

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 列車ブレーキ時の滑走制御性能を評価する

鉄道車両は車輪がすべりやすく、ブレーキ時に滑走が発生すると停止距離の延伸と車輪の損傷を招くリスクがあり、その対策として滑走制御があります。滑走制御とは車輪の滑走状態に応じてブレーキ力を調整する仕組みです。安全に関係する重要な技術であり、走行試験による性能評価を行います。が、「すべりやすさ」は実際に走って見ないとわからないため、すべり過ぎたり、ブレーキを緩め過ぎたりといったことが起きえます。そこで、シミュレーション技術を活用し、「すべりやすさ」を計算機上で模擬する試験方法を考えました。ここでは、考案した滑走制御の性能評価方法を紹介します。



土方 大輔  
Daisuke Hijikata  
車両制御技術研究部  
ブレーキ制御研究室  
副主任研究員

## はじめに

一般的な鉄道車両は、車輪とレールの接触面に働く力で加速と減速を行います。ゴムタイヤでアスファルト上を走行する自動車に比較して、鉄車輪でレール上を走行する鉄道車両はすべりやすい性質をもっています。この性質は、雨天でのブレーキ時などに滑走として現れます。滑走とは、車両の速度(対地速度)よりも車輪周速度(☞参照)が低い状態のことです。滑走が発生すると、停止距離の延伸とフラット(☞参照)の可能性が生じます。

これらのリスクを低減させるため、近年の鉄道車両の多くはブレーキシステムに滑走制御の機能を備えています。滑走制御とは、車輪の滑走状態に応じてブレーキ力を調整する仕組みで、もっとも単純には、車輪周速度を監視して滑走の発生を検知し、ブレーキ力を弱めることで滑走を元に戻す動作を自動的に行うものです。滑走制御には、滑走の検知方法やブレーキ力の調整方法などによってさまざまな考え方(アルゴリズム)があります。

滑走制御の性能とは、停止距離の延伸とフラットのリスクをどれだけ抑制

できるかです。その性能を評価するには、実際の車両を用いた走行試験(以降、現車試験とします)で車上から車輪・レール間の接触面をめぐらせて散水することによって意図的に滑走を発生させ、停止距離やフラット発生状況を測定して判断するしかないのが現状で

### ☞ 車輪周速度

車輪踏面における円周方向の速度に相当します。滑走がなければ車両速度(対地速度)にほぼ等しく、滑走が発生すると両者は乖離していきます。

### ☞ フラット

車輪の円周上の一部が平坦に削れる損傷で、そのまま走行すると騒音や振動が発生し、ほかの機器やレールにも悪影響を与えてしまいます。

### ☞ 空気ブレーキ

圧縮空気を動力源とする方式のブレーキです。ほとんどすべての車両に備わり、非常ブレーキにも使われる安全のために重要なブレーキです。

### ☞ 接線力

車輪・レール間の接触面で伝達される接線方向の力です。車両の加減速と車輪の回転の両方に影響する重要な力です。

す。現車試験による滑走制御性能の評価は、安全を担保するためにもっとも重要であるものの、すべりやすさに影響する条件(たとえば、散水量・位置・温度、車輪およびレールの表面状態)が非常に多く、同じ条件で試験をくりかえすことは困難です。さらに、現車試験には膨大な時間と労力を要し、現実的には限られた試験回数の中で性能評価をせねばなりません。

そこで、滑走制御性能の評価にシミュレーション技術の活用を考え、実機と計算機の長所を組み合わせた「滑走制御シミュレーター」の開発に取り組んでいます。ここでは、その仕組みと性能評価の例を紹介します。

### 滑走制御シミュレーターの概要

滑走制御シミュレーターの全体図を図1に示します。本シミュレーターは、空気ブレーキ(☞参照)を対象とした試験装置で、配管の長さや容積によって挙動が大きく異なるため計算機でのモデル化が難しいブレーキシリンダー(以降、BCとします)圧力を実物で再現し、それ以外の要素を計算機で模擬するハイブリッドシミュレーターです。

図2に示すブロック図のとおり、空気タンクからBCまで、実際の車両1両分に相当する配管や制御弁を用いた実機部と、おもに車両モデル・滑走制御アルゴリズム・粘着条件を指定する計算機部で構成されます。

車両モデルとはシミュレーター内部で車両の運動を数式で表したもので、車両の進行方向の運動と車輪の回転運動を表現しています。滑走制御アルゴリズムとは滑走中にBC圧力の調整を自動で行うアルゴリズムで、あらかじめ決められた条件に則り、滑走制御弁に対して排気・保持・給気の3つの動作からいずれかひとつを指令します。粘着条件とは車輪・レール間の摩

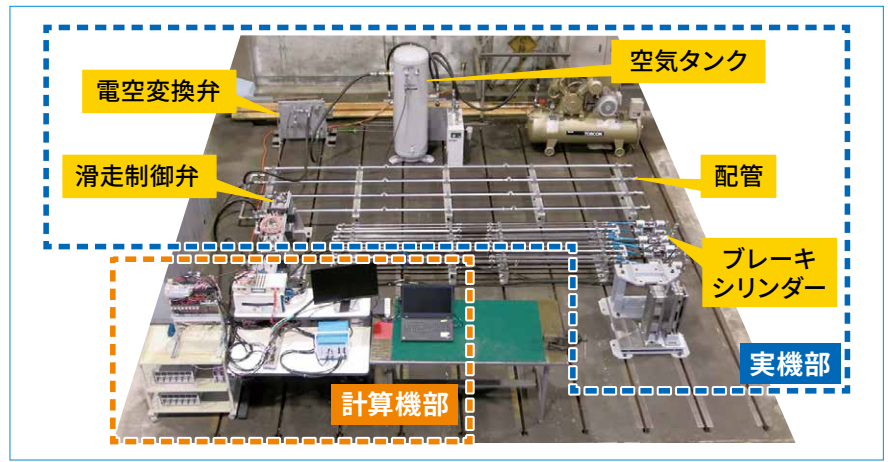


図1 滑走制御シミュレーター全体図

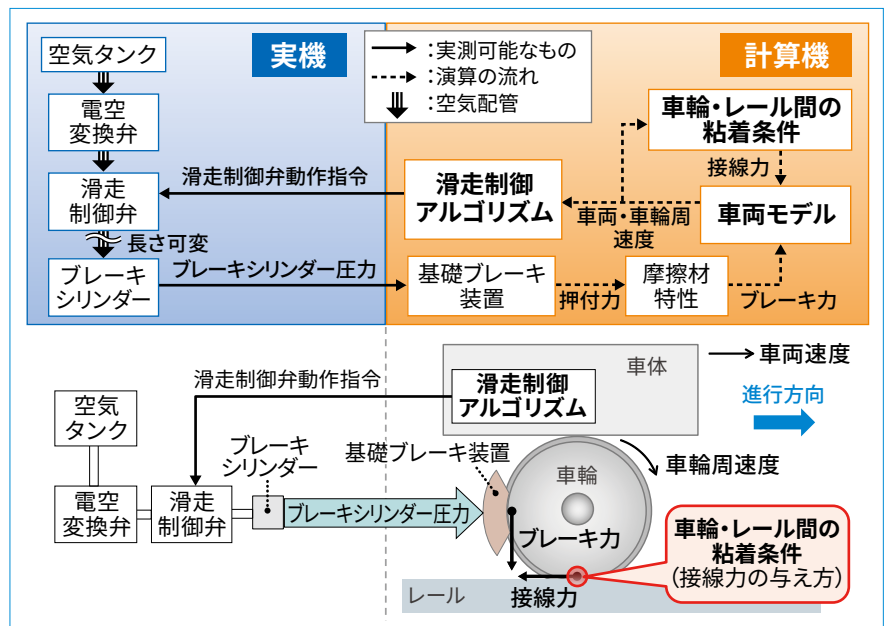


図2 ブロック図および模式図

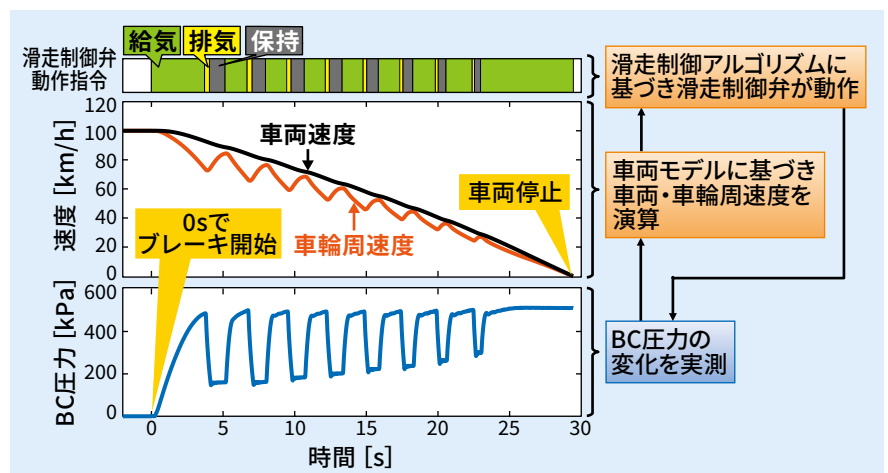


図3 滑走制御シミュレーターの出力例

擦状態のことを指し、ここでは、車輪・レール間の接線力(☞参照)の与え方を意味します。

### 滑走制御シミュレーターの出力例

図3は滑走制御シミュレーターで車両の減速を再現した結果です。横軸の

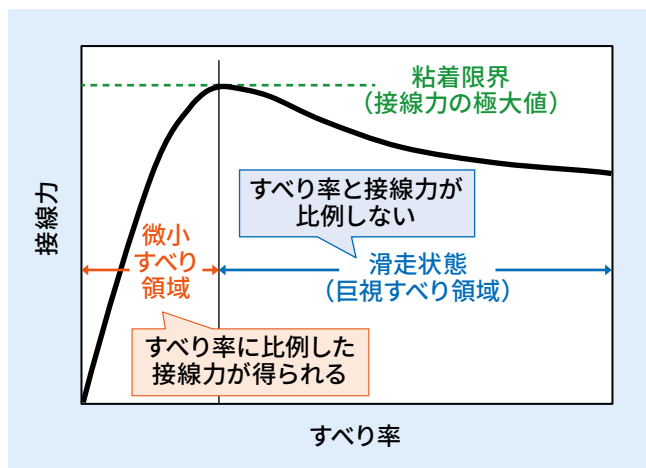


図4 すべり率と接線力の関係

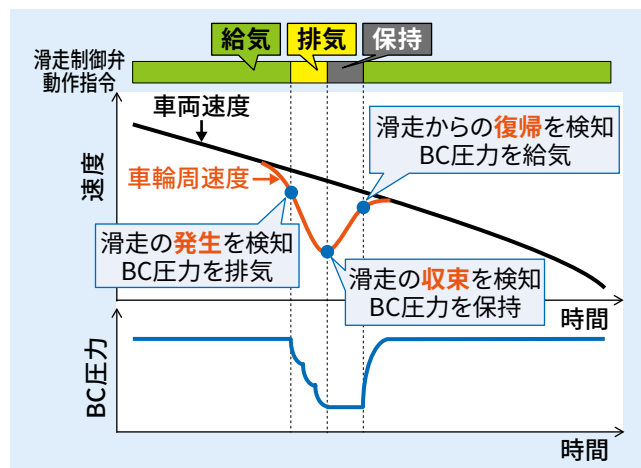


図5 すべり率滑走制御の概要

時間0s時点でブレーキを開始した後にBC圧力が上昇します。このBC圧力のみが実測値で、この情報をもとに計算機部が速度情報(車両速度および車輪周速度)を演算し、滑走制御アルゴリズムに伝えます。滑走制御アルゴリズムが滑走検知条件を元に決定した排気・保持・給気の動作を、実機部の滑走制御弁に対して指令として出力します。実機の滑走制御弁の動作によって変化したBC圧力を読み取り、ふたたび計算機部が速度情報を演算する、というループを構成しています。このループが車両停止(車両速度=0km/h)まで継続され、ブレーキ開始から車両停止までに走行した距離を停止距離として算出します。

### 試験手法の対比と粘着条件

滑走制御の性能は、滑走制御アルゴリズム・粘着条件・BC圧力の挙動の3つの要素が互いに影響しあった結果として得られます。これを正確に、効率よく評価するためにシミュレーションを活用する利点を考えます。

現車試験では、冒頭に述べたとおり散水によってすべりやすい条件をつくれますが、どれだけすべるのかは実際に走行してみないとわかりません。ある良好な結果が得られたとして、滑走

制御アルゴリズムが効果的に機能した結果なのか、走行区間の粘着が良好で滑走が収まりやすかった結果なのか判断が困難です。現車試験が現実に即したもっとも説得力のある試験手法である一方、限られた試験回数で滑走制御性能を評価するには限界があります。

対して滑走制御シミュレーターでは、性能に影響する3つの要素のうち、BC圧力の挙動と、粘着条件を試験者が設定することができます。現車では変動しやすく再現が困難な粘着条件を既知の量として指定できるため、同一の粘着条件に対して異なる滑走制御アルゴリズムを適用した場合の性能を比較することなどに力を発揮します。

両手法の対比からわかるように、滑走制御シミュレーターで、いかに現車試験に近い粘着条件を与えるかが重要です。車輪・レール間の粘着のメカニズムを分析する種々の研究結果<sup>例えば1)2)</sup>から、詳細な理論モデルや実験結果の近似値などの知見を参照し、試験目的に適した粘着条件を設定します。

ここでは、一般的な特性として知られる、図4のすべり率と接線力の関係を粘着条件として適用します。すべり率とは車両速度と車輪周速度の差を車両速度で割ったもので、その時点での滑走の大きさを表す指標の一つです。

図4に示すように、すべり率が小さい範囲ではこれに比例した接線力が得られますが、あるすべり率で接線力は極大値(粘着限界)をとり、その後すべり率と接線力が比例しなくなり、滑走状態にいたります。

滑走制御シミュレーターでは、粘着限界の値、粘着限界をとるすべり率、滑走状態での接線力の挙動など、試験者が意図するすべり率と接線力の関係を数値化して指定することで、粘着条件を与えています。

### 性能評価の指標

性能のよい滑走制御とはどのようなものでしょうか。善し悪しを判断する評価指標として、ここでは、とくに安全に影響することから、停止距離の延伸抑制をもっとも重視すべき評価指標と考えます。

次いで、フラット予防に対しての評価指標として「車輪損傷評価量」と定義する<sup>3)</sup>物理量を利用します。これは、「滑走による車輪・レール間の摩擦による仕事」に相当し、滑走しなければ0、大きな滑走が続くほど大きくなる量です。速度情報とブレーキ力から算出されます。

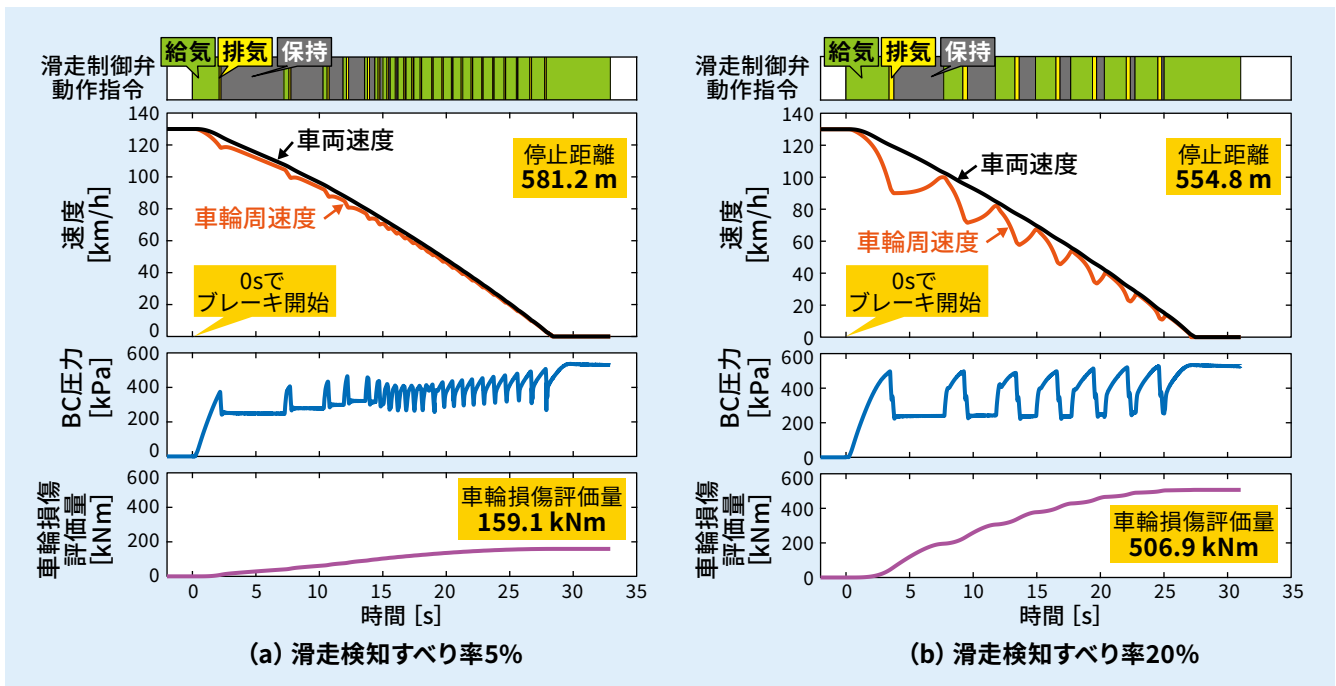


図6 滑走検知すべり率を変えた際の試験結果

### 試験結果とその評価例

滑走制御シミュレーターによる評価例を示します。図5は評価の対象とする滑走制御アルゴリズム(すべり率滑走制御)の概要です。すべり率が指定したしきい値に達すると滑走の発生を検知してBC圧力を排気し、滑走が収束に転じたことを検知してBC圧力を保持します。その後、滑走からの復帰を検知してBC圧力を給気するという動作をくりかえします。滑走を検知するすべり率のしきい値として、フラット防止を優先して許容するすべり率を小さくした(a)5%と、停止距離の延伸抑制を優先してできるだけブレーキを緩めさせない(b)20%の2つを評価の対象とします。

そして、BC圧力の挙動、粘着条件を共通として、速度130km/hからブレーキを作動させた結果を図6に示します。両結果とも、上段の速度グラフを見ると、ブレーキ開始直後から車両速度よりも車輪周速度が低く、滑走が発生しています。そして、滑走制御アルゴリズムによって排気・保持・給

気動作が実機の滑走制御弁に指令されBC圧力が変化しています。また、滑走制御アルゴリズムの設定の違いにより、しきい値が大きい(b)の方で、より大きな滑走が発生しています。

結果として、停止距離は(a)で581.2m、(b)で554.8m、車輪損傷評価量は(a)で159.1kNm、(b)で506.9kNmとなりました。本例において、車輪への負荷という点では(a)の方が優れていますが、非常ブレーキなど安全を最優先に考える場合には(b)の方が優れていると評価します。

両者のバランスを取った実用的なしきい値を検討するような場合、滑走制御シミュレーターでは滑走制御アルゴリズム以外の試験条件の影響を受けず、効率的な検討を進めることができます。また、ここでは滑走制御アルゴリズムによるブレーキ性能の比較評価に着目しましたが、滑走制御アルゴリズムを固定し、粘着条件を変更して試験することで、アルゴリズムの動作安定性を検証するなどの使い方もできます。

### おわりに

滑走制御シミュレーターは、新たな滑走制御アルゴリズムの開発ツールとして、また、現車試験の事前に滑走制御アルゴリズムの性能確認を行い、現車試験時の試番数を削減する方法として活用することを見込んでいます。今後はモデル化精度の向上や機能の拡張を図り、より使い勝手のよいシミュレーターとしていく予定です。RRR

### 文献

- 1) O.Polach: Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit, Wear, Vol.258, pp.992-1000, 2005
- 2) 陳樺: 湿潤条件下の車輪・レール粘着メカニズムを解明する, RRR, Vol.71, No.6, pp.16-19, 2014
- 3) 野中俊昭, 大山忠夫, 遠藤靖典, 吉川広: 編成としての鉄道車両における滑走防止制御(第1報, 力学モデルの定式化と制御の評価法), 日本機械学会論文集C, Vol.71, No.705, pp.1604-1610, 2005