

減速度フィードバック機能を備えた ブレーキシステムの開発

南京 政信* 中澤 伸一*
野中 俊昭** 吉川 広***

Development of a Braking System Equipped with Deceleration Feedback Control

Masanobu NANKYO Shin-ichi NAKAZAWA
Toshiaki NONAKA Hiroshi YOSHIKAWA

Train deceleration as brakes applied is a significant physical index of the onboard braking system and devices. Although every type of EMU (Electric Multiple Unit) has the setting value of braking deceleration, actual deceleration caused by applying brake does not comply with the settings by occasion of non-linearity of brake shoe friction, humidity, temperatures and other pertinent factors. So far, such a phenomenon has been treated as an unavoidable situation. However, in the near future, it is essential for braking system to be controlled automatically complying with the setting value under any circumstances due to signaling system requirement, alleviating psychological loads from train drivers, and improving the degree of safety. In this paper, as an effort of RTRI and research colleagues to develop the deceleration automatic control, we have introduced an outline of the deceleration feedback control system and some results achieved from the running test with existing EMU on the test line and commercial service lines.

キーワード：減速度，フィードバック制御，ブレーキ制御装置，自動制御理論

1. はじめに

車両のブレーキシステムは、列車の安全な運行を確保する要であり、確実な動作と安定した性能が求められる。車両のブレーキ性能は、保安装置としての性質上「非常ブレーキ」と総称されるブレーキ種別での減速度や停止距離等により評価されることが多い。一方、通常の運転で駅停車等に使用される「常用ブレーキ」は、「非常ブレーキ」によりフェイルセーフが確保されていることが前提となっているため、保安レベルを若干下げたステージでの設計が可能であり、減速・停止の品質向上に寄与する複雑な制御機能が付加できる等、より自由度の高いブレーキ種別となっている。

近年、減速・停止において乗り心地を損なわないことが必要とされていることから、ブレーキ時の速度や減速度を緻密に制御することが求められている。また、TASC (Train Automatic Stopping Controller；列車定点点停止制御) 等の上位システムで要求される停止位置精度の向上や、ブレーキ性能の安定化による運転士の負担軽減の必要性等を背景に、車両のブレーキ制御装置にブ

レーキ時の減速度を制御する機能が求められている。そこで、ブレーキ制御システムの今後の機能向上における一つの方向として、上述のように制御変更・機能追加の面で自由度が高く、通常の運転において多用される常用ブレーキの種別を対象に、減速度を検知してそれをもとにしたブレーキの制御を行う機能を付加することが有効な方策の一つであると言えることができる。

減速度をもとにしたブレーキ制御（以下、「減速度制御」と言う）について、鉄道総研では自動制御理論に基づく最適な制御システム構造の研究から着手し、計算機シミュレーションと台上試験機による制御実験¹⁾を経て、構内試験線での実車走行試験²⁾を行い、制御パラメータの調整方法と減速度制御精度を確認してきた。さらに、鉄道総研・小田急電鉄・三菱電機・筑波大学の共同研究により、制御伝送装置を用いた減速度制御システムを実際の営業用車両に構築し、営業線での走行試験によりその制御性能を確認した³⁾。

本論文では、上記の経緯にもとづき減速度制御のシステム構造等について概説し、鉄道総研の構内試験線（以下、「構内試験線」と言う）での走行試験及び営業用車両を使用した走行試験の内容と結果、及び今後の課題等について報告する。

* 車両制御技術研究部（ブレーキ制御）

** 小田急電鉄株式会社（元 ブレーキ制御）

*** 三菱電機株式会社

特集：車両技術

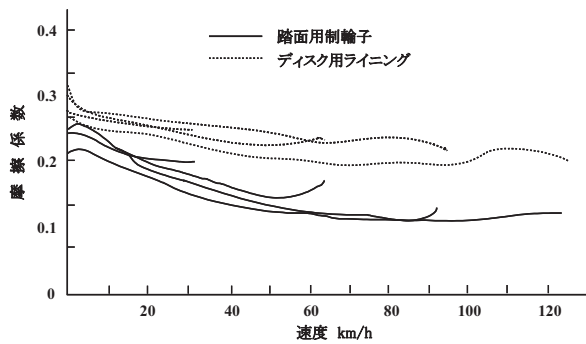


図1 摩擦係数の測定例 [出典：文献4]

2. 減速度フィードバック制御の概要

2.1 減速運動の非線形性と現状システムの問題点

現在営業運転に供されている大半の電気車両は、従来の機械ブレーキ（空気ブレーキ）に加え、回生や発電といった電気ブレーキ機能を備えている。このうち、機械ブレーキは制輪子を車輪やブレーキディスク等（以下、総称する場合は「回転体」と言う）に押し付けることによって発生する動摩擦力を制動に用いるものであることは周知であるが、減速度を制御する上で問題となる以下の特性についてもよく知られている。

- ① 制輪子～回転体間の摩擦係数が、速度、押付力、温度、乾湿条件等に依存する特性を持つ（図1）。
- ② 押し付けの原動力である圧縮空気に圧力伝達の時間遅れがある。

ブレーキが作動してから走行中の車両が減速するまでの力の伝達過程には、上記のような非線形特性が介在するため、例えば制輪子の押付力を一定に保つような制御を行ったとしても、①により減速度は一定とはならない。ところが、現状のブレーキシステムは、制輪子～回転体間の摩擦係数を一定値と見なして設計されているだけでなく、減速度を監視する機能も持たされていない（滑走再粘着制御に用いる場合を除く）。すなわち、予め設定した定数を用いた演算により押付力を決定し、それを出力する機能しか持たないオープンループ制御となっているため、上記①、②の特性に依存した減速度が制動の結果として得られる。

2.2 ブレーキシステムのモデル

減速度制御の目的は、設定された減速度の目標値に対する実際の減速度の誤差を可能な限り小さくすることである。誤差が生じる原因を制御工学的に表現すると、上記①に起因する外乱及び内部構造の変化、並びに②に起因するブレーキから見た車両の動特性とむだ時間である。これらのことを踏まえると、制動力の大きさによる指令と実際に作用する制動力の間に介在する伝達特性を、次式のように表すことができる。

$$G(s) = \mu(\omega) \frac{1}{1+Ts} e^{-Ls} \quad (1)$$

ここで、摺動速度や温度等、摩擦特性を左右する要因をまとめて ω と表し、制輪子～回転体間の摩擦特性 $\mu(\omega)$ は ω の非線形関数であるとする。また、 s はラプラスの演算子で、これを含む(1)式右辺の $1/(1+Ts)$ は1次遅れと呼ばれる線形要素である。これは、従来機械ブレーキ装置の空気圧の立ち上がりや減圧の過渡特性の数学モデルにあてがわれていたものであるが、列車編成単位でブレーキ力が管理される車両（後述）の減速度制御を考える場合には、編成全体が必要とするブレーキ力の指令値に対して、実際に編成各車が出力したブレーキ力を合計したものの過渡特性を表すことになる。 e^{-Ls} は、むだ時間要素と呼ばれる非線形要素で、入力と出力との間に L なる時間遅れを生じさせるものである。ここでは、ブレーキ制御装置内での演算に要する時間や、圧力の伝搬に伴う遅れ、及び減速度を算出する際のデータバッファリングによる遅れ等を合計したもののモデルとしている。

2.3 減速度制御系の構造

制動による実際の減速度をブレーキ制御装置で検知し、これと減速度の目標値との差をもとにした自動制御を行う帰還制御系（クローズドループ系）により、2.2に記述した内部構造変化や外乱の影響を抑制することができる。また、過渡特性の改善等を目的として、次式で表されるPIコントローラを制御要素として用いた。

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (2)$$

ここで、 K_p は比例ゲイン、 K_I は積分ゲインであり、減速度の立ち上がり特性の調整や定常偏差の解消及びシステムの安定性を確保するために調整・設定するパラメータである。特に減速度の立ち上がりについては、乗り心地の維持やハードウェアに衝撃的な応力が生じることを防ぐため、オーバーシュートのない過制動の波形とするのが妥当と考えられ、このような特性を得るための両ゲインを求める方法が文献1)に示されている。

一般にむだ時間要素を含む帰還制御系では、システムの安定性を確保することが難しい場合が多いため、むだ時間を極力小さくするか、その影響を抑制する対策が必要となる。ブレーキシステムのむだ時間を構成する圧力伝搬速度は音速に支配され、演算等による時間遅れは制御装置の性能に依存すると考えられることから、これを更に小さくすることは実際には困難である。そこで、むだ時間の補償に有効な方法としてよく知られているスミスの補償要素⁵⁾を導入する。これは、上で示したコントローラに出力予測モデル $\hat{G}(s) - \hat{G}(s)e^{-Ls}$ を局所フィードバックによって加えるもので、むだ時間を経過した出力の予測値により、むだ時間経過後の実際の出力が相殺さ

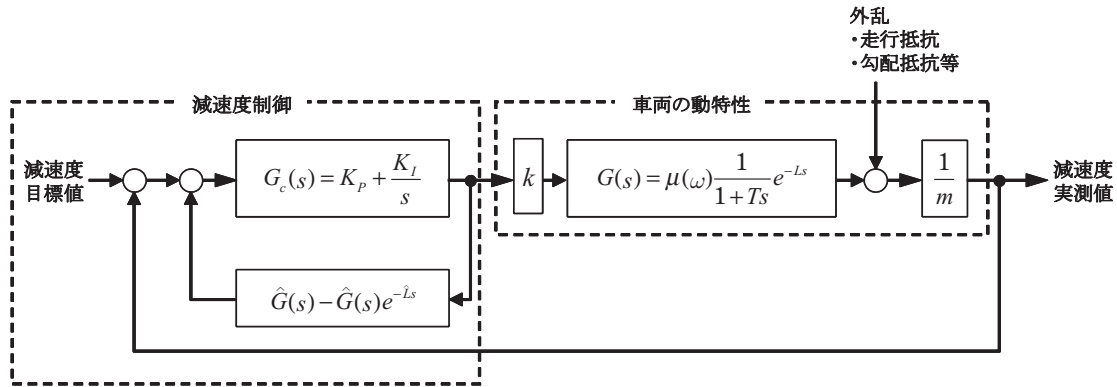


図2 減速度フィードバック制御の基本構造

れ、その影響が抑制されるというものである。(1)式でモデル化したシステムに対して、(2)式のコントローラによる帰還制御系及びスミスの補償要素を導入した減速度制御系のブロック線図を図2に示す。この図で、「車両の動特性」とした部分は、実車がブレーキ力指令を受け、ブレーキが作用して最終的に減速度が出力される過程に相当するものであるが、主たる伝達関数は(1)式で確定したものではなく、実際の走行条件等に応じて各パラメータが変動するものであることを考慮しなくてはならない。また、回生ブレーキ等が併用された場合は、伝達関数が異なる構造となることにも留意を要する。

3. 構内試験電車による減速度制御試験

図2の制御系による減速度制御の効果については、台上試験機により1車輪に対する空気ブレーキのみによる制御実験で確認されている¹⁾。この結果をもとに、著者らは構内試験線を使用して実車による減速度制御試験を行った。

3.1 実車における減速度制御の構成

まず、実車に構成する減速度制御システムについて検討した。従来の車両のブレーキ制御動作を図3に示す。運転士等からのブレーキ指令を各車に備わるブレーキ制御装置（以下、BCUと言う）が受信し、各車両の荷重に応

じた必要ブレーキ力が算出される。BCUはVVVF制御装置（主変換制御装置）に対して回生ブレーキ量を指令し、不足するブレーキ力を空気ブレーキで補うべく空制補足量に応じて圧縮空気を出力する。すなわち、BCUは車両が持つ複数のブレーキ機能を統合的に管理・制御するように構成されており、ブレーキ指令としては一つの量（通常は目標減速度）で列車編成の減速度を増減することが出来る。そこで、提案する減速度制御機能の付加については、図4に示すように、ブレーキ指令の伝達過程にBCUの上位システムとして介入させ、車両が持つ機能をそのまま利用する構造とすることが合理的と言える。

新たに付加する制御機能は、図2で「減速度制御」とした部分に相当するが、(1)式の予測モデル $\hat{G}(s)$ の設定については、車両から得る情報が限られていること、制輪子摩擦係数の推定が難しいこと等から、車両の動特性モデルを単純化した次式の1次遅れ要素とした。

$$\hat{G}(s) = \frac{1}{1 + \hat{T}s} \tag{3}$$

ここで、 \hat{T} は(1)式の時定数 T の予測値であり、図2の局所フィードバック要素にあるむだ時間の予測値 \hat{L} 、(2)式の比例ゲイン K_p 、及び積分ゲイン K_I とともに設計パラメータである。以上の制御演算による出力が、新たに制御ブレーキ指令としてBCUに与えられる。

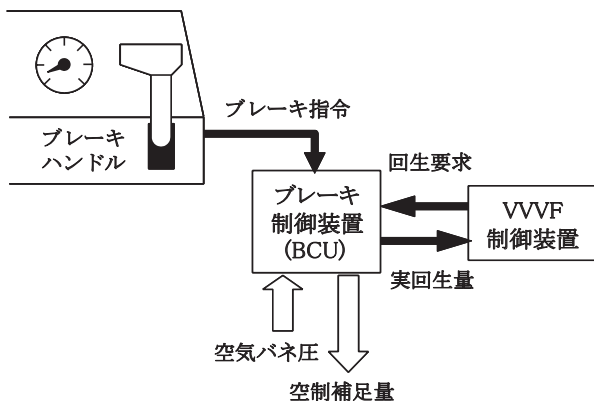


図3 従来のブレーキ制御動作

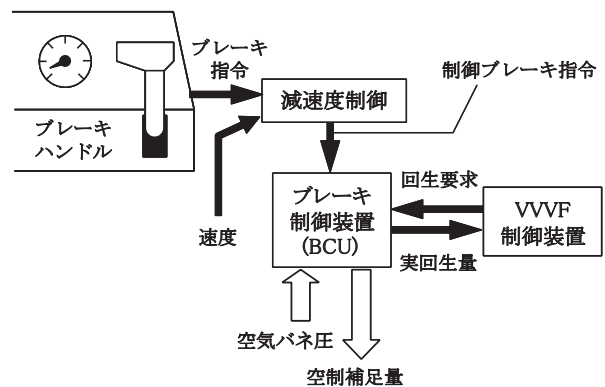


図4 減速度制御を负荷したブレーキ制御動作

特集：車両技術

3.2 構内試験電車による走行試験

この減速度制御を、図5に示すように編成各車をそれぞれ独立に制御する構造とし、構内試験線で使用している2両編成の試験電車 (R291系) に搭載して走行試験を行った。この試験電車は電動車 (Mc) と付随車 (Tc) から成る2両編成であり、車両質量が $Tc > Mc$ となっている。走行条件は、設備上の制約により、初速度30km/hからの空気ブレーキのみとした。ブレーキ4ノッチ相当の減速度2.28km/h/sを制御目標値とした試験結果のチャート例を図6に示す。減速度 (実測) が、点線で示した目標値に追従して行く様子がわかる。この構内走行試験において、提案する減速度制御の基礎的な動作を確認し、制御器設計のためのパラメータチューニング手法を確立した。

3.3 各車独立制御に見られる現象

列車編成を構成する各車両をそれぞれ独立に制御する場合、ひとつの目標減速度に対し、各車それぞれの速度から演算した減速度の実測値をフィードバックして制御を行う。車輪径補正が適切に行われ、滑走が発生していなければ、編成内の各軸は一樣に減速し、制御に用いる減速度実測値も各車で一致する。この場合、各車は自車のみで目標減速度を満たすために必要なブレーキ力を発揮できれば良く、基礎ブレーキ装置の特性が同一であれば各車のブレーキシリンダ圧力 (以下、BC圧と言う) は車両重量に比例した大小関係となるはずである。しかし、図6では、Tc車のBC圧ははじめに立ち上がって以降ほとんど変化がなく、最終的にはTc車より車両重量の小さいMc車の方が高いBC圧値を示した。これは、減速度制御は各車で独立して行っているが、それぞれがフィードバックしている減速度がこの場合ほぼ等しく、実質的に編成としての運動を代表する減速度に基づく制御が行われていること、その一方で、制御応答が速いMc車のBC圧が制御開始後先に立ち上がり、Tc車より高圧となった時点で減速度が目標値に達したため、制御動作が収束に向かったことによると考えられる。電気ブレーキとの協調を行う車両にこれを適用することを考えると、通常は空気ブレーキより応答の速い電気ブレーキが先に立ち上がるので、電気ブレーキ優先の考え方に反する現象は起こらないが、何らかの原因により付随車の空気ブレーキが先に立ち上がった場合には、回生ブレーキに余力があるにも関わら

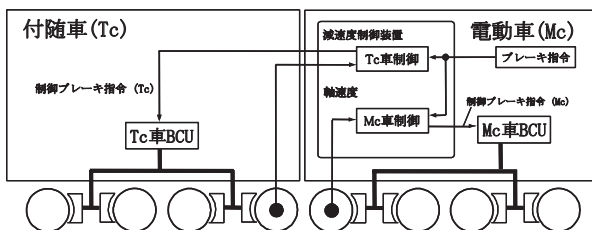


図5 減速度制御システム構造 (構内走行試験)

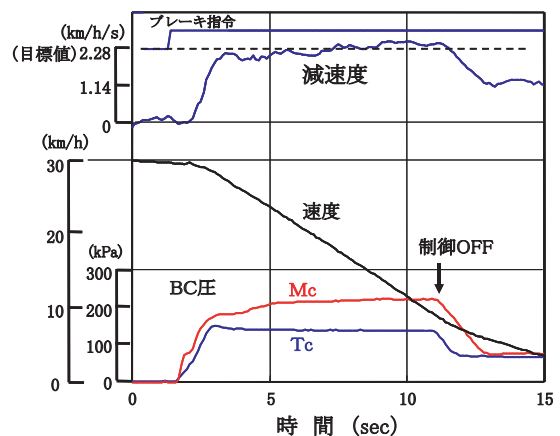


図6 構内走行試験結果例

ず、空気ブレーキによって必要な減速度が満たされる制御状態になりうることを示唆している。このような各車のブレーキ力配分としては本来望ましくない状態となることを避けるため、前述のようにBCUの持つ「電空協調制御」や「遅れ込め制御」、及びこれらを統合・発展させた「編成ブレーキ制御」等の機能の上に減速度制御を構成することが有効と考えられる。

4. 制御伝送装置による編成ブレーキ制御

著者らは、減速度制御を実車に適用するにあたり、安定した性能を発揮させるため、前述の編成ブレーキ制御機能を備えるTIMS (Train Information Management System) などの制御伝送装置を搭載した車両をターゲットとした。編成ブレーキ制御では、乗車率とブレーキ指令から編成全体で必要となるブレーキ力を算出したうえで、編成全体で有効となっている回生ブレーキ力を把握し、回生ブレーキ力では満たない分だけを機械ブレーキ力として各車に補足している。ブレーキ指令が一定である場合、編成内の各車へ分配される機械ブレーキ力は回生ブレーキ力の変動のみによって変化する。

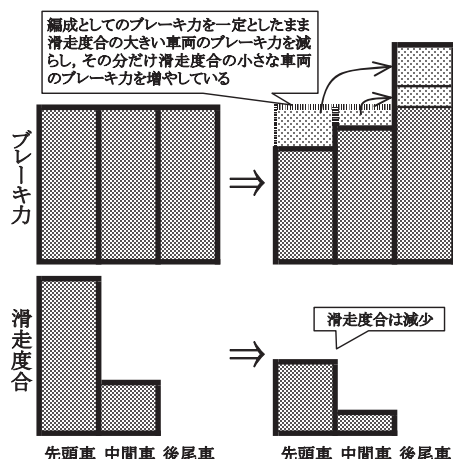


図7 編成滑走制御によるブレーキ力の分配

一方、著者らは、より安定した性能の発揮を目的のひとつとして、編成全体で滑走防止制御を行う新たなブレーキ制御システム（以下、編成滑走制御と言う）を開発した⁶⁾。編成滑走制御は編成ブレーキ制御とファジィ推論を用いた滑走防止制御（ABS）を統合したシステムであり、滑走の発生そのものを低減させることでABS単独の場合よりも「ブレーキ距離の短縮」と「車輪踏面の損傷低減」を同時に実現させることができる。編成滑走制御では、編成ブレーキ制御が編成内の各車に機械ブレーキ力を分配する際、状態変数としてABSが算出する滑走の発生している度合いにより、滑走している車両の機械ブレーキ力を低減させるとともに、その低減した分を滑走していない車両に機械ブレーキ力として付加している。つまり、編成全体でのブレーキ力を一定に保ちながら、滑走の度合いに応じて動的に各車の機械ブレーキ力を変化させている（図7）。ある軸に滑走が発生すると短時間内に再び同一の軸で滑走が発生する場合は非常に多いことから、編成滑走制御によって再滑走を防ぐことによる滑走の発生自体の低減が可能となるうえ、編成全体のブレーキ力を下げることなく滑走した軸を再粘着できるようになった。なお編成滑走制御は、小田急の60000形と4000形に標準搭載されている。

5. 営業用車両を用いた減速度制御現車試験

構内試験線での走行試験において得られた成果をもとに、小田急電鉄、三菱電機、筑波大学と鉄道総研の四者共同研究により、小田急電鉄にて新製の60000形特急車両に減速度制御を搭載し、同社多摩線において走行試験を行った。

供試車両である60000形特急車両（図8）には、列車情報管理装置（TIMS）と同等のTIOS（Train Information Odakyu System）と呼ばれる伝送システムが搭載されている。TIOSは前述のように編成内の各車両の重量や、電動車における回生ブレーキ力などを一元的に集約し、回生ブレーキ力の分配、遅れ込め制御などを編成全体で効率的に行う編成ブレーキ制御機能を持っている。これ



図8 小田急電鉄60000形特急電車

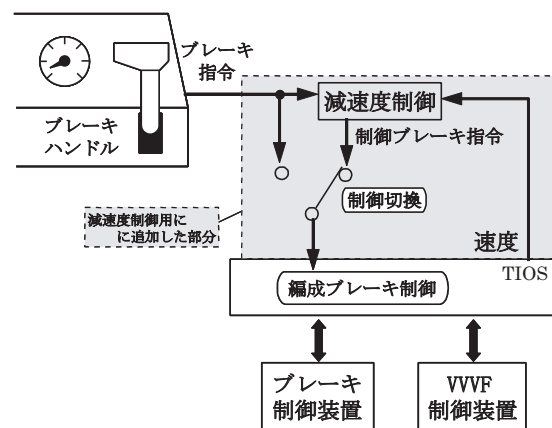


図9 60000形に搭載した減速度制御の構造

は、前述した従来のBCUが持つ1両（あるいは1ユニット）ごとの機能を、編成全体を一括とみなした形に拡張することと等しい。すなわち、減速度制御をTIOSの前段に置くだけで図4と同等の構造となり、列車の減速度を編成単位で一括に制御ができる。さらに、編成ブレーキ制御のはたらきにより、構内試験線での結果で述べた、各車の減速度を独立に制御する場合に起こりうるブレーキ力の不適切な分配が生じる恐れがないことや、より多数の軸から一つの速度を編成の代表値として選択して制御演算に用いるため、滑走の発生時などに実速度を検出する信頼性と冗長性が向上するなどの利点がある。

60000形に搭載した減速度制御の構造を図9に示す。新たに加えた制御部は、運転台からのブレーキ指令と車両からの速度を得て、制御ブレーキ指令を演算し、TIOSの減速度目標値入力部分（既存）に対して出力する構造となっている。TIOSは、これを受けて編成ブレーキ制御を含む既存の制御を行う。

減速度の目標値を常用最大（7ノッチ）相当とした場合について、回生ブレーキ併用の有無、散水の有無を条件とした場合の試験について、初速度と停止ブレーキ距

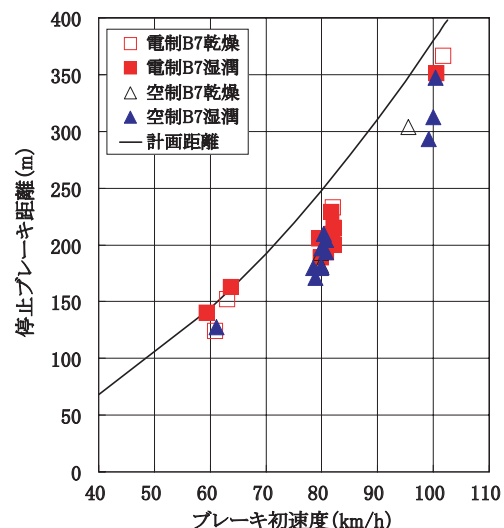


図10 停止ブレーキ距離（減速度制御なし）

特集：車両技術

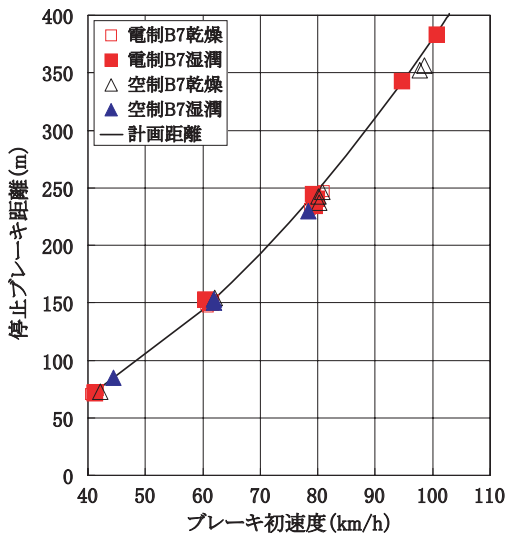


図 11 停止ブレーキ距離（減速度制御あり）

離の関係を図 10 及び図 11 に示す。なお、試験地点の勾配は平坦～上り 25% の間にあり、図では区別していない。また、図中の曲線は、目標減速度 4.0km/h/s で停止した場合（1.2s の想定空走時間を含む）の停止ブレーキ距離を、初速度をパラメータとして計算したものである。減速度制御なしの試験結果では、回生状況の違いや試験地点の勾配などにより、停止ブレーキ距離は計画値に対して最大約 30% の誤差があったのに対し、減速度制御を適用した場合には、誤差が最大 5% 程度に抑えられていることがわかる。

また、図 12 及び図 13 に試験結果の例（時系列チャート）を示す。いずれも試験条件は常用最大ブレーキ、回生ブレーキ有効、散水有り、及び平坦線区間である。回生ブレーキ併用時、及び滑走が発生した場合でも安定して目標減速度への追従制御が行われていることがわかる。これについては、4 章で述べた「編成滑走制御」によりブレーキ力配分が適正に行われ、滑走した車軸のブレーキ力損失が編成単位でみた減速度に及ぼす影響を低減する効果があることを示しているものと考えられる。なお、回生ブレーキと空気ブレーキの応答性に大きな差があることから、回生ブレーキ併用の試験では一部に実減速度が振動的な挙動を示すものがみられた。この対策としては、(3)式による予測演算機能を回生、空制それぞれに設ける等、動特性の異なる制動力源に対する個別のモデル化と制御演算が有効と考えられる。

6. まとめ

減速度フィードバック制御機能を備えたブレーキシステムの開発について、制御の基本的な構造について概説し、鉄道総研のこれまでの取り組み、及び鉄道総研・小田急電鉄・三菱電機・筑波大学の共同研究によって得ら

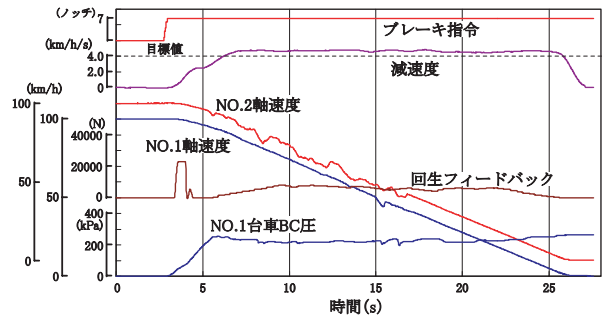


図 12 減速度制御なしの試験結果例

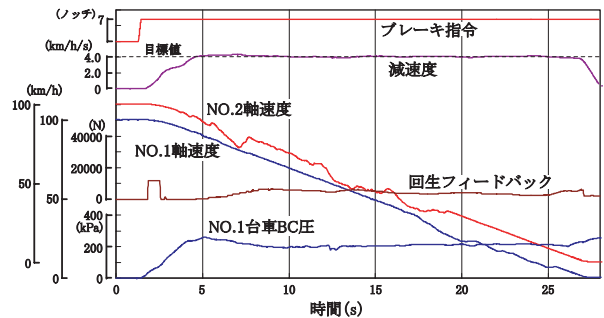


図 13 減速度制御ありの試験結果例

れた成果について報告した。制御伝送系を用いて編成各車のブレーキ力を動的に配分する「編成ブレーキ制御」をベースとして制御系を構成することで、減速度とブレーキ距離の目標値に対する誤差を、湿潤・乾燥、回生率等の条件に関わらず従来の 1/6 程度に抑えられることが、営業線における走行試験結果により示された。今後は制御伝送系を持たない既存の車両での制御系構成と回生ブレーキ併用時の挙動をより安定化するなどの課題に取り組み、実用化のレベルを向上させて行く。

文献

- 1) 南京政信：空気ブレーキによる車両減速度制御に関する研究、鉄道総研報告、Vol.17, No.4, pp.35-38, 2003
- 2) 中澤伸一、南京政信、吉川広：減速度フィードバック制御方式の検討（構内試験線における走行試験結果）、第 14 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集、pp.327-330, 2007
- 3) 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
- 4) 木川武彦、出村要、保田秀行：鉄道車両のブレーキ技術（6）—ブレーキ摩擦材料とその特性（その 2）—、機械の研究、Vol.49, No.2, p.295, 1997
- 5) 渡部慶二：むだ時間システムの制御、計測自動制御学会編、1993、コロナ社
- 6) 野中俊昭、遠藤靖典、吉川広：編成としての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.18, No.3, pp.484-495, 2006