

エージェントモデルによる東京圏都市鉄道の 超高頻度運行の可能性 その2

芝浦工業大学 工学部 土木工学科 教授 岩倉 成志

芝浦工業大学 建設工学専攻 修士課程 吉枝 春樹

1. はじめに

都市鉄道の既存ストックを最大限に活用し、輸送力増強の投資額を激減させ、列車遅延を抑制して運行間隔 90 秒達成を目標とする超高頻度運行の可能性に挑戦する。移動閉そくシステムをベースに、さらに駅間での精緻な速度制御を行うことで列車群としての最適な制御を実現できる保安システムの導入を念頭におく。複々線化整備等に比して、圧倒的に短期間にサービスが改善でき、かつ次世代への財政負担を負わせない社会的インパクトの大きい研究成果を目指す。

超高頻度運行によって各駅で一編成当たりの乗降客が減少すれば、駅での停車時間が縮減して高頻度化と混雑率低下を達成できる解の存在を証明したい。

このため列車編成ごと、乗降客個々の挙動を再現する精度の極めて高いエージェントモデルに、高頻度化にともなう利用需要の変動を予測する需要モデルを開発して統合する。

本研究は昨年度の継続研究であり2か年計画の2年目となる。昨年度は、相直路線の東急田園都市線と東京メトロ半蔵門線を対象に、超高頻度運行の実現性を評価するエージェントモデルと運転曲線図による理論解析の2種のアプローチで超高頻度運行の実現性を検討し、その可能性を示した。今年度は、実現性のさらなる精度向上を図るために、以下の研究を進める。1) 東芝 TRUE LINE ダイヤ作成ソフトウェアを用いて超高頻度運行ダイヤを作成し、実効性の高いダイヤを本研究室のエージェントモデルに組み込む。2) 新しいダイヤによって利用者の緩急行接続時の乗換需要を推計するために、大都市交通センサスの個票データに基づいて利用者の列車逐次選択モデルを構築する。3) 昨年度成果に上記1)、2)を組み込み、移動閉そく等信号システムの改良による運行頻度の増加可能性を証明する。

2. 既存研究のレビュー

移動閉そく方式による運転間隔の短縮に着目した研究は主に電気工学分野で1960年代には存在している。信号保安協会は1987年に学識者と実務者から構成される委員会をつくり、移動閉そくの運転間隔短縮の網羅的な評価研究をおこなった。当時の常磐線を対象に分析した結果では、当時の最小運転間隔205秒は移動閉そく導入によって115秒まで短縮可能としている。大島らはデジタルATCと比較的似たコンセプトで、多段制限速度信号や先行列車後部検知の細分化と後続列車への情報伝送を組み込んだシミュレーションによって140秒間隔から116秒間隔まで縮小できるとしている。Nakamuraは運転間隔の短縮方法として経験的に知られている2段階減速走行を、遺伝的アルゴリズムを用いて理論上も最小運転間隔が存在することを証明した。この解析により、先行列車と同一の運転曲線に従って走行するという前提があっても、移動閉そくと組み合わせて、加減速が3.6km/h/sであれば最小運転間隔を

79 秒、加減速が 1.6km/h/s であれば 98 秒で運行できることを示した。Takeuchi et al. は、固定閉そくと複数の移動閉そく方式をシミュレーションで比較分析し、固定閉そくに対して、実用上最小運転間隔で運行できる純移動閉そく (pure moving block) で 12% の運転間隔短縮が可能としている。また、移動閉そくは遅延が発生した際のダイヤ回復力が大きいこと、再始動時の最大電力消費への対応方法への知見を与えた。

最近の研究では、國松らは、移動閉そくに加えて、予測制御と呼ばれる先行列車の発車時刻を予測し、後続列車を運行制御する方法をシミュレーションで評価している。実在の通勤路線を対象に、運行支障によって 192 秒間停止した後の回復を試算し、予測制御なしの固定閉塞で発着時隔 82 秒を基準とすると、移動閉そくによって 67 秒まで短縮され、予測制御を付加すると時隔 51 秒まで短縮でき、遅延回復に有効であることを示した。角濱・高木 11) は、2 つの列車を超近接走行させるソフト連結との評価研究であるが、固定閉塞と 2 種類の移動閉そくとの駅発着時隔の評価もおこない、移動閉そくによって 26% から 33% 程度の時隔短縮をおこなえるとしている。

以上のように、移動閉そく方式は、固定閉そく方式に比べて、運転間隔を大幅に短縮できるほか、遅延回復にも効果があるという知見が得られている。しかし、これらの研究の分析はいずれも固定した停車時間を外生して計算しているという課題がある。

東京圏の都市鉄道の特徴は、時間帯によって交通需要が大きく変動し、かつピーク時には莫大な乗降量があり、停車時間の伸長が運行間隔や遅延、すなわち輸送力に大きな影響を与える点である。Nakamura が前提とする同一の運転曲線に従って各列車が運行するという理想的な条件に従った運行は実際にはできていない。

本研究の目的は、運行間隔 90 秒のダイヤを移動閉そく方式を想定して設計した上で、列車一編成当たりの混雑緩和と乗降量の削減に伴う乗降時間の削減によって、90 秒間隔運行の実現可能かを証明することにある。このため、筆者らが独自に構築した利用者個々の駅乗降時間推計と、列車ごとの駅間走行時間推計とを統合したエージェントシミュレーションを用い、実路線をケーススタディにして分析をおこなう。

3. 運転理論上の最小追い込み時隔の検討

(1) 分析方法の概要

時隔曲線を用いて分析した。これは図 1 に示すような横軸に時間、縦軸に距離を取ったグラフである。車両性能に基づいて先行列車の最後尾の位置をプロットし、次に後続列車の走行速度を求め、先行列車との間に確保する間隔を計算して先行列車の最後尾のプロットに重ねると、最低限の追込時間を求められる。図 1 に示した最接近点では、後続列車の空走 + 制動距離の線が先行列車の最後尾の余裕距離分手前の線に重なり、そこから駅に停止するまでの時間で追込み時間が決まっている。なお、

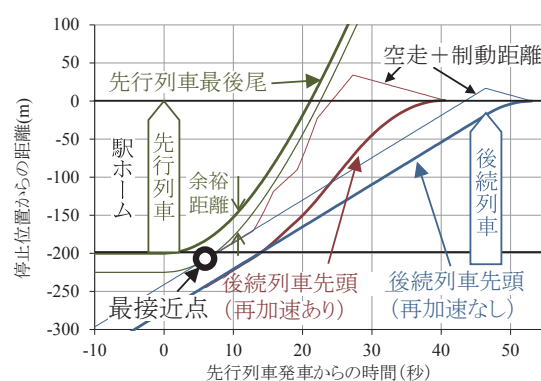


図 1 距離時隔曲線

表 1 距離時隔曲線作成条件

モデル車種	東急 8500 系 10 両
乗車率	100%
減速度	3.0km/h/s
空走時間	3 秒
余裕距離	25m
計算ピッチ	1m

この分析で求められるのは追込時間で、運転間隔は追込時間に停車時間を加算して求める。

(2) 列車の速度と追込時間

図2に実線で示した先行列車の速度が70km/hのケースでは、後続列車の速度が40km/h程度の時点で追込時間が最短の42.4秒となった。最適な進入速度は40km/h程度といえるが、先行列車が既に駅を離れている状況では、速度下げても運転時間が伸びて到着が遅れる。最適速度で進入させるためには、國松らの方法を用いるなど、先行列車の状況に応じた調整が必要になる。

一方、図2に点線で示した進出側速度が30km/h制限のケースでは、後続列車の速度も30km/hが最適となり、70km/hで進出できる場合に比べて最小の追込時間が伸びる。これは、後続列車が先行列車と最接近したあと、停車のため減速するまで速度と間隔を保って先行列車に追走するからである。追込時間短縮のためには、進出側速度制限の解消も重要であるといえる。

(3) 再加速を実施する場合の追込時間

先行列車の進出速度が速い場合、後続列車は先行列車と最接近したあと、徐々に距離を離される。ここで、図1の赤線のように再加速すると、追込時間を抑制できる。

再加速する際は、速度の上昇とともに先行列車との間に確保すべき制動距離も長くなるため、先行列車より僅かに遅い加速が求められる。しかし、鉄道車両は加速度を微調整しにくいいため、速度パターンに完全に追従した場合と、10km/hごとに間欠的に最大加速度で加速した場合について分析した。結果を図3に示す。間欠的な加速による追込時間の伸びは1秒程度で、ファクターとしては相対的に小さいが、乗り心地や省電力の観点から加速力を調節しやすい車両が望ましいといえる。

(4) 駅手前で後続列車が停止した場合の追込時間

一度停止した場合、先行列車に全く遅れず後続列車も発車することは難しい。また、ブレーキパターンは車両の性能に対して余裕を持って設定されるため、列車は本来の停止点より手前に停止する。特に手動運転の場合、衝動を避けるために運転士が意図的に速度パターンが0km/hを示す地点より手前に列車を停止させることが考えられる。そこで、後続列車の発車が先行に5～10秒遅れた場合について、先行列車の余裕距離（25m）手前に停止したケースと、

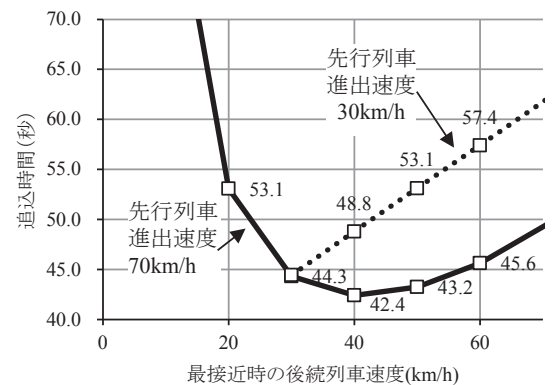


図2 列車の速度と追込時間

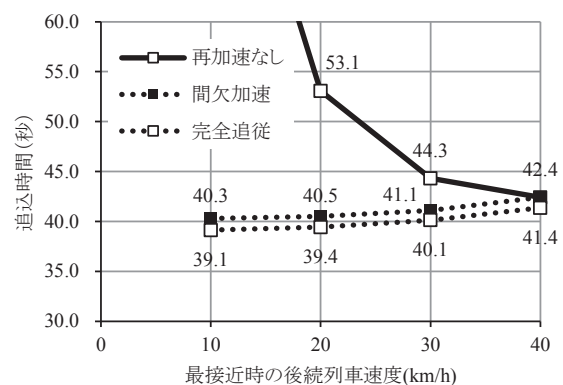


図3 再加速実施時の追込時間

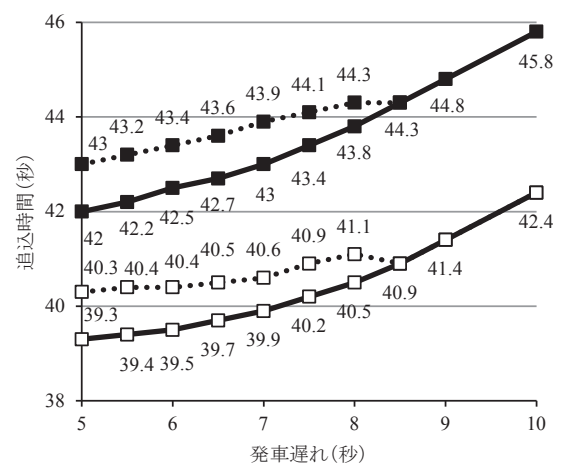


図4 駅手前で停車した場合の追込時間

それより 50m 手前に停止した場合について、間欠加速の場合も含めて検討した。結果を図 4 に示す。横軸に先行列車の出発から後続列車の出発までの遅れ時間を、縦軸に追込時間をとっている。

停止点近くまで進んで迅速に発車すれば、速度を最適化した場合と遜色ない追込時間である。エージェントシミュレーションでは、速度の最適化は行わずに駅手前での停止を許容する条件で分析する。

4. 超高頻度運転に対応したエージェントシミュレーションモデル

(1) シミュレーションの概要

ダイヤに沿って列車を走行させた場合の列車群の挙動を評価する。本研究で用いたのは本研究室で独自に開発した列車運行シミュレーションモデルである。本モデルは列車の挙動を推定する走行モデルと旅客の乗降行動を再現する乗降モデルからなる。乗降モデルは旅客の乗降行動ミクロに再現して停車時間を推定し、走行モデルは列車間の相互作用や線形等の影響を加味して列車の挙動を推定できる。乱数が含まれることから、結果を安定させるため 10 回実行して集計値を用いる。

(2) 超高頻度運転の分析への対応

超高頻度運転ダイヤに変更すると、各駅停車と優等列車が接近して走行することになり、各駅停車と優等列車の所要時間の差が縮んで乗客の列車集中度も変化すると考えられる。そこで、列車種別選択モデルを追加して集中度を変化させる。

また、渋谷駅の停車時間が課題であることから、渋谷駅のホームを線路の両側に設け、列車の片側から降車して反対側から乗車するサンパウロで見られた方式の分析に対応する。さらに、渋谷駅を 2 線化して交互発着可能にした場合についても分析する。

(3) 乗降モデル

乗降モデルは、最も乗車人数の多い扉とホーム上の乗客の行動を再現する。

図 5 に示す扉 1 箇所分の車内およびホームをシミュレーション空間とする。ホームには乗車する旅客エージェントを配置する。車内には降車する旅客エージェントと、引き続き乗車する車内旅客エージェントを配置する。駅に到着すると、降車旅客エージェントは降車しない旅客エージェントと相互に影響しあいながらホームへ移動する。混雑時は、引き続き乗車する旅客が降車客を通すためホームに降りる行動も表現する。乗車旅客エージェントはホーム上で整列して列車を待ち、一度ホームに降りた旅客の再乗車が完了するのを待って乗車する。ホームを両側化して乗降を分離するケースの場合、乗車旅客は再乗車する旅客の乗車を待たず、降車開始後 5 秒で乗車を開始する。この 5 秒は、車掌が扉を取り扱う時間である。

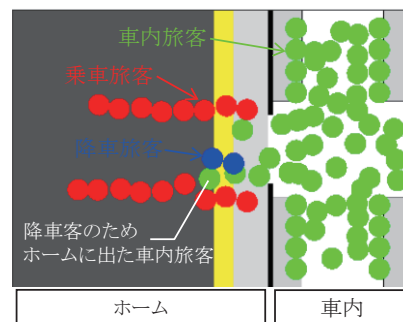


図5 乗降モデル

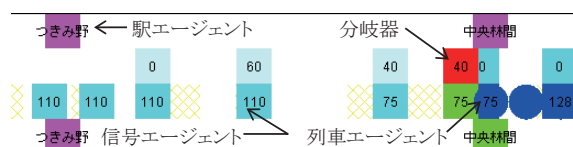


図6 走行モデル

(4) 走行モデル

図6に示すシミュレーターで、列車の走行挙動を計算して走行時間を求める。車両の特性は東急8500系で、加速性能は架線電圧1350Vで、定員乗車の場合の引張り曲線に基づいている。減速度は平坦線で3.0km/h/sであり、勾配の影響を加味して加減速させる。

走行中は、信号現示速度3km/hまで加速する。勾配等で自然に加速した場合は、信号現示速度以下に減速する。信号現示速度に対して10km/h以上低下した場合は再加速する。計算は0.2秒周期で行う。分岐器を実装しており、追越しや交互発着を再現できる。

(5) 列車種別選択モデル

a) モデル概要

式(1)に示す非集計ロジットモデルを構築した。時間帯・乗車区間ごとに、種別との乗換駅を複数の選択肢から一括で選択する。図7に示すように、優等通過駅から乗車する場合、優等列車に乗り換える駅を最初の乗車駅に近い最大4駅の優等停車駅から選択させるようにし、普通列車のみの経路と併せて最大5肢とした。時間帯は6:30～9:45の間を15分毎に区分したほか、6:00～6:30と9:45～10:30までに分けて求めた。

b) パラメーター推定

パラメーター推定には2010年大都市交通センサスの乗車経路が記録された個票データを用いた。優等通過駅から優等列車に乗り換えたサンプルや、折返しなどの異常な行動が見られるデータを除去して得られた2249サンプルで推定を行った。推定結果を表2に示す。乗車待ち時間は目的地まで移動できる列車の平均運転間隔の半分を与えた。全てのパラメーターが負に推定されて符号条件は問題なく、t値も有意となった。

c) シミュレーションへの反映

列車種別選択モデルによって時間帯ごとの選択行動を予め推定し、乗換旅客を含めた乗車人数を各駅停車・優等各々の運転間隔1分あたり乗車人数として入力し

$$P_{t,i,j} = \frac{\exp(V_{t,i,j})}{\sum_k \exp(V_{t,k,j})} \quad (1)$$

$$V_{t,i,j} = \sum_m X_{m,t,i,j} \alpha_m \quad (2)$$

$P_{t,i,j}$ 時間帯tに発駅を出発する区間jの利用者が選択肢iを選択する確率
 $V_{t,i,j}$ 時間帯tに発駅を出発する区間jの利用者における選択肢iの効用
 α_m m番目サービス変数に対するパラメーター
 $X_{m,t,i,j}$ 時間帯tの選択肢i, 区間jのm番目サービス変数

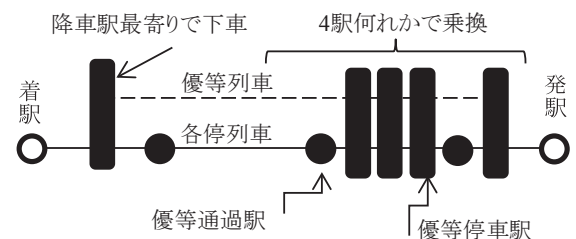


図7 乗車経路の選択肢

表2 パラメーター推定結果

パラメーター名	推定値 (t 値)	初期尤度	-3235
乗車待ち時間	-0.16 (-8.3)	最終尤度	-1382
乗車時間	-0.16 (-19.89)	修正尤度比	0.57
乗換回数	-4.31 (-34.64)	的中率 (%)	73.2
たまプラーザダミー	-1.10 (-3.84)	サンプル数	2249

表3 停車・追込時間の比較

		実測	推計
停車時間	平均 (秒)	71.6	73.9
	標準偏差 (秒)	12.8	13.8
追込時間	平均 (秒)	69.9	58.4
	標準偏差 (秒)	25.6	4.7

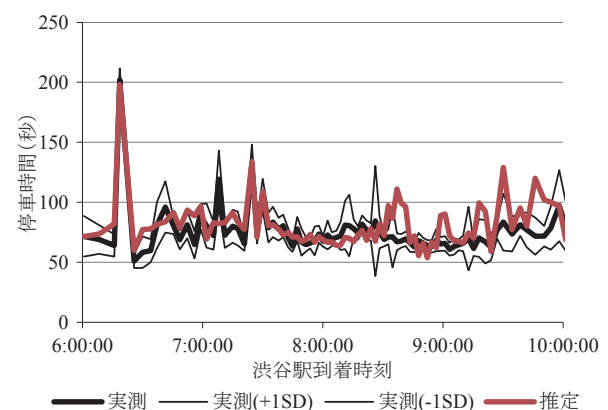


図8 渋谷駅停車時間の比較

た。ダイヤ上の所要時間や待ち時間に基づいて乗車列車が選択されるが、何らかの理由により運転間隔が伸びると、それに応じて乗客も増加する。

d) 乗降客数の設定

各駅からの乗車旅客数は、大都市交通センサスのデータと実測データを組み合わせて用いた。実測データは田園都市線内の全駅と半蔵門線の一部駅のみ存在するため、不足する駅を大都市交通センサスで補った。また、種別間の乗換が発生する駅では乗換旅客と当駅から入場した旅客の識別ができないため、大都市交通センサスのデータを用いた。

(6) エージェントモデルの現況再現性

現況ダイヤを入力して推定された停車時間と追込時間の平均と標準偏差を表3に、渋谷駅出発時刻ごとの停車時間分布を図8に示す。実測値は2014年7～11月中任意の26日の平均である。停車時間の推定値と標準偏差はよく一致しているが、追込時間の推定値が短く、標準偏差も小さい。走行モデルには運転士の個人差が反映されないほか、必ずしもダイヤに合わせずに最速で走行しようとするものが関与している可能性がある。

図9に渋谷駅断面の運転間隔の分布を示す。過小推計傾向で、特に運転間隔135～140秒の階級が乖離しているが、推定値は120～125秒の階級の分布値に近いことから、推定値がダイヤ上の運転間隔である130秒を中心に尖った分布をしている結果であると考えられる。

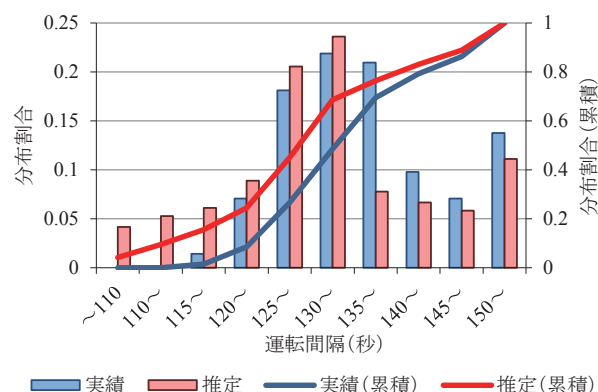


図9 渋谷断面運転間隔の比較

5. エージェントシミュレーションによる分析

(1) 移動閉そくシステムに関する仮定

距離時隔曲線による分析時と同じように、減速度 3.0km/h、空走時間 3 秒、余裕距離 25m とした。減速度と空走時間は現況の ATC と同等である。分岐器が転換中や、予定の進路と前方の分岐器の開通方向が異なるときは手前に停止させる。先行列車と同じ進路に進む場合は、本線上と同様の制御とする。また、エアセクションの停止禁止区域内に停止しないよう、通過できない場合は手前に停止点を設定する。

(2) 分析ケースの設定

渋谷駅の条件で2ケースに分けた。ケース1は現況と同じ線路配置とした場合、ケース2は渋谷駅を交互発着ができる配線とした場合である。ダイヤは、朝の準急列車と各駅停車が交互に運転されている時間帯の渋谷駅断面での運転間隔が90秒になるよう調整したダイヤを作成した。駅間の運転時間は、原則として現況と同一としたが、準急列車は普通列車との退避の都合で所要時間が伸びている箇所がある。ケース2では、渋谷駅に新設するホームに交互に発着する。

(3) 分析結果

a) 渋谷駅の運転間隔

ダイヤ上の運転間隔が90秒の列車の、渋谷駅断面運転間隔の分布を図10に示す。90秒間隔で発着

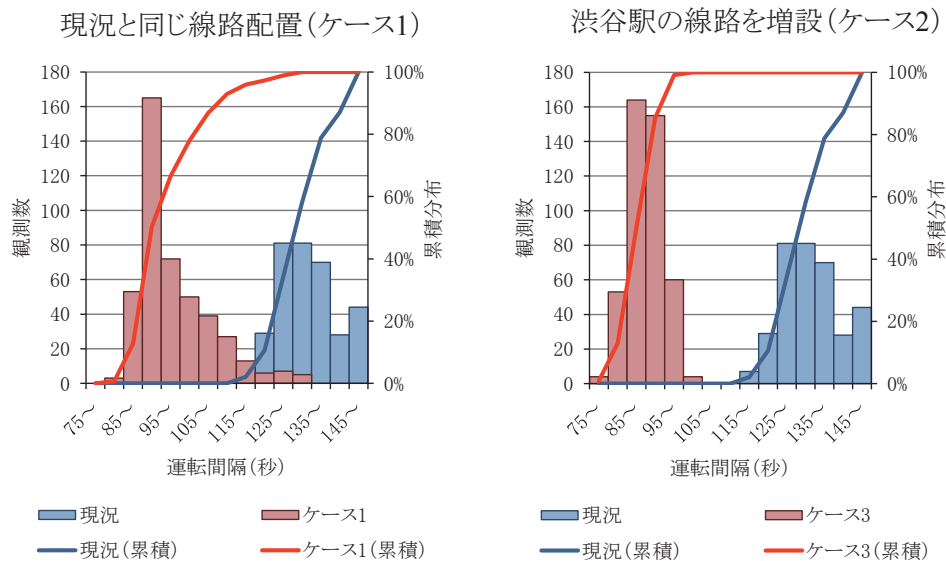


図 10 渋谷駅断面での運転間隔

できたのはケース 2 のみで、ケース 1 は半数以上が 95 秒以上の間隔で発着した。100 秒以上の間隔でなければ定時運行は確保困難と考えられる。

ケース 2 は渋谷駅を 2 線化したことで停車時間の伸びが後続列車に波及せず、短い間隔での運転を持続できた。渋谷、二子玉川、溝の口などの主要駅手前では数列車が数珠つなぎになるが、駅間で停車しても 90 秒間隔は確保できた。

6. おわりに

本研究では、東京の都市鉄道路線の超高頻度運転の可能性を検証した。まず、海外の事例を調査して、停車時間の長さが東京の都市鉄道の課題であると示した。次に、移動閉そく制御下で追込時間を短縮する運転方策について検討し、駅で先行列車に追いついて停止する走行でも短い時隔で運転できると示した。最後に、エージェントシミュレーションを田園都市線および半蔵門線に適用し、渋谷駅の線路増設を行えば 90 秒間隔での運転が可能であると示した。

謝辞

本研究に際してデータをご提供頂いた東急電鉄ならびに東京地下鉄および、ダイヤ作成支援ツールである TrueLine をご提供頂いた東芝インフラシステムズの各社に謝意を表します。