

制動距離に応じて目標値を逐次更新する減速度制御による停止位置精度の向上

○ [機] 中澤 伸一 (鉄道総研)

Accuracy Improvement of Train Stop Position by Using Deceleration Control Updating Target in According to Braking Distance

○Shin-ichi Nakazawa (Railway Technical Research Institute)

The brake control systems used in current railways are generally open-loop structure. The braking performance tends to be affected by some disturbances, such as wheel slides, characteristics of friction components included in brake equipment. In order to stabilize automatically the braking performance, we improve the proposed closed-loop system which can track the train deceleration to the target value which is updated sequentially based on the difference between the target braking distance and the measured one. We carried out running tests using the rolling stock equipped with the proposed method under the condition where the braking force can be degraded intentionally. And we applied a new velocity sensor instead of the existent tachometer to the proposed method. The results of the test showed that the proposed method sufficiently contributes to the reduction of the increase of braking distance in case of temporary brake degradation.

キーワード : ブレーキシステム, 減速度制御, 列車停止位置, レーザドップラ速度計

Key Words : Brake system, Deceleration control, Train stop position, Laser doppler velocity meter

1. はじめに

現状の鉄道車両のブレーキシステムは開ループ制御で構成されている。そのため、同じブレーキ操作でも、雨天時などにブレーキ材の摩擦係数が低下したり、車輪が滑走してブレーキ力が変動することがあり、これを運転士の操作や、自動列車運転装置 (ATO : Automatic Train Operation), 定位置停止制御 (TASC : Train Automatic Stop-position Controller) などの機能がブレーキ操作を選択することで補い、ブレーキ性能を安定化させている。

これに対し著者らは、ブレーキシステムに列車の減速度をフィードバックして目標値に追従させる「閉ループ制御」を構成した「減速度制御」を提案し¹⁾²⁾、ブレーキ距離の精度を向上できることを示した。そして、走行中にブレーキ距離に基づき減速度の目標値を逐次更新するように改良した「距離基準減速度制御」により、停止位置精度をさらに向上できることを示してきた³⁾。

距離基準減速度制御ではフィードバックする列車速度の精度が制御動作に影響することから、本研究では車輪の回転速度によらず対地速度を測定する手段としてレーザドップラ速度計の適用を考え、実車試験により停止位置精度を評価する。

2. 研究の背景

2.1 鉄道車両のブレーキシステム

現状の一般的な鉄道車両において、ブレーキシステムか

らみれば、運転士による手動操作も、ATO などによる制御動作も、受信したブレーキノッチに従って既定の動作をする点では同じである (ブレーキノッチの段数は、ATO や TASC などの自動制御では細分化されている例が多い⁴⁾)。

ブレーキノッチ段には設定減速度が規定され、空気ばね圧力から車両重量を把握して設定減速度を満たすための必要ブレーキ力を算出し、電気ブレーキ・空気ブレーキを動作させる。ブレーキシステムは、この結果として生じる列車の速度変化、すなわち減速度が設定減速度を満たしているかを判定しない「開ループ制御」である。

2.2 減速度制御

(1) 目標値一定型 (従来型)

これまでに、ブレーキノッチに対応した設定減速度を常に得られるブレーキシステムを目ざし、車両から減速度をフィードバックする「減速度制御¹⁾²⁾」を提案してきた。

減速度制御では、運転台で選択したブレーキノッチから定まる設定減速度を目標値とし、フィードバックした減速度 (実減速度とする) との誤差に基づき、制御器が新たに「制御ブレーキノッチ」を決定する。そして、従来のブレーキシステムをそのまま利用し、ブレーキノッチを制御ブレーキノッチに読み替えて与える (図 1)。制御器の構造は、PI 制御と、入力に対してむだ時間がある制御対象に有効とされるスミス補償法を適用したものである。本報ではこれを「従来型減速度制御」とする。

従来型減速度制御では、図 2 に例示するようにブレーキ

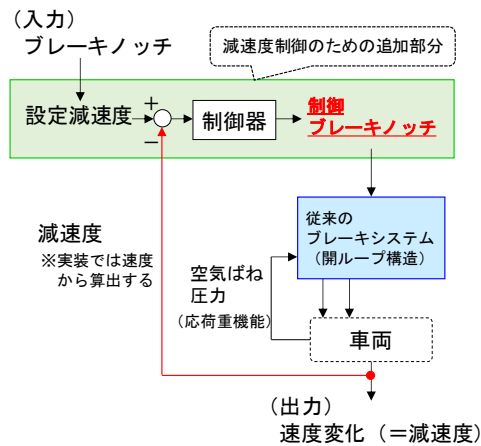


図1 従来型減速度制御のブロック線図

中にブレーキ力が急激に低下するような場合、低下した実減速度が制御によって再び目標値に追従しても、減速度の2階積分であるブレーキ距離は延伸する。この延伸分を補償するには、開ループ制御と同様にブレーキノッチを再選択する必要がある。

(2) 目標値逐次更新型（距離基準減速度制御）

ブレーキ初速度 v_0 (km/h)から v_f (km/h)まで設定減速度 β_N (km/h/s)で減速したときのブレーキ距離 S_N (m)を「目標ブレーキ距離」として、式(1)で表す。

$$S_N = \frac{v_0^2 - v_f^2}{7.2 \cdot \beta_N} + \frac{v_0}{3.6} \cdot t_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

右辺第2項は、ブレーキ開始直後など過渡応答を考慮する場合に加算する空走距離（空走時間 t_0 (s)間の走行距離）であり、停止までの場合には $v_f = 0$ とする。

さらに、ブレーキ中は常にサンプリング時間 Δt ごとに速度 v を積算して実測ブレーキ距離 S を算出する（式(2)）。

$$S = \int v dt \left(= \sum (v \cdot \Delta t) \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

そして、これら S 、 S_N とそのときの速度 v から式(3)により、距離基準目標減速度 β_d (km/h/s)を逐次算出する。

$$\beta_d = \frac{v^2 - v_f^2}{7.2(S_N - S)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(3)の分母に含まれる $S_N - S$ は目標ブレーキ距離まで

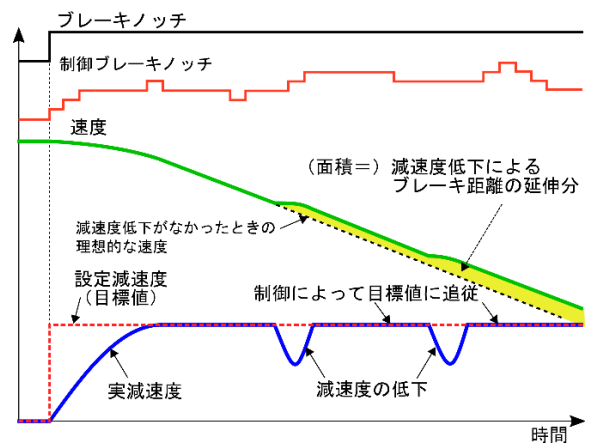


図2 従来型減速度制御でブレーキ距離が延伸する場合

の残距離で、 β_d は「残距離の間に速度 v_f まで減速するために必要な減速度」を意味する。この β_d を逐次算出して目標値とする制御を「距離基準減速度制御（以下、提案型）」とする。提案型は、従来型では一定値としていた目標値を逐次更新される β_d に置き換えることで構成でき（図3）、制御器には従来型と同じ構造が適用できる。

また、仮に特定の地上子をブレーキ開始点として固定し、その地上子から停止位置までの距離を目標ブレーキ距離として固定すれば、 $S_N = \text{一定値}$ 、 $v_0 = \text{地上子通過時の速度}$ としたTASCとして動作する。この場合、式(1)による S_N の算出は不要で、式(2)、式(3)を用いて残距離から β_d を算出し、逐次更新する。

3. 実車走行試験

3.1 車両・軌道条件

鉄道総研の所内試験線において、付随車（Tc車）と動力車（Mc車）からなる2両編成の電車（以下「試験列車」とする。構成を図4に示す）を用いて走行試験を実施した。

車上に「距離基準減速度制御装置」を搭載し、入力には速度発電機（以下「速発」とする）からの回転速度のほか、レーザドップラ速度計（詳細は後述）で取得した列車の対地速度を適用する条件を設定した。制御装置が出力する制御ブレーキノッチを空気圧制御弁への指令信号（電流値）

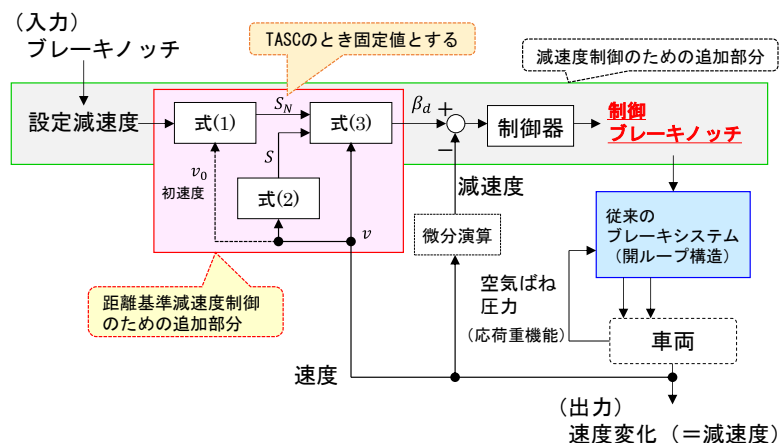


図3 距離基準減速度制御のブロック線図

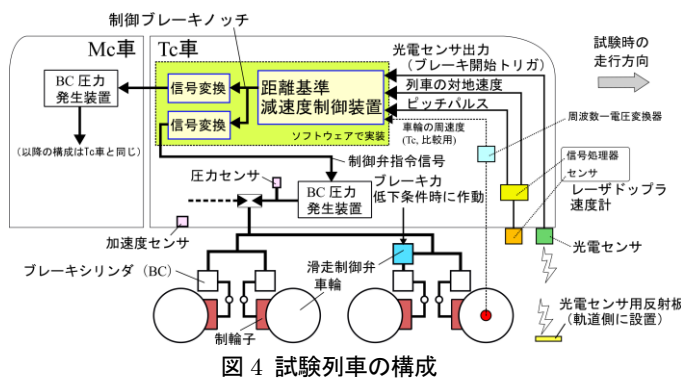


図4 試験列車の構成

に変換し、通常の供給系統と独立にブレーキシリンダ（BC）圧力を制御できる「BC圧力発生装置」に与えて空気ブレーキのみを使用した。車両重量に応じてBC圧力を変える「応荷重機能」は信号変換機能の一部として構成した。

Tc車の床下に光電センサを、軌道側に地上子を想定した反射板を設置し、これを通過したときにブレーキを開始する構成でTASCを模擬した。ただし、ブレーキ開始点までは手動操作で走行し、ブレーキ初速度は試験ごとに異なる。

3.2 制御条件

制御ブレーキノッチは、試験列車の常用最大ブレーキの設定減速度（4.32km/h/s）を21段階に等分して設定した。

また、急激な動作や衝動を防ぐため、ブレーキ開始から1.0s間は減速度のフィードバックを行わず、以降は2.2(2)項の手順で β_d を逐次更新するものとし、停止直前には設定減速度の一定値まで漸減させた。

このほか、速度20km/hを下回ったときに各車両の進行方向前方から第2軸のみBC圧力を全排気してブレーキ力を意図的に低下させる「ブレーキ低下条件」を設定した。

3.3 レーザドップラ速度計

非接触で対象物の移動速度を測定できるレーザドップラ速度計（以下、LDV：Laser Doppler Velocity meter、図5）をTc車床下に固定してレールの外軌側底部端付近に照射し（図6）、計測値を列車の対地速度として制御に適用する条件を設定した。このLDVは、極低速まで安定した速度計測ができるほか、移動距離に応じたパルス（以下、ピッチパルス）を出力できる。主な仕様を表1に示す。

また、ブレーキ区間（135mを設定）のうち約5.2mに



図5 LDV（センサ部）の外観

LDVの測定距離を逸脱させる障害物を設置した。

3.4 試験結果

LDVの速度を使用した制御例を図7に示す。この例では、約10s経過の時点でLDVの照射位置に障害物を設置した区間を通過した。このとき、LDVの補間機能が速度の直前値を保持したため、制御に適用した減速度（図7の青線）が急激に低下したとみなされ、以降の減速度の目標値を大きくしている。このとき、目標ブレーキ距離135mに対し初速度39.8km/hから134.55mで停止した。

本報で使用したLDVは、信号処理器からセンサの感度レベルや補間機能の作動状況などを外部に出力することができる。これらを距離基準減速度制御装置に取り込み、LDVの感度レベルが低下した状態を一定時間以上継続した場合、そのときの減速度を保持して、感度レベルが回復するまで速度を推定する機能を追加した。

この速度推定機能を適用した結果を図8に示す。図7と同様に約10s付近でLDVへの障害物を設置した区間を通過しているが、速度を推定して制御に影響を与えていない。その後、速度20km/hを下回りブレーキ低下条件となるが、目標ブレーキ距離135mに対し、初速度40.08km/hから135.02mで停止した。なお、本報では停止位置の精度を優先して設定減速度より小さい目標値を許容したが、停止位置からの超過をより厳密に防ぐには、減速度の目標値に下限値を設定することで対応できる。

LDVのピッチパルスで計測したブレーキ距離の実測値（平均値）の比較を図9に示す。LDVで速度推定機能を適用した場合にはほぼ目標ブレーキ距離で停止した。一方の

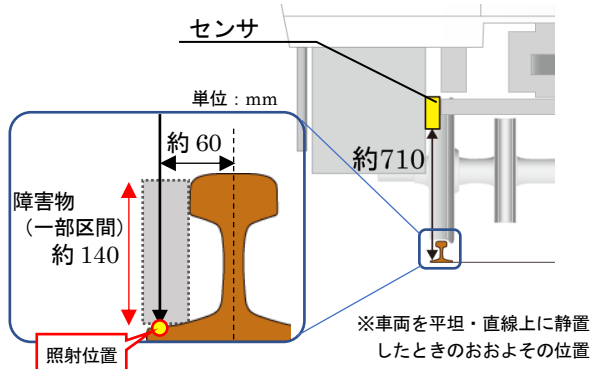


図6 LDVの照射位置

表1 LDV（信号処理器を含む）の主な仕様

センサ：MODEL 1521T（アクト電子（株）製）	
測定方式	レーザドップラ方式、後方散乱差動型
測定距離	700±100mm
測定速度範囲	-250～+250km/h または -6～+550km/h
測定精度	±0.2%以内
信号処理器：MODEL 2531A（アクト電子（株）製）	
ピッチパルス	0.01～100mm、分解能0.01mm 2出力（90°位相差）
補間機能	ドップラ信号欠落時*に速度を直前値で補間
外部出力	速度、ピッチパルスのほか、補間機能の作動状態などを外部に出力可能

※信号処理器で設定した感度レベルのしきい値を下回ったとき

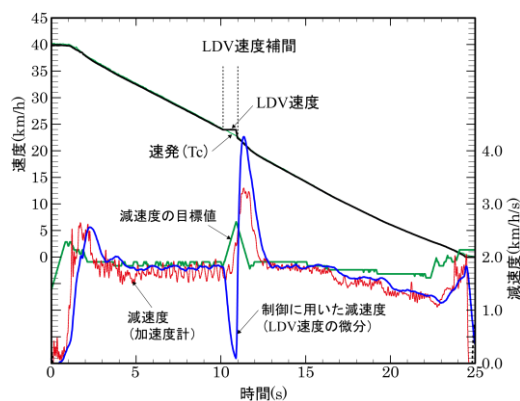


図7 提案型の結果例① (LDV 使用, 速度推定なし)

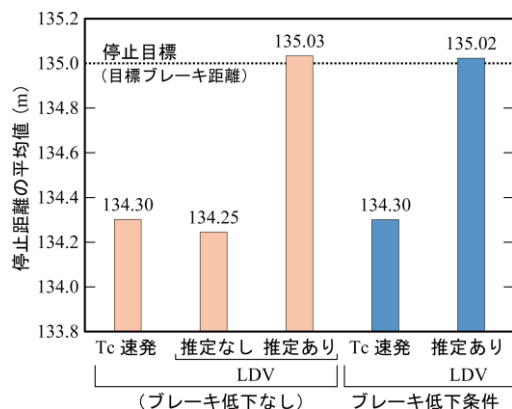


図9 ブレーキ距離 (平均値) の比較

Tc 車の速発による回転速度を制御に適用した場合、目標ブレーキ距離との誤差は 0.7m (目標値より手前) であった。提案型は、残距離の計算に速度の積分値を利用しており、速発の回転速度に含まれる車輪径の誤差などの影響と考える。

図 10 は、図 8 から停止直前の速度波形を拡大したものである。速発の出力は正弦波で低速になるにつれ振幅が小さくなる。これを波形整形して周波数-電圧変換器を経て速度として計測しており、それらの特性によって誤差が生じやすい。一方の LDV の波形は低速でも安定していた。

4. おわりに

本研究では、鉄道車両の停止位置精度の向上を目的に、列車の減速度をフィードバックする「減速度制御」を改良し、ブレーキ距離に基づいて減速度の目標値を逐次更新する「距離基準減速度制御」を提案した。そして、これを適用することで、ブレーキ力が急激に低下する場合にも停止位置の精度を向上できることを実車試験により示した。

また、提案手法では、フィードバックした列車の速度を微分した減速度と、積分したブレーキ距離を制御に利用しており、もともとなる速度の精度が制御性能に大きく影響する。速発から取得する速度には、空転や滑走により真の対地速度との誤差が含まれる恐れが常にあり、本報ではより正確な対地速度の取得手段として LDV を用いた。適用した LDV は、ドップラ信号の欠落を判定する感度などを調整できるので、センサの設置位置の調整と合わせ、補間機

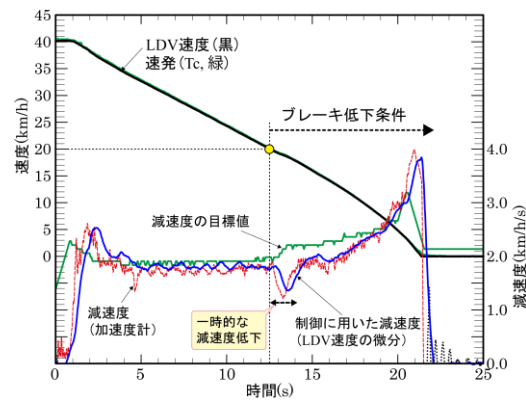
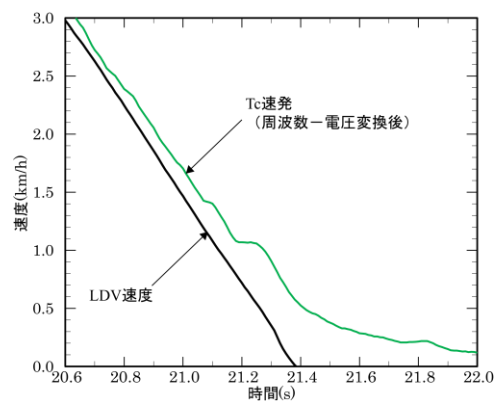
図8 提案型の結果例②
(LDV 使用, 速度推定あり, ブレーキ低下条件)

図10 低速域の速度波形 (図8から拡大)

能を適切に設定することで、精度の高い対地速度をより安定して取得できると考える。また、この LDV はピッチパルスにより距離を直接計測できるので、これを制御に利用することで、積分演算による誤差の低減が期待できる。

今後は、LDV を活用して制御の安定化を図るほか、乗り心地を考慮した衝動の小さい制御パラメータの選定など、実用に向けた検討を進めたい。

謝辞

本研究の実施にあたり、LDV を使用した試験条件の検討、車両への設置等にご指導、ご協力いただいたアクト電子 (株) の各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 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) 南京政信, 中澤伸一, 野中俊昭, 吉川広: 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, 鉄道総研報告, Vol.23, No.4, pp.41-46, 2009.
- 3) 中澤伸一: 制動距離基準減速度への追従制御による鉄道車両の停止位置精度の向上, 日本機械学会 2020 年度年次大会講演論文集, J18109, 2020
- 4) 安藤裕隆, 田中光彦, 成田武: あおなみ線 1000 形車両 TASC 装置 -TASC・ホーム7制御装置-, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, Vol.42, 論文番号 519, 2005