

# ハイブリッドシミュレータを用いた 滑走制御アルゴリズムの性能評価手法

土方 大輔\* 木崎 裕太\* 中澤 伸一\*

A Method for Evaluating Performance of Wheel Slide Protection Algorithm Using a Hybrid Simulator

Daisuke HIJIKATA Yuta KIZAKI Shin-ichi NAKAZAWA

In performance evaluation of Wheel Slide Protection (WSP) system, adjustment of control algorithm by an on-track test is the most important process. However, since it is not easy to stably reproduce low adhesion condition between wheels and rails in the on-track test, the control algorithm must be adjusted under different adhesion conditions for each run. Therefore, to solve this issue, we have developed a hybrid simulator that combines a real-time computer and pneumatic brake device. The developed simulator can specify arbitrary adhesion conditions, vehicle models, and control algorithms. This paper describes a method for evaluating the performance of the control algorithm for WSP using the hybrid simulator.

キーワード：ブレーキ，滑走制御，粘着，シミュレータ，性能評価

## 1. はじめに

鋼鉄製の車輪とレールの接触面に作用する力で加減速を行う鉄道車両は、転がり抵抗が小さく省エネルギー性に優れる一方、すべりやすいという性質がある。このため、レール湿潤時などのブレーキでは車輪が滑走し、停止距離が延伸する恐れや、固着による車輪フラットの発生が懸念される。停止距離の延伸は安全上の大きなリスクとなる。また、車輪フラットは騒音および振動の発生源となるため、車輪フラットが発見された車両では計画外の車輪転削（踏面形状を元に戻す作業）が必要となり、メンテナンス計画における影響も大きい。これらを防止するため、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る。

空気ブレーキの滑走制御は、ブレーキ中に滑走を検出し、ブレーキシリンダ（以下、BCとする）圧力を下げることで車輪周速度を車両速度に迅速に戻して再粘着させた後、BC圧力を所定の値に復帰させる。ただし、BC圧力を下げることはブレーキを緩めることであるため、ブレーキ性能の確保と車輪フラットの防止をいかに両立させるかが肝要となる。これらの両立をはかり、様々な特徴を持つ滑走制御アルゴリズムが提案されてきた<sup>1)2)3)</sup>。

一般に滑走制御の性能確認は、現車試験において意図的に滑走を発生させて行う。車上から車輪／レール間の接触面をめがけて散水することで低粘着条件をつくり、滑走制御が有効に機能したかを停止距離および車輪フラット発生状況を測定して判断する。

空気ブレーキは非常ブレーキにも使用される極めて重要なブレーキであり、現車試験による性能確認は安全を担保するために不可欠であるものの、すべりやすさに関わる影響因子（例えば、散水の量・位置・温度、車輪およびレールの表面状態）が非常に多く、全く同じ条件で試験を繰り返すことは極めて困難である。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滑走制御アルゴリズムの違いによる性能差の判断などが必要となる。

そこで筆者らは、実機と計算機の長所を組み合わせた滑走制御用ハイブリッドシミュレータの開発に取り組んでいる<sup>4)5)6)</sup>。これは、空気ブレーキの応答性を実物で再現し、それ以外の部分を計算機で模擬した台上試験環境である。低粘着条件を試験者が任意に設定でき、かつ容易に多数の試験が可能である。現車試験の事前に滑走制御アルゴリズムの比較検証を行うことで、現車試験の試番数の削減が期待できる。

本稿では、開発したシミュレータの仕組みを説明するとともに、その機能を活用した滑走制御アルゴリズムの性能評価手法について述べる。

## 2. 滑走制御用ハイブリッドシミュレータ

### 2.1 全体構成

滑走制御用ハイブリッドシミュレータ（以下、ハイブリッドシミュレータとする）の全体図を図1に、ブロック図を図2に示す。ハイブリッドシミュレータは、実機部と計算機部で構成される。

実機部は現車の圧縮空気の流れを再現する部分であり、空気タンクからBCを模擬した定容積容器まで現車

\* 車両技術研究部 ブレーキシステム研究室

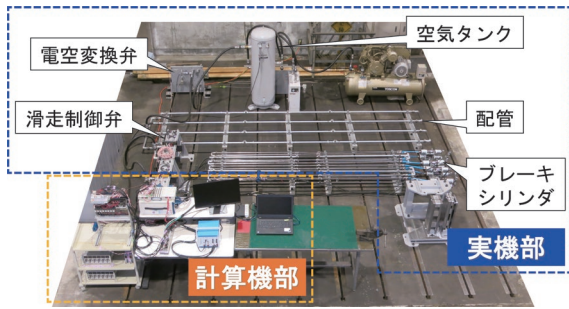


図1 ハイブリッドシミュレータ全体図

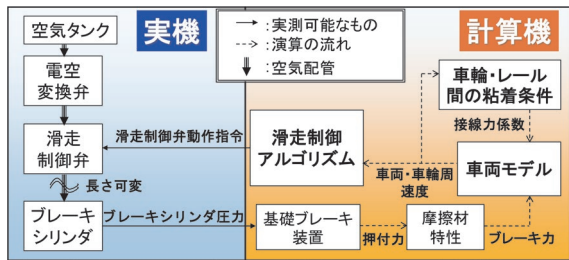


図2 ハイブリッドシミュレータブロック図

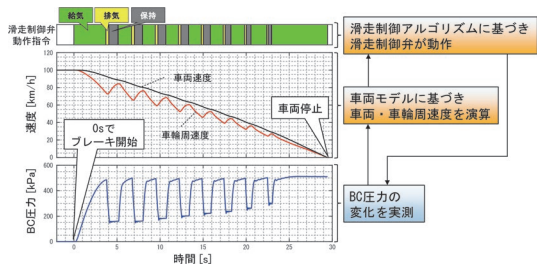


図3 計算ループの流れ

と同じ空気ブレーキ機器で構成している。機器間を接続する空気配管の長さを可変とすることで応答性を変化させることができる。空気ブレーキ機器は独立した4軸分(車両1両分)を備える。

計算機部は実機部以外の要素を模擬する部分であり、リアルタイム計算機、操作用PC、BC圧力センサで構成している。リアルタイム計算機の内部では、車両モデル・滑走制御アルゴリズム・車輪／レール間の粘着条件(以下、粘着条件とする)を試験者がそれぞれ任意に設定できる。実測したBC圧力センサの値に基づいて基礎ブレーキ装置の諸元を考慮したブレーキ力を計算し、その値を車両モデルに適用する。車両モデルでは、想定する車両諸元に基づいて減速運動を計算する。減速運動の計算には、予め設定した粘着条件と滑走制御アルゴリズムが反映される。例えば、計算機内部で減速中の軸が滑走制御アルゴリズムで設定した滑走検知条件を満たしたとき、即座にその軸に対応する実機部の滑走制御弁へ動作指令が出力されてBC内の空気が排気される。BC圧力の変化を常に次の計算ステップに反映し再び減速運動を計算す

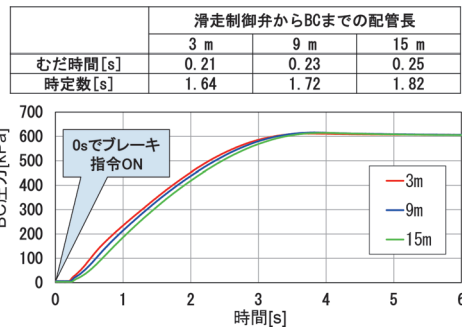


図4 配管長とBC圧力の関係

る。この計算ループが車両停止まで繰り返される(図3)。

## 2.2 空気ブレーキ機器の応答性

ブレーキ指令に対するBC圧力の応答性、および滑走制御中に排気・保持・給気が頻繁に切り替わる際のBC圧力の応答性は、圧縮空気の経路である配管の長さや容積によって大きく異なる。これを計算機内部でモデル化することは困難なため、実物の空気ブレーキ機器を使用し、配管長を可変とすることで応答性を調整できる構造とした。滑走制御弁からBCまでの配管長とBC圧力応答性の関係を図4に示す。配管が長くなるにつれてむだ時間および時定数が大きくなっており、配管長で応答性を調整可能であることが確認できる。

## 2.3 車両モデル

本稿における車両モデルとは、走行中の車両にブレーキ力を与え、車輪／レール間に接線力が発生することで、車両速度と車輪周速度が減速する運動を規定するモデルである。平坦なレール上で車両前後方向の運動のみを考慮し、車両上下方向とまくらぎ方向の運動は考慮しない。ブレーキ力はBC圧力センサの実測値と基礎ブレーキ装置の諸元および摩擦材特性から算出し、車輪／レール間の接線力係数は後述する粘着条件から算出する。

車両モデル(1両)の模式図を図5に、各記号の意味を表1に示す。減速運動に関わる数式を式(1)～式(4)で定義した。ここで、添字*i*は軸位を表す。式(1)は車両の並進運動を、式(2)は各輪軸の回転運動を表す。式(3)は接線力が接線力係数と軸重の積であること、式(4)はすべり率を表す。

4軸はそれぞれ独立した回転自由度を有し、4軸の接線力の合力で車両が減速する。このとき、車両の端部に自進力を付与すれば、隣接車両から受ける力を考慮した減速運動を表現できる。

$$(M + m_1 + m_2 + m_3 + m_4) \frac{dV_c}{dt} = - (F_{t1} + F_{t2} + F_{t3} + F_{t4}) - (F_f + F_r) \quad (1)$$

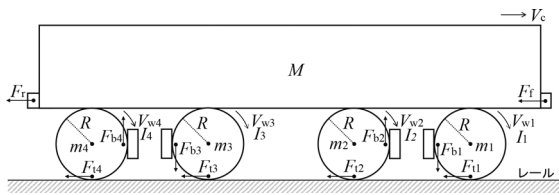


図5 車両モデルの模式図

表1 各記号の意味

| 記号       | 意味        | 記号         | 意味    |
|----------|-----------|------------|-------|
| $V_c$    | 車両速度      | $g$        | 重力加速度 |
| $V_{wi}$ | 車輪周速度     | $\mu_i$    | 接線力係数 |
| $M$      | 車体質量      | $F_{ti}$   | 接線力   |
| $m_i$    | 輪軸質量      | $F_{bi}$   | ブレーキ力 |
| $I_i$    | 輪軸慣性モーメント | $\eta_i$   | すべり率  |
| $R$      | 車輪半径      | $F_r, F_r$ | 自進力   |

※添字  $i$  は軸位を表す

$$\frac{I_i}{R} \frac{dV_{wi}}{dt} = F_{ti}R - F_{bi}R \quad (2)$$

$$F_{ti} = \mu_i \left( \frac{M}{4} + m_i \right) g \quad (3)$$

$$\eta_i = \frac{V_c - V_{wi}}{V_c} \cdot 100 \quad (4)$$

## 2.4 滑走制御アルゴリズム

滑走制御アルゴリズムは、BC圧力の排気・保持・給気の3つの動作から、車輪の減速状態に応じていずれか一つを選択するアルゴリズムである。これらの動作は、滑走制御弁へのAV（供給停止電磁弁指令）とRV（排気電磁弁指令）の組合せで指示される。滑走制御アルゴリズムには様々な特徴を持つものが提案されており<sup>1)2)3)</sup>、車輪の減速状態の検知方法として、すべり率検知、速度差検知、減速度検知などがあり、さらにこれらの組合せも用いられる。一例として、すべり率滑走制御の動作と判定条件の例を図6に示す。

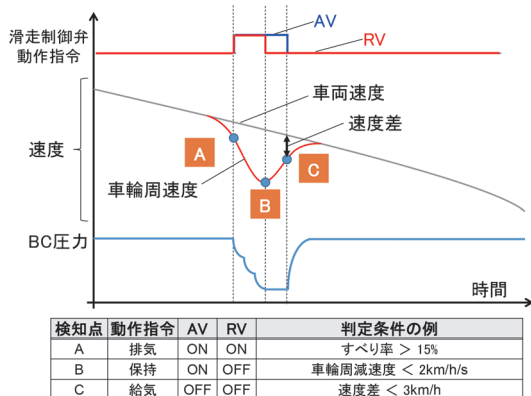


図6 すべり率滑走制御の動作と条件の例

## 2.5 粘着条件

本稿における粘着条件とは、複数の関係式から導出される接線力係数の与え方のことである。図7に示すように、一般にすべり率と接線力係数の関係は、微小すべり領域においてすべり率にほぼ比例するが、巨視すべり領域においては不安定な挙動を示すことが知られている。実物では不安定で再現性が低い現象を、計算機では経験則に基づき既知量で再現できる利点がある。

本節では、すべり率・速度・走行地点の3つの関係式から導出される接線力係数とその設定方法について述べる。

### 2.5.1 すべり率と接線力係数の関係

すべり率と接線力係数の関係は、レール表面が乾燥状態であるか湿潤状態であるかといった、粘着条件の最も基本的な性質を規定するものである。具体的には、図7における粘着係数（接線力係数の極大値）、その粘着係数をとるすべり率、巨視すべり領域における挙動などを指定することに相当する。本稿では、取り扱いが簡便で幅広い関係を表現できることから、文献7を参考に式(5)で表される関係を用いた。

$$\mu_\eta = C \sin \left( B \tan^{-1} \left( A \frac{\eta}{100} \right) \right) \quad (5)$$

ここで、 $\eta$ はすべり率であり、 $A, B, C$ は任意の定数である。基本的な性質として、 $A$ が大きいほど微小すべり領域が狭くなり（極大値をとるすべり率が小さくなる）、 $B$ が大きいほど巨視すべり領域での減衰が大きくなる。 $C$ は粘着係数の値である。特徴的な定数 $A, B, C$ の組合せと波形例を図8に示す。

### 2.5.2 速度と粘着係数の関係

速度と粘着係数の関係は、車両速度の上昇に伴って粘着係数が低下していく性質を規定するものである。本研究では、既往の研究<sup>8)</sup>により実験的に得られた結果として、新幹線には式(6)を、在来線には式(7)を用いた。ここで、 $v$ は車両速度（km/h）である。

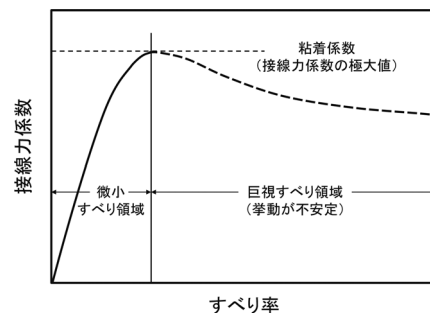


図7 すべり率と接線力係数の関係

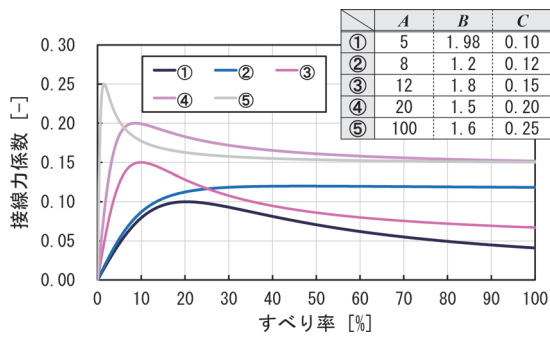


図8 接線力係数の特徴的な波形例

$$\mu_v = \frac{13.6}{(v+85)} \quad (6)$$

$$\mu_x = \frac{32.74}{(v+187)} \quad (7)$$

### 2.5.3 走行地点と粘着係数の関係

現車環境においては、水や落ち葉の介在、レールの継ぎ目や表面粗さなど、走行地点に起因する変化要因がある。このため、粘着係数も走行地点毎に変化すると考えられる。この変動を考慮することで、現車環境により近い条件の模擬を試みる。例えば、走行地点に対する周期的な変動を式(8)で表現する。

$$\mu_x = D \sin\left(\frac{2\pi fx}{X}\right) + E \quad (8)$$

ここで、 $x$ は走行地点、 $D$ は変動の振幅、 $E$ は基準値(変動がないときの値)、 $f$ は距離 $X$ あたりの周期の数である。現車試験で想定される変動を与えることが望ましいが、現車試験の結果から地点に依存した粘着係数の変化を独立して抽出するのは極めて難しい。そのため、想定する走行環境に応じて試験者が走行地点と粘着係数の関係を任意に指定することとした。ここでは、簡素な例として走行地点に対する周期的な変動を扱うが、一定の範囲内で振幅と周期をランダムに変化させた変動を与える手法の検討例<sup>9)</sup>もある。

### 2.5.4 最終的な接線力係数

2.5.1~2.5.3の3つの関係を統合した最終的な接線力係数の概念図を図9に示す。具体的な接線力係数は式(9)で表現される。

$$\mu = \mu_\eta \frac{\mu_v}{\mu_v(0)} \frac{\mu_x}{E} \quad (9)$$

$\mu_v(0)$ は車両速度 $v=0$ のときの値、 $\mu_x$ は基準値 $E$ でそれぞれ除し、正規化したうえで積をとっている。取りう

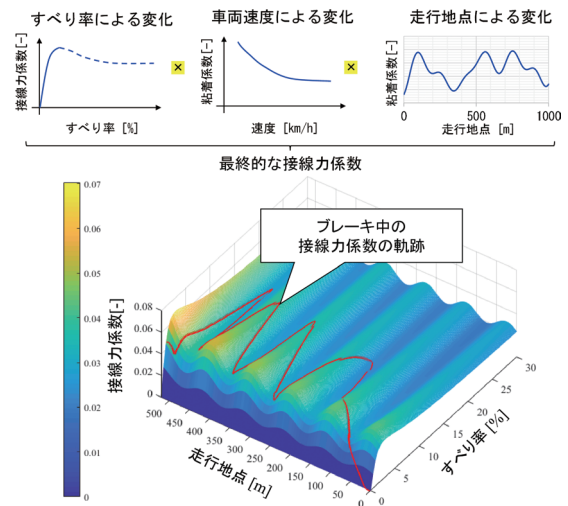


図9 最終的な接線力係数の概念図

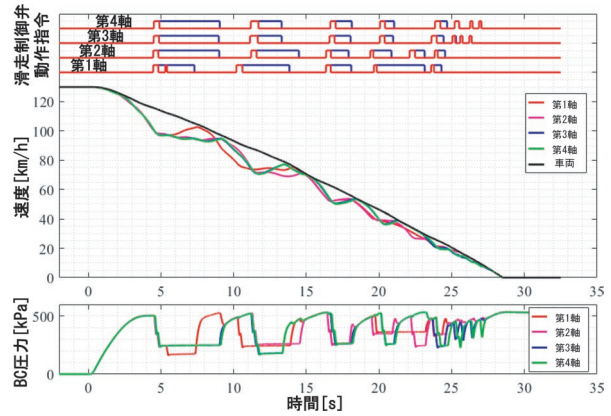


図10 ハイブリッドシミュレータの試験結果例

る $\mu$ の値を、すべり率と走行地点を軸とした三次元空間上の点として表すと、図9下部の様な図が描ける。このとき、あるブレーキ動作によって得られる接線力係数は、図の表面を三次的に移動する点の軌跡として捉えることができる。設定した粘着条件に対して、滑走がどのように進展・収束したか、接線力係数がどのように利用されたかを視覚的に把握するのに役立つ。

以上に述べた接線力係数の設定方法に基づき、実際にハイブリッドシミュレータで試験した際の結果例を図10に示す。図中の上から、滑走制御弁動作指令、速度、BC圧力であり、実測値と計算機内部モデルが連動した複雑な滑走制御動作が再現されている。速度に着目すると、車両速度が高速域にあるほど滑走しやすい性質が反映されていることがわかる。

## 3. 滑走制御アルゴリズムの性能評価手法

ここまで述べてきたように、ハイブリッドシミュレータは、実機部で空気ブレーキ機器の応答特性を再現し、

計算機部で車両モデル・滑走制御アルゴリズム・粘着条件を任意に指定できる。また、現車試験に比較して試験の負担が極めて小さく、容易に多数の試験を実施できる。この特長を利用し、多数の試験結果を統計的に分析することで、滑走制御アルゴリズムの性能評価を行う手法について述べる。

### 3.1 試験条件

空気ブレーキ機器の応答性は図4中の配管長15mの設定とし、車両モデルは自連力の作用しない1両モデルで、車両諸元は表2の通りとした。すべり率と接線力係数の関係は、式(5)における定数を  $A=100$ ,  $B=1.6$ ,  $C=0.25$  とし、速度と粘着係数の関係は在来線の式(7)を用いた。ブレーキ初速度は130km/hとした。

走行地点と粘着係数の関係は、走行地点に対して周期的に粘着係数が増減するものとして、式(8)における定数を  $D=0.2$ ,  $E=1$ ,  $X=100$  とした。これは1を基準に、振幅0.2で100mあたり  $f$  個の周期を持つ正弦波を意味する。ここで、 $f$  の値を0から10まで0.1刻みで与えることで、それぞれ周期の異なる粘着条件が101パターン生成される。 $f=0, 0.1, 0.5, 1, 5, 10$  としたときの波形を図11に示す。

試験対象とする滑走制御アルゴリズムは比較のため2つ用意し、それぞれ2.4で述べたすべり率滑走制御にお

表2 車両諸元

| 項目                    | 数値    | 単位               |
|-----------------------|-------|------------------|
| 車体質量                  | 20000 | kg               |
| 輪軸質量(4軸共通)            | 1200  | kg               |
| 輪軸慣性モーメント(4軸共通)       | 165   | kgm <sup>2</sup> |
| 車輪半径                  | 0.43  | m                |
| 所定BC圧力                | 520   | kPa              |
| BC圧力からブレーキ力への<br>変換係数 | 36    | N/kPa            |

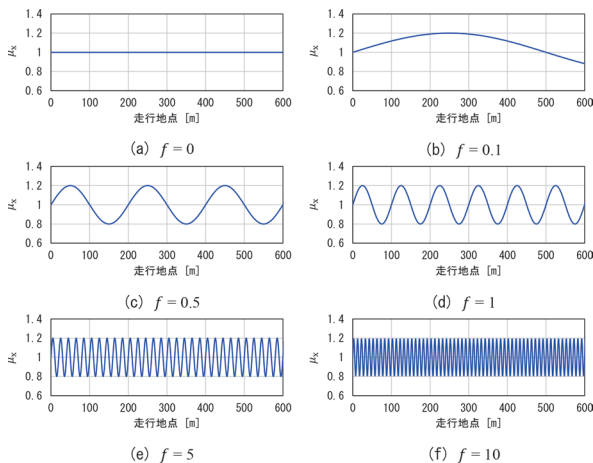


図11  $f$  と  $\mu_x$  の関係

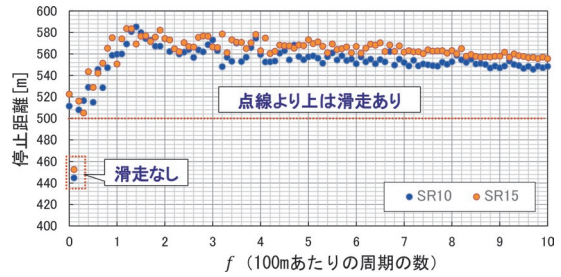


図12  $f$  と停止距離の関係

いて、検知点Aのすべり率の値を10%としたものと15%としたものである。両者をそれぞれSR10およびSR15と表記する。

### 3.2 試験結果

101パターンの粘着条件のそれぞれに対して2つの滑走制御アルゴリズムを個別に適用して試験を実施し、計202個の停止距離の結果を得た。各滑走制御アルゴリズムにおける  $f$  と停止距離の関係を図12に示す。SR10, SR15ともに、一定のばらつきを持ちながら、 $f=0$  (走行地点による粘着係数変動なし) から  $f=1.5$  付近まで停止距離は増加し、その後、緩やかに減少していくという同様の傾向を示した。同条件下で比較すると、SR10の方が全体を通してより短い停止距離をとりやすい傾向にあった。なお、 $f=0.1$  のときは、SR10, SR15ともに著しく短い停止距離を示している。これは図11に示すように、 $\mu_x$  が500mまで基準値である1を超える条件であり、高い粘着係数を与えられたことにより、滑走が発生しなかったためである。

### 3.3 統計量による評価

滑走が発生しなかった  $f=0.1$  を除いたうえで、それぞれの滑走制御アルゴリズムにおいて停止距離100個の結果をヒストグラムにしたものを図13に、統計量を表3に示す。

両アルゴリズムによる停止距離の最大値および最小値に大きな差異はなく、最頻区間から最大値にかけて段階的に頻度が低下していく傾向、および最頻区間から最小値にかけて著しく頻度が低下する傾向も両者同様であった。一方で、平均値および最頻区間では、SR10の停止距離の方が約10m短く、本試験結果においては、相対的に短い距離で停止するのはSR10だと言える。これは図14に示すように、式(5)における定数を  $A=100$ ,  $B=1.6$ ,  $C=0.25$  と置いた粘着条件下では、すべり率10%で滑走を検知してすべりの進展を抑制した方が、すべり率15%で同じ制御動作を行うよりも、接線力係数の高い領域を利用できたためであると考えられる。

このように、多数の試験結果から統計的な分析を行う

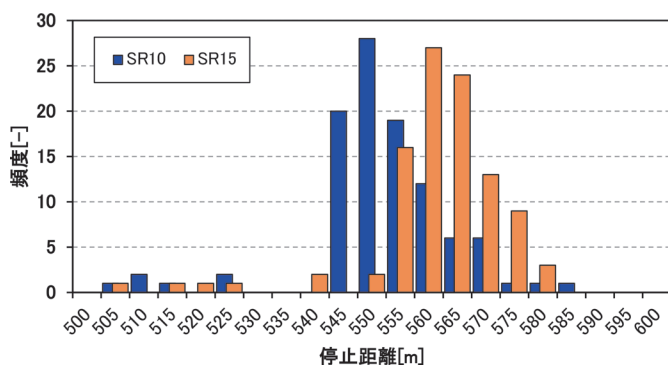


図 13 停止距離ヒストグラム

表 3 ヒストグラムの統計量

|             | 滑走制御アルゴリズム |         |
|-------------|------------|---------|
|             | SR10       | SR15    |
| 最大値 [m]     | 585.2      | 583.7   |
| 平均 [m]      | 554.7      | 563.4   |
| 最小値 [m]     | 507.9      | 505.0   |
| 最頻区間 [m]    | 550~555    | 560~565 |
| 分散          | 159.6      | 146.9   |
| 575m以上となる割合 | 3%         | 12%     |

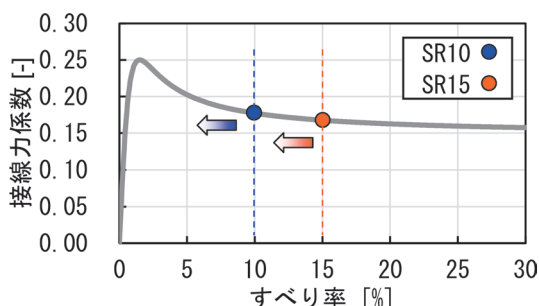


図 14 滑走検知すべり率と接線力係数の関係

ことで、取りうる値の幅、頻度およびその分布がわかり、滑走制御アルゴリズムがもつ性質を従来よりも把握しやすくなる。例えば、停止距離が575m以上となる割合はSR10で3%、SR15で12%であるなど、特定の条件に当てはまる可能性を定量的に捉えることや、単に停止距離が短いだけでなく、分散の小ささ、すなわち安定性も両立されているかという視点を取り入れることができる。以上が、任意の粘着条件を指定でき、多数の試験を容易に実施できるハイブリッドシミュレータの特長を利用した、滑走制御アルゴリズムの新たな性能評価手法である。

#### 4. まとめ

実物の空気ブレーキ機器とリアルタイム計算機を組み合わせた滑走制御用ハイブリッドシミュレータについてその仕組みを紹介した。開発したシミュレータは、低粘着条件を試験者が任意の量に指定でき、かつ容易に多数の試験が可能である。この特長を利用し、試験対象の滑走制御アルゴリズムの停止距離の分布傾向を示す評価手法を示した。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の活用が考えられる。

本稿では、粘着条件は走行地点に応じて周期的に変化

するものとして扱ったが、現車環境はその限りではなく、より複雑な変化を伴うはずである。車輪／レール間の物理現象をより詳しく知るための基礎的研究や、現車環境における実態を把握し、それらを反映した評価手法としていくことも重要であり、今後検討を行っていく。また、実機部の機能拡張と計算機部のモデル化精度向上を図り、本手法をブレーキシステムの安全性向上に向けた研究開発に活用していく。

#### 文 献

- 1) 熊谷則道, 長谷川泉, 内田清五, 渡辺一範: 同期化パルス速度演算を用いた新幹線用すべり率滑走制御システム, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.70, No.689, 2004
- 2) 塩見省吾, 板野康晴: FUZZY 制御応用 ANTI-SKID 制御装置, 日本機械学会第3回交通・物流部門大会 (J-RAIL'94) 講演論文集 (鉄道シンポジウム編), pp.237-240, 1994
- 3) 中澤伸一, 津留崎淳: 新しい検知方式を用いた滑走制御方法の開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.1, pp.43-48, 2011
- 4) 土方大輔, 木崎裕太, 中澤伸一: 実物の空制ブレーキ機器とリアルタイム計算機を組み合わせた滑走制御用ハイブリッドシミュレータ, 第28回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2021) 講演論文集, 2021
- 5) 土方大輔: 列車ブレーキ時の滑走制御性能を評価する, RRR, Vol.79, No.1, pp.16-19, 2022
- 6) 土方大輔: 任意の粘着を模擬する滑走制御シミュレータ, JREA, Vol.65, No.5, pp.42-45, 2022
- 7) M. Christof, K. Karsten, S. Stefan, "Dynamic Braking with an Electric Parking Brake System," EuroBrake 2019 Conference Proceedings, 2019.
- 8) 大山忠夫: 車輪／レール接触面性状からみた高速域における粘着力の挙動—乾燥状態における基礎実験と二次元弾性接触理論との対応—, 鉄道技術研究報告, No.1261, 1984
- 9) 土方大輔, Peter Spiess: シミュレーションによる停止距離分布傾向を用いた滑走制御性能評価, 鉄道総研報告, Vol.33, No.10, pp.29-34, 2019