

鉄道車両のブレーキを制御して 停止位置精度を向上する



中澤 伸一
Shinichi Nakazawa
車両技術研究部
ブレーキシステム研究室
主任研究員

はじめに

鉄道のブレーキには、第一に安全のために車両をできる限り早く・短く停止させる性能が求められます。そのうえで、走行する環境がさまざまに変わるなかでも、つねに操縦者の思いのままに減速・停止させられる「扱いやすさ」も求められます。

とくに最近では、都市圏を中心にプラットホームでの転落事故を防ぐためのホームドア(図1)の設置が進み、ホームドアの開口部に乗降扉を合わせるために車両には高い停止位置精度^{☞参照}が求められています。

これを実現するために、すでにホームドアを

設置した路線の車両に多く搭載される定点停止装置(TASC)^{☞参照}などの運転支援機能や、熟練した運転士によるブレーキ操作が必要で、ブレーキにも、より一層の「扱いやすさ」が求められています。

そこで、安全を確保したうえで「より扱いやすい」ブレーキシステムを目指した取り組み¹⁾について紹介します。

電車のブレーキ操作方法

図2は、電車の運転台操作卓の一例で、運転士がブレーキをかけるときには、ブレーキハンドルを操作します。ブレーキハンドルで選べるのは「ブレーキの強さ」を表す単純な整数値で、選んだ値(この例では1~7)がブレーキ指令^{☞参照}と



図1 ホームドアの例
出典：「ホームドア整備に関するWG(第1回WG配付資料)」(国土交通省)
<https://www.mlit.go.jp/common/001279827.pdf> (2022年1月25日に利用)

☞ ホームドアと停止位置精度

ホームドアを設置したときの一般的な停止位置精度として、定点停止装置が整備されている場合 $\pm 0.35\text{m}$ 程度、未整備の場合 $\pm 0.50\text{m}$ ~ $\pm 0.75\text{m}$ 程度とされています²⁾。最近では、開口部の大きいホームドアにより精度を緩和する例もあります。

☞ 定点停止装置(TASC: Train Automatic Stop-position Control³⁾)

車両が軌道上に設置したアンテナ(地上子)を通過することで自分の位置を把握するとともに停止までの速度パターンを生成し、それに沿うようにブレーキ指令をブレーキシステムに送ります。

☞ ブレーキ指令

ブレーキハンドルでは、運転士がブレーキの強さを調整する「常用ブレーキ」のほか、緊急時などに使用する「非常ブレーキ」を選択できます。非常ブレーキは常用ブレーキとは独立した経路で指令が伝達され、運転士には強さの調整ができません。

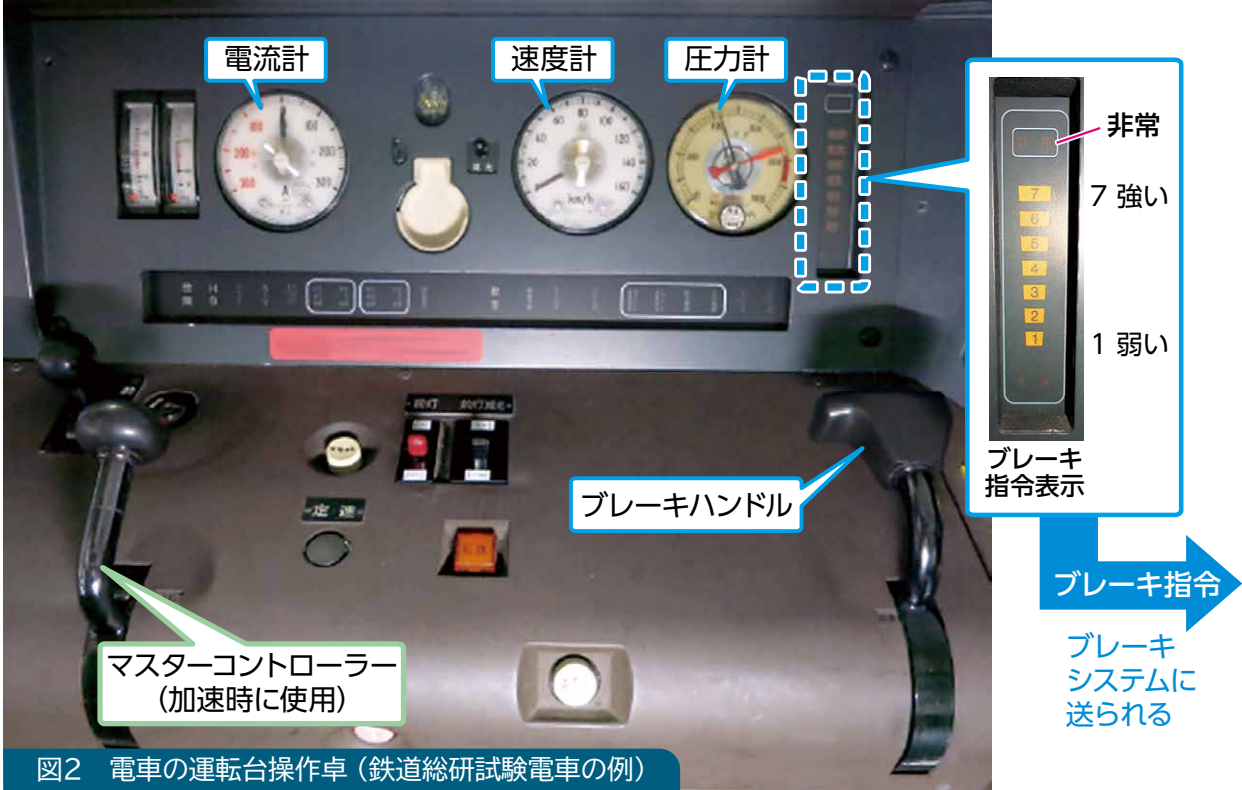


図2 電車の運転台操作卓（鉄道総研試験電車の例）

してブレーキシステムに送られます。

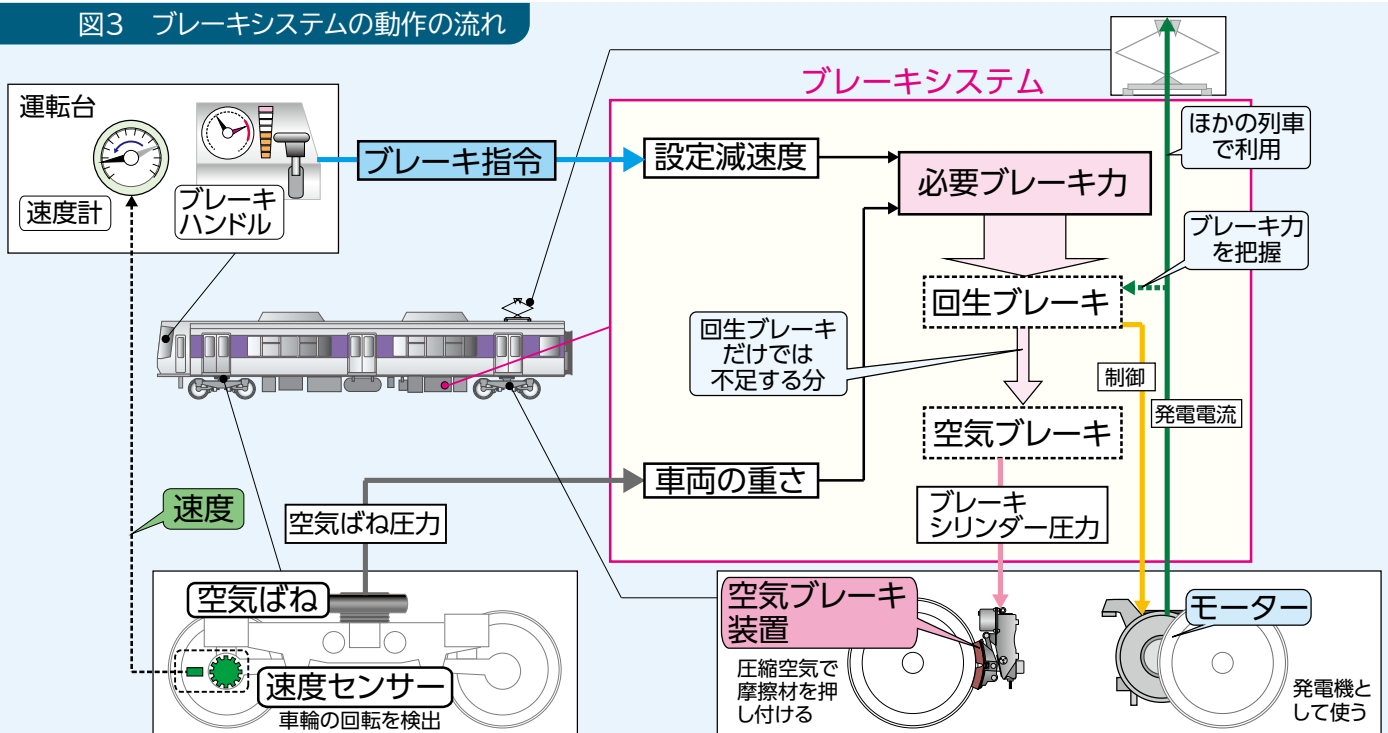
図3は、ブレーキ指令を受け取ったブレーキシステムの動作の流れを示しています。ブレーキシステムでは、指令の値に応じた「ブレーキの強さ」として減速度が車種ごとにあらかじめ設定されており（以下、「設定減速度」とします）、この設定減速度を得るために必要なブレーキ力（以下、「必要ブレーキ力」とします）を計算します。最近の車両は軽量の車体にたくさんの

乗客を乗せられるためラッシュ時と空車時とで重さが大きく変わるので、ブレーキシステムでは車体を支持する空気ばね[※]の圧力から車両の重さに関する情報をつねに取得して必要ブレーキ力を計算し、重さの変化でブレーキの強

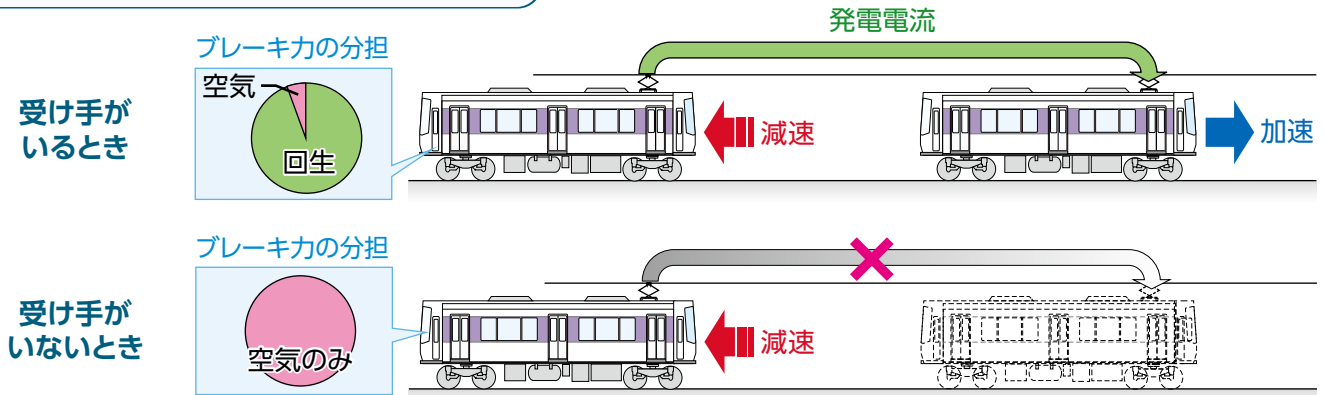
※ 空気ばね

ホームでの乗降などで車体の高さを重さによらず一定に保つために、重さに応じて空気ばねの圧力を自動的に調整しています。

図3 ブレーキシステムの動作の流れ



(a)例① 発電電流の受け手の有無



(b)例② 速度による特性

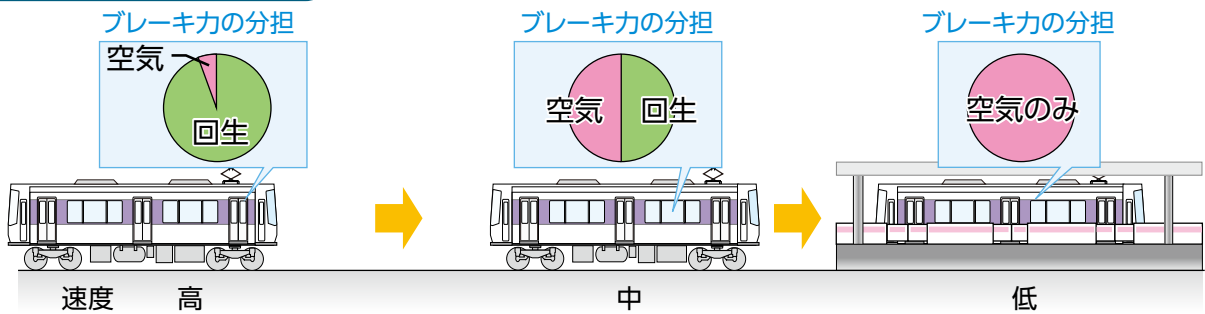


図4 回生ブレーキが変動する要因の例

さが変わらないようにしています。

つづいて、ブレーキシステムは算出した必要ブレーキ力に基づいてブレーキ装置を制御します。最近の電車では、モーターを発電機として利用し発電した電流をほかの列車で再利用できる「回生ブレーキ」を優先して使用します。回生ブレーキは発電電流からブレーキ力を把握できるので、回生ブレーキだけでは必要ブレーキ力に不足するときには、圧縮空気力でブレーキパッド（鉄道では「制輪子」とよぶ）を車輪に押し付ける「空気ブレーキ」で不足分を補い、車両を減速させていきます。

ブレーキシステムが正確に動作していても、たとえば勾配のある線路を走ってれば、実際の減速度と設定減速度との間に差が生じますが、この差をなくすようにブレーキシステム自身で調整することはありません。図2に示した運転台には回生ブレーキの作用を示す電流計、空気ブレーキの作用を示す圧力計なども備えられていますが、これらを運転士が個別に操作するこ

ともできません。運転士は、前方の監視をしながら減速効果の過不足を判断し、運行ダイヤや乗り心地なども考慮しつつブレーキハンドル一つでブレーキを操作しています。

停止位置精度を保つ難しさ

実際の走行中には、線路の勾配のほかにもブレーキの効果を変動させる要因がたくさんあります。たとえば、時間帯も一つの要因です。ラッシュ時と閑散とする時間帯とでは、まず乗客数の違いで車両の重さが大きく異なり、同じブレーキ指令を選択していても必要ブレーキ力が大きく変わります。さらに、[回生ブレーキの作用に必要なとなる発電した電流の受け手](#)^{※参照}となる列車の数も時間帯で変わるため、回生ブレーキの効果も変動します（図4(a)）。また、仮

※ 回生ブレーキによる発電電流の受け手

加速のために電流を必要としている周囲の列車が受け手になります。交流電化区間では周囲に加速する電車がいないときに変電所でも回生電流を吸収することができ、直流電化区間に比べて回生ブレーキが安定して動作します。

に発電電流の受け手がいて、ブレーキ開始から停車までブレーキ指令を一定にしても、発電機として利用するモーターの仕様などにより、速度に応じて回生ブレーキの効果が変動します(図4(b))。

このような回生ブレーキの特性を補う空気ブレーキは、ブレーキシリンダー圧力を制御して制輪子を車輪に押し付け、摩擦を利用してブレーキ力を得ています。そのため、制輪子を押し力が同じでも、ブレーキ力は速度によって変わるほか、車輪や制輪子に付着した雨や雪、レールの汚れなどによっても変わってしまいます(図5)。

また、鉄道では、雨天時やレールのわずかな汚れなどでブレーキ中に**車輪が滑走する**^{※参照}ことがあります。滑走は、回生ブレーキでも空気ブレーキでも起こりうる事象で、減速度を低下させるだけでなく、放置すると車輪が引きずられて大きく損傷するおそれがあるため、ブレーキ力を一時的に減らす機能(滑走制御)を用いる場合があります。

このように、同じブレーキ指令を選択していても、線路の勾配、時間帯や天候などによって必ずしも同じように減速できるとは限らず、刻々と変わる状況の下で精度良く停止するためにきめ細かなブレーキ操作が求められます。

車輪の滑走

レール上で車輪が「すべる」状態で、車両が進む距離と車輪が転がる距離との間に差が生じます。

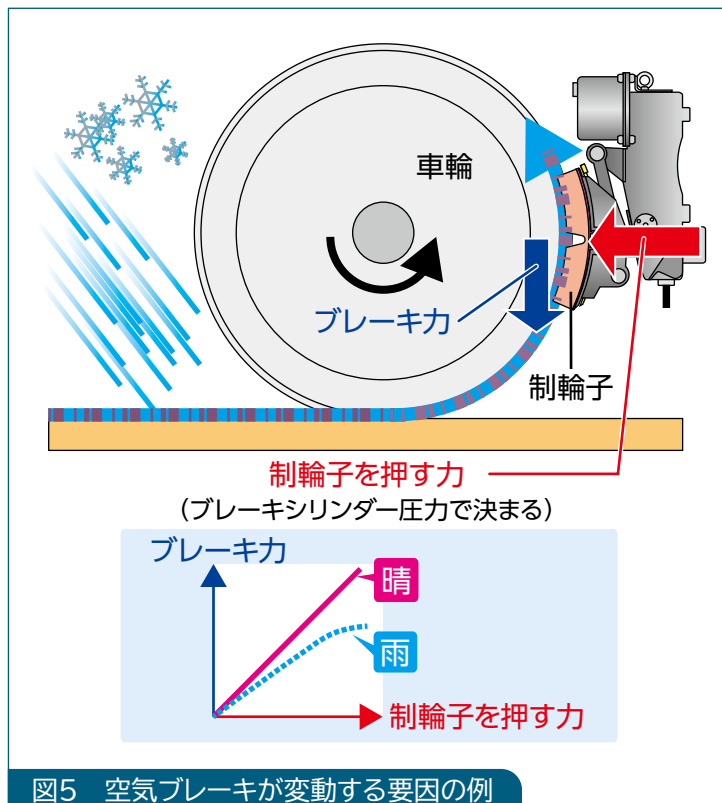
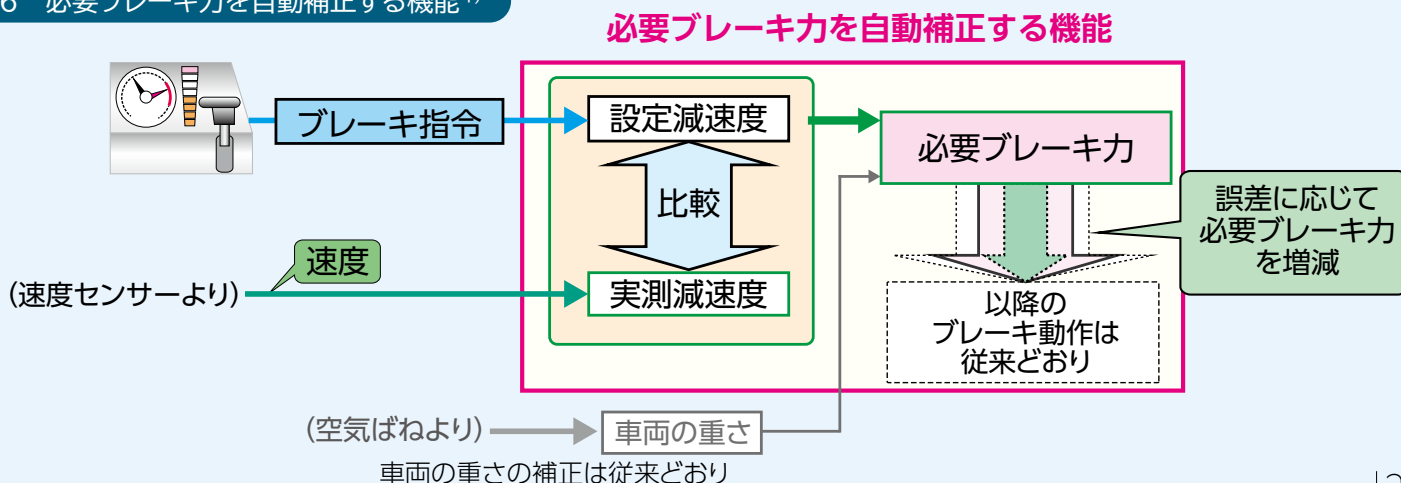


図5 空気ブレーキが変動する要因の例

停止位置精度を向上するブレーキシステム

そこで、停止位置精度を向上するために、車両に備わる速度センサーをブレーキシステムでも新たに利用して「必要ブレーキ力を自動補正する機能」と「設定減速度を自動計算する機能」の2つを追加します。まず、「必要ブレーキ力を自動補正する機能」では、速度の時間変化である減速度(以下、「実測減速度」とします)を設定減速度と比較して、「実測減速度<設定減速度のときには必要ブレーキ力を追加する」などのように補正します(図6)。これにより、線

図6 必要ブレーキ力を自動補正する機能⁴⁾



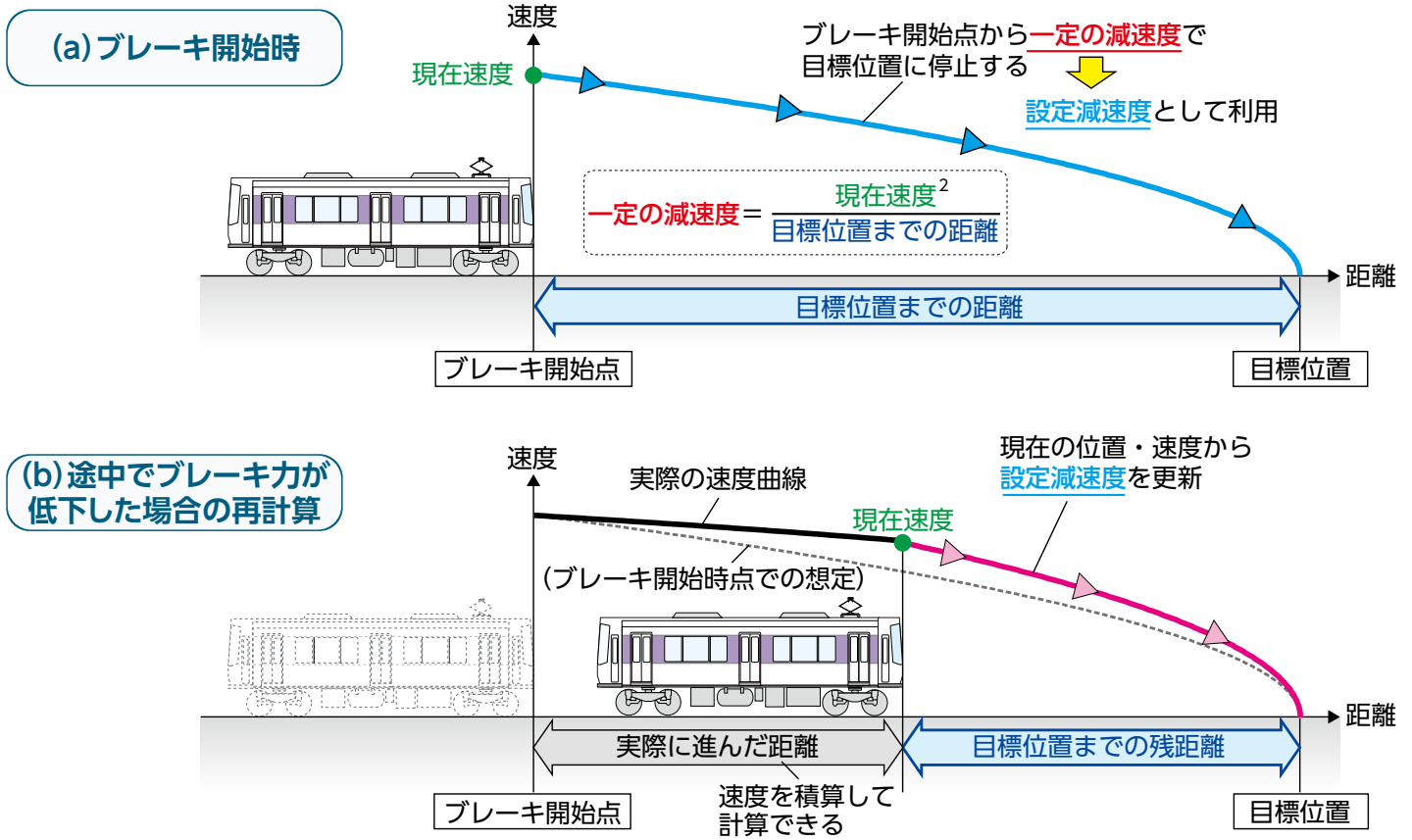


図7 停止位置精度を向上するための設定減速度の考え方

路の勾配などの影響があっても実測減速度を設定減速度に近づけることができます⁴⁾。

減速度は速度の時間変化である一方、速度を時間で積算していくと進んだ距離になるので、速度を介して減速度と距離とを結びつけることができます。そこで、停止位置精度を向上する（目標とする位置に停車する）ために追加する「設定減速度を自動計算する機能」では、「目標

位置までの距離」と「現在の速度」から計算できる減速度を、設定減速度として利用します。目標位置までの距離がわかっている定点でブレーキを開始するとその時点で設定減速度が計算できます（図7(a)）。その後も速度を積算すれば目標位置までの残距離がたねにわかるので、たとえば図7(b)のように途中でブレーキ力が低下しても、当初の目標位置に停止するための設定減

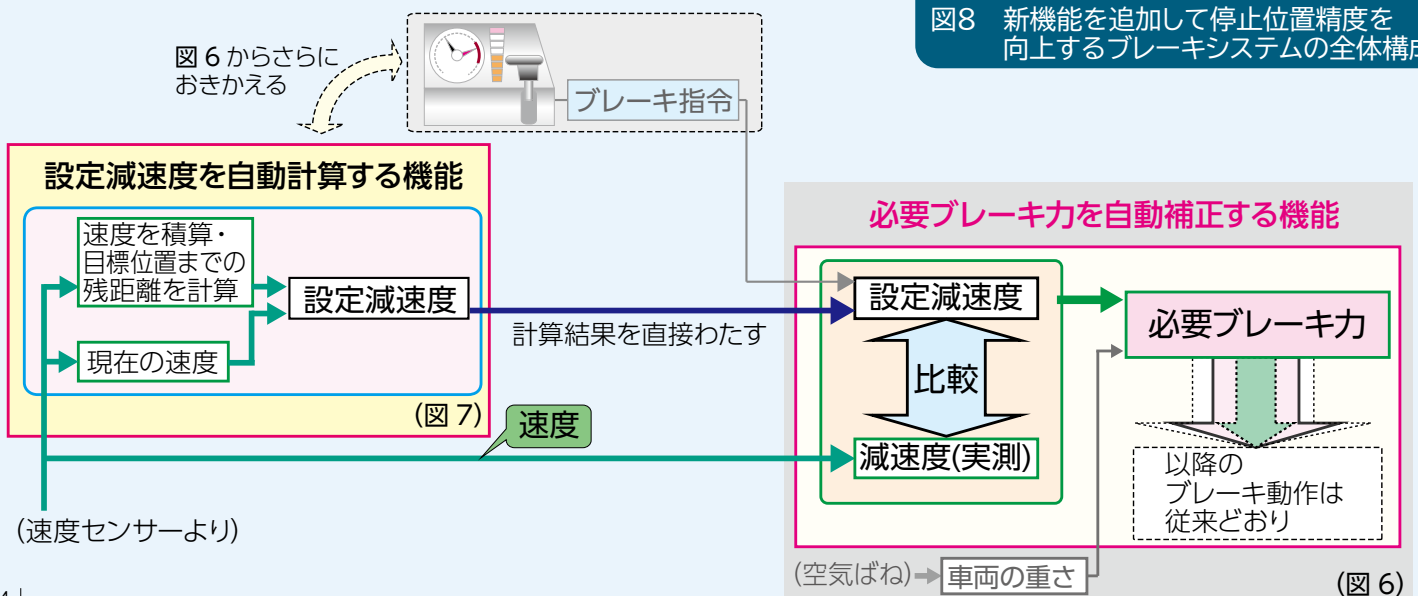


図8 新機能を追加して停止位置精度を向上するブレーキシステムの全体構成

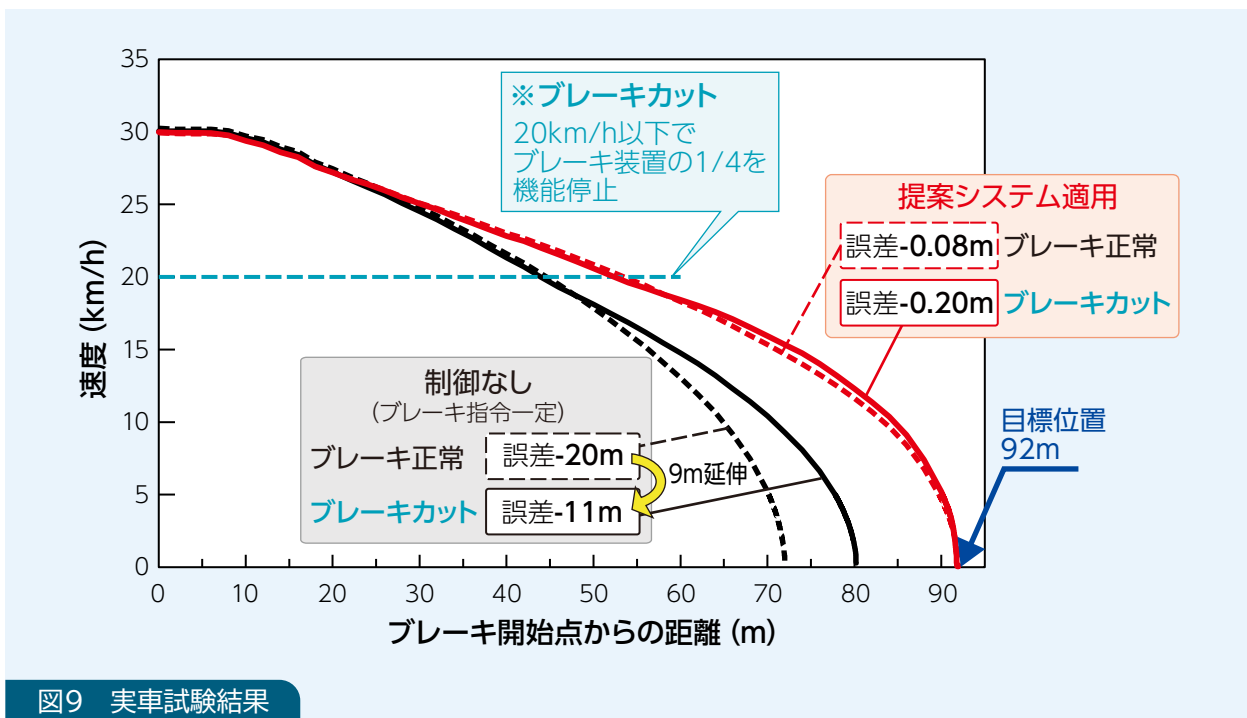


図9 実車試験結果

速度がつねに再計算されます。これら2つの機能を組み合わせて図8のような構成とすることで、停止位置精度の向上を図ります。

図9は、鉄道総研所内で実施した試験結果の一例です。試験に使用した車両で速度30km/hからブレーキ指令「2」を選んで一定に保持したとき、ブレーキが想定どおりに動作した場合の停止距離に相当する92mを目標位置として、停止位置精度を比較しました。

実際にブレーキ指令「2」を選んで一定としたとき(図9における制御なし・ブレーキ正常条件)、目標位置との誤差は-20mでした(一般的に、安全上の余裕を見込んで目標位置より手前で停止できるよう調整されます)。さらに、同じく制御なしでブレーキ力を強制的に低下させる「ブレーキカット」条件では目標位置との誤差が小さくなっていますが、これはブレーキ力の低下を補正しないために停止距離が延伸したことを意味しています。これに対して提案システムを適用した場合、ブレーキ正常で誤差-0.08m、ブレーキカット条件でも-0.20mとなり、ブレーキ力が低下しても停止距離が延伸することなく、停止位置精度を維持しました。

おわりに

ブレーキが、できる限り短い距離で停まれる性能に加えて、周囲の状況によって刻々と性能が変わるなかでもつねに操縦者の想定どおりに減速できれば、ホームドアのような新しい設備の効果と相乗して、鉄道をさらに安全・安定なシステムにできると考えます。

ここで紹介した手法はその一環として、ブレーキシステムが自身の状態を判断・補正してつねに指令に沿った性能を発揮し、それを積み重ねることで停止位置精度を向上することを目指しています。今後は、本手法に欠かせない車両速度の正確な取得方法など、周辺の要素技術も含めた検討を引き続き進めていきます。RRR

文献

- 1) 中澤伸一：減速度フィードバックの機能追加によるブレーキ距離精度の向上，鉄道総研報告，Vol.34，No.12，pp.11-16，2020
- 2) 国土交通省鉄道局：新型ホームドア導入検討の手引き～各種開発事例より～【第2版】，<https://www.mlit.go.jp/common/001229893.pdf> (入手日：2022年1月25日)
- 3) 大久保宙哉，安田明義：初級講座 TASCについて，鉄道車両工業，500号，2021.10
- 4) 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