

駅間停車抑制を目的とした 2 段階減速アルゴリズムの提案と検証

佐藤 駿一* 福田 卓海 高橋 聖 中村 英夫 (日本大学)

Proposal and Evaluation of a Two-Stage Deceleration Algorithm for Inter-Station Stop Suppression
Shunichi Sato*, Takumi Fukuda, Sei Takahashi, Hideo Nakamura (Nihon University)

Rail services in the Tokyo metropolitan area operate at very high frequencies to cope with severe crowding; however, such dense schedules are highly vulnerable to delay propagation, frequently resulting in unscheduled station-to-station stoppages when trains draw too close to their predecessors. These stoppages not only impose longer travel times on passengers but also create serious challenges for operators, including increased energy consumption and prolonged recovery of the timetable. Moreover, research specifically targeting the suppression of inter-station stoppages under conditions of chronic delay remains insufficient. In this study, we address these challenges by deriving optimal approach patterns toward preceding trains that can effectively suppress inter-station stoppages while simultaneously balancing the minimization of additional travel time and the enhancement of delay-recovery capability. We then rigorously evaluate the effectiveness of the proposed approach patterns under a variety of real-world operating conditions through detailed simulation. Through these efforts, we aim to contribute to improved operational stability and reduced energy consumption in urban railway services.

キーワード：都市鉄道, 移動閉塞, 無線式列車制御システム, 運転曲線, 列車制御
(urban railway, moving-block, wireless train control system, speed-time profile, train control)

1. はじめに

日本の首都圏は世界有数の人口密集地域であり、特に平日の朝の通勤・通学時間帯における鉄道において深刻な混雑が常態化している。国土交通省の調査によれば、2023 年度の東京圏主要路線の平均混雑率は 136%に達し、特に JR 京浜東北線の川口～赤羽間では 142%という高い混雑率が報告されている⁽¹⁾。この輸送需要に対応するため、鉄道事業者は輸送力増強を目的に、非常に短い列車間隔での高頻度運転を実施している⁽²⁾。例えば、朝ラッシュ時には 2～3 分間隔での運行が行われており、既存の施設容量を最大限に活用した運行体制が敷かれている。

しかし、高頻度運行は輸送効率を高める一方で、列車間の遅延を吸収する余裕がなくなるため、わずかな遅延が全体の運行に波及しやすいという課題を抱えている。実際、都市鉄道における列車遅延の発生と波及の要因について分析した研究では、稠密なダイヤ構成や運行形態の複雑化が慢性的な遅延の発生や広域的な波及を引き起こしていることが指摘されている⁽³⁾。

慢性的な遅延が発生している環境下では、先行列車が駅で長時間停車した場合に、後続列車が信号機の手前などで駅間に停車を余儀なくされる現象が多く発生する。駅間停

車は、旅行時間が増加することに伴う急病人の発生を誘発し、遅延を拡大させる要因となる。加えて、駅間での不要な停車とそれに続く加速は、走行に必要なエネルギー消費を増大させるため、エネルギー効率の観点からも回避すべき運転操作である。これらの理由により駅間の停車は極力減少させることが望ましい。

この問題の解決方法として、先行列車への接近速度を低下させることが考えられる。先行列車へ低速接近することで先行列車との間に十分な距離を確保することができ、駅間停車を回避することができる。しかし、この方法では速度が十分に出せないことで駅間の旅行時間が増加する。また、低速運転した列車の後続列車では、先行列車との距離が狭まることによって遅延の回復能力が損なわれ、遅延がさらに後続列車に伝播することが考えられる。

そこで、理想環境下での列車走行をモデル化し、旅行時間の増加や遅延の回復能力を考慮した駅間停車を抑制する先行列車への接近パターン算出方法を提案する。その後、実際の首都圏の路線を模倣したシミュレーションを通じてその有効性を検証する。本稿の構成は、第二章で研究背景と関連研究を整理し、第三章で分析の基礎となる数理モデルを定義する。続く第四章で提案手法を詳述し、第五章でシミュレーションによる評価を行いその有効性を定量的に示した

後、最後に本研究の結論と今後の課題を述べる。

2. 研究背景と関連研究

〈2・1〉 研究背景 首都圏における鉄道輸送は、極めて高い輸送需要に応えるべく、多くの路線で高頻度運行が実施されている。輸送力の確保はサービス品質に直結する重要な課題であり、これに対応するため主要路線では列車間の安全距離を動的に確保可能である Communication Based Train Control (以下、CBTC) システムや Advanced Train Administration and Communications System (以下、ATACS) に代表される移動閉塞システムの導入が進められている⁽⁴⁾。

移動閉塞システムは、列車が自らの位置および速度をリアルタイムで把握し、地上設備あるいは他列車との連続的な無線通信を通じて、先行列車との安全距離を動的に計算・維持する機構である⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これにより、従来の固定閉塞区間の制約から解放され、列車性能に応じた最小限の安全間隔での走行が可能となる。その結果、列車間隔の短縮を通じて輸送力を向上させるだけでなく、リアルタイムな位置・速度情報を活用した高度な制御戦略の開発も期待されている。

しかし、こうした高頻度運行の環境下では、わずかな遅延が後続列車に波及しやすく、駅間における不要な停車（駅間停車）が頻発するという課題が依然として残っている⁽⁷⁾。これまでの多くの研究は、発生した遅延をいかに速やかに回復するか（遅延回復能力）に焦点を当てており、列車どうしの速度調整や運行ダイヤの再構成といった手法が数多く提案されてきた。しかし、移動閉塞を導入した場合には、固定閉塞と比較して列車間の動的な安全間隔の最小化による余裕が増すため、遅延回復そのものに割り当てられる余地が大きくなる。

その結果、単に遅延を回復するだけでなく、走行パターンの安定性を維持しつつ、高頻度運行下でも一定の運行間隔やエネルギー効率を両立させる視点が重要になる。本研究では、この観点に着目し、移動閉塞環境下での列車走行パターンを設計・評価することで、駅間停車抑制と遅延回復能力の最適なバランスを目指す。これにより、リアルタイムな制御情報を最大限に活用しつつ、高頻度運行の信頼性向上を図ることを目的とする。

〈2・2〉 関連研究 移動閉塞方式の導入により、従来の固定閉塞方式と比べて列車間隔の短縮により早急な遅延回復が可能といった利点が得られる。実際、CBTCやATACSに代表される無線式列車制御システムは高頻度運行を可能にする一方で、ダイヤの余裕時分が少ない路線ではわずかな乱れが大きな遅延に波及しうる。特に、前方列車の遅れにより後続列車が駅間で停車する現象は、都市鉄道の安定運行における重要な課題である。この課題に対する先行研究として、仮屋崎らは東京圏の列車運行を対象に高密度ダイヤ下での遅延波及メカニズムをシミュレーション分析している⁽⁸⁾。そのモデルでは各駅での乗降による停車時間延長や列車相互作用を再現し、小さな乱れが後続列車に伝播して

遅延が拡大する状況を再現した。その上で、遅延が発生した場合には列車間隔を適度に確保するよう出発時刻を調整することで、いわゆるノックオン遅延の回復に効果があることを示している。しかし、この手法はダイヤの調整による対応であり、移動閉塞システムの特性を活用したリアルタイム制御には踏み込んでいない。

移動閉塞下での走行パターンについての分野では、次駅に最も早く到着し、かつ駅間での停車を避けるように動的に運転曲線を変更する研究がなされている⁽⁹⁾。この研究では、列車遅延時に駅間での停車の機会を削減できるとともに、変電所の消費電力を数%程度削減できる可能性を確認している。類似の研究として、通信に基づく連続リアルタイム列車位置取得を前提とした移動閉塞システムを利用し、列車間のインターバルを最適化することで遅延の伝播を抑制する手法が提案されている⁽¹⁰⁾。この研究では、後続列車の速度を動的に調整することで、全体の運行効率を向上させることを目指している。

以上のように、高頻度運転時や移動閉塞環境で遅延を削減させ、運行効率を向上させる研究が様々なアプローチで行われている。しかし、従来の研究はいずれも遅延回復に焦点を当てているが、駅間での停車に注目した研究はまだ十分ではない。本稿で提案する接近パターンは、既存の研究がカバーしていない駅間停車を考慮した駅間区間での運行効率化を実現し、都市部の高頻度運行における課題解決を図る。

3. 数理モデル化

本研究では、先行列車の発車遅延に起因して後続列車が駅間で停車してしまう事象を抑制するため、理想環境下における列車走行を数理モデルとして定式化し、最適な接近パターンを設計する。以下、モデルの前提と各種運動方程式を示す。

まず、問題を単純化するために同じ路線上进行する2列車を考える。このとき、先を走行している列車を列車1とし、後続の列車を列車2とする。列車1は初期時点で駅に停車しており、ここから出発する。列車2は列車1の後ろを走行しており、列車1が駅から出発し次第、同駅に停車する。

各列車の運動は運動方程式に基づき、列車に働く制御力 $F(t)$ により加速度が決定される。勾配抵抗や空気抵抗を無視した理想化モデルの下では、制御入力としての加速度 $a(t)$ が直接速度変化を生じさせ、位置 $x(t)$ と速度 $v(t)$ の変化は以下の状態方程式で表される：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \\ \dot{v}(t) = a(t) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、速度および加速度には次の物理制約が課される。

$$0 \leq v(t) \leq v_{\max} \quad \text{かつ} \quad -a_{\text{brake},\max} \leq a(t) \leq a_{\max} \quad (2)$$

〈3・1〉 列車1（先行列車）の運動モデル 列車1は駅停止位置を座標 $x = 0$ とし、発車時刻を基準発車時刻 t_{dep} に発生遅延 z ($0 \leq z \leq Z_{\max}$)を加えた時刻 $t_{\text{dep}} + z$ とする。運動は以下の三相に分けてモデル化する。

(1) 待機フェーズ ($t < t_{\text{dep}} + z$)

待機フェーズでは出発時刻になるまで、駅に停車する。運動方程式は、

$$\begin{cases} x_1(t; z) = 0 \\ v_1(t; z) = 0 \\ a_1(t; z) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

となる。

(2) 加速フェーズ ($t_{\text{dep}} + z \leq t < t_{\text{acc, end}}(z)$)

加速フェーズでは駅を出発後、最高速度まで加速する。運動方程式は

$$\begin{cases} v_1(t; z) = a_{\text{max}} (t - (t_{\text{dep}} + z)) \\ x_1(t; z) = \frac{1}{2} a_{\text{max}} (t - (t_{\text{dep}} + z))^2 \\ a_1(t; z) = a_{\text{max}} \end{cases} \quad (4)$$

となり、フェーズの終了条件は、

$$t_{\text{acc, end}}(z) = t_{\text{dep}} + z + \frac{v_{\text{max}}}{a_{\text{max}}} \quad (5)$$

$$x_{\text{acc, end}} = \frac{v_{\text{max}}^2}{2 a_{\text{max}}} \quad (6)$$

となる。

(3) 巡航フェーズ ($t \geq t_{\text{acc, end}}(z)$)

巡航フェーズでは、最高速度で巡航する。このとき運動方程式は、

$$\begin{cases} v_1(t; z) = v_{\text{max}} \\ x_1(t; z) = x_{\text{acc, end}} + v_{\text{max}} (t - t_{\text{acc, end}}(z)) \\ a_1(t; z) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

となる。

また、列車1の後端の位置 $x'_1(t; z)$ は、車体長 L_{train} を考慮

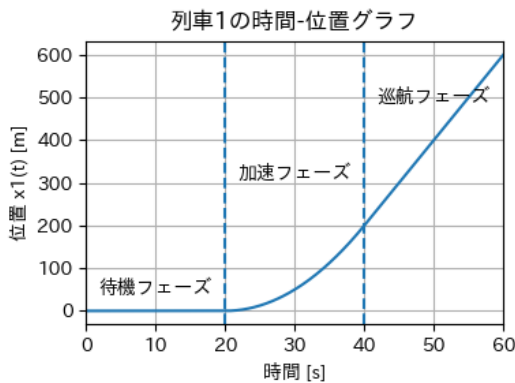


図1 列車1の走行パターン例

Fig. 1. Example of Train 1's running pattern.

して

$$x'_1(t; z) = x_1(t; z) - L_{\text{train}} \quad (8)$$

と定義する。列車1の走行例の時間-位置図を図1に示す。

〈3・2〉 列車2 (後続列車) の運動モデル 列車2は初期時刻 $t = 0$ において位置 $x_2(0) = -D_{1,2, \text{init}}$ 、速度 $v_2(0) = v_{2, \text{init}}$ から出発し、先述の一般的運動方程式

$$\begin{cases} x'_2(t) = v_2(t) \\ v'_2(t) = a_2(t) \end{cases} \quad (9)$$

を常に満たす。加えて、速度制約および加速度制約

$$\begin{cases} 0 \leq v_2(t) \leq v_{\text{max}} \\ -a_{\text{brake, max}} \leq a_2(t) \leq a_{\text{max}} \end{cases} \quad (10)$$

を守るものとする。制動距離 $d_2(t)$ は制動可能最大加速度 $a_{\text{brake, max}}$ を用いて次式で表される：

$$d_2(t) = \frac{v_2(t)^2}{2 a_{\text{brake, max}}} \quad (11)$$

〈3・3〉 安全距離制約 列車2が常に列車1の後端から十分な距離を保つために、安全余裕長 L_{safe} を加味し、任意時刻 t で以下の安全条件を課す：

$$x'_1(t; z) \geq x_2(t) + d_2(t) + L_{\text{safe}} \quad (\forall t \geq 0) \quad (12)$$

以上のモデル化に基づき、発車遅延 z の不確実性を考慮しつつ、後続列車が駅間停車を回避しつつ次駅に到達するための最適な接近パターンを設計する問題を定式化する。

4. 2段階減速による制御手法

列車2の最適な加速度制御パターンを設計する方法として、列車制御を単純化するため2段階停車を採用する。これは減速を2段階に分けて行い、1段階目のブレーキと2段階目のブレーキの間は等速運転する制御である。このとき、1段階目のブレーキで駅への侵入速度を調節しつつ、2段階目のブレーキでは駅に完全に停車する。

もし列車1の出発時間が予測可能であると仮定すれば、列車2の最適な駅への進入速度を解析的に導き出すことは可能である⁽¹¹⁾。これによって、適切な1段階目の減速の加速度が決定可能である。しかし、現実には先行列車の出発時間を高精度で予測することは困難である。そこで、列車2の最適な駅への進入速度を逐次的に求め、この進入速度をとれるように1段階目のブレーキの加速度を設計することを考える。1段階目のブレーキの終了条件を列車1の出発とすることで、駅に進入可能になった時点で適切な進入速度をもって駅に進入することで先行列車との間隔を広げず停車が可能である。

〈4・1〉 最適駅進入速度の決定 列車2の駅進入速度 v_{ap} の最適値を決定するため、列車1と列車2の位置関係を考慮した幾何学的制約を導出する。列車1の後端位置 $x'_1(t; z)$ と列車2の制動距離を含む位置 $s_2(t) = x_2(t) + d_2(t)$ が常に安全距離制約を満たすためには、両列車の軌跡が交差しない条件が必要である。列車2の駅進入時における位置関係を考慮すると、列車2が駅に到達する時刻 t_{sd} において、列車1との距離を十分に確保する必要がある。このとき、列車2の駅進入前の等速運転区間での位置 $s_2(t)$ は以下で表される。

$$s_2(t) = \begin{cases} v_{\text{ap}} - d'2 & (t \leq t_{\text{sd}}) \\ 0 & (t > t_{\text{sd}}) \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 $d'2$ は列車2の初期先頭位置から駅までの距離であり、駅進入速度 v_{ap} と列車パラメータの関係から次式で定義される。

$$d'2 = \frac{v_{ap}^2 + 2a_{max}L_{train}}{2a_{max}} \dots\dots\dots (14)$$

この関係式は、列車 2 が最大加速度 a_{max} で加速した場合に到達する距離と、駅進入速度 v_{ap} から完全停止するまでに必要な距離を考慮したものである。

列車 2 の制動パターンを最適化するため、駅進入速度 v_{ap} から完全停止までの軌跡を位置と速度の関係として表現する。1 段階目の制動における位置 x と速度 v の関係は、エネルギー保存則を適用することで以下のように導出される。

$$x(v) = -\left(\frac{v_{ap}^2 + 2a_{max}L_{train}}{2a_{max}} + \frac{v_{ap}^2}{2a_{brake,max}}\right) \dots\dots\dots (15)$$

この式を速度 v について解くと、位置 x における最適速度は次のようになる。

$$v(x) = \sqrt{\frac{2a_{max}a_{brake,max}(x+L_{train})}{a_{max}+a_{brake,max}}} \dots\dots\dots (16)$$

実際の列車制御では、列車 2 は 2 段階減速を実施し、1 段階目のブレーキを最適速度 $v(x)$ に従った速度となるように

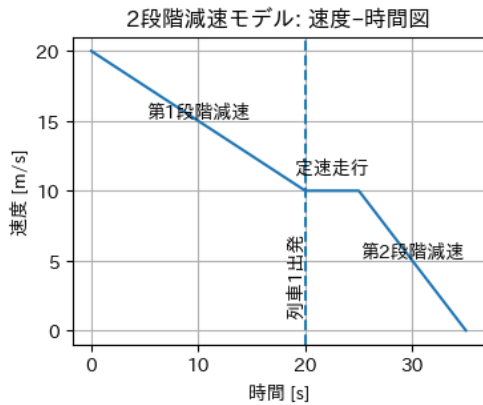


図 2 列車 2 の走行パターン例

Fig. 2. Example of Train 2's running pattern.

設計する。列車 1 が出発した時点で等速運転に切り替え走行し、駅に完全に停車できる位置から加速度 $a_{brake,max}$ で 2 段階目のブレーキを行う。

〈4・2〉 事前減速 前節で提案した 2 段階減速による制御手法は、列車 1 の発車遅延 z に応じて列車 2 の最適駅進入速度 v_{ap} を決定することで、駅間停車を回避するものである。しかし、高頻度運行時など先行列車の発車が比較早い場合、すなわち発車遅延 z が小さい状況下では、安全距離制約を遵守するために列車 2 は早期から減速を開始せざるを得ず、結果として最適駅進入速度 v_{ap} が極端に低くなる可能性がある。これは駅間旅行時間の大幅な増大を招き、後続列車への遅延波及の新たな要因となりかねない。また、 v_{ap} が極端に低下した後に、先行列車の発車に伴い再加速を行うような運転パターンは、エネルギー効率の観点からも望ましくない。

この問題を抑制するため、本稿では新たに事前減速という考え方を導入する。このアプローチの根拠は、列車が駅に

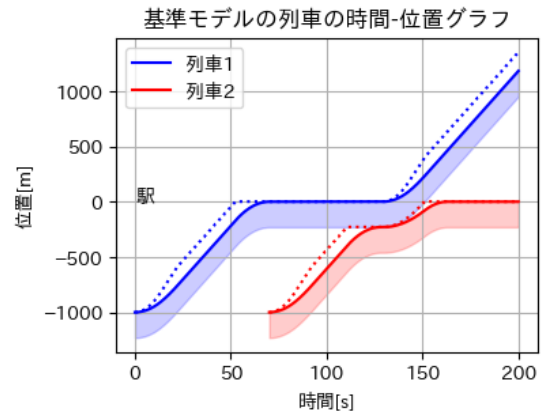


図 3 基準モデルの走行例

Fig. 3. Example runs of the base model.

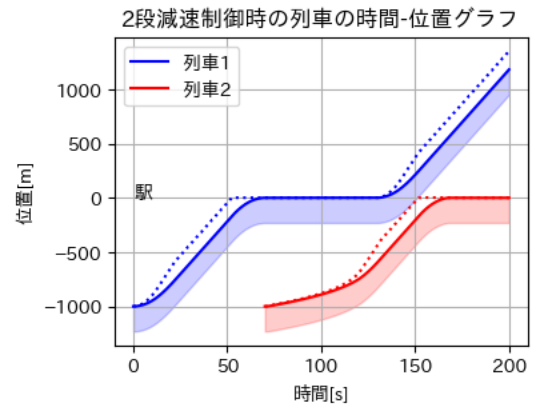


図 4 提案モデルの走行例

Fig. 4. Example runs of the proposed model.

到着した後、乗降のために必ず規定の最小停車時間が確保されるという運用上の事実に着目する点にある。つまり、次駅への到着時刻に多少の余裕が許容されることを前提とし、駅間での走行パターンをより効率的に制御することを目指す。

具体的な制御方法として、まず列車 2 は、先行する列車 1 が次駅に到着し停車したことを移動閉塞システムの通信により確認した時点で、一時的に速度を落とす事前減速を開始する。その後、一定速度で走行し、先行列車が駅を発車するまでの時間調整を行う。そして、本来の 2 段階減速を開始すべき地点に、最大速度 v_{max} で到達できるようにタイミングを計って再加速する。これにより、 v_{ap} のような中間速度で駅に進入するのではなく、常に v_{max} から最適化された 2 段階減速へと移行することが可能となる。

5. シミュレーションによる評価

〈5・1〉 シミュレーションモデル 提案したアルゴリズムの評価を行うために、数値計算をもとにしたシミュレーションを実施した。想定した環境は、東京首都圏を走行する路線の朝ラッシュ時の慢性的な遅延が発生している状況で

ある。走行距離は約 24[km] であり、実際の運行ダイヤに基づいて列車 40 本を走行させた。駅間の列車走行は、信号システムからの指示速度をもとに車両の性能特性とカーブや勾配等の線路形状を考慮して数値計算を行った。駅での停車時間は、実際の列車運行情報の遅延時間を使用し算出した。比較基準として、後続列車が安全制約の範囲内で先行列車に可能な限り接近する特別な速度調整を行わない制御手法（基準モデル）と本稿で提案する 2 段階減速（提案モデル）を評価した。基準モデルの走行例を図 3 に提案モデルの走行例を図 4 に示す。

＜5・2＞ 列車走行軌跡の比較分析 シミュレーションによって得られた列車群全体の走行パターンを図 5 に、特定の駅周辺における詳細な走行パターンを図 6 に示す。両図において、基準モデルの走行軌跡を青線、提案モデルの走行軌跡を赤線で示している。

図 5 の全体走行パターンに注目すると、提案モデルは基準モデルの軌跡から大きく逸脱することなく、ほぼ追従して走行していることが確認できる。これは、提案モデルが特定の列車の大幅な遅延を発生させることなく、計画されたダイヤグラムに沿った運行を維持する能力を有していることを示唆する。すなわち、予期せぬ遅延が発生した場合においても、基準モデルと同程度の遅延回復能力を保持しており、運行計画全体の安定性を損なうものではないと考えられる。

次に、先行列車に遅延が発生している駅周辺の挙動を詳細に分析するため、図 6 の拡大図に注目する。基準モデルでは、先行列車が駅に在線していることにより、後続列車が駅手前で完全に停止する駅間停車が発生している様子が観測される。一方、提案モデルでは、先行列車の遅延情報を活用し、より手前の段階から計画的に速度を調整している。その結果、後続列車は完全に停止することなく、低速を維持しながら走行を続け、先行列車の出発後にスムーズに加速して駅に進入できている。この挙動の違いは、提案モデルが駅間での不要な停止を効果的に回避していることを示している。

＜5・3＞ 定量的評価 続いて、シミュレーションから得られた定量的データを基に、両モデルの性能を比較評価する。評価指標は、運行の安定性を示す総駅間停車時間と、エネルギー消費を示す総消費エネルギーである。

表 1 は、シミュレーション区間における全列車の総駅間停車時間を集計したものである。この結果から、提案モデルは基準モデルと比較して、総駅間停車時間を約 72%削減することに成功した。これは、前節で述べた計画的な速度制御が、後続列車が駅間で完全に停止してしまう状況を効果的に回避したことを定量的に裏付けるものである。駅間停車の削減は、乗り心地の向上だけでなく、定時運行の阻害要因を取り除くことにも繋がり、運行の安定性および信頼性向上に大きく寄与する。

次に、エネルギー効率の観点から評価を行う。表 2 に、全列車の総消費エネルギーを示す。提案モデルの消費エネ

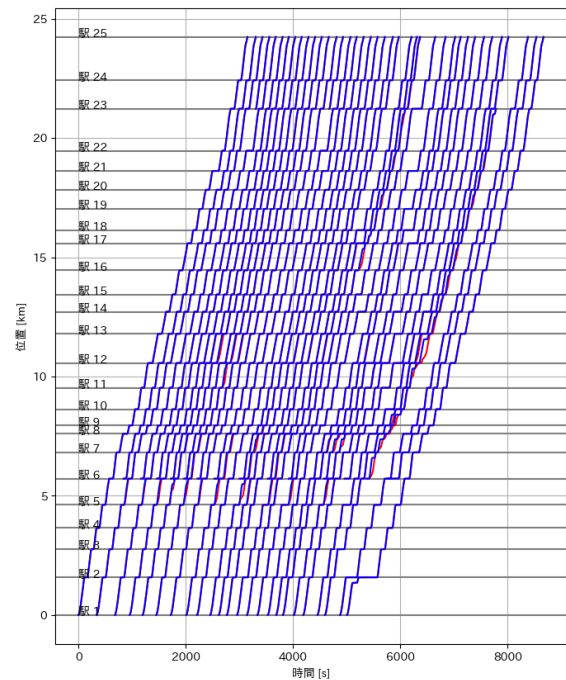


図 5 列車群全体の走行パターン
Fig. 5. Running patterns of all trains.

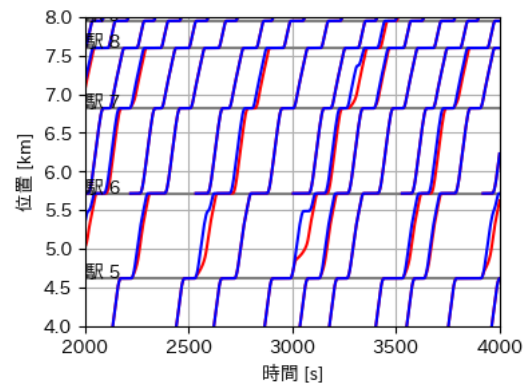


図 6 詳細な走行パターン
Fig. 6. Detailed running pattern.

表 1 駅間停車時間

Table 1. Inter-station stop time.

モデル	基準モデル	提案モデル
駅間停車時間	600[s]	113[s]

表 2 消費エネルギー

Table 2. Energy consumption.

モデル	基準モデル	提案モデル
消費エネルギー	5874[kWh]	5815[kWh]

ギーは、基準モデルに対して0.2%の微減となり、両者間に統計的に有意な差は見られなかった。この結果は、駅間停車を大幅に削減したにもかかわらず、エネルギー消費量の増加を招いていないという点で特筆すべきである。

鉄道車両の運行において、最もエネルギー効率が悪い運転の一つは、完全な停止状態からの再加速である。停止状態から目標速度まで加速するには、車両の慣性抵抗や摩擦抵抗に打ち勝つために大きな引張力を要し、大量のエネルギーを消費する。基準モデルでは、駅間停車が頻発するため、この非効率な停止と再加速のサイクルが繰り返される。

一方、提案モデルでは、先行列車の状況に応じて後続列車が計画的に減速する。これにより、完全停止を回避し、ある程度の速度を維持したまま走行を続ける。その後、前方状況がクリアになった際に再加速を行うが、これは運動エネルギーが完全に失われていない状態からの加速となる。したがって、低速走行からの再加速は完全停止からの再加速と比較して、加速に要するエネルギーが少なく済む。

提案モデルにおける計画的な減速・再加速制御は、それ自体がエネルギーを消費する要因ではある。しかし、その増加分は、基準モデルで頻発していた非効率な停止と再加速パターンを回避することによるエネルギー削減効果と相殺される、もしくはそれを僅かに上回る結果となった。結果として、全体のエネルギー消費量をほぼ同等に保ちつつ、運行の平滑性と安定性を向上させることができたと言える。

6. まとめ

本稿は、首都圏鉄道の高頻度運行において頻発する駅間停車を抑制しつつ、遅延回復能力とエネルギー効率を両立させる列車接近パターンを提案し、その有効性を検証したものである。まず、移動閉塞環境下で先行列車の発車遅延が後続列車に与える影響を理想化した二列車モデルで数理的に定式化し、安全距離制約を満たす接近条件を導出した。次に、後続列車の制御を二段階減速と事前減速の組合せで構成し、先行列車の発車時刻不確実性に応じて最適な駅進入速度を逐次決定するアルゴリズムを提案した。

24 km 区間・40 列車を想定した朝ラッシュ時シミュレーションの結果、提案手法は基準手法に比べて駅間停車時間を約 55 % 削減しながら、総エネルギー消費には有意な悪化を生じさせないことを確認した。これは、不要な完全停止を回避し計画的な速度制御に置き換えたことで、走行安定性とエネルギー効率の双方を確保できたことを示している。したがって、本研究の接近パターンは移動閉塞でのリアルタイム位置情報と親和性が高く、既存ダイヤの大幅な変更を伴わずに運行信頼性を向上させる実用的手法であると結論づけられる。今後は 勾配・曲線抵抗を含む詳細車両モデルの導入や複数列車相互作用を考慮した制御を行うことで、本手法の適用範囲拡大とさらなる性能向上を図る。

文 献

- (1) 国土交通省:「三大都市圏の平均混雑率は横ばい〜都市鉄道の混雑率調査結果を公表（令和元年度実績）〜」
- (2) 東京大学大学院情報理工学系研究科附属ソーシャル ICT 研究センター:「全国鉄道運行本数データ公開ページ」, https://gtfs-gis.jp/railway_honsu/
- (3) 岩倉成志・上松苑・高橋郁人・辻井隆伸:「高頻度運行下での都市鉄道を対象とした遅延連鎖シミュレーションシステムの開発」, 土木計画学研究・論文集 D3, Vol.28, No.5, pp.879-886
- (4) 日立:「スマートな運行を実現する無線式列車制御システムの導入」, <https://www.hitachihyoron.com/jp/archive/2010s/2018/05/09a05/index.html>
- (5) 電気学会電気鉄道における教育調査委員会:「最新電気鉄道工学 三訂版」, コロナ社 (2017)
- (6) 電気鉄道ハンドブック編集委員会:「電気鉄道ハンドブック」, コロナ社 (2007)
- (7) 和田健太郎・吉相俊・赤松隆・大澤実:「高密度鉄道ダイヤにおける列車集群化を抑制する運行制御方策」, 土木計画学研究・論文集 D3, Vol.68, No.5, pp.1025-1034
- (8) 仮屋崎圭司・日比野直彦・森地茂:「都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究」, 土木計画学研究・論文集, Vol.27, pp.871-879 (2010)
- (9) 平栗滋人・兎東哲夫:「線区条件に応じた列車群の予測制御方式」, 鉄道総研報告, Vol.24, No.3, pp.29-34 (2010)
- (10) 坂井他:「高頻度運転時の遅延伝搬を抑制する先行列車最適追従制御」, 電気学会研究会資料, pp.7-12 (2020)
- (11) Nakamura Hideo: "Derivation of minimum headway driving pattern on moving-block system by utilizing genetic algorithm", Transportation Systems, Vol.1-3, pp.747-752 (1997)