

ソフトウェア改良による空気ブレーキシステムの高応答・高効率化

中澤 伸一* 土方 大輔*

The Improvement of the Response and the Efficiency of Railway Air Brake System by Modifying Software for Control

Shin-ichi NAKAZAWA Daisuke HIJIKATA

The air brake system is essential for the safety operation of railway vehicles. However, the air brake system needs some operating time and air consumption for propagating compressed air through the pipe and filling the cylinder with it. We consider that a more efficient system will have large advantage for safety, robustness, reducing energy and laborsaving for maintenance etc. In this study, therefore we proposed a new method for reducing the operating time (called response time) for supplying the compressed air by controlling wheel slide protection (WSP) dump valve installed in the recent railway vehicles. In addition, we tried to reduce the air consumption of the air braking with a focus on the case where the WSP system is applied. Furthermore, we verified the advantage of the new approach by a real railway vehicle and by a hybrid simulation method etc. As a result, the proposed method reduced the operation time and the air consumption and improved the braking performance.

キーワード：空気ブレーキ，空気消費量，空走時間，滑走制御

1. はじめに

最近の鉄道車両では、省エネルギーや省メンテナンスの観点から電車では電力回生ブレーキを、気動車では機関ブレーキなどを優先かつ最大限に使用できるよう設計される。しかし、停電などの異常時も含め、これらのブレーキが有効に作用しない場合にも車両を安全、確実に停止させるために、圧縮空気によって摩擦材を車輪踏面やブレーキディスクに押し付けてブレーキ力を得る機械的な空気ブレーキの重要度も依然として高い。

そこで本研究では、既存の車両設備を活用してソフトウェアの改良により空気ブレーキシステムの高応答化・高効率化を図る方策として、滑走制御弁を用いて応答速度を向上する手法と、将来の省エネルギー化に向け空気消費量低減を図る滑走制御手法を提案する。

2. 鉄道車両の空気ブレーキシステム

一般的な鉄道車両における圧縮空気を動力源とする系を図1に示す。空気圧縮機で生成されて元空気タンクに蓄積された圧縮空気は、元空気が管によって編成全体に供給される。圧縮空気を使用する機器には、空気ブレーキのほかにも車体を支持する空気ばねや戸閉装置などがある。さらに最近は、乗り心地向上のための車体傾斜や制振制御など、圧縮空気の用途と使用量が増えつつある。

* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

空気ブレーキ系では、逆止弁を介して供給空気タンクと直通予備空気タンクを設けており、列車分離などの異常によって元空気タンク圧力が低下しても、個別に確保した圧縮空気によってブレーキ動作が可能である。

最近の車両に多い「電気指令式空気ブレーキ」では運転士の操作やATCなどの保安装置による電気指令信号を「ブレーキ制御装置 (Brake Control Unit, 以下, BCU)」で空気圧力に変換、出力する。BCUは、電気信号の授受やブレーキ力演算などを行う「ブレーキ受量器」と、空気ばね圧力を検知する応荷重弁、電気信号に応じた圧縮空気を出力する電空変換弁や非常電磁弁、これら

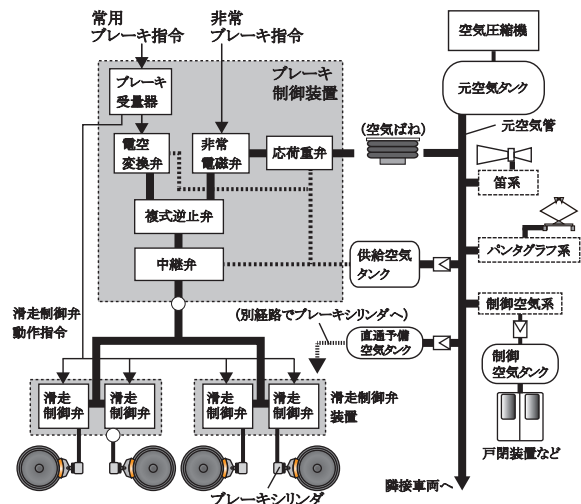


図1 一般的な車両の圧縮空気系

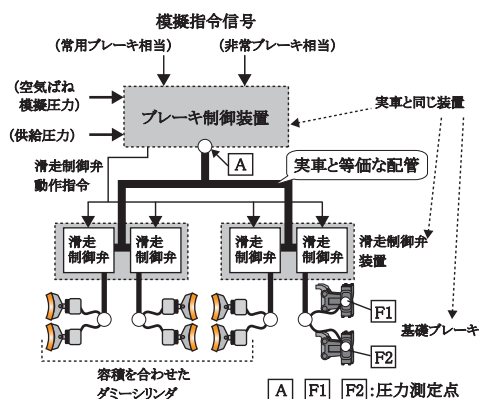


図2 等価配管系の構成

のパイロット圧を増幅して出力する中継弁などから構成される。BCU から出力された圧縮空気は、車両内の配管を通り、台車近傍に配置される滑走制御弁を経由して台車に渡り、ブレーキシリンダに至る。

3. 空気ブレーキの高応答化

3.1 高応答化による性能向上効果

ブレーキ指令から実際の作用までに要する時間は「空走時間」として「ブレーキ時間のうち、所定の割合の制動力が作用し始めるまでの時間¹⁾と定義される。ここでいう「所定の割合」は一意ではなく、ブレーキ時の速度波形から求める方法²⁾等がある。高応答化により空走時間を短縮できれば、空走時間中の走行距離（空走距離）を短縮でき、その効果はブレーキ初速度に比例する。

本報告では、走行しない状態で空気ブレーキの応答性を評価するため、上述の速度波形から求める方法に経験的にほぼ等しいとされるブレーキシリンダ（BC）圧力から空走時間を求める方法³⁾に準じ、ブレーキ指令入力からBC圧力が整定値の63.2% (=1-e⁻¹)に達するまでの時定数を空走時間に対応する指標とする。

3.2 応答性に影響する要因と高応答化手法の検討

図1に示した一般的な空気ブレーキ系の構成例においては、常用ブレーキと非常ブレーキとでパイロット圧の生成過程は異なるが、中継弁から下流の流路は共通である。そして、最近の車両では小型化された弁が管座に集約されてBCUとして一体の機器箱に収納され、弁体や相互の接続流路の容積は小さくなっている。

ある特定の実車を対象に、その空気配管長さや経路上の機器配置を考慮し、BCUや基礎ブレーキ（の一部）に実物を適用して再現した等価配管系（図2）において、在来線の非常ブレーキに相当する電磁弁制御によるブレーキ作用時のBC圧力の応答を図3に示す。このときの時定数は中継弁出口で0.31s、末端で1.09sとなり、中継弁出口に比べて末端の時定数が3倍以上大きいこと

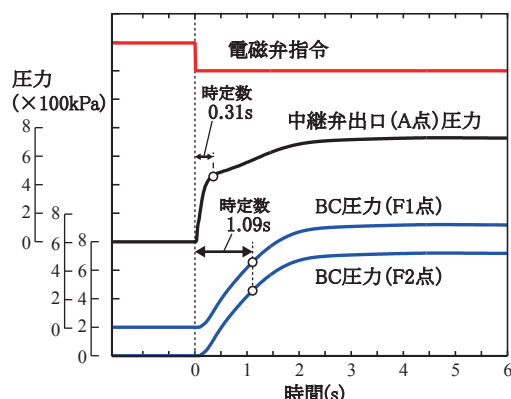


図3 等価配管系におけるBC圧力の応答

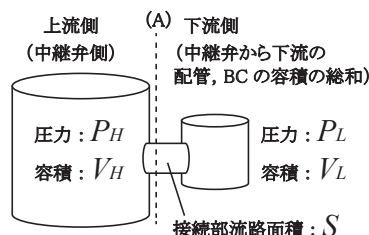


図4 タンクへの充填

から、中継弁より下流の流路の伝達と充填に要する時間が多くを占めていると考えられる。

ここで、大小2個のタンクをそれぞれ上流側と下流側に分けて接続した単純なモデルを考える（図4）。このモデルにおいてA点を開いてから下流側タンク圧力が上流側と平衡するまでの充填時間は式(1)で表せる（文献4)の式をSI単位系に換算して引用）。

$$t = \left(1.285 - \frac{101.3}{P_H} \right) \cdot 5.23 \cdot \frac{V_L}{S} \cdot \frac{1}{n} \sqrt{\frac{273}{T}} \quad (1)$$

ここで、 t : 充填時間 (s)、 P_H : 上流側圧力 (kPa)、 V_L : 下流側タンク容積 (L)、 S : 接続部流路面積 (mm²)、 n : 比熱比 (空気の場合1.4)、 T : 温度 (K) であり、上流側タンク容積 V_H は理想的に ∞ であるとした。

この関係から充填時間を短縮、すなわち高応答化するには、(a) 上流側の容積・圧力の増大、(b) 接続部の大径化、(c) 下流側の容積縮小、などの方策が考えられる。しかし、A点を中継弁出口とみなし、実車で方策(a)を実現するには供給タンクの容量増大や大流量の中継弁を新たに設計する必要がある。方策(b)で接続部に相当する空気配管の大径化は下流側の容積増大となり、方策(c)と矛盾する。

そこで、既存の車両設備、ぎ装をできるだけ変更しないことを前提として、方策(c)により中継弁から下流の空気配管の伝達・充填時間を短縮することを目的に、滑走制御弁を用いた高応答化手法を提案する。

3.3 滑走制御弁を用いたブレーキ高応答化手法

滑走制御弁は台車近傍に設置され、1軸につき供給停止電磁弁(HV)と排気電磁弁(RV)の2個の電磁弁の動作を組み合わせ、供給、排気、保ちの3種類の状態

表1 滑走制御弁の指令と動作の組み合わせ

		排気電磁弁 (RV)	
		励磁	消磁
供給停止電磁弁 (HV)	励磁	排気	保ち
	消磁	(動作禁止)	供給 (通常)

を構成する(表1)。このうち、HVを励磁するとBCへの流路を断つことを利用して、制御ソフトウェア上でブレーキ指令手順を以下のように変更する(図5)。

- (1) HVを励磁してBCへの流路を閉じた上で電空変換弁(または電磁弁)への指令を入力する。
 - (2) ブレーキ作用時にHVを消磁してBCへの流路を開く。
- なお、(1)の段階ではRVの動作は任意であるが、BCに意図しない空気圧が残る恐れを想定する場合は同時にRVを励磁してBC圧を確実に排気する。

この手順により、ブレーキ応答時間のうち、ブレーキを開始しようとする指令から中継弁～滑走制御弁間の空気配管を伝達・充填する時間分の短縮が期待できる。

3.4 応答特性試験

以下の条件でBC圧力の応答を測定した(図6)。

- ①等価配管系で在来線の非常ブレーキ相当の制御(電磁弁開動作)
- ②等価配管系で高応答化手法を適用
- ③実際の車両で高応答化手法を適用

圧力測定点は基礎ブレーキ入口(図2のF1, F2点)で、横軸の時刻の起点は、①は電磁弁開指令、②、③はHV消磁指令であり、いずれもソフトウェア上のジャーク制御は介在しない。なお、実車の制御ソフトウェアでは保安装置など他の機能との関係から動作に制約があり、③は滑走制御弁を1軸ずつ順次励消磁する「テストモード」で測定した。また、各測定時の圧力整定値は、等価配管系では700kPa程度、実車では応荷重機能が作用して530kPa程度となった。

同じ配管系で測定した①と②を比較すると、従来制御では1.09sであった時定数が、高応答化手法により0.23sに短縮された。実車に適用した場合でも0.26sとなり、等価配管系とほぼ同等の効果を確認できた。

同じ高応答化手法を適用した条件である②と③の波形を比較すると、時定数はほぼ変わらないものの、過渡応答波形に違いがあった(図6の区間(A))。これは、③では滑走制御弁を順次1軸ずつ励消磁する動作であるのに対し、②では4軸を同時に動作させており、上流側の供給流量が飽和したためと考えられる。また、図6の区間(B)で隣接する軸の滑走制御弁がテストモードによって動作した際にBC圧がわずかに低下した原因も同様に、上流側流量の制約によると考えられる。

3.5 高応答化手法の応用

提案する高応答化手法は、圧縮空気の伝達・充填に要

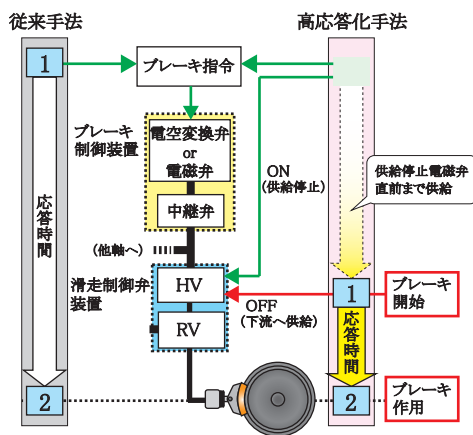


図5 滑走制御弁を用いた高応答化手法の構成

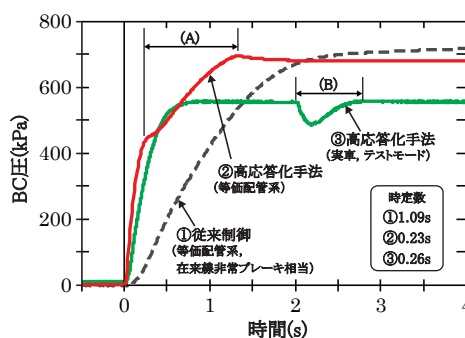


図6 高応答化手法によるBC圧力の応答

する時間の短縮のために、最もBCの近くに配置され電氣的に指令できる滑走制御弁を利用する手法で、制御ソフトウェアの変更によって実現できる。ただし、滑走制御弁に求めた機能は流路の開閉のみで、圧力の大きさは従来通りBCU内の制御弁で調整する。そのため、本手法を適用するには、使用するブレーキの強さ(ブレーキノッチ)を事前に知る必要がある。

一方、実車では、ブレーキ動作に時素を設定し、何らかの判定を行った後にブレーキを作用させる場合がある。例えば、「地震が発生した場合架線への送電を停止し、停電を検知した車両は非常ブレーキが動作し停止する⁶⁾」とした新幹線の地震時非常ブレーキの事例では、給電セクション通過等による瞬時停電と区別するため、電圧低下からブレーキ作用までの間に時素を設けており⁶⁾、このときの空走時間は時素とブレーキシステム固有の時定数の和となる。仮にこの時素を利用して提案手法であるHVの励消磁を行えば、高応答化が期待できる(図7)。

ただし、単純に高応答化するだけでは、ブレーキ作用時の衝撃によって乗り心地や連結器等の機器へ悪影響を与える恐れがあり、実用に際しては調整が必要である。

4. 空気ブレーキの空気消費量低減

空気ブレーキのブレーキ力増大のため将来的にシリン

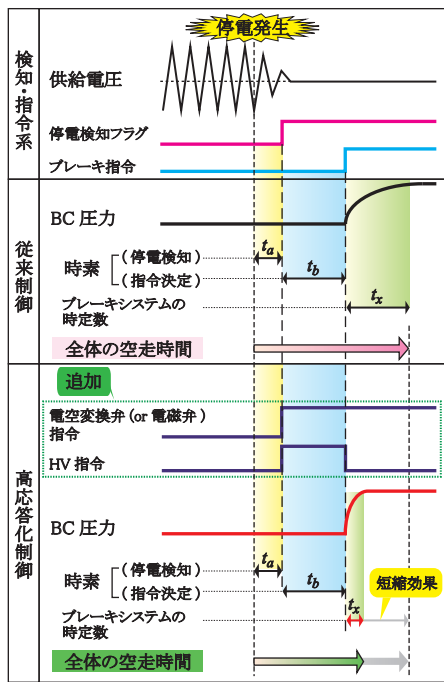


図7 高応答化手法の応用イメージ
(停電時の非常ブレーキ)

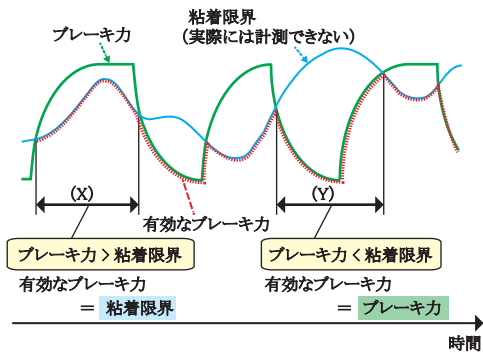


図8 粘着とブレーキ力の関係①
(単純な滑走制御)

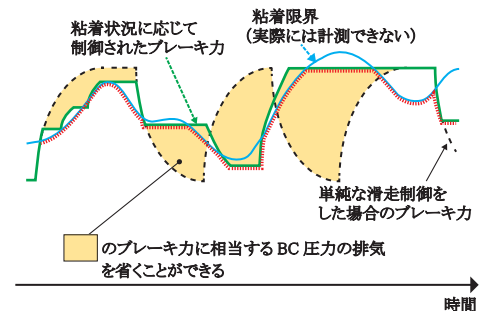


図9 粘着とブレーキ力の関係②
(理想的な滑走制御)

ダの大径化（容積増）が求められる場合や、増大したブレーキ力が車輪滑走を誘発して滑走制御頻度が増加する場合、結果的に空気消費量が增大することが考えられる。

ここでは滑走制御による空気消費量に着目し、実用化されている手法の一つであるすべり率滑走制御⁶⁾に対し、これを改良して減速度向上効果があったTL型滑走制御⁷⁾を対象に、実車とシミュレータを組み合わせたハイブリッドシミュレータ環境により空気消費量を比較する。

4.1 空気消費量の少ない滑走制御手法

4.1.1 粘着とブレーキ力の関係

ブレーキの目的は、車両の並進運動を減速・停止させることであるが、車輪・レール間の粘着力を利用する「粘着ブレーキ」において図8に示すような滑走時にブレーキ力を単純に増減させる制御を想定した場合、「ブレーキ力>粘着限界」となる区間Xでは、並進運動に対して有効なブレーキ力は粘着限界に留まるとともに滑走が進展する。そして滑走制御によってブレーキ力を減少させ、区間Yのように「ブレーキ力<粘着限界」となれば、ブレーキ力が並進運動の減速に寄与し、滑走も収束していく。このように、時々刻々と変化する粘着限界とブレーキ力の大小関係に対し、理想的なブレーキ制御を「滑走せず、粘着を最大限有効に利用して減速する」と仮定すると、その動作は図9のように「常に粘着限界と等しいブレーキ力を負荷する」こととなる。

さらに、滑走検知そのものを減らせば排気動作を抑制できるので、滑走制御による空気消費量を低減するには、

- ・粘着限界にできるだけ追従するようBC圧を制御する。
- ・固着防止性能を維持しつつ滑走を検知しにくくすることが有効と考えられる。

4.1.2 すべり率滑走制御

すべり率滑走制御⁶⁾の概要を図10に示す。この制御では、滑走を予め設定したしきい値によって「滑走」、「収束」、「再粘着（復帰）」に判別し、各状態に規定された滑走制御弁の動作によりBC圧力を給排気する。「滑走」は「速度差・すべり率検知（以下、 ΔV 検知）」条件と「減速度検知（以下、 β 検知）」条件の論理和で検知され、速度差 ΔV (km/h)とすべり率 η (%)はそれぞれ式(2)、(3)で定義される量である。

$$\Delta V = \text{基準速度} - \text{軸速度} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\Delta V}{\text{基準速度}} \cdot 100 \quad (3)$$

基準速度とは滑走していない軸の速度または制御に適用するために補正した速度である。

すべり率滑走制御は、滑走の発生から収束、再粘着までを1つのサイクルとして完結させ、滑走を確実に再粘着させることを目指した動作となっている。

4.1.3 TL型滑走制御

TL型滑走制御⁷⁾は、すべり率滑走制御を基本に、(i) β 検知に代わり式(4)で定義する固着余裕時間(T_L , 単位はs)を滑走検知条件に用いる。

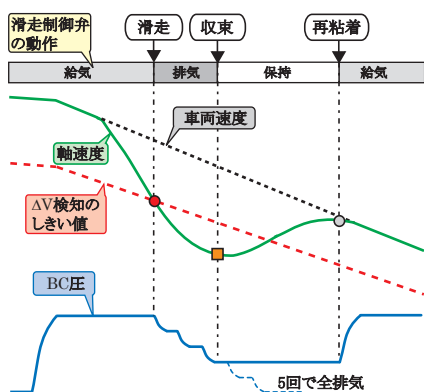


図 10 すべり率滑走制御の動作概要

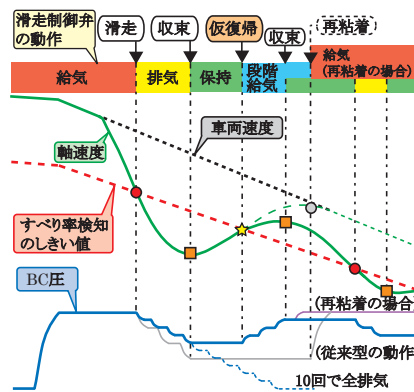


図 11 TL型滑走制御の動作概要

$$T_L = \frac{\text{軸速度(km/h)}}{\text{減速度(km/h/s)}} \quad (4)$$

- (ii) BC 圧の排気段数の細分化および再粘着するより前に回復点を設け段階給気開始点とする。
 - (iii) 滑走から復帰する過程の給気を段階的に行い、再滑走を抑制する。
- とした制御である (図 11)。ここで新たに提案した (i) の固着余裕時間は、固着するより早く BC 圧を全排気できる時間を保証する指標である。また、(ii), (iii) は、滑走しても排気ではなく保持や給気動作をできるだけ選択させて高い BC 圧を保とうとするもので、不要な排気を防ぎ空気消費量の低減にも有効と考えられる。

4.2 実車による空気消費量測定

4.2.1 ハイブリッドシミュレータ環境

基礎ブレーキ装置や空気配管の長さなども考慮した空気消費量を把握するため、鉄道総研所有の所内試験電車 (以下、R291) を実機として組み込んだハイブリッドシミュレータ環境 (図 12) を構成し、滑走制御動作時の空気消費量を測定した。R291 では、試験用 BC 圧発生装置により任意に BC 圧力を出力でき、元空気タンクから圧縮空気を供給する点および中継弁の下流に複式逆止弁が介在する点を除けば、実車と同様の空気配管、滑走制御弁、基礎ブレーキ装置を用いた動作が可能である。また、車両は無加圧とし、計測・制御装置用の電源、圧縮空気を外部から供給して試験を実施した。

シミュレーション部分は、シリンダ径などの基礎ブレーキ装置の仕様、制輪子摩擦係数や車両重量などを既知として設定しておき、実測した BC 圧力を入力として各軸の周速度と車両速度 (並進運動の速度) を算出する車両シミュレータと、BC 圧指令信号の出力とともに車両シミュレータが算出する模擬速度に基づいて滑走制御を行う BCU シミュレータで構成した。

空気消費量の測定には、流量計の容量やブレーキ時の供給経路を障害しないことを考慮して、滑走制御弁から排気される空気流量を用いた。

4.2.2 シミュレーション条件

シミュレーションの車両条件は 1 両編成の新幹線とし、速度ごとの BC 圧力パターンを設定した (図 13)。ただし、実機部分の車両は在来線用で、新幹線車両とは基礎ブレーキ装置や空気配管の長さなどが異なる。

また、粘着条件として、現実には計測できない粘着限界を粘着係数の関数として外挿した (図 14)。図に示した速度以外の領域でも値を補間し、さらに複数の正弦波と乱数を組合せて粘着係数を変動させた。

滑走制御のパラメータは、すべり率滑走制御 (以下、従来制御)、TL 型滑走制御 (以下、提案制御) のそれぞれを表 2 のように設定した。

4.2.3 試験結果

ハイブリッドシミュレータによる時系列チャートの例を図 15 に、空気消費量と平均減速度を図 16 に示す。

従来制御、提案制御ともに滑走検知条件のすべり率 (以下、検知すべり率) を大きくするにつれ空気消費量は小さくなる傾向にあり、図 17 に示す検知回数が少ないほど空気消費量も小さかった。また、検知すべり率 10% 以上の条件で従来制御に比べ提案制御の空気消費量が小さく、従来制御では β 検知が多いのに対し、提案制御ではすべて ΔV 検知であるが車輪固着は発生せず、固着防止性能を維持していた。

一方、検知すべり率 5% ではこの大小関係が逆転していた。これは、微小すべり領域 (図 14 におけるすべり率 8% 以下の領域) では粘着限界が比較的高いため、提

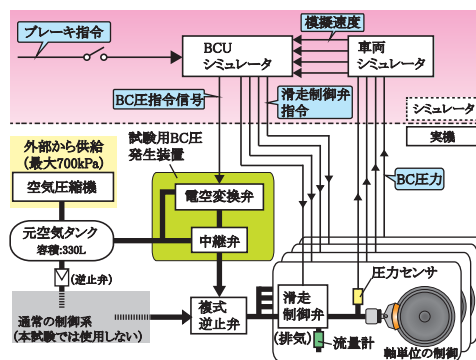


図 12 ハイブリッドシミュレータ環境

特集：車両技術

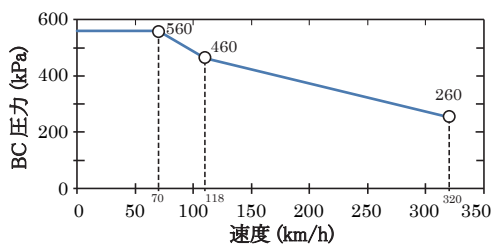


図 13 BC 圧力パターン

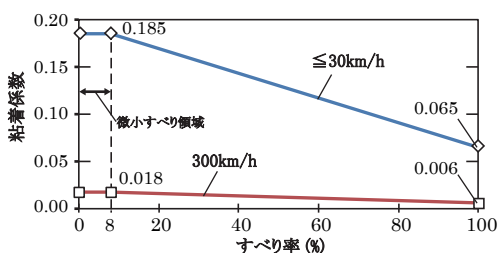


図 14 粘着係数の特性

表 2 滑走制御パラメータ

制御種別	従来制御	提案制御
ΔV 検知条件	$\beta > 3$ AND $\eta > 5, 10, 15, 20$	
β 検知条件	$\beta > 30$	-
T_L 検知条件	-	$T_L = 3.0$
段階排気	5 段階	10 段階
段階給気	-	回復時点設定

η : すべり率 (%), β : 減速度 (km/h/s), T_L : 固着余裕時間 (s)

共通パラメータ: B 点検知 $\beta < 2$, C 点検知 $\Delta V < 3$.

案制御に比べて BC 圧を排気して保持する時間が長い従来制御の動作でもすぐに再粘着でき、段階給気をしない分だけ空気消費量を低減できるためと考えられる。

5. おわりに

本報告では、既存の車両設備を活用してソフトウェアの改良により空気ブレーキの性能を向上する方策として、滑走制御弁を用いて応答速度を向上させる手法と、空気消費量低減を図る滑走制御手法を提案した。これらの手法はいずれも、滑走制御弁を備えた車両であれば、制御ソフトウェアの変更によって搭載できる。

ただし、単に高応答化するだけでは、ブレーキ作用時の衝撃によって乗り心地の悪化等の影響を与える恐れがあり、今後は、実車に搭載した場合の効果や影響を考慮しながら、実用化に向けた検討を図る。

なお、本研究に適用したシミュレーションの一部は、小田急電鉄株式会社、三菱電機株式会社、国立大学法人筑波大学と鉄道総研の四者による共同研究の成果を活用したものである。

謝 辞

実車や等価配管系による応答特性試験に際し多大なる協力をいただいた九州旅客鉄道株式会社、ナブテスコ株

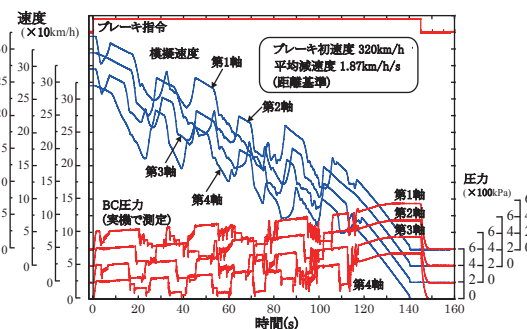


図 15 ハイブリッドシミュラタによる測定チャート例 (TL 型滑走制御, 検知すべり率 10%)

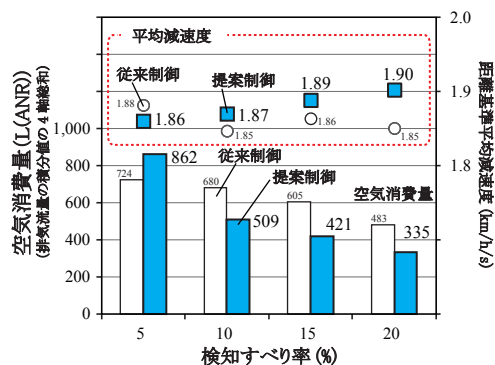


図 16 検知すべり率と空気消費量, 平均減速度

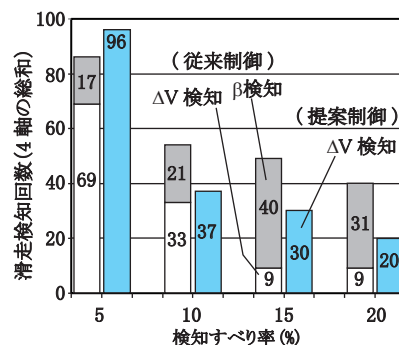


図 17 検知すべり率と検知条件別滑走検知回数

式会社に深く謝意を表する。

文 献

- 1) JIS E 4001, 鉄道車両一用語, 日本工業規格
- 2) JIS E 6004, 電気車一性能試験通則, 日本工業規格
- 3) 日本鉄道運転協会: 運転理論 (再改訂版), 2010
- 4) 中西康二: 基礎から学ぶ空気圧技術, オーム社, 2001
- 5) 田島信一郎: JR 東日本の地震に対する取り組みへ主に車両に関する~, 鉄道車両工業, 第 462 号, pp.37-39, 2012
- 6) 長谷川泉, 茅島勝敏: 在来線 140km/h 化のためのブレーキ技術一すべり率滑走制御方法の改良一, 鉄道総研報告, Vol.13, No.10, 1999
- 7) 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, 2011