

# モータの効率を上げる

近藤 稔

車両制御技術研究部(動力システム 副主任研究員)



こんどう みのる

## はじめに

電車は架線から電気を受け取り、その電気でモータを回して電車を加速します。つまり、電気エネルギーをモータにより電車の運動エネルギーに変えます。そして、最近の電車では、ブレーキ時にはモータを発電機として動作させ、電車の運動エネルギーを電気エネルギーに変えて架線に戻します。戻した電気は他の電車等が使うことができ省エネになるので、このような電車は省エネ電車と呼ばれています。このように、損失の無い理想的な状態では省エネ電車を走らせてもエネルギーは消費されないことになります。しかし、現実には様々なところで損失が発生するためエネルギーが消費されます。具体的には、架線等を通じて電気エネルギーを送るときの損失、モータで電気エネルギーを機械的エネルギーに変換するときの損失、空気抵抗による損失、車輪や様々な場所で発生する摩擦損失等があります。

現在の省エネ電車を更に省エネにするためには、これらの損失を可能な限り小さくし、0に近づけていくことが必要です。本稿では、上記の損失のうち、モータの損失を小さくする(モータの効率を上げる)技術について紹介します。モータの内部は固定部と回転部に分けることができま

すが、損失は固定部でも回転部でも発生します。また、固定部でも回転部でもない空気の部分でも損失が発生します。以下では、各部で発生する損失と、その損失を小さくする方法について紹介していきます。

## 固定部の損失を減らす

最近の省エネ電車で使用されているモータは、誘導モータと呼ばれる種類のモータです。誘導モータでは固定部の巻線に電気を流して電磁石を作り、その磁力で電車を走らせる力を出します。この電磁石は電気が流れる巻線と磁気が流れる鉄心でできています(図1)。そして、それぞれの部分で損失が発生します。そこで、巻線と鉄心それぞれについて、損失を減らす方法を考えていきます。

まず、巻線は電線を巻いたコイルを複数つなげたものですが、電線に電気が流れると電気抵抗により電気エネルギーの一部が熱エネルギーになって発熱します。この発熱を減らすには電気抵抗を小さくすれば良いので、電線には電気抵抗が小さい銅が使われています。さらに、材質以外で電線の発熱量を減らす方法としては、電線を太くする方法が考えられます。電線を巻いた巻線は鉄心に作った溝に入れるので、溝に収まらない太さにはできませんが、電線の銅の周りがある絶縁被覆を薄くすることで、電気の流れ道となる銅線を太くすることができます。例えば、電車用のモータではガラス繊維を絶縁被覆として使った電線を使うことが多いですが、高性能の高耐熱樹脂を絶縁被覆として使った電線を使うと、被覆の厚みが薄くでき銅線を太くできるので、損失を減らすことができます(図2)。

また、磁気が流れる鉄心には、磁気を良く通す材料であり、丈夫で安価でもあるため、鉄が使われます。誘導モータでは、固定側の電磁石に流す電流を上手にコントロールして、モータの中に回転する磁界を作り、モータを回します。よって、鉄心の中の磁気の流れは時間と共に変化します。これにより、鉄の中では磁気の変化に反応して電流が

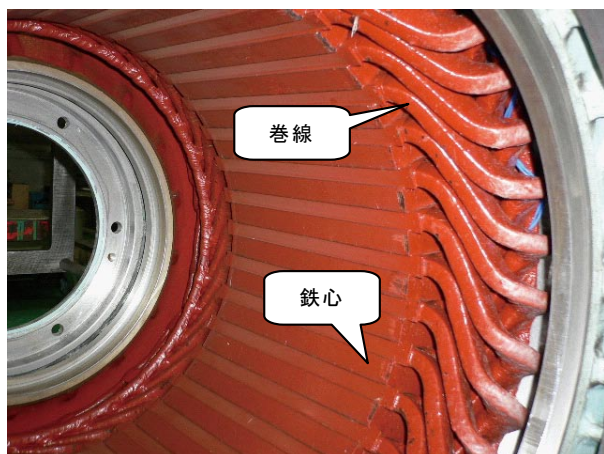


図1 固定部の電磁石の写真

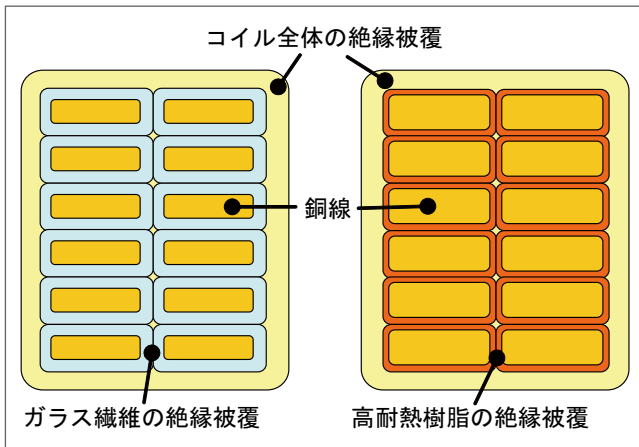


図2 コイルの断面図

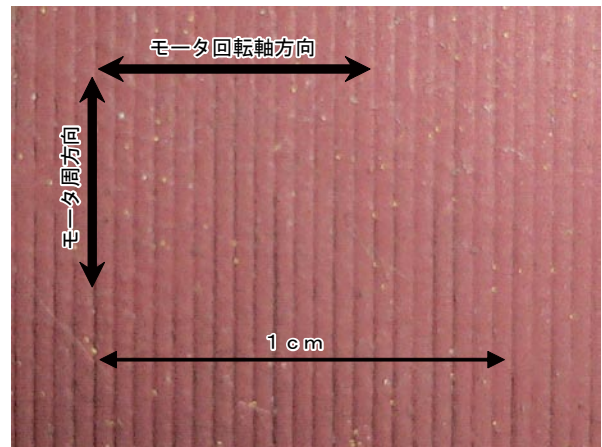


図3 鉄心表面の拡大写真

流れたりして発熱します。この原理はIHクッキングヒータでも用いられていて、電気エネルギーを熱エネルギーに効果的に変える方法として知られています。しかし、モータの中ではできるだけ電気が熱にならないようにする必要があります。そのため、磁気は流れてもなるべく鉄の中に電気が流れないように、表面が電気絶縁された薄い鉄板をモータの回転軸方向に積み重ねて鉄心を作っています(図3)。その鉄板として多くの場合用いられているのは50A800という規格の厚さ0.5mmの鉄板です。この損失を更に少なくするためには、更に厚みを薄くしたり、材質を調整したりして損失が発生しにくくした鉄板を用いる方法があります。例えば、35A300という厚さ0.35mmの鉄板にすると、鉄の中の発熱量が半分以下になることが期待できます。

このように、性能の良い材料を用いることにより、固定部の損失を減らすことができます。しかし、それらの材料は材料価格や加工コストが高いため、採用されないことが多いです。ところが、損失発生により生じる電力コストのことを考えると、高性能の材料の使用がトータルで見ると低コストにつながる可能性も高いです。そのため、新しい電車を作るときには、モータの価格だけでなく、電力コストや省エネのことも考えて、モータの材料を選ぶことが、省エネが重要なこれからの時代には大切になってくるといえます。

### 回転部の損失を減らす

次に、回転部での損失を減らす方法について考えます。

前述の通り、最近の省エネ電車ですべて使われている誘導モータでは、モータの固定部の巻線に上手に電流を流してモータの中に回転する磁界を作ります。そして、電車が加速す

るときには、回転部の回転よりも、回転する磁界が少しだけ(例えば1~2%くらい)速く回転するようにします。このパーセンテージを「すべり」といいます。誘導モータでは「すべり」の量に応じて、回転部の導体で作られる電気回路に電流が流れ、回転部にも電磁石ができ、この回転部の電磁石と固定部の電磁石の間に働く力で電車を加速したり減速したりします。

誘導モータではこのようにして、回転部の導体に電流が流れて損失が発生します。そして、この損失の大きさは「すべり」の大きさに決まり、「すべり」が1%増えれば、1%、効率が低下します。したがって、回転部の損失を減らすためには「すべり」を小さくする必要があります。具体的には、電気を良く流す材料で回転部の導体に使い、小さな「すべり」でも良く電気が流れてちゃんと力が出るようにすれば良いです。

しかし、実際の電車では、電気が良く流れる銅をそのまま使用することはまれで、銅よりも2~3倍電気が流れにくい丹銅や黄銅といった材料が使われることが多いです。その理由について以下に説明します。

電車には複数の車軸があり、標準的な通勤電車の場合その約半分の車軸をモータで回しています。ここで、例えば、2軸分の2個のモータを共通のインバータ(モータに流れる電流をコントロールする装置)で制御しているとします。電車では、傷んだ車輪は定期検査のときに削ってきれいにし使うため、車輪の直径が車軸ごとに若干異なります。そのため、車輪が小さい軸は大きい軸よりも早く回り、前述の2個のモータが回転する速さはモータ毎に若干異なります。しかし、共通のインバータで運転されているため、モータの中で回転する磁界の速さは共通です。その

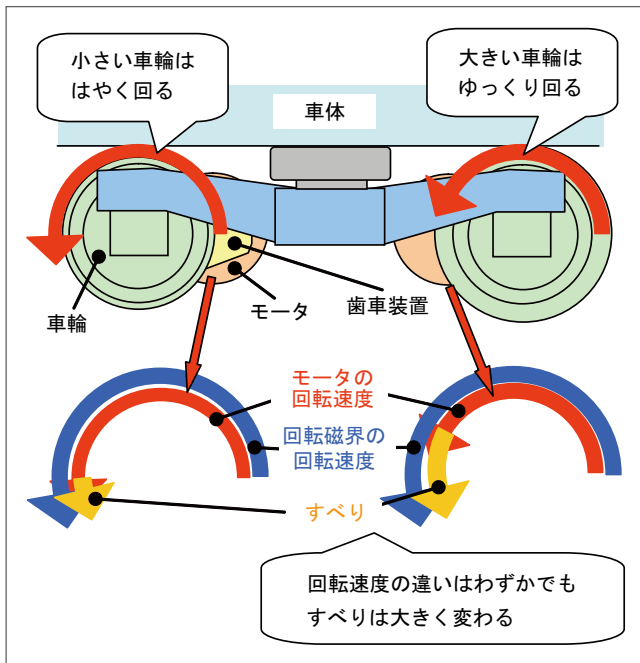


図4 車輪の大きさの違いで生じるすべりの違い

結果、モータごとに「すべり」の大きさが異なるようになります(図4)。「すべり」が異なると、その分、流れる電流の大きさやモータが出す力が異なるようになります。そして、モータの出す力が大きくばらつくと、ある軸だけ車輪が滑って空転してしまったり、あるモータだけ過熱してしまったりする問題が起きます。そこで、車輪の大きさが違って、このような問題が起きにくくするためには常に一定程度大きな「すべり」になるようにする必要があります。そのため、電気がやや流れにくい材料が用いられています。

したがって、回転部の損失を減らし、電気が流れやすい材料を使うためには、例えば、1台のインバータで駆動される車輪の大きさをなるべく揃えるようにすれば良いです。しかし、車輪の大きさを常に揃えるには、予備の車輪をたくさん準備したり、車輪を無駄に削ったりする必要があり、運用コストがかかります。

一方、モータの数だけインバータを用意して1台のインバータで1台のモータを駆動するようにすれば車輪の大きさがばらついていても問題は起きません。あるいは、そもそもモータの数を多くして、それぞれのモータが出す力を小さくし、余裕を持って使うようにしておけば、モータの出す力がばらついたときでも、モータが過熱したり、車輪が滑ったりすることはありません。しかし、これらの場合には駆動システムの初期コストが高くなります。

なお、「すべり」を0にした究極の損失低減方法として、永久磁石同期モータの使用があります。永久磁石同期モータは、回転部において電磁石の代わりに永久磁石を使用するため、理論上、回転部での損失が0です。ただし、当然

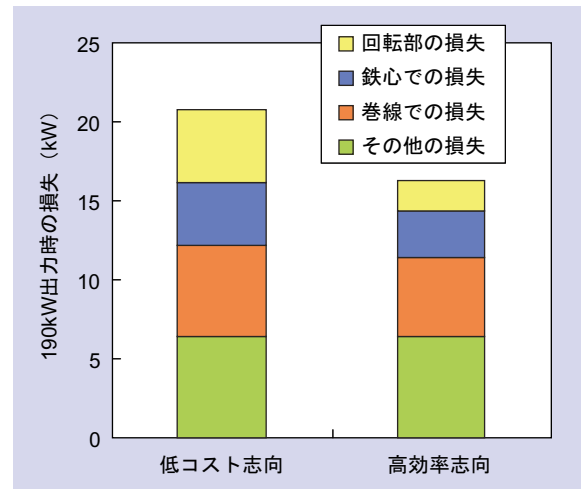


図5 高効率志向の材料選定による高効率化

のことながら、1台のインバータで1台のモータを駆動する必要があるため初期コストが高くなります。

したがって、回転部の損失削減も固定部と同様に、省エネ効果と初期コスト等のバランスを考えて、省エネ化を進めていくことが重要になります。

以上述べてきた技術による省エネ効果の例として、標準的な電車用モータを対象に、高効率志向の材料選定をした場合と、低コスト志向の材料選定をした場合のモータが、平均的な出力(190kW)をしているときの損失試算結果を図5に示します。試算によると、低コスト志向に比べ高効率志向のモータでは、巻線での損失が1割程度減り、鉄心での損失が2~3割減り、回転部での損失が半分以下になり、トータルで4kW以上損失低減できる結果となりました。これは、1kWの電気ストーブ4台分相当ですから、結構な量のエネルギーが節約できることとなります。

### 空気の損失を減らす

モータは回転する機械なので、回転に対する空気抵抗や摩擦抵抗による機械的な損失もあります。特に、鉄道車両用モータでは、様々な方法でモータに冷却風を送ってモータを冷やします(図6)。そのため、送風に伴う損失が発生します(送風のためにエネルギーが消費されます)。

在来線電車で通常用いられている自己通風式と呼ばれる方法のモータでは、モータを冷却するためのファンが軸についていて、このファンを回すためにエネルギーが必要です。この自己通風式では、ファンがモータと同じ速さで回ることになるため、電車が高速で走行し、モータが高速回転しているときには、ファンも高速回転して冷却風をたくさん流すので、より多くのエネルギーを消費します。

一方、新幹線などで使われている強制風冷式という冷却方法では、モータ内部にファンはありませんが、その代わ

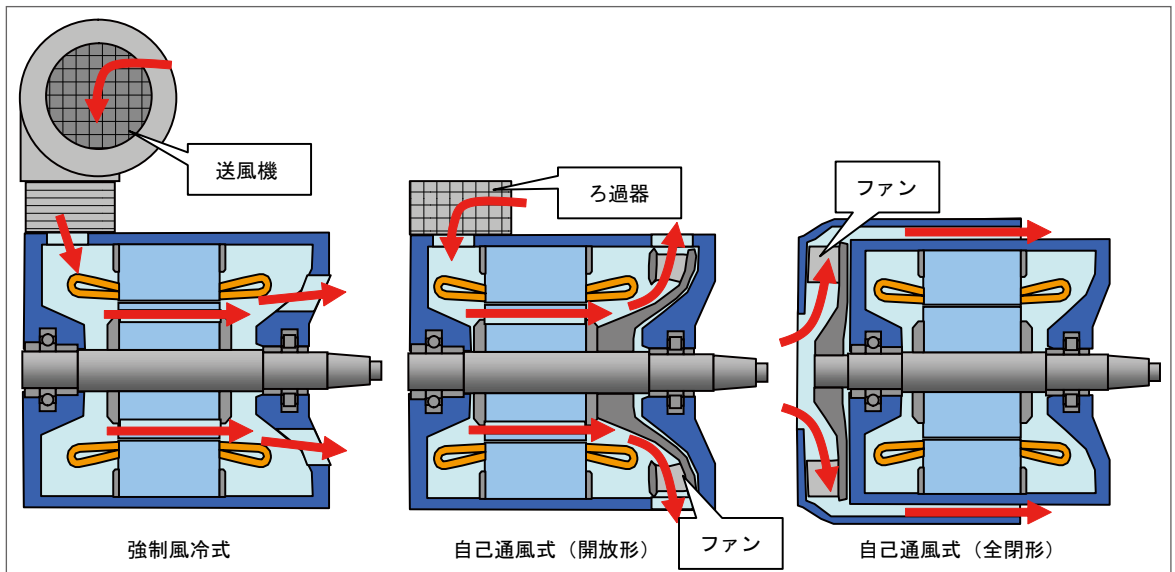


図6 様々な冷却方法

りに別途車両に設置された送風機でモータ内に風を送りモータを冷却しています。強制風冷式では、モータの回転に関わらず、安定した冷却風が得られるため、モータの小形軽量化が重要で高い冷却性能が必要な新幹線で多く用いられています。この方式ではモータにファンが無く、モータ内部で送風に伴う損失が発生しないのでモータの効率はその分高くなります。しかし、送風機が電力を必要とするので、送風機も含めて考えると、やはり送風にともないエネルギーが消費されることとなります。

一方、モータの効率が良くなれば、モータの中での発熱量が減るので、流す風の量も減らせるため、送風機の風量を小さくしたり、ファンを小さくしたりすれば、送風のためのエネルギーが少なくて済みます。先ほどの試算例では、電気ストーブ4台分の発熱が減らせているわけですから、高効率志向の設計をすれば、冷却のための送風も相当減らせることが期待できます。さらに、とても効率が良くなって発熱量が十分に小さくなれば、モータの中に風を流さなくても、モータの表面からの放熱だけで大丈夫になるので、ファンが不要になり、もっと効率が良くなります。

鉄道総研が開発してきた次世代の在来線用モータでは、永久磁石同期モータを採用することで、寸法重量と性能は同等に維持したまま、従来の自己通風式から冷却ファンを無くして表面から冷却するのみの全閉形モータにすることに成功しています。これにより、永久磁石同期モータの採用による高効率化効果に加え、送風にとまなうエネルギー損失も削減でき、更に高効率になります。また、このモータでは、固定部での損失を減らすため、被覆の薄い高耐熱樹脂電線を用い、損失の少ない鉄板を用いるといったことも、行っています。これらの結果、同等の性能をもつ

誘導モータに比べて効率が5%向上し、電車のエネルギー消費量を試算した例では、従来のモータに比べて消費エネルギーを約1割削減できることが示されています。

このモータの効率は約97%ですから、100点満点のテストで97点を取っているようなものです。したがって、効率で考えると更なる高効率化の余地は少ないです。しかし、損失という観点で考えれば、未だに数kWの損失があり、モータ1台で一般的な家で使用する全電力相当の損失があるわけですから、今後も更なる損失低減の可能性を追求していくべきだと考えています。

## おわりに

以上、最近導入されている省エネ電車用のモータを対象に、その効率を更にする方法について紹介しました。

その中でも述べたように、一般に、効率を上げる技術を適用するとモータの値段が高くなる傾向があります。そのため、どうすれば効率が良くなるかが分かっている、それらの方法は用いられないことが多いです。しかし、効率が良くなれば電気代は安くなります。電車は長い年月の間ほぼ毎日走り続けますので、長い目で見れば効率向上による電気代の節約効果は大きいものになり、値段が高くても効率が良いモータの方が、トータルで考えると低コストである場合も多いと考えます。また、モータを高効率化できれば全閉化による低騒音化や省保守化等のメリットも得られます。つまり、モータの高効率化技術は、単に、地球温暖化対策のための省エネだけでなく、電気代低減・低騒音化・省保守化といったメリットも生み出せる技術です。モータの損失を限りなく0に近づけ、効率を100%に近づけられるよう、今後も研究開発をしていきたいと思えます。 **RRR**