

列車運転士のブレーキ操作支援システム

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

鉄道輸送は地球環境への負荷が低い反面、一度に多くの人員を輸送するという性質上、より一層の安全性が求められる。過去に発生した脱線事故に着目すると、運転士の運転以外への注意により生じた速度超過によるものなど、ヒューマンエラーに起因する部分が大きい¹⁾。

筆者らは、ヒューマンエラーによるオーバーランを簡便に防止するための手法の一つとして、駅停止時に予想される停止位置を呈示する運転支援システムを提案した²⁾。このシステムは、運転士に対して、予想される停止位置をリアルタイムに視覚的に呈示することで、ブレーキ操作の支援を行う。運転シミュレータ実験により、支援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においても、ブレーキ操作が円滑に行われることを確認した。さらに、実際のブレーキ操作では、目標とする停止位置に近づくにつれ、ブレーキを徐々に緩めて停止することが一般的であることから、減速度が一定の割合で減少することを考慮した支援を行うシステムを提案した³⁾。この支援システムを用いることで、ブレーキを段階的に緩め、停止時に弱い減速度で停止することが可能になった。しかし、いずれのシステムにおいても、予想停止位置の計算には、ブレーキ操作によって生じる減速度を用いるため、ブレーキ操作の開始が遅れてしまった場合には、オーバーランを防止することができない。また、ブレーキ操作の開始が通常より早まった場合は、運転時分が延びる可能性がある。さらにブレーキ開始位置は、軌道の粘着係数の変化などによって変化するため、状況に応じて変える必要があるが、そのようなブレーキ開始位置を調節する操作は運転士に委ねられている。よって、オーバーランを防止しかつ運転ダイヤを守るためには、状況に応じた適切なブレーキ開始位置を知らせる必要がある。

そこで本研究では、状況に応じた適切なブレーキ開始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、その有効性について、列車運転シミュレータを用いた実験により検討する。

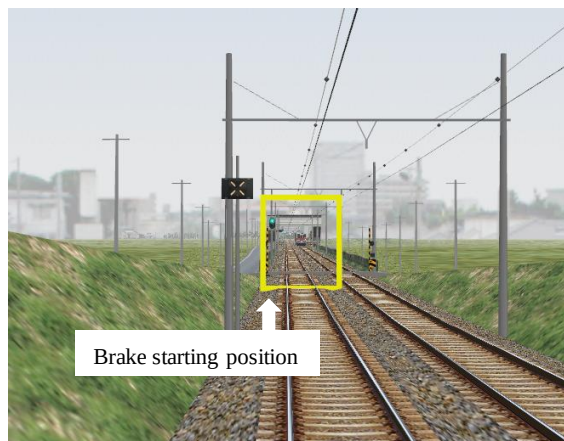


Fig.1 Image of brake starting position

2. ブレーキ開始位置呈示

本研究で提案するシステムは、図1に示すように適切なブレーキ開始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適切な位置からブレーキ操作を開始するための支援を行う。図2にブレーキ開始位置呈示の模式図を示す。目標とする停止位置 x_d 、現在の速度を $v(t)$ 、あらかじめ想定した減速度を a とすれば、ブレーキ開始位置 $x_b(t)$ は、(1)式で表される。

$$x_b(t) = x_d - \frac{v^2(t)}{2a} \quad (1)$$

なお、ダイヤ作成の基準となる運転曲線において、駅停止時の減速度は一定とみなした方法⁴⁾が採用されていることをもとに、減速度 a は、あらかじめ想定した一定の値とした。さらに、状況に応じて減速度 a の値を変更することで、ブレーキ開始位置を調節する支援を行う。駅停止時の平均減速度が概ね2.5～3.7km/h/s程度の値をとる⁴⁾ことと、予備実験において運転時分が基準とする運転時分に一致するような減速度となった結果より、想定した減速度は、軌道が乾燥状態の場合は2.5km/h/sとした。また、軌道が湿潤状態の場合には、粘着係数の値が低下し、発生する減速度が小さくなることから、乾燥状態の場合と比べ減速度の平均値が小さくなる。そこで、予備実験において、乾燥状態と同程度安全に停止するための余裕⁵⁾を持って走行できる減速度として、湿潤状態で想定した減速度は、2.2km/h/sとした。

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⁶⁾を用いて実験を行った。図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。

実験は、粘着係数が乾燥状態と湿潤状態の2条件と、支援システムの有無による2条件を組み合わせた計4条件で行った。実験順序は乾燥状態で支援あり、なしの順に走行した後、湿潤状態で支援あり、なしを走行するものを1試行とし、2試行を行った。また、支援システムの有無に関わらず、ブレーキ操作を開始した後は、予想停止位置呈示による支援³⁾を行った。

実験参加者は事前にインフォームドコンセントを得た20代男性3名である。どの実験参加者も運転資格はないが、シミュレータの運転に習熟した上で、支援システムについて説明し、支援あり・支援なしともに走行練習を行った。

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。列車の速度は、実路線の規定速度とし、第1区間は80km/h/s、第2区間は75km/h/s、第3区間は50km/h/sとした。

ヒューマンエラーは、運転士の運転以外への注意や心的負荷がかかっている状態で発生しやすい。そこで、副次課題として心的負荷を想定した暗算課題を実験参加者に課した。暗算課題は、3秒毎に音声で呈示される1桁の数字に対して、新たに呈示された数字を足し合わせて、1の位を回答するもの⁷⁾である。この暗算課題を、駅を発車して加速が終了後、惰性走行に入ってから駅停止までの間、実験参加者に課した。また、本研究では支援システムの有無によるブレーキ操作への影響を検討することから、運行ダイヤのような時間的制約は設けなかった。

4. 実験結果

4.1. ハンドル操作と予想停止位置の推移の比較

図4に乾燥状態と湿潤状態における全実験参加者の目標停止位置までの距離に対するハンドル操作の推移を示す。ここでは一例として、第1区間の結果を示す。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。縦軸はハンドル操作を表しており、この数値が高くなるほど強いブレーキがかかることを意味する。実線はブレーキ開始位置を呈示する支援システムを用いた場合、破線は用いない場合の結果を示す。この図をみ

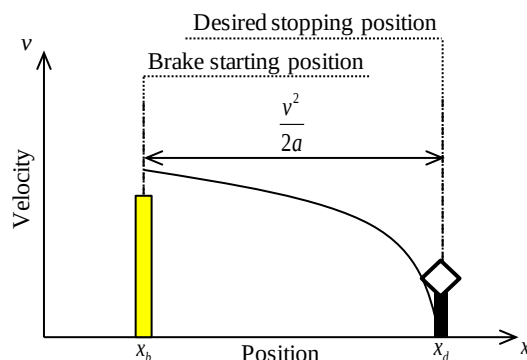
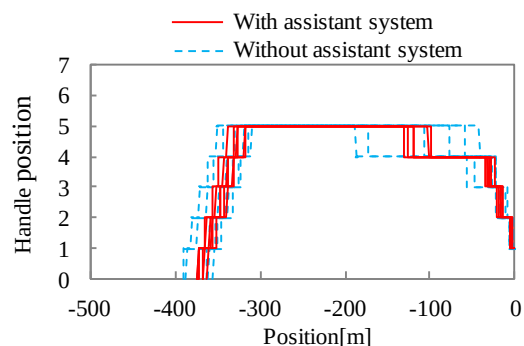


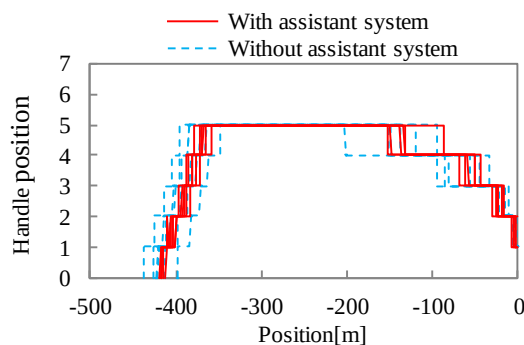
Fig.2 Schematic diagram of brake starting position



Fig.3 Overview of train-driving simulator



(a) Dry condition



(b) Wet condition

Fig.4 Transition of brake handle position (Section1)

ると、いずれの状態においても支援システムを用いた場合には、実験参加者によらず、ブレーキ開始位置のばらつきが小さくなっていることがわかる。それに対し、支援システムを用いない場合には、ブレーキ開始位置が前後にばらついていることがわかる。

次に、列車が安全に停止する余裕を持って停止できているかどうか確認するために、予想停止位置の推移について検討する。予想停止位置とは、等加速度運動を想定した式から、現在の減速度と速度を用いて計算され²⁾、値が小さいほど、列車は安全に停止する余裕を持つことを示している。図5に乾燥状態と湿潤状態における全実験参加者の目標停止位置までの距離に対する予想停止位置の推移を示す。横軸は目標停止位置までの距離、縦軸は予想停止位置を示す。縦軸は目標停止位置をゼロとし、現在の減速度を維持すると目標停止位置を超えて停止する場合を正、手前で停止する場合を負とした。図5(a)をみると、支援システムを用いた場合、-300~-100m 付近の間で、実験参加者によらず予想停止位置がまとまって推移しており、安全に停止する余裕を同程度持って推移していることがわかる。それに対し、支援システムを用いない場合にはばらついて推移していることがわかる。次に、図5(b)をみると、減速度の立ち上がりが遅くなっているために、予想停止位置が小さくなるのも遅くなっていることがわかる。また、-300~-100m 付近の間では、支援システムを用いた場合には、同じような推移をしているが、支援システムを用いない場合には、ばらつきが大きくなっていることがわかる。

4.2. ブレーキ開始位置の定量的な評価

適切なブレーキ開始位置は速度によって変化するため、規定速度の違う区間では位置による比較ができない。また、同じ区間においても、走行速度は毎回違う可能性がある。そこで、適切にブレーキ操作を開始したか比較するために所要減速度に着目する。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⁸⁾。つまり、かけ始め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。図6にブレーキ操作を開始した位置における所要減速度の実験参加者3名6走行分の平均を示す。図6(a)の乾燥状態では、全区間において支援システムの有無で所要減速度の平均値に大きな差は確認されなかった。しかし、標準偏差に着目すると、支援システムを用いた場合には全区間で低減する傾向が見られた。また図6(b)の湿潤状態も同様に支援システムの有無で所要減速度の平均値に大きな差は確認されなかったが、第1区間と第3区間で標準偏差が低減した。このことから、状況や規定速度が変わつ

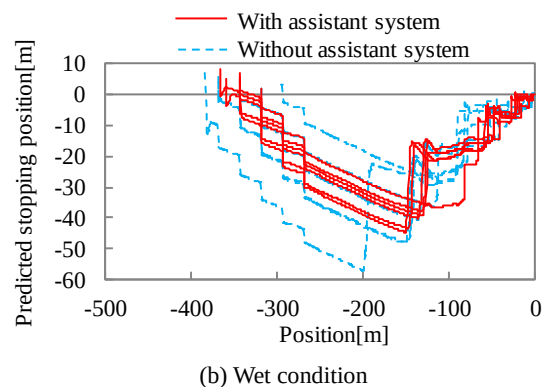
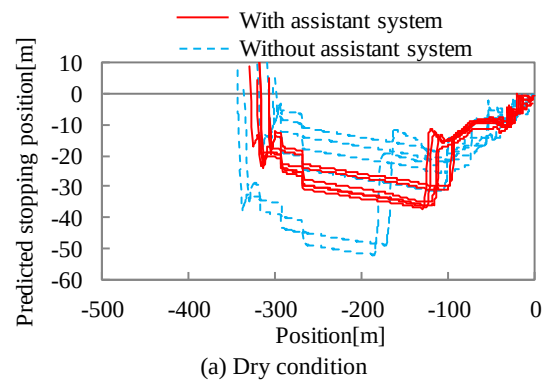


Fig.5 Transition of predicted stopping position (Section1)

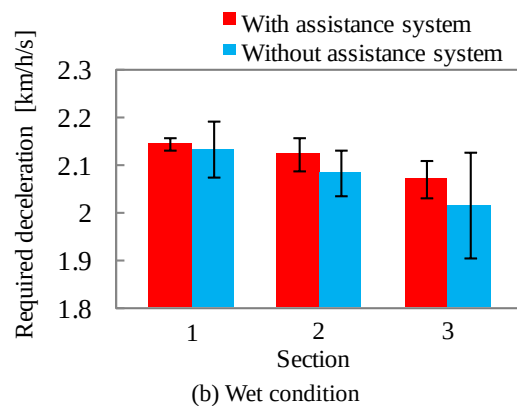
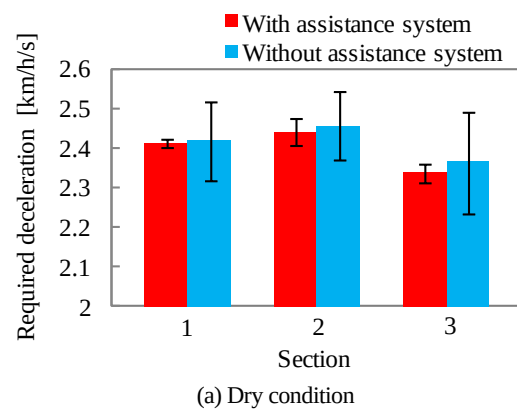


Fig.6 Required deceleration

た場合でも、適切な位置からブレーキ操作を開始することが可能になることを確認した。

不適切な位置からブレーキ操作が開始された場合、運転時分に影響を与える可能性がある。そこで、実験の主課題において時間的な制約は設けなかったが、運転時分についても検討することとする。区間や軌道の状態がいずれの場合でも、支援システムの有無によって運転時分の平均値に大きな違いは確認されなかった。ここで、運転時分のばらつきについて検討するため、標準偏差に着目する。図7に実験参加者3名6走行分の運転時分の標準偏差を示す。図7(a)の乾燥状態では、支援システムを用いることで、全区間で標準偏差が低減しており、特に第1区間と第3区間で低減している。次に図7(b)の湿潤状態も同様に、支援システムを用いることで、全区間で標準偏差が低減している。また、いずれの状態においても支援システムを用いない場合には、第3区間で標準偏差が大きくなっていることから、速度が遅い場合には、ブレーキ開始位置のばらつきの影響を受けやすいと考えられる。

7. 結語

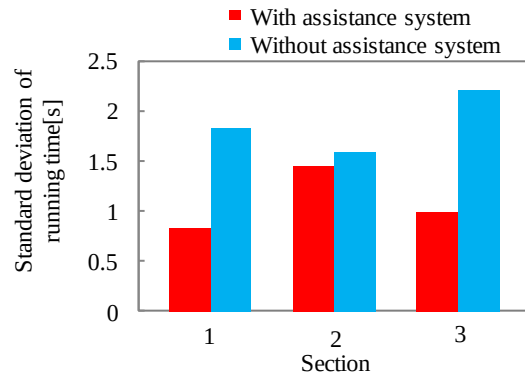
本研究では、駅停止時に列車運転士に対して、状況に応じた適切なブレーキ開始位置を知らせる支援システムを提案し、その有効性について列車運転シミュレータを用いた実験により検討した結果、以下の結論を得た。

1. 支援システムを用いることで、軌道の粘着係数の変化など列車の特性が変化する場合においても、状況に応じて適切な位置からブレーキ操作を開始することが可能になった。
2. ブレーキ操作の開始位置のばらつきが低減することで運転時分のばらつきも低減する傾向があることを確認した。また、速度が遅い場合には、ブレーキ開始位置の影響が大きくなると考えられる。

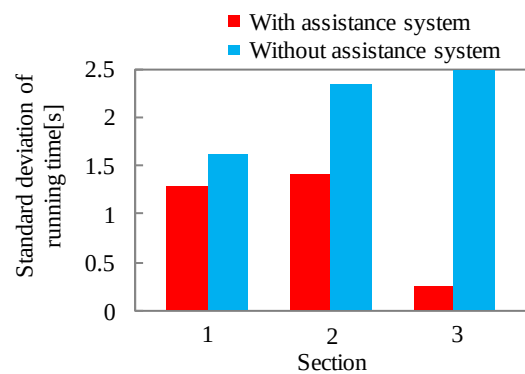
今後は、運行ダイヤなどの時間的制約を設けた場合においても、本研究で提案した支援システムが有効であるか検討する予定である。

「参考文献」

- 1) 四ノ宮章, “鉄道安全へのヒューマンファクター研究の取り組み”, 信頼性, Vol. 23, No.2(2001), pp.186-193.
- 2) 丸茂喜高ほか, “列車運転士の駅停止支援システムに関する研究(予想停止位置呈示による運転士の認知・判断支援)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 770 (2010), pp.2500-2507.



(a) Dry condition



(b) Wet condition

Fig.7 Standard deviation of running time

- 3) 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.
- 4) 生田憲人ほか, “入駅及び速度制限区間通過時の適正なブレーキ扱による列車遅延防止法 第2報 駅間の短い通勤電車の停止ブレーキ操作に関する評価”, 第18回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集, (2011), pp.527-530.
- 5) 清水勇介ほか, “列車の特性変化が運転士のブレーキ操作に及ぼす影響”, 関東学生会第51回学生員卒業研究発表講演前刷集, (2012), pp.539-540.
- 6) 網島均ほか, “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.
- 7) Gronwall, D. M. , “Paced Auditory Serial-Addition Task: A Measure of Recovery from Concussion”, Perceptual and Motor Skills, Vol. 44, No.2(1977), pp.367-373.
- 8) 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.