

# 世界を回すモータ

## 電気電子工学専攻 千葉 明 研究室

千葉 明 教授 1960年東京都生まれ。東京工業大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程修了。1988年、東京理科大学理工学電気工学科嘱託助手。その後、講師、助教授を経て、同教授。2007年、IEEE Fellow。2010年より、東京工業大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻教授。



我々の暮らす現代社会は、多くの機械によって成り立っている。機械の原動力となるのはモータであり、国内の電力の60%がモータによって消費されていることを考えると、モータは現代社会の心臓と言えるだろう。そのようなモータの中でも、今注目を浴びている二種類のモータがある。本稿では、それらのモータについて、千葉研究室で行われている研究を紹介していく。

### 私たちの暮らしを支えるモータ

自分の周りを見渡してみると、いくつもの電子機器が目に入ることだろう。本稿を読みながら携帯電話やスマートフォンを利用している人もいるかもしれない。もし電力の供給がなくなってしまうと、これらの機器はもちろんのこと、テレビ、冷蔵庫や洗濯機といった家電機器も使用できなくなり、私たちの生活水準は数段階も後退してしまうだろう。

このように、我々は電気や機械に依存して生きており、これらに関する研究が盛んである。この研究のうち、電気や電力などの「パワー」、機械の設計や運用を対象とする「メカニクス」、電子や電気回路、半導体などを対象とする「エレクトロニクス」を融合した学術的分野、それが「パワーメカトロニクス」である。これから紹介する千葉研究室では、そのパワーメカトロニクスの中でもモータの分野の研究を行なっている。

そもそもモータとは、電気エネルギーを力学的エネルギーに変換する装置のことで、一般的に磁場と電流の相互作用による力であるローレンツ力を回転運動として出力している。

この回転運動として出力される力のモーメントのことをトルクといい、回転中心から1m離れている物体を1Nで回転させる力のトルクを1N・mで表す。当然ながら、トルクが大きくなるほど、出力される力も大きくなる。このトルクという概念はモータについての研究を理解する際に必要不可欠である。

モータの研究は特に自動車業界で盛んである。これは、地球温暖化の対策として自動車の二酸化炭素排出量の削減が必要だと謳われているためである。ハイブリッド自動車などのモータの効率を上げることで燃費を向上させることができるため、モータの効率の向上は電気自動車の製品価値の上昇に直結するのだ。そのため、多くの自動車企業が高性能なモータの開発を行なっている。

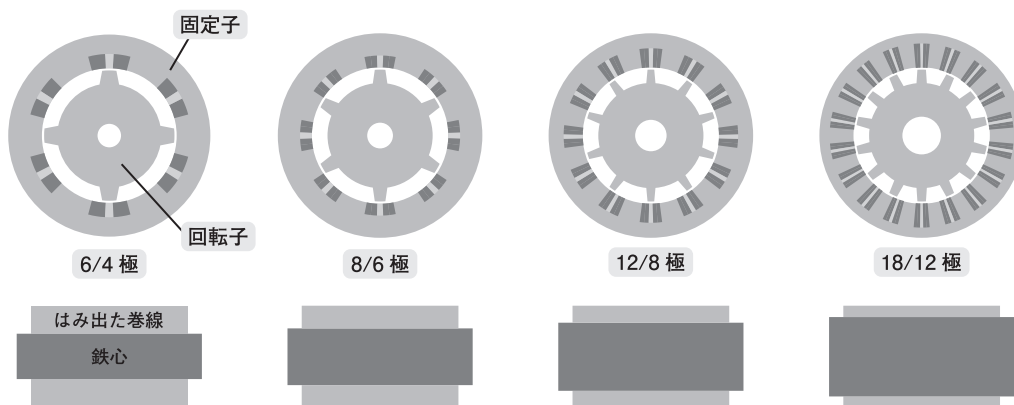


図1 モータの多極化に伴い増加できる鉄心の厚み

極数が多いほど固定子の凸極の幅が小さくなり、そこを回るのははみ出た巻線も減少する。結果、その分だけ鉄心の厚みを増やすことができる。

## SRM

昨今、主に利用されているモータは埋込磁石型同期モータ（IPM）である。これは文字通り、回転子の内部に磁石が埋め込まれたモータである。埋め込まれた磁石は棒状であり、縦方向と横方向で長さが異なる。これによって軸対称性が失われ、縦方向と横方向での磁束の大きさが異なる。回転子の回転によって磁束が変化し、これに従って変化する磁気抵抗が小さくなる方向へとリラクタンストルクが発生するため、大きな出力を得られる。リラクタンストルクとは、固定子の回転磁界による磁極と、回転子の非対称性によって発生するトルクである。

また、磁石を埋め込むことで磁石の飛散や欠損の危険が低下し、永久磁石を使用することで更に大きな出力を得られる。このようなメリットから、IPMは自動車に用いられるモータの主流となっていた。しかし、2010年9月頃、尖閣諸島で発生した「中国船衝突事件」が発端となり、中国がレアアースの輸出を禁止した。中国はレアアースの生産量において、全世界の約8割を占めるため、これによって国際市場の価格が暴騰した。こうして、レアアース磁石、つまり永久磁石を使わないモータの需要が高まり、開発されるようになったのだ。

そこで脚光を浴びたのが、スイッチドリラクタ

ンスモータ（SRM）である。SRMとは、永久磁石を使わず、巻線と鉄心のみで構成されているモータのことである。シンプルな構造ゆえに、低いコストと高い耐環境性が実現され、高速回転時でも高効率が維持できるという特徴をもっている。その反面、半径方向にはたらく吸引力の影響により、振動、騒音が大きくなってしまおうという問題点も抱えている。

まず、千葉先生はハイブリッド自動車のモータに用いられるレアアースモータと同等の効率、出力、トルクを実現するSRMの開発を目標とした。

先生が研究当初に検討したSRMはハイブリッド自動車に使われているIPMの性能には及ばず、トルクが三分の一程度の大きさで、効率は低く、出力速度範囲は半分以下であった。

しかし、先生は回転子の極数を多くすることでトルクが増加することを発見したのである。極数が多いほど、コイルの外側に出る巻線の量が少なくなり、その分だけ鉄心の質量を増やすことができる（図1）。これによって、凸極同士で引っ張り合う部分が増加したため、トルクが増加したのではないかと先生は考えている。また、6/4極<sup>1)</sup>、8/6極、12/8極、18/12極などのさまざまな構造を検討し、コンピュータ上でモデルを用いて磁界を解析した。その結果、6/4極のモータでは、二極の磁束が発生し固定子が楕円状に変形するが、

1) 固定子の凸極数が6、回転子の凸極数が4であるとき、6/4極と表記する。

12/8 極まで上昇させると四極の磁束が発生し、正形状に変形することがわかった (図2)。このように磁束が分散すれば、それだけ円の変形量が小さくなり、振動や騒音も低減できることを発見したのだ。そして最終的に18/12 極まで上昇させることで、ハイブリッド自動車に適用可能な寸法にしたとき、IPM と同等のトルクを発生させることに成功した。また、これ以上の極数ではトルクが減少し始めることが実験的にも解析的にもわかっており、自動車に収まるような扁平なモータに最適な極数がこの値なのだと先生は考えている。

効率については、鉄心を薄板化し、高ケイ素鋼板を用いることで鉄損を低減させることにした。鉄損とは、磁性材料から成るコア、SRM という鉄心によって発生するエネルギー的損失のことであり、これが少ないほど効率が向上する。高ケイ素鋼板とは、鉄に少量のケイ素を加えた合金のことで、透磁率が高く、鉄損を軽減させることができるため、モータの鉄心として用いるのに適している。先生は以前、トルクは小さいが効率のよいモータを設計していた際に、高ケイ素鋼板を使用していた。そこから着想を得て、高ケイ素鋼板を利用することに至った。鉄損が小さいほどトルクが低下してしまう傾向があったが、モータの構造を工夫することで解決した。

また、SRM のトルクは電流の直流成分 ( $I_{dc}$ ) と交流成分 ( $I_{ac}$ ) の積に比例することが知られている。ここで、モータは抵抗器 ( $R$ ) とともコイル ( $L$ ) とも見なすことができるので、 $\omega$  を電流角周波数とすると、モータにかかる電圧は、 $RI_{dc}$  と  $\omega LI_{ac}$  の和で表すことができる。電流角周波数は回転速度に比例するため、高速回転域では電圧が大きくなる。電力は電流と電圧の積であるから、同じ電力では、電圧が大きくなるにつれて流れる電流は減少し、出力は下がってしまう。そこで先生は、 $I_{dc}$  を増やすことによって、回転速度に依存する交流成分による電圧を減らし、高速回転域での出力の向上を実現させた。

このようにして先生は、現在のハイブリッド自動車の永久磁石モータと同等のパフォーマンスを実現する SRM の開発に成功した。主となる材料が鉄心のみで構成される SRM は、レアアースが原材

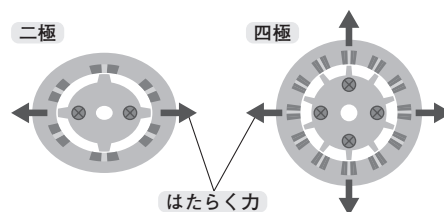


図2 磁束によって変形する固定子

二極の磁束では二方向への力がはたらくため楕円状に、四極の磁束では四方向への力がはたらくため正形状に変形する。

料となる永久磁石モータの半分ほどのコストで制作可能であり、実用化が期待されている。

また、先生は SRM の性能を永久磁石モータに近づけるだけでなく、振動と騒音の低減についての研究も行なっている。そもそも SRM はなぜ振動と騒音を発生させるのか。SRM は固定子と回転子の間にはたらく電磁吸引力のみで駆動しており、電磁力のほとんどは半径方向にはたらく。これをラジアル力という。このラジアル力によって固定子が楕円変形し、振動と騒音が発生するのである。これを解決するべく、先生らはラジアル力の和を一定値にする方法を提案した。それまでの研究によって、固定共振周波数と騒音の周波数が一致するときに振動と騒音がともに最大になることが分かっていた。そこで先生らによって、3つの連続する極のラジアル力を互いに干渉させ、ラジアル力を一定にするような新しい電流波形が提案されたのである (図3)。結果、振動加速度と音圧ともに大幅に低減することに成功したのである。しかし、この方法は極数が多い場合でのみ実証されていて、極数が少ない場合の対処法はまだ確立していないため、現在も研究が進められている。

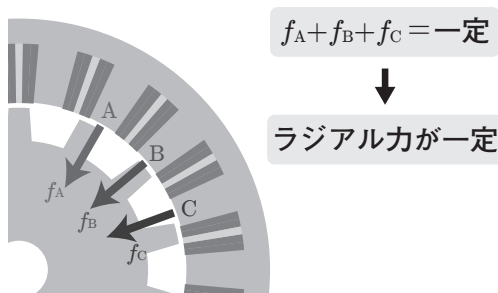


図3 3つのラジアル力の干渉

3つのラジアル力を干渉させることで、力を一定にする。

## ベアリングレスモータ

先生が行なっているもう一つの研究がベアリングレスモータである。ベアリングとは、回転する部分の摩擦を減らす軸受と呼ばれる部品のことである。つまり、ベアリングレスとは回転子と軸を接しないようにして、軸受の必要性をなくしたということを意味する。これは磁気浮上という現象によって軸受の役割を補うことができるためであり、磁気軸受とも呼ばれる。

先生は、オシロスコープで波形を見ただけでモータの回転中心となる軸の座標が分かるようになれば、ラジアル力を活用することによって軸の座標を安定させることができるだろうという考えから、磁気軸受を利用することを思い付いた。そして、すべてのモータをベアリングレス化する理論を提唱したのだ。ベアリングレスモータは、磁気軸受と電動機を磁氣的に一体化することで、磁気軸受として動作するためのトルクと、電動機として動作するためのラジアル力を1つの電磁機械で発生させている。

ベアリングレスモータが従来のモータと異なるところは、半径方向のラジアル力を利用することによって、非接触ながら回転主軸を支えるということである。このことが発想の根本である。非接触であることの利点として、摩擦がないため粉塵が発生しないこと、軸受を潤滑にするために行うメンテナンスが長期にわたって不要であること、寿命が長いこと、高速回転が可能であることなどが挙げられる。また、従来のモータならば電磁機械が3つ必要となってしまうところ、ベアリング

レスモータでは磁気軸受と回転のためのユニットが統合されているため、1つの電磁機械に収めることができる。このことから、従来のモータと比べてベアリングレスモータ自体を小さくすることができる。

磁気を用いて位置を制御するベアリングレスモータの仕組みは、能動的な安定と受動的な安定によって支えられている。ここでいう受動的な安定とは磁石によってもたらされる安定のことで、能動的な安定とは電流を流すことによって得られる安定のことである。

能動的に安定させている方向は、回転子の半径方向である。回転子は固定子の中心に位置しており、回転子の永久磁石には磁力が発生している。この力は対称的に発生しているため、回転子に作用する力の和は零である。しかし、巻線によって2極の磁界を発生させると、この対称性が崩れ、回転子には電磁力が発生する。これは電流を負にしたり、直交する巻線に電流を流したりすることによって、様々な方向に制御できるため、力の方向ベクトルを合成することによって任意の方向の力を出せるのである。

回転子の半径方向以外は永久磁石による磁束によって受動的に安定にさせられている。回転子が軸方向へ変位した場合は、固定子による磁気吸引力が生じることで、回転子の軸方向の位置を安定させる。また、回転子が傾き方向へ変位した場合は、回転子に取り付けられた永久磁石の磁束により、傾きを打ち消す向きのトルクが発生する。このような仕組みによって回転子の位置が保たれるのだ(図4)。

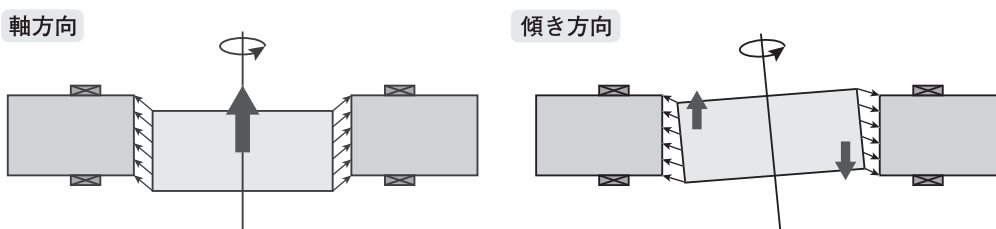


図4 ベアリングレスモータの位置制御

両図とも受動的な安定の仕組みであり、左図は軸方向の安定の仕組み、右図は傾き方向の安定の仕組みである。

先生がベアリングレスモータの研究を開始してからすぐに結果が出たかという、そういうわけではなかった。回転子は浮上するものの、回転させると軸の位置がずれて落下してしまうという状況が長らく続いた。当時は何が原因であるかも解明できなかったという。

当初のモータにはいくつか問題があった。まず、回転子に埋め込まれた永久磁石が、磁気センサに対してある決まった方向を向いている場合のみを考えて設計されていたことである。そのため、磁石が軸方向や傾き方向の変位をもった際に、適切なフィードバックが出力されていなかったのである。次に、予測の通りに振動を抑えられなかったことである。このモータでは、半径方向の位置をセンサによって検出し、検出した位置の変化から半径方向の速度を得ていた。この速度をフィードバックできれば、振動を抑制できると先生は予測していた。しかし、センサの検出値にはノイズが発生し、速度をフィードバックすることは困難を極めた。そしてもう一つは、周辺機器の性能不足である。電流制御器の性能が足りず、電流の追従遅れなどによる時間差が生じていたため、ラジアル力の出力の指令に対して、実際に発生するラジアル力の出力も遅れてしまっていた。

このような原因のために回転子を浮上させたまま回転させることは困難を極めていたが、さまざまな角度での適切なフィードバックを、角度を少しずつずらしながら実験することで見つけ出したり、より性能の良いセンサや電流制御器を用いたりすることで状況は大きく改善された。これによってどんな角度でも浮上が可能になったのである。これは世界で初めての快挙であった。

ベアリングレスモータは摩耗による粉塵等の発生がないため、その特徴を活かしたさまざまな応用が考えられている。例えば、ベアリングレスモータを使ったポンプを用いれば、純水や冷媒だけでなく、軸受に特殊な素材を必要としていた腐食性のガスや爆発性の液体までも、長期にわたってメンテナンスを行わずに運送可能になるのである。また、このメンテナンスを長期間行う必要がなく、粉塵等の発生もないという理由から、人工心臓補助ポンプへの適用の研究も行われている。

## 苦難の向こうに

新しいモータを開発するためには、一台につき500万円ほど掛かるという。この金額は、当然趣味としての研究などと言って済ませられる範疇を超えており、企業や国といった出資者の存在が必要となってくる。ではなぜ、企業の研究室ではなく大学の研究室で研究を続けるのだろうか。その理由は「一見、実現できそうもないことを研究するため」だと先生は言う。例えばSRMに関しても、企業の研究室ならば、永久磁石を一切使わないなんて突飛なことはせず、永久磁石をどれだけ減らせるかという研究を行なっただろう。大学の研究室だからこそ、自由な発想で研究ができたのである。

また先生は「研究を始めてから遅くとも2、3年のうちに、世界最高峰のブレイクスルーを生み出すような論文を書く」ことを目標に研究をしている。企業ではできないような研究を行なっているのだから、それは当然、簡単に成果が出るようなものではない。実際にベアリングレスモータの研究に関しても、回転子を浮上させるまでに先生はかなり苦しんだと言う。それでも諦めずに実験を重ねた結果、世界で初めて、浮上しながらの回転の制御を成功させたのである。

世界でまだ誰も成功したことのない無理難題を目の前にしたとき、どう考えるべきか。何をやっても無駄だと考えてしまうか、もしかしたら解決できるかもしれないと考えられるか。何事も諦めない姿勢こそが、これからを担う若き未来の研究者たちには必要なのではないだろうか。

## 執筆者より

本稿の執筆にあたり、機械の根幹を成す部品であるモータについて、千葉先生から興味深い話を伺うことができました。お忙しい中、度重なる取材に快く応じていただいた上に、執筆においてもさまざまな助言をくださった千葉先生に心より御礼申し上げます。最後になりますが、千葉研究室の皆さまのより一層のご活躍をお祈り致します。

(伊藤 颯人)