


第1章 SR モータの起源と歴史



本章は switched reluctance モータ開発の初期から現代に至るまでの大きな道筋を概観する。このモータの起源・由来を語らなくてはならないのだが、あらゆる資料を蒐集し、それに基づいて客観的に述べるものではないことを容赦いただきたい。つまり、このモータの開発と普及に情熱を持って行動した数人の人のご縁を得たことを基軸として、筆者の見方を綴るものである（その人たちが英国や隣国のアイルランドに拠点を持っていたので、この記述にもその影響があると思われる）。

1.1 Switched reluctance motor の名称について

SR モータとは switched reluctance motor の略称である。Miller¹⁾によると、この名称の由来として S.A.Nasar²⁾ が 1969 年に提唱したとされる。しかし広く知られて使われるようになったのは、後に記すように 1980 年ごろからである。それ以前は variable reluctance motor という用語が英語圏で使われていた（ちなみに、今日では専門家の間では VR type とか VR motor, VR machine という略称で通じる）。

Reluctance とは磁気抵抗のことで中国語では磁阻という。電気抵抗は resistance であり中国語では電阻である。励磁されている相が形成する磁気回路のリラクタンスが低くなろうとする向きにトルクが発生することを利用するのがリラクタンスモータであって、様々の方式がある。Switch は切り替えるという意味だが、励磁されている相を切り替えることに由来して switched reluctance motor ということもできるが、Miller も言っているように、正確な専門用語としては to switch よりも to commute（転流する）がふさわしい。つまり

“switched reluctance”は何となく釈然としない。しかし広く使われるようになったので受け入れざるを得ない。

中国語では直訳式に切替（換）式磁阻馬達という。

一方、日本語が確立しているかどうかについても若干の問題がある。まず reluctance motor に当たる漢字表記が日本語にはなく、電気学会ではリラクタンスモータと表記する。これに switched が付いているので、カタカナ表記をするとスイッチトリラクタンスモータとなるとするのが正論かも知れない。確かに switched の ed は t の音であるが、日本語でいうと「行った」の軽いツ（促音便）に近いので ed を忘れてスイッチリラクタンスモータと記す方が違和感がない。この表記は文字数が多いので本書では SR モータと記す。

一方、ロータに永久磁石を使って、外部では半導体素子を使って駆動・制御するモータはブラシレスモータと呼ばれる。このタイプの中で Interior permanent-magnet type (IPM 型) と呼ばれるタイプは、永久磁石をロータ鉄心の内部に入れ込んだ構造で、リラクタンスモータの特徴を取り込んだ、いわばハイブリッド型というニュアンスがある。これについては第6章で少し触れる。

最近では永久磁石をステータに併用する方式の SR モータも提案されているが、本書は永久磁石の併用のない純粋な SR モータに絞っている。

1.2 初期の英国のモータ開発

英国では蒸気機関に続いて、電動機の発明と発展が試行錯誤を伴いながら、めざましく進んだ時代があった。表 1.1 には主な出来事を年代順に列挙している。電気力学でいうと、ヨーロッパ大陸では 1820 年のエルステッドの発見（電流が磁界を発生すること）とアンペアの法則の発見、1824 年のアラゴの円盤、1826 年のオームの法則と大きな発見が続いた。そして決定的なのが 1831 年の英米で見たファラディとヘンリーによる電磁誘導の発見である。

電気回路の解析と計算の基本となるキルヒホッフの法則が定式化されたのは 1849 年であるが、その以前にいろいろなモータが発明されていたのだが、キルヒホッフが回路要素としてモータまで考えていたとすれば驚きである。

表 1.1 モータおよび関連電磁気学に関する科学史年表

年	国	名前	業績
1765	英	Watt	蒸気機関の完成
1820	デンマーク	Oersted	電流の磁気作用の発見
1820	仏	Ampere	アンペアの法則発見
1824	仏	Arago	回転している銅版が磁針に作用すること発見
1825	英	Stephenson	蒸気機関の実用化
1826	独	Ohm	オームの法則を発見
1829	独	Gauss	ガウスの磁束定理発見
1831	米	Henry	モータの原型を作り理論づける
1831	英	Faraday	電磁誘導を発見
1832	米	Henry	自己誘導現象の発見
1833	英	Richie	電磁石モータを作る
1834	露	Jacobi	整流子モータを作る
1836	米	Davenport	直流モータを作る
1838	英	Davidson	今日の SR モータで電気鉄道の実験
1849	独	Kirchhoff	キルヒホッフの法則確立
1860	伊	Pacinottoi	環状電機子の発明
1864	英	Maxwell	電磁場理論の大成、電磁波の予言
1866	独	Siemens	自励式発電機を作る
1867	英・独	Siemens 兄弟	近代的発電機を開発
1867	ベルギー	Gramme	交流発電機を作る
1879	米	Edison	高効率直流発電機の開発
1882	ユーゴスラビア	Tesla	火花を出して回転する直流モータに代わって 2 相交流モータの原理発見
1881	英	Ewing	東京で磁気の研究を開始、hysteresis を造語、日本の永久磁石科学技術の発端となる
1888	米	Tesla	単相交流モータを作る
1889	独	Dobrowolski	3 相籠型誘導機を発明
1893	米	Steinmetz	GE で活躍開始、モータにおける磁気ヒステリシスの研究で貢献
1905	スイス	Einstein	Maxwell の方程式に整合する特殊相対性理論発表
1910	英	Poynting	電磁エネルギー流の理論整備
1919	英	Walker	VR 型ステッピングモータの誘導子を発明
1937	米	Teare	ヒステリシスモータの開発と理論的貢献
1940	米	Kron	GE で回転機のテンソル論を提唱 二軸理論
1969	独	Hasse	籠型誘導モータのベクトル制御理論
1976	アイルランド	Byrne	可飽和 VR 型ブラシレスモータ
1983	日	指田	進行波型超音波モータを発明

さて、1825 年にスティーブソン (G. Stephenson) がイングランドで旅客を乗せた列車を蒸気機関車ロケット号で走らせたのはよく知られている。そして 1830 年から 10 年間に英国の蒸気機関車による鉄道網は急成長したという。

この時期はまた電磁気学や電気力学の揺籃期だったのだが、SR モータを使った電気機関車がスコットランドで試作されたのだ。それを見てみよう。

1.2.1 デビッドソンのモータ

世界最初のSR モータはデビッドソン (R. Davidson) が1838年に作ったと言われている。そこで引用されるのが図1.1の電気機関車³⁾であるが、それを駆動するもので、西のグラスゴーと東のエジンバラを結んだ鉄道のほぼ中間のフォールカーク (Falkirk) で実験されたいしい。

1838年と言えば日本では、明治維新を30年も遡った頃で、本邦西洋医学の開祖・緒方洪庵 (1810~1863) が大阪に洪庵塾を開いた年である。日本の電気鉄道の歴史の始まりはそれから70年後のことである。

デビッドソンの車両の重量は数トンもあって、速度は人間1人が押して動かすのと同じようなものだったと言われる⁴⁾。つまり1馬力に至らない1人力ぐらいの非力なものだったようだ。本当にこの絵のようなものだったとしたら、車両に人を乗せて動くようなモータではない。一種の概念図だと筆者は思う。このモータは electrical engine と呼ばれた。今から174年も昔のことである。

SR モータの初期の歴史については Anderson が Miller 編集の参考資料1) で詳しく当時の資料を示して解説しているが、1941年に Charles Wheatstone も

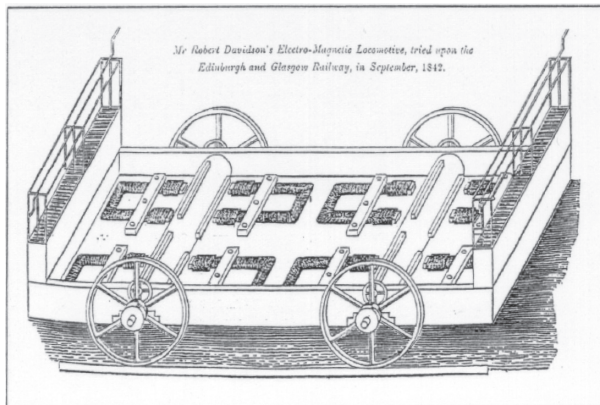


図1.1 Davidson のモータ：馬蹄形磁石が8個見える

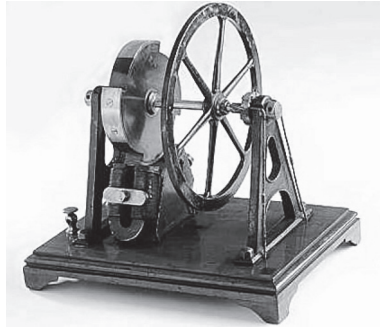


図 1.2 Wheatstone のモータの一つ (Prof. J. Lacy 提供)

U字型(馬蹄形)電磁石が2個あって、交互に励磁を切り替えながら(つまり電源から見た磁気抵抗を変化させながら)回転することが想像される

様々な設計をしていることがわかる。そこには Davidson のモータと類似の Tailor のものもある。

図 1.2 の写真はやはり Wheatstone のものであり、機械的なラチェットに似た構造のロータと2つの電磁石によって持続回転する仕組みであると思われる。

現実的な初期の SR モータとして引用されるのが、図 1.3 に示すフランス人技術者 P.G.Froment (フロマン, 1815~1860) による 1850~1860 年製とされる印刷機用モータ⁵⁾である。彼は 1837 年に École Polytechnique を卒業後にマンチェスターに留学しているので、このときに Variable reluctance 型モータの知識をイングランドで得たものと推察される。

1.2.2 電気技術史の中で考える

デビッドソンによる電気鉄道の実験はヨーロッパで電気や磁気の性質がわかりはじめて 20 年ぐらいのことであるから、この発明というか提案は次の様々な観点から歴史的に意味深いものである。

(1) 電磁石が鉄片を引き付けるという現象をモータとして利用したのは水蒸気が動力を発生することに着目した蒸気エンジンと対比できる。ワットが実用できる蒸気エンジンを作ったのが 1765 年であるが、エネルギー変換効率は極めて低いものだった。カルノーによって蒸気機関の理論が提唱されたのは 1824 年であり、スティーブンスンの蒸気機関車が本格的に動きだしたのが 1825 年頃で

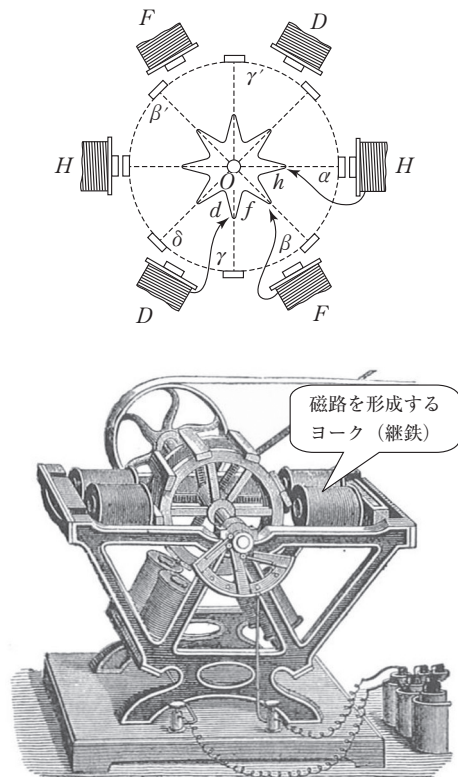


図 1.3 フランスの技術者 Froment が印刷機用に作ったモータ（文献5）より
 H, F, D は原理的には馬蹄形磁石であり $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は車輪に取り付けられた厚い鉄板。 d, f, h は車輪とともに回転する転流機構である

あるから、ワットからスティーブンソンまで 60 年があった。

(2) 蒸気機関車のピストンの動きの単位はストローク (stroke) であるが、1840 年代に作られた図 1.4 の写真に見るような SR モータを見ると、初期のモータの動作用語としてストロークがふさわしかったことが想像される。蒸気機関のメカニズムを電動化しようとしたのが electrical engine であり、Anderson¹⁾によると、Page はこの方式で 16 馬力のモータを作ってバッテリー駆動の機関車を Baltimore and Ohio Railway で時速 30 km で走らせたのが 1851 年である。

(3) SR モータでは、その動きは第 2 章で論じるように stroke が基本になる