

すべり率滑走制御の最適化による減速度の向上

車両制御技術研究部 ブレーキ制御

副主任研究員 中澤 伸一

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、ブレーキ距離の延伸に大きく影響する。しかし、安全の確保のためには、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、車輪の円周上に平坦部（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、発生を抑制しなければならない。

ブレーキ距離の延伸を防ぐには、できるだけ高いブレーキ力を維持することが求められ、一方の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、これら「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-lock Brake Systemとも呼ばれる）が実用化され、成果を挙げている。

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。

そこで、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、新たな滑走検知条件を導入した滑走制御手法を提案した。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減速度と固着防止性能の向上を同時に実現することができる。

2. 滑走制御方式の検討

2.1 従来のすべり率滑走制御とその課題

実用化されている滑走制御手法の一つに「すべり率滑走制御」¹⁾がある。これは、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、一定の範囲内ですべりを許容することで、高いブレーキ力を維持しようとするものである。この従来のすべり率滑走制御（以下、従来型）の動作図を図2に示す。従来型では、滑走軸のすべり率、または滑走軸と車両速度との速度差を監視する「すべり率検知（ ΔV 検知）」と、軸減速度を監視する「減速度検知（ β 検知）」を

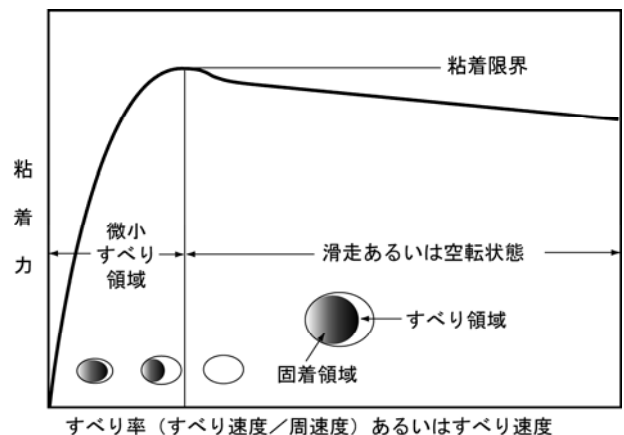


図1: すべり率と粘着力の関係²⁾

併用して「滑走」を検知し、ブレーキシリンダ (BC) 圧の排気を開始する。BC圧は、一定量の圧力を排気した後、微小時間の待機を繰り返す段階排気で、この段階排気中に「収束」を検知すると、その圧力を保持する。そして、「再粘着」を検知するとBC圧を給気して、滑走前のBC圧に復帰する。それぞれの状態を検知する条件は明確なしきい値として設定し、段階排気は5回の排気で全排気となるように、1回あたりの排気量を設定する。

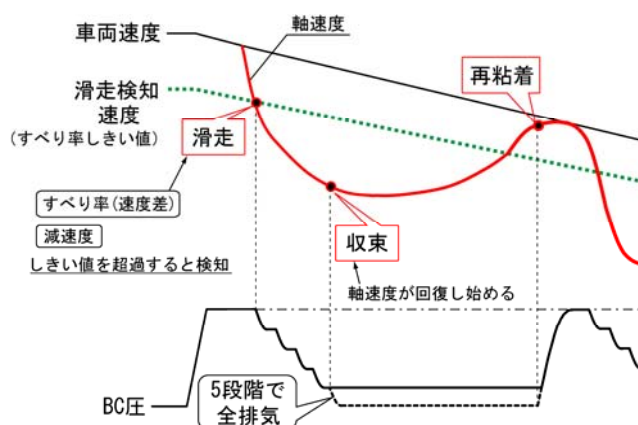


図 2：従来型すべり率滑走制御の動作例

この従来型を適用し、高ブレーキ力としてBC圧を大きく設定した車両で走行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。これは、高ブレーキ力のために滑走発生初期の減速度が大きくなり、 ΔV 検知条件のすべり率に達する前に β 検知によって滑走が検知されていたこと、また、BC圧を大きくした一方で、滑走検知後の段階排気回数が固定であるため、一回の排気動作で低下するBC圧が大きくなったことによるものと考えられた。

そこで、高い減速度を得るために、

- ① 滑走中のBC圧の排気量を減らすこと
- ② すべり率滑走制御の利点である ΔV 検知条件まで滑走を許容しつつ、固着に至るリスクを高めない滑走検知を行うこと

を課題として新たな制御手法を検討した。

2.2 BC圧排気量の低減

従来型で高減速度を目指す中で明らかになった課題に対し、以下の3点の改良を加えた。

- A) BC圧の排気量低減を目的に滑走検知後のBC圧の段階排気段数を10段に増加
- B) 従来型の再粘着検知の前に、軸速度が車両速度に接近する過程で、滑走検知のしきい値を超えた時点で段階的に給気を開始する新たな検知点（仮復帰点）を設ける
- C) 従来型の β 検知に代わり新たに定義する「固着余裕時間」に基づく検知条件を導入

この改良により、滑走中にすべり率しきい値の近傍で軸速度を維持させる動作となるため、この制御を「目標すべり率滑走制御（以下、提案型）」と呼ぶ。提案型の制御動作例を図3に示す。

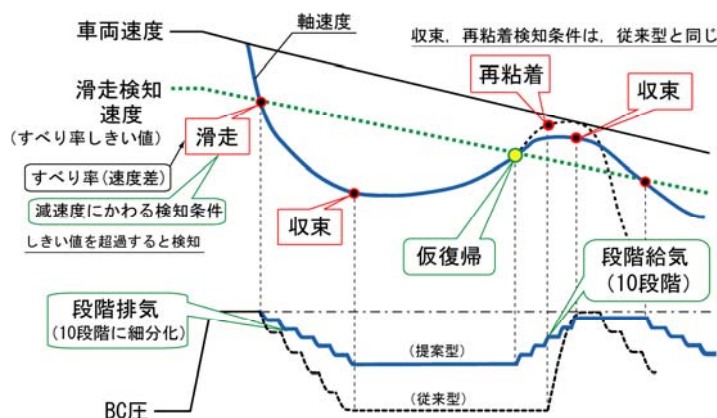


図 3：提案制御の動作例

2.3 固着余裕時間

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。これを、図4(a)に実線で示すように、速度に応じて変動させ、高速域では従来よりもしきい値を大きく、低速域では小さくする。この傾きを決定する指標として、次式で定義する「固着余裕時間」を導入した。

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

この固着余裕時間がしきい値を下回った場合に、滑走検知としてBC圧の排気動作を開始させる。例えば、図4(b)に示すようにBC圧をすべて排気するために必要な時間を定置試験などであらかじめ見積もり、「全排気時間」としてしきい値に設定する。これにより、速度域によらず、常に時間の次元で滑走状態を把握し、滑走を検知してから固着に至るまでの間に、BC圧を全排気する時間を確保しようとするものである。

また、この固着余裕時間を導入した検知方式は、従来型の減速度検知条件と対比することができる。図4(a)は固着余裕時間のしきい値を2.0sとした場合を減速度検知しきい値で表した例であり、提案する検知方式が、 β 検知において速度に応じてしきい値を変動させることと等価であることを示している。

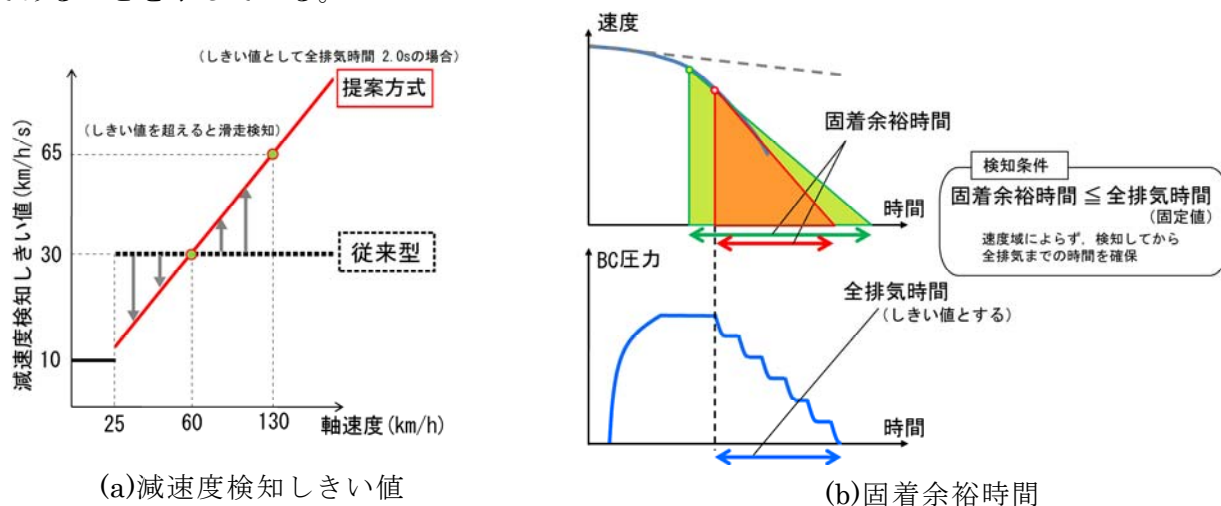


図 4：固着余裕時間による検知の考え方

3. 現車走行試験

提案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 試験概要

走行試験は、以下の条件で行った。

- ◆ 散水によるレール湿潤状態
- ◆ 初速度 110km/h、常用最大ブレーキ(試験用に設定減速度=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、またはすべて提案型) → 図 5

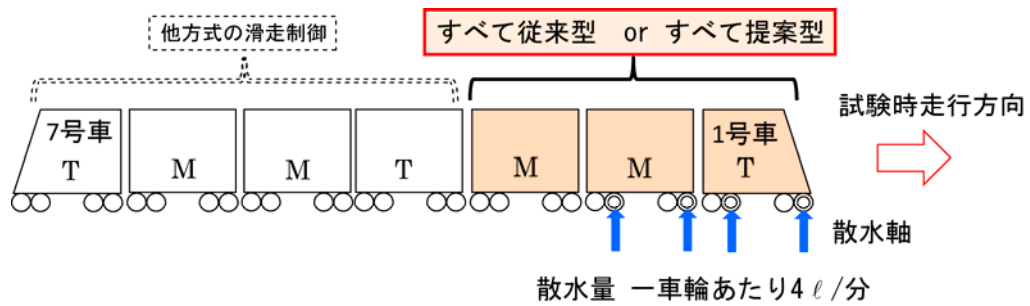


図 5：試験実施車両の編成

3.2 試験結果

ブレーキ中の速度、BC 圧の挙動を図 6 に示す。従来型に比べ提案型は高い BC 圧を保持し、その結果、実平均減速度（距離基準）が約 7% 向上した。

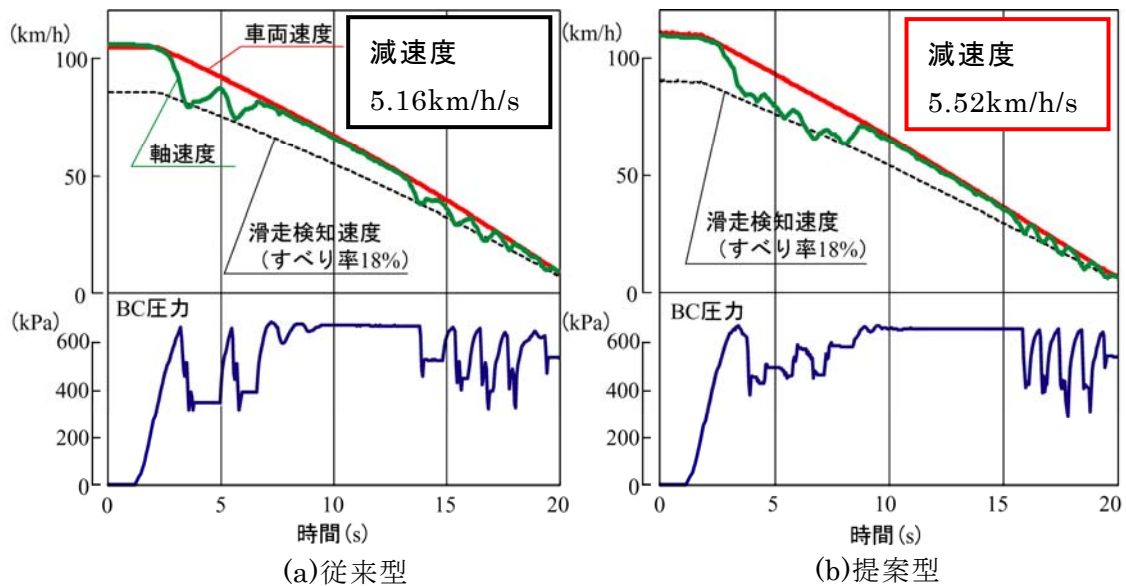


図 6：現車試験時の制御状態の例

また、試験後に各車両の車輪踏面を調査したところ、試験時走行方向に対して後方の 4～6 号車にフラットが発生していたのに対し、制御を変更した前方の 3 両にフラットは発生せず、提案手法の固着防止性能を確認できた。

4. まとめ

本研究では、より高減速度を得るために、新たな滑走検知条件を導入した滑走制御手法を提案した。また、提案手法を編成の一部に適用した試験車両による高減速度ブレーキ試験を実施した。その結果、提案手法を適用した車両にはフラットが発生せず、さらに実平均減速度（距離基準）が従来型に対し約 7% 向上することを確認した。

今後は、今回新たに提案した検知条件をさらに活用し、固着防止性能を維持しながら、より安定的に高減速度を得られる滑走制御手法を検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 長谷川 泉ほか：「在来線 140km/h 化のためのブレーキ技術ーすべり率滑走制御手法の改良ー」，鉄道総研報告，Vol.13, No.10, 1999.10
- 2) 大山 忠夫：「粘着の話ー車輪とレール間の粘着力とその有効利用ー」，レールアンドテック出版，2002.