

資 料

ブラシレスDCモータの設計と試作

川島 崇宏*・大峠 忍*

1. 目 的

現代社会は電気エネルギーの利用によって支えられており、その中において電気から動力への変換機であるモータは必要不可欠なものである。一般的な家電製品などにおいて、モータは汎用のものが用いられることは少なく、個別製品に最適なものが開発、設計、製造されている。

新製品に搭載するモータを開発、設計するには試作が必要不可欠となるが、試作機は少量生産になるため、大手企業は受注しない。そのため中小企業がその生産を担っている。今後ロボット需要の拡大に伴ってモータ需要の増加が見込まれるが、現在県内に試作機用などの少数の特注モータの設計、製造を請け負っている企業はなく、県内でその設計を受注し、生産、供給できる体制を整えることは今後の県内産業の振興を図る上で不可欠である。

上述のような企業の技術支援を行うためには、まず産業技術センターでモータの設計技術を獲得し、製造方法についても把握しておく必要がある。そこで、小型で高出力、高効率という特徴があり、今後も安定して需要が見込めるブラシレス DC モータについて、市販されている CQ ブラシレス・モータ&インバータ・キット（株式会社ミツバ製）のモータ（アウターロータ型ブラシレス DC モータ）を参考に設計と試作を行ったので報告する。

2. 方 法

2.1 設計理論

設計の流れは次のとおりである。まずマグネットやステータコアで構成される磁気回路を設計し、次にステータコアに巻く巻線を設計する。それらが設計されることでモータ特性が計算できるので、設計したモータで仕様を満たす性能が得られるかどうか確認する。性能が不足する場合は、材料の見直し、モータ体格の増大などを検討する。

アウターロータ型ブラシレス DC モータを例に、設計に用いる理論式を示す。

2.1.1 磁気回路設計

まず磁気回路の設計に用いる理論式を示していく。図1、図2にアウターロータ型ブラシレス DC モータの断面図を、

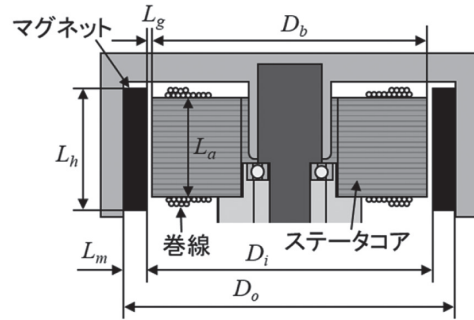


図1 モータ断面図1（アウターロータ型）

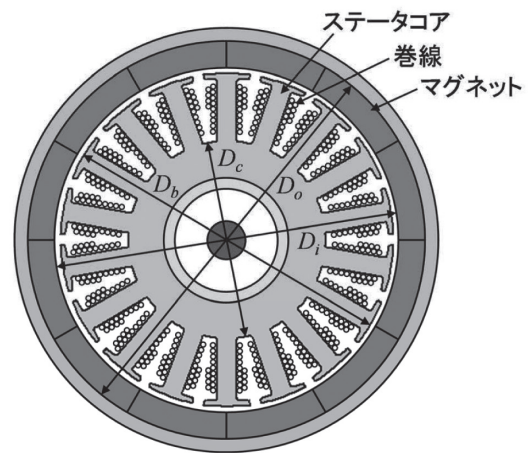


図2 モータ断面図2（アウターロータ型）

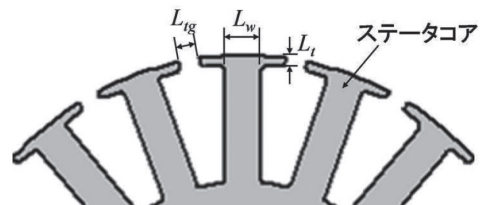


図3 ステータのスロットとティースの形状図

図3にステータのスロットとティースの形状図を示す。

1極当たりのフィールドマグネットの磁界と垂直な断面の断面積 A_m は次式となる。

* 電子・電気技術科

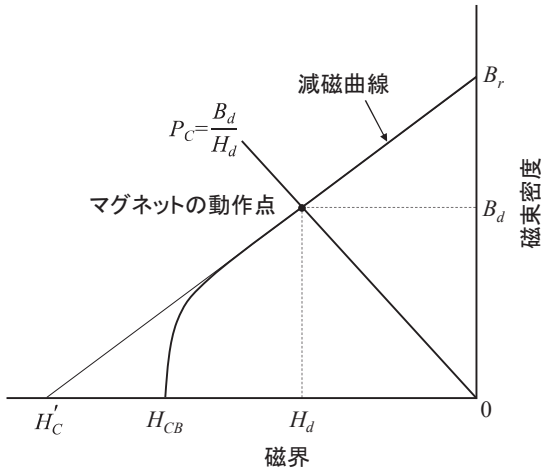


図4 マグネットの減磁曲線と動作点

$$A_m = \frac{D_o + D_i}{2} \cdot \frac{\pi}{P} \cdot L_h \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 D_o はマグネット外径、 D_i はマグネット内径、 π は円周率、 P は磁極数、 L_h はマグネット長さである。

ステータコア1スロット当たりのエアギャップの断面積 A_g は次式となる。

$$A_g = \frac{D_i + D_b}{2} \cdot \frac{\pi}{q_s} \cdot L_a - L_{ig} \cdot L_a \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 D_b はステータコア外径、 q_s はステータスロット数、 L_a はステータコア長さ(厚さ)、 L_{ig} はスロットオープニング幅である。

フィールドマグネットのエアギャップ部分のパーミアンス係数 P_c は次式で表すことができる。

$$P_c = \frac{A_g \cdot B_g \cdot L_m}{A_m \cdot H_g \cdot L_g} \cdot \frac{K_f}{K_r} = \frac{A_g \cdot \frac{D_o - D_i}{2} \cdot U_0}{A_m \cdot \frac{D_i - D_b}{2}} \cdot \frac{K_f}{K_r} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 L_m はマグネット厚さ、 L_g はエアギャップ長、 K_f は磁束の漏洩係数、 K_r は起磁力損失係数、 B_g はエアギャップの有効磁束密度、 H_g はエアギャップの磁界、 U_0 は真空の透磁率である。また、この計算式は簡略化のためエアギャップの磁束密度が均一であると仮定している。ここで用いている漏洩係数 K_f は、磁気回路中のマグネットから発生する全磁束を Φ_m 、エアギャップに収束された有効磁束を Φ_g とすると次式で表される。

$$K_f = \frac{\Phi_m}{\Phi_g} \quad \dots\dots\dots (4)$$

起磁力損失係数 K_r は、フィールドマグネットの起磁力を F_m 、エアギャップに寄与する起磁力を F_g とすると次式で表される。

$$K_r = \frac{F_m}{F_g} \quad \dots\dots\dots (5)$$

図4にフィールドマグネットの減磁曲線と動作点の模式図を示す。ここで B_r はマグネットの残留磁束密度、 B_d

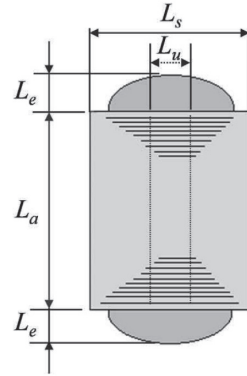


図5 電機子コイルの巻線状態図

は動作点の磁束密度、 H_d は動作点の磁界、 H_{CB} は保磁力、 H'_C は減磁曲線の線形部分を近似した直線と磁界軸の交点から推定した推定保磁力である。パーミアンス係数 P_c が決まるとフィールドマグネットの減磁曲線との交点をとることでマグネットの動作点を知ることができ、 B_d は次式で計算できる。

$$B_d = \frac{P_c \cdot B_r}{P_c + U_r} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで U_r は減磁曲線の線形部分の透磁率で、次式で表される。

$$U_r = \frac{B_r}{H_C} \quad \dots\dots\dots (7)$$

B_d が算出できると、(4)式よりエアギャップの有効磁束 Φ_g が次式で計算できる。

$$\Phi_g = \frac{\Phi_m}{K_f} = \frac{B_d \cdot A_m}{K_f} \quad \dots\dots\dots (8)$$

(8)式で算出される値は磁束密度が均一である場合の値である。実際はエアギャップ内の磁束密度は均一ではないことから、次式で表される平均値をとった Φ'_g を用いる方が実用的である。

$$\Phi'_g = \Phi_g \cdot \frac{2}{\pi} \quad \dots\dots\dots (9)$$

2.1.2 巻線設計

次に巻線の設計に用いる理論式を示していく。図5にステータティースに電機子コイルが巻き線された状態を表した図を示す。

巻線スロット面積 A_a は次式となる。

$$A_a = \left(\frac{D_b^2 - D_c^2}{4} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{q_s} - \frac{\pi \cdot D_b}{q_s} \cdot L_t - L_w \cdot \frac{D_b - D_c - 2 \cdot L_t}{2} \right) / 2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで D_c はステータコア内径、 L_t はスロットオープニング高さ、 L_w はステータティース幅である。

有効巻線面積 A_o は、占積率を S_f とすると次式で表される。

$$A_o = A_a \cdot \frac{S_f}{100} \dots\dots\dots (11)$$

1 コイルあたりの導体数 Z は、線材の仕上がり外径を D_ϕ とすると次式となる。

$$Z = \frac{A_o}{\pi \left(\frac{D_\phi}{2}\right)^2} \dots\dots\dots (12)$$

1 コイルあたりの巻線抵抗 R_a は次式となる。

$$R_a = \{(L_a + L_e) \cdot 2 + L_s + L_u\} \cdot R_d \cdot w \dots\dots\dots (13)$$

ここで L_e はコイルエンド長さ、 L_s はコイル外幅、 L_u はコイル内幅、 w は1 スロット当たりの巻線巻数で $Z/2$ と等しい、 R_d は線材の単位長さ当たりの抵抗値である。 R_d は線材の抵抗率 ρ から次式で算出される。

$$R_d = \frac{\rho}{\pi \left(\frac{D_\phi}{2}\right)^2} \dots\dots\dots (14)$$

2.1.3 特性計算

ここでは、エアギャップ磁束や巻線抵抗値からモータ特性を計算するための理論式を示していく。

モータ印加電圧を V_a 、電源電圧を V_b 、駆動回路による電圧降下を V_c とすると次式の関係が成り立つ。

$$V_a = V_b - V_c \dots\dots\dots (15)$$

始動電流 I_{st} は、巻線の並列回路数を K_a とし次式で算出される。

$$I_{st} = \frac{V_a}{R_a \cdot D_n} \cdot K_a^2 \dots\dots\dots (16)$$

ここで D_n は同時通電コイル数で、ブラシレス DC モータの場合は駆動中に同時通電されるのは3相ある巻線のうち2相なので次式で算出される。

$$D_n = q_s \cdot \frac{2}{3} \dots\dots\dots (17)$$

始動トルク T_{st} はエアギャップの有効磁束平均値 Φ'_g を用いて次式で算出される。

$$T_{st} = \frac{P \cdot Z \cdot D_n \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot K_a} \cdot \Phi'_g \cdot I_{st} - T_o \dots\dots\dots (18)$$

ここで P はフィールドマグネットの極数、 T_o は軸受損失トルクである。

無負荷電流 I_o は次式で算出される。

$$I_o = \frac{T_o}{T_{st}} \cdot I_{st} \dots\dots\dots (19)$$

無負荷回転数 n_o [rpm] は Φ'_g と R_a を用いて次式で算出される。

$$n_o = \frac{60 \cdot K_a}{P \cdot Z \cdot D_n \cdot 2} \cdot \frac{V_a - I_o \cdot R_a \cdot D_n}{\Phi'_g} \dots\dots\dots (20)$$

トルク T は、モータ入力電流を I_a とすると次式で算出される。

$$T = K_t \cdot I_a - T_o \dots\dots\dots (21)$$

ここで K_t はトルク定数で、次式で表される。

$$K_t = \frac{P \cdot Z \cdot D_n \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot K_a} \cdot \Phi'_g \dots\dots\dots (22)$$

回転数 n は次式で算出される。

$$n = \frac{V_a - I_a \cdot R_a \cdot D_n}{K_t \cdot 2 \cdot \pi} \cdot 60 \dots\dots\dots (23)$$

モータ出力 P_o は次式で算出される。

$$P_o = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot T \cdot n \dots\dots\dots (24)$$

以上より、(21)式からモータのトルク-電流特性、(23)式からトルク-回転数特性、(24)式からトルク-出力特性の理論値を得ることができる。

2.2 試作方法

試作は大きく分けて部品製作、巻線、組み立ての3つの工程に分けることができる。部品の製作については、製作に必要な材料調達や加工設備、期間を考慮するとモータの構成部品を全て試作することは困難であるため、試作するのはステータコアのみとし、その他の部品は市販品を購入することとした。

2.2.1 ステータコア試作方法

ステータコアの製造は、設計した形状に電磁鋼板を切断して積層することで行う。量産の場合は材料の電磁鋼板をパンチプレス加工で打ち抜くことで切断していくが、試作の場合は金型の製作コストが問題となる。金型を用いずに材料を切断する方法としては、レーザー加工かワイヤ放電加工が候補として考えられる。レーザー加工は被加工物の硬度に関係なく高速に切断が可能だが、加工条件を上手く調整しないと切断面にバリが残ったり、細かい部分が欠損したりする。また、被加工物が厚くなると加工が難しくなるため、一度に切断できる鋼板は一枚が現実的である。ワイヤ放電加工は、加工速度は遅いが、切断面にバリや欠損が生じることなくきれいに仕上がり、また、加工機に入るサイズのものであれば厚さや大きさに制限なく加工できるため、鋼板を積層して一度に切断することが可能である。積層してから切断することで、各鋼板の寸法のずれもなくなる。

それぞれの加工の特徴を踏まえ、今回の試作では、材料のリボン状の電磁鋼板をレーザー加工で切断して短い長さに分割し、それらを積層後、ワイヤ放電加工で外形を切断するという方法をとることとした。

2.2.2 巻線方法

ステータコアへの巻線は手巻きで行った。加工後のステータコアに何も対策せずに巻線を巻くと、角のエッジで線材の絶縁皮膜が破れ、巻線がショートしてしまう。これを防ぐためにステータコアのティースにエポキシ樹脂の粉体塗装でコーティングを施すことにした。塗装だけで巻線の絶縁が保てない場合は、ティースのエッジ部分を覆うよ

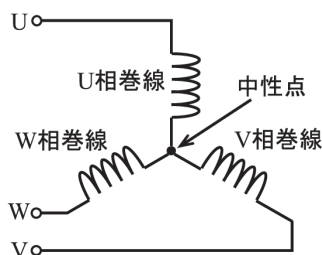


図6 三相巻線のスター結線

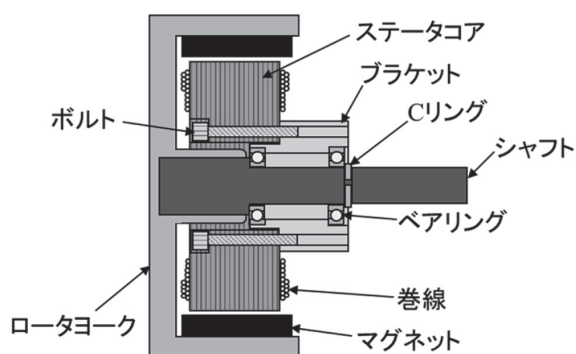


図7 アウターロータ型ブラシレスDCモータの内部構成

うにテーピングを施す。

モータの巻線方式には様々な種類があるが、今回の試作ではスター結線の集中整列巻きを行うこととした。集中巻きは、図5に示すように1つのティースに1つのコイルを巻きつけていく巻線方式である。占積率を高めるため、線材をきちんと整列させて巻きつけていく。スター結線(Y結線、星型結線とも呼ばれる)は、図6に示すように三相の巻線の一端を中性点で接続する結線方式である。

巻線の直列回路数を K_b 、相数を N とすると次式の関係が成り立つ。

$$q_s = K_a \cdot K_b \cdot N \dots\dots\dots (25)$$

ステータの各ティースに巻きつけられた巻線の K_a 、 K_b にはスロット数に応じて (25) 式を満たすだけ選択の余地があるが、今回は各相のスロットに直列だけ ($K_a = 1$) で巻いていくこととした。

2.2.3 組み立て方法

図7にアウターロータ型ブラシレスDCモータの内部構成を、図8にその組み立て手順を示す。部品の組み立ては、①ロータヨークへのマグネットの貼り付け、②ステータコアへのブラケットの挿入、③ステータコアとブラケットをボルトで締結、④ブラケットへのベアリングの挿入、⑤シャフトをベアリングへ挿入しステータコアをロータヨークの中に入れる、⑥ステータコアが奥まで入りきったらステータコア脱落防止のためCリングをシャフトに設けられた溝に装着という順序で行う。シャフトはロータヨークに圧

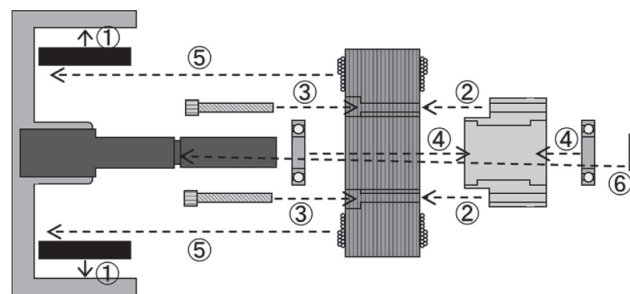


図8 アウターロータ型ブラシレスDCモータの組み立て手順

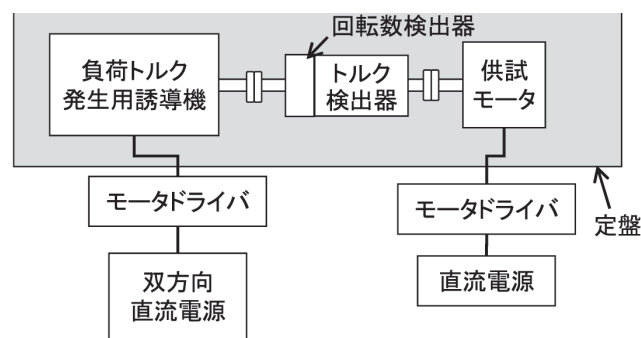


図9 モータ特性評価システムの構成

入済みの状態で購入する。①の作業ではマグネットが強力な磁力でロータヨークに引き寄せられるため、マグネットがロータヨーク壁面に衝突して破損したり、物が挟まったりする危険性があるため、作業の安全確保に注意する必要がある。⑤の作業ではステータコアとマグネットが磁力で引きあうため、しっかりと固定しながら慎重に作業するなど、こちらも安全確保に注意を要する。

2.3 評価方法

試作モータの特性評価は、供試モータをドライバで加えることのできる最大の電圧（電源電圧にできる限り近い電圧）を印加した状態で駆動し、回転軸へ負荷トルクを加えていったときのトルク-電源電流特性、トルク-回転数特性、トルク-出力特性の3つの特性を測定することで行う。

試作モータの特性評価に用いる測定システムの構成を図9に示す。供試モータと同軸上にモータに負荷トルクをかけるための誘導機（富士電機 MVK-8107A）を接続し、それらの間にトルクと回転数の測定のためにロータリエンコーダ付きトルクセンサ（ユニパルス UTM II -10Nm (R)）を設置した。それぞれのモータは簡易光学実験台（駿河精機 J15-1206T）上にボルトで固定した。供試モータのモータドライバには、CQブラシレス・モータ&インバータ・キット付属のインバータ回路基板を使用した。電源供給には市販の直流電源装置（高砂製作所 ZX-400L）を使用した。負荷トルク発生用誘導機のドライバには市販の汎用インバータ（富士電機 FRN2.2VG1S-2J）を用いた。負荷用

表 1 寸法仕様

磁気回路		
マグネット磁極数	P	12
マグネット外径	D_o	109.6 mm
マグネット内径	D_i	95.6 mm
マグネット長さ	L_h	40.0 mm
マグネット厚さ	L_m	7.0 mm
ステータコア外径	D_b	94.5 mm
ステータコア内径	D_c	56.0 mm
ステータコア長さ (厚さ)	L_a	25.0 mm
ステータスロット数	q_s	18
エアギャップ長	L_g	1.00 mm
電機子巻線		
線材外径	D_ϕ	1.0 mm
コイルエンド長さ	L_e	2.0 mm
コイル外幅	L_s	10.0 mm
コイル内幅	L_u	6.0 mm
ステータティース幅	L_w	5.6 mm
スロットオープニング幅	L_{tg}	3.2 mm
スロットオープニング高さ	L_t	1.7 mm

誘導機は回生制動を行いながら運転するため、ドライバから戻ってくる電力を回生可能な双方向直流電源装置 (My way プラス MWBFP・2-1040) を電源に用いた。

3. 結 果

3.1 設計

表 1 に参考モータの寸法仕様を示す。表 1 のパラメータから計算式を用いて算出した設計仕様とモータ特性を表 2 に示す。フィールドマグネットの減磁曲線は公開されていないため、 B_r や H_{CB} 、 H'_c は一般的な材料での値を用いた。 K_f 、 K_r についても一般的な値を用いた。電機子巻線の占積率 S_f は、手巻き時の作業性を考慮し、一般的な値 (40 ~ 80%) の範囲で低めの値にした。巻線の線材には 1.0 mm 径のエナメル銅線を用いるものとし、抵抗率は銅の一般的な値を用いた。巻線は直列で巻いていくため、 K_a は 1 とした。電源電圧は CQ ブラシレス・モータ & インバータ・キットの標準仕様である 24V とした。 V_c 、 T_o はともに一般的な値を用いた。

3.2 試作

3.2.1 ステータコア試作

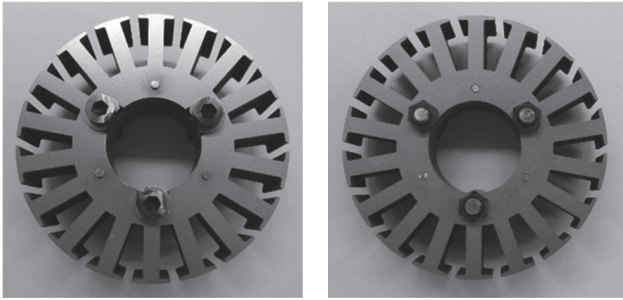
材料の無方向性電磁鋼板 (50CS1300) は、幅 100 mm × 長さ 1000 mm を 7 枚使用した。それをレーザー加工機で切断して材料 1 枚当たり 8 分割し、寸法 100 mm × 125 mm の板にした。25 mm はワイヤ放電加工の際に板を積層するときのカシメしろとしたので、実際の加工範囲は 100 mm × 100

表 2 設計仕様と特性

磁気回路		
残留磁束密度	B_r	0.470 T
保磁力	H_{CB}	2.79×10^5 A/m
推定保磁力	H'_c	3.18×10^5 A/m
漏洩係数	K_f	1.2
起磁力損失係数	K_r	1.2
1 極当たりマグネット断面積	A_m	1074.4 mm ²
1 極当たりエアギャップ断面積	A_g	334.0 mm ²
パーミアンス係数	P_c	2.73×10^6
動作点での磁束密度	B_d	0.305 T
エアギャップ有効磁束密度平均値	B'_g	0.521 T
エアギャップ有効磁束平均値	ϕ'_g	0.174 mWb
電機子巻線		
1 スロット当たり巻数	w	20 Turn
巻線スロット面積	A_a	63.3 mm ²
有効巻線面積	A_o	31.4 mm ²
巻線占積率	S_f	49.7 %
1 スロット当たり巻線長さ	L_{wire}	1400.0 mm
線材抵抗率	ρ	1.72×10^{-8} Ω/m
1 スロット当たり巻線抵抗	R_a	0.031 Ω
モータ特性		
同時通電コイル数	D_n	12
並列回路数	K_a	1
電源電圧	V_b	24.0 V
駆動回路による電圧降下	V_c	2.0 V
軸受損失トルク	T_o	0.049 N-m
始動電流	I_{st}	59.8 A
無負荷電流	I_o	0.3 A
始動トルク	T_{st}	9.5 N-m
無負荷回転数	n_o	1310.5 rpm
トルク定数	K_t	0.159 N-m/A

mm である。加工時間は加工機の準備も含めて 6 時間であった。

分割した板を積層 (ボルトの頭の収納用ざぐり穴有 10 層、ざぐり穴なし 40 層で計 50 層) し、万力でカシメた上で、前処理として、細穴放電加工で位置ずれ防止用固定ピン用の穴とワイヤ放電加工開始点の穴をあけた。その後、位置ずれ防止用の固定ピンを挿入し、ワイヤ放電加工で外形とざぐり穴、ボルト穴の切断を行った。ざぐり穴部分の加工には治具が必要になったので治具もワイヤ放電加工で作製した。加工時間は、細穴放電加工が準備に 1.5 時間、加工に 2 時間、ワイヤ放電加工が準備に 2 時間、加工に 17 時間、治具作製が準備に 2 時間、加工に 2 時間であった。



(a) ボルト用ざぐり穴側 (b) ブラケット挿入側

図10 巻試作したステータコア



(a) ボルト用ざぐり穴側 (b) ブラケット挿入側

図13 巻線後の試作ステータコア

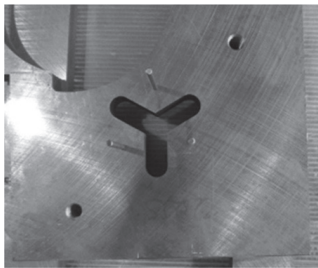


図11 ざぐり穴加工用治具

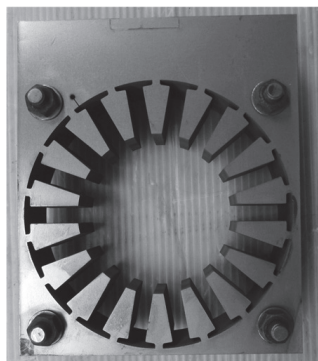


図12 外形切断後に残った材料板

図10(a) に試作したステータコアのボルト挿入用ざぐり穴のある側の写真を、図10(b) にブラケットを挿入する側の写真を示す。ステータコアはバラバラにならないようにボルトで固定し、位置ずれ防止用のピンを120°毎に3本挿入している。塗装と巻線が終わるまではざぐり穴がある層も固定しておく必要があるため、ワッシャをかませて50層全てをボルトで固定している。

図11にざぐり穴加工用に作製した治具を示す。ざぐり穴がある層は10層しかなく、加工時に材料がたわむ等の問題が生じる可能性があったため、このような治具を作製し、この上に材料の板を乗せてピンとボルトで固定して加工した。

図12に外形を切断した後に残った材料板を示す。外形切断の際には外形の内側だけでなく、外側もボルトで固定し材料板の反りや位置ずれ等の影響ができる限り出ないようにして加工した。また、細穴放電加工であけたワイヤ放



図14 組み立てた試作モーター

電加工開始点の穴があることも確認できる。

3.2.2 巻線

図13(a)に巻線後のステータコアのボルト挿入用ざぐり穴側の写真を、図13(b)にブラケット挿入側の写真を示す。各スロットに集中整列巻きで巻かれた巻線は、各相6直列1並列で接続されている。図13(b)からは、分かりにくいかもしれないが、スター結線の中性点の接続部分も確認できる。

ステータコアのティース部分は黒のエポキシ樹脂で粉体塗装を施した。ロータのフィールドマグネットに向き合う外側側面やブラケット挿入部分、ボルト挿入用ざぐり穴部分は塗装されないように耐熱テープでマスキングした。ざぐり穴がある側の塗装の下の固定ピンは抜けないように接着剤で固定してある。

エポキシ樹脂の塗装だけではティースのエッジによる巻線線材の絶縁皮膜の損傷を防ぎきれなかったため、ガラスクロステープを3枚重ねて貼り付けて追加対策を施し、問題を解決した。

3.2.3 組み立て

図14に組み立てたモーターの写真を示す。試作したステータコアは干渉等の問題を起こすことなく組み立てることが

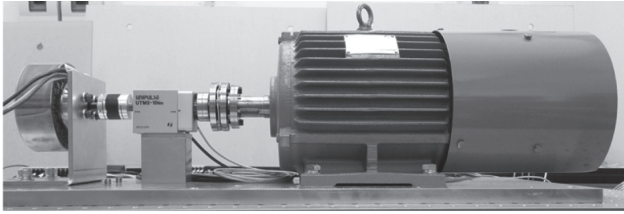


図 15 試作モータ特性評価システム

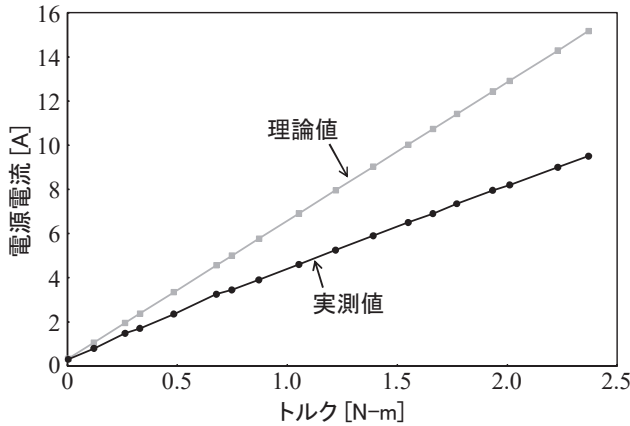


図 16 トルク－電源電流特性

できた。よって、ステータコアの設計寸法及び加工精度に機械的構造としての大きな問題はないことが確認できた。

3.3 特性評価

図 15 に試作モータの特性評価に使用した評価システムの写真を示す。左側が供試モータ、右側は負荷トルク発生用誘導機である。

図 16 にトルク－電源電流特性の理論値と測定結果を示す。実測値と理論値と比較すると、トルクが大きくなるにつれて理論値の電流の方が大きくなっていくことが分かる。また、変化の仕方については、理論値は(21)式から分かるとおり線形となるが、実測値も概ね線形に変化している。理論値と実測値では変化の傾きが異なることから、両者のトルク定数 K_t が異なるものと考えられる。図 16 の実測値のグラフを線形近似した近似直線の傾きの逆数から K_t の値を算出すると 0.259 N-m/A となり、理論値 0.159 N-m/A よりも大きい値となった。この結果となった理由として、理論値ではフィールドマグネットに関するパラメータに一般的な推定値を用いていたことが考えられ、実際にはフィールドマグネットによって生じるエアギャップ有効磁束平均値 Φ_g' が推定より大きかった可能性がある。(22)式より、 Φ_g' が大きくなるとそれに比例して K_t が大きくなること分かる。

図 17 にトルク－回転数特性の理論値と測定結果を示す。実測値は理論値よりも 300 rpm 程度低い回転数となったが、トルクの増加に対する減少の割合は実測値も理論値と

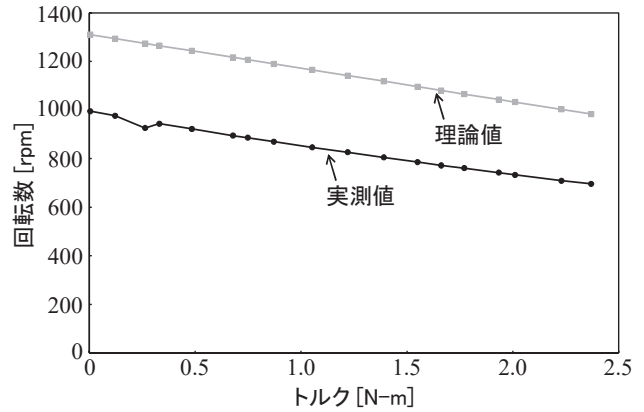


図 17 トルク－回転数特性

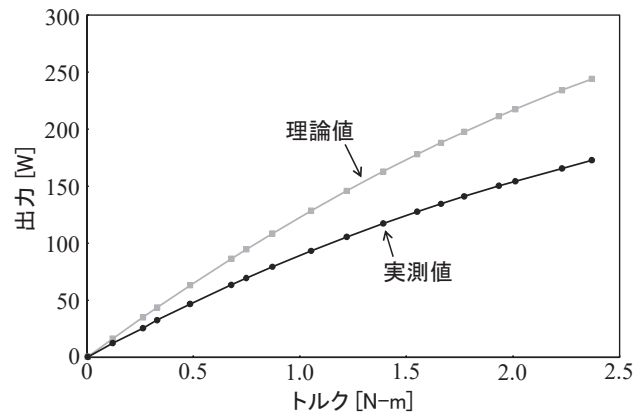


図 18 トルク－出力特性

同程度でありほぼ比例関係となっていた。実測値が理論値よりも低くなった理由も、フィールドマグネットによる磁束が推定より大きかったためであると考えられる。 Φ_g' が大きくなると K_t が大きくなることは先に述べたが、式(23)より、 K_t が大きくなると回転数 n はそれに反比例して小さくなること分かる。変化の傾きがほとんど同じであったのは、実測値においてエアギャップ磁束が大きいことによる傾きの減少効果と、鉄損などの電力損失分の電流が余計に流れて巻線抵抗による電圧降下が大きくなることによる傾きの増加効果が相殺した結果と見られる。

図 18 にトルク－出力特性の理論値と測定結果を示す。トルクが大きくなるにつれて理論値と実測値の差が大きくなっていくことが分かる。出力はトルクと回転数の積であるので、理論値と実測値の差は、回転数の差がほぼ一定であることからトルクが大きくなるほど大きくなるので、このような結果となる。

結果として、試作したモータは理論的な設計に対して、電流に対して発生するトルクは大きく、回転数は低くなり、その誤差は大まかに見て 30% 程度であった。理論値との誤差は、設計の際に一般的な値と推定しているパラメータがあることや鉄損などの電力損失の影響を無視しているこ

とが原因と考えられる。さらに厳密な設計を行う場合は、フィールドマグネットの減磁特性などに測定値に基づいたより正確なデータを用いる必要があり、さらに有限要素法などの数値解析を用いてエアギャップ磁束を算出するとより高精度な設計が可能になると考えられる。

謝 辞

本報で報告した試作を行うに際して、部品加工をしていただきました生産技術科、資材提供及び有益なご助言、ご

助力をいただきました松江電装株式会社、並びに熱心なご指導、ご助言をいただきました名城大学非常勤講師、伊東哲也様に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 東芝・小形モータ研究会．制御用モータ技術活用マニュアル，総合電子出版社，1987，382p.