

電気鉄道回生制動を最大活用するパワーマネジメントによる 省エネルギー運転とそのための低コストな運転支援

Energy-Saving Train Operation through Power Management for Maximal Usage of Regenerating Brakes and Economic Train-Driver Assistance

古関 隆章(東京大学大学院)○ 近藤 圭一郎(千葉大学大学院工学系研究科)
濱崎 康宏(新京成電鉄株式会社) 水間毅(交通安全環境研究所)

Takafumi KOSEKI, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-Ku, Tokyo 113-8656

Keiichiro KONDO, Chiba University, 1-33, Yayoicho Inaba-Ku, Chiba 263-8522

Yasuhiro HAMAZAKI, Shin-Keisei Electric Railway Co. Ltd., 4-1-12, Kunugiyama, Kamagaya 273-0192

Takeshi MIZUMA, National Traffic Safety and Environment Laboratory, 7-42-27, Jindaiji Higashi-cho, Chofu 182-0012

This manuscript deals with power-limiting regenerative braking of an electric train. The braking methodology is useful for both avoidance of squeezing of electric brakes and energy-saving train operation. However, this braking method requests difficult operation skill to a train driver. Therefore, an appropriate driver assistance is significant. This paper proposes useful methods of calculating the assistance-database and advantages and problems of the proposed method have been experimentally evaluated on a commercial urban line. The proposed method will be more effective if it is applied to urban lines automatically operated.

Key Words: electric railway, regenerative brake, energy-saving train operation, power management, driver assistance

1. 緒言

本研究では、省エネルギーのための列車の走らせ方の最適化研究⁽¹⁾成果として知られている、最大力行、だ行、最大減速という考え方に、回生制動有効活用の観点から高速域で弱いブレーキを積極的に用いる電力制限ブレーキ⁽²⁾を組み合わせる運転法の利点と問題点を整理する。そして、その運転上の問題点を解決するため、JRTT 平成 22 年度採択研究テーマ「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」(研究代表者 水間毅 H22-25 年度)で検討した、車上運転支援装置とその支援方法⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾を紹介し、その現車試験を通じた問題点と解決方法を詳細に説明する。特にプロジェクト後期に現車試験で明確化された、ブレーキ動作の支援からの 2-3 秒の遅れの悪影響を抑制し、停車駅直前に強い速度制限の存在するケースの支援方法を紹介する。さらに、本稿で述べる運転法を拡張し将来の自動運転の設計に積極的に導入⁽⁵⁾する展望を述べる。

2. 回生制動有効活用と省エネルギー運転

大震災後の電力需給逼迫と電力価格高騰を背景に、電気鉄道運行における省エネルギー方策の検討が昨今特に注目を集めるようになった。

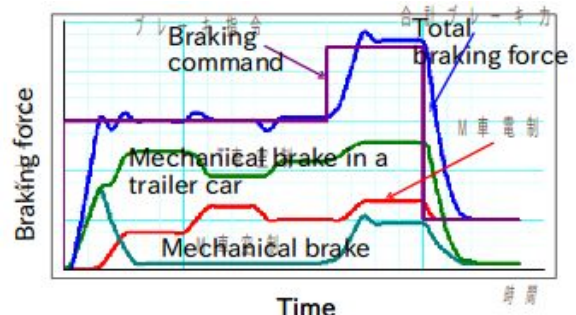


Fig. 1 General behavior of mechanical and electric brakes.

電気鉄道では現在広く回生制動が用いられているが、図 1 にあるように機械ブレーキと電気ブレーキを併用している。省エネルギーの視点からは、できるだけ回生のできる電気ブレーキの使用率を高くすることが重要である。そのためには、図 2 のように、電動機の特性にあわせて、高速域でのブレーキ力を小さく指令することが効果的である。

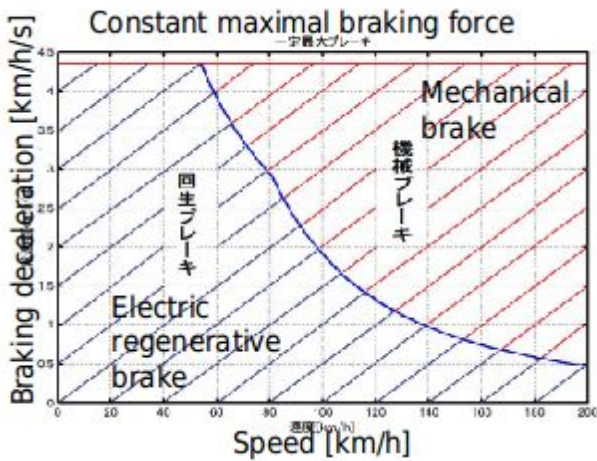


Fig. 2 Speed dependency between mechanical and electric brakes.

第1節で述べたJRTT水間プロジェクトでは、回生制動有効活用を通じ、省エネルギーが可能な運転の実用化を目指した図3のような車上運転支援方法を理論、実務の双方の観点から検討してきた⁽²⁾。高速域の制動パワーを明示的に制限して、回生時の回生電力の絞り込みや回生失効の原因となるパンタ点の電圧上昇を防ぎ、同時に図2に示すような常用機械ブレーキの動作抑制する。しかし、これは図4で示されるとおり、従来の運転法と比べ、数百m手前から、最初弱いブレーキをかけはじめ速度低下とともに徐々にブレーキ力を強める精緻な運転方法となるため、操作が難しい。

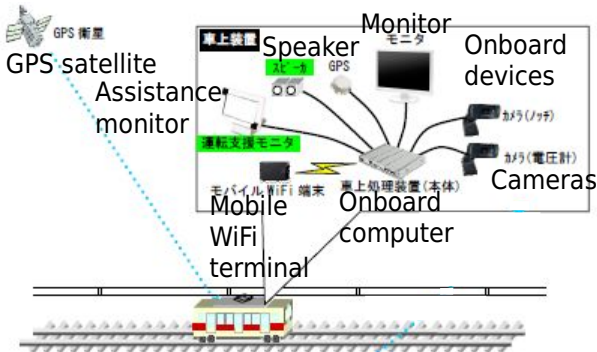


Fig. 3 Configuration of onboard drive assistance

3. 電力制限ブレーキと運転支援

さらに、図4の運転方法では、時間感度が小さい⁽²⁾とはいえ従来法に比べて駅間走行時分が伸びてしまう。このため、単純に高速域の制動を制限することのみならず、定時性を確保する工夫が必要となる。そこで、以下に示すとおり、前節の高速時の「パワー制限」を加えた制動法を、車上運転支援装置を用いて可能とする方法を提唱した。

(1) 早い時点で制動パワー制限値を決定

早い時点とは： 標準的なブレーキ開始点の十分手前 e.g. 力行終了点 + 複数点での支援

(2) 総走行時間を守るため加速時余裕時分を活用する。

(3) どうせ制動パワーを制限しても回生失効を完璧に防止できないので、自分の列車の情報のみを用いた確定的ベストエフォート戦略をとる。

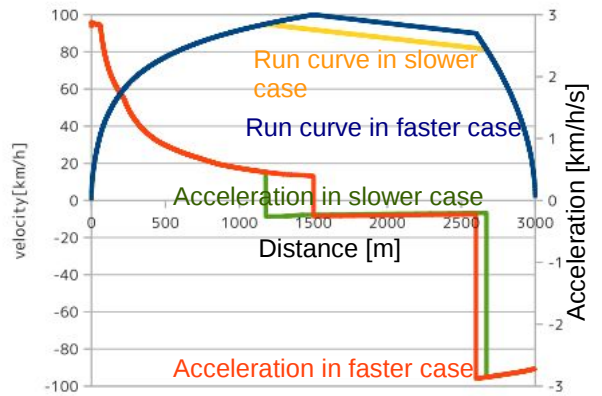


Fig. 4 Comparison between conventional and proposed power-limiting brakes.

実際には、運転士にブレーキを操作を視覚的、あるいは音声で指示するときに、ブレーキ指令の変化を連続関数として与えることは困難である。そこで、図5に示すとおり、電気駆動系の特性の内側で運転台にある有限段のブレーキノッチに相当する減速度で刻んだ制動のパターンを準備する。そして、そのブレーキの強さを、ブレーキ最大パワーに相当する図5にある丸印に対応する横軸の速度をインデックスとして表現する⁽²⁾。これを本稿では離散的電力制限ブレーキと呼ぶ。

これら強さの異なるブレーキ特性を複数用意し、駅での停車時、停車点から、時間軸を逆向きに「仮想的に後ろ向き加速」する形で、図6のような複数の「逆引き」制動曲線を計算し、前述のパワー制限のインデックスの一次元データベースをあらかじめ準備する。強さの異なる制動曲線の時間、速度、位置の多数のテーブルデータを用意し、これを、車上支援のための「下層データベース」とする。

ここでは、定時性を確保するために加速で生じた余裕時分を「できるだけ弱い」制動に充てるという考え方に基づきブレーキの方法を決定する。そのため、上記のパワー制限インデックスを、下層データベースからブレーキ軌道を一位に呼び出すための「上層データベース」とする。すなわち、力行終了点近傍に置いた支援決定点でその通過時刻から算出した停車までの残り時間と、その決定点通過時の速度情報から、その時点で取れる「最も弱いブレーキ」インデックスを指定し、ブレーキ軌道を下層の一次元データベースから呼び出すための上位の二次元データベースを準備する。

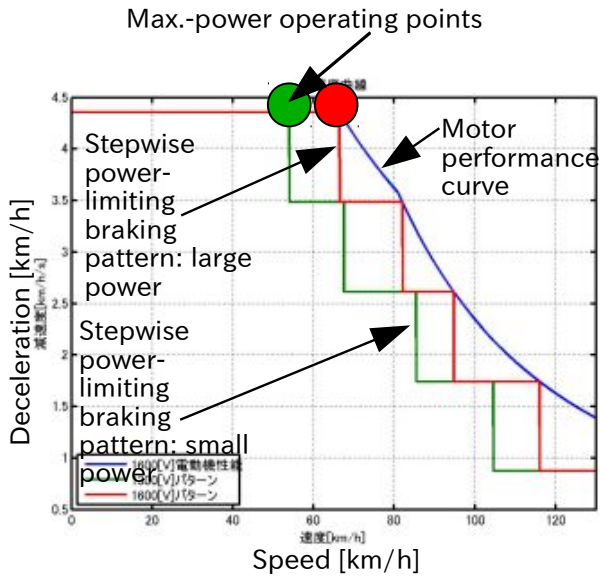


Fig. 5 Digitized stepwise power-limiting brakes and maximal power operating points as a braking index.

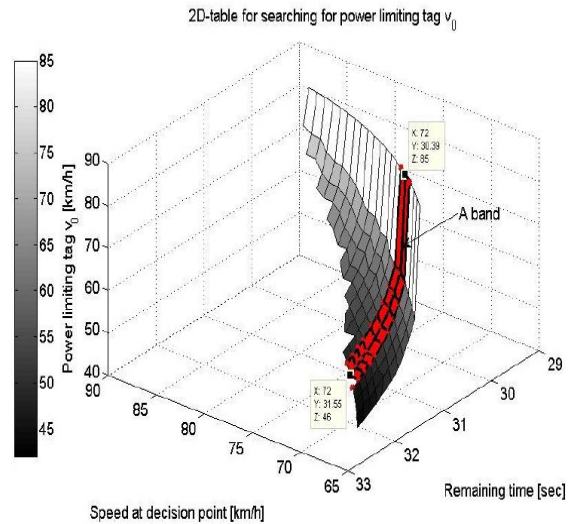


Fig. 7 Two-dimensional database of maximal braking power index dependent on speed and remaining time at a assistance-decision point.

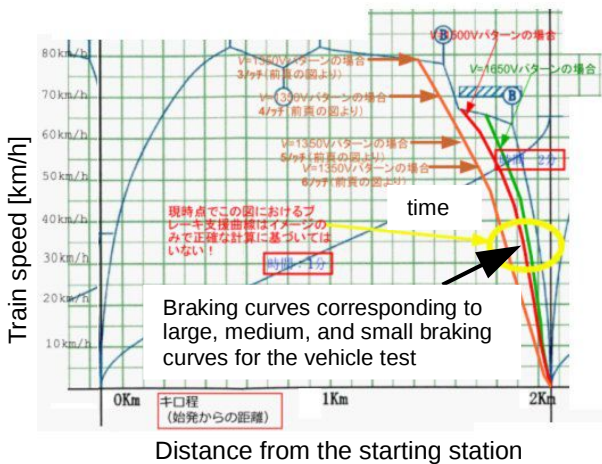


Fig. 6 One-dimensional data-base of "backward-calculated" power-limiting braking curves whose index is the maximal power operating point.

上記の支援決定点は、ここで指向している運転法の省エネルギー効果を有効にする観点から、力行終了点付近のできるだけ手前に置くことが重要である。一方、その後の走行の結果、当初の計算から実際の走行がずれてしまった際にはブレーキ操作の補正が必要となる。そのため、最初の支援点の後にも、いつか複数の決定点を設け、それぞれに対する、上記の二層データベースを準備することが望ましい。

これらの、情報を用いて、車上支援装置は、運転士に対して図 8 に示すような、運転台脇に取り付けられたディスプレイとスピーカを通じ、適切なブレーキノッチの情報が、視覚情報、聴覚情報の二手段で与えられる。実際に、運転士は前方を注視しているため、タイムリーな音声案内が特に重要である。



Fig. 8 Driver interface of the onboard drive assistance system

4. 新京成電鉄 2012 年 10 月の走行試験 --- 離散電力制限ブレーキのための運転支援

平成24年の3月、7月の予備的な試験を経て、図 9 の新京成電鉄の営業線上に試運転車を走行させ、この運転支援の現車試験を行った。試験車の仕様は、4 動力車 2 付随車、16 モータ、3.0km/h/s: 加速度、4.0km/h/s : 減速度 となっている。



Fig. 9 Vehicle test at Shin-Keisei line.

また、パンタ電圧、電流、速度、モータ電流の正確な挙動を記録するため、この試運転車には図 10 に示すような三菱電機殿が製作した運転状態記録装置を搭載した。

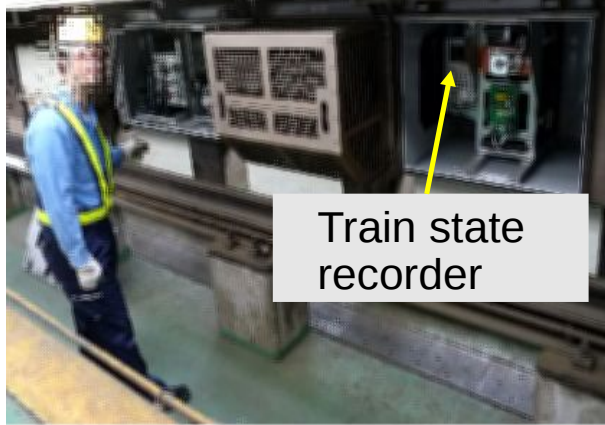


Fig. 10 Train operation status monitor.

上記とは別に、運転指令所でのモニタ装置を想定した、車上運転支援装置との通信で走行状態をを記録する情報装置を準備し、支援走行の記録した。その結果例を図 11 に示す。当初想定のとおり、力行時に計画運転曲線よりも速く加速ができた結果、支援決定点を時間余裕を持って通過した場合には、制動支援のカーブが適切に選択され、支援開始点通過後それが表示されていることがわかる。概ね運転士は支援情報に従って適切な制動操作をしていると考えられる。ただし、実際の運転士の反応と制動力の立ち上がりには遅れがあるため、実績走行曲線が制動指令曲線よりも、行き過ぎがちになっていることもわかる。

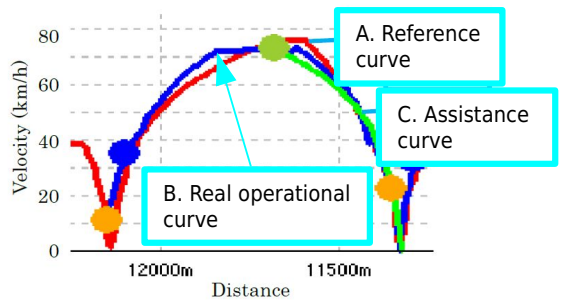
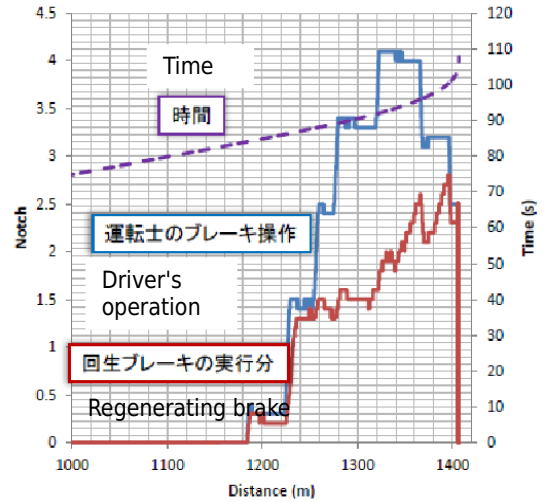
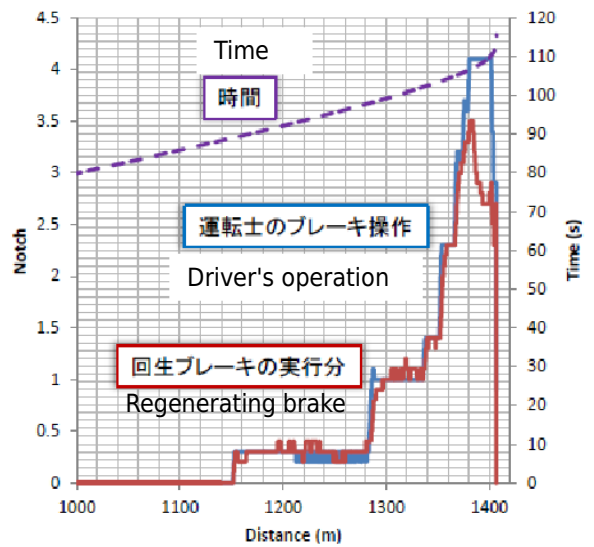


Fig. 11 An example of the driver assistance curve in the vehicle test in October 2012.



(a) Without assistance.

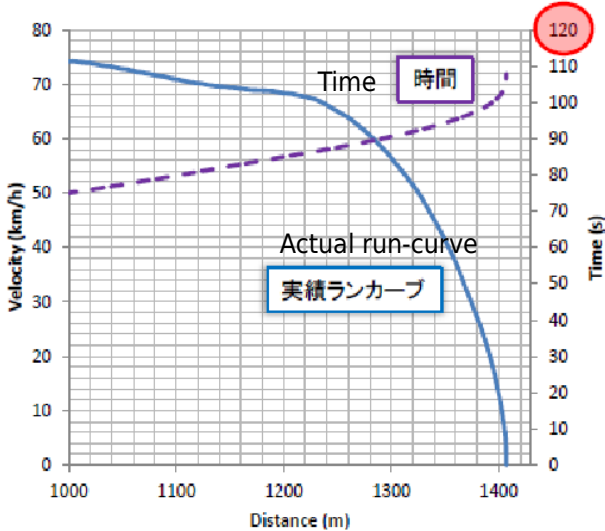


(b) With assistance.

Fig. 12 Regenerating braking action measured during the vehicle test in October 2012.

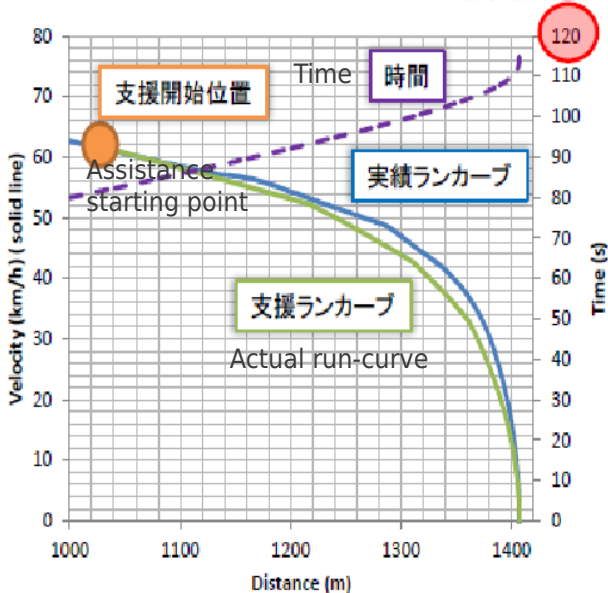
図 12 のブレーキ操作の記録から、本稿で提案している離散的電力制限ブレーキ支援により、支援なしの場合と比較し、顕著に電気ブレーキが負担する割合が高くなっていることがわかる。

Standard scheduled time 基準運転時分



(a) Without assistance.

Standard scheduled time 基準運転時分



(b) With assistance.

Fig. 13 Run-curves measured during the vehicle test in October 2012.

この支援に対し、運転士の意見を聞いた結果、以下のような回答が得られている。

(1) 支援画面について

(予備試験時と比べて)画面が見やすくなった
 回生負荷状況の情報は、あれば心構えになる。
 省エネ度表示は参考になる。

(2) 支援タイミングについて

支援開始のアナウンスの分、時間を損じている。
 もう少し早めの支援があるとやりやすい。

(3) 支援内容について

駅ホーム内に入ってからの支援開始が開始されると心理的に怖い。

制動支援で一度ニュートラルに入れると制動の立ち上がりが遅くなるので、そのような指示は避けるべきではない

か？

上記の意見聴取から、意図した支援が概ねうまくいったと結論づけることができよう。一方で、(2)下線部のように、支援を出されてもただちには反応できないので、操作が遅れがちとなる、もっと支援を早いタイミングで出してほしいとの重要な指摘もあった。実際に図 13 の実績走行曲線が支援曲線より「前のめり」になっていることがわかる。これは、停車位置が前方にずれてしまうことを、駅停止直前の急ブレーキで辛うじて回避していることを意味し、安全・安心および乗客の乗り心地の3つの観点から好ましくない。また、停車駅直前に強い速度制限がある区間では(3)の下線部で指摘された問題が専ら生じている。

5. 新京成電鉄 2013 年 3 月の走行試験---ブレーキ操作遅れ時間補償と停車直前の速度制限区間での制動

上記の問題手を解消すべく、運転士からの問題点の指摘に対応し、平成 25 年 3 月に、

(1) 支援情報決定後、列車走行軌跡の予測情報を計算することで、制動支援を 2-3 秒「前出し」するアルゴリズムを追加する、

(2) 停車駅直前の速度制限がある場合、制動曲線逆引き計算で用いるブレーキノッチの動きに意図的に制限を加える、

という、二つの改良を行った。そして、それを車上支援装置のソフトウェアとして実装して、2013 年 3 月に最後の現車試験を行った。

(1)のブレーキ操作遅れ時間補償: 支援前出しの論理については図 14 に、

(2)の 到着駅直前に強い速度制限が存在する場合の逆引き制動曲線、ブレーキノッチについては図 15 に示す。

図 15(b)で分かるとおり、停止直前にブレーキを強めることには、依然として大きな抵抗感があるためか、運転士は、今回の改良に関わらず、必ずしも指令にしたがっているとはいえない。しかし、図 16(a)の実績運転曲線でわかるとおり、条件の悪いところでも安全確実な制動動作は達成されているので、前回のコメントで指摘された問題は解決していると考えられる。文献(5)で、筆者らはこの走行における電力流の評価を詳細に説明している。しかし、この例のように制動条件の悪い箇所では、図 16(b)に現れているとおり、(ややパンタグラフの電圧が元々高かったこともあるが)必ずしも回生制動が十分に大きな役割を果たしているとは言えず、安全な制動動作への改良の分だけ、省エネルギー効果に逡減が見られた。このことは、安定した動作を可能とする良いマン・マシン・インターフェース実現のために払わざるを得なかったコストと考える。

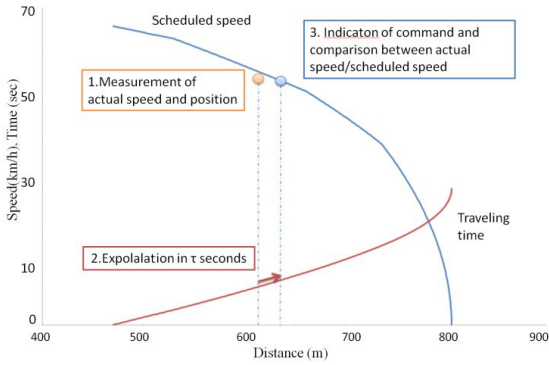
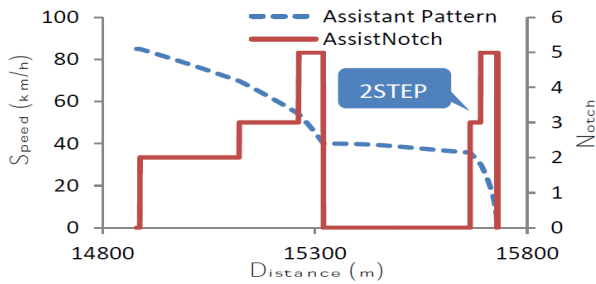


Fig. 14 Algorithm to read out the braking assistance database for compensating dead time of braking action.

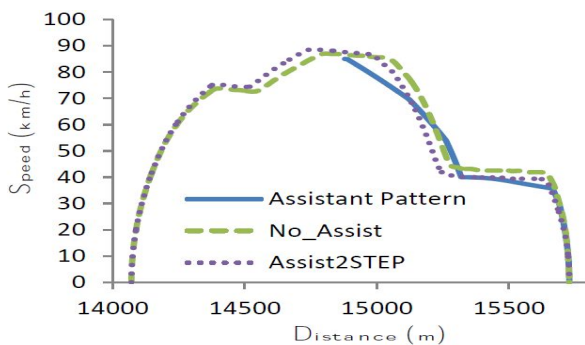


(a) Driver assistance

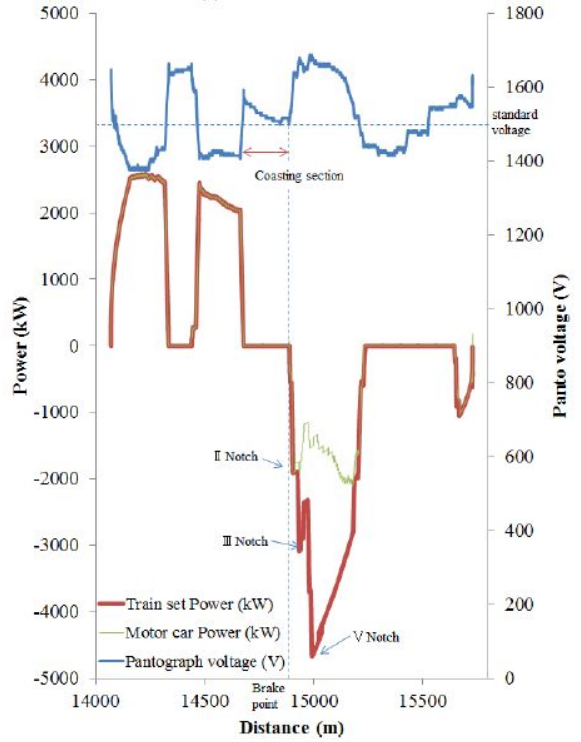


(b) Actual driver operation

Fig. 15 Braking reference and driver's action for a section of strong speed limitation before an arrival station.



(a) Comparison of run curves



(b) Measured pantograph voltage, total and electric braking powers with improved driver-friendly assistance of braking operation with limited step number and train trajectory prognosis for braking dead-time compensation explained in Fig. 14

Fig. 16 Effects of the improved assistance

6. 自動運転ATOへの展開

そもそも制動指令を離散的な形で与えることや、5章で述べた工夫の必要性は、従来の運転システムへの導入のためマニュアル運転を情報装置で支援せねばならないことから生じている。本稿で検討してきた運転法を、自動運転システム(ATO)に応用すれば、技術的に単純に、理論どおりより大きな電力の入出力の抑制、省エネルギー化ができることは明らかである。すなわち、ATOでは

- (1) 連続的な電力制限ブレーキの適用が可能
- (2) 運転支援に伴う5節で改良を要した様なマン・マシン・インターフェースの厄介な問題はそもそも存在しない
- (3) 加速から減速まで一貫した合理的設計が可能である
- (4) 勾配情報等のエネルギーに主要な要素も陽に考えられる
- (5) すなわち、駅間ごとの最適ランカーブの実装が技術的に可能である。

さらに、あらかじめ決められた単一の計画運転曲線に忠実に走行するのではなく、電圧変化や車両重量の相違から生ずる加速の実績に応じ、定時性を確保しながら省エネルギー運転のベストエフォートを動的に目指す、より柔軟な運転方法の実現も、5節までで述べた二層運転支援

データの拡張で可能となる。

現在までに普及している ATO は、最大力行-等速走行-最大減速を基本とするものも多く、省エネルギーの観点からは好ましいものとはいえない。すなわち、次世代「エコ ATO」として、本稿で詳述してきた「最大力行-だ行-電力制限制動」を積極的に適用することの効果は大きい。文献(6)では、純電気ブレーキを基本とする ATO システムの一例として、リニアメトロの自動運転にこの考え方を適用することの利点を定量的に述べている。

7. 結言

本稿では、JR TT 平成 22 年度採択研究テーマ「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」(研究代表者 水間毅 H22-25 年度)の研究成果に基づき、電力制限ブレーキが回生絞り込みの抑制と省電力の双方に有効である一方、運転が難しくなるため、適切な運転支援が必要であることを述べた、そして、その実装上の問題を具体的に列挙し、それらの対策を現車実験で具体的に実装し、検証した。予備的な試験を含む合計 3 回の試験を経ても、マン-マシンインターフェースに伴う無駄時間の存在と着駅手前に強い速度制限のある場合の問題が残ったので、それに対する対策を行い、悪い制動条件のもとでも、運転支援に従った操作を可能とする方法論としての完成度を高め、第 4 回目の現車試験でその効果を検証することができた。ただし、良いマン・マシン・フェースを実現することのコストとして、そのような「路線の条件の悪い」ケースでは、省エネルギー効果は限定的なものになってしまう。

そこで、そのような面倒な問題がそもそも存在しない ATO への展開を提案し、今後の技術的検討の意義を整理してまとめた。今後、電力制限制動を積極的に活用した次世代 ATO の技術的可能性を、高頻度運転を伴う都市形鉄道への応用を想定し具体的に継続的検討を進めた

いと考えている。

本稿は(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」平成 22 年度採択課題(2010-04)「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」の一環として行われた成果に基づいている。(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構の御支援に感謝する。また、データの測定と解析に多大な御協力をいただいた交通安全環境研究所の林田、長谷川、竹内、工藤、セントラルエンジニアリングの阿部、小野、千葉大学の斎藤、東京大学の楊、渡邊、高田 各氏の御尽力に深謝する。

参考文献

- (1) 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, Vol. 131, No. 6, pp. 860-861, 2011
- (2) 古関隆章, 楊哲, 久富浩平, 水間毅: 「直流電気鉄道回生エネルギー有効活用のための運転支援と高度なブレーキ力制御」電気学会交通・電気技術/リニアドライブ研究会, pp. 59-64, 2012.07
- (3) 楊哲, 渡邊翔一郎, 古関隆章, 水間毅, 濱崎康宏: 直流電気鉄道の省電力運転のためのブレーキ力制御と運転支援の提案, 鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL), No.3416, 2012.12
- (4) 楊哲, 渡邊翔一郎, 古関隆章, 水間毅, 濱崎康宏: “回生有効活用で省エネルギーを図るブレーキ制御とその支援の実証研究,” 交通・電気鉄道/フィジカルセンサ合同研究会, 2013.03, TER-13-006
- (5) 渡邊翔一郎, 楊哲, 古関隆章, 水間毅, 濱崎康宏: 「直流電気鉄道の電力制限ブレーキ支援現車試験—省電力効果の実証と問題点の解決法—」平成 25 年度電気学会産業応用部門全国大会 5-35 2013.08
- (6) Ninh Van, 渡邊翔一郎, 古関隆章: 「リニア駆動鉄道の省エネルギー運転のための自動列車運転システム設計の基礎検討」電気学会リニアドライブ, 交通・電気鉄道研究会 LD-13-059, TER-13-041, 2013 年 7 月