

新しい検知方式を用いた滑走制御方法の開発

中澤 伸一* 津留崎 淳*

Development of a New Skid Control Method Using a New Detection Algorithm

Shin-ichi NAKAZAWA Atsushi TSURUSAKI

Reducing the braking distance is very important for the improvement of the safety of a railway system. However, increasing braking force to realize it often causes a wheel slip under the wet condition because adhesion force between a wheel tread and a rail governs the brake performance. If a wheel slip has reached the lock, a flat spot will be generated on the tread. It damages not only a car body but also a track. Therefore, many methods called “Anti-skid(Anti-lock) Brake System”, “Wheel Slip Prevention system”, etc., have been developed and are performing reducing a braking distance and protecting a wheel tread simultaneously. In this paper, we propose a new skid control method using a new algorithm to detect a wheel slip for achieving a higher performance than the current systems. We also show the effectiveness of the proposed method by means of on-track tests.

キーワード：ブレーキ，減速度，滑走制御，固着防止制御，粘着

1. はじめに

現行の鉄道車両の多くは、車輪とレール間の粘着力を利用する「粘着ブレーキ」を採用しており、雨天時の湿潤条件などによる粘着力の低下がブレーキ距離に大きく影響する。しかし、安全の確保のために、その延伸量をできるだけ抑制することが求められる。

また、粘着力の低下によって車輪が滑走し、さらに固着に至ると、ブレーキ距離が延伸するだけでなく、車輪踏面の円周上に平坦部（フラット）が生成される。このフラットは転動時の騒音や振動の原因となり、車両、軌道にも損傷を与えるため、発生を防止する必要がある。

ブレーキ距離の延伸を抑制するには、できるだけ高いブレーキ力を維持することが求められ、一方、フラット発生を防ぐには、できるだけ早く滑走を検知してブレーキ力を弱めることが効果的である。すなわち、ブレーキ力を制御する観点からは、「ブレーキ距離の延伸」と「フラット発生」に対する方策は相反する動作であり、これらを同時に軽減、防止するために、古くから数多くの滑走制御（または滑走防止制御、ABS:Anti-skid(Anti-lock) Brake System, WSP:Wheel Slip Prevention systemとも呼ばれる）が実用化され、成果を挙げている（文献1）2）3）など）。

今後、現在よりもさらにブレーキ距離を短縮すること、すなわち高い減速度を得ることを目指してブレーキ力を大きくすれば、滑走がより発生しやすくなり、それは固

着発生リスクの増大にもつながる。そのため、滑走制御もより高いレベルで相反する事象に対処しなければならない。

通常の運転で駅停車などに使用される「常用ブレーキ」においては、列車情報管理装置（TIMS:Train Information Management System）⁴⁾などを活用して、編成全体のブレーキ力を維持しながら、滑走の発生そのものを抑える編成滑走制御が開発、実用化されている⁵⁾。しかしながら、在来線の非常ブレーキのような特に安全性を求められるブレーキでは、常用ブレーキよりもフェールセーフ性を保ちつつ、圧縮空気を駆動源とする機械ブレーキ（空気ブレーキ）のみを使用して安定したブレーキ性能を実現しなければならない。

そこで本報では、機械ブレーキのみの使用を想定し、雨天時などの低粘着条件の下でも、より安定した高い減速度を得ること、固着防止性能を向上させることを目標に、新たな滑走検知方式を導入した滑走制御を提案する。本手法は、新たなデバイスを追加することなく、現行の滑走制御装備車の設備を活用し、ソフトウェアの変更によって高減速度化と固着防止性能の向上を両立させようとするものである。

2. 滑走制御方法の検討

レール・車輪間に巨視的なすべりが生じない「粘着」状態においては、車両の並進運動の速度（以下、車両速度）と車軸の回転速度（以下、軸速度）はほぼ等しい。一方「滑走」とは、車両速度に比べて軸速度が大きく低下して

* 車両制御技術研究部（ブレーキ制御）

特集：車両技術

いる状態である。

実用化されている滑走制御ではいずれも、軸速度を元に、その変化率である減速度（以下、軸減速度）やすべり率などの物理量を求めて滑走状態の検出に利用し、検出した状態に応じてブレーキ力を作るブレーキシリンダ（BC）圧力を増減させる制御を行う。

ここでは、実績のある手法の一つである「すべり率滑走制御」¹⁾について述べ、これを用いて実施した現車によるブレーキ試験の結果から、より高減速度を実現するための課題について整理する。

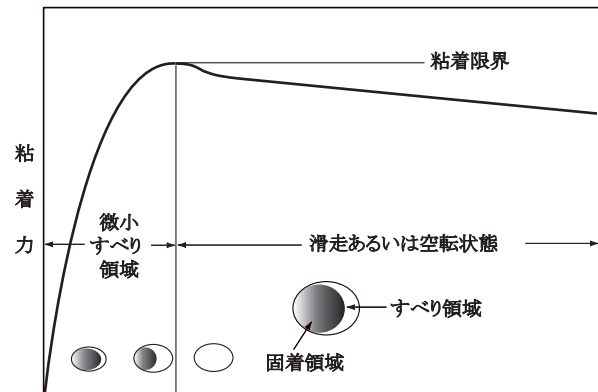
2.1 すべり率滑走制御と高減速度化への課題

すべり率滑走制御（以下、従来型）は、レール・車輪間のすべりに対する粘着力の挙動（図1）に着目し、すべり率（式(1)）をパラメータとして、これを一定の範囲内で許容しながら制御することで、高い粘着力を利用しようとするものである。

$$\text{すべり率 (\%)} = \frac{\text{車両速度} - \text{軸速度}}{\text{車両速度}} \times 100 \quad (1)$$

従来型では、軸速度、軸減速度、すべり率、速度差（車両速度と軸速度の差）を用いて、各軸の状態を「滑走」「収束」「再粘着」の3つに判別し、それぞれの状態に応じてBC圧力の給排気電磁弁を動作させる。この従来型の動作の概要を図2に示す。

滑走の検知には、すべり率、または速度差による「すべり率検知（ ΔV 検知）」と、軸減速度による「減速度検知（ β 検知）」の論理和を用いている。「滑走」を検知すると、一定量のBC圧力を排気して微小時間待機する段階排気を繰り返しながら「収束」を待つ。収束検知後はそのBC圧力を保持し、「再粘着」を検知するとBC圧力を給気して、滑走前のBC圧力に復帰する。各状態の検知は、予め設定した明確なしきい値との比較により行い、段階排気は、1回あたりの排気量（図2中の ΔP ）が等しくなるように排気電磁弁の動作時間を設定し、5回



すべり率(速度差/車両速度)あるいは速度差
図1 すべりと粘着力の関係⁶⁾

の排気で全排気となる。

この従来型を適用し、高ブレーキ力としてBC圧力を大きく設定した車両でブレーキ試験を行ったところ、期待されるほど高い減速度が得られない場合があった（図3）。図に示すように、高い減速度が得られなかった試番における滑走検知条件は、ほとんどが β 検知によるもので、BC圧力の排気量も大きい傾向にあった。また、再粘着を検知してBC圧力を給気した直後に次の滑走が発生していた。

このことから、高減速度が得られなかった原因として、以下の2点が考えられる。一つは、BC圧力の設定を大きくした一方で段階排気の段数が固定であるため、 ΔP が大きくなること、もう一つは、高いBC圧力によりブレーキ初期や再粘着の給気時に起こる滑走の減速度が大きいために β 検知がはたらき、すべり率滑走制御が意図する、すべりを許容することによる粘着力の有効活用が十分ではないことである。

そこで、高減速度を得るための改良点として、

- (1) 滑走中のBC圧力の排気量を減らすこと
- (2) ΔV 検知条件まで滑走を許容すること
- (3) 固着に至るリスクを高めないこと

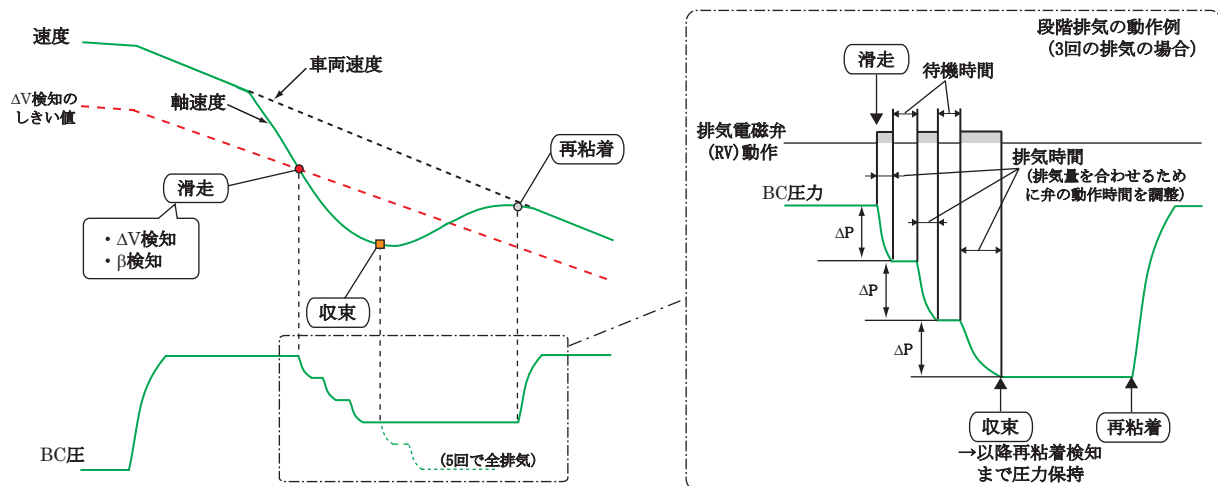


図2 すべり率滑走制御の動作の概要

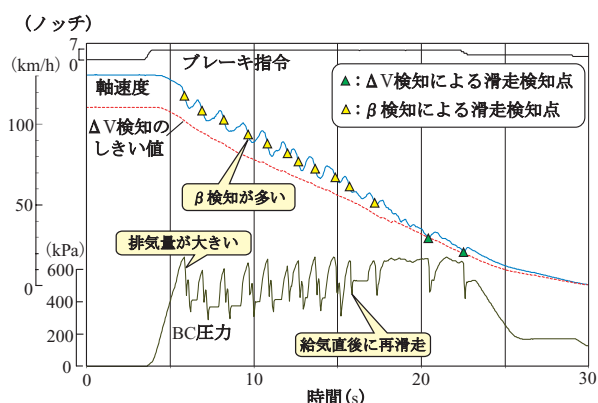


図3 従来型（高ブレーキ力設定）の現車試験結果の例

の3点に絞り、従来型を基本とした新しい滑走制御を検討した。

2.2 BC 圧力排気量の低減

まず、滑走検知後の段階排気1回あたりのBC圧力排気量 ΔP を低減させるために、段階排気の段数を従来型の5回から、10回に増加させる。

さらに、従来型では、収束から再粘着を検知するまでBC圧力を保持していたのに対し、再粘着より前段に新たに「仮復帰」点を設け、仮復帰検知後に段階的に給気を開始する。これにより、従来型よりも給気開始を早めるとともに、従来型で見られた給気時の急激な再滑走の発生を抑えることを期待する。もし、段階給気によって滑走が再び発生しても、滑走の収束検知と同じ判定条件を用いて給気を一時的に停止し、BC圧力を保持する。そして、その状態から滑走が進展して ΔV 検知条件を検出すれば、通常の滑走検知と同様に、BC圧力の排気を開始する。なお、この仮復帰の検知には、滑走検知に用いる ΔV 検知と同じしきい値を適用する。

このように、滑走検知後の排気量を細かく制御すること、滑走から復帰するときの給気開始を早めることにより、滑走時のBC圧力排気量を抑え、滑走中にもできるだけ大きいBC圧力を保持することを目的としている。

2.3 固着余裕時間に基づく新たな検知条件

従来型が目的としているすべりの許容は、 ΔV 検知によって滑走が検知されることを想定したものである。しかし、図3に示したようにすべりには余裕があるにも関わらず、 β 検知によってBC圧力の排気を開始してしまう場合があった。これに対して、 ΔV 検知まで滑走を許容するためには「 β 検知しにくい」状況にする方法が考えられる。

従来型における β 検知は、低速時の切換を除き、すべての速度域でしきい値が一定である（図7に示す）。このしきい値を大きくすることで β 検知をしにくくすることはできるが、単に滑走検知を遅らせることは、固着防止

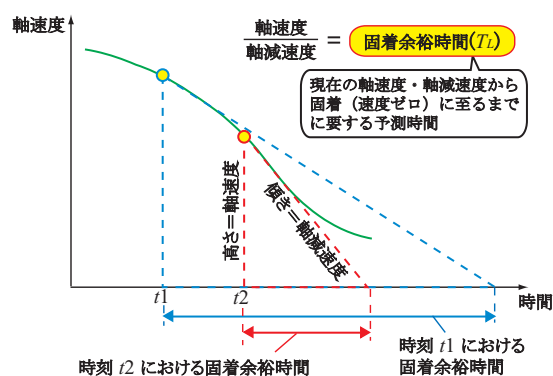


図4 固着余裕時間の考え方

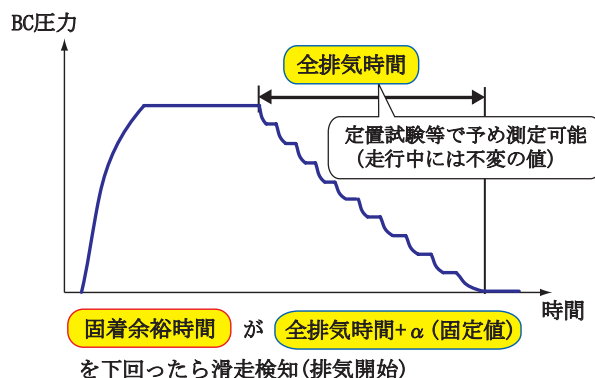


図5 全排気時間と滑走検知条件

の観点からはリスクを増大させることになる。

また、前述のBC圧力排気量の低減のために、段階排気回数を従来型よりも増やしている。段階排気では、排気後に待機時間を設けているので、待機時間の設定によっては、排気に要する時間が増すことになる。これも固着防止のためにはリスク要素である。

そこで、従来型の β 検知に代わる新たな検知方式を導入する。ただし、車両から利用できる情報は、従来型と同様に軸速度のみとする。

軸速度と軸減速度から、軸ごとに式(2)で定義する「固着余裕時間 (T_L)」を求める。

$$\text{固着余裕時間 } T_L (\text{s}) = \frac{\text{軸速度}(\text{km/h})}{\text{軸減速度}(\text{km/h/s})} \quad (2)$$

この固着余裕時間は「現在の軸速度から、現在の軸減速度のまま減速が続くと仮定した場合に、固着（速度ゼロ）に至るまでに要する予測時間」を表す（図4）。この値は、減速中の軸速度と軸減速度の変化によって常に変動する量であり、小さいほど固着の危険性が高いことを示す指標となる。

一方で、固着を防止するためには、固着に至る前にブレーキ力をゼロにする、すなわちBC圧力をすべて排気することが望ましい。このBC圧力をすべて排気するために要する時間（以下、全排気時間）は、先述の段階排気動作を行うことも含めても、定置試験などで予め測定しておけば、走行中に変動する量ではない。そこで、こ

特集：車両技術

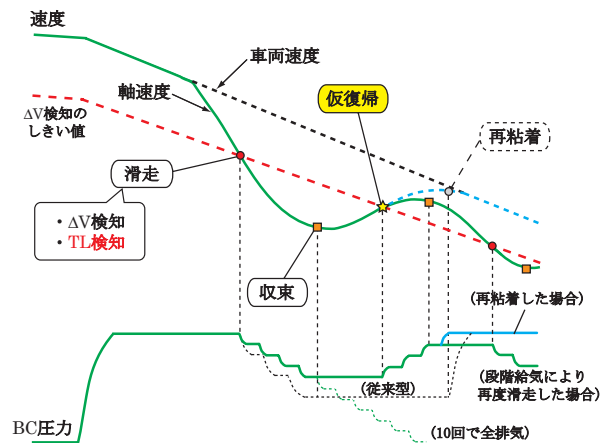


図6 TL型すべり率滑走制御の動作例

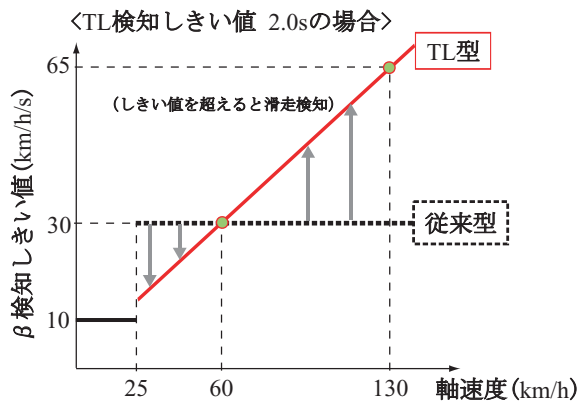


図7 TL検知条件と従来型β検知の比較

の全排気時間に基づいた一定値をしきい値とし、減速中に変化する固着余裕時間が、このしきい値を下回った場合に滑走検知として、BC圧力の排気動作を開始させる(図5)。これにより、時間の次元で滑走の度合を評価し、滑走を検知した時点でも全排気時間以上の固着余裕時間を確保する。段階排気の回数を変更して全排気時間が増加しても、その時間に応じてしきい値を設定すれば、固着に対するリスクが増大することはない。

従来型のすべり率滑走制御に対し、先に述べたBC圧力排気量の低減手法と、この固着余裕時間に基づく検知条件(以下、TL検知)をβ検知の代わりに適用した手法を、新たにTL検知型すべり率滑走制御(以下、TL型)として提案する。このTL型の動作の概念を、図6に示す。

このTL検知条件について式(2)を変形すると、従来型におけるβ検知のしきい値との間に式(3)が成り立つ。

$$\beta \text{ 検知しきい値 (km/h/s)} = \frac{\text{軸速度 (km/h)}}{\text{TL検知しきい値 (s)}} \quad (3)$$

例えば、従来型のβ検知においてしきい値を30km/h/sとした場合と、TL型のTL検知しきい値を2.0sとした場合を比較すると、図7となる。図に示すように、TL検知条件は、従来型のβ検知において、軸速度に応じてしきい値を変化させることと等価である。

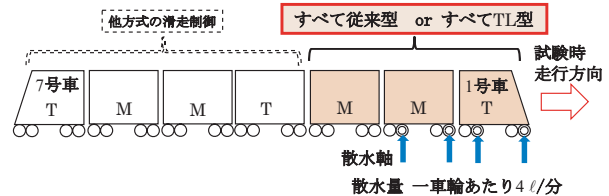


図8 試験実施車両の概要

表1 現車試験に適用した制御の比較

検知条件		従来型	TL型
	ΔV検知	すべり率18%	すべり率18%
	β検知	30km/h/s (25km/h以上)	
	TL検知		
段階排気回数		5	10
その他			仮復帰検知追加 段階給気

図の例では、TL型では高速域で従来型よりもしきい値が大きくなり、β検知による滑走検知を避けることでΔV検知を優先している。反対に低速域では、しきい値を小さくして滑走を検知しやすくすることで、固着防止機能を優先している。

3. 現車による性能確認試験

提案するTL型と従来型の性能を比較するために、現車によるブレーキ試験を行った。

3.1 試験条件

以下の条件で、ブレーキ試験を行った。

- 散水によるレール湿潤状態(散水は1, 2号車の1, 3軸の両輪, 計8ヶ所からそれぞれ4ℓ/分)
- 初速度110km/h, ブレーキ7ノッチ(試験用に設定減速度を5.88km/h/s), 電制なし
- 試験車両(7両編成)のうち, 3両の滑走制御を変更(すべて従来型, またはすべてTL型)

試験を実施した車両の概要を図8に示す。また、適用した滑走制御の主なパラメータを表1に示す。滑走検知条件のうち、ΔV検知は従来型、TL型ともに共通の設定である。制御を変更した車両の全排気時間は、段階排気回数を10回としても1.0～1.5s程度であったが、TL検知しきい値には余裕をもたせて2.0sに設定した。

なお、4～7号車は、供試車両が通常走行する際に使用する滑走制御(従来型とも異なる他方式の制御)から一切の変更をしていない。

3.2 試験結果

ブレーキ中の速度とBC圧力の挙動の一例を図9に示

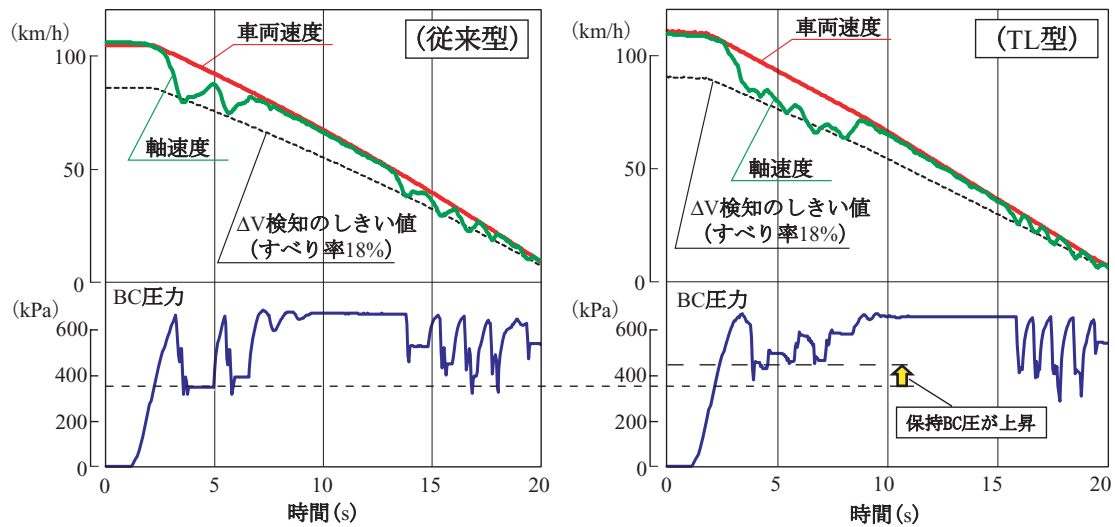


図9 現車による性能確認試験の結果例



図10 試験後に発見された車輪踏面フラットの例

す。従来型に比べ、TL型では保持するBC圧力が高く推移していた。

その結果、実平均減速度（距離基準）の試番平均で、従来型の5.16km/h/sに対し、TL型では5.52km/h/sとなり、7両編成中3両の制御変更にも関わらず、約7%の減速度向上効果があった。

また、パラメータ調整を含む全56試番の試験後に各車輪の踏面を調査したところ、4号車の一部と、5、6号車の各軸にフラットが発生していた（図10）。試験時走行方向に対して後方となる4～7号車は、前方に比べて散水の影響も受けにくく、レール・車輪間の粘着の面でも有利と考えられる。しかしながらフラットが発生しており、営業線での走行で実績がある滑走制御であっても、そのまま車両を高ブレーキ力設定に変更すると、固着に対するリスクが増大することを示唆している。一方、制

御を変更した1～3号車にはフラットは発生せず、従来型だけでなく、TL型に変更しても固着防止性能は十分に高いと考えられる。

3.3 車両速度の誤差

先に述べたように、滑走は、車両速度に対して軸速度が低下した状態である。しかし、既存の鉄道車両のブレーキシステムにおいては、車両から得られる速度情報は軸速度のみであり、真の車両速度を得ることはできない。さらに、実用化されている滑走制御の多くは1両単位で制御を行っており、制御に用いることができる速度は自車の車軸（多くは4軸）の軸速度のみである。そのため、得られる軸速度のうちの最大値、または演算で補正するなどの処理を加えた値を制御上の車両速度として認識している。軸が滑走していなければ、軸速度の最大値は真の車両速度にほぼ等しいとみなせるが、制御で扱えるすべての軸が滑走した状態（以下、全軸滑走）に陥ると、真の車両速度と制御上で認識する車両速度との間に、誤差が生じることになる。

図11は、現車試験のある試番における、従来型を適用した減速時の状態例である。図では、ブレーキ指令と、ある1軸の軸速度とBC圧力、制御上で認識する車両速度（以下、基準軸速度）、真の車両速度（編成内他車の滑走していない軸速度）、さらに、基準軸速度に対するすべり率（式(4)）と、真の車両速度に対するすべり率をプロットしている。

$$\text{基準軸速度に対するすべり率 (\%)} = \frac{\text{基準軸速度} - \text{軸速度}}{\text{基準軸速度}} \times 100 \quad (4)$$

図に示すような基準軸速度が車両速度から大きく乖離している状態は、全軸滑走が起こっていることを表している。この全軸滑走によって生じる誤差はすべり率の演算にも影響を与え、基準軸速度に対するすべり率は、車

特集：車両技術

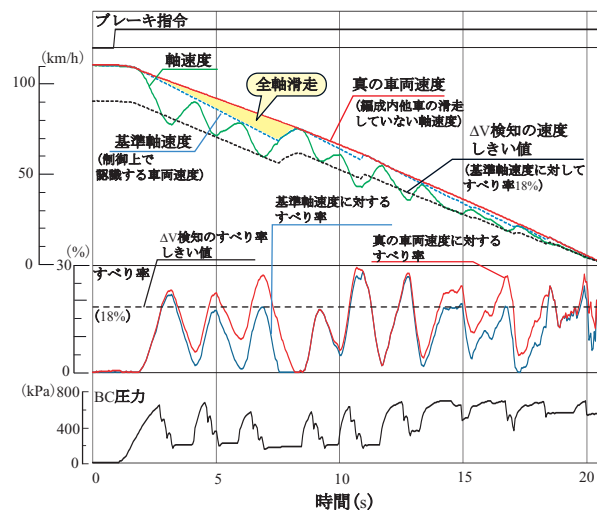


図 11 全軸滑走時の制御動作例

両速度に対するすべり率に比べて小さくなる。滑走制御では、基準軸速度に対するすべり率を使って制御を行うので、全軸滑走状態においては、 ΔV 検知条件で滑走を検知しても、そのときに実際に車輪・レール間に生じているすべりは検知条件よりも大きいということになる。

これは、制御に用いることができる速度情報が軸速度のみであるシステム構成であれば、適用する滑走制御方法に関係なく起こりうる事象である。すなわち、すべり率滑走制御に限らず、滑走検知や固着防止のために、すべり率や速度差などの基準軸速度を含んだ演算値を使用していれば、全軸滑走時には制御上のすべりが実際よりも小さいものと認識されてしまうことにより、再粘着の誤検知や、排気動作の遅れの原因となり、固着に対するリスクが高まることになる。

一方、今回提案する TL 型で適用した TL 検知は、式(2)に示すように演算には軸速度と軸減速度のみを含み、しきい値は BC 圧力の排気特性に基づく値であるので、検知条件に基準軸速度を必要としない。そのため、全軸滑走となって基準軸速度と車両速度が乖離しても、検知に影響を与えることなく、固着防止機能を保つことができると考えられる。

4. まとめ

雨天時などの低粘着条件の下でもより安定した高い減速度を得ること、固着防止性能を向上させることを目標とした、新しい検知方式を用いた滑走制御方法を開発した。

この方法を検証するために、高ブレーキ力設定とした現車により、レール湿潤状態、7両編成中3両の制御変更の条件で、初速度110km/hからのブレーキ試験を行った。その結果、実績がある従来のすべり率滑走制御に比べて、実平均減速度（距離基準）の試番平均で約7%の減速度向上効果を確認した。

提案した手法は、すべり率滑走制御を基本とし、高いブレーキ力を維持するために滑走時の BC 圧力の排気量を低減させる方策と、同時に固着防止性能を損なわないための新しい滑走検知方式として、時間の次元で検知を行う TL 検知方式を開発、適用したものである。

既存車両のブレーキシステムでは、軸速度のみを速度情報として制御を行うため、全軸滑走状態になると、実際と制御上との間に車両速度の誤差が生じることは避けられない。これに対し、新たな検知方式である TL 検知では、この誤差の影響を受けず、固着防止性能を保つことができる。また、新しいセンサ類は不要で、ソフトウェア上の変更のみで搭載可能であり、他の滑走制御と組み合わせることも可能である。

今後、高減速度化、高ブレーキ力化を進めていけば、全軸滑走の発生頻度も増加することが予想される。そこで、TL 検知のもつ全軸滑走の影響を受けない固着防止機能を活かし、滑走制御弁を台車ごとに配置して2軸を同一 BC 圧力で制御する場合など、既存の車両構成に幅広く適用できる制御手法や、電気ブレーキの滑走制御への応用、新幹線のような高速車両への適用を検討していく。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、東日本旅客鉄道株式会社には現車試験の機会と多くのご助言をいただきました。また、三菱電機株式会社には、ソフトウェアの仕様策定と製作に多くのご協力をいただきました。関係各位に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 長谷川泉, 茅島勝敏: 在来線140km/h化のためのブレーキ技術—すべり率滑走制御の改良—, 鉄道総研報告, Vol.13, No.10, 1999
- 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・物流部門大会講演論文集(鉄道シンポジウム編), pp.237-240, 1994
- 3) 野中俊昭, 遠藤靖典, 吉川広: 鉄道車両に対するファジィ推論を用いた滑走防止制御の性能向上, 知能と情報, Vol.6, No.5, pp.431-440, 2004
- 4) 松崎弘二: JR 東日本 209 系 950 番代について (2) —新しい車両情報システムTIMSの概要, 鉄道車両と技術, Vol.5, No.1, pp.20-24, 1999
- 5) 野中俊昭, 中澤伸一, 遠藤靖典, 大山忠夫, 吉川広: ブレーキ制御の研究・開発, R&m (社団法人 日本鉄道車両機械技術協会誌), Vol.16, No.11, pp.12-17, 2008
- 6) 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