目標値追従型滑走制御によるブレーキ性能向上効果の検証

○津留崎　淳　　中澤　伸一　　［機］南京　政信（鉄道総合技術研究所）

岸田　泰司　　奥村　正弘　　村上　一弘（西日本旅客鉄道）

高原　一郎（三菱電機）

Study on Brake Performance Improvement using Tracking-control-Type ABS

○Atsushi Tsurusaki,　Shin-ichi Nakazawa,　Masanobu Nankyo

(Railway Technical Research Institute)
Taiji kishida,　Masahiro Okumura,　kazuhiro murakami (West Japan Railway Company)
Ichirou Takahara (Mitsubishi Electric Corporation)

From our experiments, it has been clarified that the factor of tangential force between wheel and rail increases continuously up to the slip ratio around 20%. Therefore, for the deceleration grade up, it can be said that tracking control of wheel speed to the slip ratio which is set within 20% as a reference seems to be effective under slippery condition. We have been developed "Tracking-Control-Type ABS" based on the concept mentioned above and introduced it to a test train set called "U-tech" for running brake test. In this paper, outline of this ABS and its test results which show over 5% deceleration improvement compared with conventional ABS control are introduced.

キーワード：鉄道車両，空気ブレーキ，滑走制御，摩擦
Key Words：Railways, Pneumatic Brake, Slip Control, Friction

1．はじめに

近年の鉄道車両には、より高く、安定した減速性能が得られるブレーキシステムが求められている。しかし、ほとんどの車両が搭載するシステムには、車輪・レール間の粘着力の他、制輪子の摩擦係数、空気圧などの様々な非線形特性をもつ要素が存在するため、制御が難しい面がある。また、雨天などの悪条件下では車輪滑走が発生し、安定したブレーキ性能が得にくいといった課題がある。

滑走制御（ABS）が採用されている車両は多いが、一方、高い減速度で安定したブレーキ性能を確保する為には、極力ブレーキ力を下げずに車輪･レール間の接線力を最大限活用することが求められる。そこで筆者らは、目標値追従型の制御を導入し、接線力を有効活用する滑走制御手法を開発した[1]。さらに、この手法によるブレーキ性能向上効果を実車両・実フィールドでの走行試験で検証したので、本報ではその結果について報告する。

2．すべり率と接線力係数

すべり率ηは、車両速度をv、車輪速度をv_wとすると、次式

$$\eta = \left(1 - \frac{v_w}{v}\right) \times 100 \quad [\%]$$

で表される。

図1は、水潤滑状態における車輪・レール間摩擦係数（＝接線力係数）の関係例で、すべり率 20%以上の滑走を発生させた時の接線力係数とすべり率を0.2秒毎にプロットしたものである[1]。この図より、すべり率が 20%程度の領域までは接線力係数が増加することがわかる。

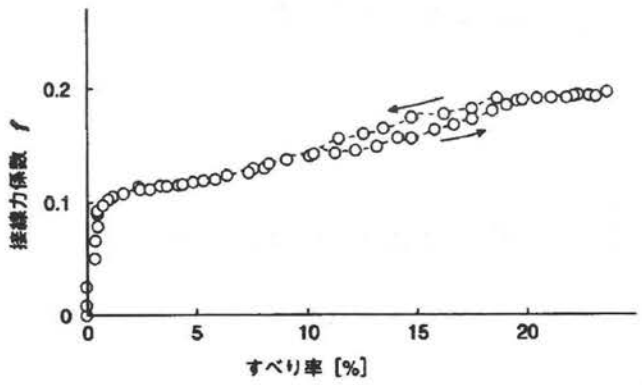
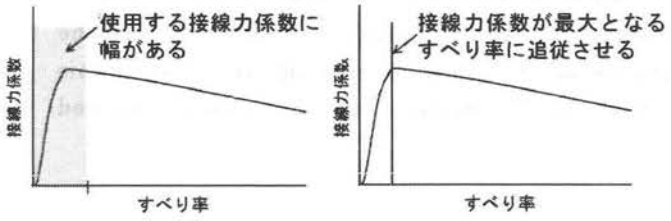


図1　すべり率と接線力係数の関係例

また、図2に目標値追従型滑走制御の考え方を示す[2]。従来用いられてきた滑走制御は、滑走を検知するとブレーキを弛めて再粘着させる方式であるが、この場合、図2(a)に示すように、接線力係数のとる値の幅が広く、ブレーキ力の損失が大きい。これに対し、図2(b)のように、接線力係数が最も高くなるすべり率を目標値とし、車輪速度をそのすべり率に追従させれば、より高いブレーキ力を確保することが期待できる。



(a) 従来の滑走制御　　(b) 目標追従型滑走制御

図2　目標値追従型滑走制御の考え方

3．目標値追従型滑走制御

先に述べた様に、鉄道車両の空気ブレーキシステムには多くの非線形要素が存在する。そのような非線形要素に対し、目標値に追従させる制御を行なう手法の一つとして、状態の変化に応じて制御構造を変えながら制御を行なう「可変構造制御」がある。今回はその中の「スライディングモード制御」を適用することとした。

図3にスライディングモード制御の概念を示す。例えば、目標値に対する誤差が図3(a)のような時系列波形であった場合、横軸が誤差、縦軸が誤差微分値の位相平面における軌道は図3(b)のようになる。スライディングモード制御は、この位相平面上に(d)のような切換線を設け、この直線上に制御を切り換えながら拘束することで、平衡点すなわち目標値に向かわせる制御である。

図4に今回使用した制御器のブロック図を示す。今回用いた制御器は、車両からの情報としてBC圧及び車輪速度を用いている。本制御器はこれまでにシミュレーション、鉄道総研におけるベンチ試験及び構内走行試験を実施し、実車両に投入しても問題の無いことを確認している[3)4)]。

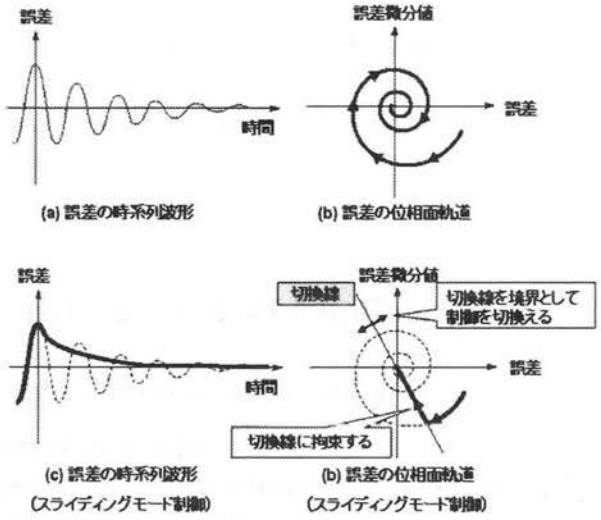


図3　スライディングモード制御の概念

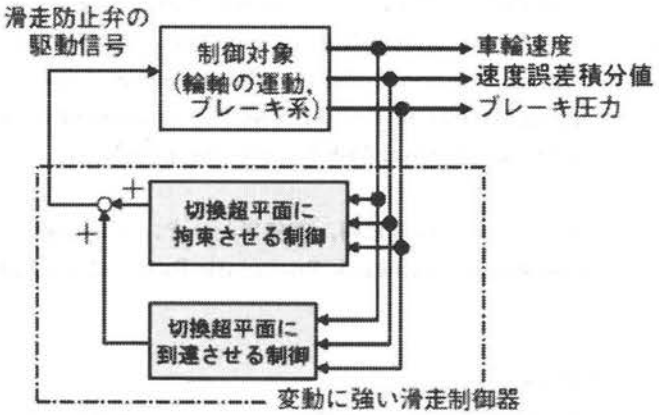


図4　制御器ブロック図

4．走行試験

目標値追従型滑走制御によるブレーキ性能向上効果について、西日本旅客鉄道㈱の在来線試験電車「U@tech」を用いた本線での走行試験により検証した。

4.1 試験概要

(1) 試験期間　：平成20年1月17日(木)～22日(火)
(2) 対象編成　：在来線試験電車「U@tech」(1M2T)
(3) 対象車両　：クヤ212-1（編成中1両のみ変更）
(4) 試験区間　：東海道本線　草津～米原
(5) 試験条件　：初速度130km/hからの非常ブレーキ

(6) 散水条件　：①散水軸：図5参照
②散水量：4.0ℓ /min（ノズルあたり）

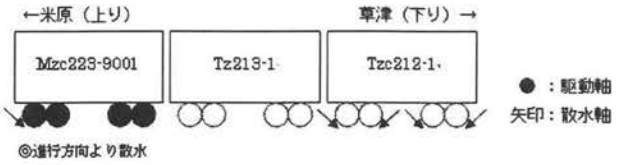


図5　散水条件

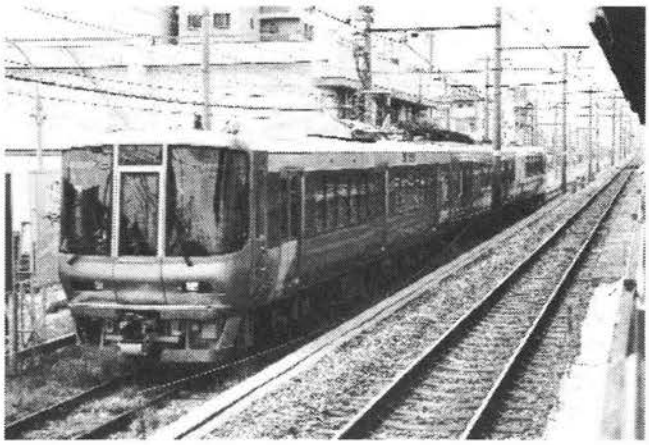


写真1　在来線試験車「U@tech」

4.2 試験結果

本線走行試験では、従来の滑走制御と目標値追従型滑走制御の2条件にて、湿潤条件で初速度130km/hから停止までの非常ブレーキ（空制）の試験を行なった。それぞれの結果について、チャート例を図6及び図7に示す。

(1) 制御状態

今回の試験では、目標値追従型滑走制御におけるすべり率目標値を15%に設定した。図6より、スライディングモード制御を用いた目標値追従型滑走制御は、車輪速度を目標車輪速度へ良好に追従させており、滑走制御弁（AV：供給停止電磁弁、RV：排気電磁弁）のチャタリングや、BC圧のハンチングは見られず、安定して制御できていることがわかる。

また、図7に示す従来の滑走制御に比べ、制御弁の動作回数も少なくなっており、本制御の適用による制御弁の負荷軽減や滑走制御中の前後同様の削減も期待できる。

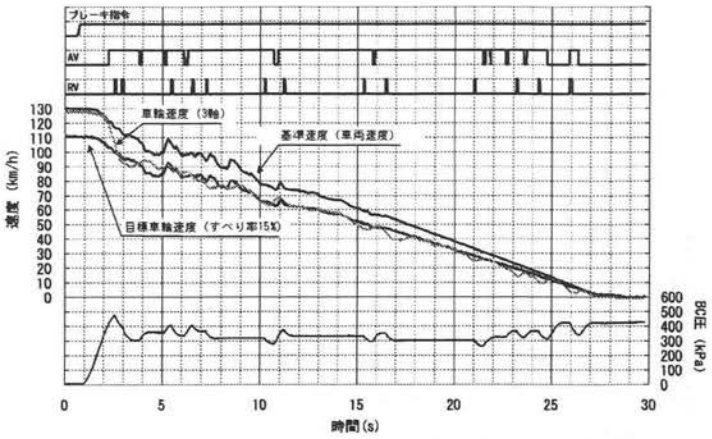


図6　試験結果チャート
（目標値追従型滑走制御、初速度130km/h→非常[空制]、散水）

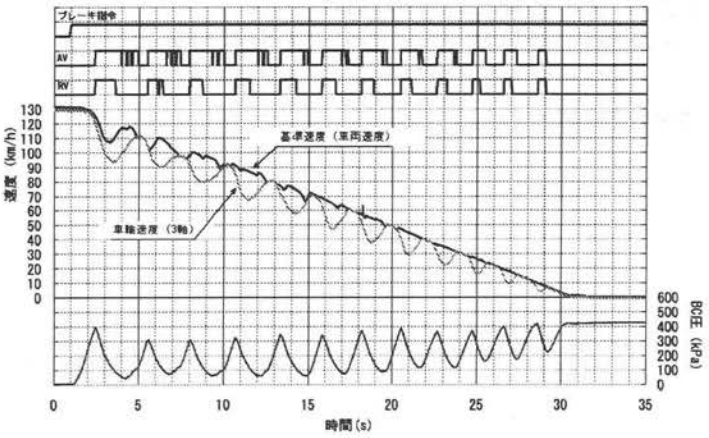


図7　試験結果チャート
（従来滑走制御、初速度130km/h→非常[空制]、散水）

(2) ブレーキ性能

今回の試験で得られた、目標値追従型滑走制御及び従来の滑走制御それぞれのブレーキ性能（ブレーキ距離、距離基準実平均減速度）を表1に示す。

表1　ブレーキ性能比較（130km/h→非常[空制]、散水）

	従来型	目標値追従型	対比
ブレーキ距離 (m)	565.5	520.0	-45.5m (-8.0%)
実平均減速度 (km/h/s)	4.40	4.82	+0.42km/h/s (+9.5%)

※値は平均値

図7より、試験編成に導入されている従来型の滑走制御は滑走に対する排気動作が大きく、チューニングが完全でない部分も見受けられた。目標値追従型滑走制御は、表1に示すように、試験編成に導入されている従来の滑走制御

と比較するとブレーキ性能が1割程度向上する結果であった。また、この結果は滑走制御を3両編成中の1両のみ変更した結果であり、編成全ての滑走制御を目標値追従型に変更すれば、より大きなブレーキ性能向上効果を得られると考えられる。

5．まとめ

接線力を有効活用することを目的とした目標値追従型滑走制御を実車両に適用し、本線走行試験によるブレーキ性能向上効果の確認を行なった。その結果、車輪速度を高い接線力が得られるすべり率に追従させることで、ブレーキ性能の向上が可能であることがわかった。

今後は、本制御の実車両への搭載についての検討が必要である。車両からの情報としてBC圧が取得できない車種に対する制御手法や電空協調における制御、制御パラメータ調整手順の簡素化といった課題がある。

本研究にご協力いただいた武蔵工業大学　山崎大生准教授と、西日本旅客鉄道㈱ならびに三菱電機㈱の関係各位に感謝の意を表す。

参　考　文　献

1) 山崎大生：摩擦係数変動と粘着変動に強い滑走制御，Railway Research Review，Vol.63,No.6，pp.18-22，2006.
2) 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－，pp.31-32，レールアンドテック出版，2002.
3) 山崎大生，鎌田崇義，永井正夫：スライディングモード制御理論に基づいた鉄道車両の滑走制御，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol.37,No.3,pp.8-14，2006.
4) 山崎大生，狩野泰，鎌田崇義，永井正夫，木村哲也：鉄道車両の車輪滑走防止のためのスライディングモード制御（実物大試験機を用いた制御実験），日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol.37,No.6,pp1-7，2006.
5) 野波健蔵，田宏奇：スライディングモード制御 －非線形ロバスト制御の設計理論－，コロナ社，1994