

カーボンニュートラルへ向けた鉄道車両技術 (鉄道車両の省エネルギー技術のこれまでとこれから)

Toward the Carbon Neutral World By the Railway Vehicle Technology (Past and Future Energy Saving Traction Technology)

近藤 圭一郎^{*1}

Keiichiro KONDO

Professor, Faculty of Science and Engineering, Waseda University



Abstract

This paper starts with the mechanism of energy saving characteristics railway transportation system. Then the technical challenge of energy saving on the railway vehicles in these 30 years follows the explanation of the mechanism of energy saving. The future possible technical innovation towards the carbon neutral in 2050 are discussed at the last of this paper.

●**Keywords:** Carbon newtral, Railway vechicle, Energy saving ,Taction technology, Runing resistance, Light weight car body

^{*1}早稲田大学 理工学術院 教授

1. 緒言

JR東日本の「ゼロカーボンチャレンジ2050」¹⁾に代表されるように、国の2050年におけるカーボンニュートラル達成に向けて、鉄道事業者各社とも鉄道事業におけるCO₂排出量の実質的なゼロ化を目指した取り組みが行われています。鉄道は元々エネルギー効率が高いことに加え、消費エネルギーの削減に取り組んできたことから、環境にやさしい交通機関と言われてきました。消費エネルギーとCO₂排出量に正の相関があることから、図1²⁾に示すように、鉄道におけるCO₂排出量は、他の交通機関に比べて少ないです。したがって、鉄道におけるカーボンニュートラルへの取り組みは、これまで以上の努力が求められることになります。鉄道事業で消費されるエネルギーの大半は、列車の運行に関わるエネルギーです。JR東日本の場合、エネルギー消費の約8割が列車の運転によるものです³⁾。列車の運転に要するエネルギーは、この30年間で大幅に削減されました。その要因としては、車両の軽量化、回生ブレーキの本格的な導入、空気力学的性能の向上などが挙げられます。本稿では、鉄道車両の力学的特性から、省エネルギーな輸送機関であることを述べた上で、この30年の省エネルギー化に寄与した車両技術について概説します。その上でカーボンニュートラルに向けた列車の消費エネルギー削減の展望について説明し、2050年における鉄道分野のカーボンニュートラルに寄与することを本稿の目的とします。

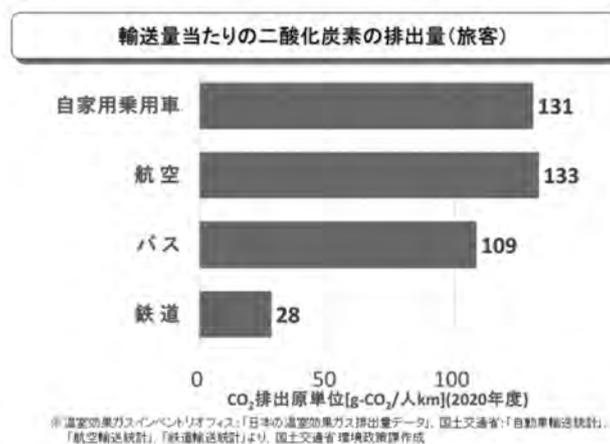
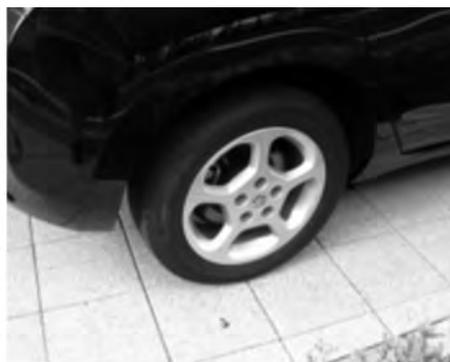


図1 各交通機関のCO₂排出量²⁾



(a) 鉄の車輪とレール

(b) ゴムタイヤと地面

図2 鉄道車両と自動車の支持・駆動・案内機構

2. 鉄道車両の力学的特徴とエネルギー消費

2・1 鉄道車両と自動車の力学的特徴

鉄道車両、自動車、航空機、船舶のいずれの乗り物も力学的には必ず、支持・案内・駆動(制動)の機能が必要です。例えば、船であれば、船体はその重さを支え、舵がその進行方向を決め、スクリューなどが駆動を行います。これに対し陸上交通機関である鉄道車両と自動車は、図2に示すように車輪に支持・案内・駆動の3つのすべての機能が集約されています。同じ車輪を用いる鉄道車両と自動車を比較してみます。鉄道車両は鉄のレールと車輪を用いることで表1に

表1 鉄道車両と自動車の特徴比較

	鉄道車両	自動車
特長	<ul style="list-style-type: none"> ・大支持荷重 ・自己操舵可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・高摩擦力 ・移動方向自由
制約	<ul style="list-style-type: none"> ・低摩擦力 ・移動方向制約 	<ul style="list-style-type: none"> ・低支持荷重 ・外部操舵必要

示すように移動方向は限定されるものの、大きな荷重に耐え、自己操舵(車輪が自らレールに沿って舵を取る機能)が可能であることから大きな車体と長い編成の列車が構成できます。また、技術的には300km/h以上の速度で走行が可能です。一方、自動車は平面上での移動方向の自由度が確保されていることから、種々の路面状態に対応でき、車輪の回転方向に依らず支持が容易なゴムタイヤ方式が採用されています。

2・2 鉄道車両と自動車のエネルギー特性

鉄道車両と自動車の力学的特性の相違は、両者のエネルギー特性にも大きな違いを生み出しました。自動車は二次元の移動自由度を持つことからエネルギー的な自律が求められます。その結果、エネルギー密度の高い化石燃料をエネルギー源とする内燃機関が発達しました。一方、鉄道はレールに沿って走行することから、150年前の技術でも、移動する列車に電力を供給することが可能でした。すなわち、架線とパンタグラフによる電力供給システムが確立しました。この結果、電動機駆動という出力密度の高い動力機構が利用可能となり、長大な列車を300km/h以上で安定に走行させるシステムが実現しました。また、同じ断面の長い車体を連ねることから、質量当たりの空気抵抗が自動車に比べ小さくできます。鉄のレール・車輪の転がり摩擦力が小さいことと併せて、走行抵抗の少ない移動体が構成できました。これが「鉄道は環境にやさしい交通機関」と言われる本質的理由です。

3. 鉄道車両の消費エネルギー削減の取り組み

鉄道車両の消費エネルギー削減に大きく寄与してきたのは、車両の軽量化、回生ブレーキ、そして走行低減です。これらについて以下で説明します。

3・1 車両の軽量化

かつて、鉄道車両の大半は鋼製車両でした。しかし、その後の金属加工技術の進展などを背景に、ステンレスを用いた車両

が一般的になりました。ステンレスは素材自体は鋼の一種です。しかし、防錆性能が高いことから、腐食対策のための厚みを見込む必要がなく、軽量化が可能です。また、新幹線などではアルミニウムが用いられ、さらなる軽量化が行われています。二階建て新幹線として活躍したE1系は鋼製車体で1両当たり55～60tの質量でしたが、同じ二階建て構造でアルミ製のE4系は50～55tでしたので、概ね1割の軽量化が達成されていました。

3・2 回生ブレーキの採用

パワー半導体デバイス技術の進展により、1990年代に入ると床下搭載可能な可変電圧可変周波数電源であるインバータが実用化されました。その結果、車両駆動用電動機として、直流電動機に代わり、交流電動機の一つである誘導電動機が広く用いられるようになりました。交流電動機では電動機を発電機として動作させ、運動エネルギーを電気エネルギーとして架線に帰す回生ブレーキが広い速度範囲で実現可能です。したがって、直流電動機駆動の車両と比べ、車両の運動エネルギーの多くを回収し、再利用することが可能になりました。表2は10両編成の通勤電車が約2kmの距離の駅間を走行した際の回生ブレーキによる省エネルギー効果を筆者が概算で求めた結果です。このケースでは架線から列車に供給されたエネルギーのうち37%が回収可能であることがわかります。回生ブレーキの採用は車両の軽量化と併せて在来線車両、特に通勤型車両の省エネルギー化に大きく貢献しています。

表2 回生ブレーキによる省エネルギー効果の概算

①架線から列車に供給されるエネルギー(kWh)	57.7
②架線に帰るエネルギー(kWh)	21.6
回生率②÷①(%)	37.4

3・3 走行抵抗の低減

新幹線のような高速車両では、高速域での走行抵抗の大部分を占める空気力学的な抵抗、すなわち空力抵抗の改善が効果的です。空力性能は1964年に開業した東海道新幹線に用いられた0系新幹線の時代から改善が図られてきました。特に空力抵抗の低減は空力騒音の低減と一体となって取り組まれてきました。そして近年ではコンピュータ技術の発達により、空力シミュレーションと実測データ処理の技術が進み、空力性能の高い車体形状の設計が行われています。図3は空力性能の向上が達成されたE5系新幹線車両です。先頭部はその長さの半分以上の部分が滑らかに断面形状が変わる設計になっています。



図3 アルミ車体のE5系新幹線の先頭形状

4. これからの鉄道車両における消費エネルギー方策

以上のように、鉄道車両における消費エネルギーの削減は、これまでは主に車両のハードウェア技術の革新に支えられ達成されてきたことがわかります。今後もこれらの取り組みは新たな技術革新を生み出すべく、続くものと考えます。一方で、近年のパワー半導体素子技術の進展は車両の動力性能を飛躍的に向上させます。また、計算機技術の進展に支えられた情報通信技術 (IT) や機械学習などの所謂、ソフト面の技術の進展は、サービスを低下させることなく、運転による消費エネルギーを削減することに効果が期待されます。また、燃料電池のような新たなエネルギーソースや、リチウムイオン電池などの高性能な蓄電素子は、架線・パンタグラフで電力を連続供給するシステムのみであった車両の電動化の選択肢を、広げることが期待されます。以下いくつかの例を考えてみます。

4・1 車両性能の向上

シリコンカーバイド (SiC) や窒化ガリウム (GaN) に代表されるワイドバンドギャップ半導体を用いたパワー半導体デバイスが、鉄道車両駆動用インバータに用いられるようになってきました。SiCデバイスを用いることで、従来のシリコン (Si) のパワー半導体デバイスに比べて、より多くの電流を流すことが可能になります。この特性を利用することで、力行 (加速)、回生いずれの性能も向上することが可能になります。その結果、力行時間が短縮されて、主回路機器の損失の低減が可能になります。また回生電力も向上します。これらの効果として消費エネルギーの削減が期待できます。

4・2 運転速度低減による消費エネルギー低減

図4は10両編成の通勤電車が2kmの駅間を走行する際に、最高速度を変化させたときの、運転時間と消費エネルギーの関係を示したものです。運転時間を少し長くするだけで消費エネルギーが大きく低減することがわかります。この特性を利用すると、将来、自動運転³⁾が実用化され、周辺の列車の運転状態や在線状況に関する情報を列車の運転に活用できるようになると、無駄な高速走行を防止でき、消費エネルギー削減が期待できます。

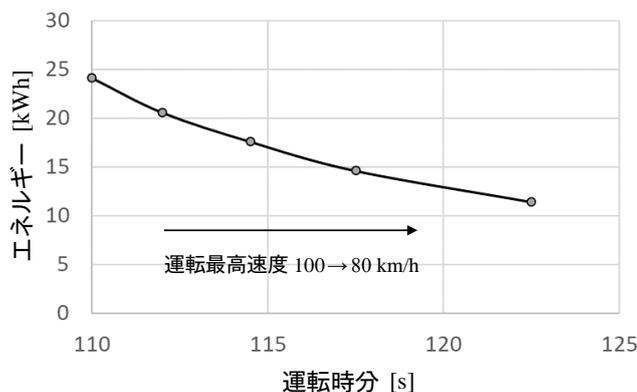


図4 走行時間と消費エネルギー(駅間距離2km)

4・3 非電化区間における取組 ～蓄電池搭載車両の活用～

非電化区間では主にディーゼルエンジン駆動の気動車が用いられてきました。2010年前後から、JR東日本をはじめ、各鉄道事業者は自動車と同様に蓄電池とエンジンを組み合わせたハイブリッド気動車を実用化して来ました。これらはハイブリッド化により従来の気動車に比べ概ね10～20%の消費エネルギー削減が期待されます。また、最近ではJR東日本のHYBARIに代表されるような、燃料電池と蓄電池のハイブリッド車両も世界的に注目されています。また、充電の機会が確保される路線条件では非電化区間を蓄電池で走る蓄電池電車も選択可能です。これらはいずれも列車走行に伴う直接的なCO₂排出量削減が可能です。加えて、これらのエネルギー源でのCO₂排出量にも留意することで、Well to WheelのCO₂排出量を従来の車両よりも低減することが期待できます。

5. 結言

1990年代の初め、京浜東北線にステンレス車体で誘導電動機駆動の209系電車が走り出した頃、車内妻面には「この電車は従来の半分以下の電力(正確には“電力量”)で走っています」という主旨のシールが貼付されていました。このシールが貼られてから30年が経ちました。そしてカーボンニュートラルの達成まで約30年です。この30年間の技術の進歩を見ると大きな段差を感じますが、日々の変化は連続的で、その差分はわかりにくいものです。このことから、省エネルギー化やCO₂削減の技術革新はある日突然起こるものではなく、不断の努力の結果であることがわかります。これまでの事実を照らすと、一つずつの効果は少なくとも、着実に技術を確認していくことが、2050年のカーボンニュートラルを達成するためには重要であると感じます。

参考文献

- 1) 2050年度のCO₂排出量「ゼロ」を目指します ～「ゼロカーボン・チャレンジ 2050」～ JR東日本ニュースリリース、https://www.jreast.co.jp/press/2020/20200512_ho02.pdf (2023年2月1日閲覧)
- 2) “運輸部門における二酸化炭素排出量” 国土交通省Web site https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html
- 3) 運転エネルギー削減に向けて、山手線で省エネ運転の研究に取り組んでいます JR東日本ニュースリリース、https://www.jreast.co.jp/press/2021/20210907_ho03.pdf (2023年2月1日閲覧)