

# 鉄道車両の省エネルギーに関する最近の研究開発

山本 貴光\*

## Recently Studies and Developments of Energy Saving Technologies in the Field of Railway Vehicles

Takamitsu YAMAMOTO

In the 1990s, energy saving technologies in the field of railway vehicles had not been wrestled with actively because of a cost-benefit point of view. In the 2000s, they had been interested in decreasing greenhouse gas as a countermeasure against global warming. In the year of 2006, the revised Rationalization in Energy Use Law obliged major railway companies which owned more than three hundred vehicles to report on the plans and actual results of their measures for the reduction of energy consumption, with the result that further countermeasures are sought after. This report introduces the recent studies and developments of energy saving technologies in the field of railway vehicles.

キーワード：省エネルギー，高効率誘導電動機，省エネ運転探索手法

### 1. はじめに

鉄道は走行抵抗が小さく、自動車や飛行機と比べて大変省エネな交通機関である。1990年代においてはモーダルシフト（他の輸送機関から鉄道輸送へ転換すること）が積極的に推奨されてきたが、鉄道車両自体の更なる省エネ化については費用対効果の観点から省エネ対策費を電気代又は燃料消費減少分だけで賄うことが困難だったため、新幹線車体のアルミ採用による軽量化や電力変換装置の発展に伴ったインバータ装置+誘導電動機が採用されて高効率化が図られたが、その他の省エネ化技術の開発は積極的に行われなかった。2000年代に入り、地球温暖化対策としての温室効果ガス排出削減に関心が高まる中、2006年に「改正省エネ法」が施行され、300両以上の車両を保有する鉄道事業者はエネルギー削減の取り組みが義務付けられたことなどから更なる省エネルギー対策が重要な課題となってきた。この対策として、非電化区間においては新型エンジンへの載せ替え、電化区間においては非回生車を最新のVVVFインバータ装置+誘導電動機を適用した車両への置換えが進められてきたが、これらの対策も限界にきている鉄道事業者もあり、更なる省エネルギー対策が求められている。このような背景において鉄道車両の省エネルギーに向けた最近の研究開発の取り組みについて以下に紹介する。

### 2. 鉄道車両の消費エネルギー

鉄道車両が走行する際の消費エネルギーを図1に分類する。この中で多くの割合を占める駆動エネルギーについて、各損失が占める割合と、車両質量・走行抵抗一次項・

\* 車両制御技術研究部 部長

走行抵抗二次項を低減した場合の効果がどのくらいの消費エネルギー削減につながるかを仮想した表1の走行条件において鉄道総研開発商品「Hybrid-Speedy」<sup>1)</sup>で試算した運転曲線例を図2に、低減要素が無い条件を基準(100)とした場合の各要素を低減した場合の効果を図3に示す。今回の試算結果では、走行抵抗定数項分損失及び出発抵抗分損失は非常に小さい割合であり、走行抵抗一次項分の損失と主回路損失がそれぞれ約1/3ずつと大きい割合を占めている。また、車両質量2割削減すると消費エネルギーもほぼ2割削減となり効果が大きいことがわかる。この試算例はあくまで表1に示した条件で仮想車両を走行させた場合の参考値であり、用途や走行距離に応じて効果は変化するため、目的に合わせて試算する必要がある。

車両消費エネルギー	エネルギー 駆動用	走行抵抗定数項分損失(機械損失)
		走行抵抗一次項分損失(機械損失)
		走行抵抗二次項分損失(空気抵抗損失)
		出発抵抗分損失
		ブレーキ損失
		主回路損失
		蓄電損失
	エネルギー 補機用	空調
		換気
		暖房
		照明
		空気圧縮機
		制御電源

図1 鉄道車両の消費エネルギーの分類

表1 損失割合の試算に使用した走行条件

編成構成	3M4T (7両編成)
主回路方式	インバータ+誘導電動機 (回生可能)
質量	250,000 kg
走行距離	3 km
走行時間	160 秒
車両用途	通勤・近郊

特集：車両技術

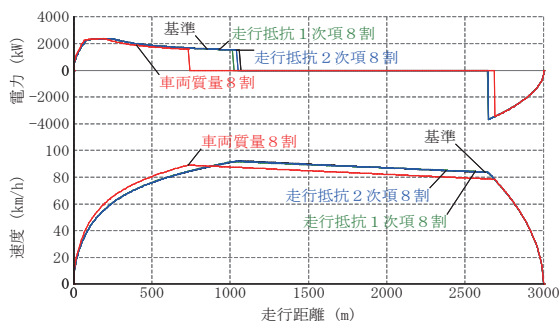


図2 車両走行時の消費エネルギー試算用運転曲線例

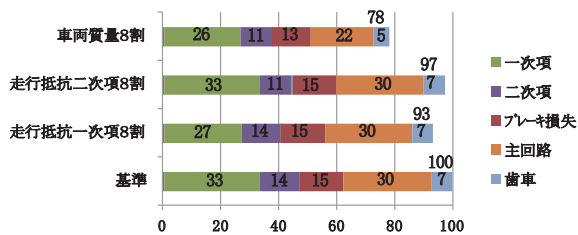


図3 各損失の割合と低減した場合の効果例

3. 消費エネルギーを低減する研究開発事例

本章では、消費エネルギーを低減する実用レベルの研究開発事例として「高効率誘導電動機」と「省エネルギー運転探索手法」の2件とその他の鉄道総研による研究開発事例について紹介する。

3.1 高効率誘導電動機<sup>2)</sup>

主回路で発生する損失が占める割合は図3により比較的大きいことは2章で述べた。この損失はリアクトル、インバータ、主電動機で発生するが、リアクトル・インバータとも効率は主電動機と比べて十分高い値であるのに対し、主電動機は91～93%程度であるため、主回路損失の多くは主電動機による損失が占める。従って、主誘導電動機の効率を向上することは消費エネルギー低減に大きく貢献する。

3.1.1 損失低減手法

まず、一つ目の手法は低損失材料の適用である。回転子導体には従来、「丹銅」が使われているが、更に抵抗率が小さい「銀入り銅」を使用することにより回転子銅損が約半分になることが期待される。鉄心材料には従来の50A800に代えて35A300を使用する。この材料の呼び名は「JIS C 2552 無方向性電磁鋼帯」に基づいており、前2桁は厚み、後ろ3桁が鉄損の大きさを示す。この材料の変更により、鉄損は3/8になることが期待される。固定子巻線には従来のガラス電線からカプトン電線に変更し巻線導体の占積率向上を図った。

二つ目の手法は固定子巻線の巻回数最適化である。従来機の巻数はインバータ容量低減を優先し、72回とし

ているが、これを54回に変更することにより主電動機効率向上が図れる。また、この変更により高速域での回生性能の向上も図れる。

三つ目の手法は回転子に新構造を採用していることである。回転子スロット部に発生する高調波二次銅損は回転子導体表面外側に発生するためこの部分に配置しない構造とした(図4)。

四つ目の手法は三つ目までの対策により従来機と比べて発熱量が小さくなるため冷却ファンの小型化と回転子通風孔を塞ぐことにより機械損の低減を図った。

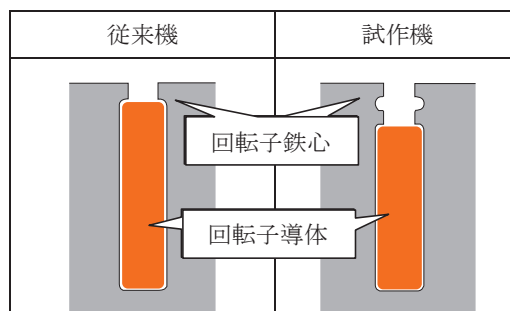


図4 回転子スロットの形状比較

3.1.2 消費電力量削減率の検討

開発した高効率誘導電動機の消費エネルギー低減効果を評価するため、走行シミュレーションを行い、消費電力を評価した。図5に駅間距離に対する消費電力量削減率を示す。

図5より、高効率誘導電動機を適用した場合の消費電力量削減率は概ね10%弱であり、回生性能向上分(モーターのパワーアップ)を考慮した場合は最大で24%程度であった。開発した高効率誘導電動機の効率は約96%であり従来機(93%)より3%程度の差であるが、主回路損失全体の1/3程度の改善となり、図3で示した主回路損失の1/3に当たる10%と概ね合致する値である。また、回生性能を向上した場合は図3のブレーキ損失(15%)の一部がさらに低減されることに相当する。

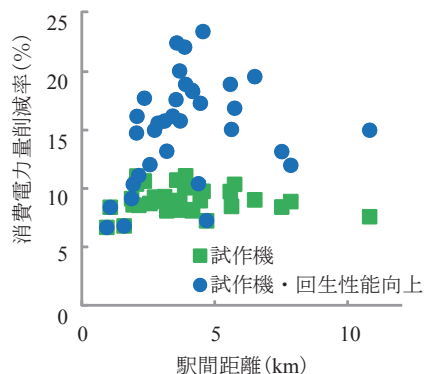


図5 消費電力量削減率の計算結果

### 3.2 省エネルギー運転探索手法<sup>3)</sup>

車両の消費エネルギーは運転方法により変化することが知られている。消費エネルギー低減を目的とした具体的な検討方法としては列車の走行試験や走行シミュレーションが実施されているが、条件設定が非常に多岐に亘り、多大な労力が必要となる。本手法は運転曲線作成と消費エネルギーを計算するもので、走行条件を入力し、走行時分を指定すると実際の運転士による運転の軌跡に近い運転曲線を作成する機能を有し、1回の入力操作でより少ない消費エネルギーとする探索アルゴリズムにより省エネルギー運転曲線を提案するものである。

#### 3.2.1 省エネルギー運転探索アルゴリズム

今回紹介する省エネルギー運転探索アルゴリズムはまず基準となる運転曲線を作成しその走行時分を  $T_0$  とする。その後、使用するブレーキノッチの変更および各地点で惰行を少しずつ加えることの繰り返しを行い、省エネ運転に効果がある局所的な運転操作を組み合わせ、指定した走行時分  $T_{MAX}$  ( $\geq T_0$ ) 以下で消費電力量が少ない運転曲線を探索するものである。惰行を加える地点の選択基準を、そのときどきで単位時間あたりの消費電力削減量をもっとも大きい箇所を選択する、一種の貪欲アルゴリズムである。

#### 3.2.2 本手法による消費エネルギーの比較

省エネルギー運転探索手法による運転曲線例と既存の代表的な省エネルギー運転法（再力行なし条件・最高速度制限条件）による運転曲線例を図6に、それぞれの運転曲線における消費エネルギー計算結果の比較例を図7に示す。いずれの運転曲線も走行距離は1,300m、走行時間は111秒に統一している。

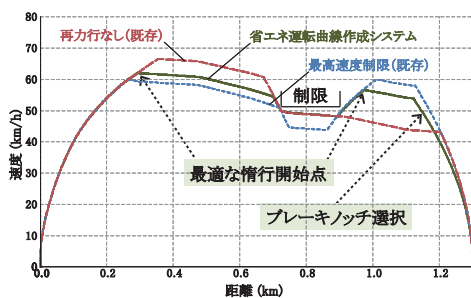


図6 本手法を用いた運転曲線例

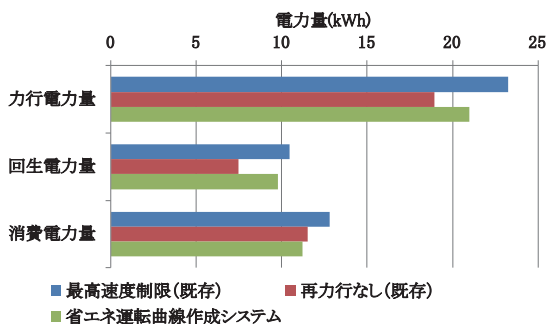


図7 本手法を用いた消費エネルギーの比較例

今回の比較では、再力行なし条件が最も力行電力量が少ない運転曲線であったが、ブレーキ初速度が低いため回生電力量が小さいため、最も省エネな条件とはなっていない。省エネルギー運転探索手法が提案する運転曲線の消費エネルギーがこの中では最小となっていることがわかるが、力行・再力行それぞれバランスが良いノッチオフタイミングが選択されているためと考えられる。

### 3.3 その他の研究開発事例

#### 3.3.1 車両の軽量化技術

車両の軽量化は省エネルギー効果が大きいことは第2章で述べた。この目的のため鉄道車両の金属部材を使用している構体の一部や部品等にFRP材料を適用するための検討<sup>4)</sup>を行っている。

また、鉄道車両構体へ適用し軽量化を図ることを目的として、難燃性マグネシウム合金を試作し、金属組織の特徴、機械的性質及び加工性について調査した。また、剛性を確保するため中空押出型材作製の可能性及び溶接・接合法について取り組んでいる<sup>5)</sup>。

#### 3.3.2 在来線車両の形状改良による空気抵抗低減<sup>6)</sup>

在来線の屋根上機器と床下機器の形状を改良することにより、8両編成に適用した場合、空気抵抗係数（走行抵抗二次項）を最大22%低減できる見込みを風洞実験等から推定した。なお、文献6)ではこの効果を消費エネルギーに換算した場合、5.4%の低減と試算しているが、図3では走行抵抗二次項を2割低減した場合、消費エネルギーが3%の低減効果と示しており文献6)での消費エネルギー低減効果の方が大きい。これは、図3での走行条件が最高速度90km/h程度であるのに対し、文献6)では最高速度130km/hとなっており、図3の条件より高速で走行する割合が高く、その分、走行抵抗二次項による消費エネルギーが消費エネルギー全体に占める割合として高くなっていることが原因と考えられる。本技術はほぼ実用段階まで研究開発が進められている。

#### 3.3.3 バッテリー搭載による省エネルギー技術<sup>7)</sup>

最近の電車ではブレーキ時に回生電力が発生するが、近傍に他の電車がいない場合は回生絞り込みや場合によっては回生失効が発生する。ブレーキ力は機械ブレーキが自動的に立ち上がりこれによって担保されるため安全上の問題は無いが、エネルギー消費量が增大する。バッテリーを車両に搭載することにより、回生絞り込みや回生失効を防止でき、高速域での回生能力向上と組み合わせることによりブレーキ損失も低減できる他、非電化区間への乗り入れも可能となり、この区間においても回生ブレーキが利用できるため消費エネルギー低減効果が大きい。本技術もほぼ実用段階まで開発が進んでおり、JR東日本のEV-E301系<sup>8)</sup>で営業運転に使用され、JR九州では817系交流電車を改造して走行試験が行われた<sup>9)</sup>。

## 特集：車両技術

3.3.4 燃料電池車両の開発<sup>10)</sup>

非電化区間を走行するディーゼルカーの代替として、燃料電池を搭載してバッテリーとハイブリッド化した車両を走行することにより、燃料電池による高効率化に加え非電化区間でも再生ブレーキが使用できることによる大幅な省エネルギーを実現することを目的として開発を進めている。燃料電池車両は排ガスも使われなかった空気の残りとも水蒸気のみで大変クリーンであり、次世代の非電化区間を走行する車両の切り札として注目されている。現在、所内試験電車に100kW級燃料電池システムとバッテリー等を搭載し、走行試験を継続実施して、長期劣化特性の評価を行っている。本研究開発の一部は国土交通省からの補助金を受けて実施した。

3.3.5 磁気ヒートポンプシステムの開発<sup>11)</sup>

現在の鉄道車両で使用されている冷房システムの主流は代替フロン等を用いた蒸気圧縮式冷凍であるが、代替フロンは排出削減対象ガスに指定されており、今後、ノンフロンで高冷凍効率が期待できる磁気冷凍技術が期待されている。室温領域では暖房にも応用可能なことから磁気ヒートポンプと呼んでいる。独立行政法人新エネルギー・産業技術開発事業／磁気ヒートポンプ技術の研究開発委託事業において、中部電力、サンデン、三徳、東工大、神戸大、九州大とともに磁気ヒートポンプシステムの開発に取り組んだ結果、冷凍能力の最大で1.4kWを確認した。

3.3.6 高効率廃熱回収サイクルの鉄道車両への適用<sup>12)</sup>

ディーゼルカーのエンジンからの排ガスや冷却水の廃熱を利用して廃熱回収サイクルを用いると燃費向上や省エネルギーが可能である。この廃熱回収サイクルに高効率な方式としてトリラテラルサイクルに着目して開発を進めている。現在、シリンダ内の沸騰状況の可視化と沸騰誘起化により効率低下防止に取り組んでいる。本研究開発は科学技術振興機構（JST）からの委託研究として実施している。

## 4. おわりに

本報告ではすぐに実用化可能な技術から基礎段階から始めたばかりの8技術について述べた。すぐに使える技術については如何に鉄道事業者に使っていただくかについてのアプローチ方法について工夫が必要であると痛感している。基礎段階である技術については実用レベルに育ててできるだけ早期に鉄道事業者に有効活用していた

だけのようにしていきたい。

また、第2章で走行抵抗一次項成分による損失が大きいことを述べた。さらに高速域でブレーキをかけた際のブレーキ損失も比較的大きいことを紹介した。これらのエネルギー損失については改善効果が大きく、低減可能性の余地があると考えており、引き続き研究手法について検討し、更なる鉄道車両の省エネルギーに貢献していきたい。

## 文献

- 1) 小川知行 他：汎用鉄道車両走行エネルギーシミュレータの開発，電気学会リニアドライブ／交通・電気鉄道合同研究会，LD-14-067／TER-14-030，2014
- 2) 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
- 3) 熊澤一将，佐藤圭介，小川知行：局所的な省エネ運転操作の組み合わせによる省エネ運転の探索手法，第20回鉄道技術連合シンポジウム，pp.405-408，2013
- 4) 伊藤幹彌：鉄道車両における高分子材料，第27回複合材料セミナー予稿集，pp.57-66，2014
- 5) 森久史 他：車体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
- 6) 井門敦志 他：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
- 7) 小笠正道，田口義晃：バッテリー搭載型電車による省エネルギー化，RRR，Vol.66，No.3，pp.6-9，2009
- 8) 白木直樹 他：蓄電池駆動電車主回路システム，第51回サイバネシンポジウム論文集，論文番号536，2014
- 9) 田口義晃 他：交流電化区間に対応した蓄電池電車主回路の開発と走行試験による蓄電池性能評価，鉄道総研報告，Vol.28，No.7，pp.17-22，2014
- 10) 山本貴光 他：燃料電池・バッテリーハイブリッド車両のエネルギー効率評価，鉄道総研報告，Vol.23，No.11，pp.17-22，2009
- 11) 宮崎佳樹 他：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
- 12) Hiroshi Kanno, Naoki Shikazono: Thermodynamic Simulation of Rankine, Trilateral and Supercritical Cycles for Hot Water and Exhaust Gas Heat Recovery, I-COPE, 2013.