

鉄道とエネルギー

Railway and Energy

東京工業大学 大学院理工学研究科 電気電子工学専攻 特任教授
渡邊 朝紀

1. はじめに

旧国鉄に入社してからこれまで、エネルギーなどの環境問題には何らかの形で継続的に関わってきました。長い目でみるとエネルギー問題の普遍的な事柄や一時的な事柄が見えてきます。以下に交通機関の中で際立つ鉄道の省エネルギー性やエネルギー蓄積技術、情報通信技術の活用について、現在の思いをお話致します。

2. 際立つ鉄道の省エネルギー性

18世紀の産業革命は、エネルギーでは石炭に支えられていました。1825年に蒸気機関車を用いた最初の公共鉄道、ストックトン・アンド・ダーリントン鉄道が営業開始して、それ以降馬車鉄道から蒸気機関車による鉄道へと変わってきました。1863年に開業したロンドン地下鉄は、当初蒸気機関車で運行されていました。乗客も乗務員も煤煙でどんなに大変だったでしょうか。1880年代から電気鉄道が広まり、ロンドン地下鉄は1890年に電化されました。

19世紀半ばから灯火用油として石油が鯨油にとって代わり、1876年にはガソリン機関が、1886年には自動車が発明されました。20世紀に入ると自動車の量産が始まり、やがて陸上輸送シェアにおいて自動車が隆盛となって、今日では輸送の大半を担っています。また化学産業も石炭化学から石油化学に代わり、今や石油主導の時代となっています。

石油の地球規模での大量消費には負の側面も出てきました。化学産業の発達と自動車の普及で大気汚染が発生し、例えば光化学スモッグは日本では1970年代にピークに達しています。その後工場や自動車の排ガスに規制がかけられて現在に至っています。正月の東京の空気がきれいになるように、現在でも工場と自動車の排ガスは多少とも空気を汚染しているのは事実です。近年の中国の大都市の大気汚染はすさまじい状況です¹⁾。現地新聞に記載してある粒状物質(PM2.5)の測定値も日本国内の基準の10倍以上だったりします。盆地の成都では前方視界不良で航空機の発着が何時間も遅れるのが常態化しており、時には道路では前方の車両が見えなくなります。大気汚染防止のため、欧州や中国では曜日と自家用車のナンバーなどにより走行を規制している地域もあります²⁾。またフランスのストラズブルのように街の中央部に一般の乗用車の乗り入れを禁止して、路面電車とした所もあります³⁾。

2009年度の輸送機関のエネルギー消費は、国内のエネルギー消費の23.6パーセントを占め、そのうちの62.4パーセントが旅客部門で、更にその85.9パーセントが乗用車、3.3パーセントが鉄道です(図1)⁴⁾。一方で輸送量では国内輸送人キロの62パーセントが自動車で、28パーセントが鉄道ですから、鉄道の省エネルギー性が際立っています⁵⁾。また国内輸送機関別



Profile

略歴

- 1972年 東京大学工学部電気工学科 卒業
- 1972年 日本国有鉄道入社
- 1977年 同 車両設計事務所浮上式鉄道主任技師付補佐
- 1981年 同 資材局用品課補佐
- 1983年 同 盛岡鉄道管理局車両管理室補佐
- 1986年 同 鉄道技術研究所車両制御研究室主任研究員
- 1994年 財団法人鉄道総合技術研究所電気車研究室長
- 2000年 同 車両制御技術研究部主管研究員
- 2004年 同 情報・国際部担当部長
経済産業大臣表彰(工業標準化功労者) 受賞
- 2007年 IEC 1906賞受賞
- 2010年 財団法人鉄道総合技術研究所国際規格センター シニアエキスパート
- 現在 東京工業大学大学院理工学研究科
電気電子工学専攻JR東日本客附講座特任教授
電気学会 交通・電気鉄道技術委員会委員長

図1 旅客部門のエネルギー消費

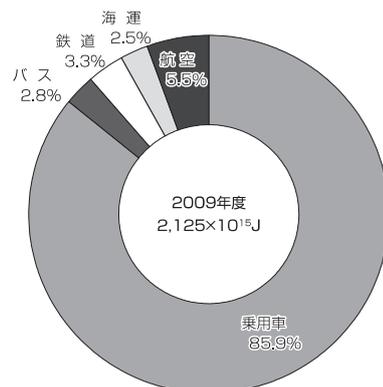


図1 旅客部門のエネルギー消費

エネルギー消費原単位では鉄道が402.8KJ/人キロ、乗用車が2586.3KJ/人キロで乗用車は鉄道の6.4倍の値となります⁶⁾。このように国内のマクロの統計から、「輸送機関のエネルギー消費量の9割は乗用車が占め、鉄道で代替できればその8割を削減できる。」といえます。このことは国内でもっと周知されるべきでしょう。

世界中で、特にアジアで自動車の増加は著しい状況です。人々が便利な物を求めるのは自然です。しかしアジアの国々では未だに多量の汚染物質を排出する自動車も多数使われています。中国でも規制する方向にある⁷⁾ようですが、世界の環境のためには日本など先進国並みの排出基準を課すべきなのではないでしょうか。また汚染を防ぐ仕組みも日本など先進国から他の国々にもっと発信されてよいのではないのでしょうか。

中国(北京、上海、成都など)、インド(ニューデリーなど)、タイ(バンコク)などアジアには人口が一千万を超える大都市が多数あります。鉄道によりこれら大都市の輸送・エネルギー・大気汚染の問題を同時に解決できます。そして交通手段として自動車ではなく、鉄道を利用する社会と文化を育てることが、エネルギー節減になり、大気汚染を防ぎ、環境を保つ最も良い方法なのです。

3. 鉄道のエネルギー節減

3.1 チョップパ電車からインバータ電車へ

鉄道では、時代によって山谷はありますが、常にエネルギー節減が求められてきました。入社して最初の仕事は、車両設計事務所、直流電車で電力回生を実現するチョップパ制御電車の回路方式を、各社のさまざまな提案から一つに絞り込むことでした。高速度交通営団(現在の東京メトロ)の千代田線にて6000系チョップパ制御電車が既に営業していました。地下鉄(最高速度70km/h)に比べ、国鉄はずっと高い速度(110km/h)からの電力回生ブレーキにこだわり、それまでなかなかうまく行っていませんでした。このような失敗の許されない雰囲気の中で、電力回生ブレーキ方式を決める必要がありました。直流主電動機の特性を基本とした様々な検討から、当時の先端の電力用半導体である逆導通サイリスタの出力定格を考慮して、H社の提案する高速度域で抵抗を挿入する方式に絞って行きました。これが量産されて201系通勤形電車(図2)となります。以前中央線を走行していたオレンジ色の車体の電車をご記憶の方も多いのではないでしょうか。採用された抵抗挿入方式は一見省エネルギーに反するように思われるかもしれませんが、その使い方により、当時の半導体の限られた能力を超えて、電力回生の速度範囲と回生エネルギーと共に大きく増加させる触媒のような働きをしています。

当時この方式を提案されたH社の担当の方(木村貴一氏)は亡くなられて久しいですが、敬服してやみません⁸⁾。当時教えて頂いたモータとチョップパの原理は私の電気車の知識の根幹となっています。チョップパ方式により列車の運転に必要な電



図2 201系チョップパ制御電車

力エネルギーを30パーセント以上節減できたことは、画期的なことでした。ただ当時の技術ではチョップパ回路は大変大きくなり、コストや電車へのぎ装面では大変だったと思います。またチョップパによるコスト増加を電力費節減額で補うことはかなり困難だったように記憶しています。エネルギー節約にコストがかかることは、今日でもあまり変わっていません。チョップパ装置と付属品で電車の床下は一杯となりましたが、現在の半導体IGBTを用いるとチョップパは半導体スイッチ1個で実現できます。

車両設計事務所の中では、1970年代半ばの当時から電車の究極の主回路はインバータということで一致していました。インバータでは半導体スイッチが6個も必要となります。技術的にはインバータが生み出される上で、チョップパの開発がその土台となったのです。もし短期的な経済計算だけで、鉄道会社がチョップパ制御電車を導入しなかったら、今日のインバータ制御電車の導入もかなり遅れて、欧州勢との技術格差がついていたでしょう。競争環境下で難しいことですが、遠くを見据えて業界全体で将来に役立つ技術の開発を継続することは大変重要です。

1980年代半ばに日本にインバータ制御電車が登場して、1990年代初めから新しい電車のほとんどがインバータ制御となりました。電力回生ブレーキは普通のものとなり、通勤電車では、車体の軽量化も加わり、走行に必要なエネルギーは従来の抵抗制御車の半分以下という著しい成果をあげています。新幹線電車でも同一走行速度で比較すれば、同じく著しいエネルギー節減が達成されています(新幹線電車の場合には、空力による走行抵抗の低減効果も大きい)。

3.2 新幹線電車の環境パフォーマンス

1964年の東海道新幹線開業からかなり経過して、1981年にフランスのTGVが最高速度260km/hで営業開始しました。フランスはこの成功に弾みを得て、1989年にTGV太平洋線を最高速度300km/hで開業させました。TGV大西洋線の走行抵抗の文献を用いて日仏高速鉄道の比較してみました。日本の新幹線技術でTGV大西洋線と同じ最高速度と加速性能の

高速列車を作ると、その出力はTGVの8800kWに対して、6000kWで済みます。当時の500系、Star21などの日本の新幹線電車は、走行抵抗が0系新幹線電車より大幅に低減していて、とびきり省エネルギーでした。これは車外騒音低減のための空気力学的研究とそこから生まれた騒音低減の方策が、結果として空力抵抗を減らすのに大きく役立ったのです。このことは鉄道総研報告に書きました⁹⁾。渡仏した時アルストムのある人からこの論文を話題にされました。鉄道総研の文献は彼らにチェックされていたのです。TGVの開発陣にすれば大変悔しいことだったに違いありません。一般には、出力の大きいほうが良い車両だと思う方も多いと思いますが、軽自動車のエンジンでスポーツカーに負けない外観と性能の車を作るのがどんなに大変かご想像されれば、ご理解頂けると思います。この優位性は2010年頃まで続きます。

しかし中国で日独原設計の高速鉄道車両CRH2とCRH3が北京～天津間を幾度も走行して、各種試験データの比較がなされた中で、走行抵抗の違いも明らかとされています¹⁰⁾。彼らは独自に風洞試験や空気力学シミュレーションを行い、JR東日本のE2ベースのCRH2に対して、20種類の先頭形状モデルから最適化を図ったCRH380A、ドイツのICE3ベースのCRH3の空気抵抗分析から同様に最適化したCRH380Bという高速鉄道車両を開発しました^{11)、12)、13)、14)}。これらの開発により日本の新幹線電車の走行抵抗の優位性はそれほどなくなってきました。またこれらの高速鉄道車両は中国において開発されましたが、ノウハウはシーメンスなどにも伝わっていると思われます。

4. 湧き出るような新技術のカオスをつかむ

4.1 エネルギー蓄積技術のイノベーション

1970年代からリアモーターカーのための蓄電池の開発などに直接・間接に関わってきた経験から、蓄電池の進歩は亀の歩みのようだと感じてきました。性能を確認する充放電試験には1年、2年とかかります。このような常識が2000年頃から大きく変化してきました。ハイブリッド車（トヨタのプリウス）や電気自動車（三菱自動車のi-MiEV）の登場で、日本の産業界や大学が広く蓄電池とその材料開発に大きな資金と情熱を傾けるようになってきたのです。開発にもナノテクノロジーが駆使される等、新しい手法も入ってきました¹⁵⁾。テスラモータのように汎用の小型蓄電池を直列・並列に多数組み合わせる逆転の発想も登場してきました¹⁶⁾。日本経済新聞にも新原理の電池や電極材料など何らかの蓄電池関連の記事が、毎月のように掲載されます¹⁷⁾。リチウムイオン電池の仕様でも、より安全性を高めるのか、より寿命を長くするのか、よりパワーをとるのかなど用途によって電極材料や電解液を選べるようになってきています¹⁸⁾。大量に生産されればリチウムイオン電池のコストが現状の半分になるなどということも、蓄電池メーカから話されるようになってきました。1回の充電で300km以上走行できる乗用車が200万円台で購入できる日が10年以内に来るでしょう¹⁹⁾。鉄道

でも標準化された大量生産品を導入できれば、将来まだまだ価格が下がります。これによりバッテリーポストや非電化線区対応の蓄電池車両の費用対効果が大変魅力的になってきて、非電化区間の列車の主流は経済面でも蓄電池搭載車両となりましょう。非電化対応車両の国内需要は、大都市圏の電車の需要からみると本当に微々たるものですが、世界全体では電化されていない鉄道が広がっています。ここに蓄電池搭載車両が投入されるなら巨大な鉄道車両マーケットとなります。

今採算がとれないからといって諦める必要はないのです。重要なのは蓄エネルギー技術の将来の発展を見据えて、世の中に将来の鉄道のニーズを発信し続けること、他社技術も取り込むオープンイノベーションの中で更に魅力的・画期的な蓄電池搭載車両を開発することです。

4.2 スマートグリッド、スマートシティ

これまでもさまざまな省エネルギー運転について語られてきました。標準的な運転方法もほぼ省エネルギーの観点からも望ましいものとなっています。列車の走行エネルギーは、従来の電車線電圧の変動限界のみならず、最近では電力回生ブレーキ能力や車上または地上の蓄電能力も加味されて検討されており、かなり複雑となってきました。

過去の検討では、車両と地上がオンラインで情報のやりとりをすることはあまり考えられてきませんでした。今日ではセンサや伝送の技術が発展し、コストをかけずに情報のやりとりが自動的にできるようになってきています。世間一般でもIoT（物のインターネット）が話題になってきており、それらを適用するための土壌が整ってきました²⁰⁾。鉄道会社の施設や車両は、鉄道会社で管理できるので、本来一般社会よりスマートメータやスマートグリッドのようなエネルギー管理がしやすいはずですが。電車線に沿って例えば1kmおきに電圧などのセンサをとりつけたとしたら？ 列車の運行電力と駅などの施設の電力を共通に管理したら？ 鉄道以外のユーザと連携できる可能性は？ いろいろ考えられます。

電車運行時の電力変動を吸収できるような外部負荷があるとエネルギーの高度な利用ができるようになりそうです。産業分野でも、電気を止めた企業にお金を支払い、企業間で電力のやりとりをするニュービジネスが出現して来ました²¹⁾。

4.3 複雑な鉄道ネットワークこそ標準化を

電力回生ブレーキ付き車両の導入のような直接的な省エネルギー効果のある、新規の事柄は少なくなってきており、列車の運行や地上設備との組合せで省エネルギー効果を引き出すことが求められています。これまでは各サブシステムはなるべく他と関係なく運用できましたが、今後各サブシステムはますます相互に依存を強め、相互の関係がこれまでになく重要となってきます。この場合、権限と責任の範囲を超えて、サブシステム同士が相互に良く見渡せることが鍵となります。このためにはサブシステムの標準化が決定的に重要です。

鉄道に限らず他分野でも、システムが大規模になればなるほど、標準化しないと、全貌を把握できなくなります。この複雑巨大システムの標準化は、日本人には常に苦手なようであり、手間のかかる標準化を軽視して個別最適化など他の事を優先しがちです。(反対に具体的な個別案件ほど日本人には対応しやすいようです。)

半導体メモリの例を取り上げますと、日本の半導体メーカは、過去にインテルに対して優位な競争力を誇っていました。窮地に陥っていたインテルはメモリ事業から撤退してCPU事業に集中する大決断を下します²²⁾。そしてメモリ事業を台湾メーカに譲渡して日本メーカと競争させ、日本メーカの体力を削ぎます。更に米国主導のシステム的な半導体製造の標準化とライバル(韓国、台湾のメーカ)の出現により、メモリが巨大化する過程で徐々に日本勢が劣勢となり、ついには製造プロセスの標準化の成果である最新の製造装置を日本メーカは不景気で直に取り入れることができず、韓国・台湾メーカに性能・価格競争で破れ、大きな打撃を受けて今日に至っています²³⁾。

複雑なシステムの標準化は、鉄道のように鉄道会社のみで可能な分野でこそ、日本で実績が作れ、しかもその恩恵を享受できるのではないのでしょうか。かつての列車座席予約システムが世界に先駆けてオンライン情報処理の先鞭をつけた様に、鉄道から産業のイノベーションを起こすことができるのではないのでしょうか²⁴⁾。そのためには座席予約システムでメーカと鉄道事業者の一体となった開発体制が作られたように、「革新的な仕組み」が必要です。

5. 鉄道をもっと社会に活かす

日本の鉄道は、省エネルギーなどの面で優位性のある発展を遂げてきました。自動車の代わりに鉄道を用いることができれば、ほぼその分の交通のエネルギー消費を減らすことができます。これはマクロの統計からは旅客輸送のみならず、貨物輸送にも当てはまります。また大気汚染についても、自動車よりはるかに環境に優しいといえます。

日本では自動車事故で毎年数千人が亡くなっていますが、それに比較すると鉄道事故の死亡者数はずっと少ないです。社会の安全の視点からも鉄道の普及は望ましいのです。

一方で鉄道には、移動の初めから終わりまでを鉄道のみで完結できない弱みがあります。鉄道をこれまで以上に利用して頂くには、乗りたくなるような仕掛けがまだまだほしいのです。快適に旅行できることはもとより、駅までアクセスしやすくすることや便数を増やすなど、地域社会とより密着して鉄道を利用しやすくすることが求められます。

鉄道自身はその優位性に磨きをかけると共に、この優位性を活かして交通機関の中で鉄道のシェアを高めること、そのために社会に働きかけることが、世界全体のエネルギー削減と環境保全に直接的に貢献することになるのです。

参考文献

- 1) 関志雄; 深刻化する中国環境問題(1)、
<http://www.rieti.go.jp/users/china-tr/jp/150513kaikaku.htm?stylesheet>
- 2) 在ハンブルク領事事務所; 北ドイツでの生活について、
4.自動車関係、
http://www.hamburg.emb-japan.go.jp/jp/leben_in_norddeutschland.html
- 3) 若江進; ストラスブール市の交通政策、
https://www.city.matsuyama.ehime.jp/shigikai/info/kaigaishisatsu.files/26_8.pdf
- 4) 資源エネルギー庁: エネルギー白書2011、第2部 1章国内エネルギー動向、pp.86-91
- 5) 国土交通省; 交通関係統計資料集、II-6 主要5か国における国別の主要交通統計
- 6) 国土交通省; 交通関係統計資料集、III-3-2 輸送機関別輸送量、エネルギー消費量及びエネルギー消費原単位の推移
- 7) 中国首相「改正環境保護法を厳格に執行」日本経済新聞HP、2015/3/15記事
- 8) 木村貴一他; 電気車用チョッパ制御装置、日立評論、Vol.60、No.7、pp.57-62(1978)
- 9) 渡邊朝紀; 300km/h級高速列車の車両性能、鉄道総研報告、Vol.11、No.4、pp.1-6(1997)
- 10) 張曙光; 高速列車設計方法研究、中国鉄道出版社(2009)
- 11) 杨国伟; 高速列車空気力学研究進展、高速列車科技创新国际论坛、北京(2012)
- 12) 渡邊朝紀; 新世代高速列車先頭形状設計技術、鉄道車両と技術、208号、pp.27-32(2013)
- 13) 王軍; CRH380A高速列車の技術イノベーション、鉄道車両と技術、195号、pp.24-33(2012)
- 14) 渡邊朝紀; 高速列車ICE3からCRH380Bまでの技術系譜、鉄道車両と技術、205号、pp.12-28(2013)
- 15) 本間格; ナノテクノロジーから大容量・高出力型リチウム電池の実用化へ、シンセシオロジー、Vol.1、No.4、pp.247-258(2008)
- 16) テスラ モデルSのバッテリーパックを分解!、
http://eco-power.jp/news_release/archives/82
- 17) 積水化学、走行距離3倍にする車用電池の新材料、
<http://bizgate.nikkei.co.jp/smartcity/kanren/201312061215.html>
- 18) 中満和弘; 蓄電池を活かす使い方、平成27年電気学会全国大会シンポジウムS26 鉄道のエネルギーを巡る動向(2015)
- 19) 電気自動車の価格が大幅に下がる、
http://www.gizmodo.jp/2015/04/post_16895.html
- 20) 営業車データ低価格解析、日本経済新聞、2015年1月10日朝刊
- 21) 工場の電力コスト1割減、日本経済新聞、2015年6月25日朝刊
- 22) インテルを危機から救ったグローブの一言、日経BizGate、
<http://bizgate.nikkei.co.jp/article/87620719.html>
- 23) 立本博文; 半導体における国際標準化戦略、東京大学ものづくり経営研究センター MMRC Discussion Paper No. 222
- 24) 喜多千草; 模倣から創造へ: 国鉄座席予約システムMARS-1における技術革新、特定領域研究「日本の技術革新—経験蓄積と知識基盤化—」第3回国際シンポジウム(2007)