

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 安全性と乗り心地から最適なブレーキパターンを探る

列車内では、駅に停車するたびにブレーキを体感します。その多くのブレーキの中で、ほとんど気にならない時もあれば、姿勢がよろけて不快だと感じる時もあります。ブレーキのどのような違いが、姿勢状況や乗り心地の違いを生むのでしょうか。ここでは、私たちがこれまでに行ってきたブレーキ時の安全性、乗り心地の研究で得られた知見に基づいて、「最適」なブレーキパターンについて考えてみたいと思います。



遠藤 広晴  
Hiroharu Endoh  
人間科学研究部  
人間工学研究室  
副主任研究員  
[専門分野] 人間工学

## ブレーキ時の減速度とジャーク

ブレーキハンドルを一定のレベル(ノッチ)に固定するとほぼ一定の減速度が続きますが、その減速度に達するまでは概ね一定の変化率で減速度が増加します。また、ブレーキハンドルを戻すと概ね一定の変化率で減速度は減少します。このブレーキ操作による減速度の時間変化を単純化して示したのが図1です。ところで、同じブレーキでも、素早くかけられるのと、ゆっくりかけられるのとではブレーキから受ける力の感じ方が違う、というのは直感的に理解できると思います。これを図1でいえば、減速度 $\beta$ が同じ大きさでも、その変化の速さ(ジャーク $j$ [m/s<sup>3</sup>])によって力の感じ方が違い、結果的に乗客の姿勢状況や乗り心地に

違いが生じます。

今後、きめ細かなジャーク制御が可能となれば、安全性や乗り心地の観点からより適切な減速度とジャークの組み合わせ(以後、「ブレーキパターン」と呼びます)を選定できるようになるでしょう。ここでは、今後のブレーキ制御技術の進展を見据え、将来のブレーキシステムが目指すべき「最適」なブレーキパターンについて考えてみましょう。

## 減速度とジャークの影響

安全性や乗り心地から最適なブレーキパターンを検討するためには、減速度とジャークが人に及ぼす影響に関する定量的な知見が必要です。このため、これまでも営業線を活用した実験が行われていました。しかし、

現行の営業車のジャーク制御や減速度範囲の限界、そして、ブレーキパターンが線路状況に依存してしまう再現性の問題などがあるため、十分な範囲のデータを安定して獲

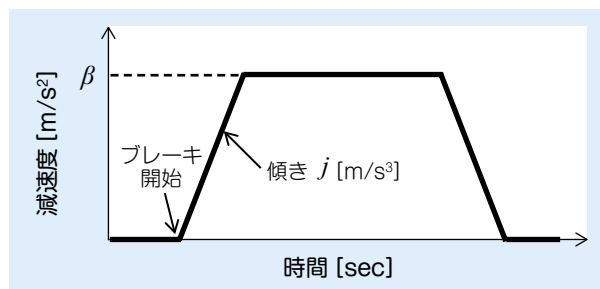


図1 ブレーキ減速度波形

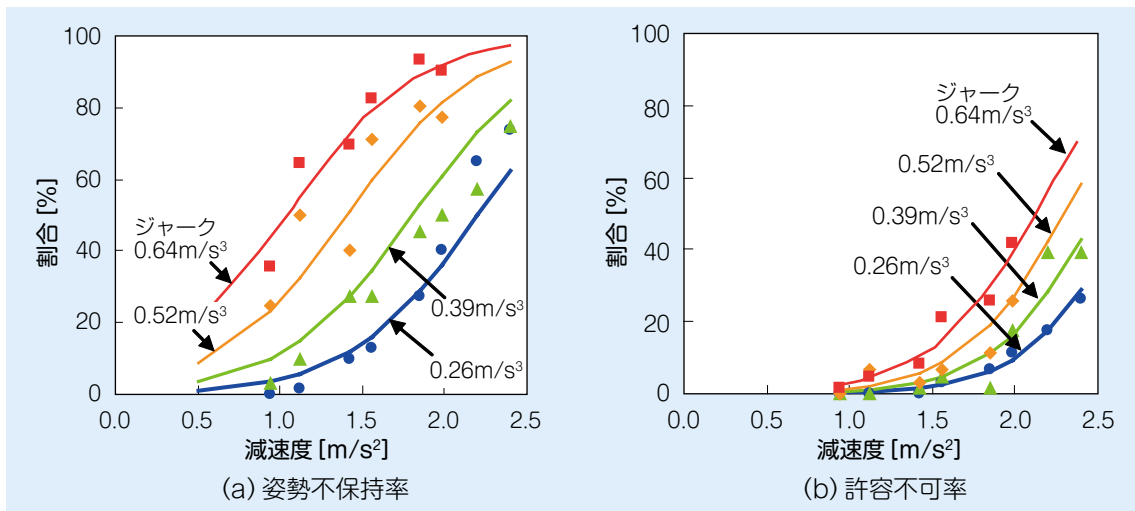


図2 減速度とジャークによる体感実験結果

得することが非常に困難でした。

そこで、私たちは、現在の在来方式鉄道を超えるジャーク制御性能を持ち、かつ再現性のあるブレーキを実現できる、超電導リニア技術を活用したブレーキの体感実験を行いました<sup>1)</sup>。この実験では、健常な成人31人が参加し、さまざまなブレーキパターンを体感した上で、体感時の姿勢状況や乗り心地に関するアンケートに回答しました。ブレーキ体感中の姿勢は、列車進行方向を向いて立った状態としました。これは、乗り心地を評価する際によく採用されている姿勢です。条件として実施したブレーキパターンは、図1のような等脚台形状の減速度波形です。現行の営業列車での減速度範囲をカバーし、かつ将来的なジャーク制御技術を想定して0.3～0.6m/s<sup>3</sup>付近を0.1m/s<sup>3</sup>きざみで設定しました。

ブレーキの人への影響には、「姿勢がふらつく」などの物理的な影響と、「不快に感じる」といった心理的な影響があります。安全性の観点からは、物理的な影響に着目し、ブレーキによりその場に立ってられず、踏み出したり、手すりにつかまったりした被験者の割合(以後、「姿勢不保持率」)を調べました。乗り心地の観点から

は、心理的な影響に着目し、駅に停車するためのブレーキとして「許容できる」、「許容できない」の2段階評価のうち、「許容できない」とした被験者の割合(以後、「許容不可率」)を調べました。なお、「許容不可率」は、乗り心地の悪さの指標としてこれまでも多く用いられてきており、かつ比較的安定した指標と考えられています。

図2に実験結果の例を示します。姿勢不保持率、許容不可率とも、減速度およびジャークが大きいほど割合が増加しています。ジャークに関しては、0.1m/s<sup>3</sup>程度のわずかな増加が、人の姿勢状況と乗り心地に大きな影響を及ぼしていることがわかります。例えば、減速度1.4m/s<sup>2</sup>では、ジャークが0.26m/s<sup>3</sup>から0.64m/s<sup>3</sup>に増加すると、姿勢不保持率は60ポイントも増加しています。図2(a)は、ジャークを低

く抑えることで、乗客の安全性を大幅に改善できることを示唆しています。なお、図2に描かれた曲線は、統計的な分析により求めた推定曲線で、これを基に種々のブレーキパターンに対する姿勢状況と乗り心地を定量的に予測・評価することができます。

### 混雑率の影響

前節は乗客同士の干渉がないことを前提とした実験でした。しかし、ラッシュ時の通勤列車のような混雑した車内では、ブレーキ時に他の乗客と接触することなどが、姿勢状況や乗り心地に影響しそうです。そこで、鉄道総研が所有する車内快適性シミュレーターを活用して、混雑率(※参照)の影響を調べるための実験をしました。この実験の被験者は、週4日以上、通勤列車を利用している健常な成人60人でした。

#### ※ 混雑率

- 混雑率の目安は以下の通りです(国土交通省鉄道局公式HPより引用\*)。
- 100%：定員乗車(座席につくか、吊革につかまるか、ドア付近の柱につかまることができる)。
- 150%：広げて楽に新聞を読める。
- 180%：折りたたむなど無理をすれば新聞を読める。
- 200%：体がふれあい相当圧迫があるが、週刊誌程度なら何とか読める。
- 250%：電車がゆれるたびに体が斜めになって身動きができません、手も動かさない。

※ [http://www.mlit.go.jp/tetudo/toshitetu/03\\_04.html](http://www.mlit.go.jp/tetudo/toshitetu/03_04.html)

シミュレーターの客室に床面積1.2m<sup>2</sup>の小部屋を設置し、**図3**のように、小部屋にそれぞれ6人、10人の被験者を配置して、150%および250%相当の混雑率を模擬しました。150%では前後方向の距離にはまだ少し余裕がありますが、250%では余裕がなく、他の被験者と常に接触する状況になります。それぞれの混雑率条件でブレーキ時の減速度パターンを模擬的に発生させました。被験者は、列車進行方向を向いて立ち、ブレーキを体感して、そのときの姿勢状況や乗り心地に関するアンケートに回答しました。また、ブレーキ体感中の姿勢の動きを把握するために、被験者の頭部の揺れ具合をビデオ画像から解析しました。



図3 小部屋内の被験者の様子

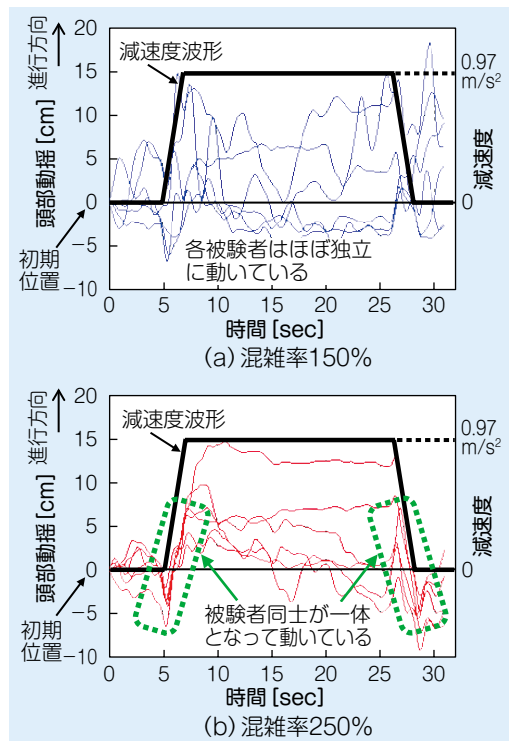


図5 頭部動揺(6名分)の例  
(ブレーキパターン:  $\beta=0.97\text{m/s}^2$ ,  $j=0.54\text{m/s}^3$ )

各ブレーキパターンに対する姿勢不保持率を**図4 (a)**に、許容不可率を**図4 (b)**に示します。混雑率150%, 250%ともに、減速度およびジャークが大きいほど割合が増加しています。ここで、同一減速度におけるジャークの影響に着目すると、混雑率250%条件では、混雑率150%条件よりも低い減速度でジャークの影響が強く現れているのがわかります。ジャークの影響が強く現れるのは、姿勢調節を行わないと姿勢が保持できなくなる減速度付近と考えられますが、その減速度は個人の体格や筋力によります。ただし、**図5**の被験者の頭部の動きが示すように、高い混雑状況では被験者同士が干渉し、ある程度一体となった動きを余儀なくされるため、姿勢保持能力の低い被験者の影響をより受けやすい状況にあると考えられます。このため、混

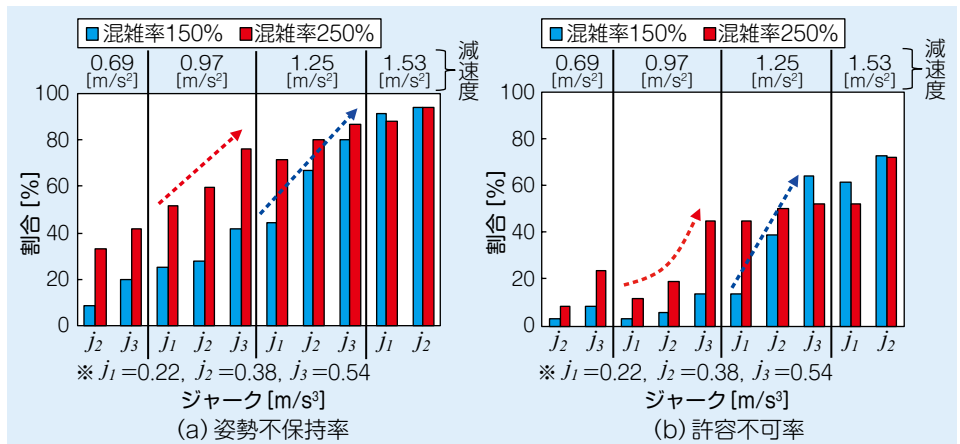


図4 車内快適性シミュレーターでの体感実験結果

雑率250%では、より低い減速度の段階でジャークの変化が姿勢不保持率や許容不可率に強く影響したものと考えられます。

以上より、高い混雑状況においても減速度だけでなくジャークが姿勢状況や乗り心地に影響し、その影響は比較的低い減速度において顕著であることがわかりました。この結果は、車内が混雑した状況でブレーキをかける場合は、その減速度が低い場合でも、高い

ジャークが発生しないようにコントロールすることの重要性を示唆しています。

### 最適なブレーキパターンを考える

2つの実験結果から、同じ減速度ではジャークがより低い方が、姿勢保持や乗り心地の面で有利であることがわかりました。ただし、現実的な問題として、駅に停車する状況や、車外の障害物との衝突を回避する状況など、ブ

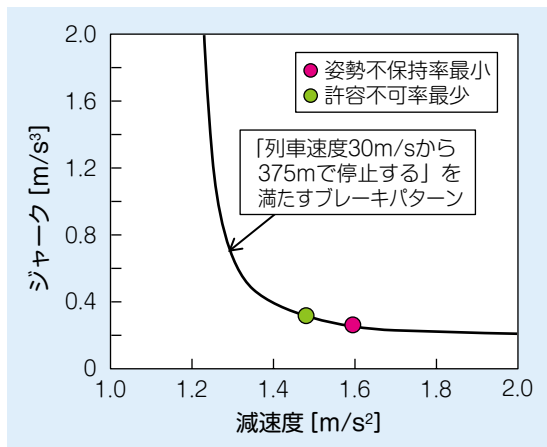


図6 制約を満たすブレーキパターン

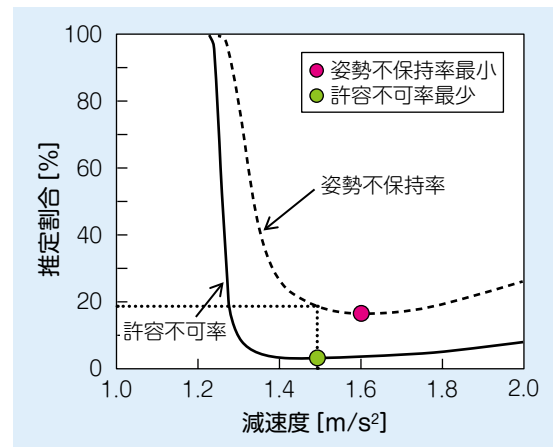


図7 姿勢不保持率と許容不可率の推定値

ブレーキ時の状況に応じて停止距離に制約があります。この制約下では、ジャークを低くした場合は減速度を高くする必要があります。そこで、このようにブレーキに課せられる制約を満足した上で、乗客にとって安全性と乗り心地の面から「最適」なブレーキパターンを選定する方法について検討します。

ここでは、ブレーキに課せられる制約として、「列車速度30m/sから375mで停止する」という状況を想定します。これは、駅停車時のブレーキをイメージした想定です。ただし、列車内は混雑しておらず、乗客間の干渉は無いとします。

まずは、この制約を満たすブレーキパターンを計算します。候補となるブレーキパターンは複数存在し、理論的には、図6に示した曲線上の全てのブレーキパターンが制約を満たします。

次に、この曲線上のブレーキパターンに対して、図2のデータに基づいて、姿勢不保持率と許容不可率を推定したものが図7です。この例では、減速度 $1.60\text{m/s}^2$ 、ジャーク $0.26\text{m/s}^3$ で姿勢不保持率が最小値17%となり、減速度 $1.48\text{m/s}^2$ 、ジャーク $0.31\text{m/s}^3$ で許容不可率が最小値2.6%となります。許容不可率を最小にするブレーキパターンと比べて、姿勢不保持率を最

小にするブレーキパターンは若干減速度が高く、ジャークが低い値になっています。ジャークが低いほど、姿勢を傾けるなど姿勢調節をする余裕があるので、より高い減速度まで姿勢を保持することができます。とはいえ、姿勢を保持できるぎりぎりまで踏ん張っていると、負担も大きく感じ、乗り心地も悪く感じるでしょう。姿勢が保持できないことによる不快感と姿勢保持の負担による不快感の両者が絡み合っ、最終的にブレーキの乗り心地が判断されていると考えられるため、姿勢不保持率と許容不可率を最小にするブレーキパターンが異なる点は納得できるのではないでしょう。

最後に、最適ブレーキパターンを選定します。ここでは「まずは安全を重視し、安全性が確保できると判断された場合はさらに乗り心地を追求する」方針とします。そこで、仮に姿勢不保持率が20%以下であれば安全上問題がないと判断することにします。なお、「姿勢不保持率」は姿勢を保持できない全ての状況を含んでいることから、転倒などの危険事象が生じる確率としては、かなり安全を見込んだものです。今回の検討例に関しては、図7より、姿勢不保持率が20%以下となるブレーキパターンが存在するので、そ

の中から、許容不可率を最小にするブレーキパターンを選定します。これにより、安全性を確保し、かつ乗り心地を追求した最適なブレーキパターンが選定されたことになります。

今回は、駅停車時のブレーキをイメージした想定でしたが、緊急時で停止距離が短く、姿勢不保持率が20%を超えるような強いブレーキが必要となる状況では、乗客の姿勢状況を重視し、姿勢不保持率を最小にするブレーキパターンを最適として選定することになります。

## おわりに

乗客の安全性と乗り心地の観点から将来のブレーキシステムが目指すべき最適なブレーキパターンについて検討しました。ただし、前述した最適ブレーキパターンの選定方法はあくまで一例であり、議論の余地があります。今後、将来のブレーキシステムを想定しつつ、状況に応じた最適なブレーキパターンについての研究を継続し、議論を深めていきたいと考えています。RRR

## 文献

- 1) 小美濃幸司, 他: 乗り心地に配慮したブレーキパターン, 人間工学, Vol.42, No.3, pp.164-171, 2006