

1406 すべり率滑走制御の最適化によるブレーキ性能向上効果の検証

○津留崎 淳 中澤 伸一 (鉄道総合技術研究所)

山岡 郁雄 加藤 仁 (東日本旅客鉄道)

Inspection of the Effect for the Brake Performance

by Optimization of the Slip Rate Wheel Slide Control

Atsushi TSURUSAKI, Shin-ichi NAKAZAWA (Railway Technical Research Institute)

Ikuo YAMAOKA, Jin KATO (East Japan Railway Company)

In conventional slip wheel slide control, the wheel slip is detected by deceleration of the wheel and difference of velocity between the wheel and vehicle. However, deceleration is detected faster than difference of velocity in practice, namely conventional control does not control of appropriate slip rate range as maximum tangential force. Therefore, we carried out the running test by the control technique that if allowed to appropriate slip rate range and lower sensitivity of deceleration detect not to be wheel skid. As a result, we have confirmed that deceleration of the vehicle improved about 10% in comparison with conventional slip rate wheel slide control.

Keywords: slip wheel slide control, pneumatic brake, adhesion, skid, tangential force

1. はじめに

近年の鉄道車両の多くには滑走制御が採用されており、雨天などの条件下にてブレーキ時に車輪滑走が発生した場合に、それを検知してブレーキ力を緩め、車輪の固着によって発生する車輪フラットを防止する役割を果たしている。しかし、滑走制御によってブレーキ力を緩めすぎると、ブレーキ力が不足してブレーキ距離が延伸してしまうため、滑走制御においては、固着を防止しつつ、ブレーキ距離の延伸を最小限にとどめることが求められる。

滑走制御は様々な手法の研究がなされている¹⁾が、その一つとして、「すべり率滑走制御」²⁾がある。この制御手法は、車輪の滑走を目標のすべり率(滑走による車輪の速度低下分を車両走行速度で除した値)の範囲で許容し、車輪・レール間の接線力低下を最小限に抑えてブレーキ距離の延伸を防ぐ制御手法である。すべり率滑走制御では、車輪のすべり率と減速度の2つの物理量で滑走を検知しているが、これまでの研究から、実際には滑走時の車軸の減速度が大きく、減速度による検知が先に動作することがわかっており、軸速度が目標のすべり率に達することなく制御が行われているため、ブレーキ距離の延伸防止の点で十分に制御性能を発揮できていない可能性があると考えられる。そこで筆者らは、減速度検知により固着を防止しつつ、検知感度を従来よりも緩和することで、車輪を目標すべり率まで滑走させる制御手法について検討した。さらに、この手法によるブレーキ性能向上効果について、走行試験による検証を行ったので、その結果について報告する。

2. 滑走制御手法

2.1 すべり率と接線力

車輪・レール間の摩擦係数(接線力係数)は、湿潤状態における車輪のすべり率の変動に対して、不安定な挙動を示すことが実験的にわかっている³⁾。

Fig.1は、水潤滑状態において、すべり率20%まで滑走し、再粘着するまでの接線力係数とすべり率の関係を0.2秒毎にプロットした例である。図のように、すべり率が10%を超える、不安定ながらも接線力が増加傾向となる場合が多いことが知られている。

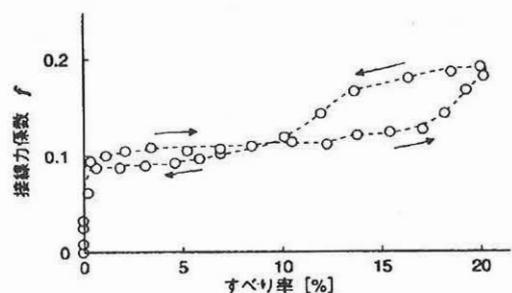


Fig.1 Relation of Slip Rate and Tangential Force³⁾

2.2 すべり率滑走制御

すべり率滑走制御は、前述した水潤滑時の車輪のすべり率に対する接線力の挙動に着目し、滑走時に車輪のすべり率を適切な範囲で許容するようにブレーキ力を制御することで、ブレーキ距離の延伸を抑制する手法である。

従来のすべり率滑走制御の空制時における動作概要をFig.2に示す。すべり率滑走制御では、ある軸が滑走した場合に、基準軸速度(車両速度)と滑走した軸速度からそれぞれ「滑走検知(A点)」、「滑走収束(B点)」、「滑走復

帰(再粘着、C点)」を各しきい値から判別し、各段階ごとの制御を行う。

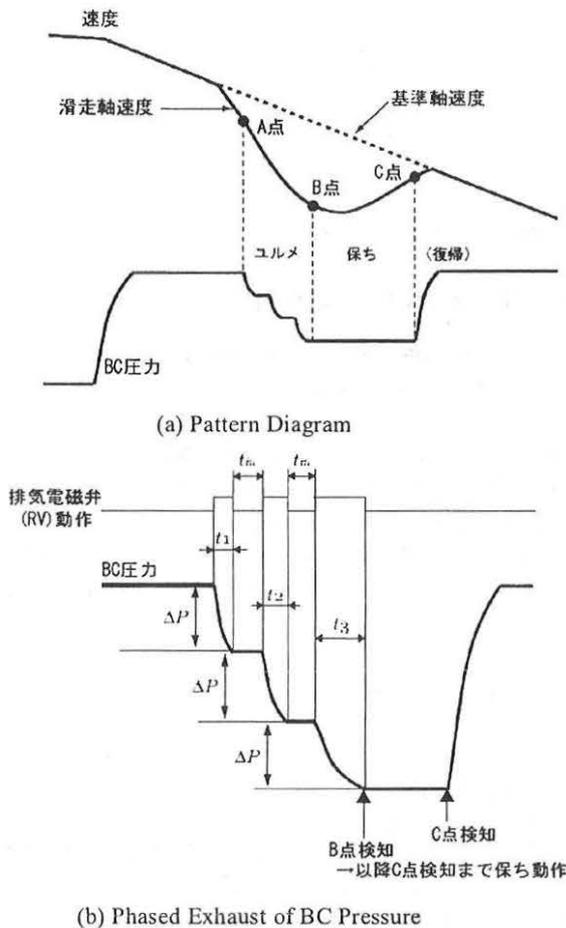


Fig.2 schematic of Slip Rate Wheel Slide Control

滑走検知 (A 点検知) は、「速度差検知 (ΔV 検知)」と、「減速度検知 (β 検知)」の 2 つの条件の論理和で構成され、検知するとブレーキシリンダ圧力 (BC 圧) の排気動作を開始する。 ΔV 検知は、基準軸速度と滑走軸速度の速度差またはすべり率が設定したしきい値を超えた場合に滑走とみなす。 β 検知は、滑走軸の減速度が設定したしきい値 (滑走検知減速度) を超えた場合に滑走とみなすことで、急激な滑走に対し、固着を防止するための保護動作的な役割を果たしている。

A 点を検知した後は、滑走収束とみなす B 点を検知するまでの間、BC 圧の段階的な排気を行う。 B 点検知後は、滑走復帰点 (C 点) を検知するか、再度滑走して A 点を検知するまでの間、BC 圧を保持する。 C 点を検知した場合は、BC 圧を所定圧まで込める動作を行う。

2.3 固着余裕時間型すべり率滑走制御

前項で述べたとおり、従来のすべり率滑走制御では、実際の走行において β 検知が先に動作し、車輪速度が目標のすべり率に達することなく制御が行われていることがわかっている。そこで、 β 検知に求められている固着に対する保護動作的な役割を維持しながら、本来のすべり率滑走制御が目指しているすべりを適切な範囲で許容する制御を行う「固着余裕時間型すべり率滑走制御」(以下、「固着余裕時間型」と呼ぶ)を提案した。

その概要を Fig.3 に示す。従来のすべり率滑走制御(以

下、「従来型」と呼ぶ)における滑走検知減速度を用いて、ある滑走軸の減速度が滑走検知減速度に達してから速度ゼロ(固着)に至るまでの予測時間を「固着余裕時間」として、式(1)で定義する。

$$\frac{\text{現在の軸速度}[\text{km/h}]}{\text{滑走検知減速度}[\text{km/h/s}]} = \text{固着余裕時間}[\text{s}] \quad (1)$$

滑走を検知すると、滑走制御により BC 圧を排気する動作を行なうが、この排気動作が連続的に作用したとして、BC 圧を全排気するまでに要する時間は、車両ごとの配管長やシリンダ容積などによって異なるが、定置試験等により求めることができる固定値であり、これを「全排気時間」とする。そして、この全排気時間よりも固着余裕時間が大きくなるように設定するのが、本手法の特徴である。式(1)の定義によれば、従来型における β 検知の概念を軸速度に応じて変動する形にしたものといえる。

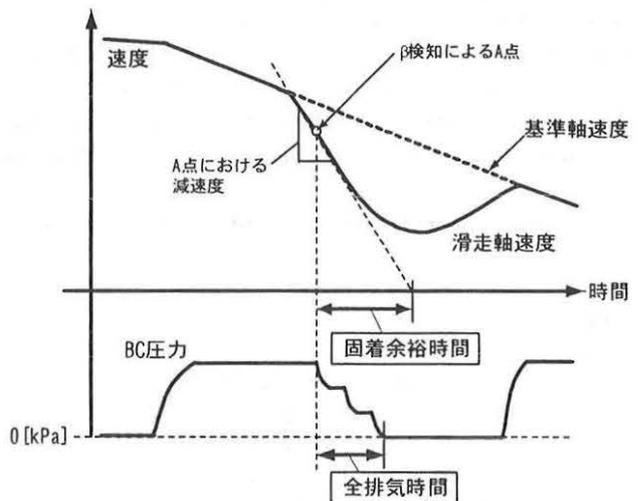


Fig.3 Concept of the Proposed Method

このように、固着余裕時間の概念を β 検知に用いることで、高速域の検知感度は従来型より鈍くなり、より滑走を許容し易くなる。よって、固着に対する安全性を確保しつつ、目標すべり率範囲で滑走を許容することが可能となり、ブレーキ力のロスが低減されてブレーキ性能が向上することが期待できる。

また、従来型では A 点検知後の BC 圧力段階排気 (Fig.2 (b)) の回数は最大 5 回であるが、固着余裕時間型ではこの回数を増し、なおかつ排気動作 1 回あたりの排気量を小さくすることで、細やかな BC 圧力制御を可能とした。

3. 走行試験

提案する固着余裕時間型検知型すべり率滑走制御によるブレーキ性能向上効果について、東日本旅客鉄道(株)の多目的実験車「MUE-train」を用いた走行試験により検証した。試験概要について以下に示す。

3.1 試験概要

- (1) 試験期間：平成 21 年 4 月 20 日～6 月 25 日
(試験：計 14 日間)
- (2) 試験車両：多目的実験車「MUE-train」
(東日本旅客鉄道(株)，6 両編成，4M2T)
- (3) 試験区間：①[東北線]大宮～宇都宮
②[高崎線]大宮～高崎

- (4) 試験条件：①ブレーキ初速度…110km/h
 ②ブレーキノッチ…B7※
 ※高減速度設定（6.0km/h/s 相当）
 ③散水条件…有り（毎分 4ℓ/ノズル）
 ④散水軸…合計 4 軸（Fig.4 参照）
 ⑤滑走制御…固着余裕時間型，従来型
 ⑥制御変更…1 号車～3 号車

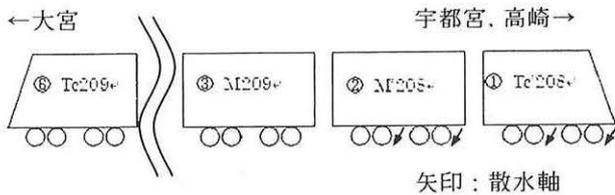


Fig.4 Composition of the Test Train Set

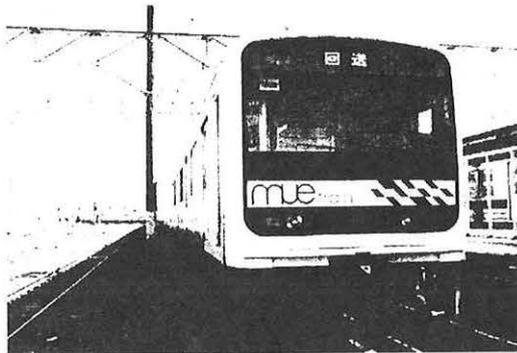


Fig.5 MUE-train

3.2 試験結果

今回の試験では，非常ブレーキを想定し，空制ブレーキによる制御状態及びブレーキ性能の確認試験を行った。結果について以下に述べる。

(1) 制御状態

試験における各制御のパラメータ（滑走検知，BC 圧排気動作）について，Table1 に示す。また，軸速度と滑走検知減速度の関係を Fig.6 に示す。この場合，高速域では β 検知による検知感度が従来型より鈍くなり，滑走を許容し易くなるが，低速域では従来型よりも検知感度が上がり，固着に対する安全性を高めていることになる。

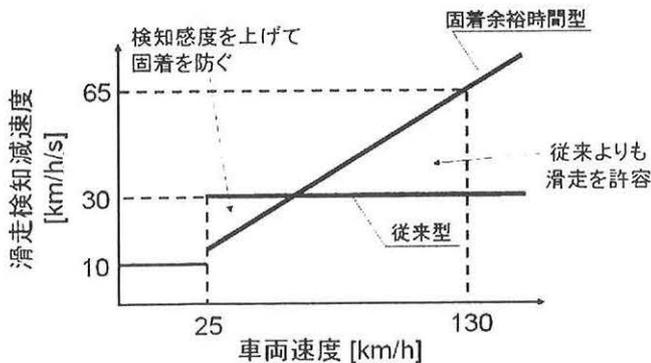


Fig.6 Comparison Between the Conventional Method and the Proposed One

Table1 Control Parameters

制御	従来型	固着余裕時間型	
(β 検知) 減速度 [km/h/s]	30	軸速度に比例	
(β 検知) 固着余裕時間 [s]	—	2.0	
(ΔV 検知) すべり率 λ [%]	18	15	
(ΔV 検知) 速度差 ΔV [km/h]	15	10	
排気時間 [s]	排気段		
	t_1	0.06	0.10
	t_2	0.08	0.03
	t_3	0.10	0.02
	t_4	0.16	0.02
	t_5	2.00	0.02
	t_6	—	0.03
	t_7	—	0.02
	t_8	—	0.02
	t_9	—	0.02
t_{10}	—	2.00	
保持間隔 t_{in} [s]	0.15	0.07	

また，各制御の動作状態の時系列波形の例(2 号車)を Fig.7 及び Fig.8 に示す。図中における軸速度は第 1 軸の速度であり，基準軸速度とは，制御において車両速度とみなす速度のことで，制御器がサンプリング時間ごとに 1 車両内の全軸の速度に演算上の仮想軸を加えた合計 5 つの速度の中で，最も大きい値を選択したものである。ここで，演算上の仮想軸とは，前回サンプリング時の基準軸速度から，一定の減速度（以下， β リミッタと呼ぶ）を減算したものである。

基準軸速度が各図中で不連続に変化しているのは，1 車両内の全軸が滑走する度，演算上の仮想軸が基準軸速度として選択されていることを示している。試験車両の滑走検知器における β リミッタの値は 8km/h/s であるため，全軸滑走状態において実際の減速度が約 5km/h/s であるにもかかわらず， β リミッタによる仮想軸が基準軸となり，実際の車両速度と基準軸速度の差が広がるとともに，全軸滑走直前までのすべり率検知速度が低下し，さらに大きな滑走を許容している。これはすなわち，実際の車両速度に対するすべり率が，本来の狙いとしている設定すべり率を上回っていることになる。

すべり率のしきい値に対する制御状態については，Fig.7 に示す従来型の制御では， β 検知によって BC 圧の排気動作を開始しているため，すべり率のしきい値まで滑走を許容できていないことがわかる。また，1 回あたりの BC 圧排気動作の排気量が大きく，比較的短い時間で再粘着を繰り返している。

これに対し，Fig.8 に示す固着余裕時間型の制御では，ブレーキ開始直後の急激な滑走に対しては β 検知によって固着防止のための排気動作をしているが，それ以降の滑走では設定したすべり率のしきい値の範囲で滑走を許容している。また，BC 圧の一回あたりの排気時間を小さく設定しているため，従来型よりも滑走の収束点をきめ細かくとらえて BC 圧力を保持しており，従来型に比べて BC 圧の給排気動作の繰り返しが少なく，滑走の継続時間が長い。

また，従来型と固着余裕型のいずれの制御方式においても，滑走を許容することで全軸滑走になりやすくなる。制御上では基準軸速度を車両速度と考えるが，全軸滑走時には，演算上の仮想軸を加えるなどの保護を加えているものの，基準軸速度が必ずしも車両速度に一致してい

ない。この場合、制御上は滑走復帰点(C点)を検知しても、実際には滑走継続中である場合が生じてしまう可能性がある。今後は、大きなすべりを許容する滑走制御に適した演算手法や正確な車両速度の取得方法を検討する必要があると考えられる。

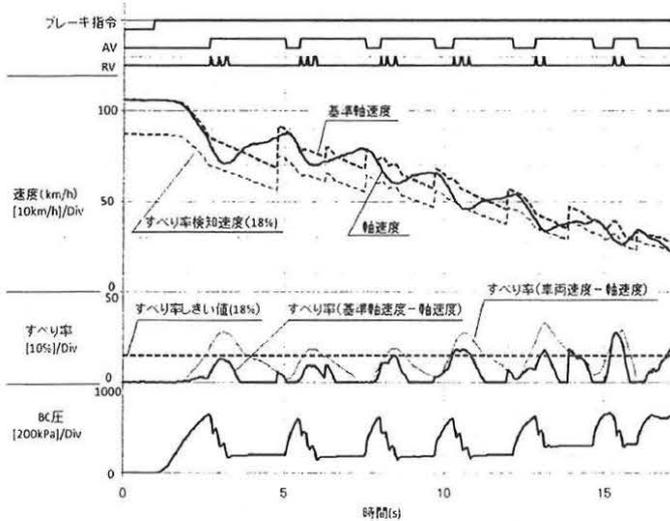


Fig.7 Running Test Result Chart (Conventional Method)

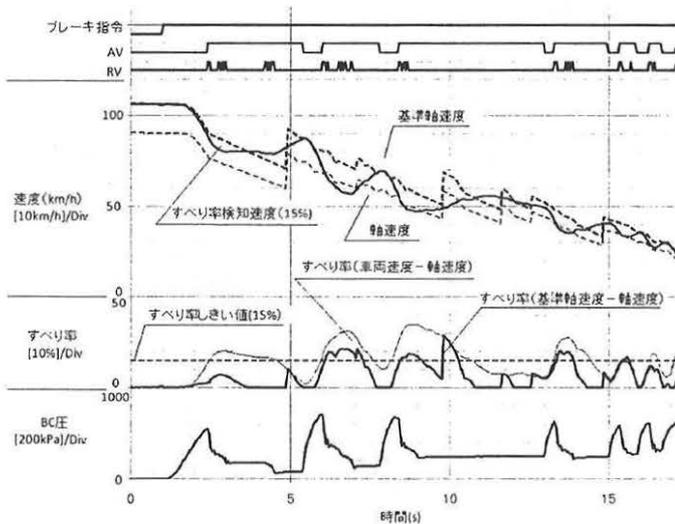


Fig.8 Running Test Result Chart (Proposed Method)

(2) ブレーキ性能

固着余裕時間型と従来型制御の距離基準実平均減速度による比較を Fig.9 及び Table2 に示す。

Table2 Comparison of Deceleration

試験条件	距離基準実平均減速度 (平均値) [km/h/s]
乾燥	6.35
湿潤：従来型	4.75
湿潤：固着余裕時間型	5.11

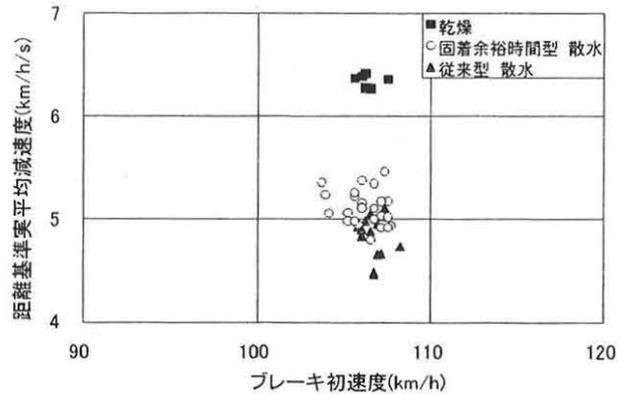


Fig.9 Average Deceleration

固着余裕時間型は、湿潤時の実平均減速度が従来型と比較して1割程度向上させることができた。また、これらは編成6両中3両の制御を変更して得られた結果であるため、編成全車へ本制御を適用することで、より高いブレーキ性能を得ることができるものと考えられる。

4. おわりに

固着に対する安全性を確保しつつ、目標すべり率範囲で滑走を許容することを目的とした「固着余裕時間型すべり率滑走制御」を提案した。さらに、これを実車両に適用して本線走行試験を行い、湿潤時の実平均減速度を1割程度向上させることができた。

今後は、滑走を許容する制御手法に必須の課題である全軸滑走時の車両速度の取得方法についての検討と、すべり率が大きい領域での最適すべり率を把握し、これを適用した滑走制御方法について研究を行っていく予定である。

最後に、本研究にご協力いただいた三菱電機㈱の関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 吉川広, 野中俊昭, 他: ファジィ推論を用いた滑走制御の性能向上, 鉄道における国際サイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, No.41, 2004.11.
- 2) 長谷川泉, 茅島勝敏: 在来線 140km/h 化のためのブレーキ技術 -すべり率滑走制御方法の改良-, 鉄道総研報告, Vol.13, No.10, 1999.10.
- 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, pp.29-32, 2000.