

| |
|-------|
| 鉄道一般 |
| 車両 |
| 施設 |
| 電気 |
| 運転・輸送 |
| 防災 |
| 環境 |
| 人間科学 |
| 浮上式鉄道 |

高効率モーターによる省エネ化

電車はモーターで走行しているため、そのモーターの効率を上げれば省エネになります。特に最近の電車のように運動エネルギーの大部分を回生ブレーキにより電気エネルギーとして回収できる場合には、モーター内で発生する損失がエネルギー消費の主な原因の一つとなるので、モーターの高効率化による省エネ効果は小さくありません。

この記事では、まず、モーターの高効率化と省エネ効果の関係について解説し、さらに、高効率モーターの研究開発事例について紹介します。



近藤 稔
Minoru Kondo
車両制御技術研究部
動力システム研究室
主任研究員
[専門分野] 電车用モーター、消費エネルギー計算

モーターの効率

電車には車輪を駆動するモーターがあり(図1)、電車は架線から得た電力でこのモーターを動かし、その動力で走っています。このとき、モーターに入ってきた電力に対する動力の割合がモーターの効率になります。

理想的には全ての電力を動力にすることができると良いのですが、実際には電気抵抗や摩擦のため、一部の電力は熱になって捨てられます。電車のモーターの効率は90%程度のもが多く、約1割の電力が熱として捨てられます(図2)。この捨てられてしまう熱のことを損失と呼びます。

90%という効率は、100点満点のテストで90点という風に考えると、優秀な成績だといえるかもしれませんが、しかし、大きい電車を動かすモーターでは、入力電力が大きいため、1割の損失もかなりの大きさです。電車のモーターの入力電力

は、最大で200kW~300kW程度であり、その1割となると20kW~30kWとなります。家庭の電化製品で大きな電力を使う電気ストーブ、ドライヤー、電子レンジなどの電力は1kW程度ですから、それらを何十台も使用しているのと同じくらいの電力がモーターの中で熱になって失われていることになります。

そのため、たとえ今のモーターの効率が90%であり、改善の余地が10%しかないとしても、モーターの効率を少しでも向上して無駄に失われる電力を減らすことは、省エネ化のために極めて重要です。

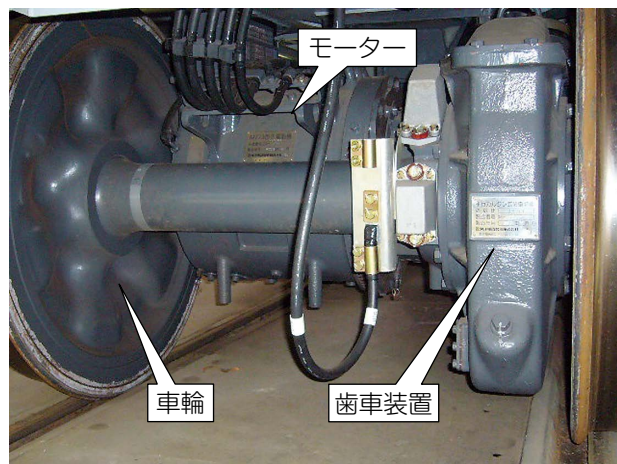


図1 電车用モーター

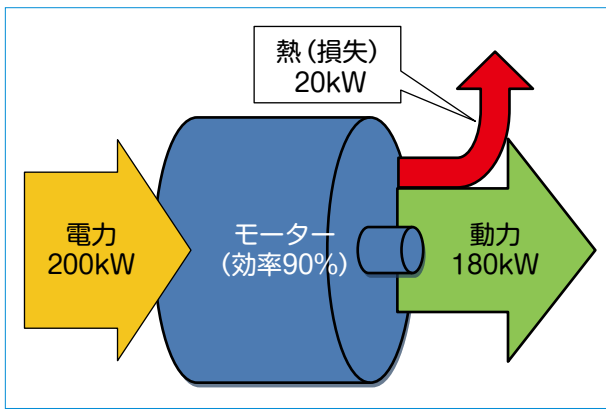


図2 モーターを通るエネルギーの流れの例

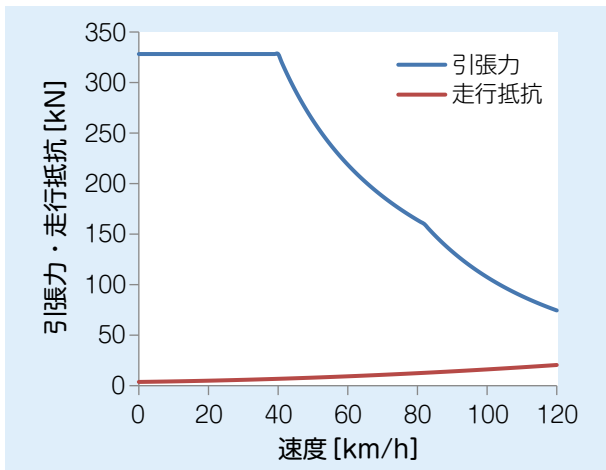


図3 電車の引張力と走行抵抗の例

電車の消費電力量に占める モーター損失の割合

ここで、電車を走らせる際に消費されるエネルギーについて考えます。図3に標準的な在来線電車¹⁾の引張力と走行抵抗の関係の例を示します。

引張力はモーターの力が車輪に伝わって、車輪がレールを蹴る力になったものです。これに対し、走行抵抗は電車が走る際に受ける抵抗力で、空気抵抗や車輪とレールの間の摩擦などによって発生する力です。

この引張力から走行抵抗を引いた分が電車を加速する力となりますが、図3から分かるように、速度が低いところでは走行抵抗は小さく、引張力の大部分が列車を加速する力となります。つまり、モーターに入力された電力の大部分が電車を加速する動力となります。

これをエネルギーの流れとしてみると、電車に入った電気エネルギーの大

部分で、電車の運動エネルギーとなり、残りの一部が走行抵抗やモーターなどによって熱エネルギーになったと考えることができます。ところで、最近の電車ではブレーキ時にモーターを発電機として動作させることで、運動エネルギーを電気エネルギーとして回収することができます。このようなブレーキ方法を回生ブレーキと呼びます。回生ブレーキを使うことで、電車を走らせるために投入した電気エネルギーの大部分を回収できるため、最近の電車では、モーターなどで発生する機器損

失と走行抵抗損失(☞参照)がエネルギー消費の主な原因となります。ただし、モーターの力不足で全てのブレーキ力を回生ブレーキでまかなうことができない場合や架線に電気を戻せずに回生電力を絞り込む場合(☞参照)もあるため、一部の運動エネルギーは機械ブレーキによって熱エネルギーに変換されて失われます。

この結果、電車を走らせる際に消費されるエネルギー、すなわち、熱として捨てられるエネルギーは、機器損失、走行抵抗損失、機械ブレーキによる損失の合計になります。以上のエネルギーの流れによる運動エネルギーの変化と発生損失の積算値の関係を図にすると、図4のようになります。

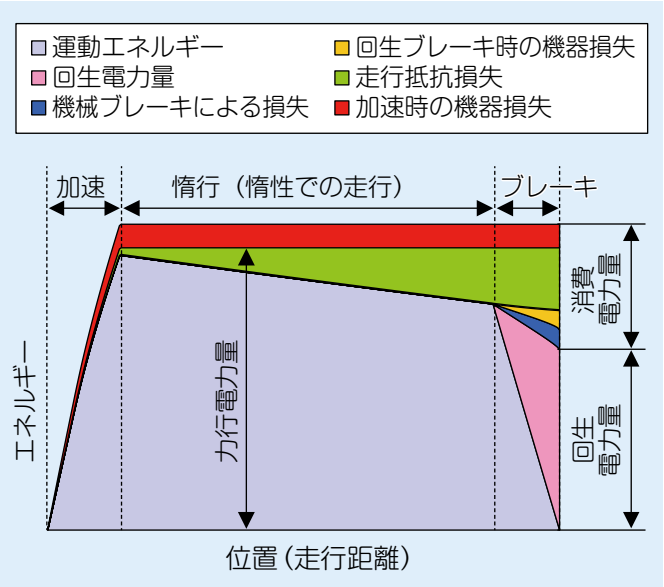


図4 電車走行時の損失の積算値と運動エネルギーの変化

☞ 走行抵抗による損失と機器損失

一般に直線平たん区間を走行する際に列車が受ける抵抗を走行抵抗と呼びます。一方、走行時に列車が受ける抵抗は曲線やトンネルの影響を受けて変化します。本稿ではそれらの効果による損失も含めて走行抵抗損失と呼んでいます。また、架線から受け取った電力が電車を走らせる動力になるまでには、モーター以外の電気機器や歯車装置を経由していくためこれらの機器でも損失が発生します。本稿ではこれらの機器の損失をまとめて機器損失と呼んでいます。

☞ 回生絞り込み

回生ブレーキにより回収した電気エネルギーは、通常の場合、架線に戻して近くを走行している他の電車に供給されます。しかし、十分近くに他の電車がいない場合には、電気エネルギーが行き場を失ってしまうため、回生ブレーキ力を減らして回生電力を絞り込む必要があります。このような制御を回生絞り込み制御と呼びます。

電車の走らせ方とモーター損失

各損失の合計が消費エネルギーになるので、鉄道総研では、これを利用して電車の消費電力量を各損失の合計から計算する簡易計算法²⁾を開発しました。電車を走らせる際の各損失を簡易計算法により計算した結果を図5に示します。図5では消費電力量の測定結果も示しており、損失の合計が消費電力量と概ね等しくなっていることが確認できます。図5を見ると、損失のうち最も大きいのが走行抵抗損失で、次に大きいのが機器損失となっています。特に駅間距離が短い場合には、走行抵抗損失と同じくらい機器損失が大きくなっています。

一般に、駅間距離が短い場合には、電車が出発して少し走ったらすぐに次の駅に止まるためにブレーキをかけなければいけません。そのため、この場合にはモーターが動作している時間の割合が高くなります。

これに対して駅間距離が長い場合には、電車の速度が十分に上がったなら、しばらくの間はモーターが力を出さず惰性で走行し、走行抵抗により速度が低下したらまたモーターで加速して速度を上げることを繰り返し、最後に停車するためにブレーキをかけるような運転になります。この場合には、走行抵抗が大きくなる高い速度で走行する時間が長くなりますので、走行抵抗損失の割合が高くなります。

このように、駅間距離が短い電車の方が機器損失の割合が高くなるため、地下鉄電車や都市内の通勤電車ではモーターなどの機器の高効率化がより重要になります。

高効率モーターによる省エネ

では、どのようにすればモーターを高効率化できるのでしょうか？大きさや出力などの基本的な仕様を変えずに

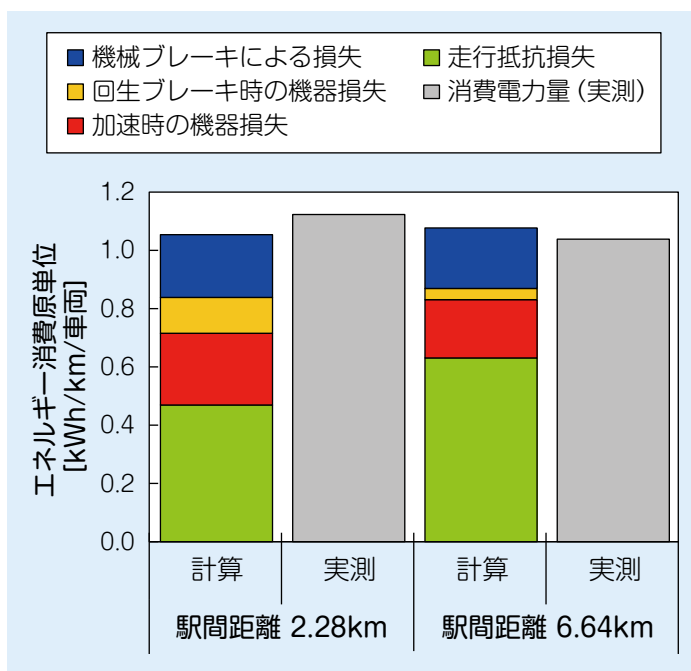


図5 電車の消費電力量の内訳の例²⁾

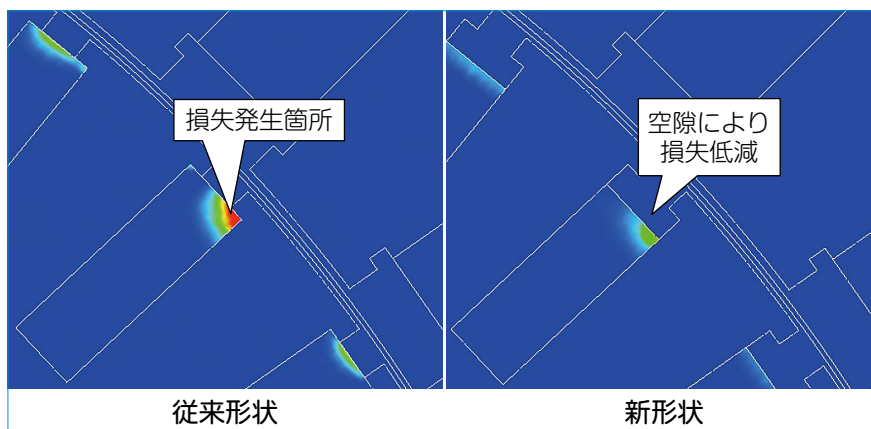


図6 回転部表面での損失分布解析結果

モーターを高効率化する方法としては、材質を変える方法と寸法や形状を変える方法があります。

材質を変える方法は単純で効果的ですが、モーターの値段が高くなってしまいう傾向があります。しかし、前述のようにモーターの効率が悪いために余分に必要になる電気は多く、それに対応する電気料金も多額になります。そのため、数十年という長いモーターの寿命を考えると、多少値段が高くても高効率なモーターの方がトータルの費用は安くなることが多いです。

一方、モーターの寸法や形状を変える方法は、あまりモーターの値段を上げずに高効率化を実現できる可能性が高いですが、モーターの形状は長年の技術の発展の中で進化してきたため、改善の余地は大きくはありません。

しかし、近年ではコンピューターの進歩で容易に磁界解析ができるようになり、モーターの中の磁気の流れや損失が発生する様子を詳細に調べることができるようになりました。

そこで、鉄道総研では磁界解析を用いて回転部の表面付近で損失が発生す

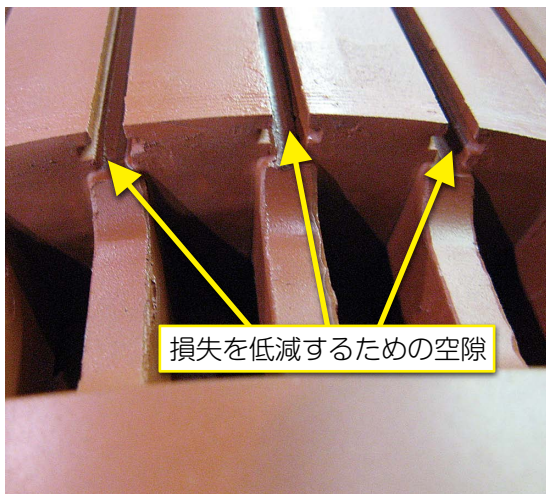


図7 誘導モーターを高効率化するための新形状



図8 鉄道総研が開発した高効率誘導モーター

る様子を研究し、回転部導体での損失を減らすことができる新しい形状を考案しました(図6, 図7)。この形状は、回転部の表面に損失を低減するための空隙を設けている点が特徴です。そして、この新しい形状と材質を変える方法を併用して、高効率な誘導モーターを開発しました(図8)。なお、この研究開発の一部は国庫補助を受けて実施しました。

このモーターでは、同じ基本仕様の従来モーターに対して約3%効率を向上しています。このモーターを使うことによる電車の省エネ効果を試算したところ、モーターでの損失低減により従来モーターと比べて走行時のエネルギー消費を6~11%、低減できることが分かりました³⁾。

また、モーターの種類を変えてしまう方法もあります。電車用モーターでは、直流モーターや誘導モーターが使

われてきましたが、これらのモーターは固定側と回転側の両方で電磁石を使用しているため、その電磁石の巻線において電流によるジュール熱が発生します。これに対して、回転側に強力な永久磁石を用いた永久磁石同期モーター(☞参照)では、回転側でほとんど発熱がないため、誘導モーターに比べて高い効率を実現できます⁴⁾。最近ではこの永久磁石同期モーターも鉄道用に用いられるようになり、これに対応するJIS規格や国際規格もできました。

高効率モーターの副産物

高効率化した誘導モーターや永久磁石同期モーターは発熱が少ないため全閉形モーターの実現に役立ちます。従来の電車用モーターでは過熱を防ぐためにモーターの内部に外気を通風して冷却していましたが、高効率モーターを用いると、そのような冷却は不要に

なり、モーター内に外気を通さない全閉形モーターにすることができます。全閉形モーターは内部の清掃やフィルター清掃が不要で省保守です。また、通風による騒音がなく、モーター内の騒音を遮蔽できるため低騒音なモーターになります。

このように、モーターを高効率化すると余計な熱が出ないため、省エネだけでなく、省保守で低騒音なモーターを実現できます。今後もさらなる高効率モーターの実現を目指して研究開発をすすめていきたいと思ひます。

RRR

文献

- 1) 日本鉄道車両工業会：JRIS R 1001 鉄道車両一通勤・近郊電車の標準仕様ガイドライン，2003
- 2) 近藤稔，小川知行，村上浩一：鉄道車両のエネルギー消費量簡易計算法，鉄道総研報告，Vol.25，No.8，pp.41-46，2011
- 3) 近藤稔，宮部実，真鍋慎一：走行シミュレーションによる高効率誘導電動機の消費電力量評価，鉄道総研報告，Vol.27，No.12，pp.47-52，2013
- 4) 近藤稔，寺田泰也，近藤圭一郎：鉄道車両への永久磁石同期電動機の適用，鉄道総研報告，Vol.16，No.5，pp.17-22，2002

☞ 誘導モーターと永久磁石同期モーター

現在、新製車両で主に用いられるモーターの種類には、誘導モーターと永久磁石同期モーターがあります。両者とも、固定部の巻線に交流電流を流して回転磁界を作り、その回転磁界と回転部の磁石との作用で動力を発生させますが、回転部の磁石の作り方に違いがあります。誘導モーターは電磁誘導により回転子の導体に電流を流し、回転部を電磁石にします。これに対し、永久磁石同期モーターでは回転部に強力な永久磁石を取り付けて、回転部側の磁石を作ります。このため、永久磁石同期モーターの方が回転部に電流が流れないため損失の発生が少なく高効率になります。