

鉄道の空気ブレーキの動きを再現する



木崎 裕太
Yuta Kizaki
車両技術研究部
ブレーキシステム研究室
主任研究員



中澤 伸一
Shinichi Nakazawa
車両技術研究部
ブレーキシステム研究室長

はじめに

鉄道車両は車輪とレールがともに鋼鉄製のため、ゴムタイヤでアスファルト上を走行する自動車に比べてすべりやすく、「急ブレーキ」が苦手です。雨天時などはより顕著で、ブレーキ時に車輪がすべる「滑走」に注意が必要です。滑走とは、車両の速度（対地速度）よりも**車輪周速度**が低い状態のことです。滑走が発生すると、減速性能が低下してしまうことで停止目

標位置を行き過ぎて重大な事故に繋がる可能性があります。そこで、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、車輪の滑走状態に応じてブレーキ力を自動的に調整する仕組みを持っています。

鉄道総研では、この滑走制御の性能を精度よく評価するための試験環境として、実際の鉄道車両の**空気ブレーキ**の動きを定置で再現する「滑走制御シミュレーター」を開発しました¹⁾²⁾。

車輪周速度

車輪路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。

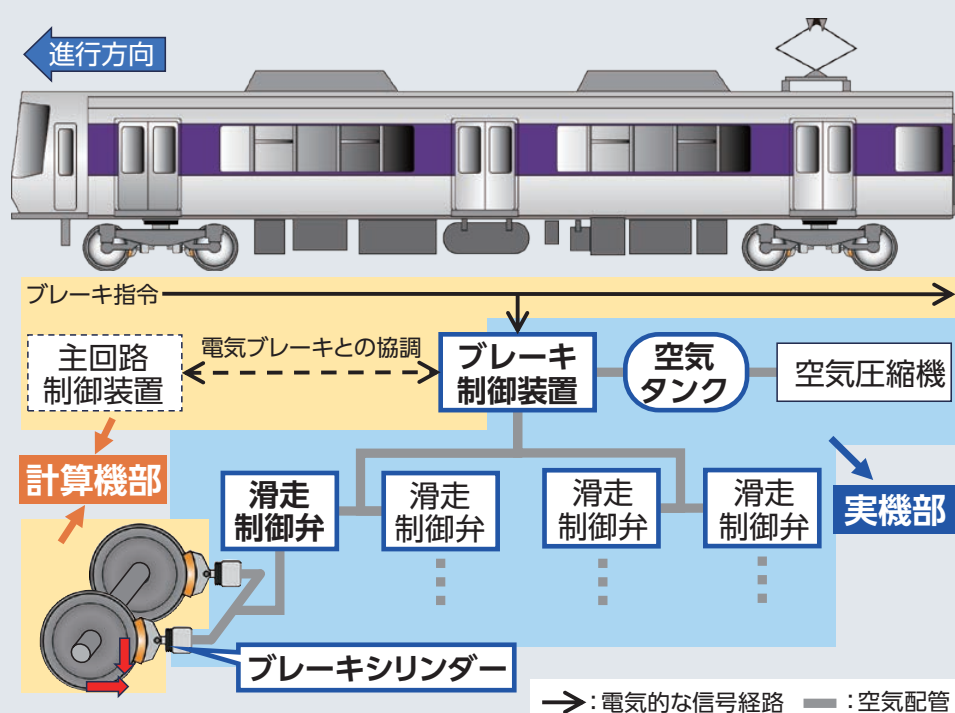
滑走制御

自動車のABS（アンチロック・ブレーキシステム）に相当するもので、車輪の滑走やロック（固着）によるブレーキ距離の延伸を抑えるために、車両の対地速度と車輪周速度などの情報に基づきブレーキ力を制御します。

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。

図1 鉄道車両の空気ブレーキシステム



滑走制御シミュレーターでは、一般的な鉄道の空気ブレーキシステム(図1)における圧縮空気の生成・制御や空気配管の構成を、実物の車両と同じ空気ブレーキ用の機器(以降、空制機器とします)を用いて再現しています。ここでは、このシミュレーターについて紹介します。

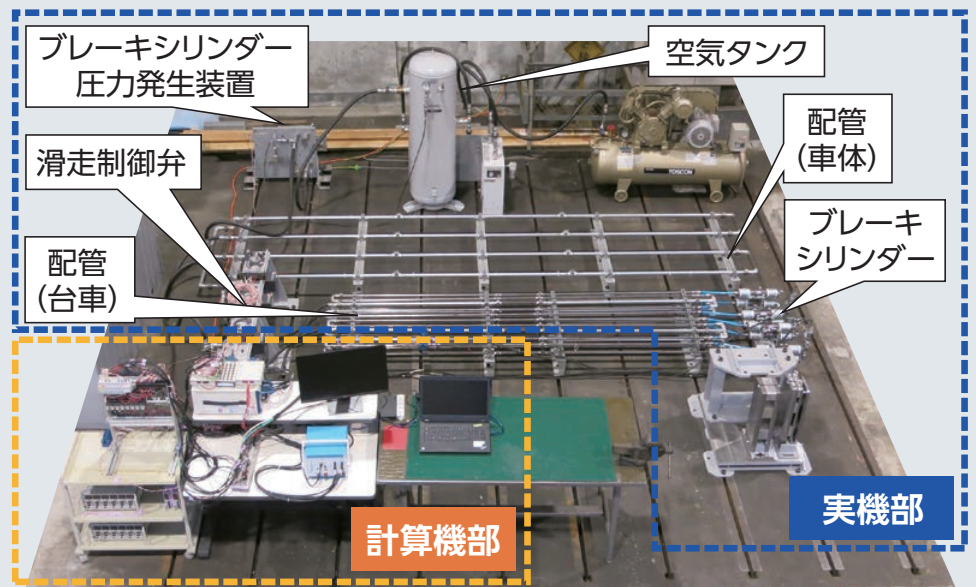


図2 滑走制御シミュレーターの全体図

空気ブレーキの動きを再現したシミュレーター

滑走制御シミュレーターの概要

開発した滑走制御シミュレーター(図2)は空気ブレーキを対象とします。ブレーキ力の源となるブレーキシリンダー(BC)に供給される圧縮空気の挙動は、経路の配管長さや容積の影響を大きく受けるため、計算機でモデル化して再現することが難しいです。そこでこのシミュレーターは、BC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としています。

その構成は、図3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などの空制機器を用いた実機部と、おもに車両モデル・滑走制御アルゴ

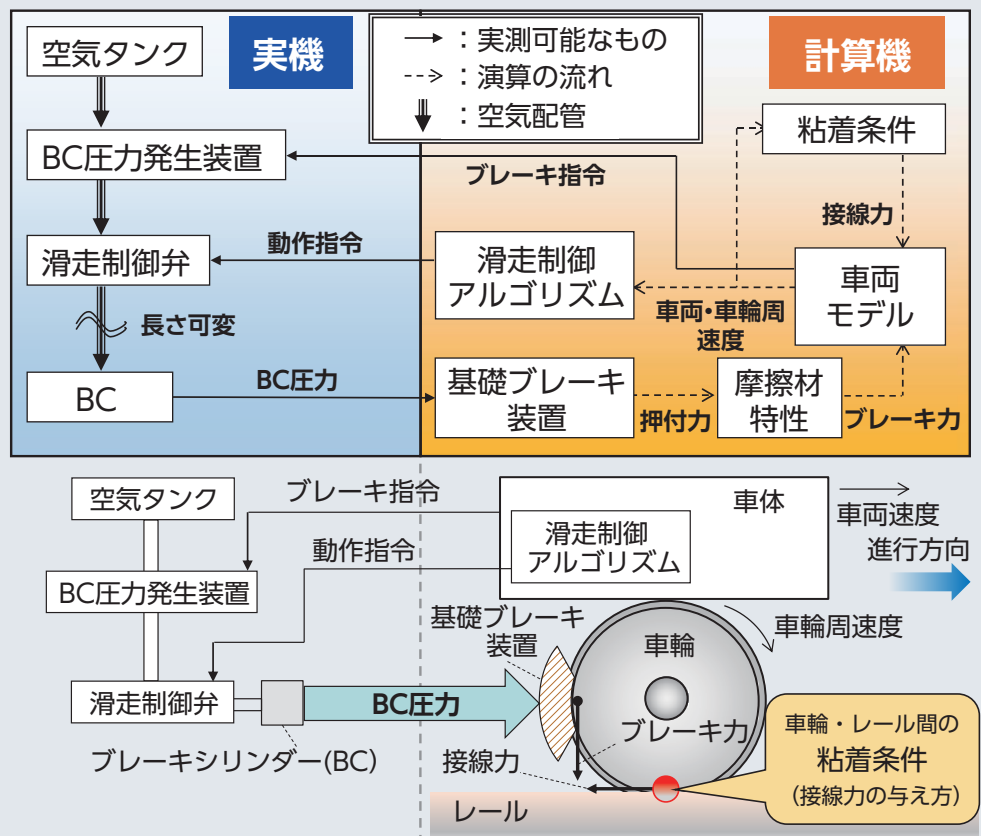


図3 滑走制御シミュレーターのブロック図および模式図

リズム・粘着条件を指定する計算機部となっています。車両モデルは計算機上で車両の運動を数式で表現しています。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ルールを定めたもので、滑走制御弁に対して排気・

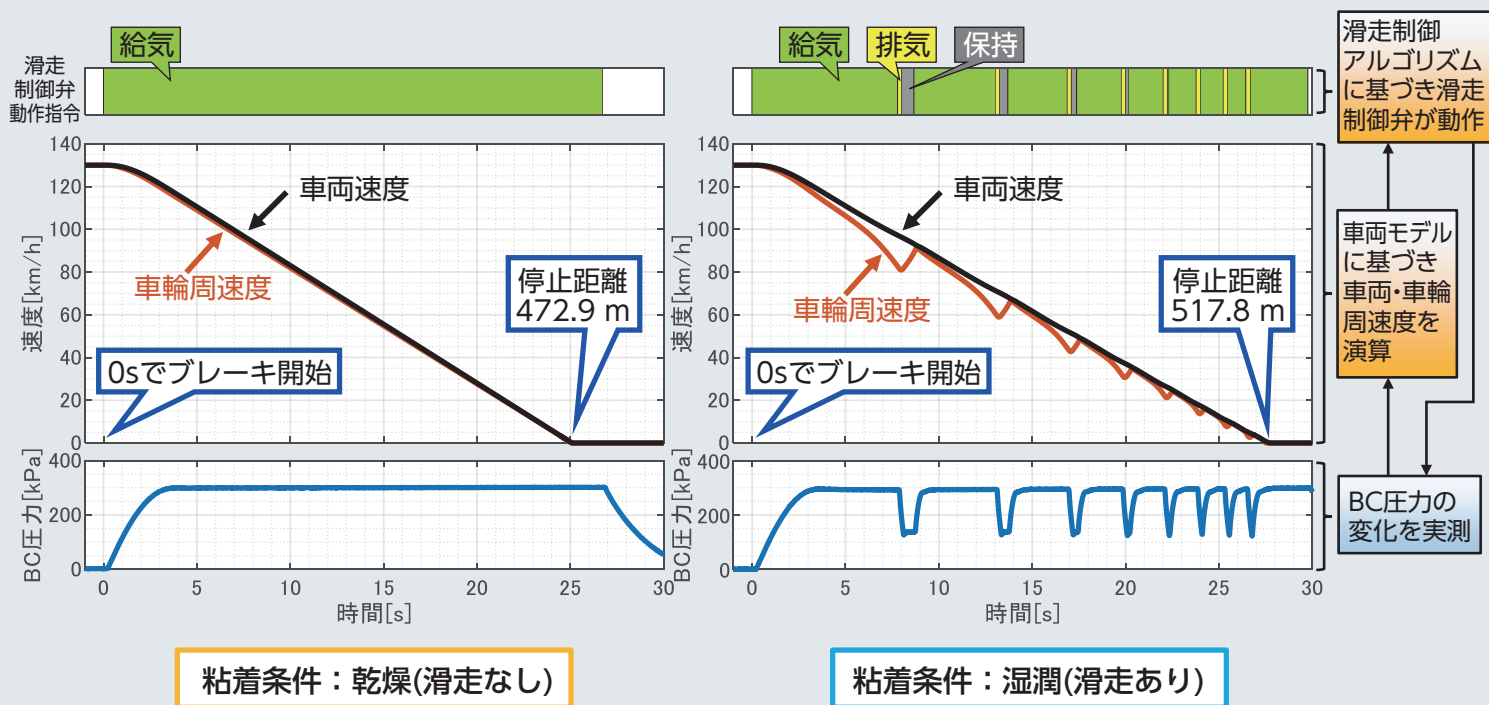


図4 滑走制御シミュレーターの試験例

保持・給気の動作からひとつを指令します。粘着条件とは「すべりやすさ」を表し、車輪・レール間の接線力^②の与え方を意味します。

従来、滑走制御の性能を評価するため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）が必要で、レール上に散水しながらブレーキをかけることで滑走を発生させ、そのときの停止距離などを測定します。しかし、現車試験ではすべりやすさに影響する粘着条件（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、完全に同じ条件で試験を繰り返すことは困難です。そのため、仮に試験結果が良好であっても、それが滑走制御アルゴリズムの効果なのか、たまたま走行区間がすべりにくかったただけなのかを区別できない場合が少なくありません。

② 接線力

車輪・レール間の接触面で伝達される接線方向（接触面に沿った向き）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。

滑走制御シミュレーターでは、この粘着条件を計算機上で任意に設定・固定できます。これを利用して、同じ粘着条件で滑走制御アルゴリズムを変えたときの性能をあらかじめ精度よく比較することで、現車試験の労力を軽減したいと考えています。

シミュレーターによる試験例

滑走制御シミュレーターで車両の減速を再現した結果を図4に示します。このうち、BC圧力のみが実機部における実測値で、計算機部がこのBC圧力をもとに車両モデルの速度情報（車両速度と車輪周速度）を演算し、滑走制御アルゴリズムが速度情報をもとにBC圧力の排気・保持・給気の動作を決定して実機部の滑走制御弁に対して指令を出力します。そして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、という計算のループが車両停止（車両速度＝0km/h）まで継続されます。このとき、ブレーキ開始から車両停止までに走行した距離が停止

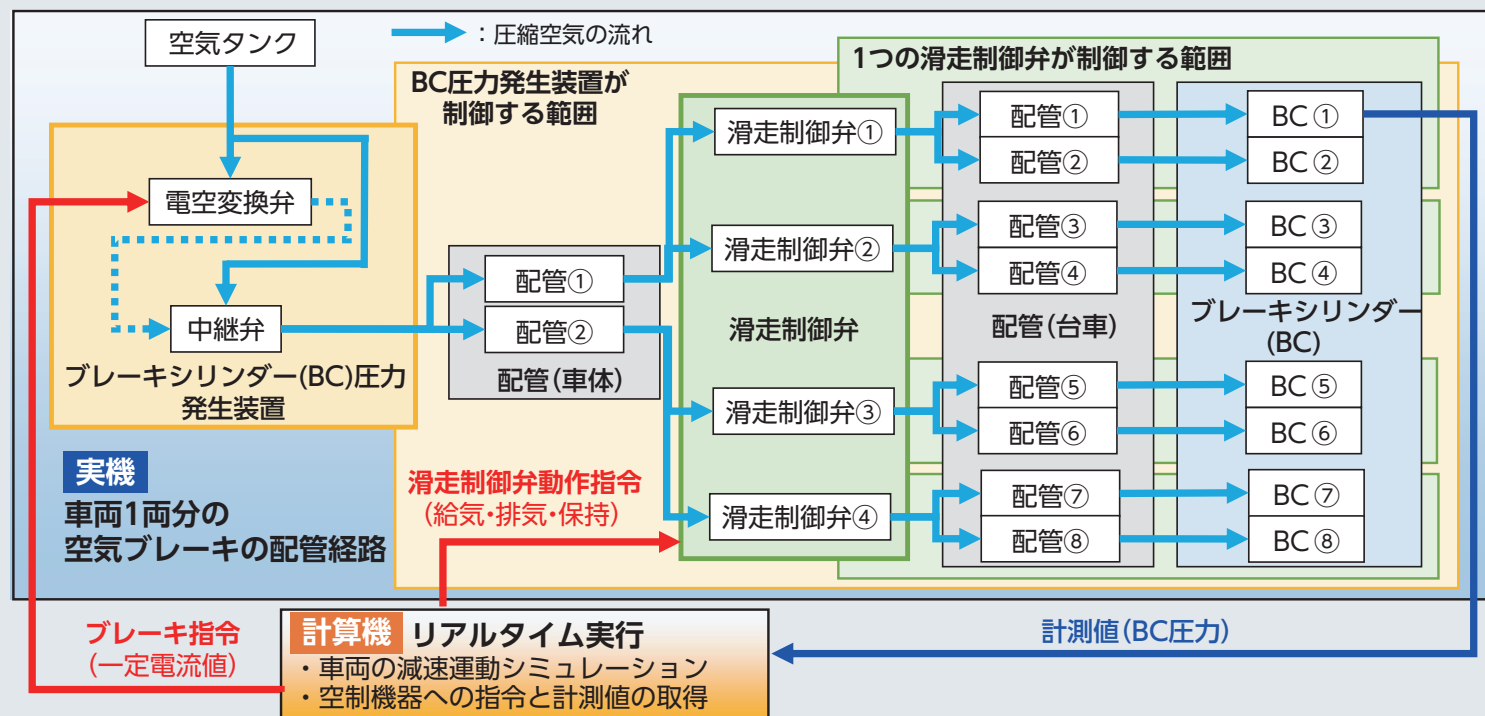


図5 滑走制御シミュレーターの実機部の構成

距離となります。

図4は計算機部で粘着条件のみを変えた結果で、一方は滑走が発生しない乾燥条件、もう一方は滑走が発生しやすい湿潤条件です。湿潤条件では、BC圧力の上昇に伴い滑走が発生し、滑走制御によりBC圧力が調整され、滑走と復帰を繰り返しながら減速しています。

シミュレーターが再現する 空気ブレーキの特性

実物の空制機器によるブレーキシリンダー 圧力の制御

滑走制御シミュレーターの実機部の構成を図5に示します。

BC圧力発生装置はBCまでの配管経路全体（1両分）に供給する圧縮空気を制御しており、車両1両分の空気ブレーキの動作に十分な流量の圧縮空気を供給する能力が必要であることから、電空変換弁と中継弁で構成されます。電空変換弁がブレーキ指令に応じた空気圧力を生成

し、中継弁は、電空変換弁が生成した小流量の空気圧力を大流量に増幅する役割をします。

滑走制御弁は自身より下流（1軸分）の配管経路内の圧縮空気のみを制御しており、2つのON/OFF弁により構成されます。計算機部の滑走制御アルゴリズムからの指令に応じてBC圧力を制御する役割を担い、2つの弁の動作の組み合わせで、BCへの給気か排気または保持をします。

シミュレーターが再現するブレーキシリンダー圧力の挙動

先ほどの湿潤の粘着条件における10回分の試験のBC圧を重ねたグラフ（図6）では、BC圧力の整定値（ブレーキ指令に応じて、最終的に収束する一定値）が試験ごとにわずかに異なっています。これは、空気圧力を制御している電空変換弁、中継弁などがもつ機械的な特性によるもので、同じブレーキ指令（実機部への電気信号）を与えても、出力される最終的なBC圧力にわずかな変動が生じることがあるためです。

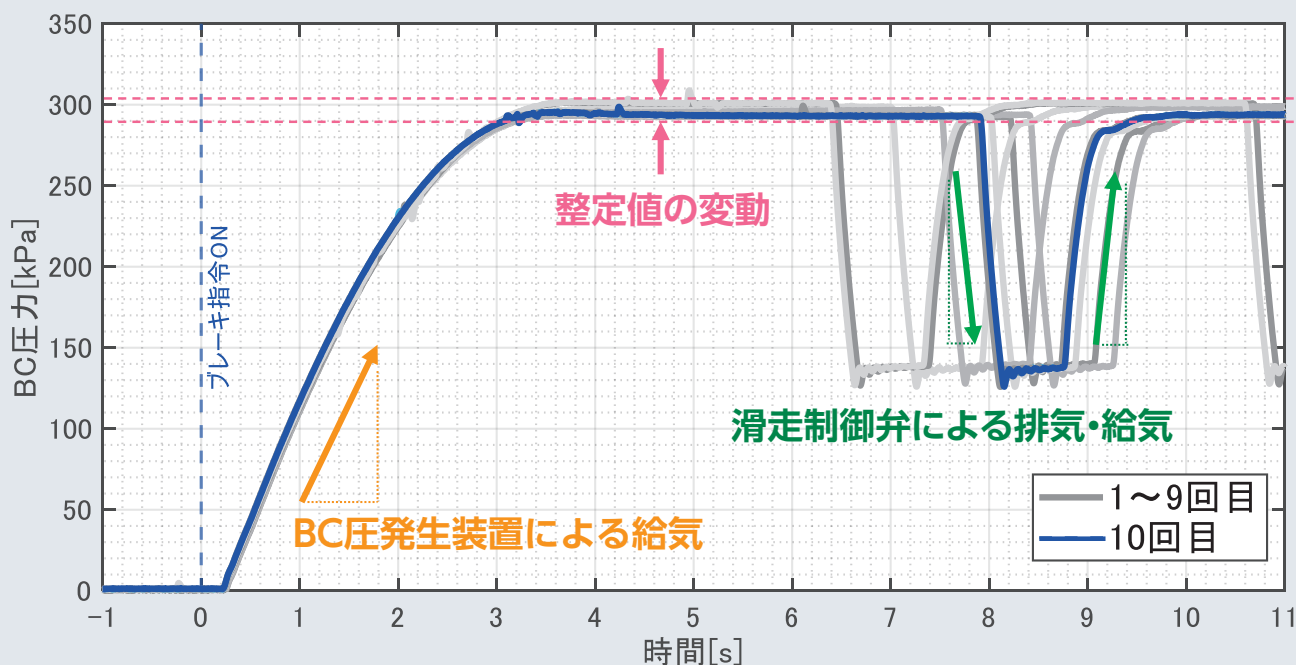


図6 繰り返し試験を行った際のBC圧の挙動

また、ブレーキ指令をBC圧力発生装置に入力した時と、滑走制御弁が動作した時ではBC圧力の「動き（応答特性）」が異なり、前者と比べて後者ではBC圧力の給気・排気のスピードが速くなっています。これは、BC圧力発生装置が1両分すべてのBCまでの大きな容積の空気を制御する動作であるのに対し、滑走制御弁の動作時は、1軸分のBCまでの小さな容積の空気を制御する動作であるためです。結果として、BC圧力の動きのわずかな違いが積み重なることで、試験ごとに滑走の発生とそれに対する滑走制御動作のタイミングは変化します。

上記のほかにも、BC圧力に影響する特性や要素は複数あり、すべてを正確にモデル化することは非常に困難です。滑走制御シミュレーターでは、実機を用いることで「現実の空気ブレーキの特性」をそのままシミュレーションに取り入れることができます。

空気ブレーキの特性の有無による停止距離精度の違い

滑走制御の動作が停止距離に与える影響をよ

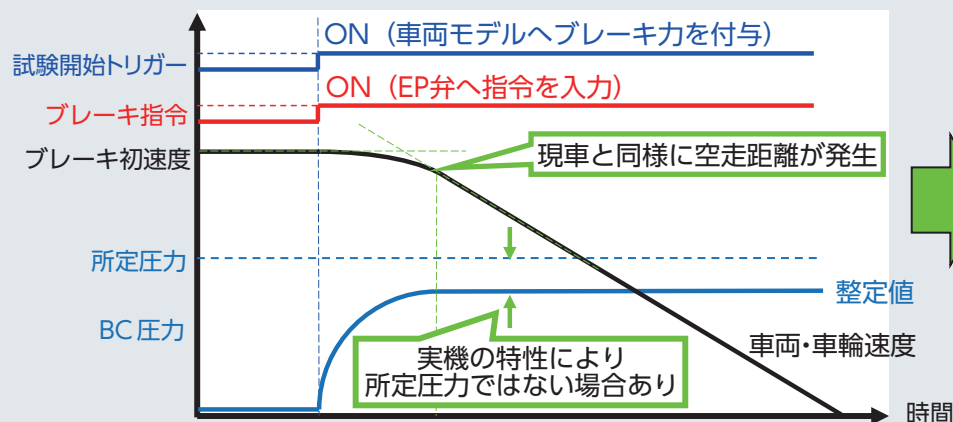
り正確に評価したい場合、BC圧の「動き」のみを実機で再現し、整定値の「変動」がない方が望ましいといえます。

そこで、BC圧の整定値の変動を抑えた試験方法（以降、提案方法とします）により、実機の空制機器がもつ特性が停止距離の精度（ばらつき）に与える影響を比較しました³⁾。提案方法と従来の試験方法との違いと、乾燥・湿潤条件の試験をそれぞれ10回行った時の停止距離の結果を図7に示します。提案方法では、試験開始時点で正確に調整されたBC圧の整定値が与えられます。ただし、提案方法では空走距離[※]を除外して停止距離を評価します。従来の試験方法と停止距離を比較すると、提案方法では、乾燥・湿潤のいずれの条件においても停止距離のばらつきが非常に小さくなっています。

滑走制御シミュレーターにより、滑走の有無にかかわらず、実機の空制機器がもつ特性が停

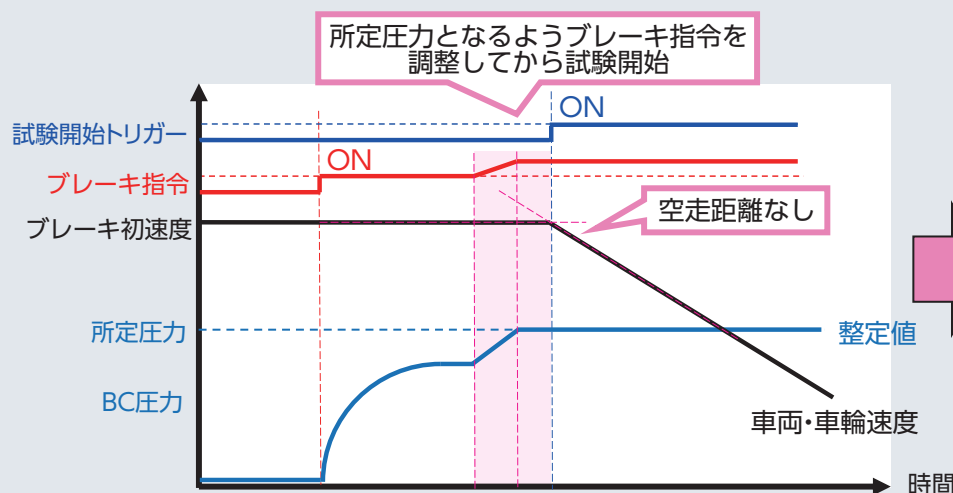
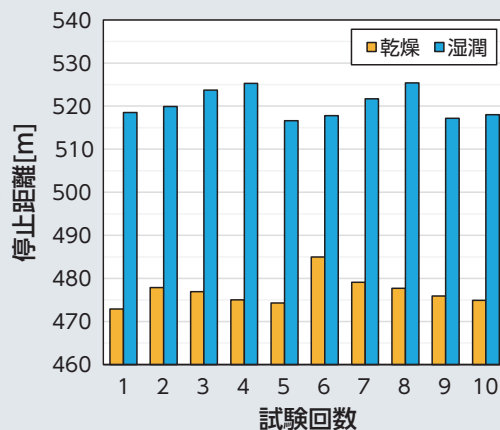
※ 空走距離

ブレーキを開始してから、ブレーキが効き車両が実際に減速を始めるまでの間に走る距離のことを指します。



(a) 従来の試験方法

各試験ごとの停止距離



(b) BC圧の整定値の変動を抑えた試験方法 (提案方法)

各試験ごとの停止距離

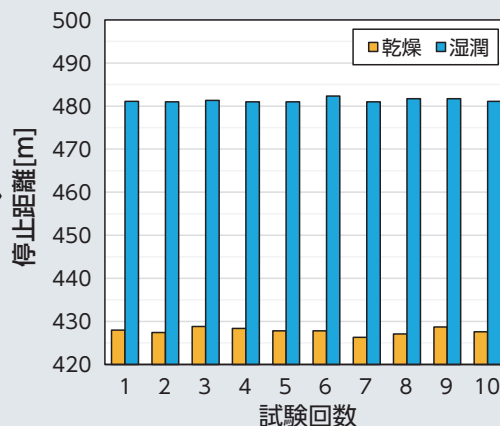


図7 空気ブレーキの特性の有無による停止距離精度の違い

止距離のばらつきに影響することがわかりました。このことから、ブレーキ性能評価に影響を与える要素を切り分けてあらかじめ把握することで、現車試験前の検討精度を高めるだけでなく、現車試験結果の分析にも役立つと考えています。

おわりに

実物の空制機器を用いることで空気ブレーキの動きを再現した滑走制御シミュレーターについて紹介しました。今後もブレーキ性能を精度良く評価できる試験方法の検討を進めるとともに、

に、実機と計算機の双方の利点を活かし、より現車を再現した結果を得られるシミュレーション環境の構築を進めていきます。RRR

文 献

- 1) 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
- 2) 土方大輔，木崎裕太，中澤伸一：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，鉄道総研報告，Vol.36，No.10，pp.19-24，2022
- 3) 木崎裕太，中澤伸一：実機の特長を考慮したシミュレータ試験による空気ブレーキ滑走制御評価の精度向上，日本機械学会第31回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL 2024) 講演論文集，2024