

報告：2025年後期寺子屋BM塾 第38期 BM講座

**JABM理事兼寺子屋BM塾長
元・日立金属(株)
徳永 雅亮**

2025年度後期の寺子屋BM塾では、「モータ技術の基礎と自動車用モータの最近の話題」をテーマに取り上げ、加納善明先生に①「モータの基礎1、ブラシ付きDCモータとブラシレスDCモータ」、②「モータの基礎2、永久磁石同期モータと高トルク化技術」、③「モータの基礎3、高トルク化技術と自動車用モータの開発動向」の3連続講義をお願いした。

第1講

日時：2025年9月26日（金）@Zoom

講義：「モータの基礎1、ブラシ付きDCモータとブラシレスDCモータ」



講師：加納善明（大同大学 工学部 電気電子工学科/教授）

受講生総数：40名

記事：モータの基礎をブラシ付きDCモータから始める。モータは直流（DC）モータと交流（AC）モータに分類されるが、直流モータはトルク・速度等総て直流量（DC電圧）で制御でき、モータの制御が容易である。一方、交流モータでは電流・電圧は3相交流が用いられ、制御が難しいものの、直流モータの制御法を踏襲しており、トルク発生原理等の基本は直流モータにある。

ブラシ付きDCモータの基本構造は界磁磁石と回転子（電機子）からなり、回転子は1組（ワンターン）のコイル、整流子及びブラシで構成される。界磁による磁界中の電線（コイル）に流れる電流によりフレミングの左手則（IBL則）によってトルクが発生し、回転する。実際の回転子は連続的なトルク発生のために、コイルと整流子のペアを多数（例えば12組）分散させて配置されている。

フレミングの左手と右手の法則は同時に働いていることに注意しよう。左手の法則によってコイルが移動すると、電流が流れ、この電流*I*が流れたことによって、力*F*が始めに動かした向きと逆に発生する。すなわち、逆起電力が発生していることになる。左手の法則は電動機動作を表し、右手の法則は発電機動作を表すが、その結果得られる*F*は逆方向である。モータ回転に伴う逆起電力発生は駆動電源の視点で考えると理解し易い。トルクを発生させるために

電圧を印加しトルク電流を流す。その結果、コイルが動いたことで右手則によってトルク電流に対し反対の電流を流そうと、内部で電圧が発生する。この電圧の方向は電源電圧と逆向きの逆起電力である。左手則で定義されるトルク定数と右手則で定義される起電力定数は一致する。

1組のコイルと界磁磁石で構成されるモータのトルクは

$$T = F \cdot l = I_a B L \cdot l$$

で表される。ここで I_a ：電流、 B ：磁界強度、 L ：磁界中の導体辺の長さ、 l ：回転子半径である。回転角 θ に対してトルクは $T = T_{max} \cos\theta$ で変化する。 T_{max} はトルクの最大値である。従って、 $\theta = \pi/2$ で $T = 0$ になるが、ここでコイル電流の方向が反転し、 T は上昇し $\theta = \pi$ で T_{max} を示す。この構造ではトルクのデッドポイントが生じ、自己始動が困難になる問題が発生するが、2組のコイルを用いることによってトルク脈動を大幅に低減できる。更に回転子コイルを12組とすると1組のコイルがトルクを発生する角度は15°となり、トルクの最小値は最大値の0.991まで改善される。

実際のDCモータの構造を見てみよう。

1組の界磁磁石、電磁鋼板製鉄心に巻かれた3つのコイル、120°をカバーする3つの整流子、コイル端子と整流子片を繋ぐ3つのライザ、1組のブラシから構成される。電機子鉄心は0.35や0.5mm厚みの電磁鋼板が積層されている。電磁鋼板を用いて渦電流損が低減される。界磁磁石には多種の永久磁石が利用されている。コイルに用いられるマグネットワイヤはポリエステルイミドによる絶縁性とポリアミドイミドによる潤滑性を持たせるためにそれらがコーティングされている。スロット内の絶縁のためにはフィルムが用いられる。

DCモータの等価回路導出を行う。現実には電機子はコイルだけではなく、電機子鉄心を用いているので、この場合のトルクの導出法が必要となる。考え方は2つある。①磁気随伴エネルギーの変化で表す手法と②電気的出力と機械的出力が等しいことを利用する手法である。②の手法で実験的にトルクを求めてみよう。実験には2つのモータを用い、モータAとモータBの回転軸を機械的に接続し、モータBの端子に接続した電圧計による発生電圧と回転速度の関係を測定する。発生電圧と速度[rpm]の関係の傾きから逆起電力定数 K_E [V/rad/s] が得られる。電機子のコイルは電線を巻いて作製されているため、2つの端子から見た電機子抵抗の性質を1つの抵抗で測定された逆起電力を1つの電圧源で表し、これらが直列に結線されているものと解釈する。電圧方程式は

$$V = R_a I_a + K_E \omega$$

と表される。ここで、 V ：電源電圧、 R_a ：モータ巻線の抵抗、 I_a ：電機子電流、 K_E ：逆起電力定数、 ω ：角速度[rad/s]である。上式の両辺に I_a を乗算すれば、電力の式になり左辺の入力電力 ($V I_a$) が右辺の出力電力 ($K_E \omega I_a$) と銅損 ($R_a I_a^2$) の和で表される。得られた出力電力はブラシ・整流子間の電圧降下がなく、鉄損がないとすれば総て機械的動力（機械的出力）に変換されるはずである。機械的出力 P_o とトルク T の関係 $P_o = \omega T$ を導出しよう。その単位はW（ワット） [$W = J/s$] である。半径 r のロータ表面のある点に1Nの力を加えた場合を考える。回転数 n (rps) でロータが回転すると、1秒間に $2\pi n$ (m) 動くので、仕事率（電力） W は

$$W = F \cdot \Delta x = F \cdot 2\pi n r$$

と表される。この時角速度 ω は $\omega = 2\pi n$ である。トルク T は $T = F \cdot r$ で定

義されるので、 $W = T \cdot 2\pi n = \omega T$ となる。機械的出力 P_o は仕事率 W と等しく、 $P_o = \omega T$ が導出される。電気エネルギーから機械エネルギーへの変換が100%の効率で行われた場合は出力電力が機械的出力と等しくなり、 $K_E \omega I_a = P_o = \omega T$ が成立し、

$$T = K_E I_a$$

が得られる。即ち、逆起電力定数 K_E がトルク定数 K_T に一致する。なお、トルク定数 K_T はモータに1Aの電流を流した場合に発生するトルクの大きさである。

実験的に電流-トルク特性や静止トルク特性を取得し、モータの特性評価が行われる。誘起電圧定数から算出したトルクと実測トルクは凡そ一致するが、実測値の方が低い。その原因は端子電圧が脈動によって低下することによる。

ブラシ付きDCモータのトルク発生原理を電機子ティースが用いられる構造で再整理する。前述の複数組のコイルが用いられるケースとは異なる。界磁は1組、電機子ティースは3つとし、U、V、Wの3相巻線が施される。界磁磁束の方向とU相巻線に正の電流が流れた場合の発生磁束の方向が一致する回転子位置を $\theta = 0^\circ$ と定義し、時計方向を正とする。磁束 ϕ を発生させるために電流 I_o をコイルに流すと、 ϕ を打ち消す磁束が ϕ と反対方向に発生する。モータに駆動電圧を接続すると、電源電圧 V 、電流 I_o 、逆起電力 E の間に

$$V - |E| = R_o I_o$$

の関係が成立する。ここで、 R_o ：巻線コイルの抵抗である。 λ を ϕ を打ち消す磁束とすると $|E| = d\lambda/dt$ と表され、電圧方程式

$$V = R_o I_o + d\lambda/dt$$

が得られる。U相巻線鎖交磁束が $\cos\theta$ で変化すると、逆起電力波形は $-\sin\theta$ 分布となる。なお、永久磁石同期モータでは回転子位置に対する逆起電力の波形が $-\sin\theta$ 分布になるよう位置調整される。電機子巻線の作る磁束と界磁磁束が直交する場合、例えば $\theta = -90^\circ$ に回転子がある場合、最大の端子電圧が得られる。U相巻線に正の電流 I_o が流れ、出力電力 $I_o |E|$ が機械的出力に変換されるために機械的出力は脈動する。

磁気エネルギー W_m 又は磁気随伴エネルギー W_m の変化からトルク発生を考えてみよう。巻線鎖交磁束と巻線電流 i の関係において磁気エネルギーとトルクの関係は θ の関数で考えると、

$$T = -\partial W_m(\theta, \lambda) / \partial \theta$$

と表される。一方、 θ と電流 i の関数で考えると、

$$T = \partial W_m'(\theta, i) / \partial \theta$$

で表される。モータのトルク T は電流で決まるので、 i の関数として表される随伴エネルギーの方が使い易い。 W_m は $i d\lambda = dW_m$ を用いて0から t （時間）までの iV の時間積分によって以下の様に求められる。

$$W_m = \int_0^t iV dt = \int_0^t i \frac{d\lambda}{dt} dt = \int_0^t i d\lambda$$

巻線鎖交磁束が電流に対して線形に変化する場合、磁気エネルギーと磁気随伴エネルギーは等しくなる。随伴エネルギーを用いたトルク式からトルクを導出するためには λ - i 面上で、ある一定電流 i_t を通電し、回転位置が -120° から 60° まで移動した場合の磁気随伴エネルギーの面積をトルクに変換する。電機子巻線に流れる電流はブラシ・整流子の作用でU相巻線に交流が流れる。具体的には θ を 60° インターバルでU相電流 $+(1/2)I_t$ 、 $+I_t$ 、 $+(1/2)I_t$ 、 $-(1/2)I_t$ 、 $-I_t$ 、 $-(1/2)I_t$ 、 $+(1/2)I_t$ が時間変化と共に流れる。

電流-トルク特性 ($I_a - T$ 特性) は $T = K_E I_a$ で表され、トルクは

電流に比例する。傾きはトルク定数 K_T であり、逆起電力定数 K_E に等しい。電機子電圧の式から回転速度 ω を求めると

$$\omega = (V - R_a I_a) / K_E$$

となり、モータ速度は電流の増加とともに直線的に低下する。電圧一定とした回転速度-トルクの関係ではトルク軸の静止トルクと回転速度軸のトルクゼロの点を結ぶ直線を変化する。従って、印加電圧を変化させると上記直線を平行移動した速度-トルク特性が得られる。よって、モータの速度を変えることができる。可変速制御するには電機子電圧 V を変えるのが有効であることが分かる。電圧の異なる直線と交差する直線は速度とともに大きくなる負荷特性を与え、交差点 p は運転動作点となる。運転動作点からトルク軸と平行に直線を引き、回転速度軸との交点は運転速度 ω を与える。過渡項まで考えると電機子電圧に $L_o di/dt$ が導入されるが、速度起電力 $K_E \omega$ が抵抗 R_o よりも非常に大きいので、リアクタンス降下により過渡項は無視できる。電機子電圧 V を制御することによって速度制御が可能であることが再確認できる。

電圧を制御する手法には抵抗制御とDCチョッパによる制御の2種がある。直列に挿入された抵抗 R で電圧制御の場合の効率 η は

$$\eta = [1 - (I \cdot R) / V_s] \times 100 [\%]$$

で表される。ここで、 V_s ：電源電圧、 R ：制御用抵抗、 I ：駆動電流である。負荷電圧 V_o が V_s に近いときには許容可能な効率が得られる。DCチョッパでは通電時間 T を T_1 と T_2 に分け ($T = T_1 + T_2$)、 T_1 の間通電し、 T_2 では通電しない。Duty Factorを $\alpha = T_1 / T$ と定義し、 T_1 を0~ T までの可変とすると、 $0 \leq \alpha \leq 1$ が得られる。本手法による電圧制御法をPWM(Pulse Width Modulation)制御と呼び、ONとOFFのスイッチングは数kHz~数十kHz（数百 μ secから数十 μ sec）で行われる。極めて短時間のON-OFFのため、OFFの間もモータは惰性で滑らかに回転する。PWMパターン生成はパワエレ向けマイコンに三角波キャリア比較方式による自動生成機能を持たせることで行われる。DCチョッパ方式による速度制御には①スイッチのON-OFF動作によるエネルギーロスと②電流過渡応答項を含めると電流脈動が発生するの2点が常に付随する。但し、高周波化によって電流脈動の低減が図れる。

ブラシ付きDCモータの特性には①磁石の高性能化、②コイル巻数及び③コイル巻線の断面積が影響を与える。これらがトルクに与える影響を勘案してモータ特性の微調整が図られている。

ブラシ付きDCモータの問題点は機械的接触を持つブラシ・コミュテータの存在による機械的摩耗が生じるため、メンテナンスが必要なことにある。ブラシ粉末ゴミの発生のため食品機械には適合せず、火花発生のため誘爆性雰囲気には不適合になる。

ブラシ付きDCモータの欠点を解決するのがブラシレスDCモータである。整流子とブラシによるプラスマイナスの電流方向転換をスイッチングに代替する。スイッチングはインバータによって行われ、位置

(回転角 θ) 信号を基に上位の判断と指令を信号処理し、インバータに指令を出す。ブラシレスの場合電機子は外側で固定され、界磁は内側で回転し、永久磁石回転子を回転させる。3スロットの3相巻線にはu、v、wの3相対称交流電流（基本波）を流す。逆起電力波形と位置関係はブラシ付きDCモータと同様である。回転子位置に対し逆起電力波形が $-\sin\theta$ （基本波）となるよう位置調整が行われる。電流波形は逆起電力波形と同相になるよう制御され、電流波形の振幅でトルクが制御される。6スロットの3相

BM インフォメーション

ブラシレスDCモータ（スター結線の場合）は6つのトランジスタのスイッチングにより3相交流を実現している。モータ特性の制御にはPWMインバータ（矩形波駆動）による制御が行われ、トランジスタをスイッチングする。スイッチング量を変化させると電圧制御が可能となり、スイッチングする相を変化させて極性切替が可能である。フライホイールダイオードは、モータのコイルに蓄えられたエネルギーによる逆起電力を抑制し、トランジスタなどのスイッチング素子を保護するための素子である。正弦波駆動回路ではPWMインバータの6つのトランジスタのスイッチングで3相交流を実現する。モータ駆動波形を正弦波状にすることによってその振幅、周波数、位相を制御する。正弦波駆動は空調ファンに用いられ、低騒音化が実現している。

ブラシ付きモータでは界磁が固定子で電機子が回転子であり、ブラシレスモータでは界磁が回転子で電機子が固定子であることに注意しよう。

加納先生にはDCモータの基礎を丁寧に説明して頂いた。フレミングの左手の法則によって駆動力が得られると同時にフレミングの右手の法則に起因する逆起電力が発生するとの説明は初めて聞くものであった。DCモータの回転数制御の手法をブラシ付き及びブラシレスモータについて詳細に説明頂いた。

第2講

日時：2025年10月24日（金）@Zoom

講義：「モータの基礎2、永久磁石同期モータと高トルク化技術」

講師：加納 善明（大同大学 工学部 電気電子工学科/教授）

受講者数：41名

記事：永久磁石同期モータはACモータに分類され、ステータ構造はDCモータと同様で正弦波駆動の回転磁界を利用する。電流・電圧は3相交流を用いるが、制御は直流モータと同様の手法が適用される。固定子は鉄心と巻線からなり、巻線はコイルスロットに施され、外部から供給される電気エネルギーを回転子に伝える。回転子は誘導モータの場合には回転導体（アルミニウム鋳物又は銅バー）及び軸（シャフト）からなり、固定子から受けた電気エネルギーを機械エネルギーに変換する。ACモータにはIM（誘導モータ）、SynRM（シンクロナスリラクタン্সモータ）、SPMSM（表面磁石型同期モータ）、IPMSM（内部磁石型同期モータ）等がある。モータ開発の概略の歴史を見ると、スイッチトリラクタン্সモータ（SRM）1840年、SynRMが1870年に開発されたが、その機能の不十分なことにより、1870年に開発されたIMが主役となった。SPMSM及びIPMSMは1930年に開発されている。現在、上記モータはいずれも商品化され、実用されている。

SPMSMの構造を見てみよう。

ロータ径方向表面に磁石が配置され、ステータのスロット数は3の倍数である。回転速度はインバータの周波数で制御する。ロータはアウターロータとインナーロータがある。アウターロータはステータの外側に磁石を貼りつけたロータを配置する。インナーロータではロータコアの外径側に磁石を配置したSPM型とロータコアの中に磁石を配置したIPM型がある。ステータ巻線には集中巻きと分布巻きがある。集中巻きコアには1相コイルを1スロットに巻線する一体コアと分割コアを連結する分割コアある。分布巻線はコアに1相コイルを数ス

ロットに分割巻線したものである。なお、ステータ及びロータは電磁鋼板を積層して作製されている。

SRMは低イナーシャ・堅牢で、回転子は突極形状で基本的に磁石は使用しない。ハイブリッド型SRMでは少量の磁石が用いられる。SRMは安価、メンテナンスフリーという特徴を有するが、トルク脈動大、運転音大という欠点を有する。ダイソンのDC12掃除機にはSRMが用いられ、超高速回転100krpmにより従来機対比でモータ体積・重量を1/2化している。同一体格のPMモータと比較しても遜色のないトルクと85%を超えるモータ効率も実現されている。

IMはAlやCu製籠型バーを有するロータが用いられ、同期モータの優等生である。

自動車用駆動モータとして要求される性能を整理しよう。

DC及び各種ACモータの性能を比較すると、自動車駆動モータにはIPMモータが選択される。定トルク、定出力範囲を広くとれるIPMSMが適している。すでに実績として、Prius、LEAF及びACCORDに搭載されている。

電機子巻線による回転磁界の役割を整理する。

IMや同期モータを回転させるために回転磁界が必要である。IMでは回転磁界の変化を妨げようとする磁界が籠型バーに発生し、磁界間の相互作用でロータが回転する。同期モータでは回転磁界とロータの磁石の発生する磁界との相互作用で回転する。6スロット2極の3相巻線では空間的に $2\pi/3$ の位相差と時間的に $2\pi/3$ 位相差が得られる。6スロット2極3相巻線の巻線aは空間的に 180° をなすスロットとでペアを構成する。bスロットはaスロットから 120° の位置と 300° の位置でペアを構成し、cスロットはaスロットから 240° の位置と 60° の位置がペアになる。これらa、b、cコイルに 120° の位相が異なる正弦電流を流すと磁界の向きが 60° ずつ回転する。回転磁界の様子は24スロット4極分布巻線や48スロット8極分布巻線でも確認できる。

回転磁界の解析式を理解しよう。

各巻線u、v、wに以下の3相電流を流す。

$$i_u = I_s \sin \omega_0 t, i_v = I_s \sin(\omega_0 t - 2\pi/3), i_w = I_s \sin(\omega_0 t - 4\pi/3)$$

このとき、基準の軸から θ の位置に各巻線が作る磁束密度は正弦波分布を前提にすると、

$$B_u = B_{u, \max} \cos \theta = K_i \cos \theta,$$

$$B_v = B_{v, \max} \cos(\theta - 2\pi/3) = K_i \cos(\theta - 2\pi/3),$$

$$B_w = B_{w, \max} \cos(\theta - 4\pi/3) = K_i \cos(\theta - 4\pi/3)$$

となる。 $B_{u, \max}$ はu相電流によって得られるBの最大値、 i_u はu巻線の電流、 K_i はトルク定数である。これら B_u 、 B_v 、 B_w は各巻線がそれぞれ単独で角度 θ の位置に作る磁束密度なので、合成磁束密度 B_g は

$$B_g = B_u + B_v + B_w = (3/2) B_{\max} \sin(\omega_0 t - \theta)$$

で表され、各相磁束密度の1.5倍となる。 B_g の振幅の最大になる位置は $\omega_0 t - \theta = \pi/2$ で得られ、 $d\theta/dt = \omega_0$ が導かれる。以上の解析から、回転子は電源の角周波数 ω_0 で回転し、その回転方向が巻線u-v-wの配置方向（相順方向）であることを意味していることが理解できる。

PMモータのトルク発生原理を見てみよう。

固定子の回転磁界に同期して、回転子の永久磁石が回転す

る。トルク T は

$$T = T_{max} \cdot \sin\theta$$

で記述され、 θ は固定子磁軸と回転子磁軸の相角度である。 $\theta = 0$ の時 $T = 0$ で、 $\theta = \pi/2$ の時トルクは最大になる。6スロットの仮想コイルと2極の回転子磁石（N、Sを有する1つの磁石）からなるモデルを考える。モータの奥行を l 、励磁電流を I' 、コイルに鎖交する磁束密度を B_{mag} とすると、フレミングの左手則から仮想コイルに力が作用する。作用・反作用の法則から回転子磁石には仮想コイルと反対方向に力が作用すると考える。そのトルクは

$$T = \alpha l' B_{mag} l \sin(\pi/2) = \alpha l' B_{mag} l$$

と表される（ α は定数）。トルク/コイル電流比（ T/I' ）を最大化するためには回転子磁軸に対して固定子磁軸位置が回転方向に直交することが必要になる。直交関係の維持のための回転子の位置検出の必要性が理解できる。

IPMSMにおいて利用されるリラクタンストルクの発生原理を考える。2スロットのステータと2極の棒状ロータを考える。ティースとロータが直線に並ぶと磁力線は直線的であるが、直線からずれると磁力線が伸びる。この磁力線の伸びを直線に戻そうとして力が働き、これをリラクタンストルクという。ロータが突極性のない円形状ではリラクタンストルクは得られない。実際の4極ロータでは磁石が配置されるd軸と磁石間のq軸が定義できる。磁石の透磁率は空気とほぼ同等の $\mu = 1$ であるのに対し、q軸は鉄心で構成され透磁率が高い。従って、q軸の方がd軸よりも磁束が流れ易く、q軸のインダクタンス L_q はd軸のインダクタンス L_d より大きい。従って、q軸は突極として働く。以上から、q軸とd軸の磁気抵抗の差を大きくすれば、また、 L_q と L_d の差を大きくすればリラクタンストルクを増加できることが理解できる。

永久磁石モータのロータはSPM型とIPM型に分類され、IPMSMの磁石配置はインセット型、V字形、スポーク型及び多層逆円弧型がある。特にIPM型ではマグネットトルクとリラクタンストルクを利用でき、トルクを大きくできると同時に、高効率、高出力、広運転範囲（回転速度の広域化）等優れた特性が得られる。トルク式は

$$\tau = P_n \Phi_a I_a \cos\beta + P_n (L_d - L_q) I_a^2 \sin 2\beta$$

で表される。右辺第1項がマグネットトルク、第2項がリラクタンストルクである。ここで、 P_n は極対数、 Φ は鎖交磁束、 I_a はステータ電流、 β は電流進角、 L_d はd軸インダクタンス、 L_q はq軸インダクタンスである。リラクタンストルクを活用するために、非突極型PMモータが $L_d < L_q$ である逆突極型PMモータに変化してきている。

分布巻ステータと集中巻ステータの特性を比較する。

分布巻ではリラクタンストルク大、磁石減磁が少ない、コイルエンドが長いがその特徴であるが、集中巻ではリラクタンストルク小、磁石減磁が厳しい、コイルエンドが短いとの特徴を持つと一般的に整理される。集中巻では6スロットのコイルの3相2極のコイル配置が一般的である。このときロータの磁極も2極である。6スロットのコイルの通電ルートを変更して、4極2層巻のコイルにすることもできる。24スロット4極の分布巻は6スロット4極の集中巻に変更できる。本変更によるメリットはコイルエンドの低減、軸方向の短縮、使用材料の低減、銅損の低減があるが、デメリットとして磁石磁束の利用率の低下、リラクタンストルクの減少、磁束分布の不均一、騒音・振動の増大がある。ロータ電気角 θ_e を 0° と 30° とした場合の分布巻の発

生磁界の分布形状は変わらないが、集中巻の発生磁界は分布形状が変化し、回転角度も不明瞭になる。

モータの高トルク化の方策を考えよう。

まず、モータはその応用に応じた開発が行われるためモータに要求される特性は多岐に渡る。トルクと出力密度平面に各種モータをプロットすると高トルクと高出力密度が必要とされる電動航空機用モータがある。電動航空機用モータは高トルク、高速及び高出力が必要とされる最もDutyの高いモータである。モータ材料である磁石、鉄心及びコイルの進歩がモータの発展を支えている。自動車に搭載されるモータはHSG（Hybrid Starter Generator）を含め、最大トルク密度5~90Nm/L、最大出力10~150kWと広範囲に分布する。

モータの高トルク密度化には以下の方策がある。順番に見ていこう。

(1) 高ギャップ磁束密度化

高ギャップ磁束密度化には磁気回路の改良が最も一般的で、ラジアル配向磁石、ハルバツハ配向磁石及びスポーク型磁石が用いられる。スポーク状配置にフェライト磁石を用いて、フェライト表面積を拡大した8極ロータの例がある。本例では極間に三角形のフラックスバリアを採用し、リラクタンストルクの増大も利用している。

(2) ギャップ面積拡大

ギャップ構造にはラジアルギャップ（シングル、ダブル/ダブルステータ、ダブル/ダブルロータ）、アキシシャルギャップ（ダブルステータ、ダブルロータ）及びラジアル+アキシシャルがあり、原理的にはギャップ面積は拡大するが、高速回転が可能か、コスト的に問題がないかを判断し、実用化される。上述の構造は多くの論文で発表されている。現在最も期待されているのはアモルファス圧粉磁心を用いたアキシシャルギャップモータである。ダブルステータとコアレスロータで広いエアギャップになっており、ステータにはアモルファス磁粉を用いた圧粉磁心が用いられ、低ロスが実現している。圧粉磁心のために低透磁率ではあるが、トルク特性及び効率マップは電磁鋼板ステータと同等である。欠点としては高速回転が難しく、渦電流が大きく磁石はポンド磁石のみが適用可能な状況である。ロータにフェライト磁石を適用したダブルギャップモータや3面ギャップモータも研究されている。

(3) 巻線係数

小型モータではコイルエンド空間が低減できる集中巻が採用されるが、巻線係数が低下し、トルクが低下する。この欠点を解消するために、分散スロットモータが開発されている。毎極毎相のスロット数 q は $q = Z_1 / (2Z_2 m)$ で定義される。ここで、 Z_1 はスロット数、 Z_2 はロータ磁石の極対数、 m は相数である。分散スロットモータでは $q < 1/2$ になる。従来の2極3スロットのモータでは $q = 1/2$ である。通常モータの16極24スロットでは $q = 1/2$ で、分散スロットモータの20極24スロットでは $q = 1/5$ である。分散スロットモータの利点はトルク向上、トルクリプル低減、コギングトルク低減およびステータの磁気飽和の低減がある。巻線係数 k_w （フレミングの法則に対し、磁束密度と電流の位置関係がどの程度有効に機能しているかを示す割合）を用いて高調波成分の低減に必要な極数及びスロット数が議論される。

(4) アンペアターン（コイル占積率）

如何にスロットに占積率高く巻線するかが検討される。巻線手法、加圧成形コイル、接合コイル（カセットコイル）等多くの技術が開発されている。線材の構造を分割導体として渦電流を低減する手法もある。

(5) 高突極比

リアクタンストルクを増加し、磁石トルクを低減する手法で、磁石使用量の低減が可能となる。主としてロータの磁石配置とフラックスバリアの設置が検討される。現状最も有効な磁石配置は多層逆円弧磁石とされ、3層において好結果が得られている。

トルク脈動低減対策のために以下のモータ構造の改善が行われる。

(1) スキュー

磁心や磁石をスキューする。即ち、コア又は着磁を軸方向に対して斜めになるように設計する。

(2) 極数とスロットのコンビネーション

磁気エネルギーの変化の少ないスロット数と磁極数を選択する。極数とスロット数の最小公倍数が大きい程良い。

(3) エアギャップ変化の緩和（回転子側）

ロータブリッジの両端を直線又は円弧状にカットして、ギャップを次第に広げる。

(4) 磁極毎の大きさ又はピッチの変化

鉄心極・磁石極の幅やピッチを変化させて端部の影響を緩和する。

(5) 閉スロット化

スロットを無くすことでパーミアンス変化を小さくする。

(6) エアギャップ変化の緩和（固定子側）

突極の両端部を直線又は円弧状にカットして、ギャップを次第に広げる。

永久磁石同期モータのモータ特性に与える種々のパラメータ（材質、永久磁石配置、ロータ極数とステータスロット数の組合せ等）の詳細を説明して頂いた。多種多様な用途に用いられるモータに要求される特性に対して多くの研究や提案があるが、信頼性やコストの面で工業的にその適用ができない場合があることも理解できた。

第3講

日時：2025年11月14日（金）@Zoom

講義：「モータの基礎2、高トルク化技術と自動車用モータの開発動向」

講師：加納 善明（大同大学 工学部 電気電子工学科/教授）

受講者数：42名

記事：EV及びHEVの駆動方式によって駆動モータの要求特性は変化する。HEVではシリーズパラレル、パラレル、シリーズの各駆動方式によってモータの種類、定格電圧、最高出力及び最大トルクが変化する。冷却方式、巻線方式、誘導機の適用、アキシアルモータの適用によってトルク密度とモータ重量も変化する。歴史的に最も古く現在まで改良されているシリーズパラレル方式HEVであるプリウスの変化をフォローすることでその技術の変遷を理解することができる。変化の基本は高速化による小型軽量化である。第1世代から第4世代への変化を見ると、ギアトレンがチェーン式からリダクション式へ、モータ配置が同軸から副軸へ、モータのコア体積が

5.1Lから2.2Lへ、最高回転数が5,600rpmから17,000rpmへ、電圧が280Vから600Vへ、磁石重量が1.14kgから0.535kgへ変化してきている。磁石配置の改善、電磁鋼板の薄板化及びコアの焼鈍も導入されている。第4世代プリウスではモータ体積が1/4に低減されている。発電機の小型・軽量化では分布巻から集中巻に変更することで第2世代から第4世代で34%の体積低減が実現している。

プリウスの損失低減技術を見てみよう。

損失低減は熱的負荷の低減につながるため、冷却技術との関連が大きい。また、燃費改善には鉄損低減の効果が大きい。高速域では鉄心冷却、低速域ではコイル冷却が重要である。材質改善では電磁鋼板の薄板化や永久磁石の高性能化があり、設計改善では鉄損低減が可能なコア形状（磁石V字配置）によるリアクタンストルク比率の向上がある。第4世代ではV字磁石にセンター磁石を加えた▽型磁石配置が採用されている。

プリウスのモータ冷却技術の推移を見てみよう。

コイルと鉄心からモータケースまでの伝熱がポイントである。第1世代ではモータとギア室（T/A：トランスアクスル）は隔離されており、熱伝経路はコイルー鉄心ーケースで、ケースが水冷されている。第3世代では熱伝経路としてコイルー油ーケースが第1世代の熱伝経路に付加されている。即ち、ギアによって油を掻き揚げて、ステータコイルエンドにオイル（ATF：Automatic Transmission Fluid）を滴下し、コイルを冷却する。ATFの適用によって熱抵抗が30%低下する。第4世代ではギア潤滑油によるコイル直冷及びロータ軸心油冷が導入されている。

巻線技術の推移を見てみよう。

第3世代から第4世代における最も大きな変化は丸線から平角線への変更とコイルエンド長の短縮である。平角線採用によってコイル占積率が向上し、溶接方法や挿入方法の変更でコイルエンド長を短縮した。平角線にレジンを付加し、平角線間の絶縁距離を確保し、部分放電開始電圧も20%向上した。スロット内に入る平角線のターン数と集中巻の並列回路数をパラメータとして渦電流損減と占積率向上を狙う例もある。

自動車メーカー各社は駆動用モータの高効率化と・省資源化を目指して競い合っている。高速回転モータをターゲットとして、そのためのモータ設計・製造技術と磁性材料が技術課題となる。トヨタでは高速回転化、リダクションギアの適用、モータ供給電圧の高電圧化が適用されている。コア用電磁鋼板の薄板化による渦電流損低減やコアの焼鈍による磁気特性回復も利用している。更に、磁気回路も平板一層⇒V字配置⇒▽配置と変更し、リアクタンストルクの有効活用が図られている。磁石材料はDyフリーの熱間加工磁石が採用された。

本田技研工業では▽型磁気回路（厳密にはC型磁石の改良型）とq軸磁束の流れを妨げないフラックスバリアを配置し、リアクタンストルクを最大化した。磁石重量は14%低減され、Dyフリー磁石の適用が可能である。

日産自動車では永久磁石界磁型を巻線界磁型とする永久磁石フリーの駆動モータを開発している。ロータは8極界磁巻線型で、

極間にくさび型のスロットウェッジ（磁性楔）を挿入し、遠心力による巻線変形を抑える構造を持つ。界磁巻線型によるロータ発熱をモータ下部のオイルパンに溜められたオイルを電動ポンプによって汲み上げる直接油冷方式を採用した。

TeslaのModel S plaidではCFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics：炭素繊維強化プラスチック）を用いたロータへの強度対策が行われてきている。ロータ外周部にCFRPスリーブが配置され、磁石＋コアピースによる遠心力をCFRPスリーブによる引張応力で、コンペーンセートする。

三菱電機では集中巻駆動モータの高性能化を目指している。基本はロータコア内の磁石とギャップの間に回転方向に傾斜した非対称形状の空隙スリットを配置することにある。同時にリラクタンストルクを向上し、トルクリプルを空隙スリットの最適化によって低減することにも成功している。

日立製作所ではスロットガイドのない磁石保持機構を目指し、ロータ非対称ブリッジを採用している。

明電舎では漏れ磁束の抑制と最適な界磁を供給することで中高速、低トルク領域での効率向上をめざしている。

現状の駆動モータの高効率化・省資源化に関する自動車メーカー及びモータメーカーの推進実績に関して講義頂いた。実績は多種多様でどの手法が将来のメジャーになるかは現状では判断できないが、今後の経済及び技術的なスクリーニングによって最適解が得られるものと思われる。

2026年前期講座予定

第39期BM塾（2026年前期）はZoom開催で、以下の日程を計画している。詳細は決定され次第JABMのHome pageで開示されるので、確認の上、塾生諸君の参加をお願いしたい。

第1講

日時：2026年5月15日（金） @ZOOM

講義：永久磁石材料の基礎 1（物性）

講師：杉本 諭（東北大学/ 名誉教授・特任教授）
（大学院工学研究科）

第2講

日時：2026年6月19日（金） @ZOOM

講義：永久磁石材料の基礎 2（材料各論）

講師：杉本 諭（東北大学/ 名誉教授・特任教授）
（大学院工学研究科）

第3講

日時：2026年7月10日（金） @ZOOM

講義：永久磁石材料の基礎 3（最近の話題）

講師：杉本 諭（東北大学/ 名誉教授・特任教授）
（大学院工学研究科）

以上