

第 1 章

モータの種別と特徴

1.1 歴史的に見た各種モータ

モータの歴史は 1830 年代の巻線界磁直流他励モータの開発に始まると言われている。

図 1-1 は、著者（松井信行）らが電気学会調査専門委員会の数年間の調査活動報告や電気学会誌の解説論文¹⁾などをまとめる際に議論した図を基に作成したものである。現在知られている各種モータについて、それぞれのモータの発芽期を含めた主として大学などの研究機関で扱われていた時期を破線で研究開発段階とし、それが実用、あるいは商品化を目指して開発期に入っていた時期を中細線で試作検討段階、さらに実際に商品としてマーケットに出た時期を太線で商品化段階としている。この図からも明らかなように、巻線界磁直流モータが 1800 年代初頭に発案され、次いでスイッチトリラクタンスモータ、巻線界磁同期モータ、シンクロナスリラクタンスモータ、誘導モータなどが発案され、1900 年初めには直流モータ、同期モータ、誘導モータが市場に製品として出ていることが分かる。

シンクロナスリラクタンスモータや埋込磁石形同期モータが一旦は実用化に

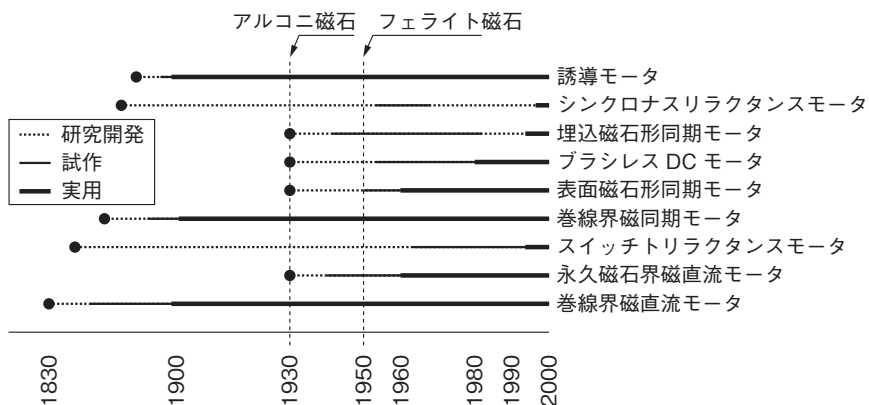


図1-1 モータ開発の歴史

向けて検討されたが、前者にあつては低力率、後者にあつては永久磁石の性能の安定性などに難点が残リ、そのまま製品としては世に出なかつた経緯がある。直流モータは可変速モータとして、誘導モータ、同期モータは商用電源駆動による定速度モータとして多用されてきた。小容量の直流モータにあつては、製作工程やモータ構造の簡素化、低コスト化の観点から巻線界磁に代わつて永久磁石を用いた永久磁石界磁直流モータが市場に出回るようになったが、当時の永久磁石の性能の信頼性などの問題もあり、あくまでも小容量のものに限定されていた。一方、1970年代のオイルショックを契機とした省エネルギー要求に応える形で1980年頃からフェライト磁石を用いたブラシレスDCモータが同期モータの応用として実用化段階に入った。

現在、後述するパワーエレクトロニクスとの整合性も考慮しつつ、高性能・高効率・高出力密度モータとして永久磁石形同期モータが普及するようになったきっかけは、アルニコ磁石やそれに次ぐフェライト磁石の開発に触発されて、現在のレアアース磁石にまでつながる永久磁石の高性能化の開発研究と実用化に負うところが大きい。最大エネルギー積 $[(BH)_{\max}]$ を指標に概観²⁾してみると、1950年代には $(BH)_{\max}$ でいえば1~4MGO_eのフェライト磁石や5MGO_e程度のアルニコ磁石が中心であったものが、1970年代になるとレアアース(希土類)磁石として6MGO_e程度のSm-Co(サマリウム-コバルト)磁石が出現し、1980年代初頭に出たNd-Fe-B(ネオジウム-鉄-ボロン)磁石では $(BH)_{\max}$ が14MGO_e程度と飛躍的に向上した。今日、この値は60MGO_eにまで飛躍的に向上している。

1.2 可変速モータの展開

1958年のサイリスタの発明によるパワーエレクトロニクス技術の開花によってモータ駆動システムの世界が大きく変わった。それまでの商用電源に代わる可変電圧・可変周波数電源(VVVFインバータ)による交流モータの可変速運転技術によって、商用電源による定速度モータとしての同期モータ、誘導モータ

タのイメージは一変した。

当初はインバータが高価であったために、交流可変速駆動システムの応用は鉄鋼関係など一部の産業部門に限定されていた感があった。これを大きくブレイクスルーしたのは、第一次とそれに次ぐ第二次オイルショックとともに、省エネルギーの重要性と経済効果に注目が集まり、ファン、ブロアのインバータ駆動可変速誘導モータによる大幅な省エネルギー効果が改めて認識されたことによる。可変速誘導モータを用いたファン、ブロア、コンプレッサなどの能力運転による省エネルギー効果は、自己消弧型素子としての大容量トランジスタの開発とそれに続く IGBT の普及・実用化や、マイコンによる制御技術の実用化・高度化と相まって、その適用範囲が中・大容量のものにまで拡大するとともに、前述の磁石性能の飛躍的な向上によってブラシレス DC モータや永久磁石形同期モータの優位性が認められ、インバータエアコンに代表されるような、わが国が世界に先導する省エネルギー形高機能化家電機器の開発にまでつながった。

ここで、可変速モータの草分けである他励、あるいは分巻直流モータを取り上げ、効率について考えてみよう。定常運転に対しては、次式に示す電機子電圧方程式とトルク式が成立する。ここで、 V_a 、 I_a 、 I_f は電機子電圧、電流および界磁電流、 Ω_m 、 T_a は速度とトルク、 K_E 、 K_T は起電力係数とトルク係数である。

$$V_a = I_a \cdot R_a + K_E \cdot \Omega_m \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

$$T_a = K_T \cdot I_f \cdot I_a \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

上式からモータの無負荷速度 Ω_{m0} は次式のように記せ、これより、直流モータはトルクが界磁電流と電機子電流の積に比例し、無負荷速度が印加電圧に比例するという制御上の特徴的な特性を有していることがわかる。

$$\Omega_{m0} = V_a / K_E \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

さらに、(1.1) 式を基にした直流モータの入出力関係を示す図 1-2 を参照して、電機子の入出力に着目してこのモータの一定電圧下での効率 η^3 を考える。一般に直流モータの速度変動率は小さいので、機械損や鉄損をほぼ一定の固定

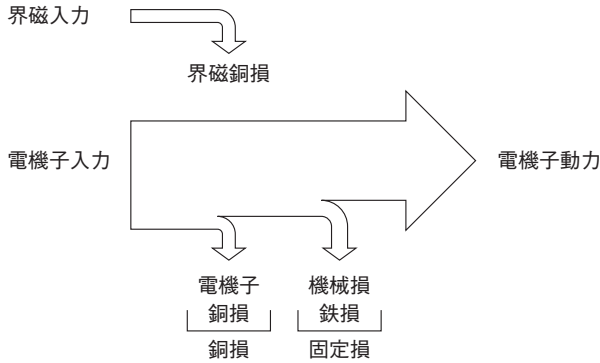


図1-2 直流モータの入出力関係フロー

損 P_{con} と表記して、

$$\eta = 1 - (I_a^2 R_a + P_{con}) / V_a I_a$$

$$= 1 - \left\{ \left(\sqrt{I_a R_a / V_a} - \sqrt{P_{con} / V_a I_a} \right)^2 + 2 \sqrt{R_a P_{con} / V_a} \right\} \dots\dots\dots (1.4)$$

と記せるので、これより最大効率条件は $I_a^2 R_a = P_{con}$ 、すなわち鉄損を含む固定損と銅損が等しいというモータ技術者の間ではよく知られた関係が得られる。

ごく最近までの産業用途では、モータは負荷に応じた定格動作点で最大効率を実現、すなわち上式が成立するようにシステム設計されていた。しかし、最近の自動車用、あるいはコンプレッサ用モータでは定格という概念はないに等しく、負荷の要求する複数の動作点、多用動作点に置いて高い効率が求められる。この要求に応えるためには、それぞれの多用動作点において要求される速度、トルクに対して、鎖交磁束（界磁）と電流（電機子電流）の適正な配分を考慮して、要求出力を満たしつつ最大効率を発揮するようなモータ構造設計と制御アルゴリズムの融合が必要である。

ところで、直流モータのブラシ、コミュテータはロータ（回転子）位置に応じて機械的に通電電機子コイルを切り替えていく巧みな機構であるが、

- ① 機械的摩耗→要メンテナンス
- ② 火花の発生→誘爆性雰囲気の中での使用不可

③ ブラシ粉末→食品工場など清潔さを要求する場所での使用不可などの問題が生じるので、同期モータを用いてブラシ、コミュテータの機能をインバータとロータ位置検出器による電子処理に代え、直流モータの無負荷速度は電圧に、トルクは電流に比例するという機能を継承したものが前述のブラシレス DC モータ⁴⁾である。

交流モータによる可変速駆動によるファン、ブローの能力運転による省エネルギーの普及とともに、交流可変速システムによる直流モータ特性の実現策として、誘導電動機のベクトル制御、同期モータの I_d ゼロ制御が実用されている。また、制御システムの簡素化、信頼性の向上の観点から、ブラシレス DC モータも含めて、これら交流モータの直流モータ的制御に不可欠のロータ位置検出器を不要とする**センサレス制御**も実用されてきている。交流可変速システムをこれらの制御とともに考えるに、誘導モータに比して同期モータが格段に簡単に扱える点が近年の同期モータ方式の急速な普及の一因でもある。

1.3 用途指向型モータとしてのモータの発展

交流可変速駆動が一般に普及する中で、モータおよびモータ制御システムに対して厳しい要求を突き付けたのは工作機械業界とロボット業界であった。一般的な技術的要求のほかに際立った特性として、

- ① 極低速・大トルク運転領域から弱め界磁運転領域を含めた最大速度運転範囲の確保
- ② 運転領域内での速度脈動・トルク脈動の極小化
- ③ モータそのものの高トルク密度化・高出力密度化

などが挙げられる。

低速・大トルクの実現には高界磁磁束が不可欠である反面、高速運転域の確保には低界磁磁束が望ましく、モータ設計上は二律背反の課題である。また、トルクや速度の脈動抑制にはモータの電磁設計的アプローチとインバータの高速・高精度電流制御技術の融合が必要であり、トルクあるいは出力密度の飛躍