

鉄道のエネルギー技術

Energetics in Railway Transportation

野末尚次*

Naotugu Nozue

1. はじめに

鉄道は、初期の鉄道馬車の時代から、(1)専用の軌道、(2)バッチ的な大単位輸送、(3)高速輸送という特長により発達してきた。これにより安価で高速な輸送を実現してきたが、便利な個別輸送が可能な自動車の普及・高速の航空網の発達により厳しい競争下におかれている。

鉄道が今後とも発展してゆくためには、新しい駆動方式による速度向上が不可欠である。しかし、高速化によるエネルギー消費は非常に大きくなる——新幹線の動力費は運営費の8%——ため、省エネルギーによる運賃の低廉化が重要となる。

現状に於ても、新幹線の高速化、MAGLEV等の各種のプロジェクトが進められているが、これらに於ても省エネルギー性は重要な因子である。

本稿では、この様な観点から鉄道のエネルギー消費とその改良技術という面を電気鉄道を中心に述べる。

2. 鉄道とエネルギー

鉄道の運営に於て消費されるエネルギーの発生源を分類すると、次の4項目に大別される。

(1)列車の走行によるエネルギー：列車が一定の速度 v で走行するために必要なエネルギーで、回収可能な力学的エネルギーと回収不能な熱エネルギーに分類される。

- a) 力学エネルギー
 - ・列車の運動エネルギー
 - ・列車の位置エネルギー
- b) 熱エネルギー
 - ・空気抵抗によるエネルギーロス
 - ・軸受け等の摩擦によるエネルギーロス
 - ・線路と車輪の接触によるエネルギーロス

(2)電気から機械エネルギーへの変換ロス：指定された速度に制御するために、電気エネルギーを機械エネルギーへ変換する際に生ずるエネルギーロス。

- a) モータ制御系のエネルギーロス
- b) モータのエネルギーロス

(3)列車への電力供給系のエネルギーロス：発電所から変電所で受電し、これを変電所で電圧を変えたり、交流から直流に変換した後、き電回路により電車に電力が送られる間に発生するエネルギーロス。

- a) 受電系統のエネルギーロス
- b) 変電所・電力変換装置のエネルギーロス
- c) き電回路のエネルギーロス

(4)設備・運用・旅客サービスのエネルギー消費：駅や車両の接客設備の照明・空調・運転のエネルギーは、鉄道の形態により特長のある消費パターンがある。例えば、札幌地下鉄では、電力費の40%を駅舎等を維持するために使用しており、上越新幹線では消雪のために多くの経費が払われている。また、列車の運行がスムーズに行かない場合には、頻繁な加減速によるエネルギーロスが発生する。

次節以降で、これらの中から鉄道に固有な問題を取り上げ解説する。

3. 列車の走行エネルギー

3.1 力学エネルギー

質量 m の列車が停止状態から速度 v に加速するためには $mv^2/2$ の加速エネルギーを供給する必要がある。また高さ h に登坂するためには、 mgh の仕車を重力に抗して行う必要がある。

しかし、この獲得したエネルギーは、列車の駅への停車・下り坂の減速のためのブレーキにより熱エネルギーとして散逸してしまう。

鉄道のブレーキ・システムは、摩擦力による空気ブレーキと発電による電気ブレーキがある。前者は、車輪に制輪子を押し着けて制動するため低速域で使用さ

* 財団法人鉄道総合技術研究所 野末研究室・室長
〒185 国分寺市光町 2-8-38

れる。後者は、高速域で使用されるが、その原理を簡単に説明する。

従来の車両は、列車の速度制御を抵抗器を用いて行っている(図-1のA)。電気ブレーキとして利用する際には、図-1のBの回路に構成して、モータを発電機として利用し、抵抗器を負荷とすることにより車輪の回転に制動力を与えている。従って、運動エネルギーは、抵抗器から熱エネルギーとして放散される。

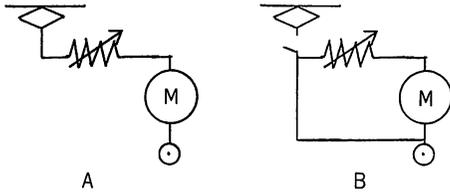


図-1 鉄道の電動機(力行と回生)

このエネルギーロスは、列車の停車回数が多い程大きくなる。例えば、東海道新幹線の0系のひかりの1000t・km当りの消費電力は39kwhに対して、山手線の103系電車の同じ条件の消費電力は56kwhである²⁾。それ故、力学的エネルギーの削減が重要であることが分る。

このエネルギーの最も直接的な削減案は、車両質量を減らすことであり、ほぼ質量に比例した省エネが可能となる。

しかし、車両の質量を議論するためには、全重量に占める有効荷重の比率が重要である。この面では、日本でも2階建て車両が導入されているが、貨物輸送の盛んな米国では、トラックとの厳しい競争に勝つために、コンテナの2段階積み貨車が採用されており、1段階の約60%のコストで輸送が可能となっている³⁾。

以上の方策は、散逸するエネルギーの発生を抑えるという立場であるが、力学的エネルギーは容易に変換出来るので、これを回収する方向での開発が行われた。

まず、運動エネルギーと位置エネルギーの交換を利用して、図-2に示すように、下りこう配を利用して出発時の加速を行い、停車時には上りこう配により運動エネルギーを位置エネルギーとして蓄える重力鉄道の



図-2 重力鉄道

アイデアである。これは、鉄道路線の計画者により取り入れられている。

次に、電気ブレーキが発電ブレーキとして作用していることを利用して、この発生電力を抵抗器で消費せずに変電所に戻して他の電車の加速に利用するという回生ブレーキのアイデアがある。

この方式の例としては、山手線の205系電車があり、約25%の電力消費量が節減されている²⁾。回生ブレーキについては、4.2で述べる。

3.2 熱エネルギー⁴⁾

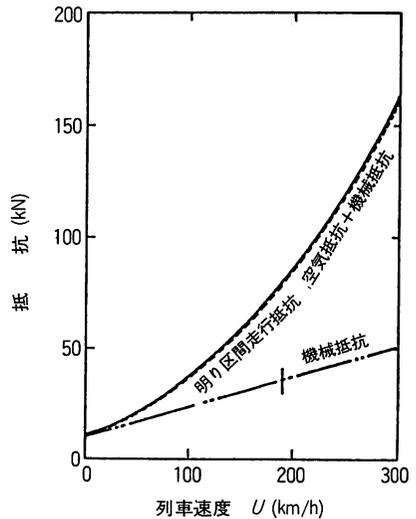
列車の走行に伴い不可避免的に発生する散逸エネルギーは、次の形で走行抵抗として集約されている。

$$\text{走行抵抗} = \text{機械抵抗} + \text{空気抵抗}$$

走行抵抗の新幹線での実測値を図-3に示す。この中で機械抵抗は、軸受け、レールとの相互作用に伴う抗力であり、次の式が一般に成立する。

$$\text{機械抵抗} = (a + bv) m$$

これに対しても車両質量mの軽量化が有効である。また、レールとの相互作用では、バラスト軌道よりは、固いスラブ軌道の方が機械抵抗は小さい。



(0系, 16両, 869t)

図-3 走行抵抗⁴⁾

空気抵抗は、車両の前頭部と後尾部に働く圧力抵抗と、列車側面に働く摩擦抵抗に分けられ、次の理論式が導びかれている。

$$\begin{aligned} \text{空気抵抗 (D)} &= \text{圧力抵抗} + \text{摩擦抵抗} \\ D &= 0.5 \rho A v^2 \{ (C_{\text{前}} + R) (1 - R) \\ &\quad + R^2 \lambda l / d + \lambda' l / d' \} / (1 - R)^3 \end{aligned}$$

但し、 ρ : 空気密度、 A : 列車断面積、 v : 速度、 C_{dp} : 圧力係数、 λ' 、 λ : 列車とトンネル側面の摩擦係数、 d' 、 d : 列車とトンネルの水力直径、 l : 列車長、 R : 列車断面積/トンネル断面積

上式で $R=0$ がトンネル外の明り区間に相当する。200系新幹線の場合には、250km/hでトンネル内を走行する場合には、明り区間の1.6倍の電力消費量となる。

従って、高速の列車を走らせるためには、空気抵抗の減少が非常に重要である。

全体としては、車両の断面積を減らすことが有効であり、300系新幹線では縮小した断面が採用されている。

圧力抵抗を減少させるために先頭部形状模型による風洞実験が行われ、100系では先頭部延伸により C_{dp} が25%減少している。側面の摩擦抵抗を減らすために、床下機器のボディーマウント化等の対策が行われ効果を上げている。ドイツの風洞実験の結果では、徹底した空力対策を施すことにより、約50%の空力抵抗の削減が可能であることを示しているが、1990年5月のフランスTGVによる515.3km/hの達成に於ても空力抵抗の10%削減を目的とした改良が行われている⁹⁾。

以上の様に、高速列車に対しては空気抵抗の削減が非常に重要なエネルギー問題となっている。

4. 電気から機械エネルギーへの変換

鉄道に利用されるモータは、基本的には通常の電動力用モータと同様であるが、小型軽量であること、速度制御が容易であること、起動時に大きな引張力が得られること等による制約がある。

鉄道の電気車は、上記の点から、直流区間はもとより、交流区間でも車両に整流器を積んで直流直巻電動機が使用されて来た。しかし、最近の電力用半導体の進歩に伴い、同期電動機や誘導電動機等の交流モータが主流となりつつある。

4.1 モータ制御系¹⁾

直流直巻電動機では、電動機の端子電圧を図-1-Aの構成で変化させることにより行っている。しかし、この方式では、抵抗によるエネルギーのロスが大きいので、図-4に示すサイリスタにより主回路電流を高速でスイッチングを行い無損失で端子電圧を変えるチョップ制御が導入された。

交流電車の場合には、電圧制御は変圧器のタップ切替えにより容易に出来るため、タップ切替制御が導入

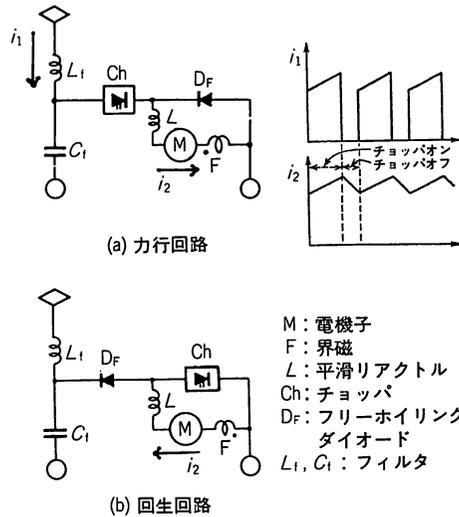


図-4 チョップ制御¹⁰⁾

された。その後、サイリスタの位相制御によりチョップ制御と類似の方法で電圧を連続的に制御すると同時に整流も行う位相制御方式——従来の新幹線はこの方式——が使用された。

さらに最近では、大容量のGTOサイリスタを利用したインバータ装置によって交流電動機を直接動かすことにより、主電動機の重量当りの出力が大幅に上昇するとともに、電動機のブラシ・整流子が不要となるため保守の面でも非常に有利な方式が開発された(図-5参照)。フランスのTGV大西洋線では同期型電動機であり、ドイツのICEは誘導電動機であり、日本の300系は後者でPWM方式を採用する⁹⁾。

これらの方式では、電力の回生が容易に行える。

4.2 回生ブレーキ¹⁾

電力用半導体を制御に用いることにより、電力の回生が可能となるが、チョップ制御を例にして動作原理を述べる。

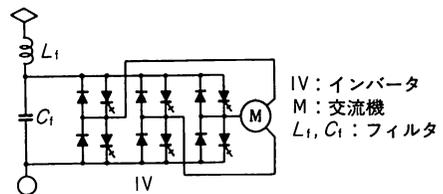


図-5 インバータ制御¹⁰⁾

図-4-bに示す回路が構成されているとし、中央部のチョップが閉じている状態を考える。この時チョップにより短絡された回路にはMの発電による電流 i_2 が

流れ、L（平滑リアクトル）にエネルギーが蓄積される。次にチョップが開放されるとLは持続して電流を流そうとするために上端が正、下端が負の極性の電圧を生ずる。この誘起電圧と発電電圧によって電車線の電圧に逆らって電源に電流を流し込み回生が行われる。時間とともにLの誘起電圧が減少し、電車線側に帰る電流が減少するため、適当な段階で再度チョップを閉にして動作を繰り返す。

なお、電源側に戻した回生電力を吸収するのに十分な負荷——近くで加速中の列車——が存在しない場合には電車線電圧が異常に上昇するため、ある規定値を越えるとブレーキ電流を減らして電圧の上昇を防いでいる。この場合には、回生ブレーキ力が不足するため、空気ブレーキで不足分を補う指令が出される。

回生用の負荷としては、力行中の他の列車の外に、変電所に回生用の負荷を置く実験もされている(5.3参照)。

5. 電力供給系

JRの場合には、約25%を自営電力、残りを電力会社からの購入電力によっている。この電力を変電所で受電し、電圧を下げ、直流区間では整流して、電車用電力に変換する。これは、変電所、電車線路、電気車、レール、変電所というルートで流れる。この回路全体をき電回路と呼ぶ。

JRの場合には、直流き電方式（首都圏、中部、西日本、四国）と交流き電方式（北海道、東北、北陸、九州、新幹線）が採用されている。

5.1 直流き電方式

直流き電方式の場合には、電圧が1500Vと低いため、き電々流が大きく、き電損失が4～15%程度になっている。このため、変電所間隔を短くしたり、変電所相互を接続する等の改良が行われている。

また、外国では3000Vのき電も行われており、き電々圧の上昇や定電圧き電方式等の検討も行われている。

5.2 交流き電方式

この方式では、き電々圧は30kVの高圧で送電するため、き電損失は少ない。しかし、交流がレールを通して帰還するため、レールから大地へ漏れた電流により付近の通信線に障害を発生する。これを防ぐために、電流がレールを流れる区間を短くする工夫がなされている。

当初は、吸上変圧器（BT）き電方式が採用されたが、最近では図-6に示す単巻変圧器（AT）き電方式

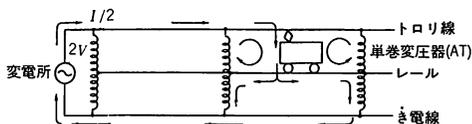


図-6 ATき電方式⁷⁾

が利用されている。後者は、変圧器設置箇所にセクションがなく構成が簡単、変電所のき電々圧を2倍に出来るため変電所間隔を長く出来るなどのメリットがある。

5.3 変電所での電力回生

回生可能な車両が導入されても、回生している車両の近くに力行状態の車両がいなければ、回生車両のブレーキは失効してしまう。

これを防ぐために変電所に負荷を置く方式が実験されている。

- (1)変電所にインバータを設置して電源側へ戻す
- (2)変電所にフライホイールを設置して電力を蓄積

上記の(1)の方式は、現行の制度下では電力会社に電力を戻しても電力料金の返却とはならないため現状では未だメリットが少ない。(2)の方式は、京浜急行で図-7のシステムの実験が行われているが蓄積容量は15kWhであり未だ少ない。

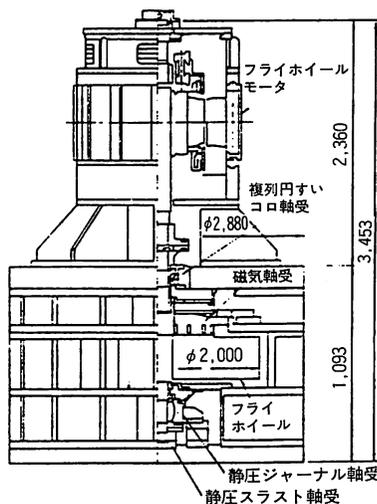


図-7 フライホイール蓄勢器⁸⁾

なお、交流き電区間に回生車を導入した場合には、同一き電線に同時に回生車と力行車が存在すると、回生電力は伝達されるが、全体としての力率が下がる。現行の電力会社との契約では、力率が85%より1%向上する毎に基本料金の1%が割引かれる

ことになっている。従って、系全体としての力率の改善も重要である⁷⁾。

6. 設備・運用・サービス

鉄道の設備の保全や旅客サービスのためにも多くのエネルギーが消費されている。大部分のものは、通常のオフィスや工場と同様な問題なので、手近にある例を述べる。

6.1 熱エネルギーの有効利用

地下鉄のトンネルや駅は、車両や人体による熱の放散、換気のために非常に多くの電力を費している。例えば、札幌地下鉄では全電力量の40%をこの様な駅舎等を維持するために利用している。そこで同社等は、この廃熱を積極的に利用することにして、札幌駅北口の再開発地区に札幌エネルギー公社を設立し、このシステムで地域へ熱供給を行っている。ここでは、地下鉄の廃熱で全体の25%を負担している⁹⁾。

この外にも、夏期の太陽エネルギーによる地下帯水層の蓄熱を利用した消雪システムも利用されている¹⁰⁾。

6.2 運行制御による省エネルギー¹¹⁾

車両の運転の仕方によっては、消費されるエネルギーが大幅に異なるため、最小エネルギーによる運転方式の研究や、ファジー予測制御により省エネルギー運転を実現した仙台地下鉄の例などがあるが、利用客の需要に合った列車を運転することが最も重要である。

省エネルギーという面からの検討が今後の課題である。

7. 磁気浮上関連システム¹⁾

従来の鉄道より一層の高速化を目指して磁石を利用した各種のシステムが開発されている。ここでは、浮上、推進方式により分類して解説を行う。

7.1 浮上方式

現在迄に実験・実用化が行われた浮上方式には、次の3種類がある。

(a) 誘導反発浮上：車上に超電導等による強力な磁石、地上に短絡した固定コイルを設置し、車上磁石の移動によりコイルに発生する誘導電流により生成される電磁石との反発により浮上する方式

(b) 通電反発浮上：地上の一定高さに設置されたケーブルに直流電流を流し、これと車上の電磁石との間にフレミングの左手の法則により発生する反発力により浮上する方式

(c) 磁気吸引浮上：地上の一定の高さに設置された鉄の走行路を電磁石で吸引しながら浮上する方式

これらの3方式のうち、反発方式は制御が不要だが吸引方式はギャップの制御が必要である。

7.2 推進方式

推進方式は、浮上システムのため粘着駆動が出来ないことからリニア・モータが採用されている。

(A) リニア・インダクション・モータ (LIM)
誘導形モータを展開したものであり、車上のコイルに供給される三相交流により発生される磁界と地上のリアクション・プレートに誘起される渦電流との相互作用

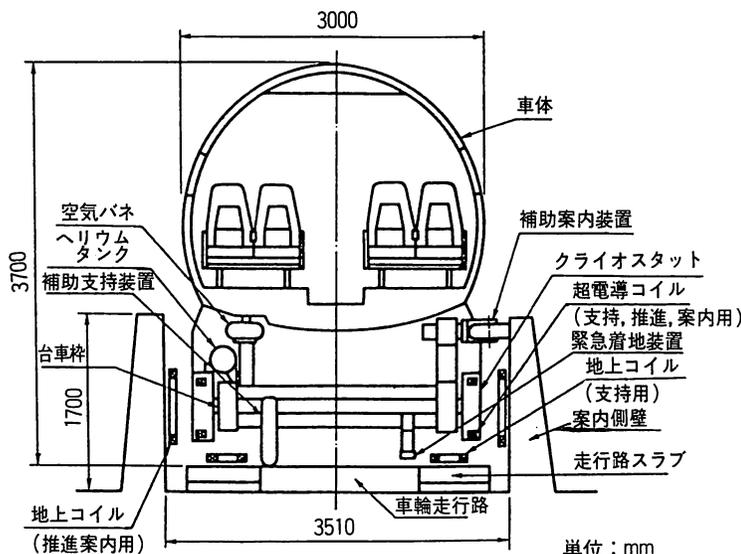


図-8 ML002とガイドウェイの断面構成¹²⁾

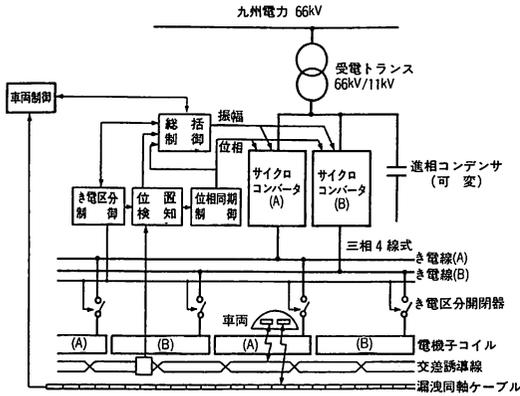


図-9 宮崎実験の電力供給システム¹²⁾

用により推進

(B) リニア・シンクロナス・モータ (LSM)

同期形モータを展開したものであり、地上コイルに三相交流電流により発生される移動磁界と車上の電磁石との相互作用により推進

(C) リニア・サイリスタ・モータ (LTM)

直流形モータを展開したものであり、地上に設置されたコイルに断続的に流れる直流電流と車上の電磁石との相互作用により推進

これらの方式のうち、(A) は誘導型であるため、車上磁石と地上のリアクション・プレートの間隔を10～15mm程度に保つ必要がある。

7.3 組み合わせ

上記の浮上を推進方式を組み合わせることにより、次のシステムが実験された。

- (1) JR総研・超電導磁気浮上システム : aB
- (2) "・直流リニア浮上システム : bC
- (3) ドイツ・トランスラピッド : cB
- (4) 日本航空・HSST : cA

これらのシステムの詳細は述べないが、(1) システムの概観とシステム特性を図-8～10に示す。

また、JRの超電導システムの場合には、極低温技術が種々開発されているが、ここでは割愛する。

8. おわりに

鉄道のエネルギー技術の中から、電気鉄道を中心と

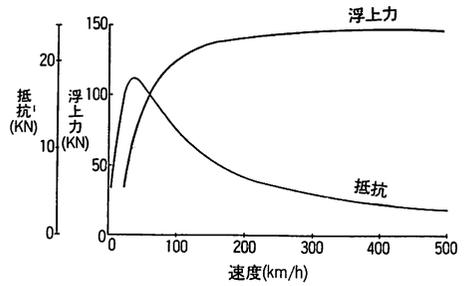


図-10 浮上力と磁気抵抗の速度特性¹³⁾

した技術、及び、直接エネルギーの変換には関与しないが重要と思われる事項について解説した。

何分にも内容が多岐に渉るため表面的となったことをお許しいただきたい。

参考文献

- 1) 丸山弘志, 片岡軌夫編: 鉄道電気工学 (1981), 丸善
- 2) 望月 旭: 鉄道車両の軽量化の効果と考え方, 車両技術, 182号 (1988), 1～9
- 3) 野末尚次: 外国のレール/ロード協同一貫輸送, 鉄道技術, 42巻, 8号 (1985), 300～301
- 4) 前田達夫: 新幹線電車 (0系, 200系, 100系) の空気抵抗, 鉄道総研報告, 1巻, 3号 (1987), 17～28
- 5) 前田達夫: 空気力学的に見た車両形状, RRR, 4巻, 11号 (1990), 27～28, 鉄道総合技術研究所.
- 6) 秦 広: ヨーロッパのパワーエレクトロニクス, 車両と機械, 4巻, 5号 (1990), 47～50
- 7) 伊藤二郎, 持永芳文: 電気車へ電力を供給する, RRR, 3巻, 8号 (1989), 17～22
- 8) 横山高和: フライホイール式電車線電力蓄勢装置の概要, 電気鉄道, 36巻12号 (1982) 12～15
- 9) 山田繁晴: 地下鉄の廃熱利用による地域熱供給車業, 車両と機械, 3巻, 9号 (1989) 56～59
- 10) 沢瀬和久, 小島 徹: 屋根流下式太陽熱集熱の特性, 鉄道総研報告, 3巻, 5号 (1989), 39～46
- 11) 保川 忍, 佐藤光一: 新幹線電車の省エネルギー運転方式, 鉄道総研報告, 3巻, 7号 (1989), 48～57
- 12) 藤江尙治, 他: マグレブの技術動向, RRR, 3巻, 1号 (1989), 46～51
- 13) 特集: リニアモーターカー・マグレブの世界, RRR, 1巻, 11号 (1987), 10～10
- 14) 電気学会編: 電気工学ハンドブック, オーム社 (1990), 969-969