

# 巨視すべり領域を活用する滑走制御

中澤 伸一\* 土方 大輔\*

## Wheel Slide Protection System Using Tangential Force in the Macro Slip Area

Shin-ichi NAKAZAWA Daisuke HIJIKATA

Almost all recent railway vehicles have the brake system by the use of the tangential force between rails and wheels. It is difficult to stabilize the braking performance and to prevent wheel damage because the tangential force is influenced by various conditions, such as climate, contact surfaces of rails and wheels, etc.. The wheel slide protection system (WSP) is one of the useful approaches used in many vehicles. However, in the existing WSPs, braking force is controlled on the basis of the limited information derived from the rotational speed of the wheel. Therefore, they do not always demonstrate optimal control in response to tangential force varying frequently. In this study, we propose a new WSP in which the quality of the tangential force by the brake cylinder pressure during wheel slips can be judged. Furthermore, we verified the advantage of the new approach by bench tests. As a result, the application of the proposed method reduced the loss of braking performance.

キーワード：粘着，巨視すべり，滑走制御，空気ブレーキ

### 1. はじめに

現在の鉄道車両のブレーキは、車輪とレール間の粘着力によって車両を減速・停止させる「粘着ブレーキ」が主流である。粘着力は、天候や車輪、レールの表面状態など様々な条件によって変動するため、ブレーキ距離短縮を目的としてブレーキ力を増大しても、粘着力が十分でなければ滑走を誘発し、結果的にブレーキ距離の延伸や車輪の損傷などのリスクを増大させる場合がある。

滑走の発生そのものを防ぎつつブレーキ性能を向上するために、レール・車輪間の粘着状態を改善する手法<sup>1) 2)</sup>なども実用化されているが、本報では、滑走発生後に動作し、車輪固着とブレーキ距離延伸の防止を図る滑走制御手法の性能向上を考える。

既存の滑走制御では、車輪の回転速度に基づく情報のみを用いて制御を行っており、粘着力はもちろん、作用しているブレーキ力などの「力」に関する情報を制御に利用していないため、変動しやすい粘着力に対応した制御を常に行うことは難しい。

そこで本研究では、空気ブレーキの滑走制御を対象に、従来からの速度に関する情報に加え、ブレーキシリンダ(BC)圧力の情報から粘着力を推定して制御に利用する滑走制御手法を提案する。そして、台上試験によりブレーキ性能を評価する。

### 2. 粘着とブレーキ

一般に「粘着」と呼ぶのは、車輪・レール間に作用する(伝達する)力に関わる事象である。本報では、ブレーキ時に作用する力を図1のように考えたときに、車輪・レール間に作用する力  $\hat{F}_m$  を単に接線力と呼ぶものとする。このとき、回転、並進の運動方程式はそれぞれ式(1)、式(2)となる。なお、図と式中の記号の定義は以下のとおりである。

- $\hat{F}_m$  : 接線力
- $F_b$  : ブレーキ力
- $F_r$  : 並進運動に作用する外力
- $P$  : BC 圧力
- $\omega$  : 回転角速度 (ブレーキ方向を正)
- $v$  : 並進運動速度 (ブレーキ方向を正)
- $R$  : 車輪半径
- $M$  : 質量 (一車輪あたり)
- $J$  : 輪軸周りの慣性モーメント
- $\beta_w$  : 車輪の周減速度 ( $=R \cdot d\omega/dt$ )
- $\beta_c$  : 並進運動の減速度 ( $=dv/dt$ )

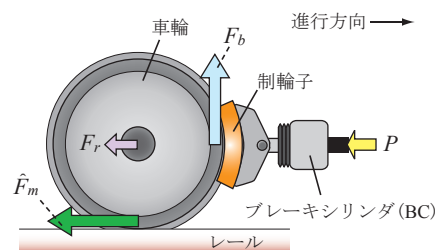


図1 粘着ブレーキの力の作用

\* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

$$J \frac{d\omega}{dt} = R(F_b - \hat{F}_m) \quad (1)$$

$$\beta_c = \frac{\hat{F}_m + F_r}{M} \quad (2)$$

式(2)は、ブレーキの目的である並進運動の減速に接線力が必要であることを示している。

接線力は一般的に図2に示すような特性があるとされ、通常のブレーキ状態でも車輪とレール間のごくわずかにすべっている「微小すべり領域」にある。このときの並進運動と車輪回転に対応する速度は等しいとみなすと ( $v = R\omega$  が成立するこの条件を以下では「理想粘着条件」とする)、並進運動の減速度と接線力は、式(3)、式(4)で表せる。

$$\beta_c = \frac{F_b + F_r}{M + \frac{J}{R^2}} \quad (3)$$

$$\hat{F}_m = \frac{M}{M + \frac{J}{R^2}} F_b - \frac{\frac{J}{R^2}}{M + \frac{J}{R^2}} F_r \quad (4)$$

外力  $F_r$  が作用しなければ、回転運動に与えたブレーキ力  $F_b$  に比例した減速度で減速する。また、実際には直接測定することは容易ではない接線力が、 $F_b$  から求められることを示している。

滑走状態は図2の「巨視すべり領域」に相当し、微小すべり領域と巨視すべり領域の境界となる接線力の極大値を「粘着力」、粘着力を静止状態の車輪とレールの接触荷重（静止輪重）で除した値を「粘着係数」と呼ぶ。多くの場合、巨視すべり領域では微小すべり領域より接線力が減少するが、図3のように巨視すべり領域でも微小すべり領域より大きい接線力を得られる場合もある。

巨視すべり領域における並進減速度と接線力は、「滑走減速度<sup>3)</sup>  $\Delta\beta$  ( $=\beta_w - \beta_c$ )」を定義すると、それぞれ式(5)、式(6)で表せる。

$$\beta_c = \frac{F_b + F_r - \frac{J}{R^2} \Delta\beta}{M + \frac{J}{R^2}} \quad (5)$$

$$\hat{F}_m = \frac{M}{M + \frac{J}{R^2}} \left( F_b - \frac{J}{R^2} \Delta\beta \right) - \frac{\frac{J}{R^2}}{M + \frac{J}{R^2}} F_r \quad (6)$$

慣性モーメント  $J$  は輪軸の質量と形状によって一意に定まるので、ブレーキ力と滑走減速度から巨視すべり領域の接線力を求められる。また、理想粘着条件であれば  $\Delta\beta = 0$  となり、そのときの接線力は式(4)に一致するので、式(6)は微小すべり領域でも適用できる。

この式(6)を接線力の評価関数とみなし、巨視すべり領域においても「ブレーキ力  $F_b$  が大きく、滑走減速度  $\Delta\beta$  が小さい状態」を滑走制御の動作指針とすれば、ブレーキ性能を向上できる。

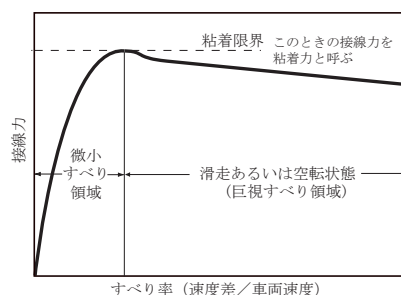


図2 すべりと接線力の関係

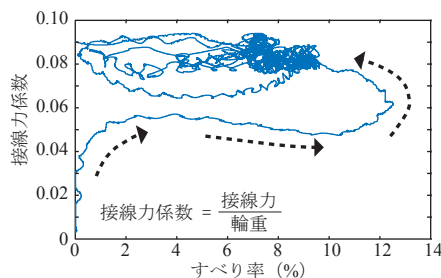


図3 すべりと接線力の関係の実測例

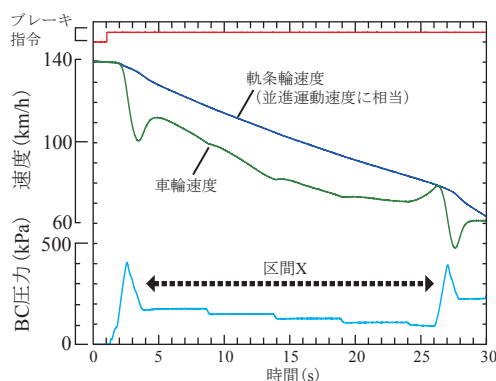


図4 「ダラダラ滑走」の例

### 3. 現行の滑走制御

現状の車両で実用化されている滑走制御には、すべり率滑走制御<sup>4)</sup>、ファジィ制御<sup>5)</sup>などがある。これら既存の手法に共通して滑走状態の判定に用いられているのは、車軸の回転速度から求まる減速度、速度差  $\Delta V$  (= 基準速度 - 車輪周速度)、すべり率  $\eta$  ( $=\Delta V /$  基準速度、百分率で表すことが多い) など、すべて速度に基づく情報である (なお、ここでの基準速度とは得られる軸速度のうちの最大値、または演算での補正などの処理を加えて車両の並進速度とみなす値である)。このため、滑走制御パラメータは、図2のような接線力に関する特性を予め想定して設定されるが、実際の制御中は接線力に関する情報がなく、速度情報に基づくすべり率や減速度で規定した検知条件が満たされれば、実際の接線力が想定と乖離していても制御動作には反映されない。

図4は台上試験による滑走再現試験結果の一例で、区間Xでは滑走を検知してBC圧力を低下させても再粘着しない「ダラダラ滑走」と呼ばれる状態が長く続いて

いる。現行の滑走制御では、このように接線力が小さい状態であることを認識して制御に反映することは難しい（なお、実車には保護機能があり、一定の時間が経過すると滑走制御がBC圧力の排気を中止してブレーキを優先する）。

そこで、既存の速度情報に加え、軸ごとのBC圧力を取得して接線力を推定し、滑走制御に活用する方法を考える。

#### 4. 接線力の推定

##### 4.1 二円筒モデルにおける接線力

図1に示した単純なモデルに近い環境として、軌条輪と車輪からなる二円筒接触モデル（図5）を考える。図5と以下の式中の記号の定義は次のとおりである。

- $F_x$  : 接線力
- $T_{zw}$  : 車輪に作用する外力
- $T_{zr}$  : 軌条輪に作用する外力
- $\omega_w$  : 車輪の角速度（ブレーキ方向を正）
- $\omega_r$  : 軌条輪の角速度（ブレーキ方向を正）
- $R_w$  : 車輪半径
- $R_r$  : 軌条輪半径
- $J_w$  : 車輪軸周りの慣性モーメント
- $J_r$  : 軌条輪軸回りの慣性モーメント
- $\beta_w$  : 車輪の減速度 ( $=R_w \cdot d\omega_w/dt$ )

このモデルにおける接線力は車輪と軌条輪間に作用する互いに逆向きの力  $F_x$  である。実車を想定すると、計測できるのは車輪側の情報に限られるので、車輪軸の運動方程式に着目すると、

$$J_w \frac{d\omega_w}{dt} = R_w \left\{ (F_b - F_x) + \frac{T_{zw}}{R_w} \right\} \quad (7)$$

となり、さらに外力の影響がないものとする

$$F_x = F_b - \frac{J_w}{R_w^2} \cdot \beta_w \quad (8)$$

と表せることを利用して、二円筒接触条件のもとでの接線力推定試験を行う。

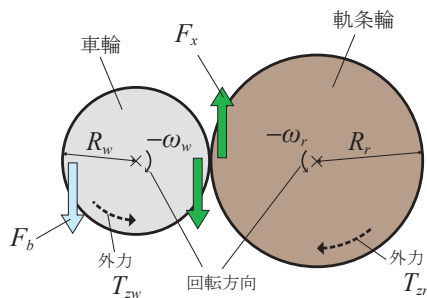


図5 二円筒接触モデル

##### 4.2 二円筒接触試験装置による接線力推定試験

二円筒接触試験装置（図6、図7）に内蔵されているトルクメータの計測値を車輪と軌条輪の接触点位置、すなわち軌条輪半径上に作用する力に換算して真の接線力とみなし、これと比較することで推定手法を評価する。

試験条件を図8、表1とし、制御に適用するBC圧力には10ms周期で取得した空油変換器入口圧力の10点ごとの移動平均値を用いた。得られた圧力に、ブレーキシリンダ面積、空油変換器の倍率、制輪子摩擦係数の想定値を乗じてブレーキ力  $F_b$  を求め、式(8)により接線力を推定した。



図6 二円筒接触試験装置

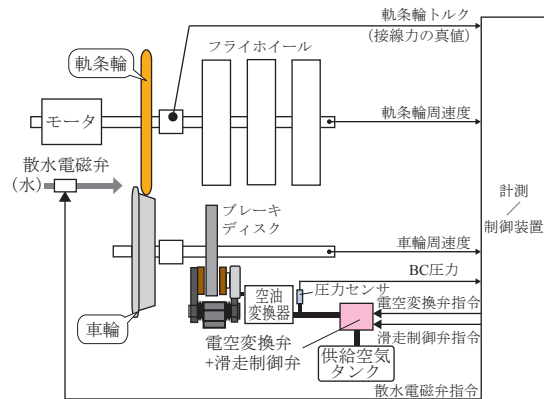


図7 接線力推定試験の計測・制御構成

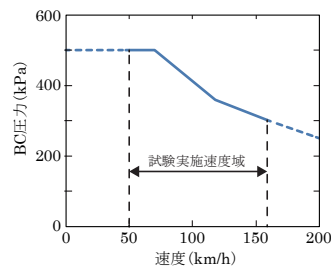
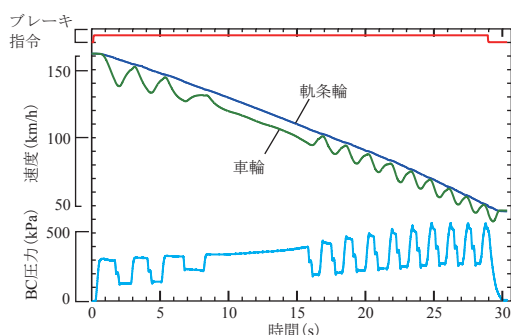


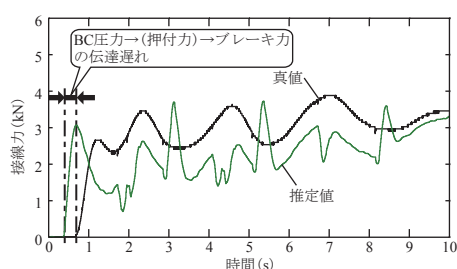
図8 接線力推定試験のBC圧力パターン

表1 接線力推定試験の設定

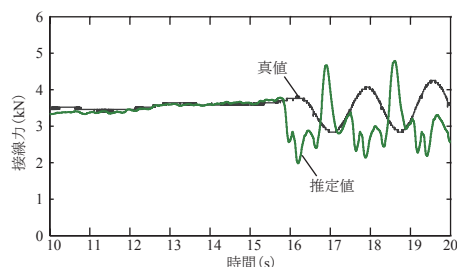
諸元・条件	設定値	記事
慣性モーメント		
主軸	1058 kg・m <sup>2</sup>	静止輪重 42.7kN
従軸	60 kg・m <sup>2</sup>	車輪直径 858.7mm
ブレーキ初速度	160 km/h	50km/h まで
BC圧力		図8
散水条件	200 ml/min	



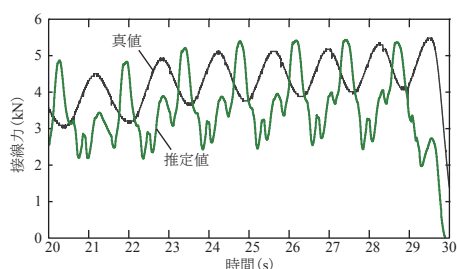
(a) ブレーキ指令，速度，BC圧力



(b) 接線力 (0~10s)



(c) 接線力 (10~20s)



(d) 接線力 (20~30s)

図9 接線力推定試験の一例

推定結果の一例を図9に示す。図9(a)はブレーキ指令，速度，BC圧力を示し，(b)～(d)は軌条輪軸トルクから求めた接線力を真値として，BC圧力から推定した接線力と比較した結果である。

図9(c)の10～15s区間のように滑走中であってもBC圧力の変化が小さい場合には推定値と真値がよく一致したが，滑走制御動作が頻繁になると，BC圧力がブレーキトルクとして伝達するまでの時間遅れが影響し，真値との乖離が大きいの。また，制輪子摩擦係数を一定値として推定しているが，実際には速度や押付力によって変動するため，図9(b)の2～8s区間のように真値に

対する推定値のオフセットが生じる。

接線力を正確に知るには，これらの伝達遅れや摩擦係数の変動を考慮する必要がある，いずれも車両ごと，ブレーキ部位ごとに異なることが想定される。また，実車は複数の軸で構成され，他軸のブレーキ動作の影響なども考えると，実車で接線力を推定するには非常に多くの情報が必要である。

## 5. 粘着状態の良否を推定する滑走制御

実用化されている滑走制御の一つであるすべり率滑走制御<sup>4)</sup>を基礎として，粘着状態の良否判定機能を追加した滑走制御手法を提案する。

### 5.1 すべり率滑走制御

すべり率滑走制御（以下，従来制御）では，車輪周速度からその微分値である減速度と，速度差，すべり率を演算し，それぞれに設定したしきい値によって「滑走 (A点)」「収束 (B点)」「再粘着 (C点)」の3つの状態を検知する。そして，BC圧力に対しては「A→B点間では『排気』」「B→C点間では『保ち』」「C点を検知したら『給気 (復帰)』」となるよう滑走制御弁が動作する (図10)。本手法は，明確なしきい値で滑走状態を区別し，それに対応して予め規定する滑走制御弁動作により，比較的単純な構成ながらブレーキ距離延伸抑制に効果的である。

### 5.2 新しい滑走検知条件

ここでは，接線力そのものを推定するのではなく，式(6)を接線力の評価関数とみなし，接線力の損失分を評価して制御に反映する条件を考える。

式(1)の回転運動方程式を

$$\hat{F}_m = F_b - \frac{J}{R^2} \cdot \beta_w \quad (9)$$

と表す一方，同じブレーキ力を与えて滑走しない，すなわち微小すべり領域であるときの接線力を $\hat{F}_m^*$ ，そのと

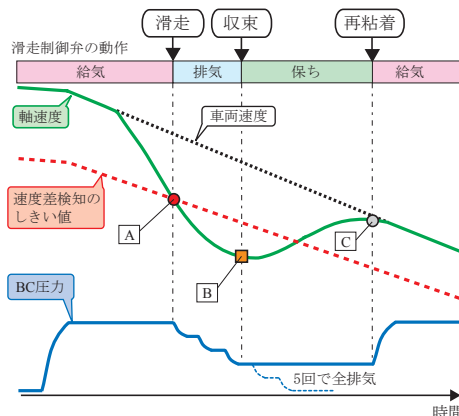


図10 すべり率滑走制御の動作概要

きの並進減速度を $\beta^*$ （以下、想定減速度）とすると、微小すべり領域では $\beta_w = \beta^*$ であることから

$$\hat{F}_m^* = F_b - \frac{J}{R^2} \cdot \beta^* \quad (10)$$

となり、同じブレーキ力を与えて滑走が発生した場合、

$$\hat{F}_m^* - \hat{F}_m = \frac{J}{R^2} \cdot (\beta_w - \beta^*) = \frac{J}{R^2} \cdot \Delta\beta^* \quad (11)$$

と表せる（ $\Delta\beta^* = \beta_w - \beta^*$ を想定滑走減速度とする）。これは、接線力そのものを得ることはできないが、滑走による接線力の損失分を、想定すべり減速度 $\Delta\beta^*$ によって表せることを意味している。

このとき、想定減速度 $\beta^*$ は式(3)により求められるが、直接得られないブレーキ力 $F_b$ に代わり、軸ごとのBC圧力 $P$ を新たに利用できるものとし、BC圧力とブレーキシリンダ径や機械効率などの設計上の想定値を使って $\beta^*$ を算出する。ただし、実車では制輪子摩擦係数などの非線形要素が介在し、設計上のパラメータだけではBC圧力と想定減速度との関係が一意に定まらないため、実機における調整用として想定減速度 $\beta^*$ に係数 $k$ を与える。そして、 $k\beta^*$ と実測の軸減速度 $\beta_w$ から

$$\Delta\beta^* > 0 \Rightarrow \beta_w > k\beta^* \Rightarrow \hat{F}_m^* > \hat{F}_m : \text{滑走進展} \quad (12)$$

$$\Delta\beta^* \leq 0 \Rightarrow \beta_w \leq k\beta^* \Rightarrow \hat{F}_m^* \leq \hat{F}_m : \text{再粘着過程} \quad (13)$$

と判定する。

また、従来制御をより高いブレーキ力・低粘着の条件に適用した場合、過大な軸減速度によって滑走を検知することが多く、図2に示したすべりと接線力の関係に基

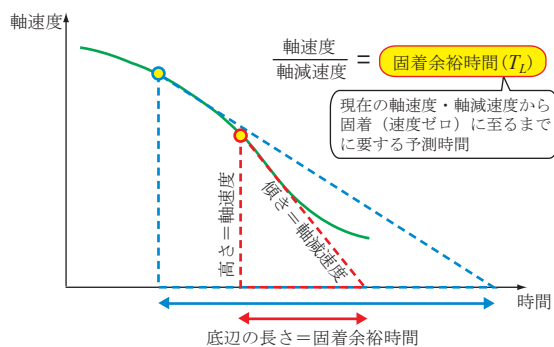


図11 TL検知の考え方

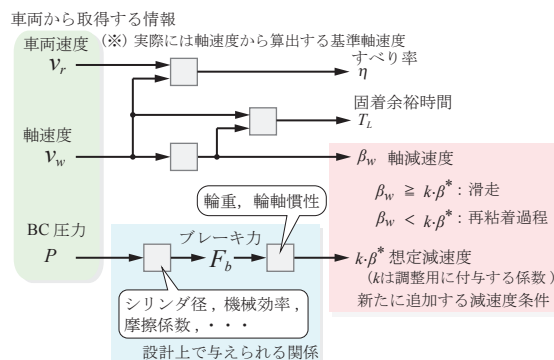


図12 新しい滑走検知条件

づいてパラメータを設定しても、十分に活かさない場合が起こりうるということがわかっている<sup>6)</sup>。そこで、従来制御の減速度検知条件に代わり、固着防止性能を維持しつつ全軸滑走の影響も受けないTL検知<sup>6)</sup>（図11）を併用し、表2の検知条件を適用した制御方法を提案する（図12）。

提案制御の動作概要を図13に示す。提案制御では、従来制御の減速度検知条件をTL検知に置き換え、固着防止性能を保ちつつもBC圧力を極力排気させないことで滑走を従来よりも許容する。そして巨視すべり領域内で粘着の良否を判定してBC圧力を制御する。

表2 滑走検知条件と滑走制御弁動作の対応

論理和		減速度条件	
		$\beta_w \geq k \cdot \beta^*$	$\beta_w < k \cdot \beta^*$
すべり率条件	$\eta \geq \eta_a$	A点（段階排気）	
	$\eta < \eta_a$	B点（保ち）	B'点（段階給気）
固着防止	$T_L \leq t_a$	A点（段階排気）	
再粘着	$\Delta V < v_c$	C点（一括給気）	

5.3 台上試験による性能評価

図6の試験装置を用いて、提案制御の性能を従来制御と比較した。試験条件は表1と同一とし、制御に適用したパラメータを表3、表4に示す。

乾燥条件（滑走なし）での減速区間160～50km/hにおける距離基準の実平均減速度（以下、単に「平均減速度」とする）の試番平均値は4.72km/h/sであったのに対し、散水条件で従来制御を適用した場合の試番平均値は3.60km/h/sに低下した。従来制御では、図14のように設定したすべり率検知しきい値に達する前に、減速度検知条件によって滑走制御が動作し、BC圧力を排気するケースが多く見られた。また、再粘着を検知して給気を開始した直後に滑走が再び発生し、滑走検知～再粘着のサイクルが多発していた。

一方、提案制御における平均減速度の試番平均値は

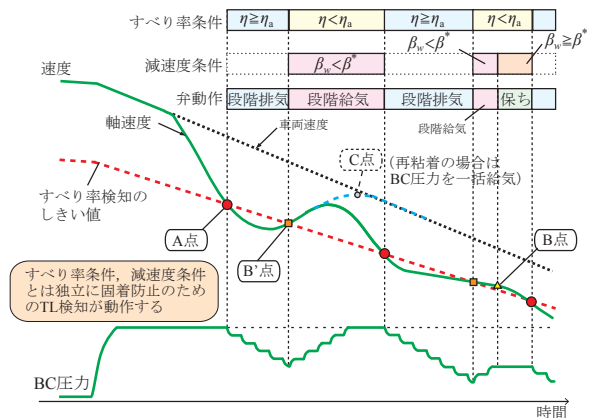


図13 提案制御の動作概要

特集：車両技術

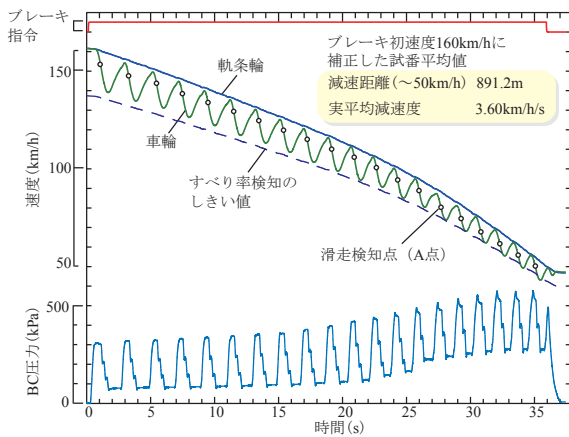


図 14 台上試験結果（従来制御）

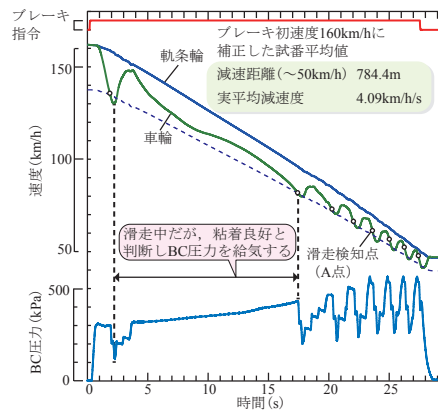


図 15 台上試験結果（提案制御）

表 3 従来制御のパラメータ設定

検知点	従来制御	
A 点	$\Delta V$ 検知	$\beta_w > 3$ かつ $\Delta V > 100$ または $\eta > 10$
	$\beta$ 検知	$\beta_w > 30$
B 点	$\beta_w < 2$	
C 点	$\Delta V < 4$	

表 4 提案制御のパラメータ設定

検知点	提案制御	
A 点	すべり率検知	$\eta > 15$
	TL 検知	$T_L < 2.0$
B 点	$\eta < 15$ かつ $\beta_w \geq k \cdot \beta^*$ ( $k=1$ )	
B' 点	$\eta < 15$ かつ $\beta_w < k \cdot \beta^*$ ( $k=1$ )	
C 点	$\Delta V < 4$	

4.09km/h/s となり、従来制御に比べて約 13% 向上した。制御動作例（図 15）を見ると、滑走を検知して BC 圧力を排気するが、直後に段階給気を開始している。その後も滑走は継続しているが、新たに提案した滑走検知条件によってすべり率検知のしきい値範囲内での粘着状態が良好であると判断し、BC 圧力を高く維持するための制御動作を行っている。このように、新たな検知条件は式 (6) を接線力の評価関数として利用し、巨視すべり領域内で「ブレーキ力  $F_b$  が大きく、滑走減速度  $\Delta\beta$  が小さい状態」を継続させることで接線力を有効に利用できる。

6. おわりに

本研究では、車輪・レール間の粘着をより有効に利用するために、軸ごとの BC 圧力から車輪・レール間の接線力を推定する手法を台上試験によって検証した。そして、制御への適用しやすさから、接線力そのものではなく接線力の過不足を減速度の単位で表す指標を提案し、

従来からのすべり率による滑走検知条件と組み合わせた新しい滑走制御手法を提案した。

台上試験によって初速度 160km/h から 50km/h までの減速ブレーキ試験を行い、従来制御に比べて約 13% の減速度向上効果があることを確認した。

一方、実用化に向けた課題として、提案制御では滑走中の接線力を推定するために軸ごとの BC 圧力を取得し、想定減速度を算出しているが、既存の滑走制御システムでは BC 圧力をフィードバックできる構造とはなっていない。また、想定減速度の算出過程には制輪子摩擦係数などの非線形要素が含まれ、その変動が大きい場合は補正方法を検討する必要がある。

今後は、より実車のシステム構成に即した条件で制御に利用できる情報を選定して制御性能の検証を進め、実用化を図る。

文 献

- 1) 大山忠夫：鉄道技術アラカルト－36－増粘着研磨子，RRR，Vol.64，No.5，pp.38-39，2007
- 2) 大野薫：鉄道技術アラカルト－22－増粘着材噴射装置（セラジェット）－その1－，RRR，Vol.63，No.1，pp.36-37，2006
- 3) 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，2002
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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