

シミュレーションによる車両入換条件下における
制動距離の制御性の検証

木崎 裕太* 宮原 宏平** 中澤 伸一*

Simulation-based Verification of Braking Distance Controllability under Shunting Train Conditions

Yuta KIZAKI Kohei MIYAHARA Shin-ichi NAKAZAWA

In train shunting at railway facilities, it is difficult to control the stopping distance due to differences from main line operation regarding brake control elements. In this study, we create a simulation environment to reproduce expected shunting train conditions and conduct Train Automatic Stopping Control (TASC) simulations. We will also confirm the controllability of the stopping distance using a previous brake control method under shunting train conditions.

キーワード：ブレーキシステム、車両入換、自動空気ブレーキ、連結器力、定位置停止制御(TASC)

1. はじめに

近年の人口減少を背景に、より一層の業務の効率化・省力化の一環として鉄道分野においても自動運転の導入に向けた取り組みが急速に進んでいる¹⁾²⁾。これらの自動運転技術は、本線を走行する旅客列車を主な対象とし、ホームドアの設置などの施策とも関連して、安全性・定時性の確保のため車両を速やかに正確な位置に停車させる定位置停止制御（Train Automatic Stopping Control : TASC）が重要な役割を果たしている。この TASC が高性能な車両や高度な信号保安システムの利用を前提としている一方で、鉄道分野では車両基地などの専用施設構内での車両の小移動（以下、車両入換とする）が日常的に行われ、本線での営業運転とは異なる条件下で車両を走行させる状況が多数ある。車両入換は、低速のため車両を停止させやすい一方で、連結した車両の一部にのみブレーキが作用する、番数の小さい分岐器を通過するなどの条件が営業運転とは異なる。これらの条件下においては、停止位置精度に加え、列車座屈などのリスクを防ぐためにブレーキの強さや操作頻度などに制約が課される場合があり、ブレーキ操作の自動化において課題となる。

また、一般的な鉄道車両のブレーキシステムは開ループ制御³⁾であり、既存の TASC 手法では地上子などの信号設備からの情報に基づく速度曲線に追従するように車両のブレーキ力を調整して目標の位置に停止させる。これを車両入換に導入するには、多様な車両条件への対応や地上信号設備の新設などを必要とするため容易ではない。これに対し、同等の制御機能を車両側のみで完結させることができれば、地上子への依存を低減することで設備の追加を抑制し、TASC 導入コストの低減を通じた自動運転の広範な普及にも寄与が期待できる。よって、車両入換作業の省人化を実現するためには、既存車両にも適用可能な車上完結型のブレーキ制御系の開発が望まれる。

車上完結型のブレーキ制御手法として、「距離基準減速度制御」を TASC に適用した先行研究³⁾では、2両編成の旅客電車を用いた現車試験により有効性が示されているにとどまり、自動空気ブレーキ式車両や機関車けん引列車など、車両入換で想定されるブレーキシステムに対する有効性は検証されていない。また、ブレーキの応答特性や車両間の連結装置に発生する力（以下、連結器力とする）の相互作用によって発

* 車両技術研究部 ブレーキシステム研究室

** 車両技術研究部 車両運動研究室

生する編成車両の前後方向ダイナミクス（Longitudinal Train Dynamics : LTD）を考慮して、TASC の性能に与える影響を検討した例はほとんどない。

そこで本研究では、車両入換におけるブレーキ操作の自動化のためのブレーキ制御手法の検討、性能評価のために、車両入換で想定される車両条件・制約を再現可能なブレーキシミュレーション環境を構築する。そして、構築した環境において、ブレーキ指令方式やブレーキ軸数が異なる、車両入換で想定される3つの編成車両モデルを作成し、本線走行車両を想定した先行研究の既提案手法である距離基準減速度制御を適用した TASC シミュレーションを行う。さらに、シミュレーションにおいて、各編成車両モデルのブレーキ制御に関する複数のパラメータを変更した場合の停止距離の誤差の分布を確認することで、既提案手法による車両入換条件下の編成車両への適用可能性を確認する。

2. シミュレーションのためのモデル化

本章では、構築したブレーキシミュレーション環境を構成する各要素のモデル化について述べる。

2.1 連結器力モデル

連結器力モデルは、連結された車両の相対変位により連結装置に発生する圧縮・引張方向の変位を入力とし、連結装置前後の車両に作用する連結器力を出力として規定したものである。本研究では、編成内各車両のブレーキ動作により発生する連結器力が編成車両の運動と停止距離に与える影響や、ブレーキ操作方法によって生じる連結装置の座屈などのリスクを考慮可能とするために、実機の連結装置の構成要素である緩衝器の試験データを用いて連結器力モデルを作成した。作成したモデルでは、緩衝器 1 個によるバネ-ダンパ要素で接続された車両間に発生する連結器力を再現した。作成したモデルの変位入力に対する連結器力出力の特性を図 1 に示す。なお、連結器力の符号は入力変位が減少する（連結装置が圧縮される）場合を負の値として表示している。図 1(b)より、作成したモデルは、変位入力に対して連結器力出力にヒステリシスを示しており、緩衝器が持つゴム緩衝器実機の特性を反映している。

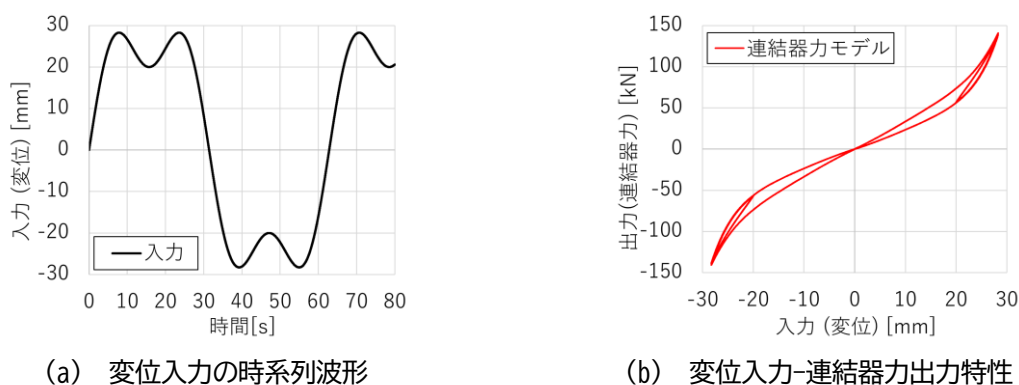


図 1 連結器力モデル

2.2 自動空気ブレーキモデル

空気指令式ブレーキの一種である自動空気ブレーキシステムについて、本研究では、ブレーキノッチを入力とし、編成内各車の基礎ブレーキ装置に供給するブレーキシリンダ（BC）圧を出力とするモデルとして規定し、編成内を引き通したブレーキ管（BP）内の圧縮空気によるブレーキ指令の伝達や、各車両に搭載される制御弁の応答特性と応荷重機能によって調整される最終的な BC 圧の生成を再現する。

図2に示す通り、作成した自動空気ブレーキモデルは3つのサブモデルで構成される。まず、ノッチーBP圧モデルでは、8段のブレーキノッチに対するBP圧の減圧量とその応答特性をむだ時間と1次遅れ系（ゲイン1，時定数1s）で規定し、むだ時間の設定を調整することでBPによるブレーキ指令の伝達の遅れを再現している。次に、BP圧ーBC圧モデルでは、BP圧の変化に応じて編成内各車両の制御弁が出力するBC圧の応答特性をむだ時間と1次遅れ系（ゲイン1，時定数1s）で規定している。本報では、ブレーキノッチ入力がない時の既定BP圧（490kPa）からの減圧量をBC圧出力とした。3つ目の応荷重機能モデルは、車両が積載率によらずブレーキノッチごとに設定された減速度を発揮するようブレーキ力を調整するために、荷重変化に応じて最終的なBC圧を生成する要素を模擬している。作成したモデルを用いて、機関車1両（Loco）と、積載率をそれぞれ0%，50%，100%とした貨車3両（FC01～03）の4両編成車両における自動空気ブレーキシステムを再現し、一定ノッチのブレーキ指令を与えたシミュレーション結果を図3に示す。図3内のグラフより、作成したモデルは、ノッチ入力に応じたBP圧の減圧・増圧と、ブレーキ指令の伝達の遅れ、制御弁の応答と応荷重機能による各車両の積載率に応じたBC圧の出力を再現している。

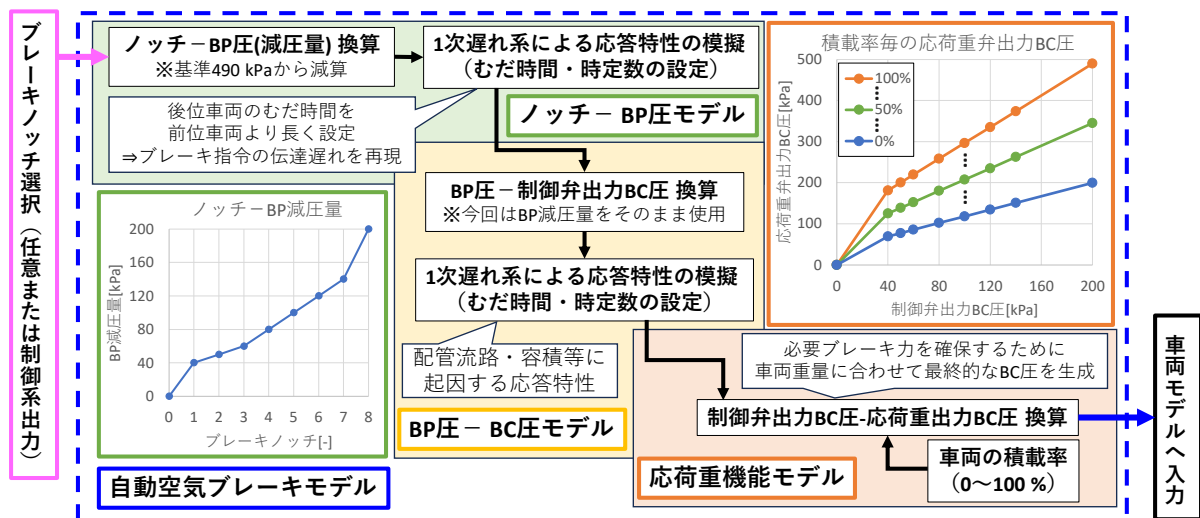


図2 自動空気ブレーキモデルの構成

自動空気ブレーキ：

編成に引き通した配管(BP)内の圧縮空気で指令を伝達するため、各車両のブレーキ動作に遅れがある ex. 貨物列車など

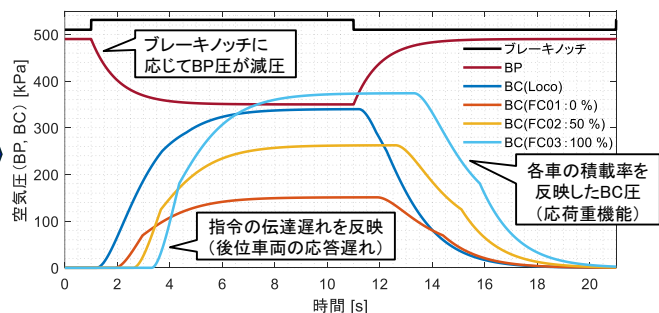
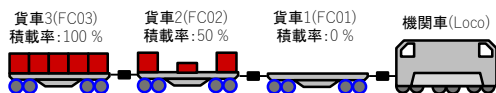


図3 自動空気ブレーキモデルのシミュレーション例

2.3 基礎ブレーキ装置およびブレーキ摩擦材のモデル

基礎ブレーキ装置およびブレーキ摩擦材モデルは、ブレーキシステムモデルが出力したBC圧を押付力に変換し、さらに押付力をブレーキ力に変換するモデルである。BC圧 P が基礎ブレーキ装置に入力された際に発生する押付力 F_p は式(1)で表される。ここで、 S はブレーキシリンダ面積、 τ はテコ比、 κ は機械効率であり、この押付力と摩擦材の摩擦係数 μ_f を用いてブレーキ力 F_b は式(2)で表される。図4にBC圧ーブレー

キ力変換の模式図を示す。一般的な摩擦材の特性の一つとして、速度が低下するにつれて摩擦係数が上昇する傾向が知られている。本研究では、低速でのブレーキシミュレーションにおける現車要素の再現として、文献4を参考に、摩擦係数 μ_f を式(3)および図5に示す車両速度 V_c の関数として定義した。

$$F_p = S \cdot \tau \cdot \kappa \cdot P \quad (1)$$

$$F_b = \mu_f \cdot F_p \quad (2)$$

$$\mu_f = \frac{1}{-0.0002V_c^2 + 0.0409V_c + 1.818} \quad (3)$$

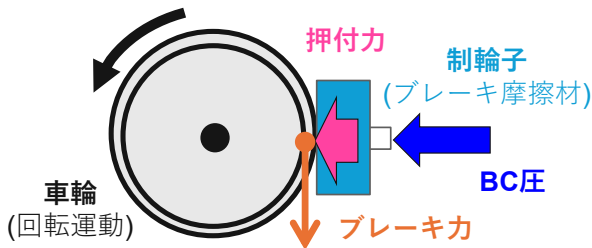


図4 BC圧-ブレーキ力変換の模式図

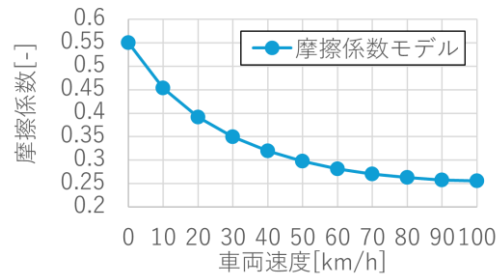


図5 摩擦材の摩擦係数モデル

2.4 一車両モデル

一車両モデルは、走行中の車両にブレーキ力を与え、車輪・レール間に接線力が発生することで、車両速度と車輪周速度が減速する運動を規定するモデルであり、平坦なレール上で車両前後方向の運動のみを考慮し、まくらぎ方向の運動は考慮しない。一車両4軸モデルの模式図と各記号の意味を図6に示す。減速運動に関わる数式を式(4)～式(6)で定義し、添字 i は軸位を表す。式(4)は車両の並進運動、式(5)は各輪軸の回転運動を表す。式(6)は接線力が接線力係数と各輪軸荷重の積であることを示す。接線力係数は、車輪・レール間のすべりやすさを規定する粘着条件のモデルとして考慮できるが、本報では滑走が生じないほど十分に余裕があるモデルとした。4軸が独立に運動し、4軸の接線力の合力で車両の並進運動が減速する。このとき、車両の端部に作用する連結器力として隣接車両から受ける力の授受を考慮した減速運動を表現する。後述する編成車両モデルでは、この一車両モデルで車両質量を可変として積載率を変化させた貨車のモデルと、車両質量を固定として軸数を6軸に拡張した機関車のモデルを用いる。

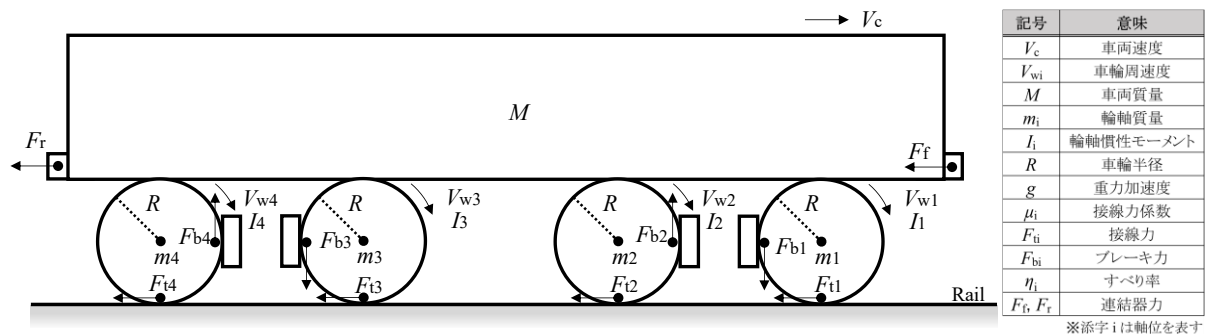


図6 一車両4軸モデル

$$(M + m_1 + m_2 + m_3 + m_4) \frac{dV_c}{dt} = -(F_{t1} + F_{t2} + F_{t3} + F_{t4}) - (F_f + F_r) \quad (4)$$

$$\frac{I_i}{R} \frac{dV_{wi}}{dt} = F_{ti}R - F_{bi}R \quad (5)$$

$$F_{ti} = \mu_i \left(\frac{M}{4} + m_i \right) g \quad (6)$$

3. シミュレーション環境

構築したシミュレーション環境および編成車両モデルの構成とそれによる計算結果について述べる。

3.1 シミュレーション環境の構成と編成車両モデル

構築したブレーキシミュレーション環境の構成を図7に示す。2.1～2.4 節で述べたモデルを統合して、機関車 1 両と貨車 10 両を連結した計 11 両の編成車両モデルを構築した。

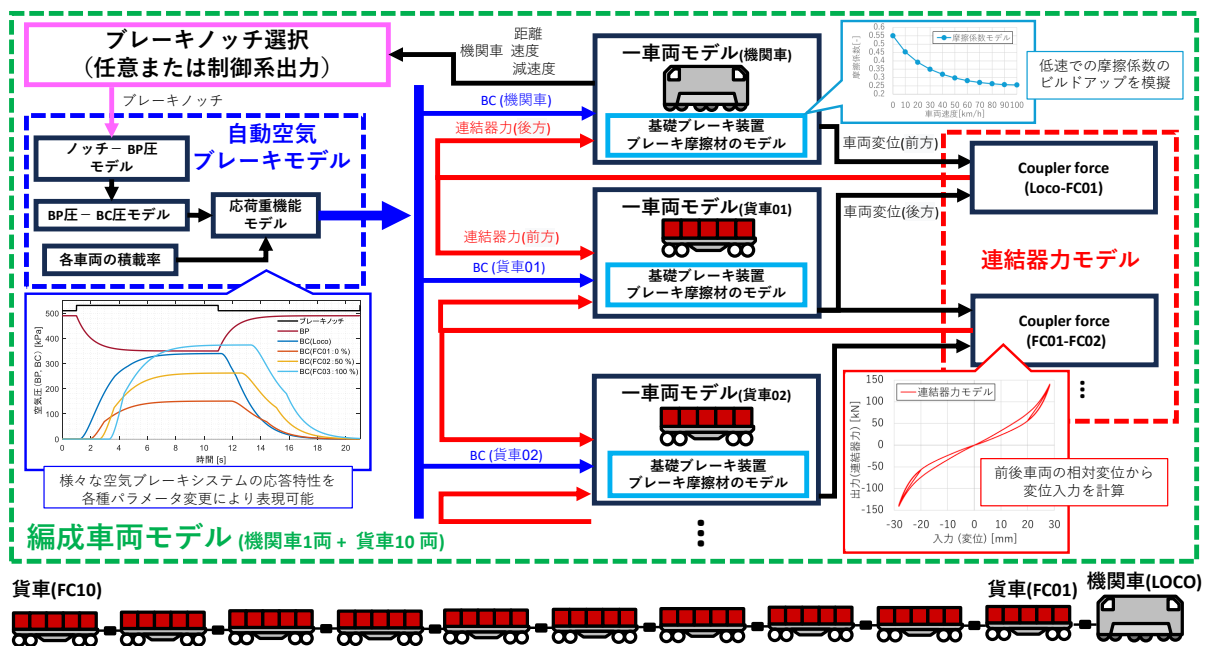


図7 シミュレーション環境の構成

機関車と貨車を模擬した2種類の一車両モデルの車両諸元を表1に示す。車両入換で想定される車両条件の再現として、2.2 節の自動空気ブレーキモデルのパラメータを調整し、異なるブレーキ指令方式とブレーキ軸数をもつ3つの編成車両モデルを作成した。各編成車両モデルのブレーキシステムの設定を表2に示す。EPBモデルは各車へのブレーキ指令の伝達に遅延がほぼない電気指令式の空気ブレーキ（EPB：Electro-Pneumatic control Brake）を想定した設定、AABモデルは自動空気ブレーキ（AAB：Automatic Air Brake）を想定した設定である。IBモデルは機関車けん引車両などの再現として、編成の先頭車のみ単独にブレーキ（IB：Independent Brake）が作用するように、AABモデルで機関車のみブレーキが作用する形で模擬する設定とした。

3.2 計算結果

構築したシミュレーション環境において各編成車両モデルの一定ブレーキノッチによるブレーキシミュレーションを行い、各ノッチに対するブレーキ距離、減速度を確認した。貨物列車で想定される編成内の各車両重量の違いがブレーキ性能に与える影響を確認するために、各貨車の積載率の条件として表3に示す6パターンを設定した。条件1,2では、各貨車に均等にそれぞれ100%、50%の積載率を設定した。条件3～6では、全貨車の平均積載率が50%としつつ、貨車ごとに異なる積載率を設定した。

表1 一車両モデルの車両諸元の設定

モデル	意味	数値	単位
共通	車輪半径	0.43	m
	重力加速度	9.8	m/s ²
機関車 (LOCO)	車両全体質量 (車両 + 全輪軸)	96000	kg
	輪軸慣性モーメント (6軸共通)	250	kgm ²
	BC圧力からブレーキ力への変換係数《式(1)および(2)》※	43.6	N/kPa
貨車 (FC)	空車 車両全体質量 (積載率: 0%)	18700	kg
	満車 (積載率: 100%)	59200	
	輪軸慣性モーメント (4軸共通)	160	kgm ²
	BC圧力からブレーキ力への変換係数《式(1)および(2)》※	35.9	N/kPa

※ 摩擦材の摩擦係数《式(3)》が0.3の時

表2 各編成車両モデルのブレーキシステムの設定

モデル	BPによるブレーキ指令伝達の むだ時間	BP-BC間のむだ時間	
		機関車	貨車
EPB	0 [s]	0.2 [s]	0.4 [s]
AAB	0.5 * (n-1) [s] ※		
IB	なし (機関車のみブレーキ)		

※ n: 列車進行方向前側からの両数

表3 6つの積載条件における各貨車の積載率の設定

積載条件	各貨車(FC)の積載率[%]										
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	平均
No.1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
No.2	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
No.3	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	50
No.4	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	50
No.5	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	50
No.6	95	85	75	65	55	45	35	25	15	5	50

各編成車両モデルにおいて1～8ノッチの一定ブレーキによるシミュレーションを、初速度(15,30km/h)、積載条件(1～6)を組み合わせた条件で行った。MATLAB/Simulinkを用いて環境構築し、シミュレーションの時間刻みは5msとした。各編成車両モデルのシミュレーション実施例を図8に示す。各図グラフは上段が各車両速度、中段が各車両内の輪軸に作用するブレーキ力の総和、下段が各車両間の連結器力のそれぞれ時系列波形であり、機関車と貨車の6両(連結器力は5箇所)の抜粋である。連結器力の符号は変位入力が増加する(連結装置が圧縮され、前後車両を押し返す力が作用する)場合を負、増加する(連結装置が伸長し、前後車両を引き寄せる力が作用する)場合を正とした。

図 8 では、ブレーキシステムの違いと、連結器力による車両ごとに異なる挙動の影響を反映し、編成車両モデルによって各車両のランカーブが異なる。また、ブレーキ摩擦材の摩擦係数の速度依存性を再現したことにより、減速するにしたがってブレーキノッチが一定でもブレーキ力が大きくなる。さらに、連結器力は、編成車両内のブレーキの応答特性やブレーキ軸数の違いを反映した定性的な傾向を再現している。

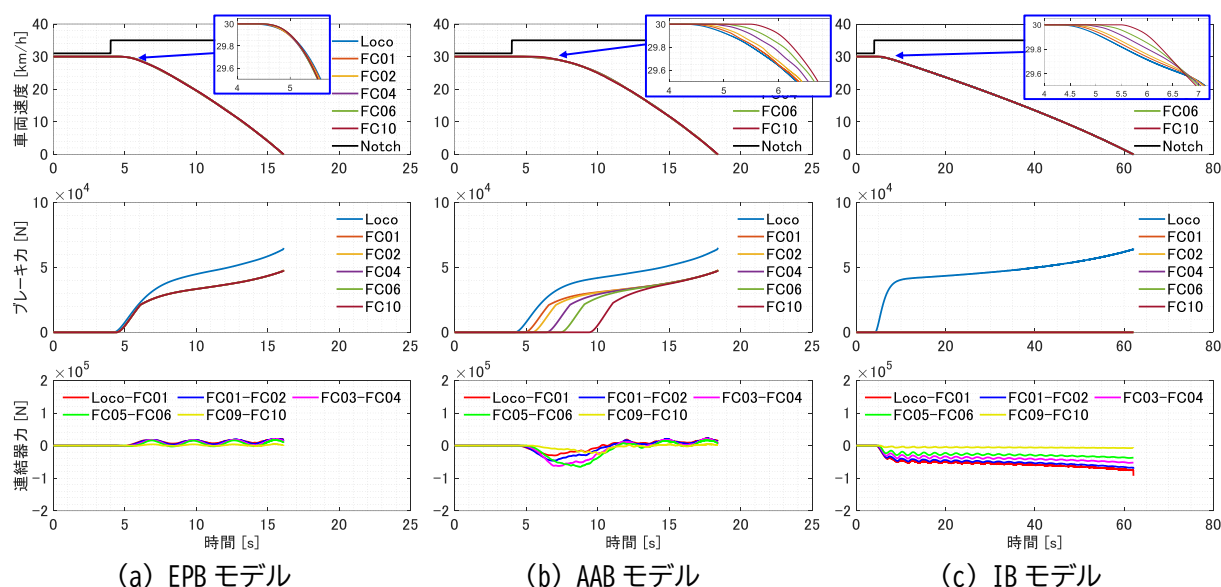


図 8 各編成車両モデルのシミュレーション実施例（積載条件 2，初速 30km/h，4 ノッチ）

ブレーキ 4 ノッチ条件のシミュレーション結果より、各編成車両モデルの各初速度，積載条件に対するブレーキ距離と減速度を図 9 に示す。減速度は、ブレーキ開始から停止までの空走を含む全ブレーキ距離と初速度を用いて算出した距離基準平均減速度である。図 9 より、EPB モデルでは積載条件によらず安定したブレーキ性能を発揮した一方、AAB モデルではブレーキの応答特性と積載条件に起因して同一ノッチであってもブレーキ性能が変動した。IB モデルでは初速度 15km/h と 30km/h における減速度がほぼ同等となった。これは、IB モデルは他の編成車両モデルに比べブレーキ距離および時間が長いいため、相対的に摩擦係数が小さい速度域にある時間が長くなるためである。また、IB モデルは他のモデルに比べてブレーキ軸数が少ないため、積載条件 1 では顕著にブレーキ性能が低下した。

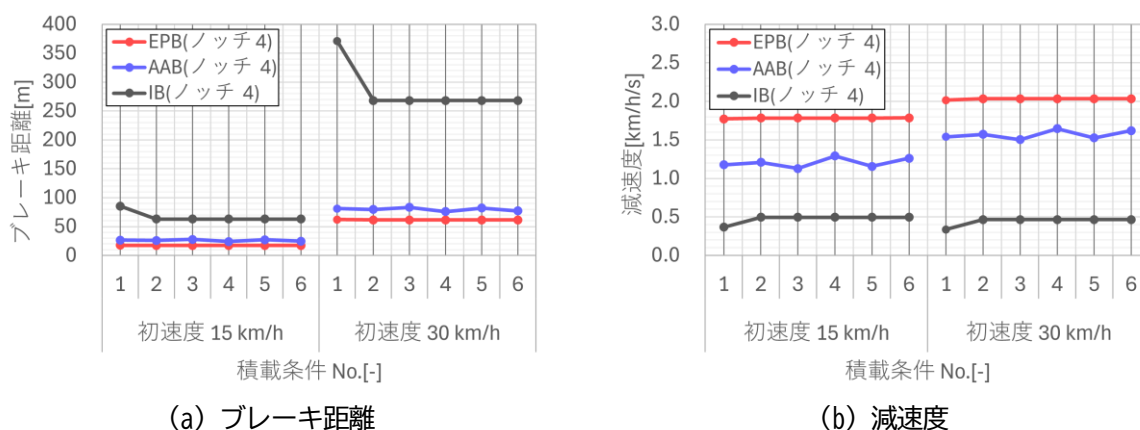


図 9 各編成車両モデルのブレーキ性能（4 ノッチ時）

4. 車両入換条件下での定位置停止制御シミュレーション

本章では構築したシミュレーション環境を用いた定位置停止制御（TASC）シミュレーションを行い，車両入換で想定される3つの編成車両モデルに対する既提案手法の適用可能性を確認する。

4.1 定位置停止制御系の設計

3章の各編成車両モデルに対して定位置停止制御系を設計した。制御手法には距離基準減速度制御³⁾を適用し，PI制御器とスミス補償器を用いて構成した。スミス補償器に必要な制御対象のモデルは，3.2節に示した各編成車両モデルの積載条件2～6（積載率の平均が50%となる5つの条件）における各ブレーキノッチの平均減速度の平均値を使用したノッチ入力ー減速度出力の関係と，ブレーキシステムのモデルと同じ時定数の1次遅れ系とむだ時間（本報では貨車のBP-BC圧間のむだ時間0.4sを適用）を組み合わせで表現した。TASCシミュレーションでは，編成車両モデルごとに参照するノッチ入力ー減速度出力の関係のみを変更し，その他の制御系の設定は共通とした。

距離基準減速度制御による停止位置の精度がブレーキノッチ段数によって変化する⁵⁾ことから，本報においても，既定で8段のノッチを指定した値で等分し，最大24段までノッチ段数を細分化する機能を設けた。また，自動空気ブレーキ式車両などでは，ノッチ入力に対するブレーキ力の応答特性を考慮して，編成車両の減速度が安定するまで一定時間ノッチを維持する運転操作を行う場合がある。本報ではこれを制御上の制約の一つとして模擬することとして制御器出力にゼロ次ホールドを挿入し，シミュレーション時間を基準にブレーキノッチ出力のサンプリング時間を変更することで，任意の時間ノッチを保持する機能を設けた。

4.2 シミュレーション条件の設定

図7のシミュレーション環境におけるブレーキノッチ選択ブロックの設定を4.1節で設計した制御系に置換してTASCシミュレーションを行った。本報で適用するTASCのためのブレーキノッチ選択ブロックの内部を図10に示す。目標停止距離は，図9に示した初速度30km/h，積載条件2～6における4ノッチのブレーキ距離に約10%を加えた，各編成車両モデルのブレーキ性能に余裕をもたせた値として，EPBモデルで70m，AABモデルで90m，IBモデルで300mとした。各編成車両モデルにおいて，初速度(15, 30km/h)，積載条件(1～6)，制御器のノッチ保持時間(1, 2, 4s)，制御器のノッチ段数(8, 16, 24段)を組み合わせた全108パターンのシミュレーションを行った。

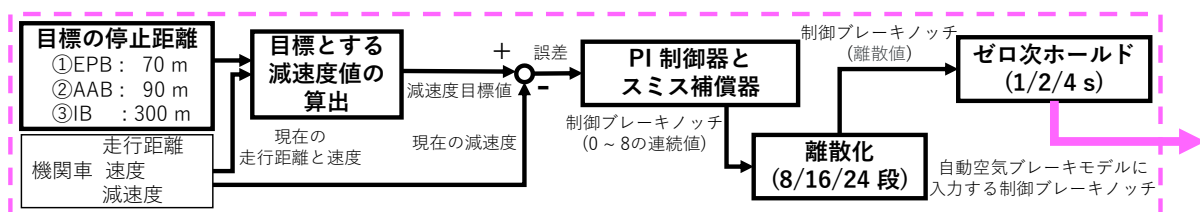


図10 定位置停止制御系のブロック線図

4.3 結果

各編成車両モデルのTASCシミュレーション結果の例を図11に，すべての結果による目標停止距離に対する誤差（停止距離誤差）の分布と各パラメータの関係を図12に示す。図12内の各グラフの横軸は，停

止距離誤差の分布（0.5m 刻み）で、最上段はヒストグラムである。負値の誤差は目標位置より手前で停車した場合を表す。誤差が-15m 以下となった結果はまとめてカウントし、5m を超えた結果は制御不良（×）としてカウントした。2～5 段目のグラフは各パラメータ（初速度、積載条件、ノッチ保持時間、ノッチ段数）と停止距離誤差との2変量ヒストグラムであり、頻度をカラーバーで表している。

図 12 の初速度と停止距離誤差との2変量ヒストグラムより、いずれの編成車両モデルにおいても、初速 30km/h に比べ 15 km/h の条件で制御性能が低下し、目標地点より手前に停止する傾向を示した。これは、本報では初速度 30km/h におけるブレーキ性能に基づき制御系を設計したことと、摩擦係数の速度依存性により同じノッチでも速度低下に伴いブレーキ力が大きくなることから、停止直前の低速域で適切なノッチ選択およびブレーキ力の調整ができなかったためと考えられる。

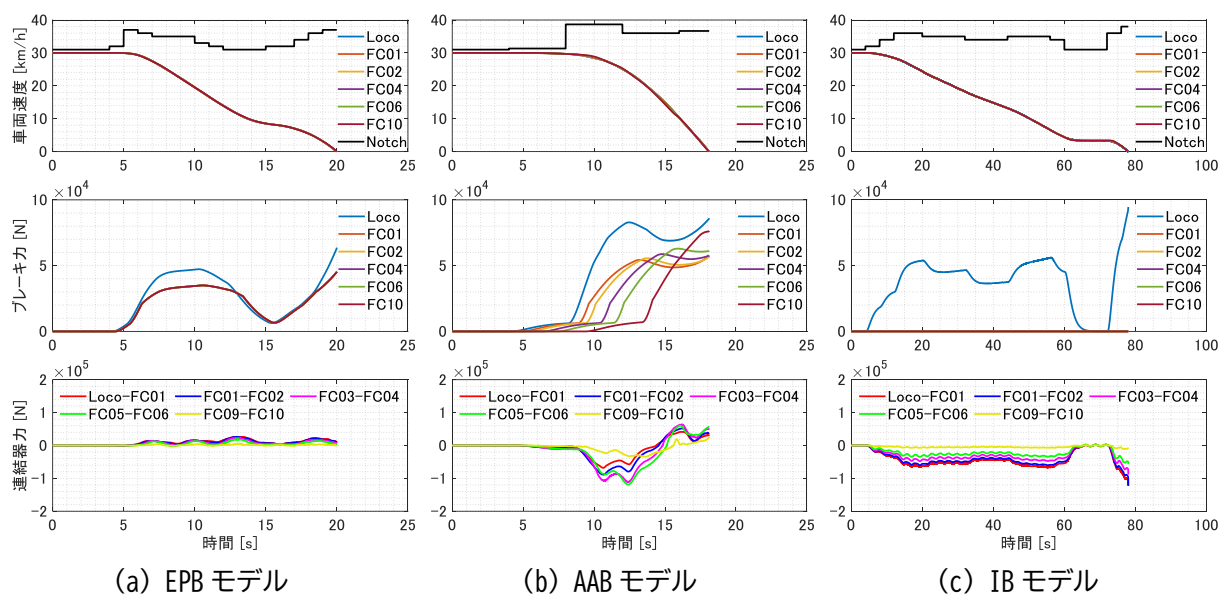


図 11 各編成車両モデルの定位置停止制御シミュレーション実施例

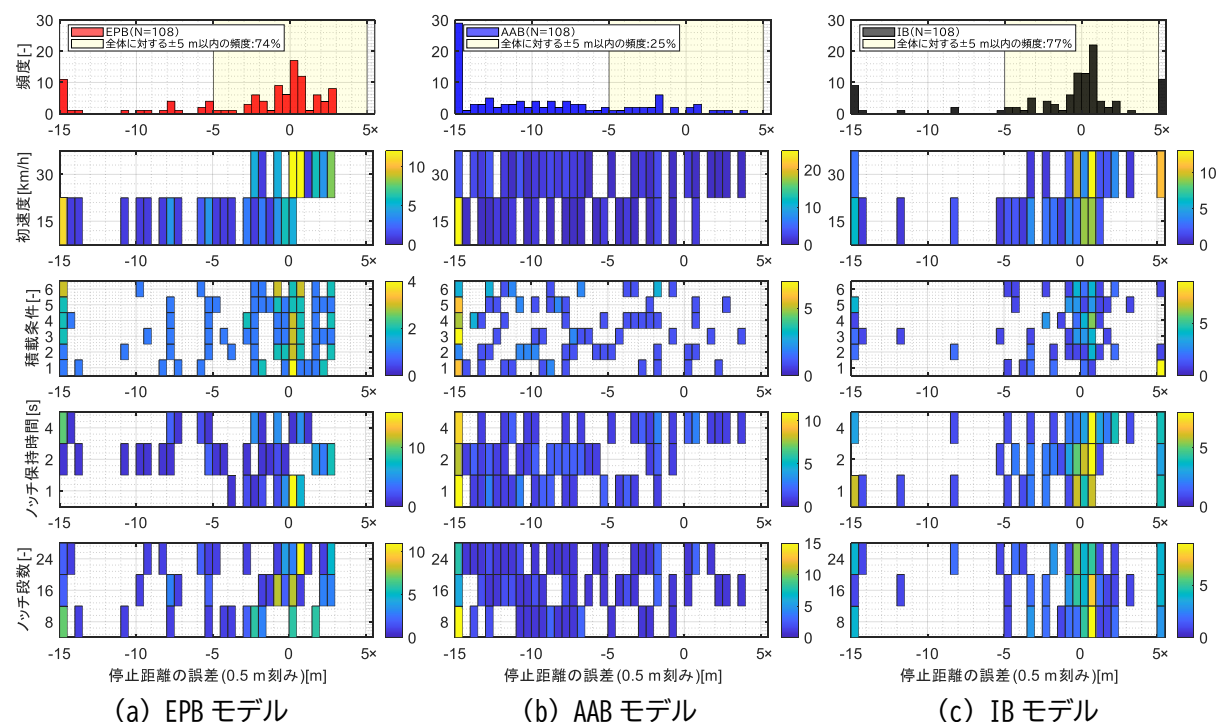


図 12 定位置停止制御シミュレーションにおける停止距離の誤差分布と各パラメータとの関係

編成車両モデルに着目すると、図 12(a)の EPB モデルでは、誤差の分布に対し積載条件の影響はほぼなかった。また、ノッチの保持時間が短く、段数が多いほど誤差分布が 0 に近づいており、ノッチ選択の自由度が停止距離の制御性能に影響する傾向が確認できた。一方、図 12(b)の AAB モデルでは、誤差-15 m 以下の分布が全体の 27%を占めたことから目標地点より手前に停止する傾向が強く、積載条件 1 と後位車両の積載率が相対的に高い積載条件 3, 5 でその頻度が高かった。また EPB モデルとは異なり、ノッチ保持時間が長いほど誤差分布が 0 に近づく傾向を示した。AAB モデルでは、ブレーキの応答特性と積載条件により、各車両が発揮するブレーキ力とその応答順序が異なることから、ノッチ操作および目標減速度に対する編成車両の減速度の追従性が変化する。本報の結果から、自動空気ブレーキ式車両に対する TASC の設計では、目標減速度に到達するまで選択したノッチを適切に維持する手法を構築することが、停止距離の精度向上に繋がると考えられる。図 12(c)の IB モデルでは、制御不良が全体の 10%を占め、積載条件 1 かつ初速度 30km/h の場合で特に頻度が高かった。また EPB モデルとは異なり、ノッチの保持時間や段数の違いによる可制御性への明瞭な影響は確認できなかった。本報の結果から、ブレーキ軸が少ない IB モデルの場合、編成車両に負荷できるブレーキ力が小さいため、調整可能な編成の減速度の量がノッチ段数に関わらず小さくなることから、ノッチ選択の自由度が制御性能に与える影響は相対的には少ないと考えられる。ただし、絶対的なブレーキ力が小さいため、ブレーキ開始直後からただちに適切なノッチを選択できなければ逸走する可能性が高まる。よって、機関車けん引車両に対する TASC の設計では、ブレーキ開始直後のブレーキノッチを高めに選択し目標地点前までに十分減速するなど、確実な停止機能の実装が重要と考えられる。

以上より、車両入換を想定した 3 つの編成車両モデルに対する TASC シミュレーションを行うことで、車両入換条件下における既提案手法の適用可能性を確認できた。

5. まとめ

本研究では、車両入換におけるブレーキ操作の自動化のためのブレーキ制御手法の検討、性能評価を行うために、車両入換で想定される車両条件・制約を再現可能なブレーキシミュレーション環境を構築した。構築した環境において、電気指令式空気ブレーキ車両を対象とした先行研究の既提案手法である距離基準減速度制御を、車両入換条件を模擬した編成車両モデルに適用し TASC シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、車両入換にて想定される自動空気ブレーキ式車両やブレーキ軸数の少ない機関車けん引車両では、既提案手法による停止距離の制御性の低下や逸走が確認され、停止距離精度向上にはブレーキシステムの特性に合わせた適切なノッチ選択が可能な制御系設計が必要であることがわかった。

今後は、構築したシミュレーション環境内の各要素モデルを精緻化するとともに、現車試験によるシミュレーション環境の精度検証も進めることで、車両入換を対象とした定位置停止制御手法の開発のための検討を進める。

なお本稿は、文献 6 の第 14 回世界鉄道研究会議の会議論文集の内容を編集して転載したものである。

文 献

- 1) JR 東日本：新幹線にドライバレス運転を導入します，JR 東日本 HP ニュースリリース，2024 年 9 月 10 日
- 2) JR 九州：2024 年 3 月 16 日より 2 つの「自動運転」を開始します！～香椎線 GOA2.5 自動運転開始，鹿児島本線 自動列車運転支援装置の実証運転開始～，JR 九州 HP ニュースリリース，2024 年 2 月 22 日
- 3) 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
- 4) 運転理論研究会：運転理論（再改訂版），日本鉄道運転協会，p.77，2010

- 5) Shin-ichi, N., “Effect of the number of control command steps in brake system with deceleration feedback loop structure on accuracy of train stop position”, 13th World Congress on Railway Research (WCRR 2022), Birmingham, UK, June 6-10, 2022.
- 6) Yuta, K., Kohei, M., Shin-ichi, N., “Simulation-based verification of braking distance controllability under shunting trains conditions”, 14th World Congress on Railway Research (WCRR 2025), Colorado Springs, USA, November 17-21, 2025.