

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

土方 大輔* Peter Spiess**

WSP Performance Evaluation using Stopping Distance Distribution by Simulation

Daisuke HIJIKATA Peter SPIESS

There is a concept of simulating specific adhesion conditions, to evaluate Wheel Slide Protection (WSP) performance. This allows us to arbitrarily set adhesion conditions which is difficult to ensure reproducibility on track tests and to significantly reduce the number of track tests, which require cost and labor. On the other hand, it is not clear whether or not a WSP system adjusted to specific adhesion conditions is optimal under all naturally occurring conditions. In order to improve the reliability of performance evaluation by simulation, we devise a performance evaluation method using distribution of stopping distance, which is the core part of this paper.

キーワード：滑走制御，性能評価，車輪・レール間の粘着，シミュレーション

1. はじめに

鉄鋼製の車輪がレール上を転動する鉄道車両は走行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、レール湿潤時におけるブレーキでは車輪が滑走し、停止距離の延伸や、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であり、さらに車輪フラットは騒音および振動の発生源となるうえ、進展すると車輪転削が必要となるためメンテナンス性にも影響する。

これらを防止するため、近年の鉄道車両の多くは滑走制御（滑走再粘着制御とも呼ばれる）を備えている。一般に空気ブレーキの滑走制御システムは、ブレーキ中に滑走を検知し、ブレーキシリンダ圧力（以下、BC圧とする）を下げることで車輪の回転速度を車両の走行速度に見合う値に迅速に戻して再粘着させた後、所定のBC圧に復帰させる。ただし、BC圧を下げることはブレーキ力を下げることであるため、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つつ、さらに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^{1)~4)}。滑走制御アルゴリズムとは車輪の滑走開始や再粘着等を検知しBC圧を制御する規則を意味し、車輪状態の検知方法にはすべり率検知、速度差検知、車輪減速度検知などがあり、さらにこれらの組み合わせも用いられる。

電空協調制御など多様なブレーキ使用状況が想定され

るなかで、最終的に安全を担保する空気ブレーキシステムの性能を把握することは、その機能や信頼性をさらに高めていくうえで重要である。

国内では、列車のブレーキ性能に関して、省令の解釈基準⁵⁾に、新幹線以外の鉄道においては非常制動による列車の制動距離は600m以下を標準とすることが示されている。従来、滑走制御の規格はなく、文献6に示される試験条件・方法が参考とされてきたが、これはあくまでも車両運転速度の向上時に確認すべき事項および、それを証するための技術的指針を示したものである。2017年に制定された日本鉄道車輛工業会規格(JRIS R 1607)⁷⁾では、滑走制御システムに要求される基本性能および試験方法を規定（新幹線は対象外）しているが、定量的な評価基準はない。

一方、欧州では滑走制御の規格としてEN 15595⁸⁾が2009年に制定されている。これは製品の認証プロセスに用いられるなど大きな役割を担っており、乾燥条件における停止距離に対する滑走制御動作時の停止距離の延伸率を性能の評価基準のひとつとしている。

また、これら国内外の滑走制御の規格の大きな特徴として、個々の内容は異なるが、シミュレーションによる性能確認によって現車試験工程の一部を代替するという考え方が採用されている。これにより、特定の車輪・レール間の粘着条件とその条件で想定される車両の運動をシミュレーションで再現することで、膨大な時間と労力を要する現車試験の工程が一部削減されることを期待している。ただしこの考え方は、特定の条件に特化して調整された滑走制御の性能が評価されることになり、それらの滑走制御が実際の使用条件下で最適な性能を発揮でき

* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

** DB Systemtechnik GmbH

特集：車両技術

るかという点で議論の余地がある。

そこで本研究では、より現実の状況を反映した条件下で滑走制御性能を評価する手法として、多数のシミュレーション結果から評価対象の滑走制御アルゴリズムが持つ停止距離の分布傾向を示し、個々の滑走制御アルゴリズムが持つ特性をより詳細に評価する手法について述べる⁹⁾。

2. 精緻な粘着条件の模擬

図1にブレーキ中の車輪に作用する力を示す。車輪・レール間において接線方向に働く力を接線力、接線力を輪重で除したものを接線力係数、車両速度と軸速度の差を車両速度で除したものをすべり率と呼ぶ。図2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は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。この挙動が滑走時のブレーキ性能に大きく影響するため、シミュレーションにおいては実際の現象を捉えた精緻な粘着条件を模擬する必要がある。そのため、以下の手法を検討した。なお本研究では、すべり率と接線力係数の関係を粘着条件と呼ぶこととする。

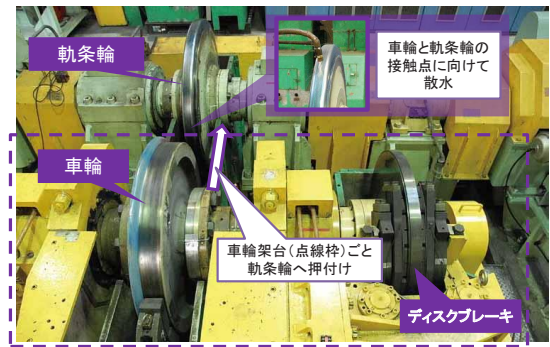


図3 粘着試験ユニットの外観

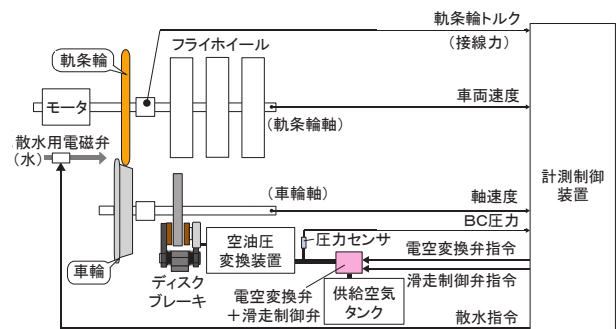


図4 粘着試験ユニットの構成

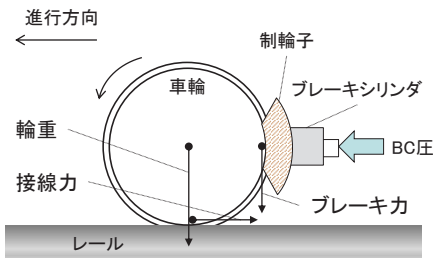


図1 ブレーキ中の車輪に作用する力

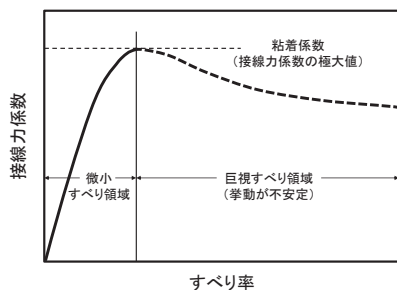


図2 すべり率と接線力係数の関係

2.1 ベンチ試験に基づく粘着条件の生成

現車試験は、最終的な滑走制御性能を評価するためには不可欠である一方、走行環境に関わる影響因子の多さから試験結果にバラつきが生じやすく、膨大な時間と労力を費やしても粘着についての一定の傾向を見出すのは

容易ではない。そこで、鉄道総研の粘着試験ユニットを使用し、ベンチ試験の結果から基準となる粘着条件の抽出を試みた。図3および図4に示すように、本試験装置は、車輪・レール間の接触を模擬するため軌条輪と実物大車輪を備え、散水によって粘着が低下した状態を再現する。試験装置に設置されたセンサにより接線力と輪重

表1 滑走制御試験時の試験条件

項目	数値	備考	
慣性モーメント	軌条輪軸	1058 kg・m ²	静止輪重 42.7 kN 相当
	車輪軸	60 kg・m ²	車輪直径 857.7 mm
ブレーキ初速度	130 km/h	50 km/h で試験終了	
所定 BC 圧	600 kPa		
散水量	360 ml/min		

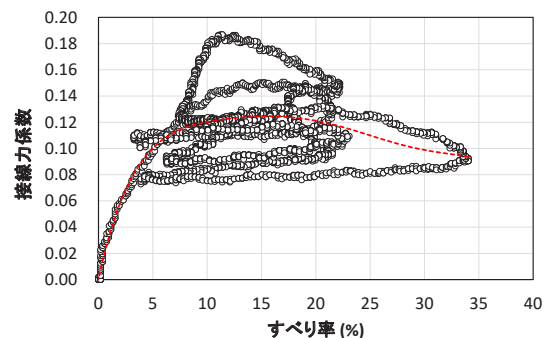


図5 粘着試験ユニットから得られた試験結果

が測定され、接線力係数が算出される。また、車両速度と軸速度からすべり率が算出され、これらを記録することですべり率と接線力係数との関係が得られる。

表1の条件で滑走制御試験を行った際に、複数回の試験で同様の傾向が見られた試験結果の代表的な例を図5に示す。車輪とレールの接触点にむけて散水することで粘着を低下させた試験であり、巨視すべり領域における接線力係数は、滑走制御動作によるBC圧の給排気を伴いながら増減を繰り返すなど不安定な挙動を示した。本研究では、図5の測定値の多項式近似によって得られる赤い曲線を接線力係数の代表曲線として用い、これを粘着条件の基準とした。実測されたすべり率の範囲外は近似式から外挿した。

2.2 コンディショニング効果

シミュレーションから現実的な結果を得るためには、滑走制御動作時に車輪・レール間で生じる現象を精緻にモデル化することが重要である。

コンディショニング効果のモデル化はその取り組みの一つであり、滑走時の車輪・レール間の介在物（水や油など）に及ぼす熱的影響（摩擦損失）および機械的影響をモデルとして考慮したものである。図6に、シミュレーションで使用したコンディショニング効果のモデル概略図を示す。このモデルにおいて、走行中の車両が排除できる車輪・レール間の介在物の厚さは、介在物を接触面から絞り出すために費やされる時間（すなわち車両速度の逆数）、輪重、介在物の粘度によって変化する。主に、滑走時の車輪踏面が滑走の進展によって清掃され、粘着が改善する現象の再現を試みており、文献によっては同様の意味合いで「クリーニング効果」との表現も見られる^{10) 11)}。

この効果をモデル化することで、低粘着条件下での滑走制御時の接線力の挙動がうまく再現され、シミュレーション精度の向上が期待できる。

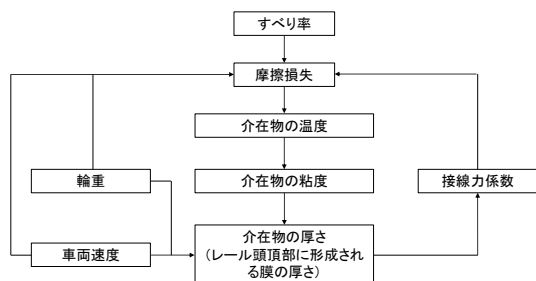


図6 コンディショニング効果の概略図

2.3 地点による粘着の変化

現車環境においては、水や落ち葉の介在、レール継ぎ目など、軌道条件に起因する変化要因がある。このため、

レール表面状態は走行地点毎に異なり、これに左右されて粘着係数（接線力係数の極大値）も走行地点毎に変化する。この変動を模擬することで、より現車環境に近い条件の再現が可能となる。

図7に地点による粘着の変化イメージを示す。接線力係数はすべり率の関数として得られ、走行地点毎に変化する。すべり率と走行地点に対応するブレーキ中のある時点における接線力係数は図7の三次元空間上の点として表され、ブレーキ中の接線力係数の挙動は三次元空間内の点の軌跡として捉えることができる。

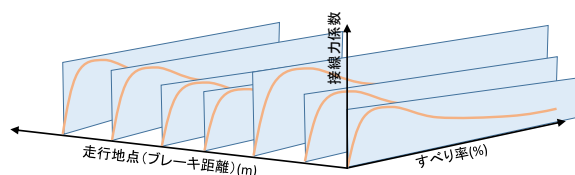


図7 地点による粘着の変化イメージ

2.4 統計的シミュレーション手法

以上に記してきた要素を統合し、実際にシミュレーションで用いる最終的な接線力係数 μ を合成する。その概要を図8に示す。 μ は、 μ_1 , μ_2 , x_1 , x_2 の各値で表現される関数である。ここで、 μ_1 は車両速度の上昇に伴って粘着係数が低下していく一般的な傾向¹²⁾を表したものである。 μ_2 はベンチ試験から得られた基準となる粘着条件であり、 x_1 はコンディショニング効果の影響、 x_2 は地点による粘着の変化である。

x_2 には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。そこで、任意に条件を設定できるシミュレーションの特性を活かし、図9に示す地点に対する粘着の変化を表す波形を準備した。これは、 x_2 の平均値をほぼ同等として、一定の範囲内で振幅と周波数をランダムに変化させたもの（以下、データセットとする）である。走行地点毎の粘着の変化を再現しつつ、走行区間全体で見れば各データセットで大きな粘着の差がない走行区間を模擬している。

本研究では、このようなデータセットを100パターン生成し、それぞれのデータセットに対して評価対象とする滑走制御アルゴリズムを適用したシミュレーションを実施した。シミュレーションの結果は、各データセットに対するブレーキ距離（指定したブレーキ初速度から終速度までの走行距離）として得られる。この距離の分布傾向を考察することで、滑走制御アルゴリズムが持つ固有の特性の把握を試みた。

特集：車両技術

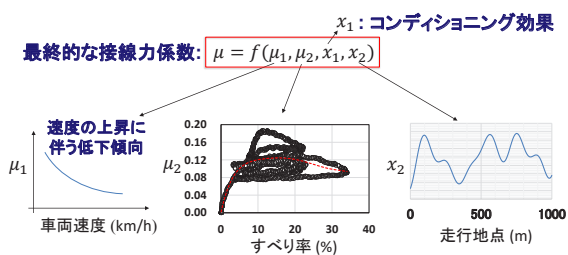


図8 最終的な接線係数 μ の合成

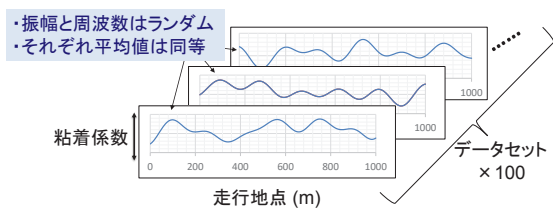
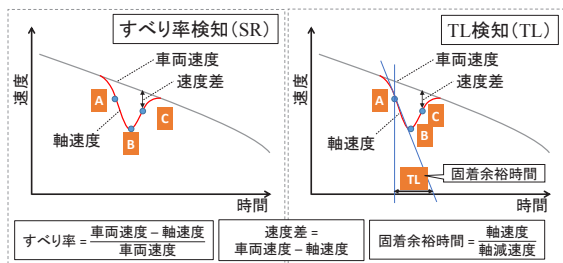


図9 地点による粘着の変化を持つデータセット

3. シミュレーション結果

2つの滑走制御アルゴリズムを前章のシミュレーション手法に適用し、両者のシミュレーション結果の比較を行った。

適用した2つの滑走制御アルゴリズムの概略を図10に示す。すべり率検知による滑走制御は、滑走の検知にすべり率を用いるもので、TL検知による滑走制御は、軸速度と軸減速度から車輪が固着に至るまでの時間を推定して制御に用いるものである³⁾。本稿の目的は滑走制御アルゴリズムの優劣を議論することではなく、提案する評価手法の特徴を説明することにあるため、これらの滑走制御アルゴリズムを一部簡素化したものをそれぞれSR、TLとして比較する。また、両者でおおむね同等の停止距離となるよう制御パラメータを設定した。



検知点	BC 圧操作	アルゴリズムの閾値	
		SR	TL
A	排気	すべり率 > 10 %	TL < 3.5 s
B	保持	軸加速度 > 3.5 km/h/s	軸加速度 > 3.5 km/h/s
C	供給	速度差 < 3 km/h	速度差 < 3 km/h

図10 2つの滑走制御アルゴリズムの概略

表2にシミュレーション条件を示す。シミュレーションは一つの輪軸の運動について行った。2つの滑走制御アルゴリズムにおいて、100パターンのデータセットを用いてシミュレーションを実行した。シミュレーション結果の比較を表3と図11に、結果のヒストグラムを図12に示す。

表2 シミュレーション条件

項目	数値	
ブレーキ初速度および終速度	130 ~ 50	km/h
所定 BC 圧	600	kPa
摩擦材の摩擦係数	0.37	
軸数	1	
軸重	93.1	kN
軸の慣性モーメント	250	kg · m ²
車輪直径	950	mm

表3 シミュレーション結果

		滑走制御アルゴリズム	
		SR	TL
ブレーキ距離 (m)	平均	347.4	334.0
	最大	355.9	369.7
	最小	338.2	319.2
分散		14.2	42.8

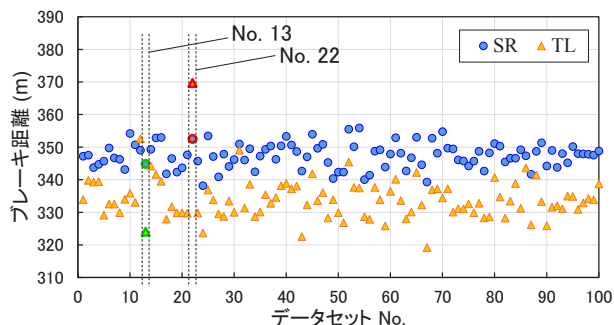


図11 各データセットにおけるブレーキ距離

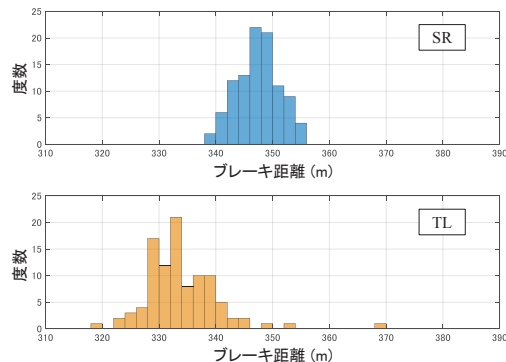


図12 滑走制御アルゴリズム別のブレーキ距離ヒストグラム

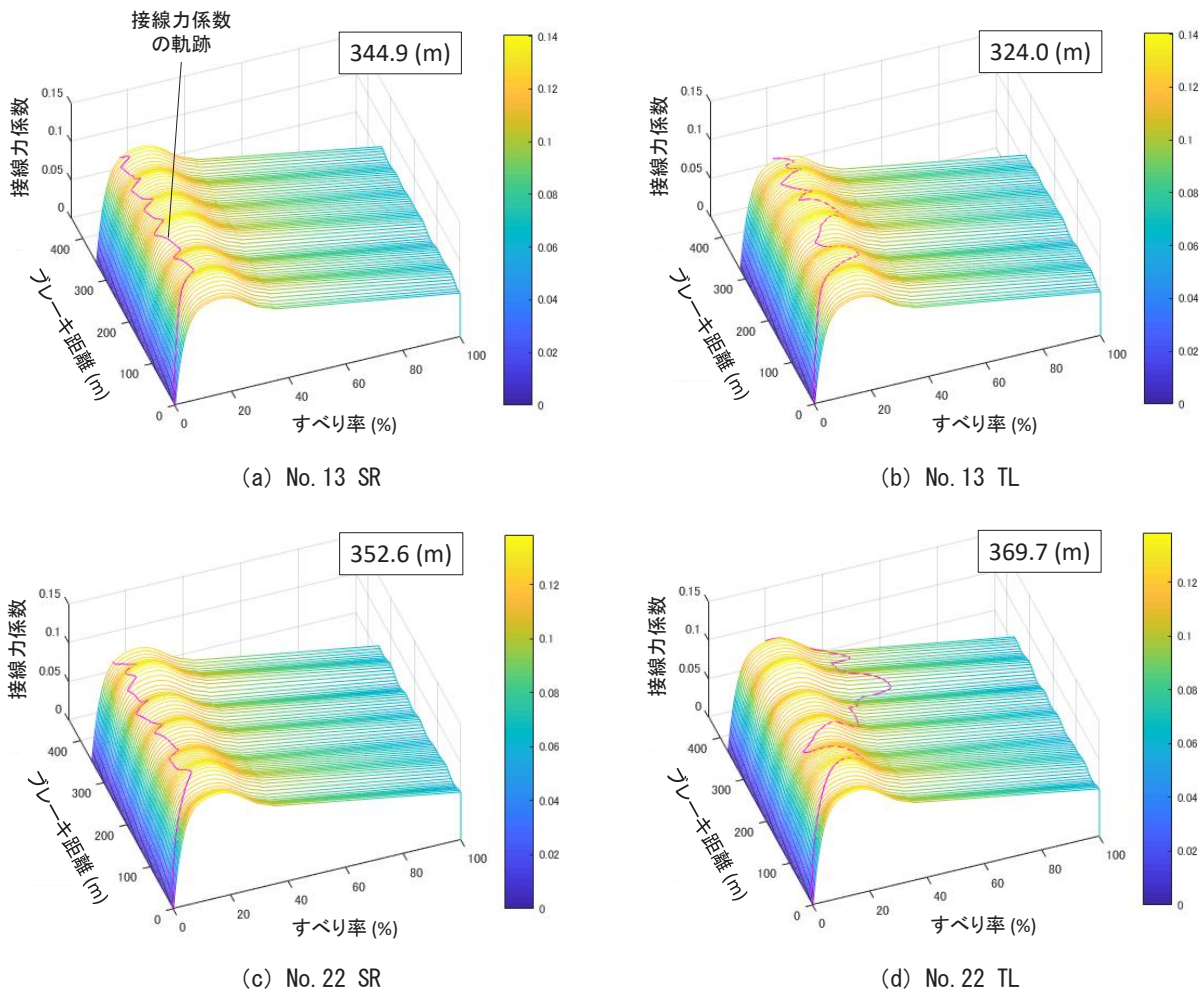


図 13 接線力係数の軌跡

結果より、最短および最長のブレーキ距離はともに TL であり、分散が小さいのは SR であった。つまり、TL における距離の分布傾向として、最短の結果を得られる可能性がありつつも、取りうる値の範囲は SR よりも広いと見ることができる。一方、SR における距離の分布傾向として、最短の結果は得られないものの、取りうる値の範囲はせまく、比較的ブレーキ距離が安定していると見ることができる。

さらに、図 11 において同一のデータセットに対する 2 つのアルゴリズムのブレーキ距離の差 (TL ブレーキ距離 - SR ブレーキ距離) を算出すると、データセット No.13 は -20.8m で最小であり、データセット No.22 は 17.2m で最大であった。つまりこの 2 つの組み合わせは、地点による粘着の変化を同等とした条件であっても、両者に比較的大きな差が生じた例である。

この 4 つのシミュレーション結果に対して、すべり率、走行地点、および接線力係数からなる三次元空間内の接線力係数の軌跡を図 13 に示す。データセット No.13 ((a) および (b)) において、TL は全体としてより高いすべり率で推移し、SR よりもより高い接線力係数の領域でブレーキが作用していたことがわかる。データセット No.22 ((c) および (d)) においても同様に、TL は全体としてはるかに高いすべり率で推移するが、このケースでは SR より低い接線力係数の領域でブレーキが作用している。一方、SR は (a) と (c) において挙動はさほど変わらず、接線力係数の極大値 (粘着係数) に至るよりもすべり率が小さい領域を安定して推移している。常に最大限の接線力を発揮する訳ではないが、粘着係数を超過して接線力係数が急に低下する領域へは推移しない。これらの違いは、SR がすべり率を閾値に用いているのに対して TL は用いていない点に起因しており、両者の滑走制御アルゴリズムの違いを視覚的に表している。

このように、多数のシミュレーション結果を統計的に考察することで、その滑走制御がもつ性能の特性を把握し、さらに特徴的な結果に対して個別に分析することで、滑走制御の性能を従来よりも詳細に把握することが可能となる。

4. おわりに

本研究では、シミュレーション環境に着目し、従来よりも現実の状況を反映した条件下で滑走制御性能を評価するため、粘着条件をより精緻に与える手法と、多数のシミュレーション結果から滑走制御アルゴリズムが持つ個々の特性を統計的に考察する手法について述べた。

粘着条件は、実物大車輪と軌条輪の接触によるベンチ試験の結果から基準となる値を抽出したうえで、コンディショニング効果として車輪・レール間の介在物が粘着に及ぼす影響をふまえて精緻にモデル化した。また、走行地点により粘着が変化する条件をデータセットとして多数用意し、そのそれぞれに対して滑走制御シミュレーションを行い、各ブレーキ距離の結果を統計的に評価することで、従来把握できなかった滑走制御アルゴリズムがもつ特性を明らかにする手法を示した。考案手法は、滑走制御システムの性能評価のなかで、現車試験の一部代替や、システムの頑健性評価への活用が期待できる。

課題としては、実際の接線力係数が持つ不安定な挙動をより誤差の少ない形で表現する手法や、ブレーキ中に発生する車両内での荷重バランス変動の考慮などが挙げられる。今後はこれらの点について検討を行っていく。

本研究における滑走制御時のブレーキ距離は、DB Systemtechnik GmbHによって開発されたシミュレーションプログラムによって算出した。また本稿は、文献9の内容をもとに一部を編集して転載したものである。転載元の著作権はFISITAが有する。

謝辞

本研究は、DB Systemtechnik GmbHとの共同研究により実施した。同社の Benjamin Bueche 氏、Felix Kroeger 氏には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

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) Lee, N-J, Kang, C-G, "Wheel slide protection control using a command map and Smith predictor for the pneumatic brake system of a railway vehicle," Vehicle System Dynamics, DOI: 10.1080/00423114.2016.1213864, 2016.
- 5) 国土交通省, 鉄道に関する技術上の基準を定める省令の解釈基準: <http://www.mlit.go.jp/common/001273450.pdf> (参照日: 2019年8月23日)
- 6) 運輸省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説, 研友社, pp. 175-179, 1993
- 7) JRIS R 1607: 2017 鉄道車両-空気ブレーキの滑走制御システム, 日本鉄道車輛工業会
- 8) BS EN 15595: 2018 Railway applications - Braking - Wheel slide protection, British Standards Institution.
- 9) D. Hijikata, P. Spiess, B. Bueche, F. Kroeger, "Performance Evaluation of Wheel Slide Protection by Using Simulation and Statistical Analysis," EuroBrake 2018 Conference Proceedings, FISITA, 2018.
- 10) B. Allotta, M. Malvezzi, E. Meli, L. Pugi, A. Ridolfi, A. Rindi, G. Vettori, "Simulation of Railway Braking Tests under Degraded Adhesion Conditions," The 2nd Joint International Conference on Multibody System Dynamics, May 29-June 1, 2012, Stuttgart, Germany.
- 11) L. Pugi, M. Malvezzi, A. Tarasconi, A. Palazzolo, G. Cocci, M. Violani, "HIL simulation of WSP systems on MI-6 test rig," Vehicle System Dynamics, DOI: 10.1080/00423110600886937. 2006.
- 12) 大山忠夫, 粘着の話-車輪とレール間の粘着力とその有効利用-, レールアンドテック出版, pp. 22-23, 2002