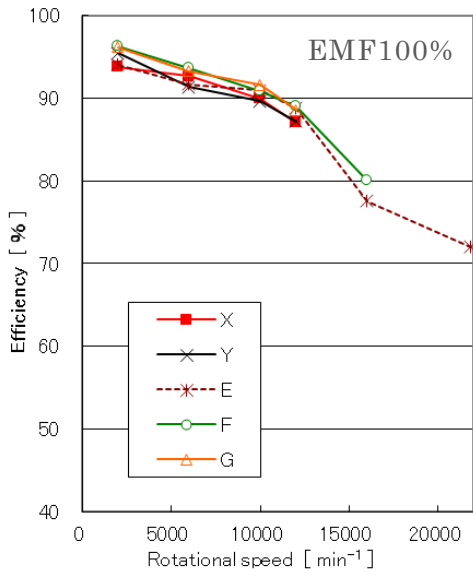


図 3.30 効率 - 回転速度特性

図 3.31 効率 - 出力特性(12000 $\text{min}^{-1}$ )

### 3. 5 まとめ

永久磁石可変界磁モータの研究に付随して生まれ、次章で説明する具体的な設計や試作に用いられた新技術として、「磁束集中 IPM モータ」、「加圧成形コイル」と「高強度鋼板ロータコア」について論じた。

「磁束集中 IPM モータ」では、3種類の磁束集中 IPM モータのロータ構造に関する適用性を論じた。サーボモータ用に試作した磁束集中 IPM モータの、高トルク化に対する課題と方策を述べた。

「加圧成形コイル」では、モータの高出力化を図るため、コイルの温度上昇を低減できる新しい構造を提案し、従来構造に対する効果を評価した。その結果、提案構造の放熱性能が従来構造に対し、2倍近く向上したことを確認できた。

「高強度鋼板ロータコア」では、高強度鋼板を IPM モータのロータコアへ適用し、高い耐遠心力強度を確認した。また、従来の電磁鋼板を用いた場合との効率比較では効率の低下は1~3%程度であった。EV モータを変速機なしで用いる目的に対して、高強度鋼板のロータコアへの適用は、IPM モータの高速回転化に有効な技術になると考えた。

## 第4章 可変界磁モータ要素試作：10kW

永久磁石可変界磁モータの広範囲高効率駆動について検討する。さらに、検討結果を確認するため、試験用永久磁石可変界磁モータを試作し、広範囲駆動に対する効率評価を行う。

### 4.1 目的

界磁の強さを連続的に変化させるモータとしては、既に磁束可変形永久磁石モータ<sup>(18)</sup>やハイブリッド可変磁力モータ<sup>(32)</sup>等の報告がある。これらには、界磁の強さを変化させる原理や、ある駆動状態において界磁を弱めることで効率が向上した事例が報告されている。しかし、1:10等の可変速範囲については実施の報告がなく、また、可変速範囲の回転速度において、出力に応じて界磁の強さをどのような値とすべきかを論じたものはない。例えば最大出力で1:10の可変速範囲を有するモータを最大回転速度最大出力状態で駆動する場合、界磁の強さは大きくすべきなのか小さくすべきなのかが明確にされていない<sup>(9)</sup>。

本章では永久磁石可変界磁モータの広範囲高効率駆動について検討した結果を報告する。広い可変速範囲のそれぞれの回転速度において、界磁の強さや電流位相角をどのような値にすれば最大出力制御が達成できるのか、また、それぞれの出力状態において、界磁の強さや電流位相角をどのような値にすれば最大効率制御が達成できるのかを明らかにする<sup>(37)(42)</sup>。

#### 4. 2 最大出力制御と最大効率制御に関する検討

界磁の強さや電流位相角をどのような値にすれば、最大出力制御や最大効率制御が達成できるかについて調べるとき、文献(38)には図 1.5 が示されている。これは巻線界磁式同期モータの V 特性としてよく知られる特性である。一定の出力状態において、効率が最大となる最適な界磁の強さがあり、効率は力率に大きく影響を受ける。

界磁の強さを、最大界磁状態を 1 とした誘起電圧の比で定義する界磁率で表すと、永久磁石可変界磁モータでも、効率が最大となる界磁率が得られるであろう。最大出力制御と最大効率制御に力率がどのように係わるのかを特に注目する。

そのために、まず広範囲駆動に関する限界について述べ、1 つめの検討内容として、弱め磁束制御と力率 1 制御が両立するか否かを調べる。最大効率状態で力率が 1 でない場合、力率が 1 になり得ないから 1 でないのか、なり得ても効率で劣るから 1 でないのかを知るためである。2 つめの検討内容として、計算により最大出力と最大効率となる界磁率や電流位相角を求め、力率を確認するとともに、最大出力制御と最大効率制御がどうあるべきかを明確にする。

##### 4. 2. 1 最大回転速度および最大出力の限界

広範囲駆動が意味するところの 1 つである最大回転速度の限界については、文献(58) に(4.1)式が示されている。

$$\omega_{\max} = \frac{V_{a\max}}{\Psi_a - L_d I_{a\max}} \dots \dots \dots (4.1)$$

ここに、 $\omega_{\max}$  : 電気角速度の最大値、 $V_{a\max}$  : 最大電圧、 $\Psi_a$  : 鎖交磁束、 $L_d$  : d 軸インダクタンス、 $I_{a\max}$  : 電流の最大値

(4.1)式は電流値を鎖交磁束に合わせて調整すれば、最大回転速度は電磁的には無限にできる(58)ことが示されている。そのため、実際の最大回転速度は、ロータの破壊強度によって決定される(11)。

広範囲駆動が意味するところのもう 1 つである最大出力の限界については、文献(38) に(4.2)式が示されている。

$$P = \frac{VE_0}{x_s} \sin\delta \dots \dots \dots (4.2)$$

ここに、 $P$  : 出力、 $V$  : 供給電圧、 $E_0$  : 誘起電圧、 $x_s$  : 同期リアクタンス、 $\delta$  : 負荷角

(4.2)式は、定められた供給電圧のもとでは、最大出力は、誘起電圧定数の大きさと同期リアクタンスの小ささにより決定されることが示されている(38)。例えば、界磁を大きくし、巻数を低減するほど最大出力を増大できる。電圧飽和に達しない回転域での最大出力制御については、文献(11)に示されている最大トルク／電

流制御で達成できる。

#### 4. 2. 2 弱め磁束制御と力率 1 制御の両立

電圧飽和より高速回転域では，弱め磁束制御を成立させる必要がある。そのため，弱め磁束制御を成立させる界磁率に対する電流位相角と，力率 1 制御を成立させる電流位相角に交点があるかないかを調べる。交点があれば，弱め磁束制御と力率 1 制御は両立する。検討に用いる特性式としては，文献(11) に習い，下式を用いる。

$$T = P_n(\Psi_a I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

$$V_a = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad \dots \dots \dots (4.4)$$

$$V_d = R_a I_d - \omega L_q I_q$$

$$V_q = R_a I_q + \omega L_d I_d + \omega \Psi_a$$

$$I_a = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad \dots \dots \dots (4.5)$$

$$I_d = -I_a \sin \beta$$

$$I_q = I_a \cos \beta$$

$$I_a = \sqrt{3} I_e$$

記号の説明は以下の通りである。

$I_a$  : d, q 軸モデル上の負荷電流 [Arms]

$I_d$  : d 軸電流 [Arms]

$I_q$  : q 軸電流 [Arms]

$I_e$  : 相電流 [Arms]

$\beta$  : 電流  $I_a$  の位相角

$\omega$  : 電気角速度 [s<sup>-1</sup>]

$V_a$  : d, q 軸モデル上の端子電圧または線間電圧 [Vrms]

$V_d$  : d 軸電圧 [Vrms]

$V_q$  : q 軸電圧 [Vrms]

$R_a$  : 巻線抵抗 [ $\Omega$ ]

$P_n$  : 極対数

$L_d$  : d 軸インダクタンス [H]

$L_q$  : q 軸インダクタンス [H]

簡単のために影響の小さい  $R_a$  を無視すれば，力率 1 制御に対する電流位相角  $\beta_p$  は次式のように計算される。

$$\beta_p = \sin^{-1}\{(-\Psi_a + \sqrt{B}) / A\} \quad \dots \dots \dots (4.6)$$

$$A = 2(L_q - L_d)I_a$$

$$B = \Psi_a^2 + 4(L_q - L_d)L_q I_a^2$$

同様に弱め磁束制御に対する電流位相角  $\beta_w$  は次式のように計算される。

$$\beta_w = \sin^{-1}\{(-D + \sqrt{D^2 - CE})/C\} \quad \dots \dots \dots (4.7)$$

$$C = (L_q^2 - L_d^2)I_a^2$$

$$D = \Psi_a L_d I_a$$

$$E = (V_a / \omega)^2 - \Psi_a^2 - L_q^2 I_a^2$$

(4.6)や(4.7)式による電流位相角が実際にどのような値となるかを、試作した可変界磁モータで求めてみる。ただし特性算出に関しては、 $L_d$ や $L_q$ は電流値や電流位相による影響を考慮しない。図 3.18 や図 3.26 で説明した試作モータの機器定数測定値(表 4.1)を(4.6)式に用いると、力率 1 制御を成立させる電流位相角  $\beta_p$  は図 4.1 に示す特性となる。図 4.1 は、仮に  $I_e$  を 20~80A としたときに、力率が 1 となる界磁率と電流位相角の分布を示している。実際のモータの界磁率は 0~1 の範囲でしか調整できないが、ここでは理解を助けるために 1.8 までの範囲で示している。例えば、 $I_e=20A$  に対しては、界磁率が 0.8 で電流位相角を  $30^\circ$  程度で通電することができれば力率は 1 となり、40A の負荷電流に対しては、界磁率が 0.9 で電流位相角を  $60^\circ$  程度で通電することができれば力率は 1 となる。力率 1 制御が可能な  $I_e$  の範囲は 50A までで、50A 以上では界磁が不足して、力率 1 は成立しないことがわかる。

表 4.1 試作モータの機器定数測定値

$V_a$	177 V
$P_n$	4
$\Psi_a$	0.0963 Wb
$R_a$	0.039 $\Omega$
$L_d$	0.0011 H
$L_q$	0.0011 H

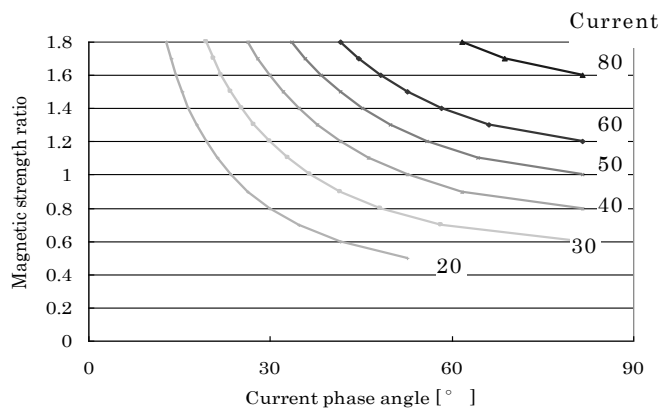


図 4.1 力率が 1 となる界磁率と電流位相角(計算値)

次に最大出力状態を意図した電流値 50A と中間出力状態を意図した電流値 30A について、(4.7)式を用いて弱め磁束制御に対する電流位相角  $\beta_w$  を求めると、例えば  $I_e=50A$  に対しては図 4.2 に示すようになる。回転速度が影響しない力率 1 制御に対して、弱め磁束制御の条件は回転速度によって大きく変化する。例えば  $20000\text{min}^{-1}$  において、界磁率を 1、電流位相角を  $80^\circ$  程度とすることで、弱め磁束制御と力率 1 制御が両立でき、 $I_e=50A$  に対し  $15.3\text{kW}$  に近い最大出力が得られることがわかる。界磁率を 1 に固定したまま、より低い回転速度においても弱め磁束制御による駆動はできるが、力率は低下し、その分、出力も低下する。

図 4.3 に  $I_e=30A$  に対する電流位相角を示す。 $5500\text{min}^{-1}$  以上の回転速度において、界磁率が  $0.6\sim 1$  の範囲において、弱め磁束制御と力率 1 制御が両立できる。

以上より、最大出力状態では、界磁率が 1 で高速回転域において、弱め磁束制御と力率 1 制御が両立する。それより低速回転側においては力率 1 で駆動することはできない。出力が小さくなると力率 1 となる界磁率も低下し、より広い範囲で弱め磁束制御と力率 1 制御が両立できることが分かった。

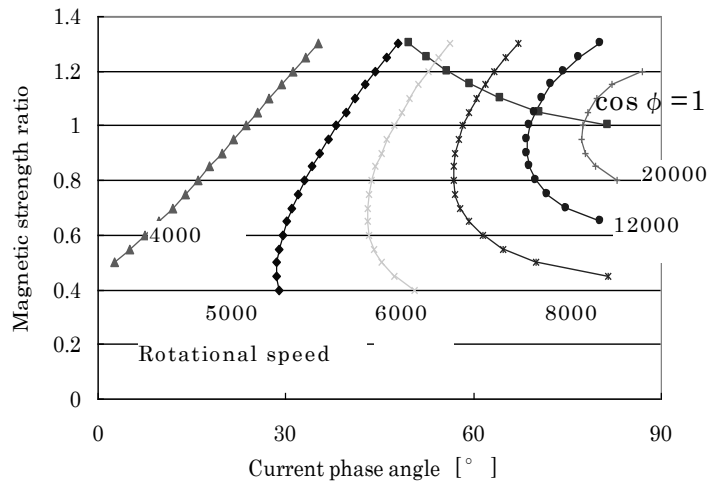


図 4.2 弱め磁束制御電流位相角(50A) (計算値)

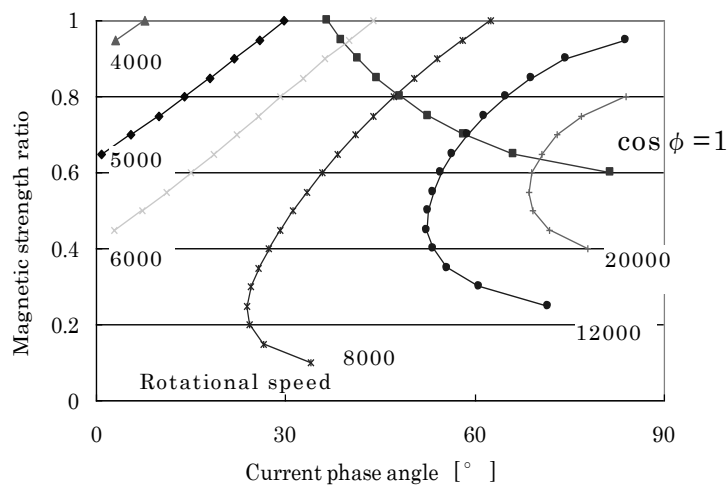


図 4.3 弱め磁束制御電流位相角(30A) (計算値)

#### 4. 2. 3 最大出力と最大効率の計算例

ここでは、(4.3)～(4.5)式において銅損を考慮し、実測値による無負荷損失を加え、最大出力と最大効率となる界磁率と電流位相角を求める。界磁率と電流位相角の選択可能範囲の回転速度と出力に対する傾向を見るため、回転速度として  $5000 \text{ min}^{-1}$  と  $20000 \text{ min}^{-1}$ 、出力として  $4 \text{ kW}$  と  $12 \text{ kW}$  を例に説明する。

図 4.4 に、試作モータを  $5000 \text{ min}^{-1}$ ,  $4 \text{ kW}$  で駆動できる界磁率と電流位相角を示す。図では効率を濃淡で示した。試作モータは、駆動できる範囲は広いが、電流位相角を小さくする方が効率は良いことがわかる。最大効率は電流位相角が  $0^\circ$  で、界磁率を  $0.58$  とした場合で、このとき  $0.969$  である。

図 4.5 に、 $5000 \text{ min}^{-1}$ ,  $12 \text{ kW}$  で駆動できる界磁率と電流位相角を示す。出力が大きいため、界磁率も  $0.8$  以上が必要なことがわかる。最大効率は界磁率が最大で電流位相角が駆動可能範囲の最小値とした場合で、このとき  $0.97$  である。

図 4.6 に、 $20000 \text{ min}^{-1}$ ,  $4 \text{ kW}$  で駆動できる界磁率と電流位相角を示す。選択できる範囲が狭くなり、高速回転になるほど、界磁率と電流位相角の繊細な調整が必要となることがわかる。最大効率は駆動可能範囲のなかで、界磁率も電流位相角も最小値とした場合で、このとき  $0.922$  である。

図 4.7 に、 $20000 \text{ min}^{-1}$ ,  $12 \text{ kW}$  で駆動できる界磁率と電流位相角を示す。界磁率は  $5000 \text{ min}^{-1}$  の場合と同じく  $0.8$  以上が必要である。界磁率と電流位相角のさらに繊細な調整が必要となる。最大効率は、駆動可能範囲のなかで、界磁率も電流位相角も最小値とした場合で、このとき  $0.881$  である。

これらの傾向を見て、次のことがわかる。 $5000 \text{ min}^{-1}$  においても  $20000 \text{ min}^{-1}$  においても、出力が小さい場合には、広い範囲の界磁率が選択でき、様々な効率や力率の状態でも駆動できる。出力を上げるに従い大きな界磁率に限られていき、最後には界磁率が  $1$  で電流位相角も  $1$  つの点に収束する。その状態で駆動することが最大出力制御となる。

中間出力状態では、最大効率点は、駆動可能範囲のなかで界磁率も電流位相角も最小値とした付近にある。その状態で駆動することが最大効率制御となる。

図 4.8 に、最大効率状態を回転速度と出力の全範囲について求めた可変界磁率マップを示す。図 4.9 は、界磁率を  $1$  に固定した場合の効率マップである。両者の違いは低出力状態において見られる。図 4.10 は、図 4.8 に示した最大効率状態の力率マップであり、図 4.11 は、界磁率マップである。

従来の IPM モータの最大効率ベクトル制御は、銅損や鉄損とその他の損失の総和が最小値となる位相角で駆動することであった。可変界磁モータの最大効率制御は、さらに界磁も調整して実現される。前節の検討結果より、高速回転域では最大出力から低出力まで力率  $1$  制御が可能であるにもかかわらず、その範囲の力率は  $0.8$  程度の部分が多い。これより、可変界磁モータは、低出力時に界磁率を調整して力率を  $1$  にするよりも、さらに界磁率を下げ、弱め磁束電流を下げて効率を向上できることがわかる。これは、力率を  $1$  にして電流を下げて銅損を下げるよりも、界磁率を下げ鉄損を下げる寄与率の方が大きいと考えられる。



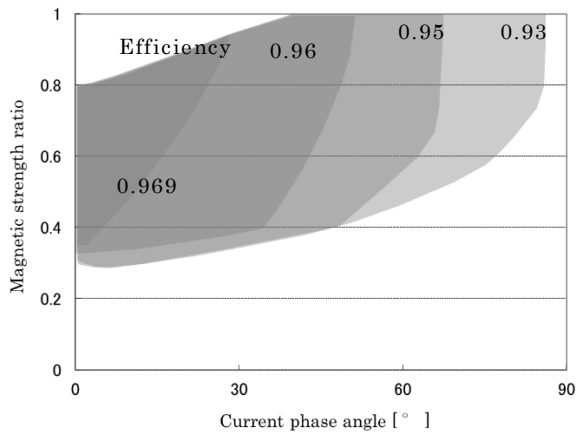


図 4.4 駆動範囲(5000min<sup>-1</sup>,4kW) (計算値)

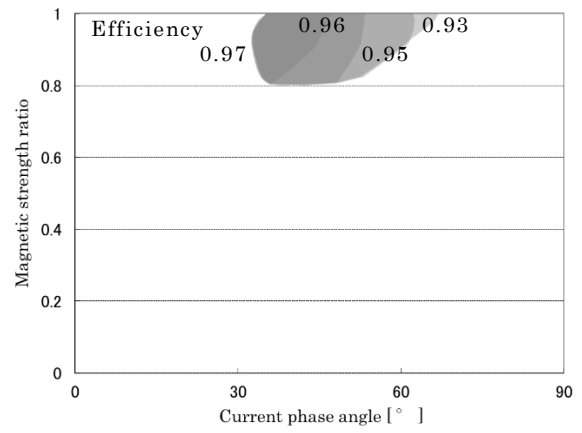


図 4.5 駆動範囲(5000min<sup>-1</sup>,12kW) (計算値)

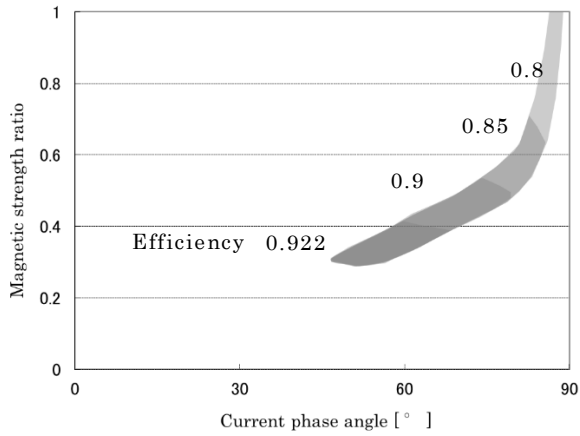


図 4.6 駆動範囲(20000min<sup>-1</sup>,4kW) (計算値)

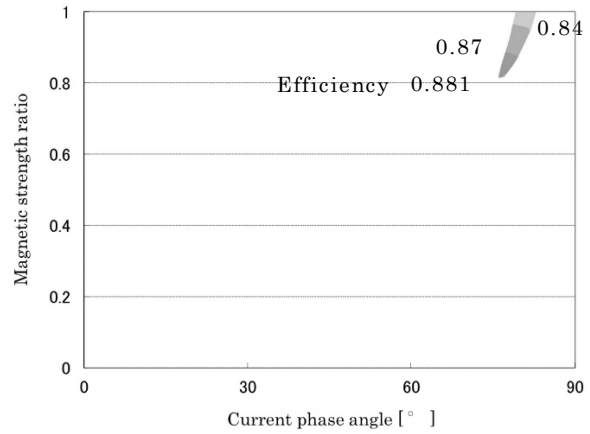


図 4.7 駆動範囲(20000min<sup>-1</sup>,12kW) (計算値)

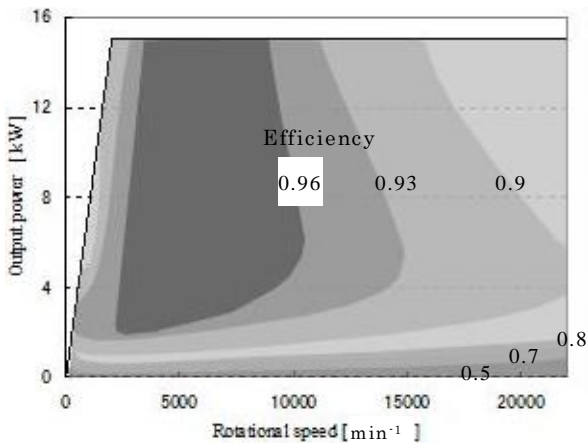


図 4.8 可変界磁効率マップ(計算値)

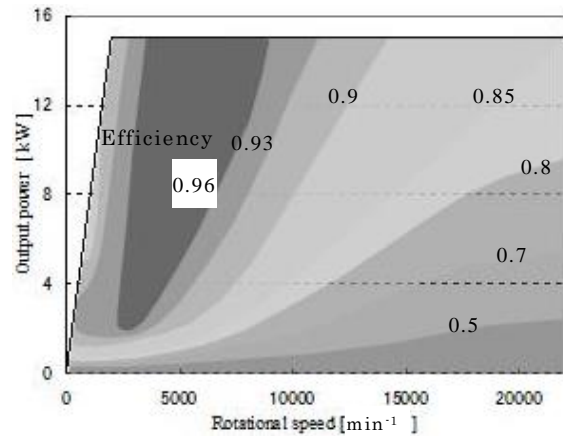


図 4.9 固定界磁効率マップ(計算値)

最大出力は供給される最大電圧で制限される。モータへ印加された電圧はおおよそ  $2000 \text{ min}^{-1}$  で最大電圧に達し、 $22000 \text{ min}^{-1}$  に至るまで最大電圧で駆動される。限られた電圧に対しより大きな出力を得るためには、ロータの界磁を最大に調整しなければならない。本試作では磁束を集中し界磁の増大を図っているが、例えば、永久磁石をさらに強化することができれば、最大出力はさらに増大できる。

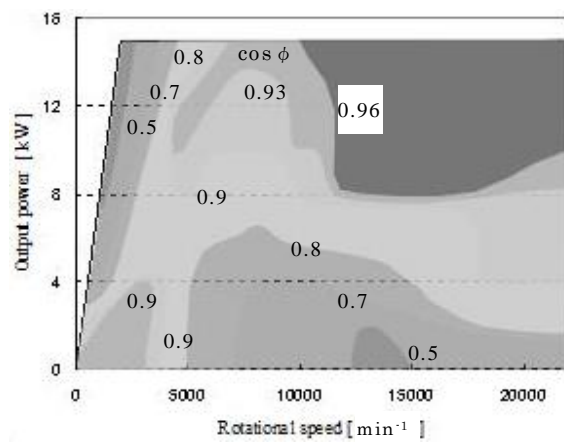


図 4.10 力率マップ(計算値)

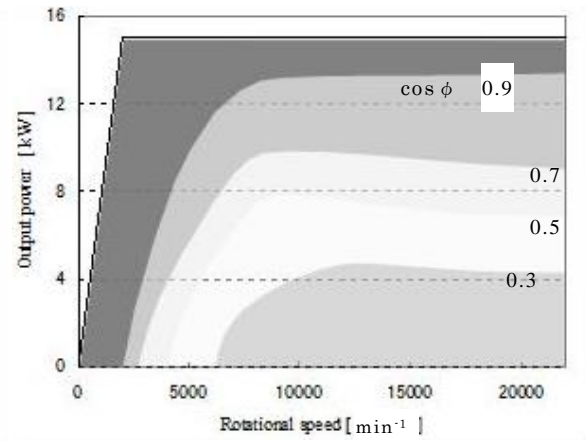


図 4.11 界磁率マップ(計算値)

## 4. 3 検討結果の試作モータによる検証

### 4. 3. 1 可変界磁と固定界磁との効率比較

前節で得られた駆動に関する検討結果を確認するため、試験用永久磁石可変界磁モータを試作し、広範囲駆動に対する効率評価を行った。効率評価は、最大回転速度  $22000 \text{ min}^{-1}$ 、最大出力  $10\text{kW}$  の範囲内で行われ、固定界磁に対して最大  $20\%$ 以上の効率向上を確認した。

可変界磁モータの界磁の強さや電流位相角をどのような値にすれば、最大出力制御や最大効率制御が達成できるかについて調べ、検討結果を実証する。

図 3.18 や図 3.26 で説明した本試作モータの仕様は、表 3.3 で示した通りである。ロータ表面での最大接線力は  $9.1\text{N/cm}^2$ 、トルク密度は  $4.1\text{N}\cdot\text{m/kg}$  となり、試作モータは十分に高トルク密度である。図 3.26 で説明したように試作ロータは、シャフト先端に装着されたボルトを手動で回転させることで界磁率を変化できる。駆動に用いるインバータは速度制御を行い、ベクトル制御の位相角を変更できる。試作モータの負荷試験を行い、これまでの検討結果の妥当性を検証する。ロータの相対角と位相角を変化させ、所定の回転速度と出力について、効率が最大となる状態を調べた。効率はモータの機械的出力を電気的入力で除した値である。

図 4.12 に試作モータの効率マップ測定値を示す。効率マップは、相対角  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  について効率評価を行ったうちの、最大効率となった測定結果である。図 4.13 に試作モータの界磁を最大値で固定した場合の効率マップを示す。回転速度については遠心力に対する機械的強度限界計算値の  $22000\text{min}^{-1}$  まで、出力については各回転速度において出し得る最大出力まで行った。

2つのマップを見比べると、低出力状態において界磁を変化させた場合の方が効率は良い。例えば、約  $12000\text{min}^{-1}$  の回転速度における効率を見ると、最大出力近くでは、界磁を変化させた場合も最大値で固定した場合も約  $90\%$  である。しかし、界磁を最大値で固定した場合は低出力になるほど効率が低下し、約  $2\text{kW}$  以下ではその差異は  $20\%$ 以上となっている。他の回転速度においても同様な傾向が見られるが、高速回転になるほど効率の差は大きくなっている。最大効率は、どちらも約  $95\%$  であり、 $2000\text{min}^{-1}$ 、約  $3\text{kW}$ 、界磁が最大状態において得られた。

最大出力については、相対角  $0^\circ$  の場合に限り約  $10\text{kW}$  までの駆動が行えた。測定時の線間電圧最大値は約  $250\text{V}$ 、最大相電流は約  $35\text{A}$  であった。最大出力が図 4.8 に示した計算結果を下回った理由としては、計算値に用いたインダクタンス  $L_d, L_q$  が過小であったことが考えられる。

図 4.13 において右下の白色部分は、モータを始動できず評価ができなかった範囲である。この原因は、使用したインバータでは、駆動中に位相角の変更ができず、大きな位相角を入力すべき範囲では、始動トルクが不足したためである。駆動中に位相角が回転速度とともに増大できるインバータを用いれば、より大きな効率の差異が明確になると考える。

図 4.14 は、図 4.12 に示した最大効率状態の相対角 (relative rotation angle)

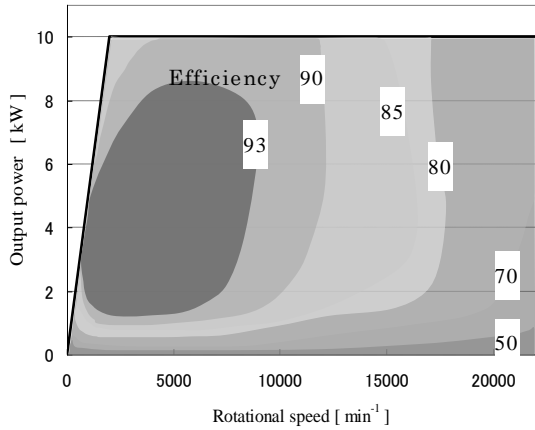


図 4.12 効率マップ（可変界磁）

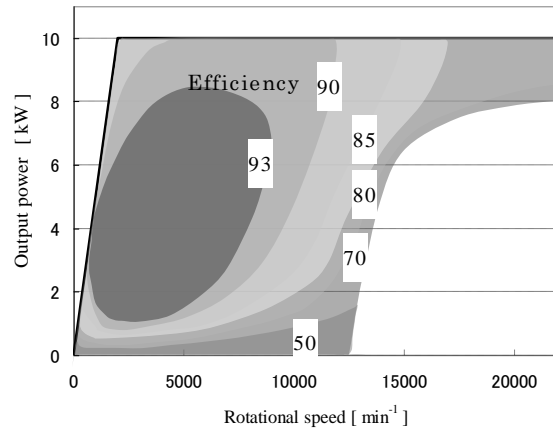


図 4.13 効率マップ（固定界磁）

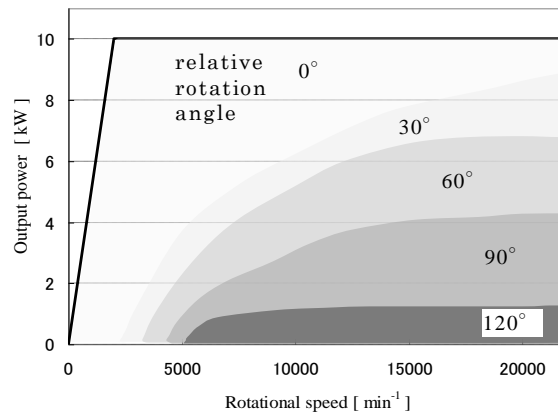


図 4.14 相対角マップ

マップである。相対角に対する測定結果からは、図 4.11 に示した通り、基底回転速度以上の回転速度において、可変界磁モータは、界磁率の増大に伴い出力を増大でき、中間出力状態の最大効率制御では、界磁率を下げ、弱め磁束電流を下げ、効率を向上できることが確認できた。

#### 4.3.2 特性の検証

図 4.15 は試作モータの相対角に対する誘起電圧の変化の様子を示している。試作モータの相対角は連続的に増減することができるため、誘起電圧も連続的に可変できる。

図 2.1 で説明したように、永久磁石を V 字に配置した IPM モータでは、ロータ内において異なる磁極が軸方向に揃うことで、永久磁石から発した磁束がロータ内で軸方向に短絡し、その分ロータから出てゆく磁束自体が減少する。この場合、ステータコアを通過する磁束が減少するため、ステータコアに発生する鉄損を低減することができる。

図 4.16 に試作モータの無負荷損失を示す。試作モータを別のモータで回転させ、各々の回転速度に対して要した入力を損失として示した。4000min<sup>-1</sup> から 20000min<sup>-1</sup> までの回転速度範囲において、相対角を 0° とした場合の損失は、相対角を 120° とした場合の損失の 2~3 倍であった。相対角を大きくすると鉄損が減少することを確認した。以下この理由について述べる。

図 4.17 は、4000min<sup>-1</sup> 以下の回転速度における図 4.16 に示したものと同様な比較を行ったものであるが、ロータに装着する永久磁石を除去した場合の損失を加えて比較している。相対角を 120° とした場合の損失は、永久磁石を除去した場合の損失と差異が小さいため、鉄損をほとんど含んでいないことがわかる。

これは、相対角を大きくした状態では、ロータから出ていく磁束自体が減少し、ステータコアで発生する鉄損が減少したためと考える。この鉄損の低減が、特に高速低負荷域において、可変界磁モータの効率を向上させる大きな要因であると考える。

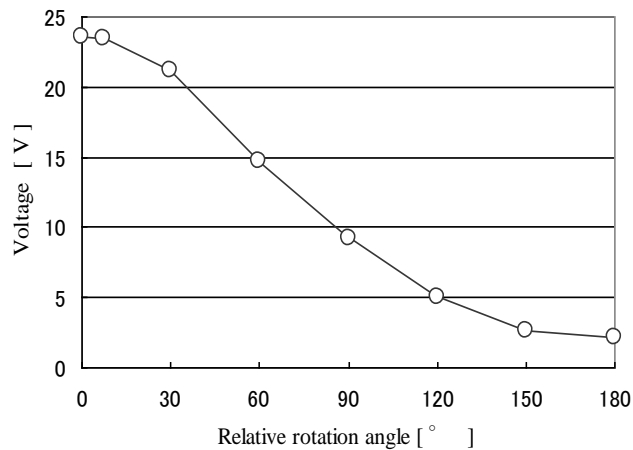


図 4.15 界磁率マップ

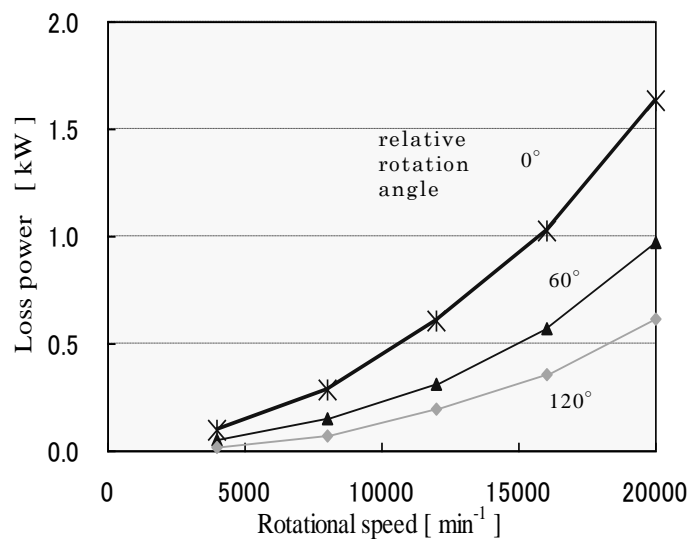


図 4.16 無負荷損失(4000~20000min<sup>-1</sup>)

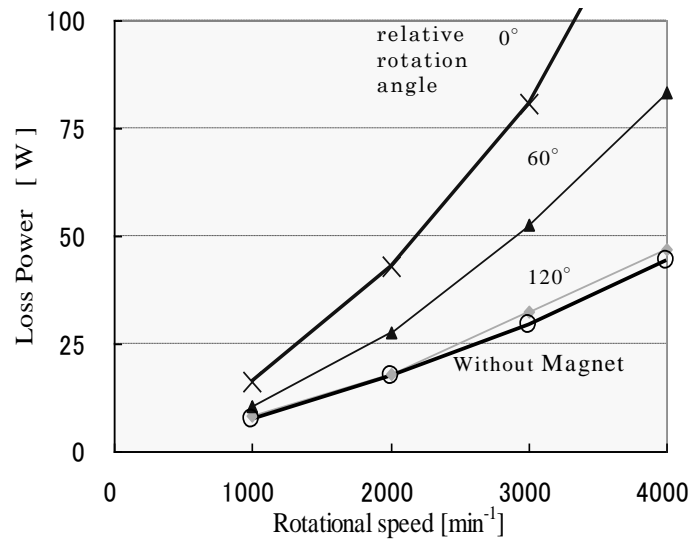


図 4.17 無負荷損失(1000~4000min<sup>-1</sup>)

#### 4. 4 まとめ

EV モータの広範囲高効率駆動を実現するために新構造の永久磁石可変界磁モータを試作し，広範囲駆動に対する効率評価をおこなった。

試作モータの効率評価は，最大回転速度 22000 min<sup>-1</sup>，最大出力 10kW の範囲内で行われ，固定界磁に対して最大 20%以上の効率向上を確認した。

可変界磁モータの界磁の強さや電流位相角をどのような値にすれば，最大出力制御や最大効率制御が達成できるかについて調べ，次のことがわかった。

- (1) 界磁率の増大に伴い出力が増大するため，最大出力制御では，すべての回転速度において界磁率を 1 とする。
- (2) 中間出力状態の最大効率制御では，界磁率を調整して力率を 1 にするよりも，さらに界磁率を下げ，弱め磁束電流を下げた方が効率を向上できる。

## 第5章 可変機構付可変界磁モータ：52kW

EV用52kW永久磁石可変界磁モータとして、可変機構付永久磁石可変界磁モータの設計と試作を行い、その基本特性について評価する。さらに、ベクトル制御における電流位相角をより広範囲に制御し、同時に界磁を調整する方法としてマップ制御を行い、その動作結果を検証する。

### 5.1 目的

軽自動車から小形の普通自動車程度のエンジンと変速機を組み合わせた出力範囲を網羅できるEV用52kW永久磁石可変界磁モータとして、最大トルク200N・mで、最大回転速度20000min<sup>-1</sup>を目標にモータ開発する。

界磁を可変するために、高速で回転しているロータの中央の磁極を相対的に回転させる必要がある。この要求を満たしつつ、低損失となるような界磁可変機構を開発する。

永久磁石可変界磁モータは界磁が変化すると誘起電圧定数やトルク定数などのモータ定数が変化するため、固定界磁モータを駆動するための従来インバータではベクトル制御の位相角を広範囲に制御できず、モータを駆動することができない<sup>(42)</sup>。また、インバータには界磁を調整する機能がない。そのため、モータの駆動状態に合わせて界磁とインバータの指令が適切に制御される永久磁石可変界磁モータの駆動システムを開発する<sup>(61)(19)</sup>。

## 5. 2 提案する永久磁石可変界磁モータの構成と諸元

### 5. 2. 1 設計仕様

2. 1 節で示したロータ構造を用いた可変機構付可変界磁モータの試作を検討した。本試作では EV 用のモータを想定し、目標トルクを  $200\text{N}\cdot\text{m}$  で、軽自動車から小形の普通自動車程度のエンジンと変速機を組み合わせた出力範囲を網羅できることを狙いとした。形状に関しては、HEV などではエンジンと軸方向に並列で置かれることが多いため扁平形状が好まれるが、EV モータとしての車載性を考慮して、径方向に小さいレイアウトとした。この試作モータの諸元を表 5.1 に示す。

### 5. 2. 2 電磁設計

モータの電磁設計としては、トルクなどの要求は満たしながら、極力銅損と鉄損を低減する必要がある。2 節に示したように、弱め磁束電流による銅損は可変界磁にすることで低減されるため、本節では主に鉄損の低減について検討した。

鉄損はヒステリシス損と渦電流損に分類され、それぞれ次式で表される<sup>(62)</sup>。

$$P_h = k_h f B_m^{1.6} \quad (\text{ヒステリシス損}) \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

$$P_e = k_e \frac{(t B_m)^2}{\rho} \quad (\text{渦電流損}) \quad \dots \dots \dots (5.2)$$

$P_h$  ヒステリシス損,  $P_e$  渦電流損,  $f$  周波数

$k_h$  ヒステリシス係数,  $k_e$  渦電流係数,

$B_m$  最大磁束密度,  $\rho$  磁性体の抵抗率,  $t$  鋼板の厚さ

(5.1), (5.2) 式に示されるように、鉄損はコアを通る磁束密度  $B_m$  や周波数  $f$ 、ヒステリシス係数  $k_h$ 、渦電流係数  $k_e$  などにより決定される。単純に磁石を減らして  $B_m$  を下げようとするのはギャップの磁束密度  $B_g$  を下げることになり、高トルク化や広出力範囲化の要求に反するため、極力ギャップの磁束密度を落とさない施策が好ましい。これらを元に以下の施策を行った。

表 5.1 試作モータの諸元

Number of poles	8
Number of slots	12
Maximum output power	52 kW
Maximum torque	225 N·m
Rotational speed	20000 min <sup>-1</sup>
Outside diameter of case	180 mm
Length <sup>※1</sup>	301 mm
Weight	29 kg
Power supply voltage	400 V <sub>ac</sub>

※1 The length does not include a shaft.



- (a) ステータコア形状 高調波成分を低減することを目的とし、ステータコア形状を図 5.1 に示すように全閉スロット構造とした。全閉スロットにすることでティースを通る磁束は若干下がるが、高調波成分を大きく低減することができる。
- (b) ステータ材料 鉄損の式の各係数  $k_h$ ,  $k_e$  や  $t$  を下げる方法としては、ステータコアの材料として、ヒステリシスが小さく薄肉の電磁鋼板を選択した。
- (c) ステータ寸法 ギャップの磁束密度  $B_g$  を下げずに、ステータコアの磁束密度  $B$  を下げることが検討した。ティース幅を広げることでティースの磁束密度は下げられるが、それに反してコイルスペースは圧迫されることになり、銅損の増加に繋がる。大形のモータでは比較的鉄損が支配的であることや、弱め磁束電流による銅損については可変界磁により低損失化されることから、最大出力時の巻線電流密度が実用的となる範囲でティース幅を極力広げた。

### 5. 2. 3 可変機構の設計

界磁を可変するために、高速で回転しているロータの中央の磁極を相対的に回転させる必要がある。この要求を満たしつつ、低損失となるような機構を検討した。まず機構の仕組みについて述べる。図 5.2 に界磁を可変とする機構（以下、可変機構と呼ぶ）の一部を示す。3 分割されたロータの、中央の磁極の半径方向内側に捻りスプラインがあり、雄側と雌側が噛み合っている。この雄側の捻りスプラインと接続されたプッシュロッドがロータの反負荷側から出ており、これを軸方向に押し引きすることで雄側の捻りスプラインが連動し、中央の磁極が相対的に回転する。この際、モータが運転中であればロータは高速で回転しているため、プッシュロッドも高速で回転している。このプッシュロッドを押し引きさせるために、先端に軸方向荷重を受けながら回転することができるアンギュラ玉軸受を設け、軸受の外輪を押し引きすることで、止まっているアクチュエータにより高速回転しているロータを回動させることが可能となる。プッシュロッドの位置を制御することで、ロータ中央部を任意の相対角に調整できる。

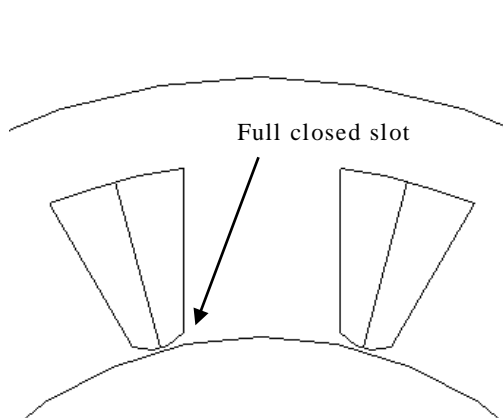


図 5.1 ステータコア形状

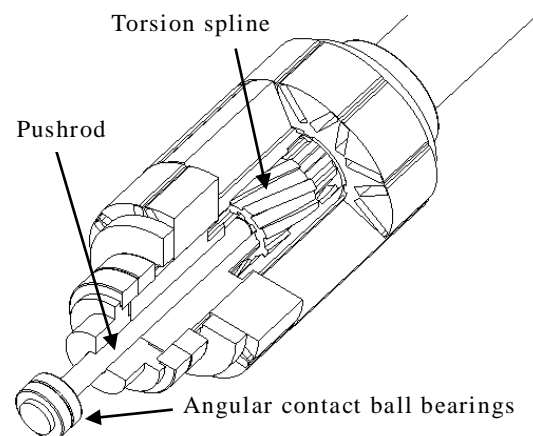


図 5.2 可変機構

この機構ではプッシュロッドを軸方向に押し引きすればよいので、要求するコストや精度に合わせた、任意の直動アクチュエータを取り付けることで界磁を制御することが可能である。この可変機構による損失の増加については、プッシュロッドに付いたアンギュラ玉軸受によるものが追加されることになる。損失の増加を避けるため、小径の軸受を選んだ。捻りスプラインはすべり摩擦を伴っており、定常状態における駆動では可変機構は動かないため、EVのような用途ではここでの損失は非常に少ない。

#### 5. 2. 4 試作モータ

可変機構を適用した永久磁石可変界磁モータを試作した。図 5.3 にモータの外観と、図 5.4 にロータの外観を示す。5. 2. 3 節で示したプッシュロッドは、ウォーム減速機 (Worm speed reducers) などを介したサーボモータ (Control motor) により押し引きが可能である。

出力密度は電磁部では約  $15 \times 10^6 \text{ W/mm}^3$ 、ケース等を含めたモータ全体としては約  $8 \times 10^6 \text{ W/mm}^3$  であった。また、可変機構によるモータ体積の増加は 2 割程度である。モータ駆動に用いたインバータやコントローラは汎用品である。

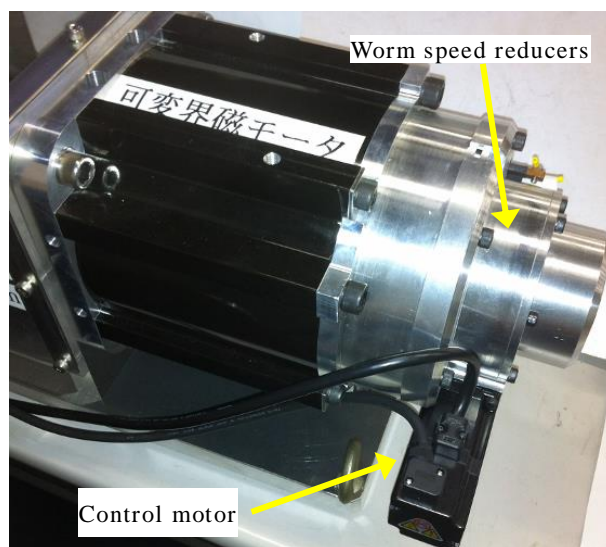


図 5.3 試作モータ

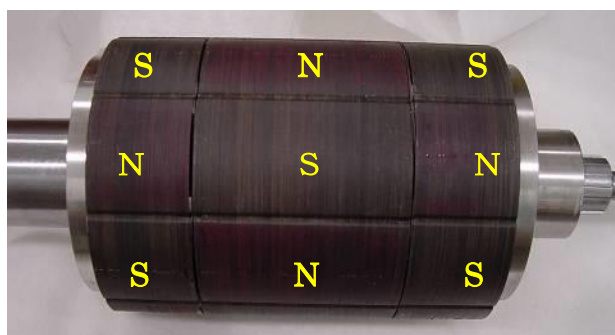


図 5.4 最小界磁状態のロータ

### 5.3 特性評価結果

#### 5.3.1 誘起電圧と無負荷トルク

図 5.5 および図 5.6 に、相対角と誘起電圧の関係を示す。相対角が大きいほど誘起電圧が小さくなっていることがわかる。相対角が  $0^\circ$  のときが最大界磁状態であり、誘起電圧定数は  $37.1\text{mV}/\text{min}^{-1}$  であった。相対角が  $180^\circ$  のときが最小界磁状態であり、 $0.01\text{mV}/\text{min}^{-1}$  であった。このロータではサーボモータにより相対角を変えることで、誘起電圧定数を  $0\sim 100\%$  まで任意の値に変化させることが可能である。

#### 5.3.2 最大トルク

図 5.7 に、最大界磁状態におけるモータ無回転時のトルクと電流の関係を示す。最大で  $225\text{N}\cdot\text{m}$  と、設計目標である  $200\text{N}\cdot\text{m}$  以上のトルクを出すことが出来ていることがわかる。

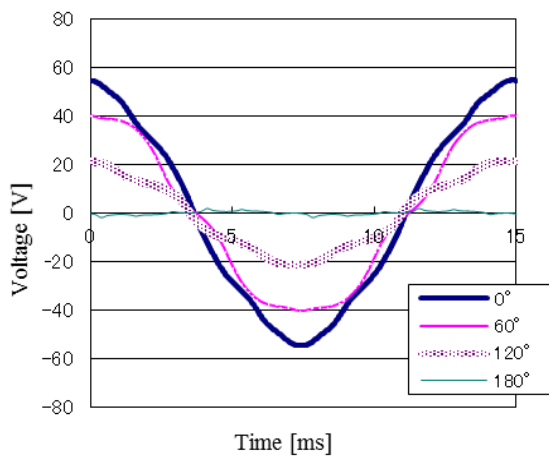


図 5.5 誘起電圧波形

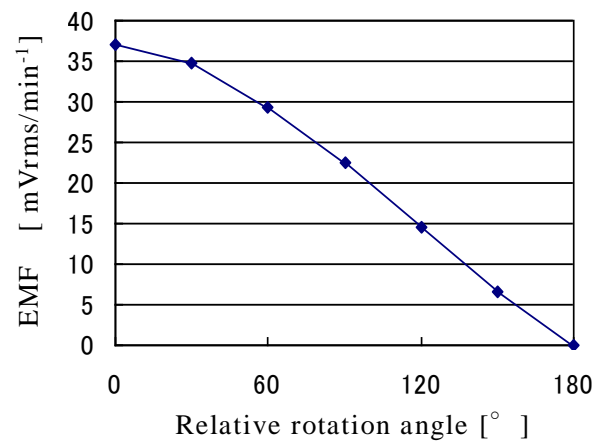


図 5.6 誘起電圧特性

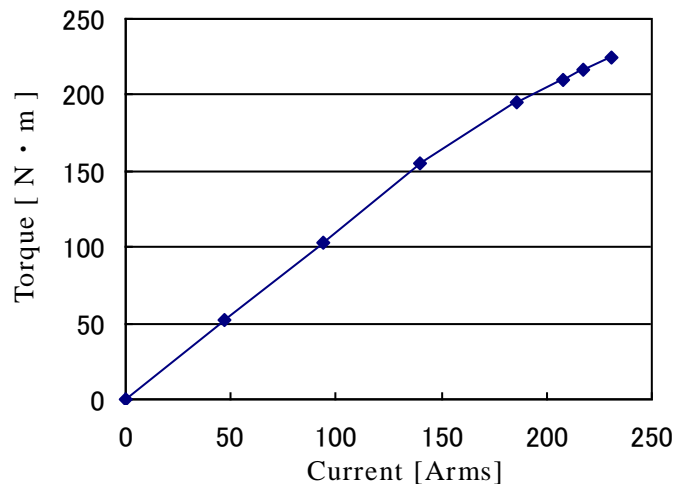


図 5.7 トルク特性

### 5. 3. 3 可変機構のアクチュエータによる損失

可変界磁の最も単純な動作として、図 5.8 に、相対角を  $180^\circ$ （最小界磁状態）から  $0^\circ$ （最大界磁状態）まで動かした後 0.5 秒停止し、再び  $180^\circ$  へ戻したときの、サーボモータのトルク指令を示す。この図より、①界磁を強める動作時にはサーボモータはトルクを約 70%出す必要があるが、③弱める動作時にも約 10%のトルクが必要になることがわかる。これは捻りスプラインのリード角を調整し、セルフロック条件を満たすように設計しているため、減磁時にもわずかなトルクを必要とするためである。定常状態では、このセルフロックによりサーボモータは原則動く必要がない。仮に常に動いているとしても、サーボモータによる損失は平均で 90W 程度であった。この損失の大きさについて、は最大出力 52kW のモータに対して大きな損失にはならないことがわかる。

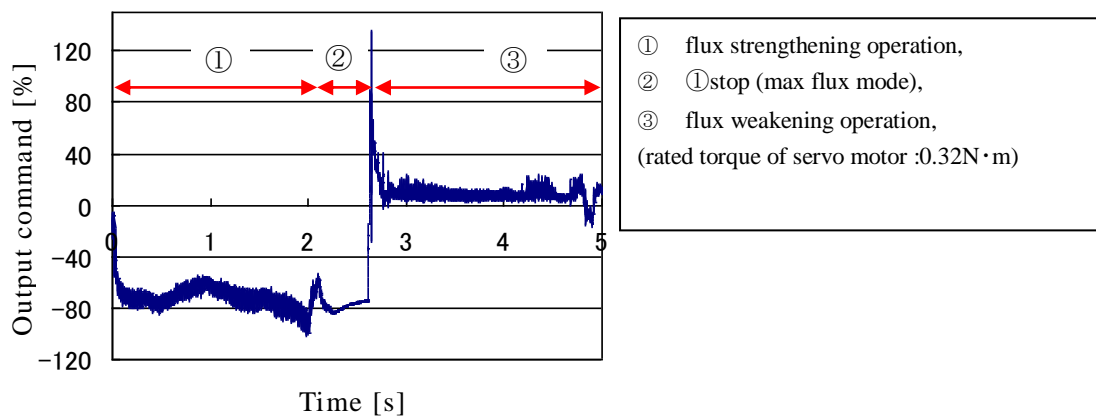


図 5.8 サーボモータのトルク指令

### 5. 3. 4 無負荷トルク

図 5.9 に相対角と、提案する永久磁石可変界磁モータを外部から回すことで得られる無負荷トルク（外部モータの出力トルク）との関係を示す。無負荷トルクは基底回転速度の  $3000\text{min}^{-1}$  で  $0.7\text{N}\cdot\text{m}$  であった。図 5.7 で示した最大トルク  $225\text{N}\cdot\text{m}$  に対する無負荷トルクの割合は 0.31%と非常に低い。さらに、相対角を大きくすると無負荷トルクはさらに低減することがわかる。しかし、図 5.6 では相対角  $180$  度するとき、誘起電圧が 0 となっているが、無負荷トルクは回転速度によって異なる無負荷トルクとなった。これはロータ内でキャンセルしきれなかった磁束による、渦電流損が原因であると考えられる。なお、この無負荷トルクのうち、可変界磁機構のために付加したアンギュラ玉軸受により増加したトルクは  $3000\text{min}^{-1}$  時でも約  $0.05\text{N}\cdot\text{m}$  程度で、可変機構による無負荷トルクは十分に小さいことが確認できた。

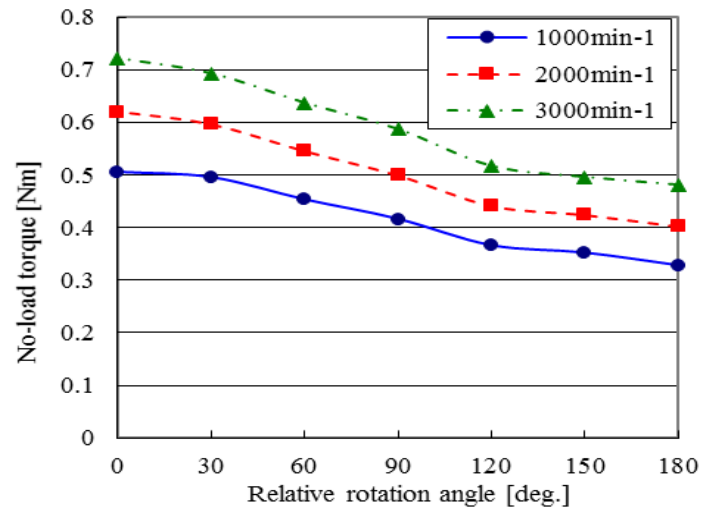


図 5.9 無負荷トルク

## 5. 4 提案する永久磁石可変界磁モータの制御方法

### 5. 4. 1 駆動システム

提案する永久磁石可変界磁モータの駆動システムでは、運転者によるアクセルペダルの踏み込み量を出力指令として、加減速が行われることを想定している。すなわち、出力指令に応じて、所望の出力が得られるように、同時に効率が良くなるように、界磁率や電流値が自動で制御される。この要求を実現するためには、提案する永久磁石可変界磁モータ（VMFM）の制御用モータを除いたものをモータ本体と呼ぶことにすれば、モータ本体と制御用モータをそれぞれ制御する必要がある。

図 5.10 に駆動システムを示す。本駆動システムはモータ本体と制御用モータをそれぞれ制御するため、インバータおよび制御用モータドライバの上位にコントローラが接続されている。コントローラは、出力指令と可変界磁モータから送られてくる回転速度情報により適切な指令をインバータと制御用モータドライバからモータ本体と制御用モータにそれぞれ送る。

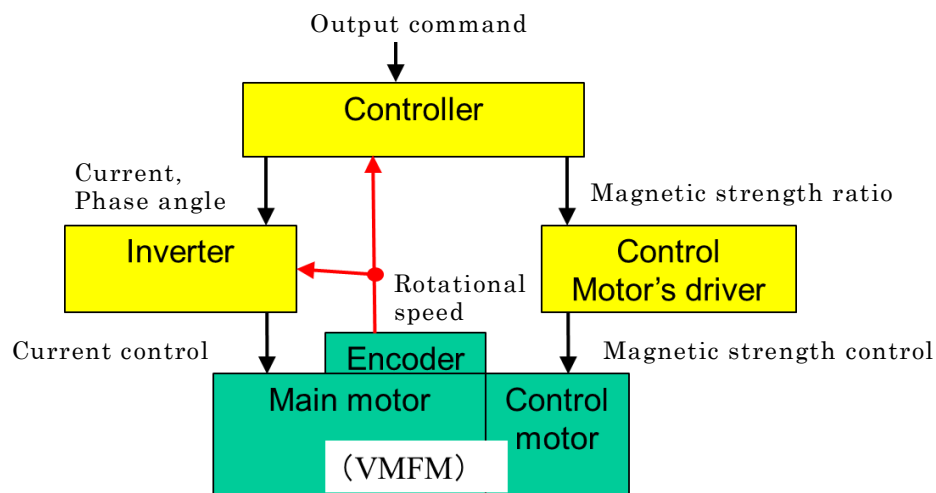


図 5.10 駆動システム

### 5. 4. 2 マップ制御

提案する永久磁石可変界磁モータは駆動状態に応じて、適切な指令をインバータと制御用モータドライバに送る必要がある。そこで、コントローラは、出力指令とモータ本体の回転速度を入力として受け、インバータに電流値指令と位相角指令、制御用モータドライバに界磁率指令を適切に出力するマップ制御を行う。マップ制御は式を用いずに駆動させることができるが、予め駆動状態の値が記録されたマップを必要とする。マップとは図 5.11 に示すように、ある入力に対して、決められた出力をするための値のことである。3 枚のマップは横軸にそれぞれ回転速度、縦軸に出力指令をとった 2 次元マトリクスであり、値はそれぞれ電流値、位相角、界磁率が記録されている、コントローラは出力指令と回転速度を参照して、インバータに電流値と位相角の指令を、制御用モータドライバに界磁

率の指令を出力する。

### 5. 4. 3 制御アルゴリズム

図 5.12 に、駆動システムの制御アルゴリズムを示す。コントローラは、アクセルペダルの踏み込み量に応じた出力指令とエンコーダから計算されるモータの速度フィードバックを入力として受け、各マップを参照して電流値指令および位相角指令をインバータに、界磁率指令を制御用モータドライバに出力する。インバータはベクトル制御を行うため、エンコーダから送られるロータの回転角度とコントローラから送られる電流値指令および位相角指令から、電流を d 軸電流 ( $I_d$ ) と q 軸電流 ( $I_q$ ) に配分し、モータ本体に出力する。制御用モータドライバは界磁率指令に従い、制御用モータを位置制御する。

出力指令 %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	98	98	98			
	90	100	100	100	100	98	94	92	90	90	89	89	88	88			
	80	100	0	0	29	49	58	64	69	74	77	79	81	82	83	84	
	70	0	0	25	45	56	63	67	72	76	78	80	81	82	83		
	60	80															
	50	出力指令 %	100	400	400	400	376	352	342	337	335	335	335	335	334	334	335
	40	90	400	400	369	312	301	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
	30	80	400	400	313	269	266	266	266	266	266	266	266	266	266	267	267
	20	70	400	400	266	232	232	232	232	232	232	232	232	232	232	232	233
	10	60	396	396	224	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199	200	199
0	50	370	370	185	165	165	165	165	165	165	166	165	168	169	171	172	
界磁率 (%)	10	40	296	296	148	132	132	132	132	132	134	142	146	152	157	158	
	0	30	222	222	111	99	99	99	99	102	110	123	127	130	131	138	
	20	148	148	75	89	75	80	84	90	96	98	104	106	110	115		
	10	74	74	45	49	53	56	58	71	82	90	94	97	99	100		
	0	8	8	7	9	18	29	42	64	79	87	92	96	98	99		
位相角マ:	n	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100			
	電流値マップ (A)																
																回転速度 %	

図 5.11 電流値、位相角と界磁率のマップ（横軸は、3枚とも回転速度%）

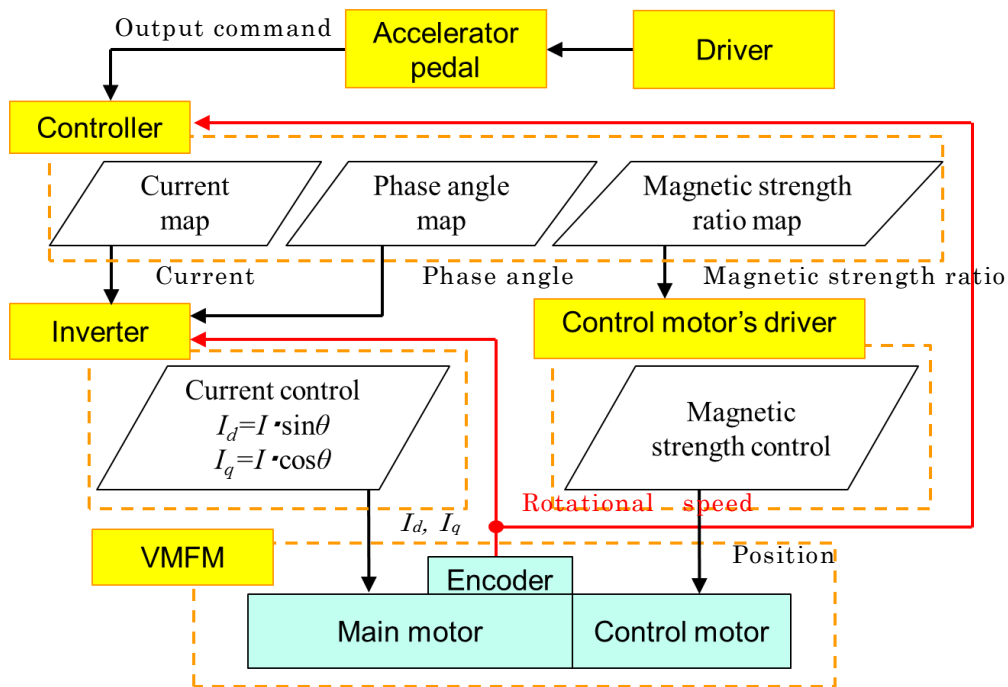


図 5.12 制御アルゴリズム

## 5. 5 駆動システムの評価方法

### 5. 5. 1 駆動システムの動作確認方法

試作モータを駆動システムで駆動し、駆動状態と界磁率に変化しても試作モータが駆動を行えるか評価する。

図 5.13 に評価システムを、図 5.14 に評価用の駆動パターンを、表 5.2 に評価内容を示す。評価方法は時間と出力指令から算出したトルク、回転速度、界磁率目標値に対して、トルクメータに表示されるトルク、回転速度と出力、コントローラ内部から読み取った界磁率の実測値が一致するかを確認する。

評価システムは駆動側を試作モータで駆動し、負荷側で動力計にて速度制限を行う。本評価の駆動パターンを実現するには出力指令と回転速度を同期させる必要がある。そのため、図 5.12 に示した 3 つの出力指令の他に、本評価のために、回転速度を制御するための速度制限を出力できるように、コントローラを改造した。コントローラは出力指令と可変界磁モータの回転速度から、電流、位相角、界磁率のマップを参照してインバータと制御用モータドライブに指令を出力し、速度制限を動力計制御盤に出力することで、動力計が試作モータの速度を制限する。

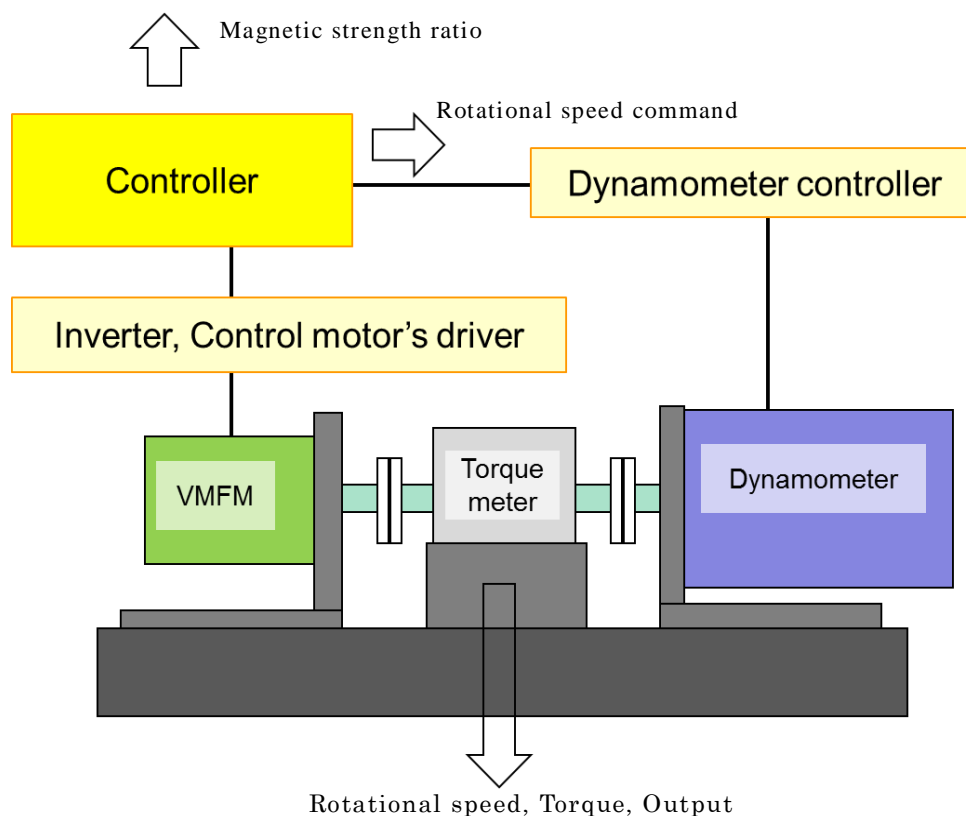


図 5.13 評価システム



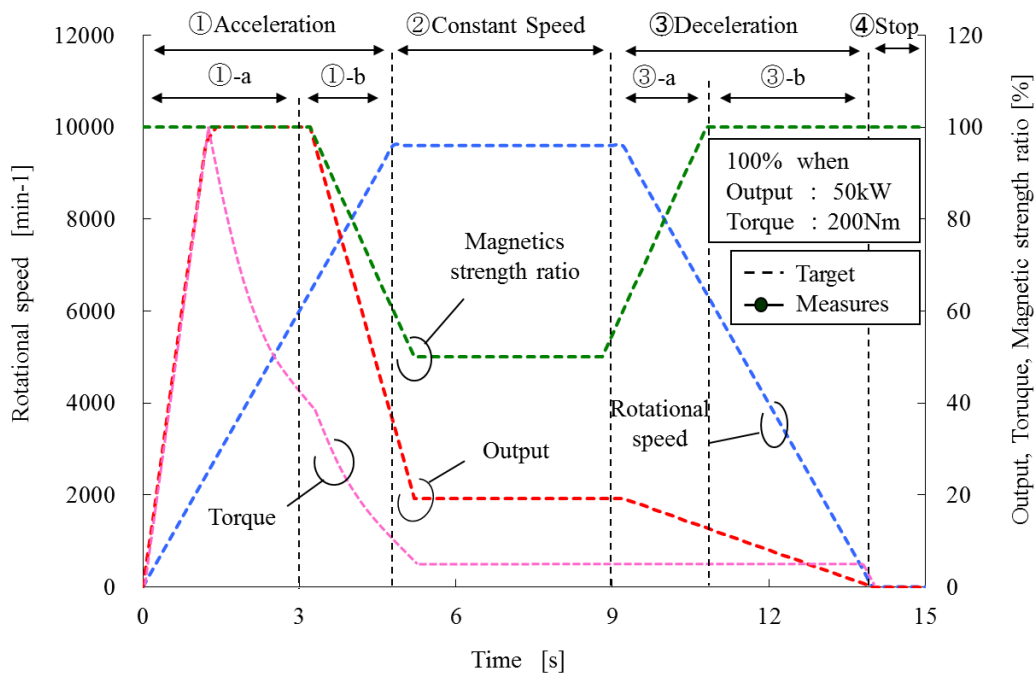


図 5.14 駆動パターン

表 5.2 評価内容

Drive state	Notation	Status information
①Acceleration (0~5s)	①-a	The motor is accelerated from stop state. The motor accelerates at a constant output power, after torque reaches 100%(200N·m).
	②-b	The motor is accelerated from 6400min <sup>-1</sup> . Magnetic strength ratio is controlled to 50% at rotational speed of 9600min <sup>-1</sup> .
②Constant speed (5~9s)	②	The motor is driven at a constant speed.
③Deceleration (9~14s)	③-a	The motor is decelerated while maintaining torque of ②. Magnetic strength ratio is controlled to 100% when rotational speed of 6400min <sup>-1</sup> .
	③-b	The motor is decelerated at magnetic strength ratio of 100% while maintaining torque of ②.
④Stop (14s~)	④	Output power becomes 0%, and the motor stops.

### 5.5.2 効率評価

試作モータは界磁を変化させることで効率良く駆動が行えるかを確認する。さらに、電流値と位相角，界磁率を調整し，各駆動状態における試作モータの最大効率を確認する。

## 5. 6 制御評価結果

### 5. 6. 1 マップ制御の動作結果

図 5.15 に試作モータを 5. 5. 1 節で述べた，駆動システムで制御したときの評価結果を示す。回転速度は動力計で速度制限を行っており，図 5.15-①②③の全域において実測値が目標値と一致するように調整されている。界磁率も，回転速度と同様に図 5.15-①②③の全域において実測値が目標値と一致するように調整されている。出力の目標値は図 5.15-①-a において，界磁率が 100%のまま，出力 50kW とするトルク 200N・m まで加速する。その後，出力 50kW で一定となるように回転速度に応じて，トルクが減少しながら加速している。これに対し出力の実測値は目標値と一致していることから，評価用コントローラからインバータへの電流値指令と位相角指令はマップ制御で正しく再現されていることがわかる。図 5.15-①-b より駆動状態と界磁率が同時に変化していく過渡状態でも目標値通りの駆動が行え，図 5.15-①-b のように界磁率が大きく変化してもトルクは目標値と一致している。このことから，本駆動システムで，提案する永久磁石可変界磁モータを駆動させることが可能であることがわかる。図 5.15-③-a,b から界磁率を変化させて減速を行っても，トルクは目標値と一致している。以上のことから，マップ制御により駆動状態は正しく再現されることが確認できた。また，本駆動システムを用いることで，提案する永久磁石可変界磁モータの駆動状態や界磁率の変化しても問題なく駆動が行えることが確認できた。

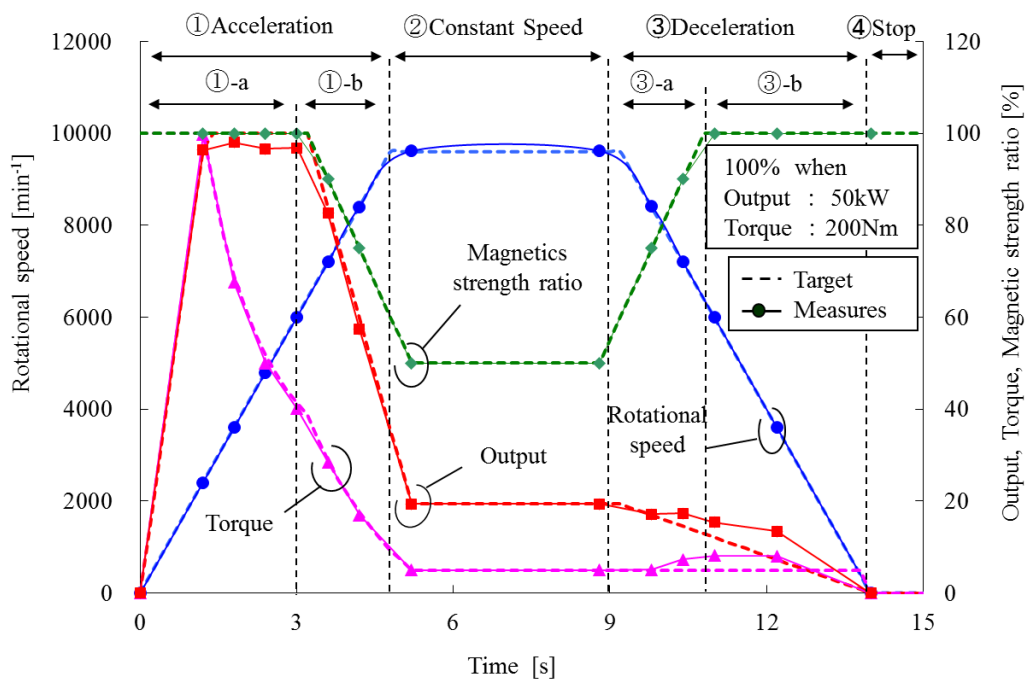


図 5.15 制御評価結果

## 5. 6. 2 効率評価結果

図 5.16 に 5. 5. 2 節で述べた，試作モータの界磁率と電圧，電流，効率との関係を示す。図は回転速度  $7200\text{min}^{-1}$ ，出力トルク  $10\text{N}\cdot\text{m}$  一定で効率が最も良くなる位相角で駆動を行った結果である。この図から，界磁率 100% のときの電圧はインバータの電圧飽和となる  $400\text{V}$  に近いが，界磁率を減少させることで電圧が小さくなることがわかる。

効率は界磁率 75% のときが最も良く，界磁率 100% に対して界磁を弱めることで，弱め磁束電流や鉄損が減少したためと考えられる。また，界磁率 50% では，電流が大きくなり効率が低下していることがわかる。これは，界磁が弱すぎるため，必要なトルクを出すために電流が大きくなったと考えられる。

以上のことから，試作モータは界磁率を変化させること電圧飽和を抑えることが可能であり，適切な指令を与えることで，効率良く駆動が行えることがわかる。

試作モータの効率を図 5.17 に示す。結果として 96% 以上の最大効率と広い出力範囲で 95% 以上の高い効率が確認できた。この結果は測定結果の一部であり，適切なマップで駆動することで，低出力域の効率がさらに向上できると考えられる。なお，効率測定時に界磁制御用モータは動作しないため，効率はモータ本体のみが対象となる。

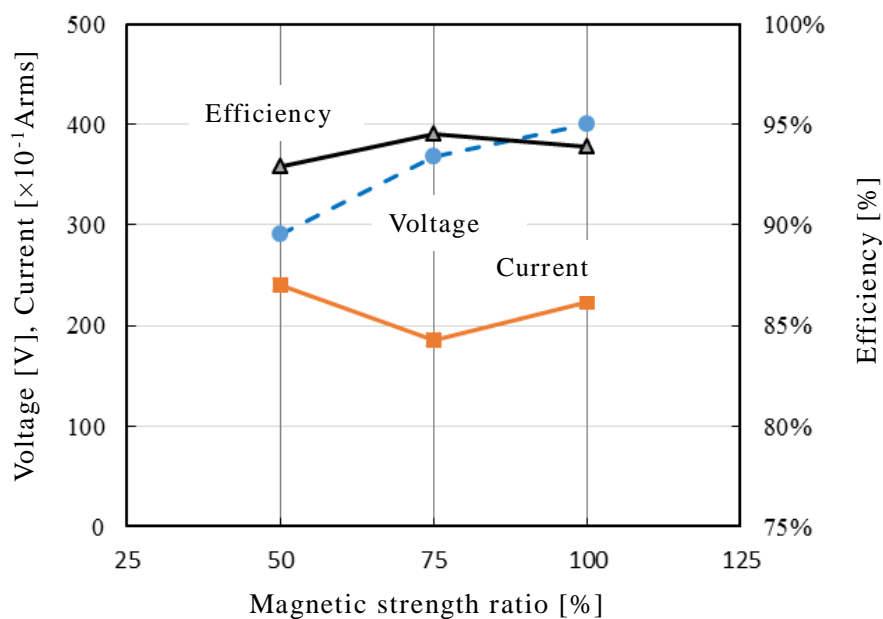


図 5.16 試作モータの界磁率と電圧，電流，効率との関係  
( $7200\text{min}^{-1}$ ， $10\text{N}\cdot\text{m}$ ，最大効率となる位相角)

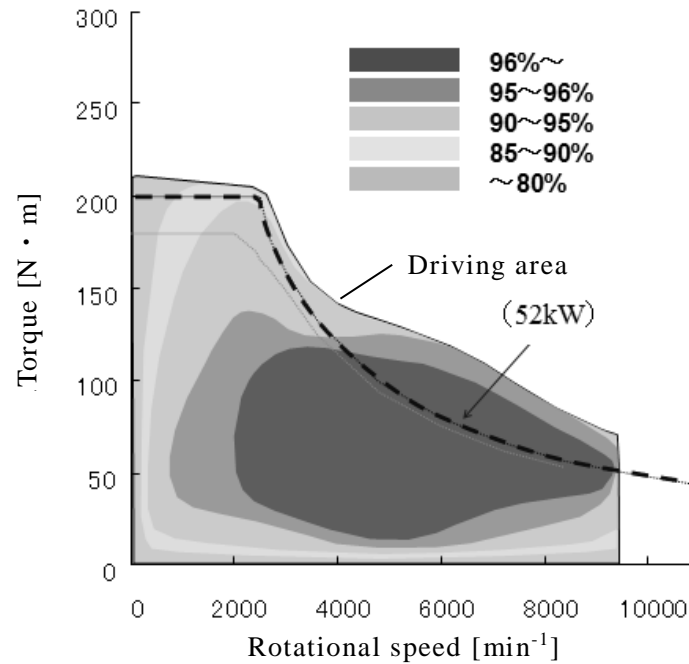


図 5.17 試作モータの効率

### 5.7 まとめ

高出力化と高効率駆動の両立ができる可変界磁モータについて、中央の磁極をアクチュエータで回転できる試作機の製作を行い、特性と制御について評価を行った。

特性については、誘起電圧を任意に変えられることや、トルクの要求を満たしつつ無負荷損失が十分に小さいことを評価試験で確認した。

制御については、提案する永久磁石可変界磁モータをマップ制御で駆動させることで、ベクトル制御の位相角をより広範囲に制御し、同時に界磁の強弱が変化しても駆動が行えることを確認した。また、試作モータは電流値、位相角、界磁率を適切な値に調整することで、広い出力範囲での高効率化が行えることを確認した。

今後は、より高効率で駆動が可能となるマップの取得と 20000min<sup>-1</sup> までの駆動確認を行う。

## 第6章 簡易可変界磁モータ要素試作：24kW

界磁の強さがおのずから変化するような永久磁石可変界磁モータについて論じる。モータの駆動状態に応じて、界磁の強さがおのずから変化するような永久磁石可変界磁モータとして、筆者等は可変機構を有しない小形で低コストな簡易可変界磁モータを考案した。この簡易可変界磁モータは、外部からの機械的な可変機構を有しないだけでなく、電気的な操作も必要としないため、従来の永久磁石モータ用インバータのみで駆動できる。従来モータと同サイズで製作した試作機の構造と効率評価について説明する。

### 6.1 目的

界磁の強さを正確に調整する可変機構は、広範囲高効率駆動を実現する永久磁石可変界磁モータには必要なものであったが、可変機構にかかる費用と搭載スペースが増大する欠点もあった。これに対して、モータの駆動状態に応じて界磁の強さがおのずから変化するような永久磁石可変界磁モータが望まれている。可変機構を有しない可変界磁モータの例としては、第1章で説明した巻線界磁式同期モータがあり、永久磁石モータの例では、インバータにパルス的なd軸電流を発生させることで、ロータに装着された永久磁石の磁力を変化させる例がある<sup>(63)</sup>。これらのモータは、回転速度や負荷の大きさに対応して、界磁の強さをモータの外部より適切に調整する。その他にも文献<sup>(64)</sup>、<sup>(21)</sup>がある。前者は回転速度の増加とともに自励的にロータ内の漏れ磁束量が増加することでパッシブに界磁を自動調整するとあるが、界磁を減じる方式では最大出力が低下してしまう問題がある。後者は磁路のパーミアンス変化で漏れ磁束量を可変にするしくみであるが、トルク密度が低い問題を残している<sup>(37)</sup>。筆者等は可変機構を有しない小形で低コストな簡易可変界磁モータを考案した。このモータでは、負荷トルクに応じて界磁の強さが、おのずから変化する。

界磁の強さを正確に調整する可変機構を有しない簡易可変界磁モータの開発の方向性として、従来の永久磁石モータをより高出力化することを検討する。永久磁石の磁束を集中しギャップ磁束密度を増大すれば、従来の永久磁石モータでは鉄損の増加が問題となる。そこで、簡易可変界磁モータを用いて、従来の永久磁石モータの負荷範囲での効率を低下させることなく、最大出力の増大を図る。このモータは、広範囲駆動については可変機構付に劣るが、低コストで可変負荷対応を主目的とする永久磁石可変界磁モータである。

本章の簡易可変界磁モータは、機械的な可変機構を有しないだけでなく、電気的な操作も必要としないため、従来の永久磁石モータ用インバータのみで駆動できる。従来モータと同サイズで製作した試作機の構造と効率評価について説明する。

## 6. 2 試作モータの概要

図 2.2～図 2.4 で説明した簡易可変界磁モータの最初の試みとして、従来の永久磁石モータ用インバータで駆動できることを確認する。その上で、本試作は下記 2 点を確認するために行う。

A. 負荷トルクを利用して界磁の強さを変化できること

B. 既存 SPM モータの効率を低下させることなく最大出力を増大すること

図 6.1 に、試作したロータの内側のシャフト(**Inner shaft**)と、外側の磁極部を軸方向両側で保持する側板(**Side plate**)を示す。シャフトの外側には 10 極の内側永久磁石(**Inner magnet**)が磁極を径方向に向けてリング状に装着されている。側板に設けられた 10 個の孔は、磁極部を保持するためのピン孔である。放射状に設けられた 10 本の溝(**groove**)には、外側の磁極部に装着される外側永久磁石をはめこむ。内側永久磁石の軸方向両側には、外向きに内側仕切り壁(**Inner wall**)が設けられ、側板に設けられた内向きの外側仕切り壁(**Outer wall**)の間に装着されるため、仕切り壁の間の空隙で相対角が規制される。負荷トルクがない状態では、試作ロータの内側永久磁石と外側永久磁石の位置関係は、永久磁石の戻しトルクにより図 2.2 に示した相対角  $0^\circ$  の通りである。この状態では、内側仕切り壁は外側仕切り壁の中央に位置する。負荷トルクがある状態では、負荷トルクの方角により正方向にも逆方向にも負荷トルクの大きさに応じて相対角は増大する。試作ロータの相対角最大値は、双方向に 1 極分よりやや小さい  $32^\circ$  であり、最大界磁状態になっても永久磁石による戻しトルクが 0 にならないように小さめに設定した。図 6.1 に示した側板に外側永久磁石と鉄心を組み付けると、図 6.2 に示す試作ロータとなる。

試作モータは、比較のため、既存の SPM モータと同じ外形状で製作した。より高出力化のため、永久磁石は既存の SPM モータの約 2 倍使い、最大界磁状態での鎖交磁束量を増大した。その結果、ギャップの平均磁束密度は約 1.5 倍に増大すると見込まれたため、試作ステータのコイルのターン数を  $2/3$  に減らして、トルク定数を同等にするとともに、太い線径の巻線を用いて巻線抵抗を低減できるように設計した。

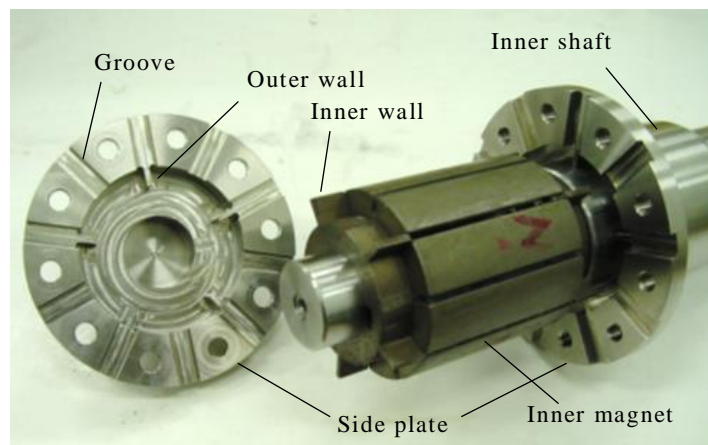


図 6.1 内側のシャフトと側板

表 6.1 に試作モータの基本諸元を示す。試作ロータの外径とロータコアの積厚は、既存の SPM ロータと同サイズとした。シャフト両側の軸受も同じものを同じ間隔で設けたため、ロータ同士を交換して比較評価することができる。

図 6.3 に、試作モータと既存の SPM モータを示す。左が試作モータで右が既存の SPM モータである。試作モータのフレーム等は、既存の SPM モータのものを流用した。サイズも同じであるため、外観では区別がつかない。

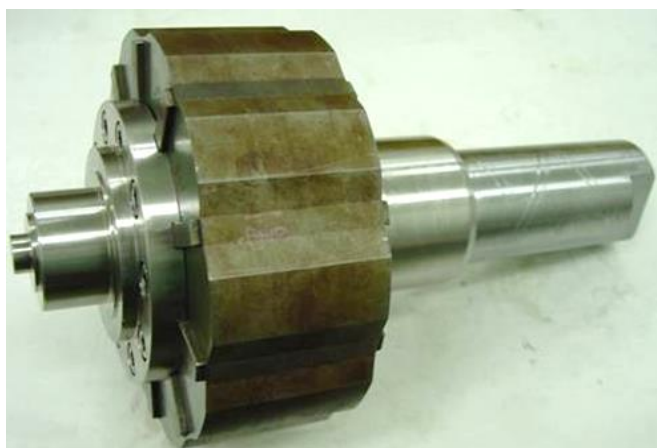


図 6.2 試作したロータ

表 6.1 試作モータの基本諸元

Stator outer diameter [ mm ]	167
Stack length [ mm ]	46
Coil-end length [ mm ]	66
Winding resistance /phase [ mΩ ]	23.4
Number of poles	10
Number of slots	12
Outer magnet thickness [ mm ]	5.6
Mass [ kg ]	14.5

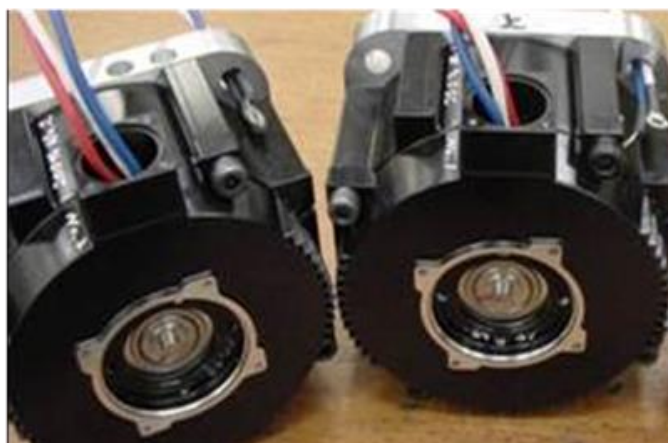


図 6.3 試作モータ（左）と既存の SPM モータ（右）

## 6. 3 試作モータの評価

### 6. 3. 1 界磁可変特性

負荷トルクを利用して界磁の強さを変化できることを確認するために、拘束トルク試験を行った。U相からV,W相に一定の直流電流を通電し、発生するトルクを測定した。図6.4に、測定装置と装置に取り付けられた試作モータを示す。試作モータのシャフトはトルクメータ(Torque meter)に接続し、トルクメータのシャフトは分度器の付いた治具(Angle holder)に接続した。

図6.5に、分度器(Protractor)の付いた治具を示す。シャフトを拘束せずU相からV,W相に一定の直流電流を通電すると、ロータは回転し静止する。その位置を回転角 $0^{\circ}$  (temporary 0 deg.)として、通電したまま外部からシャフトを回転させるとトルクが発生する。そのシャフトの回転角に対するトルクの変化を測定する。

試作ロータの反負荷側に取付けられるエンコーダは、写真に示すように本測定では取り外されている。エンコーダは、磁極の位置に合わせて駆動するため、シャフト側でなく外側の磁極部側に取付けられる。図6.6に示すように、エンコーダ取付け部に取付けた針金の先(Wire-pointer)を分度器(Protractor)で読取ること、シャフトの回転角に対する磁極部の回転角を測定し、両者の差より相対角を算出できるようにした。

図6.7は、U相からV,W相に一定の直流電流を通電した状態での、シャフトの回転角(Rotation angle)に対するトルクの変化を測定した結果である。20, 41, 62, 83Aの4つの電流値に対して測定を行った。試作モータは10極であるため、従来の永久磁石モータであれば、回転角の増大に対してトルクは0より正弦波的に増大し、最大値 $18^{\circ}$  (電気角 $90^{\circ}$ )を経て減少するはずである。20, 41, 62Aでは、回転角 $25^{\circ}$ 以上でモータトルクは脱出トルク状態となり、界磁が最大界磁まで増大した様子は見られない。83Aでは $50^{\circ}$ 近い回転角まで測定ができトルクも増大したため、最大界磁まで相対角が増大することがわかる。つまり、直流電流で83Aに相当する負荷電流が流れれば、最大界磁まで相対角は増大する。このときトルクは、永久磁石同士の吸引による戻しトルクに打ち勝って、相対角を最大界磁に対応する角度まで増大できる。

図6.8は、U相からV,W相に一定の直流電流を通電した状態での、シャフトの回転角に対する相対角(Relative rotation angle)の変化を測定した結果である。20,41,62Aでは、相対角は電流の大きさに応じて増大し、83Aでは $32^{\circ}$ 程度に増大することが確認できる。

どれほどのトルクで相対角は増大するのかを明確にするため、測定した相対角のトルクに対する変化を、図6.9に示す。トルクが小さな範囲では相対角は緩やかに増大し、 $30\text{N}\cdot\text{m}$ 程度で最大界磁まで相対角が増大することがわかる。つまり、試作モータは、負荷トルクの増大に応じて界磁を増大し、約 $30\text{N}\cdot\text{m}$ 以上の負荷トルクに対しては最大界磁となる可変界磁モータとなっていることがわかった。



30N・m 程度で相対角が急激に変化することについては, 負荷トルクに応じて相対角が増大するように今後改善すべきである。

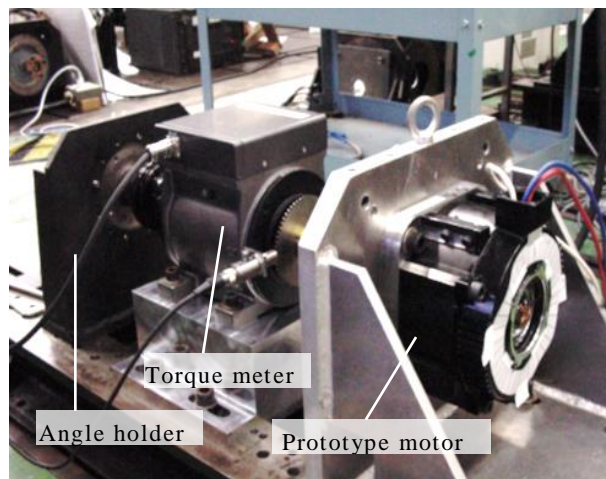


図 6.4 測定装置と試作モータ

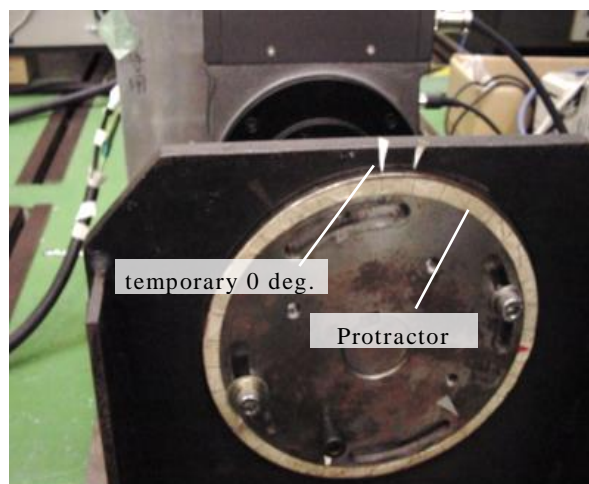


図 6.5 分度器の付いた治具

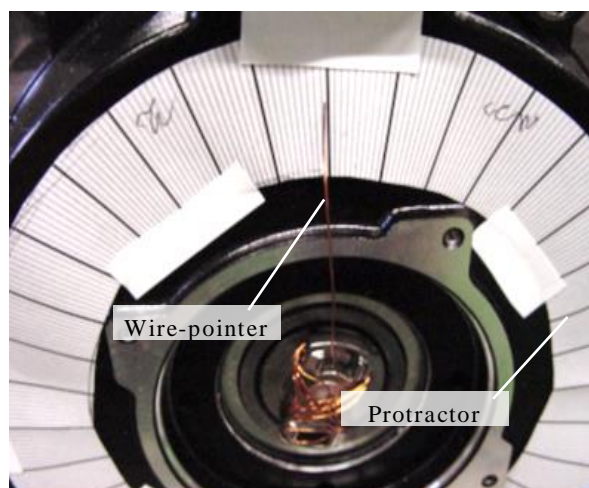


図 6.6 エンコーダ取付け部に取り付けた針金と分度器

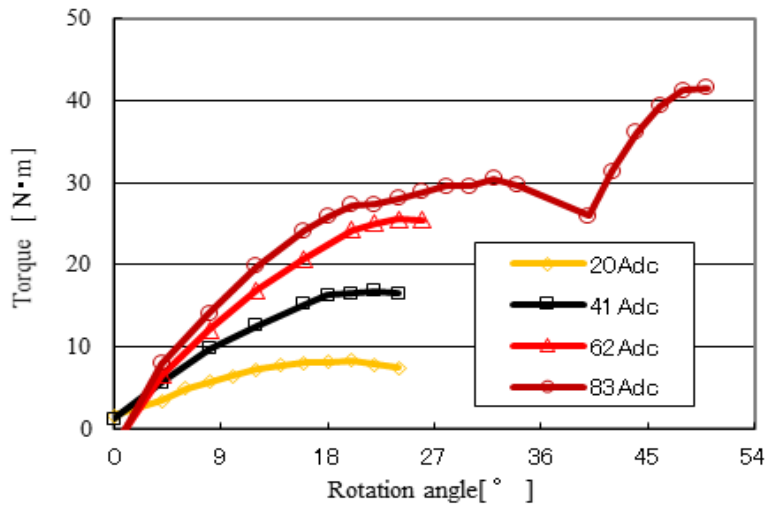


図 6.7 シャフトの回転角に対するトルクの変化

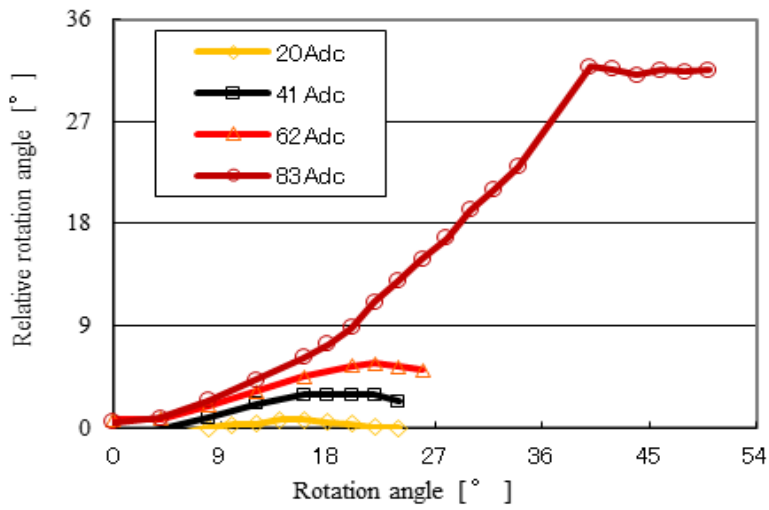


図 6.8 シャフトの回転角に対する相対角の変化

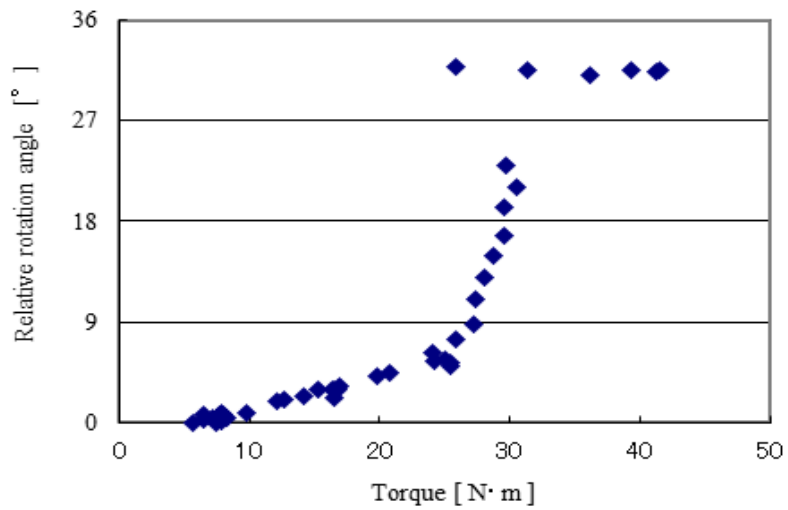


図 6.9 トルクに対する相対角の変化

### 6. 3. 2 負荷試験

既存の SPM モータの効率を低下させることなく最大出力を増大できることを確認するために、試作モータの負荷試験を行った。負荷試験は、速度制御でモータを  $1500 \text{ min}^{-1}$  または  $3000 \text{ min}^{-1}$  で駆動し、負荷を増大しながらトルクメータでトルクを測定した。回転速度とトルクよりモータの機械的出力を算出し、パワーメータで測定した電氣的入力より効率を算出した。また、従来の永久磁石モータ用インバータで駆動できることを確認するため、既存の SPM モータに装着されていたエンコーダを試作モータに装着し、既存の SPM モータ駆動用インバータで試作モータを駆動した。

図 6.10 に、 $1500 \text{ min}^{-1}$  で駆動した試作モータと既存の SPM モータの負荷試験による効率比較結果を示す。既存の SPM モータの負荷範囲での効率を低下させることなく、最大出力の増大を達成していることがわかる。既存の SPM モータの最大出力が約  $8 \text{ kW}$  であるのに対し、試作モータの最大出力は約  $13 \text{ kW}$  と約 1.6 倍に増大した。また、既存の SPM モータの最大効率が約 91% であるのに対し、試作モータの最大効率は約 93% と約 2% 増大した。図中の矢印は、試作ロータの界磁が最大に変化する約  $30 \text{ N}\cdot\text{m}$  の位置を示している。矢印以上の出力状態において、既存の SPM モータの効率は試作モータに比べ、顕著に低下した。既存の SPM モータは、負荷電流が上昇し、銅損の増大によりコイル温度が許容温度を超えるため、測定値以上の出力を発生することができなかった。高出力状態で試作モータの効率が優れるのは、鉄損の増大よりも巻線抵抗が小さいことによる銅損の減少の方が貢献するためと思われる。

図 6.11 に、 $3000 \text{ min}^{-1}$  で駆動した試作モータと既存の SPM モータの負荷試験による効率比較結果を示す。 $1500 \text{ min}^{-1}$  と同様に、既存の SPM モータの負荷範囲での効率を低下させることなく、最大出力の増大を達成していることがわかる。既存の SPM モータの最大出力が約  $15 \text{ kW}$  であるのに対し、試作モータの最大出力は約  $24 \text{ kW}$  と約 1.6 倍に増大した。最大効率は、既存の SPM モータも試作モータも約 93% であった。既存の SPM モータは、端子電圧が飽和に達し、測定値以上の出力を発生することができなかった。試作モータは、コイルのターン数が減った分リアクタンス電圧が減少し、より大きな負荷電流の通電が可能になったことが、出力を増大できた主な理由と考えられる。 $1500 \text{ min}^{-1}$  に比べ高出力状態で試作モータの効率優位性が小さいのは、回転速度が大きいため、鉄損の増大と銅損の減少が拮抗してきたためと思われる。

図 6.12 に、 $1500 \text{ min}^{-1}$  と  $3000 \text{ min}^{-1}$  で測定した電流とトルクの測定値から計算したトルク定数を、試作モータと既存の SPM モータの比較で示す。試作モータのトルクに対するトルク定数の変化をみると、矢印で示す約  $30 \text{ N}\cdot\text{m}$  のトルクの辺りで、約  $0.6 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$  から約  $0.7 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$  へトルク定数が変化していることがわかる。つまり、試作モータは負荷トルクの増大に応じて界磁を増大し、約  $30 \text{ N}\cdot\text{m}$  以上の負荷トルクに対しては最大界磁となる可変界磁モータとなっていることが、既存の SPM モータ駆動用インバータによる駆動によって確認できた。

試作モータは、既存の SPM モータとトルク定数を同等に設計したが、測定結果を見ると、約 1 割小さい結果であった。その理由としては、ロータ構造が複雑になり、永久磁石の漏れ磁束が増大したこと等が考えられる。また、試作モータの最小界磁状態のトルク定数は、期待に反し、最大界磁状態の 1 割程度の減少にとどまった。界磁の変化率はロータに配置された永久磁石の N 極と S 極の表面積比の変化と考え、3 割程度の変化を見込んでいたが、最大界磁状態での漏れ磁束増大が、トルク定数の変化を減少させたものとする。今後は最小界磁時のトルク定数を下げ、鉄損をより低減し、低出力状態における効率も向上できるよう検討したい。

また、図 6.12 において、試作モータの  $1500\text{min}^{-1}$  駆動時(Prototype motor, 1500)と  $3000\text{min}^{-1}$  駆動時(Prototype motor, 3000)、および既存の SPM モータの  $1500\text{min}^{-1}$  駆動時(SPM motor, 1500)と  $3000\text{min}^{-1}$  駆動時(SPM motor, 3000)の比較では、どちらも  $3000\text{min}^{-1}$  駆動時のトルク定数の方が 1~2% 小さな値となった。この理由としては、高速回転時の鉄損の増大に起因する無負荷電流の増大が、トルク定数を減少させたと思われる。

試作モータと既存の SPM モータのどちらも、トルク定数が最大となるトルクよりもトルクが小さくなるほどトルク定数が小さくなる理由は、負荷電流に対する無負荷電流の割合が増大するためである。また、トルク定数が最大となるトルクよりもトルクが大きくなるほどトルク定数が小さくなる理由は、磁気飽和により鎖交磁束が減少するためである。

図 6.10 に示したように、 $1500\text{min}^{-1}$  で駆動した試作モータの最大出力は約 13kW であり、このとき負荷試験では  $80\text{N}\cdot\text{m}$  の最大トルクを測定した。小形高トルク化を比較する指標に、最大トルクをステータ外径とコイルエンドを含む軸方向長さからなる電磁部容積で除したトルク密度がある。表 6.1 に示したように、試作モータのステータ外径は 167mm、ステータコアに装着したコイルの軸方向長さは 66mm であり、 $80\text{N}\cdot\text{m}$  発生時の電磁部に対するトルク密度は  $55\text{N}\cdot\text{m}/\text{L}$  となる。高トルク密度モータとして度々引用されてきたトヨタ社 Prius II 搭載 IPM モータのトルク密度は、文献(65)によれば  $45\text{N}\cdot\text{m}/\text{L}$  であるため、約 1.2 倍のトルク密度である。このことは試作モータが界磁の強さを自由に変化できるだけでなく、トルク密度の点でも従来の SPM モータや IPM モータに比べ、高いレベルを達成したことを証明していると考えられる。簡易可変界磁モータを用いて、従来の永久磁石モータの負荷範囲での効率を低下させることなく、最大出力の増大を図る試みは十分な成果を収めたと考えられる。

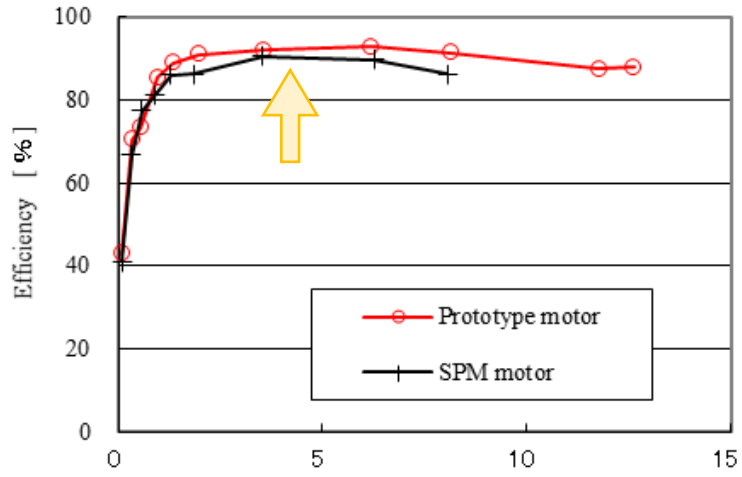


図 6.10 1500min<sup>-1</sup> 駆動時の効率比較結果

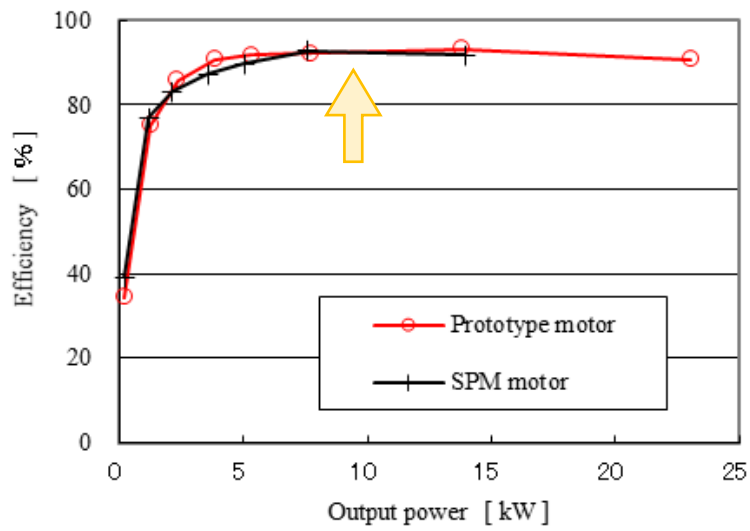


図 6.11 3000min<sup>-1</sup> 駆動時の効率比較結果

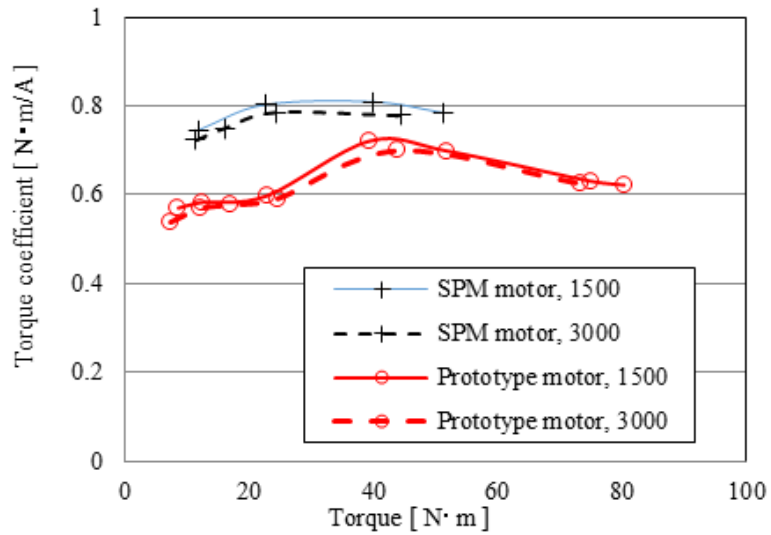


図 6.12 トルク定数の比較

#### 6. 4 まとめ

簡易可変界磁モータの最初の試みとして、従来の永久磁石モータ用インバータで駆動できることを確認した。負荷トルクの増大に応じて界磁を増大し、約  $30\text{N}\cdot\text{m}$  以上の負荷トルクに対しては最大界磁となる可変界磁モータとなっていることを、既存の SPM モータ駆動用インバータによる駆動によって確認した。

第 5 章で述べた可変機構を有し界磁の強さを正確に調整できる可変界磁モータには、広範囲高効率駆動の点で遠く及ばないが、小形で低コストな簡易可変界磁モータの最初の成果として、従来の永久磁石モータの負荷範囲での効率を低下させることなく、最大出力の増大を達成した。今後はより高速回転域まで、駆動範囲を拡大したい。

## 7章 結論

本論文は、EV モータへの応用を想定して、可変界磁機能をもつ永久磁石可変界磁モータを提案、試作し、可変界磁によるモータの小形高出力広範囲高効率化を実現する手法をまとめたものである。その結果として以下の成果を得た。

(1) 永久磁石可変界磁モータを実現するための基礎技術として、「磁束集中 IPM モータ」、「加圧成形コイル」および「高強度鋼板ロータコア」を開発した。これらの技術は、永久磁石可変界磁モータだけではなく、多くのモータの高性能化に資するものである。

(2) 永久磁石同期モータの広い可変速駆動範囲の各回転速度において、最大出力制御達成のための界磁の強さおよび電流位相角、そして最大効率制御達成のための界磁の強さおよび電流位相角を明らかにし、試験用永久磁石可変界磁モータの試作、評価により、その妥当性を示した。

(3) 可変機構付永久磁石可変界磁モータの設計と試作を行い、その基本特性を明らかにするとともに最大出力制御、最大効率制御の効果を示した。その際、モータの駆動状態に合わせて界磁の強さとインバータの電流指令を適切に制御する専用の駆動システムも開発した。

(4) 負荷状態に応じて界磁が自動的に変化する簡易可変界磁モータを考案、試作して、その基本特性を確認した。この可変界磁モータは、可変機構付と比較して、駆動範囲は劣るものの、低コストで通常インバータのみで駆動可能であるという利点をもつ。

これらの基礎技術開発および永久磁石可変界磁モータの設計・試作を通して得た知見は、以下のようにまとめられる。

(1) モータの最大回転速度を制限するのはロータの耐遠心力破壊強度のみであり、電磁的な制限はない。

(2) 可変界磁モータは界磁の大きさを可変できるモータであるため、従来の鉄損量による制限を受けることなく、界磁を装荷することが可能となる。これにより、可変界磁モータではより大きな磁気装荷を行うことでモータの高出力化が可能となるが、要求された出力に対し鉄損を最小限にとどめ、モータの最大効率運転を実現するためには、その出力に見合った磁気装荷を行う必要がある。

(3) 電圧が飽和する回転速度以上の範囲で最大出力を得るためには、最大界磁のまま電流位相角を進め、弱め磁束制御によって鎖交磁束を減じる必要がある。基底回転速度以上の回転速度でかつ最大出力以下の中間出力状態においては、低出力であるほど界磁を弱めることで、より高効率の駆動状態が得られる。

現在、モータは小形高出力にとどまらず、高効率で可変速範囲の広いものが求

められており，中でも高性能な永久磁石を用いた永久磁石同期モータは幅広い応用が期待されている<sup>(12)</sup>。今後，モータの応用範囲は，移動体のみならず建設機械など，ますます拡大すると考えられる。希土類永久磁石を用いた永久磁石可変界磁モータの歴史はまだ浅いが，永久磁石可変界磁モータは確実に実用化され，多く商品化されて行くものと思われる。本論文で提案する永久磁石可変界磁モータが，今後のモータの小形高出力化，広範囲高効率化に貢献できれば幸いである。



## 謝辞

本論文は株式会社安川電機において研究を行い、社内外に報告してきた「可変界磁モータ」に関する内容をまとめたものである。本論文をまとめるにあたり、鹿児島大学学術研究院理工学域工系山本吉朗先生には主査として、田中哲郎先生、甲斐祐一郎先生には副査として、終始懇切丁寧なるご指導を賜りました。安川電機の皆様と先生方に感謝の意を表するとともに、厚くお礼申し上げます。

エンジニアを志した人生を思うとき、どれだけ社会に貢献できたかの問いに屹立する。ふり返れば、「可変界磁モータ」に費やした時間は大きく、これ以上の成果を他のテーマで出せそうもない。ここまで来れたことを心から感謝したい。下記の方々への感謝も加えたい。

故九州大学野中作太郎先生：恩師であり、学生時代に学び文献(38)に挙げた教科書は、何度も私の不備な知識を補充して頂いたバイブルでした。

元九州大学吉田欣二郎先生：恩師であり、日本に在って永久磁石をモータに用いる意義を教示いただきました。

元先輩ヤマハ発動機株式会社内海洋司氏：「可変界磁モータ」をテーマとする示唆をいただきました。

元上司安川電機大戸基道氏：当初より長きにわたり、「可変界磁モータ」の研究を支えていただきました。

最後になるが、ここ数年非常勤講師として出向している九工大の電気工学実験「同期電動機」の指導の折、たまにわかった学生さんより、「永久磁石モータの今、V曲線を学ぶ意味は？」と問われることがある。「将来も必ず必要になります」と答えている。

## 文献

- (1) 村上宗司, 大戸基道, 矢原春樹, 渡邊宏, 塩月博, 下地広泰, 戸高孝, 磁束集束形永久磁石配列を用いた産業用モータの小型・高出力化, 日本 AEM 学会誌, Vol.21, No.4 pp.529-535 (2013)
- (2) 赤津観監修, 「モータ技術のすべてがわかる本」 p1, 164, 197, 205, ナツメ社
- (3) 樋口剛著, 阿部貴志, 横井裕一, 宮本恭祐, 大戸基道: 「交流モータの原理と設計法」まえがき, 第 8 章, 科学情報出版
- (4) 加藤崇: 「自動車駆用途における可変特性型高効率モータに関する研究」, 芝浦工業大学博士論文, 第 1 章 (2015)
- (5) 日経温暖化新聞: 「EC 法規制, エコ・イノベーションで自動車の CO2 排出量削減へ」, [http://daily-ondanka.es-inc.jp/news/2011/20110805\\_1.html](http://daily-ondanka.es-inc.jp/news/2011/20110805_1.html)
- (6) 産経新聞: 「中国, エコカー普及で新規制=一定台数の生産義務付けへ」, <https://www.jiji.com>article.g=eco>
- (7) 秋山勇治著, 「はじめてのモータ技術」 p10, 工業調査会
- (8) 「リラクタンストルク応用モータ IPMSM, SynRM, SRM の基礎理論から設計まで」, p5,52, リラクタンストルク応用電動機の技術に関する調査専門委員会, 電気学会
- (9) 今給梨明大: 「電流可逆チョップ付 PWM インバータ駆動 PM モータシステムの定出力領域における高効率化に関する研究」, 鹿児島大学博士論文, 17701 甲理工研第 427 号, 第 1 章 (2016)
- (10) 「エコとパワーを両立するトヨタのモータ制御技術」 2004.08 NIKKEI MONOZUKURI p92 (2004)
- (11) 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, pp16-29 (2001)
- (12) 中野孝良: 「交流モータのベクトル制御」, 日刊工業新聞社
- (13) 山本吉朗: 「PWM インバータ駆動永久磁石形 AC サーボモータの特性解析と電流制御法に関する研究」, 九州大学博士論文, 博士乙第 1230 号, 第 1 章 (1996)
- (14) 花田秀人, 他: Toyota Technical Review, Vol.54, pp. 42-51 (2005)
- (15) 青山真大, 野口季彦: 「モータハードウェアの技術革新によるモータドライブの新展開ー可変界磁機能をもつモータの設計と制御の可能性ー」, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, 3-S4-1, pp.III-21-III-26 (2017)
- (16) 前村明彦: 「埋込み磁石型同期電動機の電子巻線切替えによる速度範囲の拡大方法」, 平成 22 年度電気学会産業応用部門大会, Vol. II pp.93-96 (2010)
- (17) 岡崎: 「自動洗濯機の低騒音性に革新をもたらした DD インバータ 技術と洗濯機の進化」, 東芝レビュー, Vol.69, No.2, pp. 37-40 (2014)
- (18) 周広斌・宮崎泰三・川又昭一・金子大吾: 「電気自動車に適用する磁束可変型永久磁石モータの性能評価」, 平成 22 年電気学会全国大会, 5-014,

- pp.22-23 (2010)
- (19) 大賀荘平・野中剛・石井隆明・大戸基道：「可変界磁モータの試作と評価」，平成 24 年電気学会産業応用部門大会,3-32, pp.I-91-94 (2013)
  - (20) 榎本裕治，米田真，川副洋介，鳥羽章夫，樋口剛，前村明彦：「実用化が期待される可変磁力モータ」，平成 26 年度電気学会産業応用部門大会,Vol. III pp.47-52 (2014)
  - (21) 加藤，箕輪，土方，赤津：「可変洩れ磁束特性を利用した埋込磁石型同期モータの高効率化」，平成 26 年電気学会産業応用部門大会, No.3-13, pp.139-142 (2014)
  - (22) 三菱電機 HP,  
[https://www.mitsubishielectric.co.jp/automotive/news/2011/pdf/tms2011/2-01\\_rare-earth.pdf](https://www.mitsubishielectric.co.jp/automotive/news/2011/pdf/tms2011/2-01_rare-earth.pdf)
  - (23) 小山純，阿部貴志，樋口剛，山田英二：「永久磁石を併用した半波整流ブラシなし同期電動機の定常特性」，電気論 D, Vol.109, No.7, pp.507-514 (1989)
  - (24) 小坂：「SMC コアを利用したハイブリッド界磁モータの研究開発」，H22\_3\_25 NEDO プレスリリース (2010)
  - (25) Zero to Darwin Project WEB サイト,  
<http://www.zdp.co.jp/2007/2007suzuka10.html>
  - (26) 特許第 4932418 号，図 2
  - (27) 特開 2006-191783，図 15
  - (28) 特開 2016-149895，図 2
  - (29) 特開 2010-148257，図 1
  - (30) 難波，平本，中井：「可変界磁機能を有する 3 次元磁気回路モータの提案」，電気論 D, Vol.135, No.11, pp.1085-1090 (2015)
  - (31) 堺和人・倉持 暁：「ハイブリッド可変磁力モータの原理と基本特性」，電気学会論文誌 D, Vol.131, No.9, pp.1112-1119 (2011)
  - (32) 特許第 4225001 号，図 1
  - (33) 特許第 5750987 号，図 1
  - (34) 特開 2012-70608，図 2
  - (35) Brent S. Gagas, Kensuke Sasaki, Apoorva Athavale, and Robert D. Lorenz, "Magnet Temperature Effects on the Useful Properties of Variable Flux PM Synchronous Machines and a Mitigating Method for Magnetization Changes", Proc. of IEEE ECCE 2013, pp. 581-590, 2013.
  - (36) 福重，加藤，赤津，Robert.D. Lorenz：「電動車両における可変磁力モータの検討」，電気論 D, Vol.135, No.9, pp.922-928 (2015)
  - (37) 野中剛・牧野省吾・平山雅之・大戸基道：「可変界磁モータの効率評価」，平成 23 年電気学会産業応用部門大会,1-O6-3, pp.I-91-94 (2011)
  - (38) 野中作太郎著，「電気機器 I」，p.282，森北出版社

- (39) 堀洋一，他：「自動車用モータ技術」，p185，日刊工業新聞出版（2003）
- (40) 小坂卓：「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発/要素技術開発/脱レアアースを目指す自動車用モータの研究開発/SMC コハイブリッド界磁モータの研究開発」，H22\_3\_25 NEDO プレスリリース-1（2010）
- (41) 中井英雄，平本健二，大谷裕樹，稲熊幸雄：「ギャップ長可変を利用した磁束制御アキシヤルモータの検討」，平成 19 年電気学会産業応用部門大会，3-64，pp.Ⅲ-337-342（2007）
- (42) 野中剛・大賀荘平・大戸基道：「可変界磁モータの駆動に関する考察」，電気学会論文誌D，Vol.135，No.5，pp.451-456（2015）
- (43) Tuyoshi NONAKA, Shogo MAKINO, Masayuki HIRAYAMA, Motomichi OHTO：「Efficiency Evaluation of New Variable Magnetic Flux Motor」，1st international Electric Vehicle Technology Conference 2011May 17 to 19,2011 Pacifico Yokohama Japan（2011）
- (44) 野中剛・石井隆明・大戸基道：「簡易可変界磁モータの試作と評価」，電気学会論文誌D，Vol.137，No.6，pp.534-539（2017）
- (45) 野中剛・牧野省吾・平山雅之・大戸基道：「可変界磁モータの構造検討と評価」，平成 25 年電気学会全国大会，5-012，pp.21-22（2013）
- (46) 野中剛・牧野省吾・大戸基道：「磁束集中 IPM モータの技術開発」，日本 AEM 学会誌，Vol.24，No.4，pp.323-330（2016）
- (47) 野中剛・牧野省吾・大戸基道：「モータの高放熱構造に関する研究」，電気学会論文誌D，Vol.136，No.6，pp.385-391（2016）
- (48) 野中剛・平山雅之・大戸基道：「高強度鋼板の IPM モータのロータコアへの適用と評価」，日本 AEM 学会誌，Vol.25，No.2，pp.未定（2017）
- (49) A.M.EL-Refaiie, J.P.Alexander, S.Galioto, P.Reddy, K.Huh, P.Bock, and X.Shen, "Advanced High Power-Density Interior Permanent Magnet Motor for Traction Applications", Proc. of IEEE ECCE 2013, pp. 581-590, 2013.
- (50) 松尾圭祐，沖津隆志，松橋大器，三木一郎，フェライト磁石を用いた高トルク IPMSM の開発，平成 24 年電気学会産業応用部門大会，3-33 pp.Ⅲ-175-Ⅲ-178（2012）
- (51) 松本直久，真田雅之，森本茂雄，武田洋次，V 字型 IPMSM の磁石配置とトルク特性，平成 17 年電気学会全国大会，5-105 pp.138-139（2005）
- (52) 吉岡慎治，森本茂雄，真田雅之，井上征則，自動車駆動用 IPMSM のロータ構造による高トルク化と運転特性の検討，平成 26 年電気学会産業応用部門大会，3-14 pp.Ⅲ-143-Ⅲ-146（2014）
- (53) K.Atallah, D.Howe,"The Application of Halbach Cylinders to Brushless AC Servo Motors",IEEE Trans. on Magnetics, Vol.34, Issue 4, Part 1,pp.2060-2062, (1998)
- (54) 松岡孝一・近藤 稔・清水康弘：「永久磁石同期電動機を用いた鉄道車両用

- 全閉式電動機」, 電気論 D, Vol.124, No.2, pp.175-182 (2004)
- (55) 木本伸一:「最近の輸送システムにおける回転機技術」, T.IEE Japan, Vol.117-D, No.9, pp.1054-1056 (1997)
- (56) 鬼丸貞久・松井啓仁・田口知成・大高健二・市岡英二・水谷竜彦:「ハイブリッド電気自動車(HEV)の ATF を用いたモータ冷却構造の熱解析」, デンソーテクニカルレビュー, Vol.13, No.1, pp.19-25 (2008)
- (57) 鈴木正夫・饗庭雅之・高橋紀之・太田 聡・岡田重紀:「巻線コイルに圧縮成形を適用した低渦電流損失地上コイルの開発」, 電気論 D, Vol.132, No.2, pp.185-193 (2012)
- (58) 堺和人:「電気自動車用モータの技術動向」, 平成 16 年度電気学会産業応用部門大会, 2-S10-4, pp II -154-157
- (59) 「ハイブリッド/電気自動車駆動モータ用電磁鋼板の最近の動向」, 新日鉄技報, 第 393 号, 2012.
- (60) 「省エネルギーに貢献する自動車駆動系とその要素技術」, NTN TECHNICAL REVIEW, No.75, (2007)
- (61) 石井隆明・大賀荘平・野中剛・大戸基道:「可変界磁モータの制御と効率評価」, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会,3-35, pp.3-223-228 (2014)
- (62) 関井康雄:「電気材料」, 丸善株式会社(平成 13 年)
- (63) 堺和人・結城和明・橋場豊・高橋則雄:「可変界磁メモリモータの原理と基本特性」, 平成 21 年電気学会産業応用部門大会,3-10, pp. III -179-184 (2009)
- (64) 青山真大, 野口季彦, 神山博夢:「電氣的ハルバッハ配列をもつ可変界磁 PM モータの提案」, 平成 28 年電気学会全国大会,5-041, pp. III -73-74 (2016)
- (65) 千葉明, 清田恭平, 星伸一, 竹本真紹, 小笠原悟司:「自動車用 SR モータ(50kW,60kW)の研究開発」, 2012 モータ技術シンポジウム, R3 pp. R3-2-1- R3-2-17 (2012)