

第11回

電管用モーター

モーターの誕生から電車の誕生まで

世界で初めて作られたモーターは、イギリスのファラデー (Faraday) による電磁現象の研究・実験の中で1821年に誕生したとされています。ただし、このときのモーターは棒が電磁力で回転運動をするというだけのもので、何かを回したりできるものではありませんでした。また、電源が容易に得られる時代では無く、実用的な応用を考慮することができる段階にありませんでした。

しかし、その後、1820～30年代に徐々に新しいアイデアが加えられていき、実用的なモーターを目指した改良が進められました。そして、アメリカの鍛冶屋であったダベンポート (Davenport) が実用的なモーターを考案し (図1)、さらに1835年にそのモーターで駆動する今日の鉄道車両模型のようなものを作り公開しました。

ダベンポートのモーターは固定子に永久磁石を配置し、回転子に電磁石を配置した構成であり、原理的には、現在も玩具用のモーターで広く用いられている直流モーターと同じものだったようです。

その後、固定子に永久磁石ではなく電磁石を用いる自己

励磁式の直流モーターが開発されていき、強力な力を発生させることができるモーターが実現できるようになりました。そして、1879年にベルリン博覧会でドイツのシーメンス (Siemens) が電気機関車を出品しました (図2)。この機関車は第3軌条から集電してレールを帰線とする世界最初の集電式の電気鉄道でした。さらに、1881年にシーメンス-ハルスケ (Siemens Halske) 社が世界最初の電気鉄道営業運転をベルリン近郊で開始しました。

初期の電車はモーターの動力をワイヤーロープやベルトで伝達していましたが、まもなく歯車で動力を伝達するようになっていきました。そして、1886年には、アメリカのスプリング (Sprague) (図3) がモーターの一端を車軸上に他端を台車枠に支持し、歯車で動力を伝達する方法を考案しました (図4)。これは吊り掛け式と呼ばれる装架方式で、現在でも用いられている方式です。

さらに、スプリングは架空電車線からトロリーポールを用いて集電する電力供給方式を考案し、世界で初めて大形の電車を作って、リッチモンドで路面電車の営業運転を開始し、大成功を収めました。黎明期には蓄電池を電源とした電車も試作されていましたが、当時の蓄電池は十分



図1 ダベンポートのモーター

提供 : Courtesy of the National Museum of American History.



図2 ベルリン博覧会の電気機関車

出典 : User WHell on de.wikipedia [Public domain], via Wikimedia Commons



図3 電気駆動の父、スプリング
出典：Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0 / GFDL

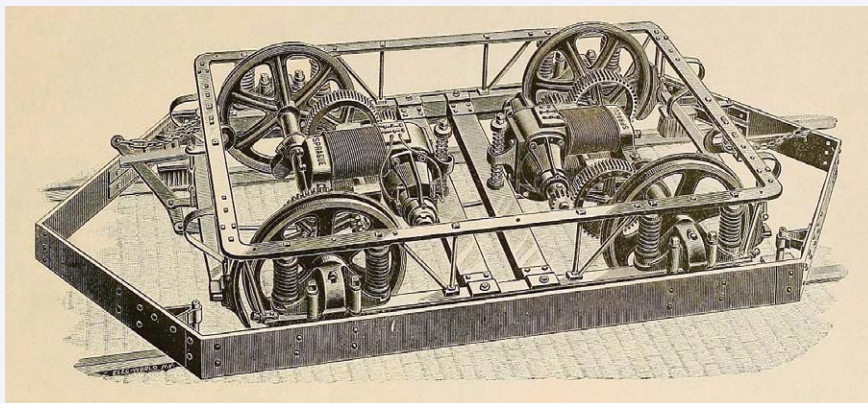


図4 スプリングのモーターを搭載した台車
出典：The Street Railway Gazette (1888-12)

な容量が無く、充電に時間がかかり重量も重かったことから、電車の電源として十分な性能がありませんでした。また、レールから給電する方式は電圧を高くすることが難しく、大きな電力を送電することが困難でした。そのため、電車線からの集電技術の確立によって初めて本格的な電車が可能となったのです。

また、スプリングは運転台からの指令で複数のモーターを同時に制御して連結した電車を走らせる方式を考案したり、回生ブレーキを用いた車両を作ったりもしました。すなわち、現在、電車と呼ばれているものを実現するのに必要な技術の多くを作り上げました。

【 直流モーターによる電車駆動技術の発展 】

スプリングの会社は、その後、エジソン (Edison) の会社などと統合され、現在のゼネラル・エレクトリック (General Electric) 社 (以下GE) となりました。GEでは統合された各社の経験を参考にして、1892年に全密閉形の直流モーターGE-800形を試作し、その後、その改良形のGE-57形を試作しました。一方、GEと並んで現在の電気機器技術の礎を築いた電機メーカーであるウェスティングハウス (Westinghouse) 社も1894年に同じく密閉形の直流モーター12-A形を製作し、その2形式が当時の標準となったようです。

初期のモーターはフレームで覆われておらず内部構造がむき出しの開放形でしたが、上述のモーターはフレームで覆われた密閉構造で、モーターの内部構造が保護されており、今日のモーターと同じような外観になっていました。

その後、1905年に、固定子に補極を設ける構造が考案され、良好な整流が可能となり、様々な改良が加えられながら、モーターの出力や最高回転速度を徐々に向上して

いきました。そして、1912年に試作されたピッツバーグ (Pittsburgh) 社の電車で用いられたウェスティングハウス社のモーター328形では、回転子軸にファンを取り付けた自己通風冷却方式が採用されました。それまでの間、電車用モーターの構造は水の浸入を防ぐために全密閉構造を採用してきましたが、回転子にファンを取り付けて通風冷却をすると出力を向上することが可能なことが分かり、その後は、自己通風式が主流になっていきました。

このようにして、電車用モーターの方式は、装架方式が吊り掛け式、冷却方式が自己通風式の直流モーターが主流となり、現在でも使用されている電車用モーターと同じ方式が確立されました。

【 インバーターと誘導モーターによる電車駆動 】

このように、電車用モーターは近年まで直流モーターが主流でした。しかし、直流モーターはブラシと整流子により、摺動接触させながら回転子に電流を流す仕組みであるため、それらの摩擦摩耗部品の保守が必要でした。そこで、そういった保守が不要なインバーター駆動の誘導モーターが登場すると、新しく作られる電車では直流モーターは用いられなくなり、電車用モーターは誘導モーターに置き換わっていきました。

誘導モーターの原理は1824年にフランスのアラゴ (Arago) により発見された磁針と導体の相互作用に基づくものです。この原理を用いて誘導モーターを実現するためには、交流電流により回転磁界を発生させる必要があります。1885年にイタリアのフェラリス (Ferraris) は交流電流で回転磁界を発生させる方法を考案し、1888年までに誘導モーターを試作しました。これと同時期に、ア

アメリカではテスラ (Tesla) が多相交流を用いて回転磁界を発生させる方法を考案して、1887年に誘導モーターの特許を申請しました。また、ドイツでドブロボルスキー (Dobrowolsky) が1889年までに三相かご形の誘導モーターを考案して試作し、今日の誘導モーターの基本的な技術を生みだしました。

その後、鉄道車両の駆動に誘導モーターが用いられたのは1898年に開業したスイスの二つの登山鉄道 (ゴルナグラード鉄道、ユングフラウ鉄道) でした。これらの鉄道では三相交流き電で車両に電力を供給し、その三相交流で誘導モーターを駆動して車両を走らせる方式を採用しており、現在でも用いられています (図5)。しかし、この方式は2本のトロリ線を必要とするため、建設費と保守費がかさみます。また、一定周波数の交流では、誘導モーターの制御が非常に面倒になります。そのため、その後、この方式が普及することはありませんでした。

誘導モーターが鉄道車両駆動に本格的に適用されるようになったのは直流から任意の周波数、任意の大きさの交流が生み出せるインバーターが開発されてからでした。インバーターは電力用半導体素子により構成されていますが、制御可能な電力用半導体素子として初めて登場したのが、GEが1958年に開発したサイリスターでした。サイリスターが登場すると、1960年頃からサイリスターを応用したインバーターでモーターを制御する方法が研究され、1965年頃から鉄道車両駆動への応用が試みられるようになりました。

そして、1972年にはクリーブランドの空港線電車でインバーター制御のかご形誘導モーターによる直流電車が営業運転を開始しました。しかし、この車両は故障が多く、1974年には従来の直流モーターに戻されてしまったようです。

一方、ブラウンボベリ (Brown Boveri) 社は1965年頃



図5 三相交流電化のユングフラウ鉄道

から誘導モーター駆動の開発をはじめ、1971年にはヘンシエル (Henschel) 社とともに誘導モーター駆動の電気式ディーゼル機関車DE2500を試作しました (図6)。そして、この機関車をベースにして様々な誘導モーター駆動車両の開発を行うようになり、1976年にはドイツ国鉄のE120機関車において誘導モーター駆動が行われました。これをきっかけにドイツのメーカーも誘導モーター駆動車両の開発を活発に行うようになりました。そして、1975年にはニュルンベルク市電向けにシーメンスが誘導モーター駆動のインバーター電車を製作しました。その後も西ドイツやスイスを中心とするヨーロッパ各地でインバーター電車が広まっていきました。

一方、日本でも、1970年代に電機メーカー各社の社内でインバーター制御の誘導モーターによる駆動システムの開発が開始され、1982年に熊本市電で日本初のインバーター電車の営業運転が開始されました。そして、その後、誘導モーターを用いたインバーター電車が日本でも標準となっていきました。

永久磁石同期モーターの実用化と今後の展望

一方、インバーターの実用化により、誘導モーターのみでなく同期モーターも電車用モーターの候補になりました。

同期モーターの原理が発見されたのは1883年にイギリスのホプキンソン (Hopkinson) が回転磁界中で永久磁石が同期回転速度で回転することを確認したのがはじめとされています。つまり、永久磁石同期モーターの原理が確認されたといえます。その後、広く実用されていった同期モーターは回転子に永久磁石を配置したものでは無く、回転子・固定子ともに電磁石を配置し、回転子にはスリップリング



図6 インバーター駆動誘導モーターを用いたDE2500機関車

出典: alex26 (trainpix.org) [CC-BY-3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>)], via Wikimedia Commons



図7 鉄道総研で試作した全閉形の永久磁石同期モーター

等で電流を供給するタイプの同期モーターでした。

そのようなタイプの同期モーターを用いた電車駆動システムの開発はインバータ駆動誘導モーターの開発と同時期に行われました。日本では1971～1972年に同期モーターによる電車走行の試験が行われ、良好な結果が確認されましたが、実用化には至りませんでした。一方、海外では1979年から負荷転流形の同期モーター方式の試験が行われて成功を収め、同期モーターはフランスの機関車用モーターの標準となりました。

一方、永久磁石を用いた同期モーターは小形モーターの分野では早くから用いられていましたが、電車のようないくつかの大出力のモーターに使用できるような強力な磁石が無かったため、電車用モーターの方式として注目されることはありませんでした。しかし、1967年に希土類永久磁石の一つである強力なサマリウムコバルト磁石が登場し、その後、1983年に登場したネオジム・鉄・ボロン磁石はさらに強力で、価格も比較的安価でした。そのため、これを用いた永久磁石同期モーターによる鉄道車両駆動が検討されるようになりました。

日本では、1990年頃より鉄道総研において永久磁石同期モーターの開発が本格化し、車輪一体形モーターが試作されました(図7)。その後、次世代通勤電车用、軌間可変電车用、高速新幹線電车用、在来線全閉形など、各種方式の試作と研究開発が進められ、2006年にJR東日本のE331系電車で永久磁石同期モーターが営業運転に使用されました。さらには、2007年から2010年にかけて東京メトロで01系、02系、16000系の3車種で永久磁石同期モーターが用いられるようになりました。また、ヨーロッパにおいてもLRT、地下鉄、高速鉄道車両向けなど様々な鉄道車両

向けに永久磁石同期モーターが開発されており、今後、その適用が拡大していくと予想されます。

永久磁石同期モーターは効率が高くて発熱が少ないため、冷却の必要性が低くなります。そのため、日本で現在実用化されている永久磁石同期モーターは自己通風式ではなく、全閉自冷式を採用しています。その結果、非常に低騒音で機内清掃の保守も不要でシンプルな構造のモーターになっています。

この最新型のモーターを見ると、一時は電磁石に置き換えられた部分に永久磁石が復活したり、一時は自己通風に置き換えられた全密閉構造が復活したりと、以前の方式に先祖返りしていることが分かります。はじめに作られたモーターは原理的にはシンプルで優れたものだったのですが、強力な永久磁石が無いことがネックで、電磁石を使用したことから、直流モーターやかご形誘導モーターで自己通風式のもの主流となっていました。しかし、そのネックとなっていた永久磁石の劇的な進歩により、従来のシンプルな方式が復活したわけです。そう考えると、将来の技術進歩を考えるには、どのような先祖返りの可能性があるのかを考えてみるのも面白いかもしれません。

(近藤稔/車両制御技術研究部 動力システム研究室)

文献

- 1) 松田新市：「高速度電動機と駆動装置」, 電気車研究会, 1958
- 2) 大木創, 田中国昭：「電気機器論 設計思想と技術の変遷」, 実教出版, 1984
- 3) 鉄道車両用VVVFインバータ開発の歴史を残す会：「インバータ制御電車開発の物語」, レールアンドテック出版, 2008
- 4) 持永芳文, 宮本昌幸 編著：「鉄道技術140年のあゆみ」, コロナ社, 2012