

はじめに

日本の鉄道技術は世界一などとよくいわれるが、多くの要素から成り立つ鉄道のすべての側面において日本が優秀というわけではない。しかし、日本の旅客鉄道のエネルギー面での効率性は、国際比較すれば群を抜いて高いレベルにあると考えられる。日本の鉄道の電化率は必ずしも高いわけではないが、それでも輸送需要のほとんどは電気鉄道によって運ばれているから、日本の鉄道のエネルギー効率の高さは日本の電気鉄道の効率性とほぼ同義である。

その高いエネルギー効率だが、日本では先進国では例外的といえるほど輸送需要が大きいこと（それは場合によつては「詰め込み輸送」といった好ましくない「効率性」に帰結する）や、新幹線以外の鉄道の速度が先進国のなかでは低めであることなど、本質的とはいえない要素による部分も無視はできない。しかし、基本的には長年の研究開発や導入投資の蓄積の結果、電車の効率化が進んだ成果であると考えてよい。

日本の通勤鉄道の効率性

その電車の効率性は、新幹線のような時速300km近い速度で走行する高速列車と時速100km前後の速度で走

行する通勤鉄道の列車とは様相が異なるが、後者についていえば「車両の軽量化」と「パワーエレクトロニクスの多用」の2点によって説明できそうである。

■車両の軽量化

車両が軽ければ、加速時に要するエネルギーが少なくなるから、省エネルギー化に寄与するのは自明であろう。通勤列車のように発進・停止を繰り返す回数が多い場合は特に効果が大きい。その軽量化の実現のためには、車体（構体）の材料や構造などの見直し、台車の軽量化、その他搭載機器等の見直しなどが行われる。

日本では、車体についてはアルミ合金やステンレス合金を使用したものが1960年代からみられるようになり、近年はほぼすべての新造車両がこれらのいずれかを使用して製造されている。アルミ合金は普通鋼（炭素鋼）に比べて軽量であるが、アルミニウム自体が高価であるため、コスト削減のための技術開発が進められてきた。一方、ステンレス合金はアルミ合金に比べれば安価であるが、重量が重くなる欠点があり、構造の見直しによる軽量化が進められてきた。現在ではアルミ車体・ステンレス車体とも軽量化の観点からは似たような水準に達しているといえ、各社各様の考え方で導入が行われている。

鉄道の未来学 36

基調報告

日本の電気鉄道は、エネルギーの効率化を目指し、長年にわたり、切磋琢磨してきた。しかし、今なお着手すべき課題は残る。さらなる省エネルギー化の可能性は大きく広がっている。

電気鉄道の省エネルギー化

工学院大学工学部電気システム工学科 准教授

高木 亮

Ryo TAKAGI

東京大学工学部電気工学科卒業、東京大学大学院工学系研究科修士課程、博士課程修了。2006年より現職。専門は電気工学・電気機器工学、システム工学、交通工学・国土計画。日本鉄道電気技術協会、日本鉄道技術協会、電気学会所属。

台車は、輪軸（車軸と車輪）やバネなどを搭載し、車両重量のかかりの割合を占める。空気バネの開発と普及、ボルスタレス台車の開発などが1980年代までに行われ、1960年代に用いられていた台車と比べ、かなりの軽量化がその時点までに達成されたが、その後は現在まで軽量化という観点から目立った進展はみられていない。

その他搭載機器のうち、駆動用電動機やその制御装置については、従来の直流電動機から交流電動機への世代交代が急速に進んでいる。交流電動機は1980年代以降、後述のパワーエレクトロニクス技術（インバータ制御）の進展により鉄道車両での実用が可能となったものであり、直流電動機に比べ出力当たりの重量がはるかに軽い。同時に、電動機だけではなく制御装置の軽量化も進んでいる。また、制御方式の改良により、従来よりも電動機数を減らし、列車の性能（加速度・減速度）を維持することができるようになり、電動機を減らすことによる軽量化も進められている。

一方、かつて車両冷房化で車両重量が大幅に（1両当たり2t程度も）増加したことがあった。現在も旅客サービスや安全性などをさらに向上させるために搭載機器が増える傾向にあり、それらの重量も当然ながら増加傾向にあることには注意が必要であろう。



西武新宿線 新井薬師前駅-沼袋駅間で中野通りを超える20000系（撮影／織本知之）

■パワーエレクトロニクスの多用と電力回生ブレーキ

パワーエレクトロニクスとは、半導体で作られた高速なスイッチにより電力を自在に変換・制御する技術のことである。日本の鉄道業界は、パワーエレクトロニクスの導入について古くから積極的であり、1960年代のチョップパ制御電車の開発や1970〜80年代のインバータ制御電車の開発などを通じ、日本のパワーエレクトロニクス技術を世界最高水準に高める牽引役ともなった。

パワーエレクトロニクス導入以前、車両の電動機の制御は多数の抵抗器とスイッチにより行われてきた（抵抗制御と呼ばれる）。抵抗制御において、抵抗器は損失を生じ効率を下げる要因となる。パワーエレクトロニクスの普及によりこの損失がなくなり、多くの場面で加速時の効率が向上した。

また、減速時に電動機を利用して運動エネルギーを電気エネルギーに変換し、再利用する「電力回生ブレーキ」も、より広範囲に普及した。電力回生ブレーキ自体はパワーエレクトロニクス登場以前から存在し、積極的に活用する鉄道会社もないわけではなかったが、幅広く普及するようなものにはならなかった。1970年頃を境にパワーエレクトロニクスが応用されるようになり、こうした技術がより使いやすくなった。電力回生の効果を

表す指標である回生率（加速時に列車が取り込んだエネルギー）に対する「ブレーキ時に回生したエネルギーの比率」も、技術開発の進展につれ高まってきており、当初は10〜20%程度がふつうの数字であったものが、現在は40%以上といった数字も珍しくなくなってきた。

近い将来の省エネルギー化の展望

では、鉄道の省エネルギー化は当面どのように進むだろうか。

■古い車両の淘汰

鉄道会社が保有する車両は最新のものばかりではなく、20〜30年前のものも多数保有する会社は少なくない。近年は、こうした古い車両の置き換えに積極的な会社が増えており、置き換えられない場合でも機器をより性能の高いものに置き換える改造工事が行われるケースがかなりあるから、これら古い車両や機器の淘汰により省エネルギー化が進む余地がまだある。

■より省エネルギー化された車両の開発

一方、いつその省エネルギー化を目指した技術開発も盛んに行われている。例えば、電動機や制御装置の効率を上げる余地はまだ残っており、これだけで10%程度の高効率化が実現する

かもしれない。また、従来よりも高速な制御が可能なパワーエレクトロニクス機器の導入に伴い、電力回生を行う際に車両の電圧を限度に近いところまで高めることにより、電力回生能力を高めることも行われている。さらに、軽量化とは逆行する可能性もあるが、より多くの電動機を用い、通常は電力回生ブレーキのみを用いて停車させることにし、機械ブレーキ（ブレーキシューを車輪に押しつけるなどして列車を止めるタイプのブレーキのこと）で、摩擦により消耗する部品の取り替え等が必要）の使用を最小限として回生率を極限まで高める「純電気ブレーキ」の実現に向けた開発も進んでいる。

■回生失効問題とエネルギー蓄積（蓄電）装置

だが、このように車両の性能向上に依存するだけでは限度があることも分かっている。

直流電気鉄道は日本に限らず都市鉄道の大部分を占めるが、ここで使用する電力は通常電力会社から供給された三相交流電力を変電所で直流に変換して用いている。この交流直流変換には、ふつうシリコンダイオードを用いた「シリコン整流器」が用いられる。シリコン整流器は交流から直流への電力変換は可能でもその逆はできないので、電力回生ブレーキにより電車から

回生された電力は電力会社側に戻すことができず、近隣にいる他の電車が消費してやるしかない。しかし、電車の数が少ないから、必ず他の電車が消費してくれる保証はない。回生電力を消費してくれるものがまったく存在しなければ、電力回生ブレーキが「かからない」という状況が発生する。これを「回生失効」と称している。

回生失効が頻発する路線では、せっかく高い電力回生能力をもつ車両を開発しても、その能力を生かすことができなくなる。実際、筆者もある都市近郊鉄道において走行試験を見学したことがあるが、条件によっては45%程度の回生率を実現可能なシステムを搭載した車両であるにもかかわらず、見学当日の走行試験では35%程度の回生率しか得られていなかった。回生率45%が実現していれば、加速時に列車が消費したエネルギーを100としたとき、45が再利用されるため、正味のエネルギー消費は55にとどまるが、35%（これも決して低い値ではないのだが）では正味のエネルギー消費は65に増大する。エネルギーの増加分は、当然ながら電力会社に支払う料金の増大という形でコスト増加を招くが、それだけではなく機械ブレーキの使用頻度も増加し、ブレーキシューなどの取り替え費用の増加という形で別なコスト増加も招き、「二重に損」であることが分かっている。

回生失効を防ぐ方法として、変換装置の追設などによって変電所で電力の逆流（直流から交流へ）を可能にすることや、電力回生ブレーキをかけている列車がより遠くの列車に回生電力を送り届けることができるように変電所の電圧を抑制したり、回路の抵抗値を下げたりするといった対策がこれまでとられてきた。しかし、電車の改良で電力回生能力も上がり、より多くの回生電力が発生する可能性が出てきたとき、こうした従来の対策だけでは不十分になる可能性が高い。

こうした背景に加え、電気自動車への応用などの目的のために2次電池（蓄電池）などの技術開発が急進してきたことから、近年はエネルギー蓄積（蓄電）技術への関心が急速に高まりつつある。蓄電装置を変電所に設置、あるいは車載して、回生失効が起きそうな場合には蓄電池が充電を行い、多くのエネルギーが必要とされるときまで蓄えておくことなどにより、いつその省エネルギー化がはかれる可能性が出てきた。

実は、エネルギー蓄積装置の利用についても日本の鉄道業界では1980年代から取り組みが行われている。しかし、当時に比べると現在は蓄積媒体の技術が大きく進歩し、使い勝手もよく、効率の高いものが得られるようになった。まだ高価な技術ではあるが、自動車向けの量産が進めば価格も低下

すると見られており、将来性は高いと考えられている。

■その他の可能性と課題

こうしたこと以外に、鉄道版エコドライブとでもいうべき技術（運転の方法を変更することで、所要時間が同一であってもより少ないエネルギーで走行できるようにする）などの研究開発も進みつつある。

一方、車両や台車の軽量化については1990年代までに急進したが、その後は、あまりに軽量化された車体は乗り心地に悪影響を及ぼすとか、多少の重量増があっても電動機を増やして回生率を高める方が省エネルギー化につながるといった知見が得られたことに加え、乗客が死亡するような重大事故において指摘された車体の衝突安全性不足の対策の結果、重量が増えたケースが多いことから、近年あまり進展がみられていない。しかし、航空機の効率向上に寄与した炭素繊維のような新材料による画期的な軽量化の可能性もまだ残っており、今後のエネルギー価格の動向などによってはそのような技術の採用もあり得るかもしれない。

なお、大きな課題として、列車の運行以外の部分（主に駅）での省エネルギー化が急務となっていることを指摘しておきたい。近年は、エスカレーター・エレベーター等のバリアフリー

対応設備の設置が増えたことなどから、駅での消費エネルギーが増えており、列車運行のために必要なエネルギーが減少傾向にある一方で、これら「高圧配電負荷」が増加傾向にある。

地下鉄では、地下の駅やトンネルの照明・換気等が必要なため、かなり前から高圧配電負荷の電力量が列車運転のそれを上回っているケースが多いし、地下鉄ではない鉄道会社でも相当な割合に上っているケースが多く見られるようだ。これら機器個別の省エネルギー化が必要であることはもちろん、例えば橋上駅舎のように階段の上り下りが多い駅構造はできるだけ避けるなど「こうした機器に過剰に依存しないでもすむようサービス内容自体を見直す」ことも必要ではないだろうか。

おわりに

ご存じの通り、大学では最終年度に「卒業論文」と称して最先端の研究に取り組んでもらうことになっている。筆者の研究室で取り組まれる研究のテーマは電気鉄道関連のものばかりだが、こうした電気鉄道の省エネルギー化に関するテーマは人気が高く、また興味深い成果がたくさん得られる分野である。例えば、蓄電池を電気鉄道において利用すると一口にいつても、その効果的な配置や制御方法などについ

て実にさまざまな提案が可能であり、鉄道業界や関連メーカーの方々だけではなくわれわれも活発な研究活動を研究室で行っている。

機器や車両の効率化だけではなく、[※]饋電システムの最適化、鉄道版エコドライブ、そして運行計画・運行管理システムと電力供給などエネルギー関連のシステムとの一体化によるいつその省エネルギー化など、研究者が抱く夢は大きく広がっていく。最終的には、いわゆる出改札システムなども取り込み、鉄道サービスの姿自体を大きく変革させていくなかで、省エネルギー化をとらえ直すことが求められることになるだろう。

こうした技術は日本の鉄道の明らか「強み」であるが、今後もそれを維持・発展し、世界に貢献していくためには、強力な技術開発の体制づくりが欠かせない。もともと、本稿で紹介した技術に限らず、日本が誇る鉄道要素技術のなかには、数多く存在する民鉄会社のいくつかが積極的に開発・採用してきたものが全国的に広まる、といった経緯をたどったものが多い。数多くの試行錯誤を経ることなしにいいものではないわけで、一見無駄にも見える技術開発活動にもある程度のカネと時間がかけられるような体制を、われわれ大学人のような者も含め、国を挙げて維持していくことも、重要な課題である。

※饋電システム：鉄道変電所から供給された電力を電車に伝える電線路設備