

停まるための制御

中澤 伸一

車両制御技術研究部(ブレーキ制御研究室 副主任研究員)



なかざわ しんいち

はじめに

鉄道のブレーキシステムに用いられている制御には、電氣的に動作するブレーキと、空気圧により機械的に動作するブレーキとを協調させる制御や、編成列車の冗長性を活用した編成ブレーキ力制御など、目的や適用範囲によって様々な実用例があります。

それらたくさんの制御技術の中で、ここでは、ブレーキに求められる最も重要な役割である「早く(短く)、安全に、確実に停める」ための制御の一つとして、車輪とレール間の「滑走」を制御する技術について紹介します。

ブレーキと粘着

車両が走行する運動を単純なモデルで表すと、質量を持つ物体(車輪)が、平面の上を転がりながら進む、回転運動と並進運動をあわせ持つ形となります。

ブレーキの役割は、この転がる車輪を停めることです。そのために、車輪やブレーキディスクなどの回転体にブレーキ力を加え、回転と並進運動をともに抑制します。このように、回転運動の力が並進運動の力に変わるのは、車輪とレールが接触しているためです(図1)。このとき車輪とレールとの間に生じる並進運動の力を、一般に「粘着力」と呼んでおり、粘着力を使ったブレーキ方式を粘着ブレーキと総称しています。

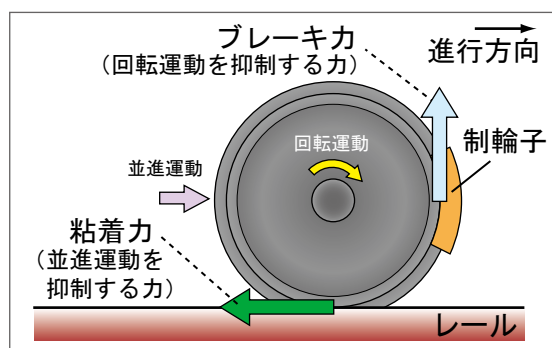


図1 ブレーキ時にはたらく力

鉄道は、鉄製のレールの上を鉄製の車輪が転がって走行することで、エネルギー損失が少ないのが利点です。その反面、加減速に必要な粘着力に限度があるため、ブレーキ力に対して粘着力が不足し、並進運動に比べて回転運動だけが大きく減速する「滑走」をたびたび引き起こします。この滑走がさらに進み、回転運動が停止したまま並進運動が続く「固着」状態になると、車輪踏面の円周上の一部が平坦になるような傷(フラット)を作る原因となります。滑走や固着はブレーキ距離を延伸させ、フラットがあるまま走行すれば大きな振動の原因となり、車両や軌道の保守の面でも悪影響を及ぼします。

安全のために、ブレーキはいかなる状況でもできるだけ早く(短く)車両を停めることを求められます。しかし、そのためにブレーキ力を大きくしても、利用できる粘着力が小さければ滑走が発生しやすくなり、期待通りの結果が得られるとは限りません。粘着力は、2つの物体の接触による力のため、当然その接触状態が大きく影響し、降雨などによって急激に低下する場合があります。また、質量(輪重)や速度によって変動することもわかっています。そのような多様な条件の下で、常に安定した粘着力を得ることは容易ではありません。そこで、滑走が発生しても、ブレーキ距離の延伸を抑え(短縮するとは限らない)、固着の発生を防ぐための制御方法として用いられているのが、滑走制御、または滑走防止制御、ABS (Anti-lock Brake System) などとも呼ばれる技術です。

滑走制御のはたらき

滑走制御と呼ばれる機能が求められた端緒は、フラット防止のためでした。そしてその動作は、滑走を検知したらブレーキを完全に緩めるといった単純なものでした。その後、粘着についての研究が進み、ある程度滑っていても粘着力が期待できる場合があることもわかってきました(図2)。さらに、車両の高速化の要求、計測・制御系のハード・ソ

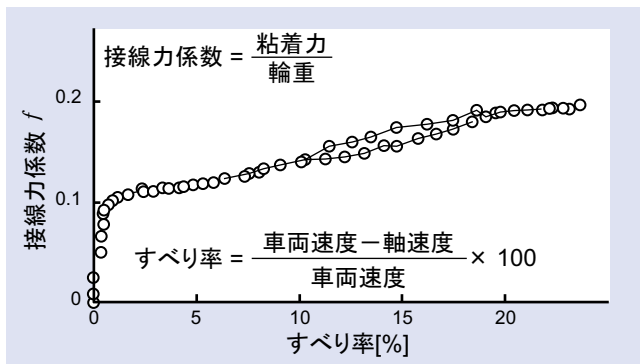


図2 すべりと粘着力の関係の例
(文献1)に用語の説明を加筆)

フト両面の進歩につれて、高度な制御が用いられるようになり、フラット防止だけでなく、ブレーキ距離の延伸を抑える役割も兼ね備えた、現在のような機能に発展しました。

図3は、機械ブレーキの滑走制御システムの構成例です。機械ブレーキの滑走制御システムは一般に、「ブレーキシリンダ (BC) 圧力制御部」と「滑走制御部」から構成されます (装置の名称は車両によって異なる場合があります)。前者は、ブレーキ指令を受けてBCへ送る圧縮空気を作り、後者は滑走状態を判定し、滑走防止弁に供給停止・排気を指令してBC圧を細かく制御する機能を持っています。滑走は、先に述べたようにブレーキ力が粘着力を上回ったときに発生し、回転運動の速度 (車輪の周速度、以下「軸速度」) が、並進運動の速度 (以下「車両速度」) より小さい状態となります。ただし、車両では車軸の回転を検出するセンサによる軸速度しか得られず、真の車両速度はわかりません。そのため、滑走していない軸速度を車両速度とみなすか、得られる軸速度に補正を加えて、仮想的な車両速度とみなしています。

実用化されている滑走制御は多数ありますが、いずれも、(a) 滑走の状態を判定し、それに基づいて (b) 滑走防止弁を排気・保持・給気 (復帰) の3つの状態のどれかにするという2つの機能に集約できます。そして、(a) の状態判別手法や、(b) の状態選択を行う論理に、それぞれの滑走制御の特徴があります。

実用例の一つであるすべり率滑走制御²⁾では、図2のようなすべりと粘着力の関係に基づいて、滑走中も高い粘着力を得ることを目指した制御を行います。滑走の判定にはすべり率 (車両速度に対する、車両速度と軸速度の差を割合で表した量) を用い、このすべり率が一定のしきい値を超えるまでは何もせず、滑走を許容します。そして、滑走と判定したら、一定量のBC圧を排気して待機する「段階排気」と呼ぶ動作を繰り返しながら、滑走がそれ以上大きくならないような状態になる (収束する) のを待ちます。段階排気は5回の繰り返して全排気となりますが、その前

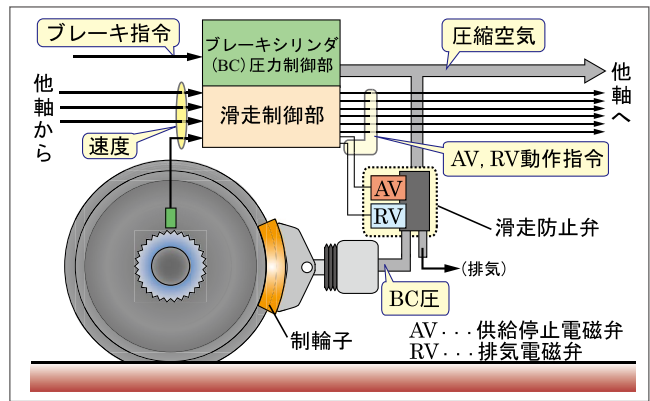


図3 機械ブレーキの滑走制御システムの構成例

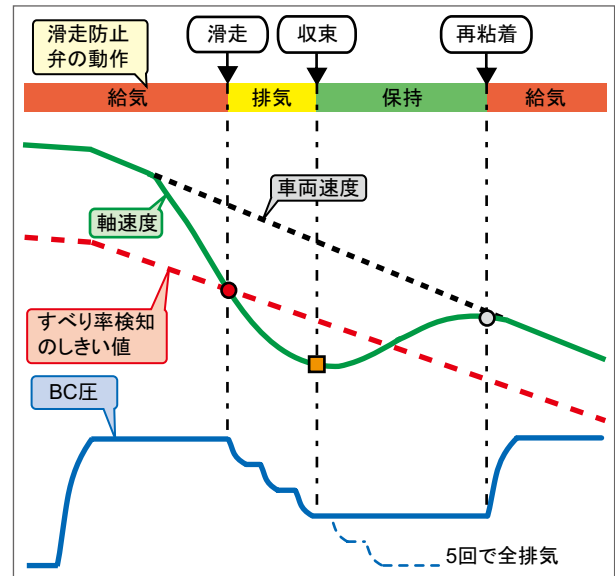


図4 すべり率滑走制御の動作の概要

に滑走が収束すれば、そのときのBC圧を保持し、再粘着したらBC圧を復帰させます (図4)。

また、滑走が急激に進む場合には軸減速度 (軸速度の微分値) が大きくなるため、軸減速度も滑走の判定に用います。すべり率による滑走検知 (すべり率検知) と、軸減速度による滑走検知 (軸減速度検知) のいずれかが動作すれば、滑走防止弁がBC圧の排気を開始します。

高減速度を目指して

「より安全に」を目指す、さらに編成減速度を高くすることも必要になってきます。ただ、そのために車両の保守量が増えてしまったら、効果は半減です。そこで、従来のすべり率滑走制御 (以下、従来型) を基本として、編成減速度を向上させるとともに、固着防止性能も向上させるように、改良を検討しました。

図2に示したように、滑走しても高い粘着力を期待できるのであれば「滑走してもブレーキを必要以上にゆるめない」ことが有効と考えられます。そこで、段階排気を従来

型の倍となる10回に細分化し、従来型よりも高いBC圧で保持することを期待します。さらに、緩めたBC圧をできるだけ早く復帰させるよう、軸速度がすべり率検知のしきい値内に戻った時点を「仮復帰」とし、BCに段階的に給気を開始します。再粘着すればBC圧は完全に復帰させますが、段階給気によって再び滑走が進めば、BC圧も再び保持して様子を見ます。このBC圧の給排気動作の概要を図5に示します。

高いBC圧、すなわち高いブレーキ力を保持することで、滑走中にもできるだけ高い粘着力を期待しますが、固着の

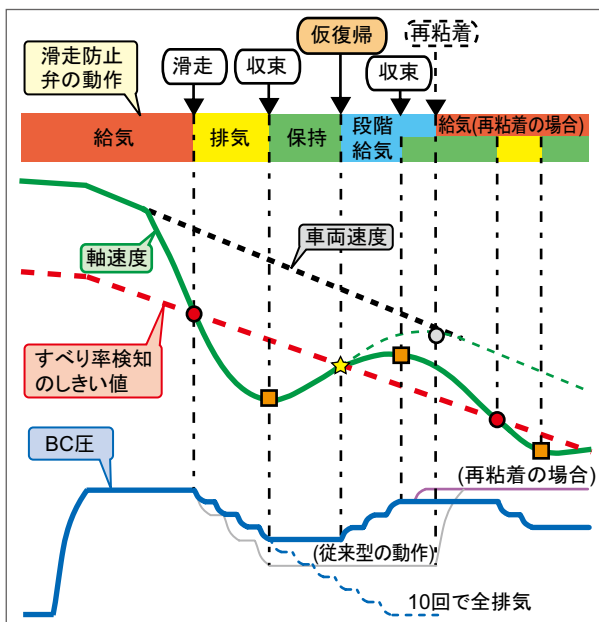


図5 BC圧排気量を低減させる制御動作の概要

危険性も高まることになります。そこで、固着防止性能を維持するために、滑走検知の新しい指標を導入します。

車両から得られる情報は、軸速度と軸減速度のみであることから、軸速度を軸減速度で除して得られる時間を単位とする量(TLとする)に着目しました。このTL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、固着に至る(速度ゼロ)までに要する予測時間」を意味することから、これを「固着余裕時間」と定義します。TLは、小さいほど固着の危険性が高いことを示します。

一方で、固着になる前にBC圧をすべて排気できれば、固着を防ぐことができると考えられます。そこで、BC圧をすべて排気するのに要する時間(以下、全排気時間)を事前に測定しておき、多少のゆとりを加えてしきい値とします。そして、このしきい値と、走行中に変動する固着余裕時間とを比較して、固着余裕時間がしきい値を下回ったらBC圧の排気を開始させれば、固着に至るより早く、ブレーキを緩めることができると考えました(図6)。

また、現状のシステムでは、全軸が滑走すると、真の車両速度が得られないために、制御上の車両速度が、真の車両速度と異なる場合があります。このような場合、すべり率や速度差にも誤差が生じ、固着防止の動作に影響を与える可能性があります。

一方の固着余裕時間による滑走検知では、自軸の軸速度と軸減速度だけを用い、自軸のBC圧排気時間を基にした値と比較します。その過程には車両速度が必要ないため、全軸が滑走しても、検知性能が変わらないという利点があります。

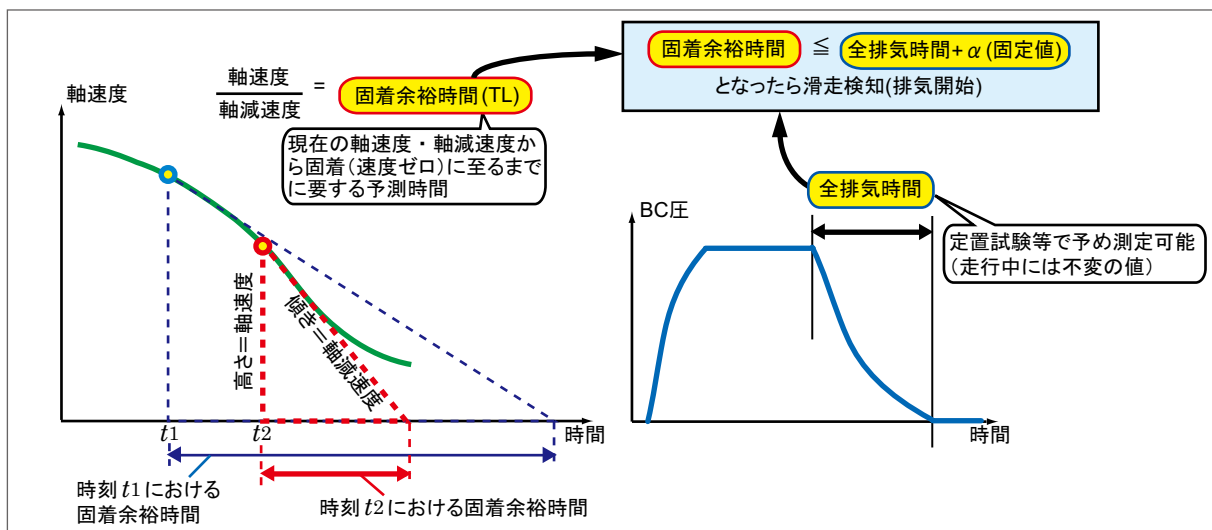


図6 固着余裕時間による滑走検知の考え方

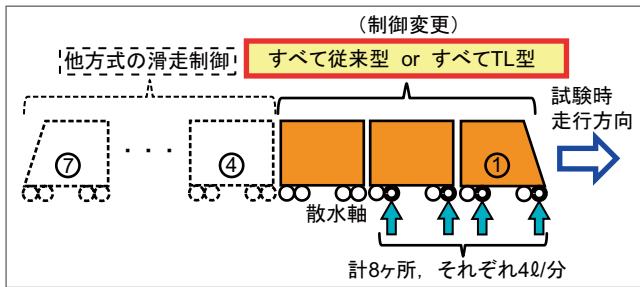


図7 試験車両の構成

現車による性能確認

従来型の軸減速度検知に代わり、固着余裕時間による滑走検知（以下、TL検知）を導入し、図5に示したBC圧排気量の低減手法を組み合わせたTL型すべり率滑走制御³⁾（以下、TL型）と、従来型の性能を、現車により確認しました。

試験車両には7両編成電車を用い、うち3両を、すべて従来型、またはすべてTL型に変更し、他の4両は従来型とも異なる既存の制御のままとしました（図7）。試験では、散水によるレール湿潤状態を作り、初速度110km/hから、現行の非常ブレーキ設定よりも高減速度のブレーキ（設定減速度5.88km/h/s、電気ブレーキなし）を動作させました。

適用したパラメータを表1に示します。TL検知のしきい値は、制御を適用した車両で実測した全排気時間にさらに余裕を加えて、2.0sとしました。

制御結果の一例を図8に示します。TL型の方が滑走中にも高いBC圧を保持していることがわかります。その結果、編成内の一部車両の変更にもかかわらず、TL型の方が約7%高い編成減速度を示しました。

また、試験後には、制御を変更していない車両の車輪踏

面にフラットが発見されました。これは、現状のブレーキ力であれば問題ない滑走制御でも、ブレーキ力を大きくすることで、固着の危険性が増すことを示していると考えられます。

一方、制御を変更した前方3両にはフラットは発生せず、ブレーキ力を大きくしても、固着防止性能を維持していると考えられます。

おわりに

滑走制御は、「ブレーキ指令中にブレーキを緩める」という動作を選択することになるため、その適用には慎重な設計と検証が求められます。

また、滑走制御の効果はあくまでも「滑走が発生してもブレーキ距離の延伸を抑えること」であり、ブレーキ距離を短縮するには、ブレーキ力を大きくしても滑走が発生しない状況、つまり利用できる粘着力が高い状態とすることがより効果的です。

今後も、粘着や基礎ブレーキ装置なども含んだブレーキシステム全体を捉えた中で、滑走制御のさらなる性能向上を目指し、より安全な鉄道の実現に貢献していきたいと考えています。RRR

文献

- 1) 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
- 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－すべり率滑走制御手法の改良－，鉄道総研報告，Vol.13，No.10，1999
- 3) 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.1，2011

表1 適用したパラメータ

| | | 従来型 | TL型 |
|--------|--------|--------------------------|---------------|
| 検知条件 | すべり率検知 | すべり率 18% | すべり率 18% |
| | 軸減速度検知 | 30 km/h/s (25 km/h以上) | |
| | TL検知 | | しきい値 2.0 s |
| 段階排気回数 | 5 | 10 | |
| その他 | | 仮復帰検知 段階給気 | |

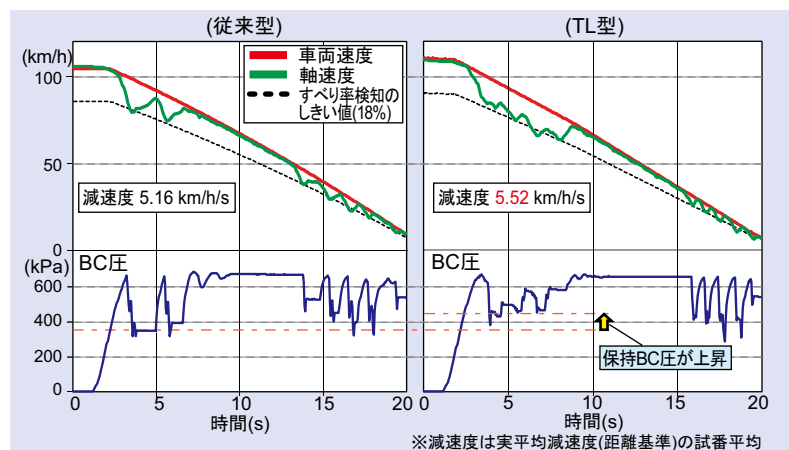


図8 現車による性能試験の制御結果例