

列車運転士の加減速操作支援に関する研究

日大生産工（院） ○清水 勇介 日大生産工 丸茂 喜高
日大生産工 綱島 均 鉄道総研 小島 崇

1. 緒言

日本の鉄道輸送は、安全性の高い輸送手段であるが、一度事故が発生すると大きな被害につながる危険性がある。過去に発生した脱線事故に着目すると、発生要因の一つに運転士のヒューマンエラーがあげられる。現在では様々な対策が実用化されているが、依然としてヒューマンエラーに起因する事故が発生しているのが現状である¹⁾。列車運転の多くは運転士の経験に委ねられており、列車運転時のヒューマンエラーを防止するためには、運転支援システムの開発が必要であると考えられる。

これまで、ヒューマンエラーによるオーバーランを防止するために駅停止時に運転士に対して、現在の減速度を維持した際に予想される停止位置を視覚的に呈示し、ブレーキ操作の判断の支援を行うシステムを提案した²⁾。列車運転シミュレータ実験により、このシステムを用いることで、運転士に心的負荷がかかった場合でも、ブレーキを段階的に緩め、弱い減速度で停止することが可能となった。ただし、このシステムはブレーキ操作により生じる減速度を用いて予想停止位置を計算するため、ブレーキ操作が遅れた場合には、オーバーランを防止できない。また、ブレーキ操作の開始が通常より早まった場合には、減速度が一定で減少することを想定しているため、運転時分が延びる可能性がある。そこで、想定した減速度から計算されるブレーキ開始位置を、視覚的に呈示する支援システムを提案し³⁾、運転士に心的負荷がかかった場合でも、ブレーキ操作を開始するタイミングや運転時分のばらつきを小さくすることを可能にした。さらにブレーキタイミングを変化させることで、運転時分を調節した支援を行うことが可能である⁴⁾。

これまでの惰行時や制動時のノッチ操作支援に加え、加速時におけるノッチオフ操作タイミングを運転士に対して知らせることにより、例えば、走行速度を上げ、ブレーキ操作のタイミングを遅らせるような回復運転の支援が可能になると考えられる。また、走行速度を下げることでエネルギー消費を抑えつつ、ブレーキ操作のタイミングを遅らせ、運転時分は守るような省エネ運転への支援も可能になると考えられる。そこで本研究では、

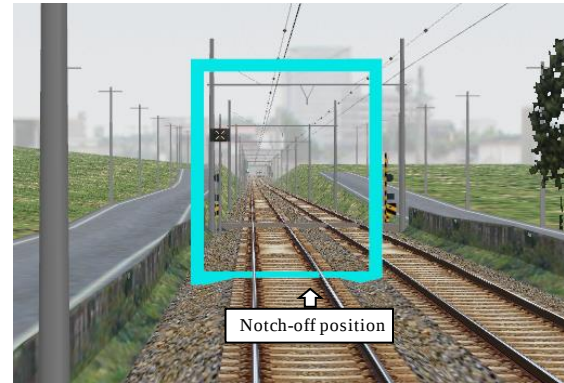


Fig.1 Image of notch-off position

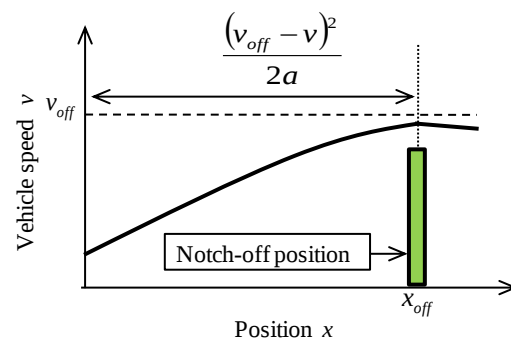


Fig.2 Schematic diagram of notch-off position

ノッチオフ位置を運転士に対して、視覚的に呈示する支援システムを提案し、走行速度とブレーキ操作のタイミングを調整することで、運転時分や運転行動に及ぼす影響を、列車運転シミュレータ実験により検討する。

2. ノッチオフ位置呈示

本研究では、Fig.1に示すように加速終了時のノッチオフ位置を運転士に対して視覚的に呈示する。これにより運転士が状況に応じて走行速度を変化させるための支援を行う。Fig.2にノッチオフ位置呈示の模式図を示す。ノッチオフ操作を行う速度（以下、ノッチオフ速度という）を v_{off} 、現在の自車の位置を $x(t)$ 、速度を $v(t)$ 、加速度を $a(t)$ 、とすれば、ノッチオフ位置 x_{off} は、(1)式で表される。

$$x_{off} = \frac{(v_{off} - v(t))^2}{2a(t)} - x(t) \quad (1)$$

ノッチオフ操作後、惰行時にはブレーキ開始位置³⁾を呈示する支援を行う。このシステムにおいて、予想される制動距離は、現在の速度とあらかじめ想定した一定の減速度（以下、想定減速度という）を用いて計算されている。想定減速度の値を変化させることでブレーキ操作を開始するタイミングを調整することが可能であり、値が大きいくほどブレーキタイミングは遅くなる。ノッチオフ速度を調整することで、走行速度を変化させることが可能であり、想定減速度によるブレーキ開始位置の調整⁴⁾と組み合わせることで、ブレーキタイミングのみを変化させた場合に比べ、より運転時分を短くすることや消費エネルギーの低減を行うために低い速度で走行しつつ運転時分を守った運転を行うことが可能であると考えられる。

また、再加速を行う際には、再びノッチオフ位置の呈示を行うが、ブレーキ開始位置を超えた場合には、目標とする停止位置に停車することができなくなる可能性がある。そこで、ノッチオフ位置が、ブレーキ開始位置よりも目標停止位置側に呈示される場合には、ブレーキ開始位置支援を呈示することによって、ブレーキ操作の遅れによるオーバーランを防止する。

さらに、減速時には予想停止位置呈示によるブレーキ操作の支援²⁾を行う。このシステムは、現在の速度と加速度を用いて計算される予想停止位置を、呈示される位置によって色分けをして呈示することで、ブレーキ操作の判断の支援も行う。

3. 実験方法

本研究では、列車の運転を模擬した列車運転シミュレータ⁵⁾を用いて実験を行った。Fig.3 に運転シミュレータの外観を示す。このシミュレータは定置型であるため、加速度などの体感情報は得られないが、2 台のプロジェクタを用いることによって実験参加者が偏光メガネを着用することで、立体視による前方視界を生成していることを特徴としている。

運転課題は、実路線を模擬した 4 駅間（それぞれの駅間を第 1 区間から第 3 区間とする）の 3 区間を 1 走行として運転し、各駅にある目標停止位置に列車を停止させるものとした。各駅間の路線長（規定速度）は、第 1 区間が 974m（80km/h）、第 2 区間が 828m（75km/h）、第 3 区間が 498m（50km/h）である。

実験は、標準、回復、省エネパターン⁶⁾の 3 条件についてそれぞれ 3 走行ずつ、計 9 走行するものとした。各パターンにおけるノッチオフ速度と想定減速度の組み合わせを表 1 に示す。また各パターンの特徴と走行条件を以下に示す。



Fig.3 Overview of train-driving simulator

Table 1. Condition of experiment pattern.

Running pattern	Notch off velocity	Assumed deceleration
Standard	Middle	Middle
Time recovering	High	High
Energy saving	Low	High

- 標準パターン
ノッチオフ速度は実路線の規定速度と同様とし、想定減速度は、2.5km/h/s とする。
- 回復パターン
回復運転を想定し、走行速度を高く設定して、運転時分の短縮を行う。ノッチオフ速度は、規定速度+5km/h とし、想定減速度は、予備実験によりブレーキ操作のタイミングを遅らせ、かつオーバーランしない値として、2.65km/h/s とした。
- 省エネパターン
消費エネルギーを低減させるため、ノッチオフ速度を規定速度-5km/h とし、想定減速度は、走行速度の低下による運転時分の延長を防ぐため、ブレーキ操作のタイミングを遅らせた、2.65km/h/s とした。

実験参加者は、実際の列車の運転資格はないが、シミュレータの運転に習熟した 20 代男性 3 名である。実験参加者には事前に実験の趣旨説明と合わせ、インフォームドコンセントを得た。

4. 実験結果

Fig.4 に目標停止位置までの距離に対する速度の推移を示す。ここでは一例として、実験参加者 A の第 1 区間の結果を示し、それぞれの条件において 3 走行分の結果を示す。いずれの結果も、停止時には目標とする停止位置付近に停止した結果である。横軸は目標停止位置までの距離を示し、目標停止位置の手前を負とした。縦軸に

は速度を示す。実線、破線、点線は、それぞれ標準、回復、省エネパターンの結果を示す。この図より、回復パターンではノッチオフ速度が高いため、標準パターンに比べ、走行速度が高くなっており、同様に、省エネパターンでは、ノッチオフ速度が低いため、走行速度が低くなっていることがわかる。また、減速時に着目すると、標準パターンに比べ、回復、省エネパターンは、想定減速度が大きいため、同じ速度について見ると、より高い速度で推移しており、強い減速を行っている。

ノッチオフ位置を呈示することで、ノッチオフ速度に対し、適切な速度で加速操作を終了しているか検討する。Fig.5 に、ノッチオフ速度とノッチオフ時の車両速度の関係を示す。横軸は、パターンごとに設定したノッチオフ速度を示し、縦軸は、ノッチオフ操作時の車両速度を示す。また、点線は傾き1の直線を示している。この図より、パターンごとに設定したノッチオフ速度に応じて、ノッチオフ時の速度を変化させていることがわかる。また、どのパターンも傾き1の線付近に分布しており、適切なタイミングで加速操作を終了していることがわかる。

想定減速度の変化によって、ブレーキ開始位置が変化する際に、適切にブレーキ操作を開始しているか検討する。Fig.6 に、想定減速度と所要減速度の関係を示す。横軸に想定減速度、縦軸にブレーキ操作開始時の所要減速度を示し、点線は傾き1の直線を示している。所要減速度とは、現在の位置から、一定の減速度で目標停止位置へ停止するために必要な減速度である⁹⁾。つまり、所要減速度はブレーキ操作のタイミングを示しており、ブレーキ操作の開始が早い場合には値が小さくなり、遅い場合には値が大きくなる。この図をみると、標準パターンでは、点線付近に分布しており、ブレーキ開始位置呈示に従った運転ができていていることがわかる。しかし、回復、省エネパターンでは、想定減速度に対して、所要減速度が小さくなっていることがわかる。これらのパターンはブレーキタイミングを遅らせる条件であり、実験参加者がある程度余裕を持って、呈示しているブレーキ開始位置よりも早いタイミングでブレーキ操作を開始していると考えられる。しかし、どちらのパターンにおいても、標準パターンに比べるとブレーキ操作のタイミングは遅くなっており、呈示したパターンに沿った運転はできていると考えられる。

走行パターンの違いが運転時分に及ぼす影響について検討する。Fig.7 に、ノッチオフ速度と運転時分の関係を示す。横軸にノッチオフ速度を示し、縦軸に運転時分を示す。この図より、回復パターンでは、すべての走行で、標準パターンよりも運転時分が短くなっていること

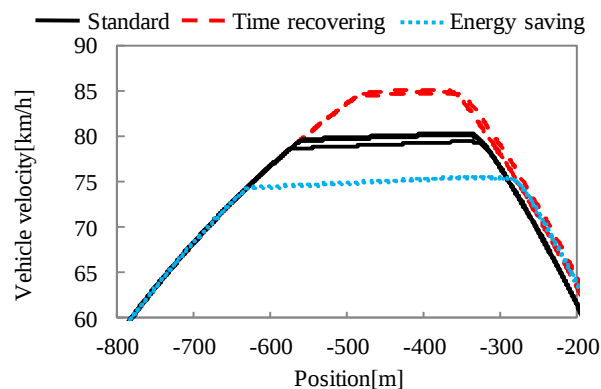


Fig.4 Transition of vehicle velocity (Participant A, Section 1)

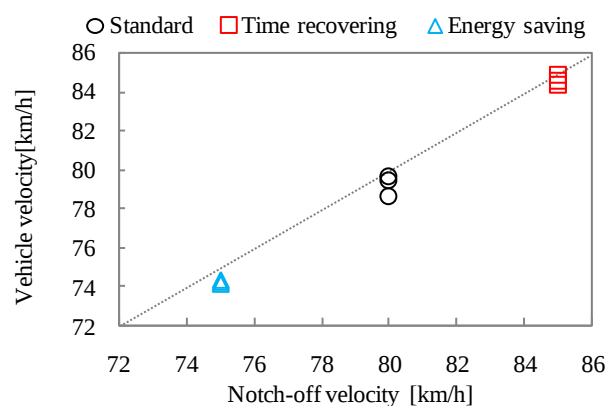


Fig.5 Relation between notch-off and vehicle velocities (Participant A, Section 1)

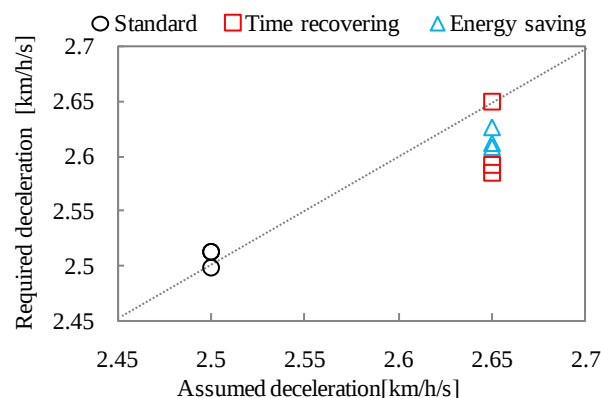


Fig.6 Relation between assumed and required decelerations (Participant A, Section 1)

がわかる。同様に、Fig.8 に想定減速度と運転時分の関係を示す。横軸に想定減速度を示し、縦軸に運転時分を示す。この図より、回復パターンでは、標準パターンに比べて想定減速度の値が大きく、ブレーキ操作のタイミングが遅くなっていることから、運転時分も短くなってい

ることがわかる。省エネパターンでは、走行速度が遅い条件であるが、想定減速度の値が大きく、ブレーキ操作のタイミングが遅いことで、標準パターンと同等の運転時分で走行することが可能であることがわかる。

運転時分の平均に着目すると、回復パターンは、標準パターンに比べ、2.9s 短くなっており、支援システムを用いることで、運転時分を短縮する回復運転の支援が可能となることがわかる。また、省エネパターンでは、ノッチオフ速度を下げ、走行速度が低くなっているものの、標準パターンと同等の運転時分で走行が可能であることがわかる。平均に着目すると、省エネパターンは、標準パターンに比べ、0.52s 短くなっており、走行速度を下げている場合においても、運転時分を守った運転が可能であることがわかる。

他の実験参加者でも同様の傾向が確認された。しかし、他の区間に着目すると、区間によっては、ノッチオフ時の速度差よりブレーキタイミングの方が運転時分に与える影響が大きいと考えられる区間が存在した。このことから、支援システムを用いた際の運転時分に大きな影響を与える要因のひとつに、惰行運転を行う距離の長さが関係している可能性がある。よって、今後は路線長も考慮して、支援システムの有効性を検討する必要がある。

5. 結語

本研究では、これまでに提案したブレーキ開始位置提示、予想停止位置提示による支援に加え、新たに加速時のノッチオフ位置を提示する支援システムを提案した。列車運転シミュレータを用いた実験により以下の結論を得た。

1. 加速時にノッチオフ位置を提示することで、パターンごとのノッチオフ速度に応じて、適切な速度で加速操作を終了することが可能になり、走行速度を調整する支援が可能となった。
2. 回復パターンでは、ノッチオフ速度を高くして、走行速度を上げ、さらに想定減速度を大きくして、ブレーキ操作のタイミングを遅らせることで、標準パターンに比べ、運転時分を短縮した回復運転の支援を行うことが可能になった。
3. 省エネパターンでは、ノッチオフ速度を低くして、走行速度を下げることによって、エネルギー消費を低減する運転への支援が可能となった。また、想定減速度を大きくすることで、走行速度を下げた場合でも、標準パターンと同等の運転時分での走行が可能になった。

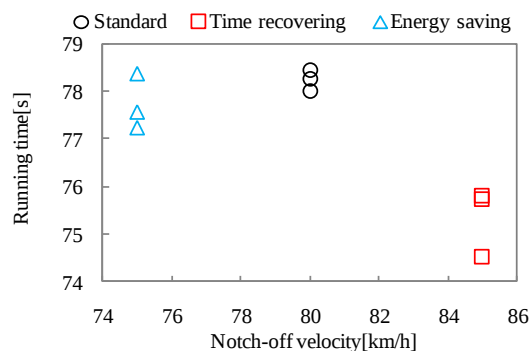


Fig.7 Relation between notch-off velocity and running time (Participant A, Section 1)

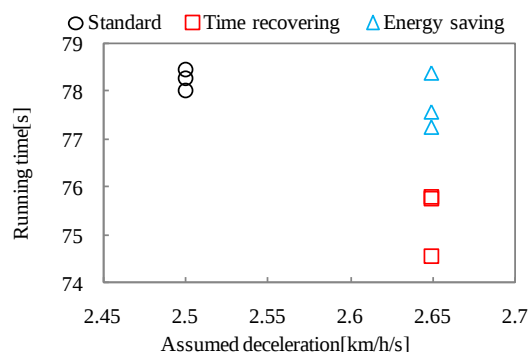


Fig.8 Relation between assumed deceleration and running time (Participant A, Section 1)

「参考文献」

- 1) 四ノ宮章, “ヒューマンエラーによる事故・故障を防止する”, 第 16 回鉄道総研講演会要旨集, (2003), pp.59-66.
- 2) 丸茂喜高ほか, “ジャーク一定減速を想定した列車運転士のブレーキ操作支援システム”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.791(2012), pp. 2416-2425.
- 3) 清水勇介ほか, “状況に応じた列車運転士のブレーキ開始支援システムに関する研究”, 第 19 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, (2012), pp.565-568.
- 4) 清水勇介ほか, “列車運転士のブレーキ開始支援システムが運転時分に及ぼす影響”, 日本機械学会 2013 年度年次大会 DVD 論文集, (2013), DVD-ROM.
- 5) 綱島均ほか, “人間-機械系評価用 列車運転シミュレータの開発と脳機能測定への適用”, 信頼性, Vol.26, No.7 (2004), pp. 626-627.
- 6) Marumo, Y., et al, “Analysis of Braking Behavior of Train Drivers to Detect Unusual Driving”, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol.3, No.1(2010), pp.338-348.