

# 車両のエネルギー消費低減



山本 貴光  
Takamitsu Yamamoto  
車両制御技術研究部 部長  
[専門分野] 電気工学

鉄道のエネルギー消費は車両運行に伴うエネルギーの割合が多く、この低減が効果的です。これまで、車両のエネルギー消費低減に向けた研究開発を実施し、これらを統合して評価を行って、10%低減を目指してきました。ここでは、実施してきた研究開発の内容と成果を統合した場合の評価結果について述べます。

## はじめに

鉄道は走行抵抗が小さく、一度に多くの乗客を運ぶことが可能なため、自動車や飛行機と比べて省エネな交通機関です。これまで、車両のエネルギー消費低減対策としては車体構体を鋼製からステンレスやアルミ化する軽量化が図られ、また、駆動システムにおいては抵抗制御+直流電動機方式からVVVFインバーター+誘導電動機方式に変遷し、回生ブレーキの有効利用が図られるなどの高効率化が行われてきました。しかし、その他の省エネ化技術の開発は、電気代の節約分で開発費やコスト増大分が見合わず、費用対効果の観点から積極的には実施されませんでした。近年、地球温暖化対策として、温室ガス排出削減に関心が高まり、さらなる省エネルギー対策が求められるようになってきました。

## 車両のエネルギー消費低減として取り組んだ研究開発テーマ

車両のエネルギー消費低減対策は様々な方法が考えられますが、その中でも効果が大きいものとして今回選定した項目を図1に示します。車両のエネルギー消費は大きく分けて駆動用エネルギーと補機用エネルギーに分かれ、前者が約70%、後者が約30%の割合です。これらの項目のうち、「電気機器の効率向上」に対応して「高効率誘導電動機の開発」、「走行抵抗の低減」に対応して「車両の空気抵抗低減」、「軽量化」に対応して「金属系新材料および高分子材料による軽量化」、「省エネランカーブ」に対応して「省エネ運転曲線作成シミュレーター」、「空調の高効率化」に対応して「高効率空調装置用磁気ヒートポンプ」をテーマとしてそれぞれ設定し、実施しました。

「高効率誘導電動機の開発<sup>1)</sup>」

在来線電車が走行する時に発生する損失の多くは電機に搭載されている主回路によるものです。主回路を構成するインバーター装置やリアクトルは比

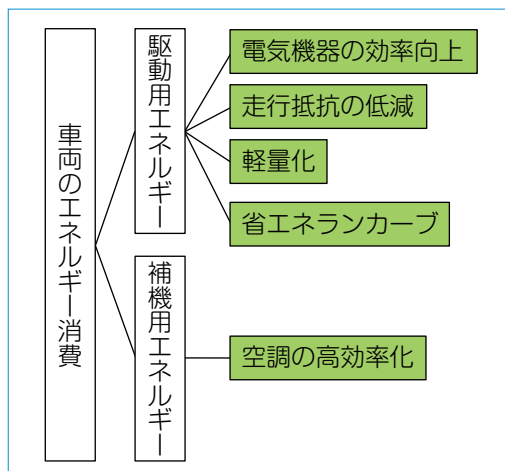


図1 車両のエネルギー消費低減対策項目

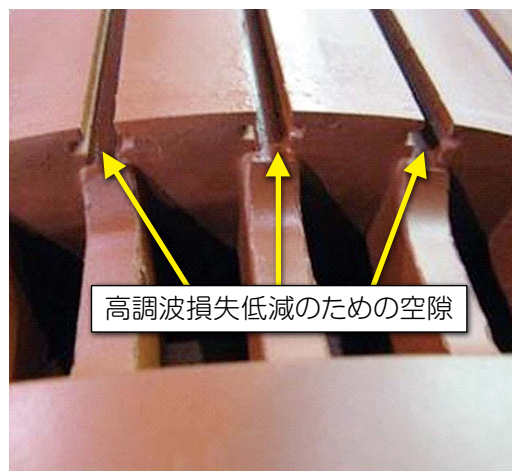


図2 新構造回転子スロット部



図3 ユニットクーラーの空気抵抗低減策

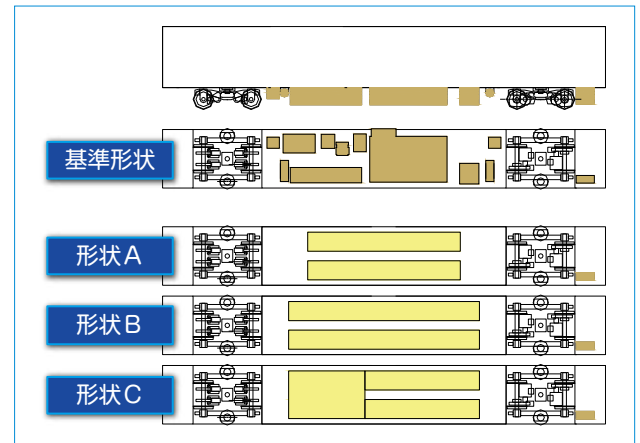


図4 床下機器の空気抵抗低減策

較的高い効率であり、損失のほとんどが主電動機で発生します。主電動機の効率は91～93%程度（誘導電動機（☞参照）の場合）ですが、主電動機の効率が3%改善され、96%になれば、走行に伴う消費電力量は約1割削減できるとの試算結果を得ています。以下に効率向上方法について示します。一つ目の手法は、低損失材料を使用することです。通常、回転子導体には「黄銅」や「丹銅」などの銅合金が使われますが、さらに抵抗率が小さい「銀入り銅」を使用することにより回転子が発生する銅損が約半分となります。また、鉄心材料には従来品より薄い鉄心を使うことで鉄損を低減できます。二つ目の手法は、固定子巻線の変更です。従来機の巻数はインバーター装置の容量から最適設計となっていました。主電動機の最適化を図る巻数とすることにより効率向上が図れます。三つ目の手法は、回転子スロット部の表面付近に発生する高調波二次銅損を低減するようにこの部分を避けて導体を配置

する新構造を採用することです（**図2**）。四つ目の手法は、上記手法により従来機と比べて発熱量が低減するため冷却ファンの小型化と回転子の風損を低減するように通風孔を塞ぐことにより機械損の低減を図ることです。これらの手法を用いることにより、開発した高効率誘導電動機の試作機は、2.6%の効率向上を実現しました。

### 車両の空気抵抗低減<sup>2)</sup>

高速化が進んだ新幹線では空気抵抗の低減がエネルギー消費低減に大きく寄与しますが、新幹線と比較して速度が低い在来線ではこれまで空気抵抗の寄与度が大きくないと考えられていました。しかしながら、在来線車両においても最高速度は160km/hに達しており、空気抵抗によるエネルギー消費も大きくなってきます。今回は、在来線車両の屋根上部および床下部に注目して形状改良により空気抵抗低減を図りました。今回の実験では風洞を用いており、供試体として縮尺1/8.4の3

両編成の車両模型を使用しました。

最初に、屋根上部のユニットクーラーについての実験形状を**図3**に示します。この実験から、空気抵抗係数（ $C_D$ 値）の低減量を評価したところその効果は、形状C>形状B>形状Aであることがわかりました。次に、床下機器についての実験形状を**図4**に示します。その効果は、形状B>形状C>形状Aでした。これらの結果から、8両編成の電車へ適用した場合を試算すると、形状変更前の編成の空気抵抗係数 $C_D = 1.87$ に対して、空気抵抗係数低減効果が最も大きかった形状では、 $C_D = 1.45$ となり、形状変更前の実に22%減となります。

### 金属系新材料および高分子材料による軽量化<sup>3)4)</sup>

鉄道車両のエネルギー消費低減手法の一つとして車両の軽量化があります。この方法として、鉄道車両構体材料として、新幹線で適用されているアルミニウム合金より軽量の難燃性マグネシウム合金を使うことが考えられます。従来からマグネシウムは発火しやすい材料と言われてきましたが、カルシウムを添加することにより難燃性に改善できると考えられています。この難燃性マグネシウム合金を試作して、各種特性試験を実施しました。

その結果、難燃性については、発火する前に熔融する状態であり、これは

#### ☞ 誘導電動機

鉄道車両用の電動機はケースを兼ねた固定子とその内側で回転する回転子で構成されます。直流電動機の場合は回転子に電気を通電するブラシが必要ですが、誘導電動機は固定子側に配置された巻線に交流電流が流れることにより回転子導体に電流が誘導され、固定子側巻線を通る電流による磁界と回転子に誘導される電流による磁界の相互作用により回転力が得られます。回転子の構造が比較的に簡単であること、直流電動機のブラシが必要ないこと、誘導電動機を駆動するための電力変換装置（VVVF インバーター）の技術が普及したことなどから近年、新製される電車の多くに採用されています。

アルミニウム合金 (6N01) と同等であること、また機械的強度については、アルミニウム合金 (6N01) の最低値以上を示すことを確認しました。加工性については、加熱することにより欠陥の少ない圧延板が得られることや中空押出型材の製作可能性も確認しました (図5)。溶接・接合については、TIG アーク溶接 (☞参照) では、アルミニウム

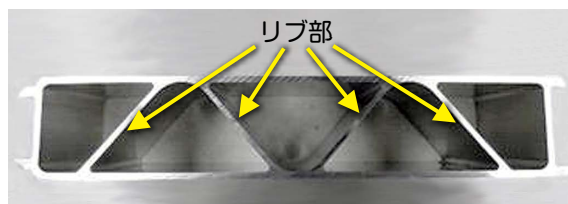


図5 難燃性マグネシウム合金の中空押出型材 (改良品)



図6 試作したCFRP製一本リンク

合金の溶接条件で難燃性マグネシウム合金の溶接が可能であること、摩擦かくはん接合 (FSW) による接合では、一般のFSW接合部と同等な仕上がりとなり、継手強さは母材強度とほぼ同等であることを確認しました。これらのことから難燃性マグネシウム合金の要素技術については確認できましたが、鉄道車両構体への適用に当たっては、大型部材の製作性の確認が必要です。

高分子材料による軽量化としては、近年、航空機や自動車を初めとして利用が拡大している炭素繊維強化プラスチック (CFRP) があります。CFRPは

鉄の1/4の比重でありながら、比強度が約10倍に達する材料です。鉄道車両への適用にあたっては、保守や運用および使用環境での影響を確認する必要があります。このため、耐候性、熱、洗浄剤に対する耐久性について、それぞれの劣化加速試験を行った後に試験材の曲げ強さとシャルピー衝撃値 (☞参照) を測定して、試験前後での変化について評価を行いました。その結果、それぞれの試験前後で若干の差異は発生するものの、CFRPへの影響は限定的でした。このCFRPの鉄道車両用適用部材として車体と台車を接続する一本リンクを選定し、試作を行いました (図6)。本試作品は従来品と比較して約25%の軽量化が達成されました。今後は耐久性などの性能確認を行うとともに必要に応じて設計変更などを行います。

### 高効率空調装置用磁気ヒートポンプ<sup>5)</sup>

現在使用されている冷房システムの主流は温室効果ガスである代替フロンなどを用いた蒸気圧縮式冷凍であり、より温室効果が低い物質・方法が求められています。このような状況の中、ノンフロンで高冷凍効率が期待できる磁気冷凍技術が注目されています。磁

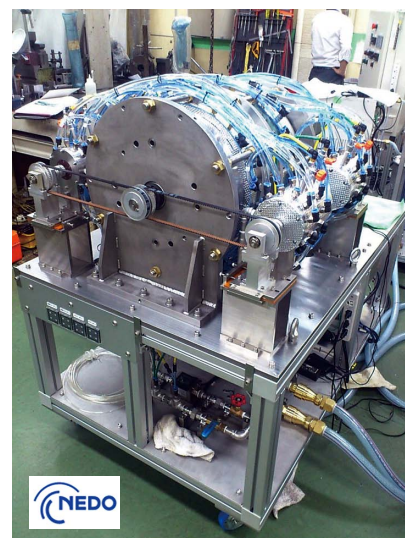


図7 磁気ヒートポンプ

気冷凍とはある種の磁性体に磁場変化を与えた場合に、磁性体内部でエントロピー変化が生じることを利用した冷凍方式です。この磁性体として、ほぼ室温に近い21℃に磁気的な相転移点をもつガドリウムを選定しました。この物質は印加する磁場が大きいほど効果が大きいため、強い磁界を発生できるように永久磁石配列として円環ハルバツハ配列 (☞参照) を採用しました。これらの技術を用いて開発した磁気ヒートポンプを図7に示します。この磁気ヒートポンプの冷凍能力は熱交換媒体の温度が23℃で最大となり、国内最大の1.4kWを達成しました。今後の課題としては、実際の鉄道車両に適用するためには、もう一桁、能力向上を図ることです。なお、本開発は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施しました。

### 省エネ運転曲線作成シミュレーター<sup>6)</sup>

鉄道車両のエネルギー消費低減手法には、機器損失低減、走行抵抗低減、軽量化などがあり、効果検証には営業列車を想定した走行パターンで評価することが重要です。実際に走行試験を行う場合、機器の試作や車両搭載改造

#### ☞ TIG アーク溶接

TIGはTungsten Inert Gasの略でタングステン電極と不活性ガスを用いた電気溶接方法の一つです。高品質で美しいビードが得られ、多くはアルミニウム合金などの非鉄金属やステンレス鋼の溶接に採用されています。

#### ☞ シャルピー衝撃値

試験片に高速で衝撃を与えて試験片を破壊したときの、破壊に要したエネルギーをシャルピー衝撃値といい、じん性を表します。

#### ☞ ハルバツハ配列

磁石のNS極を90°づつ回転させて並べる配列のことで、一方面の磁界のみ強力な磁界を発生させることができます。

などのコストが高く、また、架線電圧、運転方法、乗車率、天候などの条件をそろえる必要があります。データを取得することは容易ではありません。そこで、条件設定の自由度と精度が高いエネルギー評価シミュレーターが期待されます。鉄道総研ではこれまで運転曲線作成シミュレーターにエネルギー評価機能を付加する開発を行ってきました。運転曲線作成シミュレーターは基準運転時分を策定するためのもので、最速運転しか計算できず、実走行結果と比べて走行時間が短い分、消費エネルギーが大きいという課題がありました。そのため、加速ノッチ、惰行開始地点、ブレーキノッチなどを自由に設定でき、架線電圧も簡易式で組み込んで実際の運転曲線を再現できるシミュレーターを開発しました。ある特定の路線における走行データと比較したところ、走行時分を同じとした場合、誤差は2%程度という結果を得ました。

同じ走行区間・走行時分で走行する場合でも運転操作により、エネルギー消費量に差が出る可能性が指摘されています。今回は上記シミュレーターに惰行区間、ブレーキノッチを変更する省エネ運転アルゴリズムを追加して、運転操作の違いだけで省エネとなる運転曲線を策定するシミュレーターを開発しました(図8)。快速や普通など、実際のさまざまな走行データを上記シミュレーターで再現し、省エネ運転曲線を策定し、平均で4%程度の低減効果が得られました。

### 車両のエネルギー消費低減効果

今回紹介した技術のうち「高効率誘導電動機」、「車両の空気抵抗低減」および「省エネ運転」による総合的な省エネ効果をシミュレーターにより評価しました。その結果、省エネ技術、省エネ運転の効果を適用することによ

り、14%程度の省エネ改善が期待できるという結果を得ました(図9)。

### 成果の活用

高効率誘導電動機の適用にあたっては、確保したいモーター特性などにより、また、空気抵抗低減手法についても車両の搭載機器やユニットクーラー形状などによりカスタマイズする必要があります。いずれの技術も在来線の比較的高速走行時間が長い車両に適していますが、適用にあたっては、車種毎に適用方法やその効果が異なり、個別に対応が必要のため、新車設計時での導入が期待されます。また、省エネ運転手法については、適用したい路線に対して比較的容易に省エネ運転曲線が求められますが、得られた省エネ運転曲線をどのように実現するかが課題と言えます。

### おわりに

今回、車両のエネルギー消費低減にむけた技術開発について、5つの技術的課題に取り組んできました。それぞれの技術開発段階についてレベルの違いはありますが、継続して開発を行っていく技術については実用段階に向け、実用段階の技術については、普及に向け推進を行い、鉄道の省エネルギーに貢献していきたいと思えます。RRR

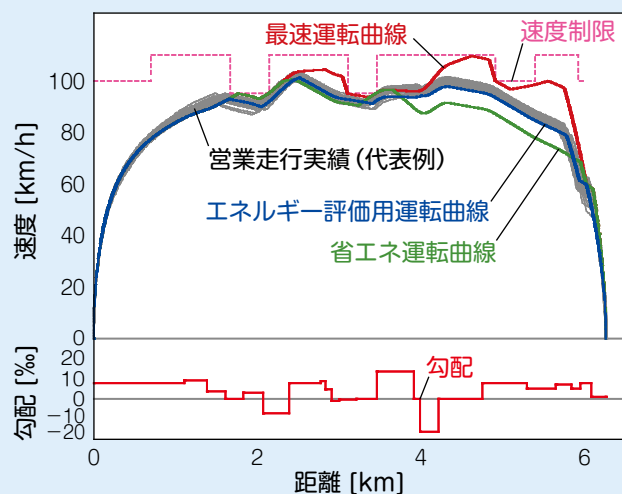


図8 省エネ運転曲線作成シミュレーターによる省エネ運転曲線作成例

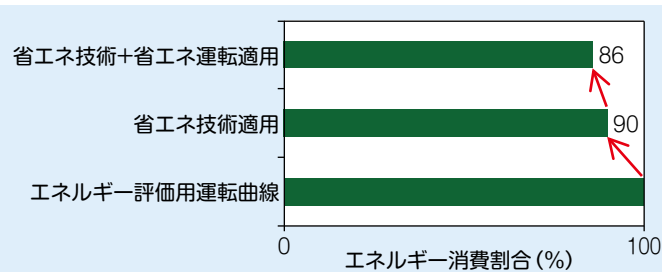


図9 省エネ効果の評価結果 (ある線区を走行する快速・普通列車を想定して試算した例)

### 文献

- 1) 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.41-46, 2013
- 2) 井門敦志, 宮地徳蔵, 井上達哉, 蝦名弘太, 岩崎誠: 在来線車両の形状改良による空気抵抗低減と省エネルギー効果の評価, 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.41-46, 2013
- 3) 森久史, 上東直孝, 辻村太郎, 石塚弘道, 花木悟, 清水和紀: 車両構体への難燃性マグネシウム合金の適用, 鉄道総研報告, Vol.28, No.2, pp.41-46, 2014
- 4) 柘田吉弘, 伊藤幹彌: 鉄道車両環境を想定したCFRPの耐久性評価, J-Rail2014, S3-2-1, 2014
- 5) 宮崎佳樹, 脇耕一郎, 水野克俊, 池田和也: 車両空調向け磁気ヒートポンプシステムの冷凍能力向上, 鉄道総研報告, Vol.28, No.9, pp.35-40, 2014
- 6) 熊澤一将, 佐藤圭介, 小川知行: 局所的な省エネ運転操作を組み合わせた省エネ運転支援システムの開発, 電気学会論文誌D, Vol.135, No.4, pp.368-375, 2015