

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信  
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

# 新しい滑走制御で ブレーキ距離の延伸を防ぐ

鉄道は、レールと車輪がともに鉄製であるために転がり抵抗が小さい反面、レールと車輪の間に入り込むわずかな水膜や汚れなどによって非常にすべりやすく、すべりが大きくなれば、ブレーキ距離が大きく伸びたり、車輪を傷めてしまいます。これを防ぐため、これまでに多くの滑走制御が開発・実用化されています。ここでは、レール・車輪間の「粘着」の物理現象に改めて着目し、変動しやすい粘着状態を推定してブレーキ力を調整する新しい滑走制御手法についてご紹介します。



中澤 伸一  
Shinichi Nakazawa  
車両制御技術研究部  
ブレーキ制御研究室  
副主任研究員  
【専門分野】ブレーキシ  
ステム、制御工学

## ブレーキと粘着

走行中の車両の運動を簡単に表すと、**図1**のように車輪が回転しながら地面（レール）に対して走る、回転と並進をあわせ持った運動となります。

回転している車輪に制輪子を押し付けてブレーキを作用させると、車輪と制輪子との接触部に回転方向と逆向きの「ブレーキ力」がはたらくとともに、車輪とレールが接触している部分では進行方向と逆向きの「粘着力」(☞参照)がはたらき、回転速度と並進速度が同時に減速していきます。

ブレーキの目的をより具体的に言えば「車両の並進速度を低下させること」といえますが、車輪に制輪子を押し付けるような回転運動に作用するブレーキは、ブレーキとしての性能、すなわち並進運動の減速効果が粘着力に左右されるため「粘着ブレーキ」と総称されます。

### ☞ 粘着力

回転体が地面から接線方向に受ける力なので、一般には単に「接線力」と呼ばれますが、鉄道では特に「粘着力」と呼ぶ場合があります。

## 鉄道における粘着

粘着力には一般に、並進運動の速度と回転運動の周速度との差、すなわち「すべり」との間に、**図2**に示すような関係があることが知られています。通常のブレーキ状態でも、厳密には、微小すべりと呼ばれるようにごくわずかにすべっています。この範囲では、ブレーキ力に応じた粘着力を安定して得ることができます。

しかし、車輪とレールの接触面の状態や荷重によって粘着力には限界があり、相対的に「ブレーキ力 > 粘着力」

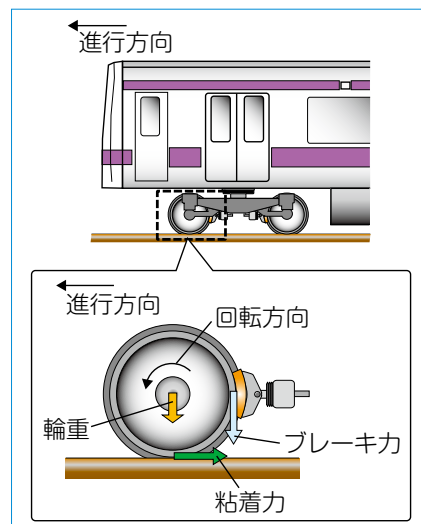


図1 ブレーキ時に作用する力

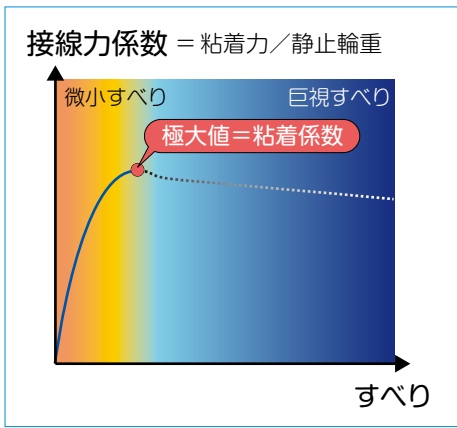


図2 粘着力の特性

になると、大きくすべる「滑走」状態となります。これは、図2の巨視すべりと呼ぶ領域に相当し、この範囲における粘着力の挙動は不安定で、さらに滑走が進んで回転運動が停止したまま並進運動のみが続く「固着」に至る場合もあります。これは、自動車におけるゴム製車輪とアスファルト路面との間でも起こりうる現象ですが、鉄道の場合、粘着力の上限の指標である「粘着係数」(☞参照)が小さく、非常にすべりやすいといえます。さらに、固着による車輪フラット傷(☞参照)の修復も容易ではなく、すべりやすさはメンテナンス面にも影響を与えています。

### 滑走制御

ブレーキは、いつでも高い減速度を安定して得られるシステムであることが理想です。しかし、粘着ブレーキにとって滑走を完全に防ぐことは難しく、滑走すると粘着力が不安定な巨視すべ

り領域に入るため、安定した性能の確保はさらに難しくなります。

鉄道では、滑走を検知して自動的にブレーキを緩める機能が「フラット防止装置」として自動車よりも早くから実用化されていました。当初は、滑走が発生したらすべりがなくなる「再粘着」までブレーキを緩めて待機するだけの動作でしたが、それではブレーキ距離が延びてしまうので、滑走状態を細かく判断してブレーキ力を調整できる「滑走制御」へと発展してきました。

機械ブレーキにおける滑走制御システムの構成例を図3に示します。ブ

レーキ指令を入力として既定のブレーキシリンダー圧力(BC圧)を作る圧力制御部と、速度情報を入力として、滑走制御弁への指令を出力とする滑走制御部から構成されています。滑走制御部では速度から滑走状態を判定し、滑走した軸だけを選んで圧力を給排気できるようにになっています。

滑走制御部で行う滑走状態の判定手法には多数の実用例があります<sup>1),2)</sup>などの手法も、図2に示したすべりと粘着力の関係を予め想定して、固着を防ぎながら巨視すべり領域の粘着力を有効に利用しようと発展したものです。他にも減速度などの指標を滑走状態の判定に併用しますが、いずれの指標も速度を元にしており、既存の滑走制御は速度情報だけで制御されているといえます。そのため、粘着力を想定しているとはいえ、「力」と直接関係する指標が無く、粘着力の変動を制御に反映させるのが難しいといえます。

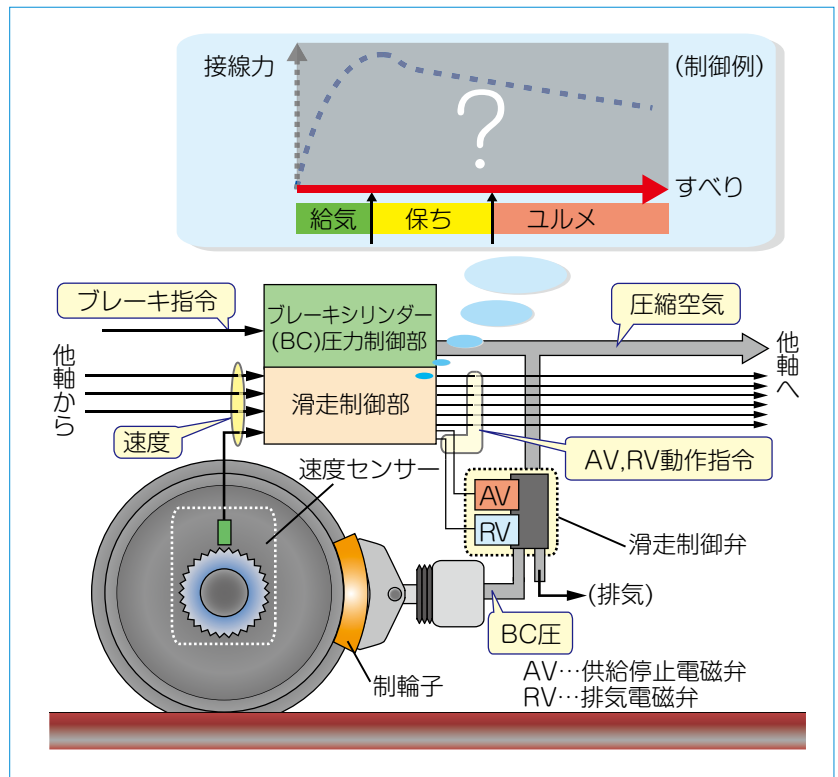


図3 機械ブレーキの滑走制御システムの構成例と制御動作のイメージ

#### ☞ 粘着係数

微小すべりの範囲内における粘着力の極大値を静止輪重で除した無次元量。「車輪が滑走しないブレーキ力の上限」を意味し、車両のブレーキ性能を決める上で重要な指標の一つとなります。

#### ☞ フラット

車輪の円周上の一部が平たんに削れる損傷で、そのまま走行すると騒音や振動が発生し、他の機器やレールにも悪影響を与えてしまいます。

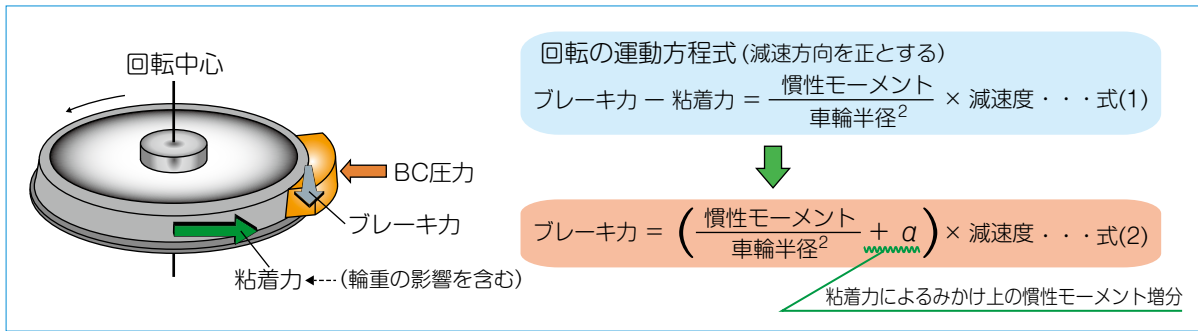


図4 ブレーキ時の回転運動モデルと運動方程式

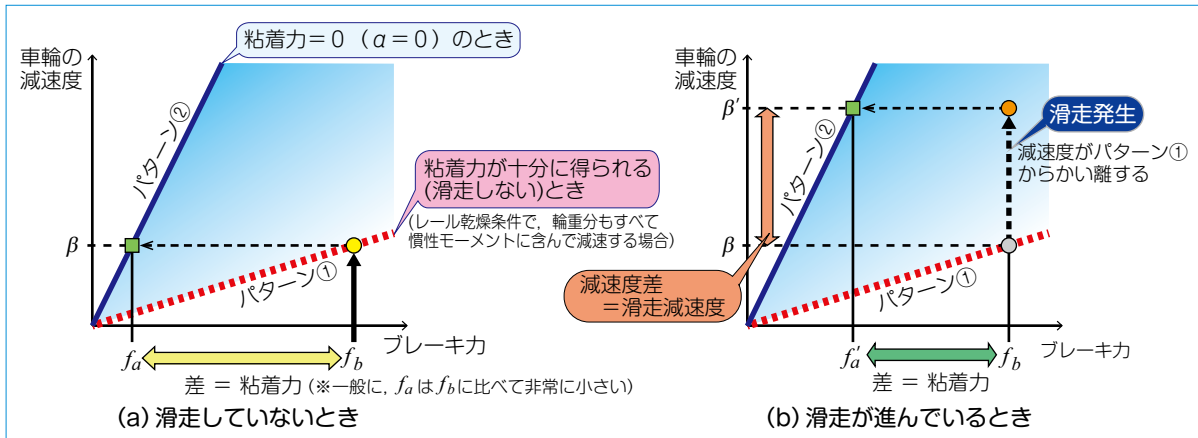


図5 運動方程式 (式 (2)) に基づくブレーキ力と車輪の減速度の関係

### 制御系から見た滑走と粘着

では、滑走中に変動する粘着力を捉える方法はないでしょうか。

冒頭に、粘着ブレーキは並進と回転をあわせもつ運動と述べましたが、ここでは、回転運動に着目し、運動方程式を考えます (図4)。

このとき、回転中心周りの慣性モーメント (☞参照) は、輪重ではなく輪軸の質量と形状で決まる固定値であり、回転抵抗や勾配の影響を無視すれば、ブレーキ力と粘着力が作用して減速するものとして表せます (式 (1))。さらに、ブレーキ力と逆向きに作用する粘着力を、慣性モーメントの増分とみなせば式 (2) で表せます。

この式 (2) に基づいたブレーキ力と

減速度の関係を図5に示します。粘着力が十分に得られる場合、滑走することなく減速できる場合をパターン①、反対に粘着力がゼロの場合をパターン②とします。このとき、パターン①において「粘着力が十分に得られる」とは、輪重分をすべて慣性モーメントの増分に付与したときのブレーキ力と減速度の関係を意味します。そして、車輪の減速度がこの2本の直線に囲まれた範囲内であれば「滑走が進んでいる」ことになります。

例えば、ブレーキ力  $f_b$  を負荷したとき、粘着力が十分に作用して滑走せず、減速度が  $\beta$  になるとします。一方で、粘着力がゼロで同じ減速度  $\beta$  を得るために必要なブレーキ力  $f_a$  がパター

ン②から求められ、その差  $f_b - f_a$  が粘着力を意味します (図5 (a))。なお、滑走していなければ  $f_a$  は  $f_b$  に比べて非常に小さいので、一般に「ブレーキ力 = 粘着力」とみなされています。

同じくブレーキ力  $f_b$  を負荷したときに粘着力が十分でない場合、減速度はパターン①から離れていきますが、粘着力は同様の関係で考えることができます (図5 (b))。図5 (a) と (b) を比較することで、滑走中は作用する粘着力が減少していることがわかります。

実際の車両には複数の軸があり、各軸で運動方程式が成立し、図5のパターン①を簡単には得られないため、正確な粘着力を知ることは難しくなります。しかし、図5に示される粘着力に関する傾向は、制御のための新たな指標として期待できます。例えば、

- ・ 負荷しているブレーキ力  $f_b$
- ・  $f_b$  に対するパターン①の減速度  $\beta$  から滑走減速度<sup>4)</sup> (図5 (b)) を求めれ

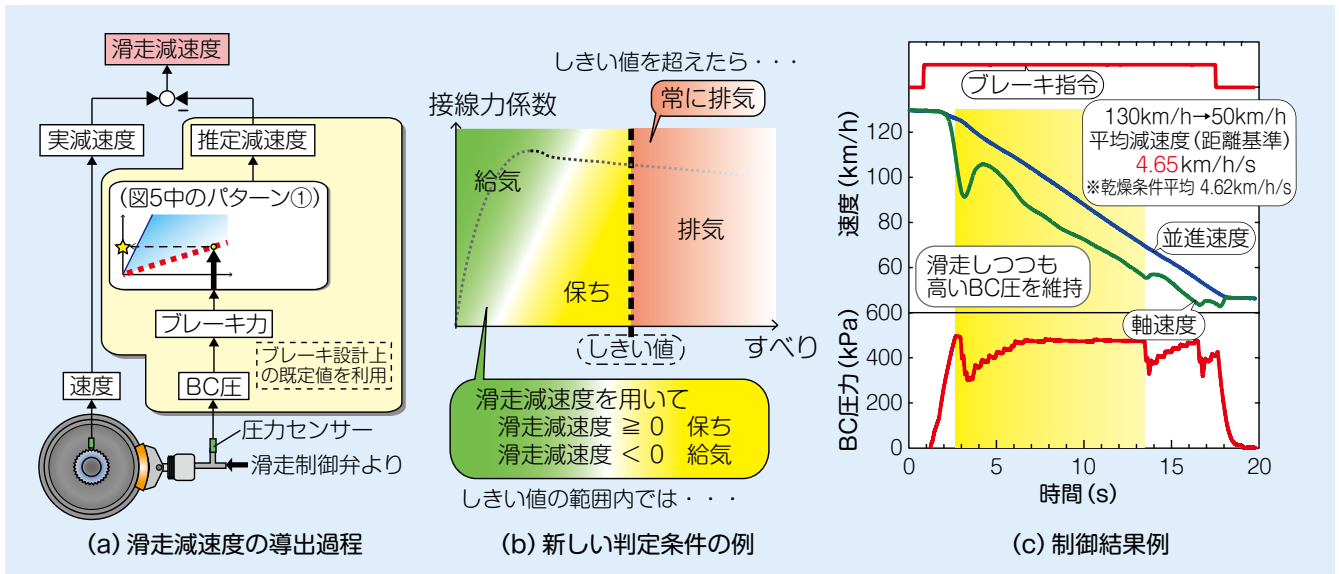


図6 粘着を考慮した滑走制御の構成と制御結果の一例

ば、滑走中の粘着力が、滑走していないときに比べてどれだけ減少しているかを知ることができます。

### 粘着を考慮した新しい滑走制御

これを利用して、粘着を考慮した滑走制御手法を考えてみます。

実車ではブレーキ力を直接得ることは難しいため、機械ブレーキにおいてはBC圧で代用するものとします。このBC圧から、計算上のブレーキ力と、滑走しないときの減速度（推定減速度とします）を求め、一方で速度センサーから得られる減速度（実減速度とします）との差で、滑走減速度が求められます（図6 (a)）。

滑走減速度で表せる粘着力の特性の一例に、図5 (b) より「同じブレーキ力ならば、滑走減速度が小さい方が粘着力は大きい」ことがあります。これをすべりと粘着力の関係に反映させ、図6 (b) のような制御規則を設けます。これは、すべりにあるしきい値を設け、これを超えると固着のリスクが高まるためBC圧を排気する一方で、しきい値を超えない範囲では、滑走減速度による判定条件を追加して、BC圧は「保ち」または「給気」の二者択一とし、で

きるだけ高いBC圧を維持させようとするものです。

このように構成した滑走制御を適用し、鉄道総研所有の軌条輪と実物大車輪の接触試験機により散水ブレーキ試験を行いました（図6 (c)）。ブレーキ開始直後に大きな滑走が発生しBC圧を排気した後、滑走は続いているにも関わらず、新たな条件によって粘着の良否を判定してBC圧を再給気しています。そして、固着防止のための新しい判定条件<sup>5)</sup>を併用しながら、BC圧を高い値に保っています。その結果、平均減速度（距離基準）は4.65km/h/sとなり、荷重と押付力が同じ条件で散水なしとした試番の平均値4.62km/h/sと遜色ない値を示し、滑走しても粘着力を有効に利用できた例といえます。

### 適材適所な制御に向けて

ブレーキは、ハードウェアも含めて幅広いシステムであり、求められる保安度や、利用できる機器の冗長性や信頼性などに応じて制御に課せられる役割も変わってきます。

ここでは、粘着ブレーキの性能向上を目的として、粘着の良否を考慮した新たな判定条件を組み込んだ滑走制御

手法を紹介しました。

提案した手法は、現状ではBC圧力を検出するためのデバイスを追加する必要はありますが、その一方で、軸ごとの回転運動方程式からわかる関係を用いることで、他軸の情報を使わない判定条件を構成しています。

実用化するには多くの検討課題がありますが、適用できる条件、利用できる情報などを見極めながら、ブレーキシステム全体の性能向上につながるよう、活用したいと考えています。[RRR]

### 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) 運転理論研究会: 運転理論(再改訂版), 2010
- 4) 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
- 5) 中澤伸一, 津留崎淳: 新しい検知方式を用いた滑走制御手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.1, 2011