

運転支援におけるブレーキ操作遅れ時間の補償と ATO による電力制限制動活用の提案

古関隆章*, 渡邊翔一郎, Cuong Ninh Van(東京大学)

水間 毅(交通環境安全研究所)

磯部栄介(日本地下鉄協会)

Dead time compensation of braking operation with an on-board driver assistance
and a proposal of power-limiting braking in an automatic train operation

Takafumi KOSEKI*, Shoichiro WATANABE, Cuong Ninh VAN (The University of Tokyo)

Takeshi MIZUMA (National Transportation Safety and Environment Laboratory), and

Eisuke ISOBE, (Japan Subway Association)

This paper 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.

キーワード: 電気鉄道 省エネルギー 回生制動 引張力 電気ブレーキ 電力制限ブレーキ リニア地下鉄 自動運転 運転支援

(Keywords: electric railway, energy saving, regenerative brake, traction, electric brake, power limiting brake, linear metros, automatic train operation, drive assistance)

1. はじめに

本稿では、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簡潔に整理する。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の発掘と解決の経過を説明する。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⁾することの意義を説明する。

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の逼迫や電力価格の高騰を背景に、電気鉄道運行における省エネルギー方策の検討は注目を集めている。

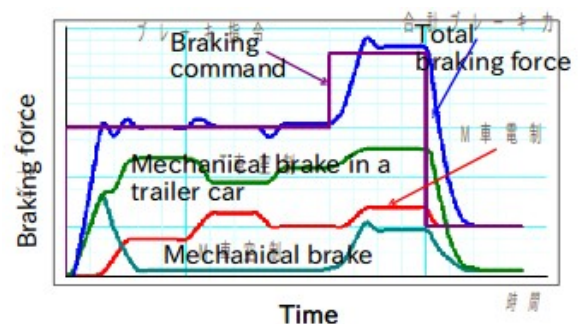


図 1 機械-電気ブレーキの一般的な挙動

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。省エネルギーの観点からは、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、図 2 にあるとおり、電動機の特성에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本質的に重要となる。

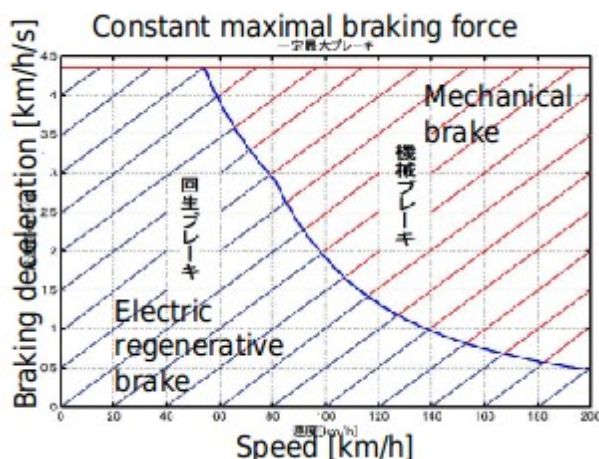


図 2 機械-電気ブレーキ分担の速度特性

Fig. 2 Speed dependency between mechanical and electric brakes.

1 章で述べた JR TT 水間プロジェクトでは回生制動有効活用を通じた、省エネルギー運転の実用化を目指した図 3 のような車上運転支援の検討を理論、実務の双方の観点から進めてきた⁽²⁾。高速域の制動パワーを明示的に制限することで、回生時の回生絞り込み、失効の原因となるパンタ点の電圧上昇を抑制し、同時に図 2 で見られるとおり常用の機械ブレーキの使用を回避する。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たはじめ速度の低下とともに徐々にブレーキ力を強める運転となるため、操作が難しい。

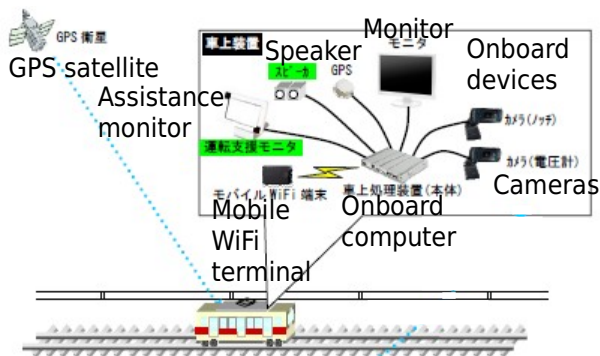


図 3 運転支援システムの構成

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 のような運転方法では、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間が伸びてしまうため、単純に高速域の制動を制限することに加え、定時性を確保するための工夫が必要となる。このため、以下の考え方で、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で支援することとした。

(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論的ベストエフォートの戦略をとる。

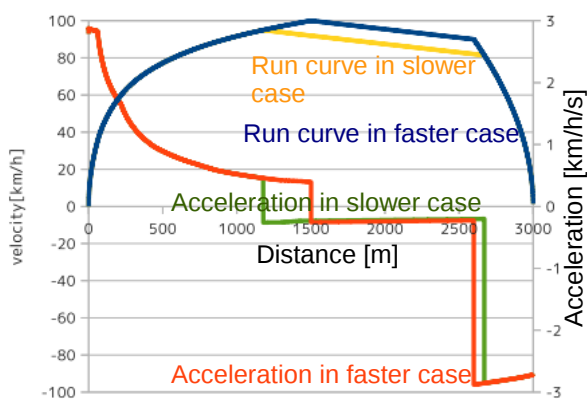


図 4 従来のブレーキ法と電力制限ブレーキの比較

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

実際に、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ため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 の丸印の点の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。

これらの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「後ろ向きに加速」する形で、図 6 のような複数の「逆引き」制動曲線をあらかじめ計算し、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とする。多数の強さの異なる制動曲線の時間、速度、位置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。

定時性を確保するためには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なので、上記のパワー制限インデックス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する二次元データベースを準備する。

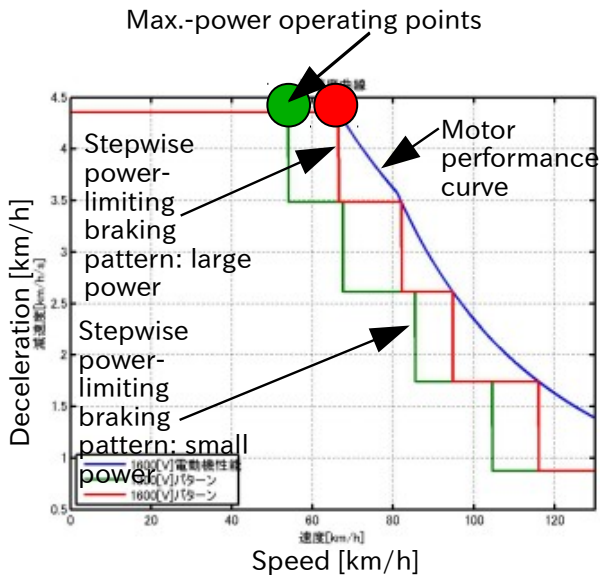


図5 離散電力制限ブレーキとインデックスとしての最大電力動作点

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

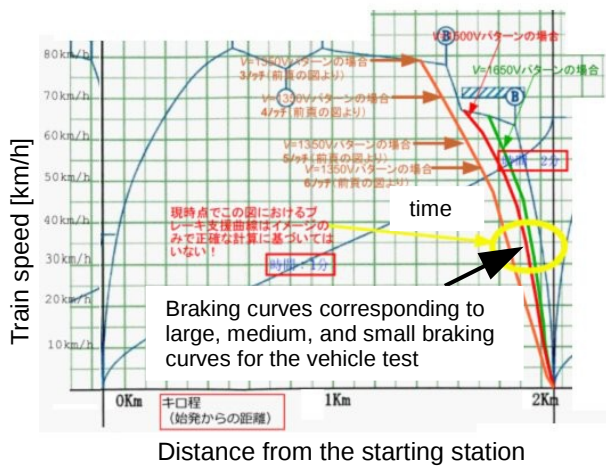


図6 制動電力制限値をインデックスとした逆引き制動曲線の一次元データの例

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は補正が必要となる。そのため、その後いく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。

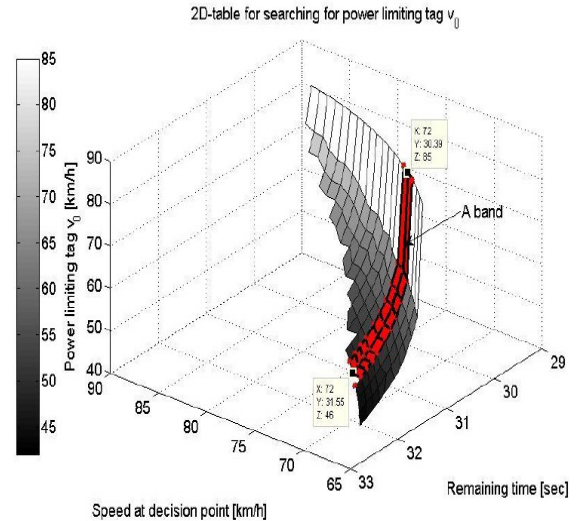


図7 支援開始点での余裕時分と通過速度による制動電力制限値の二次元データベースの例

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



図8 車上運転支援装置の運転士に対するインターフェース

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。



図9 新京成電鉄における現車試験
Fig. 9 Vehicle test at Shinkeisei 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に示すような列車運転状態記録装置を搭載した。

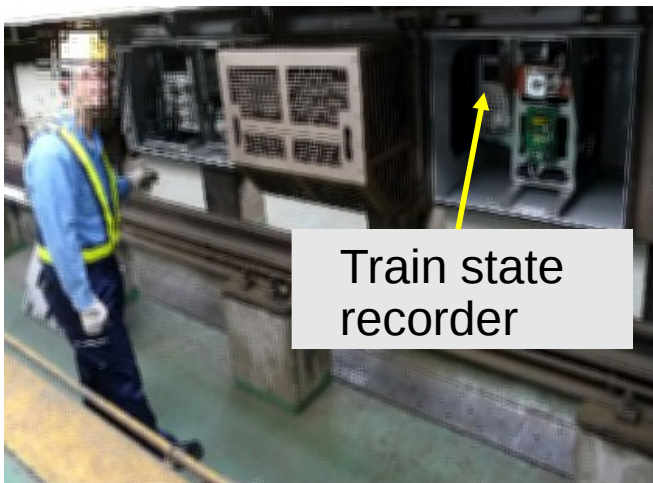


図10 列車運転状況記録装置
Fig. 10 Train operation status monitor.

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記録する情報装置を準備し、支援走行の記録した結果例を図11に示す。当初の想定のとおり、力行時に計画運転曲線より速く加速した結果、支援決定点を時間余裕を持って通過した場合に、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が、実際の制動力の反応に遅れがあるため、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。

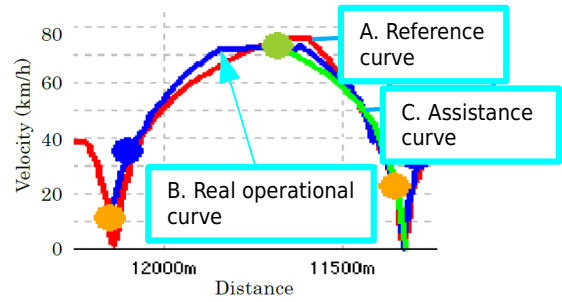
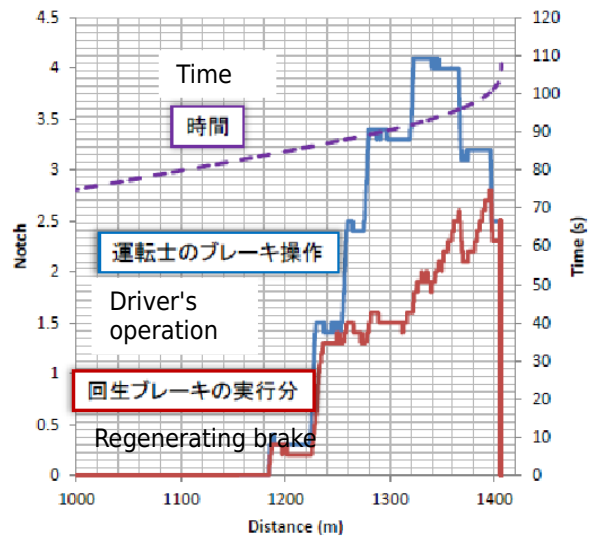
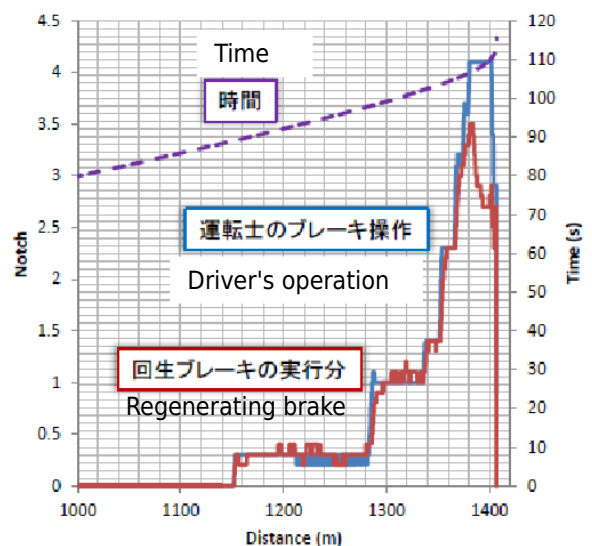


図11 2012年10月の現車試験における支援の例
Fig. 11 An example of the driver assistance curve in the vehicle test in October 2012.



(a) Without assistance.



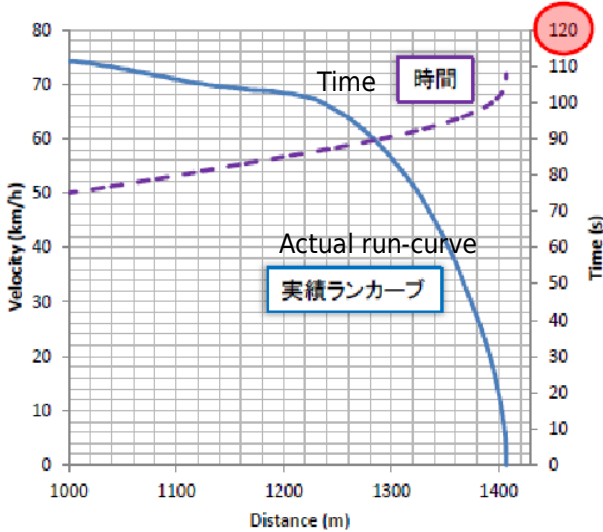
(b) With assistance.

図12 2012年10月の現車試験における回生ブレーキの動作測定例

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

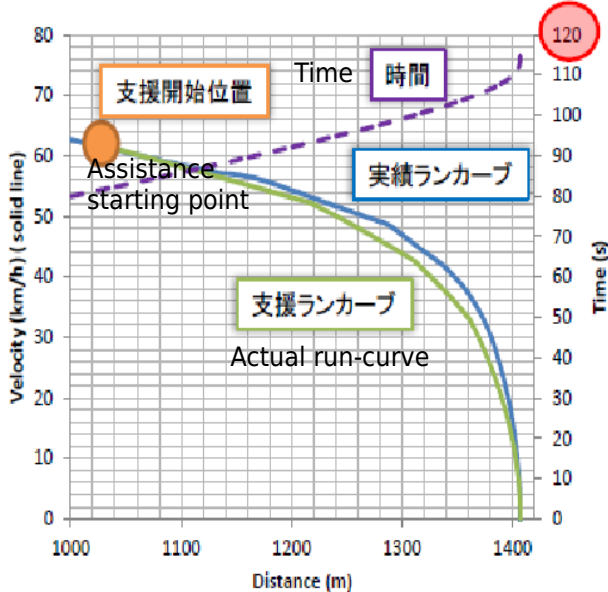
図 12 のブレーキ操作の記録から、本稿で提案している離散的電力制限ブレーキ支援により、支援なしの場合と比較し顕著に電気ブレーキの負担の割合が高くなっていることがわかる。

Standard scheduled time 基準運転時分



(a) Without assistance.

Standard scheduled time 基準運転時分



(b) With assistance.

図 13 2012 年 10 月の現車試験における走行曲線測定例
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ロスしている。

もう少し早めの支援がほしい。

(3) 支援内容について

駅ホーム内に入ってから支援開始は心理的に怖い。

制動支援で一度ニュートラルに入ると制動の立ち上がりが遅くなる。

上記から、概ね、意図した支援はうまくいったと解釈できる。一方で(2)下線部のように、支援をいきなり出されてもすぐに反応できず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意見があった。実際に図 13 の実績走行曲線は支援曲線より「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、安全および安心と言う観点から好ましくない。また(3)の下線部で指摘された問題は、停車駅直前に強い速度制限がある場合に生じている。

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、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、二つの工夫をして、2013 年 3 月にさらに現車試験を行った。(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抵抗感があり運転士は必ずしも指令にしたがっていない。しかし、図 16 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が達成されていて、前回のコメントで指摘された問題は解決している。なお、この走行における電力の流れの評価は 2013 年 8 月の産業応用部門全国大会(5)の発表で詳細に説明する予定である。この例のように制動条件の悪い箇所では、安全な制動動作への改良の分だけ、省エネルギー効果には逡減が見られた。

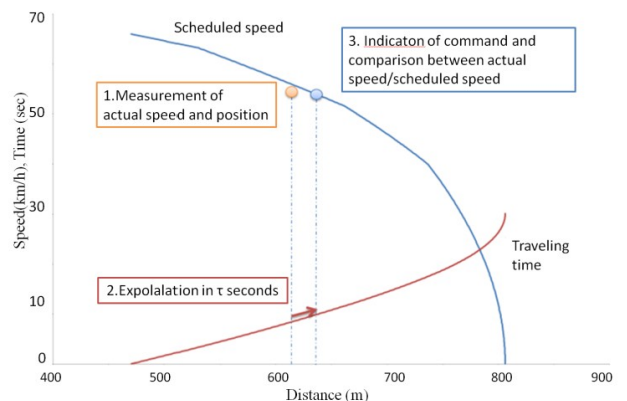
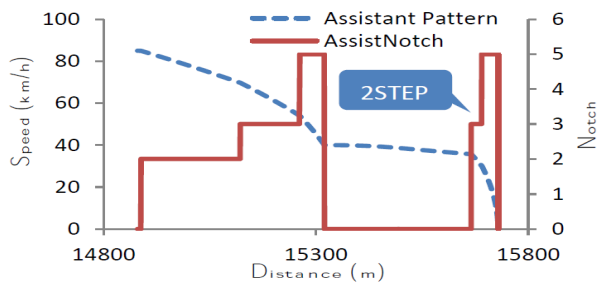
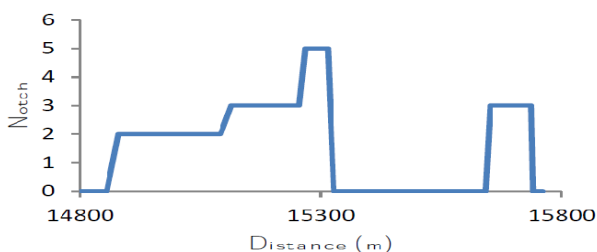


図 14 ブレーキ操作遅れ時間を補償するための支援前出しのためのデータベース読出の考え方

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



(a) Driver assistance



(b) Actual driver operation

図 15 到着駅直前に強い速度制限が存在する場合の制動ノッチ支援と応答

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

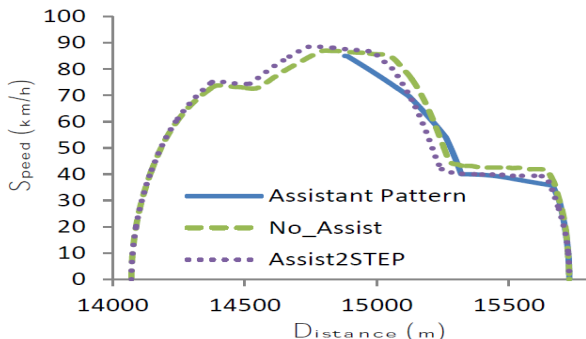


Fig. 16 Effects of the improved driver assistance: measured train run curve

図 16 改良した運転支援の効果: 走行曲線

6. リニアメトロ自動運転への展開

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、マニュアル運転を情報装置で支援するという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、単純に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ー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
- (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、最適ランカーブの実装が可能である。

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目指す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。

一方、現在までに普及しているATOは、最大力行-等速走行-最大減速を基本としているものが多く、省エネルギーの観点からは好ましくない。すなわち、次世代の「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。資料(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紹介している。

7. おわりに

本稿では、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た。ただし、そのような「悪い」ケースでは、省エネルギー効果は限定的となる。

そこで、そのような問題がそもそも存在しないATOへの展開の意義を整理した。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、リニア地下鉄への応用を例として具体的に検討したい。

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発表予定 2013年8月
- (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