

鉄道をほんとうに環境に優しいものにするためには：総論

高木 亮 (工学院大学)

Development of A Truly Environment-friendly Railway System

Ryo Takagi (Kogakuin University)

Railways have been believed to be one of the most environment-friendly modes of transport. However, recently there are arguments that other modes have caught up with the railways, and in some cases even went ahead of them, in terms of environment-friendliness. The arguments have stimulated rail engineers around the world, who are now seeking ways to improve energy efficiency of the railway system. In this paper the author gives an overview on the current situation, and discuss how improvements can be made to make railways more energy efficient, and thus environment-friendly.

キーワード：省エネルギー、電気鉄道、低損失化、電力回生、エネルギー蓄積

Keywords : energy-saving, electric railways, loss reduction, regenerative braking, energy storage

1. はじめに

鉄道は、一般的には「環境に優しい」交通モードであると信じられている。しかし、近年は競合する他の交通モードにおいても省エネルギー化技術が急速に進歩し、鉄道のこの面での優位性はかつてほどではなくなっている可能性がある。欧州ではすでにこうした状況を念頭に置きつつ鉄道の省エネルギー化を進めようという動きが強まっている。

一方、日本の鉄道界は、車体の衝突安全性に関する規制が緩いこと、全体として速度などのサービスレベルがやや低いこと、輸送密度が高いことなど、日本特有の事情はあるものの、車両の軽量化の進展、パワーエレクトロニクスの多用と回生ブレーキの常用、そして高速鉄道（新幹線）における走行抵抗低減の進展などにより、全体としてみれば省エネルギー化技術に関しては世界の最先端に近い位置にいてと考えてよい。しかし、そのような日本の状況は、同時に鉄道のいっそうの省エネルギー化を進めるうえで今後利用可能な手段が相対的に限られていることをも意味する。

他の交通モードについては、例えば最新の報道においても自動車の燃費を 2005 年度と比べて 2020 年度には 65%改善するという方針を日本の環境省が示したと報じられている⁽¹⁾ことなどからして、今後大幅な省エネルギー化が進む可能性が高い。当然ながら、鉄道もこうした動きに対抗する必要があると思われる。幸い、近年省エネルギー化に資すると考えられるさまざまな新技術が現れているほか、従来から知られている方策でさまざまな理由によりまだ実行さ

れていないものなどもある。こうした手段により今後どのように省エネルギー化を進めていくべきか、その狙い目を探るのが本稿の目的である。

2. 鉄道の省エネルギー性に関する議論の現状

日本の鉄道業界は、環境レポートなどを通じて「鉄道は環境に優しい」とアピールしている（文献(2)・(3)を掲げておくが、他にも同様な文献等が多数あると考えられる）。世界的にも似たような発言が鉄道業界からなされている（英国の例は文献(4)）。

だが、日本国外の研究者などによるレポートにおいて、鉄道の環境特性は一般に信じられているほどよくはない、という議論が時折みられる。最近では、2004 年ごろに英国の Roger Kemp 教授が、英国のロンドン・エディンバラ間（約 600km）を移動する場合の座席当たり所要エネルギーを、①既存の高速鉄道（最高速度約 200km/h）、②乗用車（VW 社製の一般的な乗用車「パサート」）、③最高速度 350km/h の高速鉄道新線（実在しない）、および④航空機（エアバス A321-200 型機）について比較した結果を発表している⁽⁵⁾。結果を文献(5)所載の図からよみとると表 1 のようになっており、鉄道にとってよい数字ではない。

そこで、筆者はこの数字と比較するため、日本のデータ（700 系電車が東京・大阪間を走行した場合の座席あたりエネルギー 14.7kWh⁽⁶⁾）をもとに比較を行った。このデータは東京・大阪間約 500km 走行時のデータであるから、これを 5 分の 6 倍してロンドン・エディンバラ間 600km と同じ距離に換算し、さらに原油換算を行った。その結果も表 1 に示してあるが、Kemp 教授のデータに比べると大幅に省エ

表 1. ロンドン・エディンバラ間 600km の移動に必要な
座席あたりエネルギーのモード間比較

交通手段	所要エネルギー (原油換算 t / 座席)
現在の高速鉄道 (最高速度 200km/h)	8.2
自動車 (VW パサート)	8.6
仮想的な高速鉄道 (最高速度 350km/h)	20
航空機 (エアバス A321-200)	20
日本の新幹線 700 系電車 (東京・大阪間実績値をもとに計算)	3.8

文献(7)による。

エネルギーであることがわかる⁽⁷⁾。

歴史をさかのぼれば、およそ 30 年ほど前にも似たようなレポートが海外で出され、これに対応して日本国内で鉄道と他モードとの消費エネルギーの比較が行われたことがある⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。それによれば、米国のレポートによると米国の地下鉄(サンフランシスコ BART など当時の新しい都市高速鉄道のデータに基づく)は日本の通勤鉄道(当時の東京・大阪の国電区間の実績データに基づく)に比べて実績人キロ当たりで 13 倍ものエネルギーを消費しているとされている(当時の日本の通勤鉄道の混雑が現在に比べてもさらにひどかったことを考慮に入れる必要はある)。

このように、日本の鉄道のエネルギー消費は海外のそれに比べ非常に少ないが、その要因なる技術的特徴として以下のようなことが挙げられる。

- (1) 車両の軽量化の進展。
- (2) パワーエレクトロニクスの積極的な利用、および電力回生ブレーキの広範囲な利用。
- (3) 高速列車の空気抵抗の少なさ。

なお、(1)の背景として、日本においては車体の衝突安全性に関する規制が緩く、他国に比べて車両の軽量化に有利であるという事情は指摘されるべきであろう。また、(1)・(2)とも他国に比べ日本の鉄道事業者が積極的であった背景に、日本の鉄道企業が独立採算で鉄道を運営しているという産業界の体制の違いも指摘されるべきであろう。さらに、(3)については新幹線の厳しい騒音規制をクリアするための技術開発が結果的に空気抵抗の低減にも役に立っていること、ならびに新幹線が採用している広幅車体が座席あたり空気抵抗の低減に有利であることを指摘しておく必要がある。また、日本では輸送密度が高い路線が多いこと、また残念ながら速度やサービスなどのレベルが他国に比べて低いといわざるを得ないケースが少なからずあること(例: 新幹線に食堂車等の長距離旅客向けサービスが十分でないこと、新幹線以外の鉄道において 100km/h 以上の表定速度は

極めてまれであることなど)も、指摘される必要がある。

3. 鉄道の省エネルギー化の狙い目と新技術

鉄道以外の交通機関においては、近年大幅な省エネルギー化が進行しつつある。運輸部門におけるエネルギー消費等の大きな割合を占めるのは自動車だが、これについてはすでに述べたようにいわゆるエコカーの開発や普及が進みつつある。航空機についても、近年燃料消費の少ない機材が開発され、旧式機材を急速に置き換えることを計画している航空会社も少なくない。こうした動きに対抗するためには、鉄道においても省エネルギー化の努力を怠るべきではない。

では、鉄道の省エネルギー化の狙い目はどこにあり、かつどのような新技術がある、もしくは考えられるのだろうか。

通常の電気鉄道において、省エネルギー化の方法として考えられるのは次のような項目であろう。

- a) 車両の軽量化
- b) 走行抵抗低減
- c) 加速時の高効率化
- d) 電力回生
- e) 饋電システムの低損失化
- f) 饋電システム電圧等の最適設定・制御
- g) 最適運転

このうち、a) については、日本では特に 1980 年代なかばから 1990 年代にかけて大幅な進展がみられた。しかし、その後は軽量化は足踏み状態であったり、場合によっては重い車両に逆戻りしたケースなどもある。これは、車両構体の剛性不足による乗り心地への悪影響、近年の事故において指摘された衝突安全性の不足、あるいは搭載機器の容量の切り詰めすぎによる信頼性不足、などの問題への対処のためである。現在最新の鉄道車両を大幅に上回る軽量化は、今後エネルギー価格のいっそうの高騰などが無い限り実現しないのではないだろうか。b) は特に新幹線において騒音低減のいわば「副作用」として実現してきた経緯があり、これまた今後大幅な抵抗低減はあまり望めないと考えたほうがよさそうである。

c) については、パワーエレクトロニクスの採用により抵抗制御時代にあった起動時の抵抗による損失はなくなったが、インバータ制御の電気車では加速中つねにインバータ自体の損失が出ているほか、電動機の効率も一般的に直流電動機時代に比べ低いケースが多かった。このうち電動機の効率向上について、従来より 2 次導体の抵抗が小さく効率が低い誘導電動機や、励磁不要の永久磁石界磁同期電動機などが使われ、従来比で数%から場合によっては 10%を超えるような効率向上が実現したとされるケースが出てきている。さらに、今後は SiC デバイスの実用化などによりパワーエレクトロニクスの損失低減も期待できるなど、こ

の分野は意外に今後の改良の余地がありそうである。

d) については、日本ではすでに新造される電気車はほぼすべて電力回生ブレーキを利用可能であるが、特に速度が高い領域でブレーキ力のすべてを電力回生ブレーキでまかなうことはできていないケースが多いほか、直流饋電システムにおいては回生負荷の不足による回生失効の問題も依然として解消していない。これらの問題を解決し、いわゆる純電気ブレーキ化（常用ブレーキ力はすべて電力回生ブレーキによってまかなうことを可能とするシステムへの転換）をめざした技術開発が進められており、今後もブレーキ時により多くの運動エネルギーを回生することを通じた省エネルギー化の余地がある。電力回生ブレーキは加速時に用いる電動機等がそのまま用いられるから、c) の進展によっても回生ブレーキ時に回収可能なエネルギーが増加する効果が期待できることも注目されるべきだろう。

e) については、饋電システムは大電力を比較的低電圧・大電流で変電所から列車まで数 km～数 10km を輸送する必要があるため、いわゆる饋電損失は意外に大きな値となっている。例えば、日本における典型的な 1.5 kV 直流電気鉄道では、変電所を通じて直流饋電系に入力されたエネルギーのうち 1 割前後が饋電損失として失われている。これを低減するための方法として、饋電タイポスの設置、上下線一括饋電方式など饋電方式の改良のほか、パワーエレクトロニクスやエネルギー蓄積装置などの利用による改善（横流防止、電圧低下防止、力率向上など）、抵抗値の低減（導体数や導体断面積の増加、そして超電導ケーブルの利用など）、そして高電圧化などといった手法が検討されている。ただし、饋電方式の改良以外の方法はややコストが大きい問題がある。

f) については、特に直流饋電システムにおいて、回生電力が回生車から力行車に円滑に送られるように変電所の電圧設定（場合によっては電圧制御）を行うことにより、回生電力の有効活用が図られて省エネルギー化できることが知られている。従来は電圧をやや低めに設定するのがよいといわれてきたが、近年は車両の回生絞り込み開始電圧が高めに設定される例が多くなってきたので、従来よりは高めの電圧が最適である可能性が高い。

さて、以上の手法に対し、g) はいわば「ソフト的」手法により省エネルギー化を図ろうとするものである。ランカープの最適化、惰行制御（惰行を活用して早着を抑制することによる省エネルギー化）、また列車ダイヤの工夫（通過主体列車の活用など）といった手段が考えられ、国内外で活発な研究開発が行われている。

では、こうした手法により、具体的にどの程度の省エネルギー化が可能と考えられるのだろうか。近年、他の交通モードにおいて大幅な省エネルギー化の動きがあるが、もともと省エネルギー性が高かった鉄道においては必ずしも改善の余地は大きいわけではないようである。例えば、2004 年の Kemp 教授のレポート以後欧州では鉄道省エネルギー化の気運が高まっているが、EU 主導の研究プロジェクト

RailEnergy が公式に掲げた目標は現状に比べて 6% の削減とされる。こうした数字は、現在の省エネルギー化技術の導入状況や、列車速度などをはじめとするサービス内容などにより変わりうるが、日本の鉄道界においても今後 20% などといった大幅な省エネルギー化は困難なのではないだろうか。

4. 電気鉄道とエネルギー蓄積技術

ところで、電気自動車などの開発にともない、近年急速に 2 次電池などのエネルギー蓄積装置の技術が進歩しており、鉄道の省エネルギー化のためにこれを応用しようという動きも盛んである。しかし、現在の研究開発や実用化などの動きは、低速なライトレール路線の一部の架線レス化とか、直流電気鉄道における回生電力吸収設備としての応用などが主体であるといえる。前者のような架線レス化は、いまのところ蓄積可能なエネルギーがまだ不十分であり、高速鉄道などには利用しがたい。後者は直流饋電システムの電力輸送能力の低さを補うための技術という色彩が強く、類似の技術と比べたときの優位性は明確とはいえないように思われる。

一方、このエネルギー蓄積装置を用いて非電化区間を走行するディーゼルカーを省エネルギー化・低騒音化・低排出ガス化する試みは、当初からたいへんな注目を集めてきた。すでに乗用車ではガソリンエンジンと電池を搭載したハイブリッド車が一般化しつつあるが、鉄道でもディーゼルエンジンと電池などを積んだハイブリッド車両がそろそろ本格的な実用化に入ろうとしており、これらによる抜本的な省エネルギー化などが期待されている。

こうしてみると、エネルギー蓄積装置の技術進歩は、他のモードと比較したときの電気鉄道の優位性を薄める働きをしているように思われる。いまのところ、ライトレール以外の鉄道が一気に架線レス化などに動くとは考えにくいだが、技術進歩が今後どこまで進むのか、注視する必要があるだろう。現在の摺動集電を前提とする電気鉄道は、蓄電を前提とする「非電化」鉄道に比べ、充放電損失がない、重いエネルギー蓄積装置を車載する必要がないなどの観点から今後も大きな利点を有すると考えられるが、電車線などの保守にかかる手間が大きいことなど問題点も少なくない。こうした電気鉄道が抱える問題を解決する技術開発を通じ、電気鉄道のメリットを今後も生かし続けることが必要であろう。

5. おわりに

以上のように、鉄道以外の交通手段の大幅な省エネルギー化が進むなかにあつて、電気鉄道は対抗して同様に大幅な省エネルギー化を行う余地は少ない。それでも、優位性を維持し、問題点を解消するため、今後も技術開発の努力を継続する必要があることは間違いない。

ただし、大量輸送機関としての電気鉄道は、その特性上利用者数や市場シェア（モーダルスプリット）が多いほど

輸送量あたりの所要エネルギーは減る傾向にある。こうした観点からは、今回議論した電気鉄道の「ハード的」省エネルギー化も重要ではあるものの、「ソフト的」手法のほうも同様に、もしくは場合によってはより重要であると考えられる。特に、市場シェアを上げるためのさまざまな施策を、社会的な理解を得つつ導入していくことのほうがより重要であるともいえる。例えば、自動車が省エネルギー化されたとしても、自動車交通量が大幅に増えてしまえばその効果は当然減殺されてしまう。二酸化炭素排出量の大幅削減を国際公約する一方、交通量増大につながるものが考えられる高速道路無料化の社会実験が実施されるなど、現在の日本政府の政策には明らかに整合性に欠けるものがあるが、鉄道業界やその関係者もこうした状況を正しい方向にもっていくための十分な努力をしてこなかったと考えられる。鉄道がどのように社会に対して貢献するのか、それに対してどのような援助なり政策なりを期待するのかなど、社会が全体として受入れ可能であるような強力な提案を、数多く繰り出していくことこそが、ほんとうの意味での課題であると考えられる。

文 献

- (1) 「温室効果ガス：車の燃費『65%改善』削減策、20年までに一環境省」、毎日新聞、2010年11月19日（電子版）
- (2) 「鉄道と環境に関する資料」、日本民営鉄道協会ウェブサイト <http://www.mintetsu.or.jp/eco/library.html> (2010年11月20日アクセス)
- (3) 「JR 東海 環境報告書 2009」、東海旅客鉄道(株)ウェブサイト <http://company.jr-central.co.jp/company/achievement/echo-report/index.html> (2010年11月20日アクセス)
- (4) "Rail industry carbon", Network Rail website <http://www.networkrail.co.uk/aspx/7708.aspx> (2010年11月20日アクセス)
- (5) Kemp, R.: "Take the Car and Save the Planet? The Environmental Impact of Rail Transport", IEE Power Engineer, October/November 2004.
- (6) 伊藤順一: 「700系量産車両の特徴と新幹線の進歩について」、鉄道車両と技術, 5, 2 (43), pp. 2-12 (1999).
- (7) 高木 亮: 「鉄道はほんとうに『環境に優しい』か? ～鉄道とエネルギーについて考える～」, 鉄道車両と技術, 143, pp. 7-13 (2008).
- (8) 茅 陽一編: 「21世紀に向けての科学技術」、共立出版 (1984), 第5章「鉄道」(曾根 悟分担執筆)。
- (9) 曾根 悟, 笠井啓一, 田崎良三: 「交通システムの省エネルギー昭和58年度文部省科学研究費エネルギー特別研究報告書 (1984)。
- (10) 曾根 悟, 笠井啓一, 田崎良三: 「交通システムの省エネルギー化」, 昭和59年度文部省科学研究費エネルギー特別研究報告書 (1985)