

# 鉄道車両における省エネルギーおよび節電技術の動向の今後の方向性

千葉大学大学院 工学研究科 人工システム科学専攻 電気電子系コース 准教授

近藤圭一郎

## 1. 調査研究の目的

鉄道は他の交通機関に比べエネルギー効率が高いと言われているが、一方で改善の余地もあると考えられる。鉄道が交通機関としてその強みを発揮しつづけるためには、さらなる消費エネルギー低減の努力が重要である。一方、昨今の電力事情の変化による節電の要請が社会的に強くなっている。もともとピーク電力の大きい電気鉄道は、節電の効果も必要性も高い。以上の情勢を背景に、本調査では現在の電気鉄道車両における省エネルギーおよび節電の技術を体系的に調査する。その上で、今後さらに伸ばす技術や新たに発展を図る技術について考察を行う。これらの調査研究を通じて鉄道の交通機関として競争力強化に資することを目的とする。

## 2. 現在の省エネルギー技術

### 2.1 車両の運転方法の改善

ある平坦で速度制限のない2駅間を定められた時間で列車を運転する際に、もっとも省エネルギーな運転方法は一般に、最大力行→(定速走行→)だ行→最大制動である<sup>(1)</sup>。また、計画の時点から、運転時間をエネルギー消費のトレードオフ量として考えると、運転時分の延伸による消費エネルギー効果への感度は、極めて高いと言える<sup>(2)</sup>。さらに運転時間の延伸は加速度の低減を伴うので、節電にも効果的である<sup>(3)(4)</sup>。

しかし、実際の運転に際しては、時刻を守ることに主眼が置かれ、省エネルギーや電力のピークカットまでは考慮されていないのが実態である。

### 2.2 回生電力の有効活用

#### 2.2.1 回生ブレーキに関連した課題

回生ブレーキによる運動エネルギーの回収は電気鉄道固有の利点である。しかし、回生ブレーキの有効活用にあたっては一般に以下のような課題がある。一つは回生負荷の不足である。これは直流電気鉄道では変電所にダイオード整流器を用いるため、回生車の近傍に力行車が在線しない場合に十分な回生電力が吸収されないことに起因する<sup>(5)</sup>。もう一つは回生電力がすべて吸収される場合には、ピーク電力の増加が課題となる。例えば、新幹線のような交流電気鉄道ではき電設備は回生電力を吸収可能なように設計されるが、き電設備の利用率は低下する。

#### 2.2.2 軽負荷回生制御

力行車を含む負荷で消費する電力より回生電力が高いと、回生車のインバータ直流側に設けられたフィルタコンデンサ電圧(FC電圧)が上昇し、過電圧保護でインバータ動作の停止、回生ブレーキの完

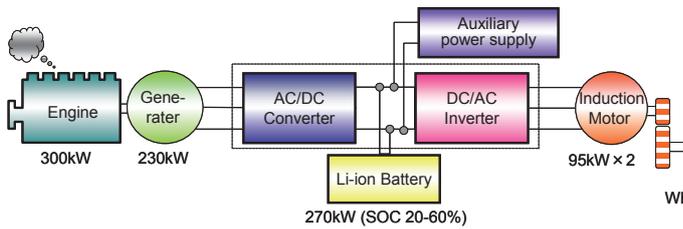


図1 キハ E200 形のシステム構成<sup>(7)</sup>



図2 JR 東日本キハ E200 形

全失効に至る。そこで、直流電気車では、FC 電圧に応じて、電動機の回生電流を絞り、回生失効を防止する軽負荷回生制御が用いられる<sup>(6)</sup>。

### 2.2.3 蓄電装置の応用による回生電力吸収

蓄電装置を用いた回生エネルギーの有効利用の実用例としては、わが国ではディーゼルエンジンと蓄電池のハイブリッドによる気動車がある。2007年に登場したJR東日本キハE200形はディーゼルエンジンとリチウムイオンバッテリーを搭載したハイブリッド車両である<sup>(7)</sup>。システムの構成としては、図1に示すようなディーゼルエンジン発電機の出力と、リチウムイオンバッテリーの出力の両方で、インバータ-誘導電動機を駆動するシリーズハイブリッド方式である。JR東日本の小海線で図2に示す車両が3両営業運転に使用されている。電気鉄道では海外で路面電車で電気二重層コンデンサ(EDLC)を搭載して、回生電力吸収による省エネルギーと摩擦ブレーキの摩耗対策を行っている例がある<sup>(8)</sup>。

## 2.3 走行抵抗の削減と車両の軽量化

### 2.3.1 走行抵抗の低減

高速域での車両の走行抵抗を支配するのは空気力学的抵抗(空力抵抗)である。空力抵抗の低減は騒音低減やトンネル微気圧波の低減等の環境対策につながる。そのため、これらへの要求が強い我が国的高速列車では特に空力抵抗低減への取り組みが熱心に行われている。その結果、図3に示すように、東海道・山陽新幹線用車両の場合、N700系では初代新幹線車両の0系と比べて半分の走行抵抗となった<sup>(9)</sup>。高速巡航する時間の長い新幹線では、空力抵抗低減は消費エネルギー低減にも大きく寄与する。現在、我が国での営業列車の最高運転速度320km/hで営業運転を行うJR東日本のE5系での空力抵抗低減策の例を図4に示す<sup>(10)</sup>。先頭車両では断面形状が変化する長さの割合が車両長の30%以上に達している。また、これまで保守の便を考慮してカバーを設けていなかった台車部にもカバーを設けて台車周りの空気の

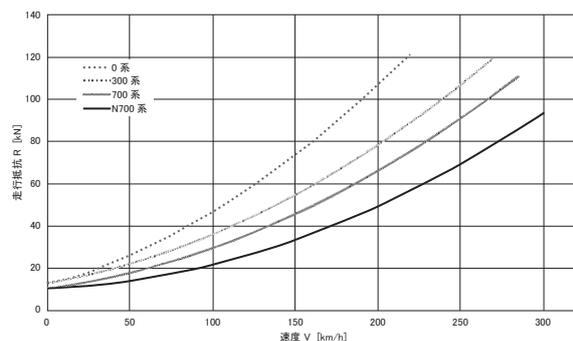


図3 東海道・山陽新幹線用車両の走行抵抗<sup>(9)</sup>

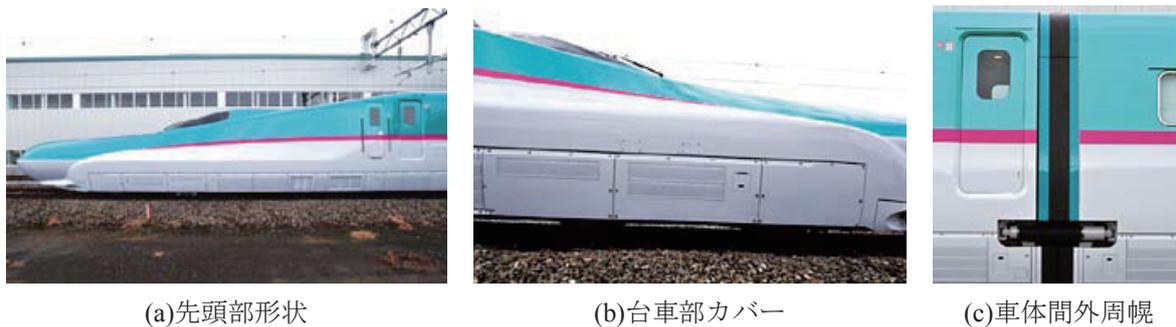


図4 JR 東日本 E5 系新幹線電車の空気力学抵抗低減方策<sup>(10)</sup>

流れの乱れを防いでいる。また、車体間には外周幌を設け、車体間での空気の流れを滑らかにしている。この他に、分割すり板を採用して運転中に上昇させるパンタグラフの数を従来の編成中2台から1台に減らしている。最高運転速度 130km/h の在来線の車両でも、床下機器配置の空力抵抗への影響が必ずしも小さくないことが最近の研究で明らかとなっている<sup>(11)</sup>。現在のところ、実用車両のこの点について設計に反映しているものはほぼ皆無であるが、省エネルギーや後述のピーク電力カットへの要求が高まった際には、設計時に考慮が行われる可能性もある。

1980年代以降、通勤電車などでは車体のステンレス化が広まり、また、1990年代以降新幹線を中心に優等列車のアルミ合金車体化が進んだ。アルミは鉄に比べその原子量が約半分であることから、その合金は鋼体に比べ軽量化が可能である。

主回路システムについては、抵抗制御による直流電動機駆動では、主回路機器質量における抵抗器の質量の割合が大きかった。その後、チョップ制御により抵抗器の省略が図られ、インバータ制御による誘導電動機駆動が1980年代後半に実用化されるに至り、このころから普及したアルミ合金やステンレス車体等の採用と併せて大幅な車両の軽量化が図られた。インバータは当初、パワー半導体スイッチングデバイスとしてGTOが用いられていたが、1990年代後半に入り、損失の少ないIGBT化が進み主回路機器の小型軽量化が一層進んだ。

### 3. 現在の節電技術

#### 3.1 省エネルギーと節電<sup>(12)</sup>

電気鉄道において、“節電”，つまりピーク電力の抑制と、運転のためのエネルギー消費を低減する“省エネルギー”は本質的に異なるものであり、技術的には両者それぞれの観点から評価を行うべきである。また、蓄電装置の導入が理想的なレベルまで進んだ場合には、電力系統からみて鉄道にはピーク負荷電力の概念がなくなることを述べる。また、蓄電装置は電力ピークシフトに有効であることを述べる。

#### 3.2 節電につながる技術

節電への要望が恒常的ではなく、たとえば緊急避難的なものであれば、その際だけ従来とは異なる速度-引張力特性として運転する方法が考えられる<sup>(13)</sup>。現在の車両、特に通勤車の速度-駆動力特性の多くは、マスコンの常用ノッチ数(3~5N)と起動加速度・高速時の引張力が対応しているが、起動加

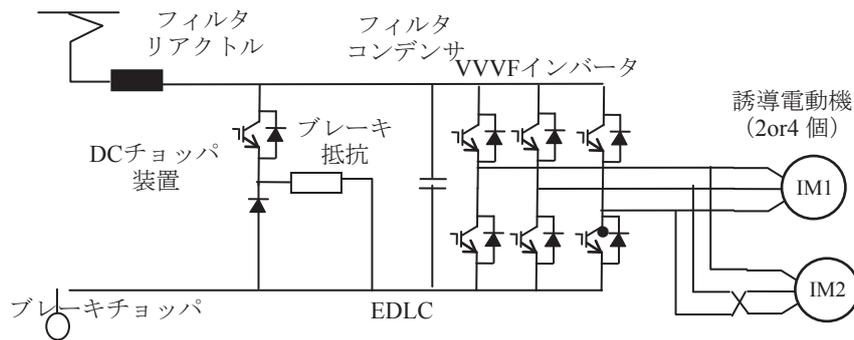


図5 ブレーキチョップ装置搭載車両の主回路構成例

速度は大差なく、定出力特性に入る速度はノッチによらずほぼ一定であるため、最大電力には大きな差がない。これに対して、ピークカットを行いやすくするための一つの方策として、ノッチ数と最大電力とを直接対応させるような特性に変更する方法が考えられる。起動加速度の調節をしたい場合にはノッチとは別に設けた現在の高加速スイッチと同様、低加速スイッチを扱うようにすれば良い。この新特性には新設計ばかりではなく既存車両の特性変更でも容易に対応可能である。

回生電力吸収の例としては、JR 東海の 313 系では、車上のブレーキチョップ装置で運動エネルギーを吸収することが行われている<sup>(14)</sup>。この車両では、図5に示すように、インバータ直流入力側に並列に挿入されたブレーキ抵抗とチョップにより、軽負荷回生時に回生エネルギーを消費することで、ピーク電力のカットに寄与する。また、ブレーキ抵抗により、回生失効に至る機会もへり、僅かながら省エネルギー化にも寄与している。

### 3.3 蓄電装置応用

JR 貨物が、入れ換え用ディーゼル機関車の燃費削減、排出ガス削減、および騒音低減等を目標とした、HD300 形ディーゼルエンジン・リチウムイオン電池ハイブリッド機関車を開発し、実証試験を行っている<sup>(17)</sup>。諸元を表1に示す。この車両のハイブリッド化の本質はエンジンのピークカット効果である。エンジン駆動の場合であれば、エンジン出力は踏面出力 500kW に対応したもの（おそらく 750kW 程度）にするべきところであるが、ハイブリッド化により、エンジン出力は約 210kW 程度に低減されている。この車両は非電化区間用であるが、同様なことは電化区間用の電気車<sup>(16)</sup>でも可能であり、その場合には地上電力設備の出力容量低減に寄与することが実証されたと言える。

表1 HD300 ハイブリッド入換機関車の諸元<sup>(15)</sup>

| 項目         | 仕様  |
|------------|---|
| 運転整備重量(軸重) | 60t (15t)   |
| 車体長        | 14300mm   |
| 最大牽引力      | 約 20tf  |
| 最大踏面出力     | 500kW   |
| 最高運転速度     | 45km/h (回送時 110km/h)                              |
| エンジン出力     | 270HP × 1台  |
| 主電池性能      | リチウムイオン電池<br>67.4kWh-750V (26S-3P)                |
| 主電動機       | 全閉自冷却式永久磁石同期<br>電動機(4台), 6極<br>62kW(連続) 80kW(1時間) |

## 4. 今後の省エネルギー・節電技術に関する考察 ～まとめに変えて～

### 4.1 運転方法の最適化による省エネルギー化の今後

鉄道運輸機構による運輸分野の基礎的研究推進制度における平成22年度採択課題「持続可能な低コスト・省エネルギー鉄道のためのパワーマネジメント」では、乗務員に省エネルギーな運転方法を提示するオンボード運転支援装置を開発し、前述のような人間の運転操作に伴う諸課題を解決しつつ、低コストに省エネルギー運転を実現する方法を提案している<sup>(18)</sup>。この方法では、運転台に設置されたモニタ装置から乗務員に省エネルギーかつ定時運行可能なノッチ操作の提案が表示される。この装置は乗務員の操作系にも保安装置にも一切介入せず、安全確保のための運転操作はいつでも従来同様乗務員の判断で行う方式である。すなわち、乗務員はオンボード支援装置の提案操作方法に従う義務はない。このような思想とすることで、運転操作系や信号システムとのインタフェースを不要とし、これらに伴う莫大な設備付加や信頼性確保のコストを低減しつつ、省エネルギーな運転を実現する方法として将来有望である。

### 4.2 非接触給電を用いた節電技術

電力ピークカットを目指した節電も、前述のように省エネルギー化同様、運転曲線の最適化、車両の小型軽量化が重要である。また、加えて、蓄電装置の応用の他、適切なタイミングでの電力供給も重要である。現在は架線方式であるが、メンテナンスの低減効果と蓄電装置の活用を考えると、移動時も含めた非接触給電技術の活用も視野に入ってくる。非接触給電の技術としては、30～50kWの出力レンジで自動車を対象としたものが発表されている<sup>(19)</sup>。これに対し、図6に示すような鉄道車両を対象とした300kWクラスを目指した非接触給電に関する検討も行われている<sup>(20)</sup>。この場合、課題としてはギャップ長が広いことによる無効電力の増大や、出力が大ききことによる、損失増加などが挙げられる。これらに伴う技術的限界が明らかとなった時点で、非接触給電技術が鉄道車両への電力供給にどの程度適用可能かが見えてくるものと思われる。

### 4.3 蓄電装置を用いた究極の省エネルギーと節電技術

鉄道車両は慣性負荷であることから、物理的にピーク電力の大きい負荷である。しかし、一方で、電気駆動とすることにより、運動エネルギーは可逆性のあるエネルギーとなり得る。そのため、電気鉄道をはじめとする、移動体の電気駆動においては、給電・蓄電・駆動（回生）技術を高めることによって、電気鉄道は電力系統からみて平準化された省エネルギーな負荷になり得る。このことは、ピーク電力が

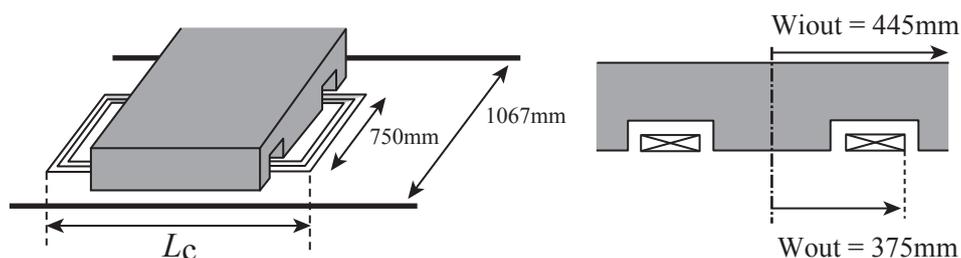


図6 検討されている300kW非接触給電コイル<sup>(20)</sup>

大きく、必ずしも十分に回生エネルギーが回収できていない現在の電気鉄道を、究極的に良い負荷に変身させ得ると考えられる。このように、非接触給電技術、蓄電技術と前述のような運転上の工夫などを組み合わせることでこれが実現できる可能性がある。

以上

## 参考文献

- (1) 藤森英男 “電気鉄道における省エネルギー技術の動向 II. 運転電力の省エネルギー技術” 電気学会誌, Vol. 117-D, No. 1, pp.4-7, (1997.1)
- (2) 宮武昌史 “省エネルギーな列車ダイヤ作成のための簡易数理モデル,” 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.131, No.6, pp.860-861, (2011.6)
- (3) 保川忍, 藤田信一郎 “運転時間の簡略計算法を用いた新幹線各駅停車列車省エネルギー運転制御システムの開発,” 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.107, No.1, pp.665 -672, (1987.5)
- (4) 郭海蛟, 大橋祐則, 一ノ倉理 “省エネルギーを指向する直流電鉄ダイヤ作成手法一回生電力量の大きいダイヤ構成要素の組み合わせ,” 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.119, No.11, pp.1337-1344, (1999.11)
- (5) Keiichiro KONDO "Recent Energy Saving Technologies on Railway Traction System", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Volume 5, Issue 3, pp.298-303, (2010.5)
- (6) 齋藤達仁, 古関隆章, 近藤圭一郎 “直流電気鉄道における軽負荷回生制御器の解析的設計法,” 気学会論文誌 D, Vol. 132-D, No. 2, pp.268-277(2012.2)
- (7) 新井静男, 白木直樹, 佐藤春雄: “キハ200形ディーゼル気動車のハイブリッドシステム,” 平成22年電気学会産業応用部門大会論文集, pp. I - 143 ~ 148, 2010.8
- (8) Steiner, Markus Klohr, Stanislaus Pagiela, “Energy Storage System with UltraCaps on Board of Railway Vehicles,” Proceedings of the 12rh Conference on European Power Electronics-EPE2007, (CD-ROM) (ISBN : 9789075815108)
- (9) 萩原善泰, 石川栄, 加藤宏和, 吉澤正克 “新幹線電車における車両システムの技術動向,” 平成20年電気学会産業応用部門大会講演論文集 (CD-ROM), 3-01-1, pp.III-57 - III-62, (2008.8)
- (10) JR 東日本 Web サイト「車両図鑑 E5 系」<http://www.jreast.co.jp/train/shinkan/e5.html>
- (11) 井門敦志, 宮地徳蔵, 井上達哉, 蛭名弘太, 岩崎誠 “在来線車両の形状改良による空気抵抗低減と省エネルギー効果の評価,” 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.41-46, (2013.1)
- (12) 曾根悟, 近藤圭一郎, 小西武史, “電気鉄道の節電技術,” 平成24年電気学会産業応用部門大会講演論文集 (CD-ROM),
- (13) 曾根 悟: 長期的節電要請に対する電気鉄道のモデルチェンジの提案, JREA 誌 Vol.54, No.9, pp39-46, 2012年9月
- (14) JR 東海 313系ブレーキチョッパ
- (15) JR 東日本プレスリリース 「「スマート電池くん」の実用性を確認する試験を実施します」<http://>

[www.jreast.co.jp/press/2011/20120204.pdf#search='JR%E6%9D%B1%E6%97%A5%E6%9C%AC+%E3%82%B9%E3%83%9E%E3%83%BC%E3%83%88%E9%9B%BB%E6%B1%A0%E3%81%8F%E3%82%93'](http://www.jreast.co.jp/press/2011/20120204.pdf#search='JR%E6%9D%B1%E6%97%A5%E6%9C%AC+%E3%82%B9%E3%83%9E%E3%83%BC%E3%83%88%E9%9B%BB%E6%B1%A0%E3%81%8F%E3%82%93')

- (16) JR 東日本プレスリリース 「「スマート電池くん」を実用化し、烏山線に導入します」 <http://www.jreast.co.jp/press/2012/20121104.pdf#search='JR%E6%9D%B1%E6%97%A5%E6%9C%AC+%E7%83%8F%E5%B1%B1%E7%B7%9A'>
- (17) 添田正, 寺内伸雄, 新田浩, 杉山義一, 小川知行 “入換用ハイブリッド機関車の開発,” 第 17 回 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2010) 講演論文集, (主催 電気学会交通電気鉄道技術委員会, pp.401-404, 2010.12)
- (18) 鉄道運輸整備機構 Web サイト “「持続可能な低コスト・省エネルギー鉄道のためのパワーマネージメント」の公開シンポジウム (開催報告) (PDF: 514KB) [課題番号: 2010-04]” <http://www.jrtt.go.jp/02Business/Research/pdf/symH24-201004.pdf>
- (19) 藤田敏博・金子裕良・阿部茂: 「直列および並列共振コンデンサを用いた非接触給電システム」 電気学会論文誌 D, Vol. 127, No.2, pp.174-180, 2007.2
- (20) T. Maruyama, K. Yamamoto, S. Kitazawa, K. Kondo, and T. Kashiwagi, K. Yamamoto, S. Kitazawa, K. Kondo, and T. Kashiwagi “A study on the Design Method of the Light Weight Coils for a High Power Contactless Power Transfer Systems,” Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2012), (CD-ROM), pp.1-6, 2012.10