

都市鉄道の遅延連鎖シミュレーションシステムの再現精度の向上と 対策効果の分析

角田 隆太* 川村 孝太郎 (芝浦工業大学大学院)
岩倉 成志 (芝浦工業大学)

Accuracy improvement of simulation system for estimating knock-on delay of urban rail
and impact analysis of investment strategy to reduce train delay

Ryuta Tsunoda*, Kotaro Kawamura, Seiji Iwakura, (Shibaura Institute of Technology)

On the urban railway network system in the Tokyo metropolitan area, mutual direct running and high frequency operation cause the problem that train delay with expansion of mutual direct operation. In order to solve these problems, the authors promoted the development of simulation system for estimating knock-on delay of urban rail that reproduce knock-on train delay when trains run high frequently. However overestimates of delay time was occurred and reproduce accuracy was a problem. Therefore this research enhance the reproduce accuracy of existed simulation model. Then it reflects anti-delay measures and predicted effectiveness of the anti-delay measures.

キーワード：列車遅延，マルチエージェントシミュレーション，都市鉄道，高頻度運行

Keywords：knock-on train delay, multi agent simulation, urban rail, high frequency operation

1. はじめに

東京圏の都市鉄道は，通勤通学時間帯の混雑緩和のため，新線整備や複々線化による輸送力増強を図ってきた．それらは整備に膨大な費用と長期の整備期間を要するため，複数の鉄道会社間の相互直通運転や，2～3分間隔で列車を運行する高頻度運行などの対策も併せて進められてきた．それらの対策は一定の効果を得たが，一度遅延が発生すると，高頻度運行に起因した後続列車への遅延の伝播や，遅延による到着駅の旅客増加に伴う遅延の拡大など，慢性的な列車遅延が問題となっている．

これらの問題の解決に向けて，岩倉¹⁾は東急田園都市線と東京メトロ半蔵門線を対象に，高頻度運行時の1列車ごとの列車遅延を再現するマルチエージェントシミュレーションモデルを開発してきた．このシステムは図-1のように駅での停車時間を推計するモデルと，駅間の列車の走行時間を推計するモデルを組み合わせ，統合モデルとして遅延時間を推計するものである．

既存の統合モデルでは，遅延時間の過大推計が発生しており，実務的な検討に用いるには未だ課題が残っていた．

そこで本研究では，既存のシミュレーションモデルの再現精度の向上のため，各サブモデルの改良と統合モデルの遅延時間の過大推計の原因究明と解消を行った．これにより，既存のシミュレーションモデルに比べ大幅に再現精度が向上した．また，そのシミュレーションモデルに遅延対

策案を反映させ，その効果を把握した．

以下，2.では，既存のシミュレーションモデルの課題と対応について述べる．3.では，2.であげた課題に対応した結果を述べる．4.では，再現精度が向上したシミュレーションモデルに遅延対策案を反映させ，効果を把握した結果を述べる．5.では本研究の成果と今後の展望について述べる．

2. 既存のシミュレーションモデルの課題と対応

(1) 遅延連鎖シミュレーションモデルの概要

本シミュレーションモデルは，汎用性のあるマルチエージェントシミュレーションのプログラミングソフトartiso academic 3.0を用い，東急田園都市線中央林間駅から東京メトロ半蔵門線押上駅の48.3km区間を対象に構築する．このシステムは，列車の駅停車時間を推計する乗降時間推計モデルと確認・調整時間推計モデル，駅間の列車の走行時間を推計する走行時間推計モデルで構成され，それらのサブモデルを組み合わせたものを統合モデルとし，図-1のように列車ごとの列車遅延を再現する．

本研究では，中核となる乗降時間推計モデルと走行時間推計モデルの2つのサブモデルが抱える課題を整理し，対応することで再現精度の向上を図った．

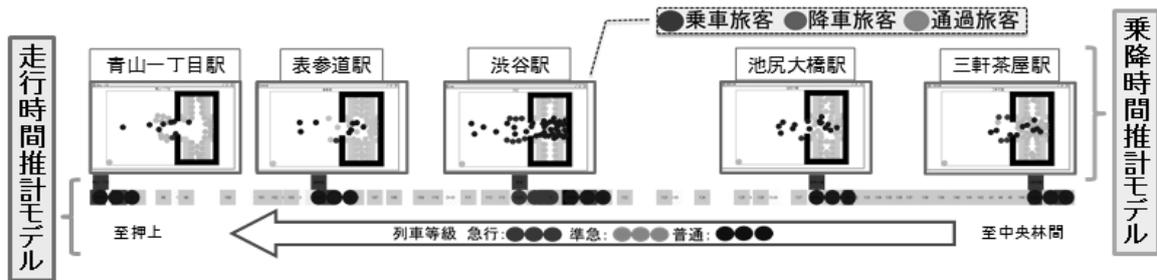


図-1 本シミュレーションモデルの様子

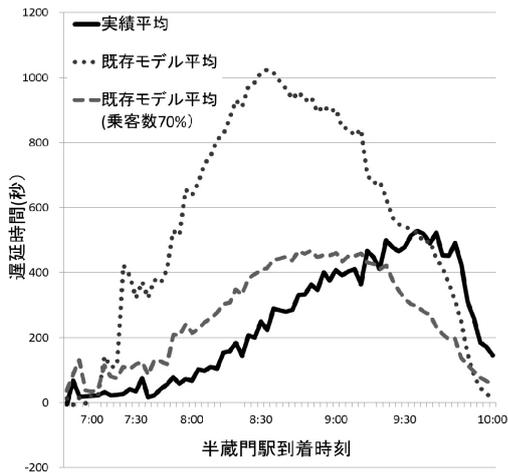


図-2 既存の統合モデルの半蔵門駅での遅延の再現性
長津田駅～半蔵門駅の遅延時間

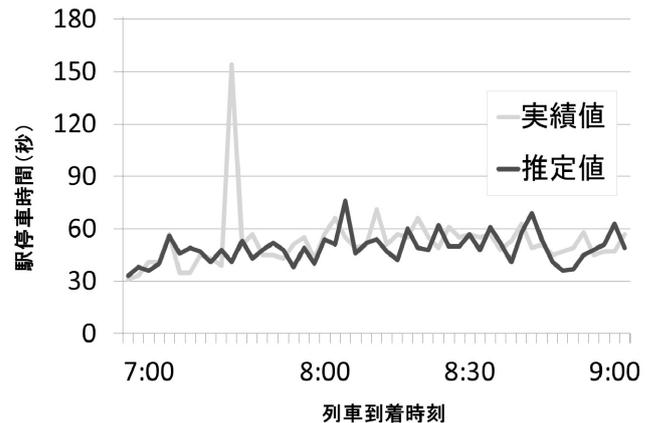


図-3 突発的な長時間の停車の一例 (11月24日青葉台駅)

(2) 既存モデルの課題と対応

a) 乗降時間推計モデル

課題と対応 1: 図-2 は長津田駅～半蔵門駅の遅延時間を示したものである。実績の遅延時間は平日 24 日間の平均値を実線で示し、推計した遅延時間は 10 回のシミュレーションの平均値を点線で示している。これより、実績の遅延時間に比べ推計した遅延時間は過大であることがわかる。そのため、乗客数を 7 割に調整して推計を行い、破線で示すような再現性を得ていた。遅延時間の過大推計は、旅客エージェント同士の接触時に挙動が停止する事象が発生しており、乗降時間が過大に推計されることが原因であった。そこで、乗降時間推計モデルの旅客エージェントに、周囲の旅客に対して方向転換を促すルールを加え、旅客の存在認識範囲の設定を細かく分割するように設定した。

課題と対応 2: 半蔵門線内の各駅で実績の停車時間に比べ推計した停車時間が過少になる問題が発生していた。この問題は、半蔵門線内において乗降時間を推計する際に反映される列車内の混雑率や各駅の最混雑扉の乗降客数のデータが、大都市交通センサスをベースにしていたため、実績値よりも大幅に少ないことが原因であった。そのため、当該区間の列車内の混雑率を示す応荷重データを東京地下鉄株式会社から提供頂くと共に、渋谷から永田町の各駅で乗降客数のカウント調査を行い、実際の乗降客数をモデルに反映した。

課題と対応 3: 既存モデルは、大部分の駅停車時間は推計できているものの、図-3に示すような突発的に発生する比較的長い時間の停車を推計できていない問題があった。そのため、実績遅延時間の平均に近い12月1日を対象に、時刻表の停車時間に対し実際の停車時間が何秒間超過したかを全停車ごとに算出し、60秒以上超過した停車をモデルの中でも同様に発生するように設定した。

b) 走行時間推計モデル

課題と対応 4: 本モデルで開発した走行時間推計モデルの再現性は、駅間走行時間の推計値と実績値の相関係数が 0.99 以上であることに加え、残差 RMS を全ての等級の列車が停車する 12 駅において算出した結果、平均で 10 秒程度となり、再現性としては良好といえる。しかし、池尻大橋駅～渋谷駅間では、当該区間において実際に列車が渋谷駅手前にて長時間停車することを防ぐ特殊な運転ルールが存在しており、その運転ルールをモデル上に反映していないことから、大きな残差が発生していた。そこで、東京急行電鉄株式会社から、朝ピーク時の運転曲線図を提供頂き、列車の運行速度がモデル上よりも実際は早いことが判明したため、当該区間の速度設定を修正した。

課題と対応 5: 渋谷以降の東京メトロ半蔵門線区間において、常時数秒から十数秒程度の駅間の走行時間の過少推計が発生していた。これは遅延を過少に推計する要因となっている。現段階では過少時間分、駅での停車時間を増加させて調整を行っているが、実際は課題と対応 4 の対応と同様に、列車の加減速挙動を修正する必要がある。

課題と対応 6: 東急田園都市線と東京メトロ半蔵門線の再現性は良好であるが、列車の運行に関わるエージェントルールの他路線での汎用性が不明であった。そこで、新たに東京メトロ千代田線及び日比谷線を対象に、既存の走行時間推計モデルと同様のルールを与え汎用性の確認を行った。

3. 各課題への対応による再現精度の結果

a) 乗降時間推計モデル改良後の再現精度

課題 1 について、ルールの改良後、実際に運行した列車から得られる混雑率と乗降人数の値を用いて、同じ条件下のシミュレーション内で旅客エージェントの挙動の停止が発生する回数を算出した。その結果、発生確率は改良前の0.82%に対し、改良後は0.01%となり結果は良好であると判断できる。

半蔵門線内の駅停車時間を過少に推計していた課題 2 は、半蔵門線区間に実際の列車内の混雑率と乗降客数を反映させることにより、推計値が実績停車時間に近い値となった。

b) 走行時間推計モデル改良後の再現精度

池尻大橋駅～渋谷駅の駅間走行時間の残差が大きく推計されている課題 4 について、東京急行電鉄株式会社へのヒアリング調査を基に、運転ルールの改良することで対応した。それにより、当該区間の残差 RMS が 23.5 秒から 12.5 秒と減少し、再現精度が向上した。

走行時間推計モデルで使用しているエージェントルールの他路線への汎用性の確認が出来ていない課題 6 については、東京メトロ千代田線および日比谷線を対象に新たに走行時間推計モデルを開発した。表-1 に示すように、千代田線の駅間走行時間の実績値と推計値の相関係数は 0.96、所要時間 1 分あたりの残差 RMS は 3.1 秒となった。

また、日比谷線の駅間走行時間の実績値と推計値の相関係数は 0.98、所要時間 1 分あたりの残差 RMS は 4.2 秒となり、走行時間推計モデルのエージェントルールの汎用性を確認することが出来た。

c) 統合モデルの再現精度

図-4 に示すように、既存モデルで発生していた過大推計は大幅に解消され、大幅に再現性が向上したと考える。しかし、実績遅延時間の平均に近い 12 月 1 日の推計のみであるため、今後複数日で遅延の推計を行い、実績平均との比較を行う。

4. 遅延対策案の効果分析

12月1日の遅延時間が精度良く推定できたため、このモデルを利用して遅延対策案の効果进行分析する。

図-5は、本研究の対象路線の主要駅において、列車が時刻表から何秒遅れて到着したか示すものである。どの時間帯でも東京メトロ半蔵門線の渋谷駅～半蔵門駅間の遅延時間が大きい。すなわちこの区間がボトルネックとなり、渋谷

表-1 走行時間推計モデルの他路線への汎用性

路線	田都・半蔵門線		千代田線		日比谷線	
区間	半蔵門～長津田		綾瀬～代々木上原		北千住～中目黒	
相関R	0.99		0.96		0.98	
残差RMS(秒)	37.95		64.30		135.51	
サンプル数	77		68		107	
駅間走行時間	実績	推定	実績	推定	実績	推定
	0:57:31	0:58:17	0:21:15	0:20:00	0:32:18	0:31:41
実績-推定	-40		-23		-38	
所要時間(分)あたりの残差RMS(秒)	0.77		3.08		4.20	

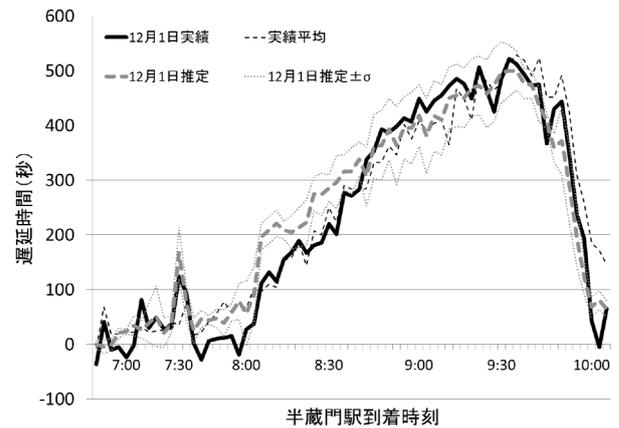


図-4 統合モデル改良後の再現性
長津田駅～半蔵門駅の遅延時間

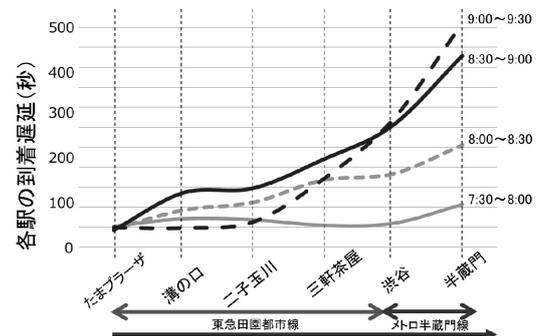


図-5 遅延連鎖の様子(各時間帯平均)

以前の東急田園都市線区間を走行する後続の列車にも、遅延が波及していくと考えられる。そのため、慢性的な列車遅延を解決するには、第一段階として渋谷駅～半蔵門駅間で対策を施す必要があると考える。そこで、当該区間において、後述する(a)と(b)の2つの遅延対策案を、図-4に示す12月1日を統合モデルで推計したものに反映し、効果を予測した。なお、当該区間において、遅延対策案を組み込む範囲を段階的に拡張させていき、それに伴う遅延時間の変動を見た。

a) 線路の複々線化

朝の混雑時は、線路内で列車の渋滞が発生し、それに伴い列車遅延が拡大しやすい。そこで、渋谷駅～半蔵門駅間において、線路容量の拡大のため、線路の複々線化とそれに伴った駅のホーム増設を本モデルに反映させ、その効果を予測した。なお、複々線化の範囲は、渋谷駅ホーム増設

(ホーム増設のための副本線の設置)と、渋谷駅から表参道駅、青山一丁目駅、永田町駅、半蔵門駅まで一駅ずつ進行方向側に拡張した5パターンを反映させ、各々の遅延時間の変化を見ることとした。なお、列車は、現存のホームと増設されたホームに交互発着するよう設定しており、発着時刻は変化させていない。

図-6に複々線化を本モデルに反映させた結果を示す。なお、遅延時間削減率とは、12月1日(施策なし)を推定した際の全列車の遅延時間の合計が、複々線化によって何%削減されたのかを示す値である。

複々線の範囲に関わらず、8時20分ごろと9時40分ごろに遅延時間が大幅に拡大しているが、これは実際に12月1日に突発的に発生した長時間の駅停車をモデルに組み込んでいるためである。それを除いては、複々線化の範囲を拡張するにつれ、遅延の拡大が抑えられているのが見取れる。しかし、最低でも100秒程度の遅延は発生しており、完全に遅延の解消ができたとは言い難い。これは、ピーク時に渋谷駅から永田町駅間の各駅において、駅停車時間が、時刻表上で定められる停車時間に比べ20~30秒程度超過しており、慢性的な駅での停車遅延が発生しているためである。

以上の分析結果から、本ケースでは渋谷駅での副本線を設置するホーム増設によって、全列車の遅延時間を38%削減することが可能となり、大きな限界効果が得られることがわかる。

b) 閉そく区間の分割

閉そく区間の粗密は線路容量に影響する。そのため、閉そく区間長が長い場合、高頻度運行下では線路上での列車の渋滞が発生し、列車遅延に大きな影響を及ぼす。

そこで、列車の走行時間の拡大しやすい区間である渋谷駅~永田町駅間において、閉そく区間を区間長が長い順にランク付けを行い、その上位3区間、5区間、10区間、15区間、20区間と段階的に分割する閉そく区間を増加させ、遅延時間の変化を見る。なお、閉そく区間の分割は、対象とする閉そく区間の距離を等距離で2分割している。

図-7に閉そく区間を分割した効果を示す。遅延時間の変化が大きい分割パターンのみ示した。12月1日を推定した結果と比較すると、上位3区間を分割した場合は50秒程度、上位5区間を分割した場合は120秒程度、上位10区間を分割した場合は180秒程度遅延時間が減少した。分割する閉そく区間が増加するに伴い、遅延時間が減少している。上位15区間、上位20区間を分割した場合は、上位10区間分割したパターンと同程度の遅延時間となった。このことから、上位10区間を分割した段階で、無駄なく列車を進行方向側に詰めることが可能になったと考えられる。

5. おわりに

既存のシミュレーションモデルの再現精度の向上のため、その課題の整理と改良を行った。その結果、中核とな

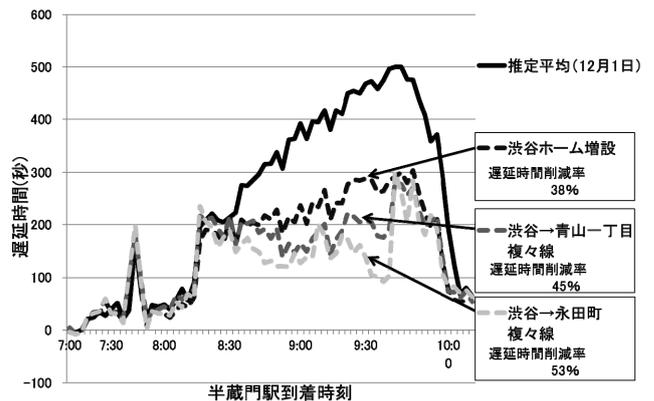


図-6 複々線化の効果

長津田駅~半蔵門駅遅延時間

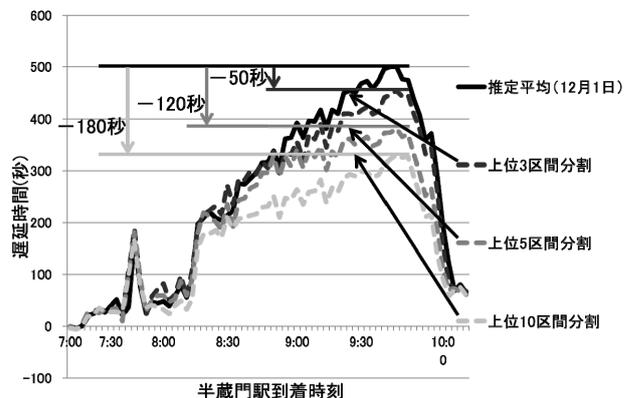


図-7 閉そく区間の分割効果

長津田駅~半蔵門駅遅延時間

る2つのサブモデルの主要な課題を解決し、統合モデルの遅延時間の再現精度は大幅に向上した。そして、再現性を得られている統合モデルに線路容量を拡大する2つの遅延対策案を反映させ、その効果を把握することができた。

今後は、東京メトロ半蔵門線内の実際の加減速挙動をモデルに反映させ、過少推計を解消することと、より多くの対策案をモデルに反映させ、本システムの有効性を検討していく。

謝辞：東京急行電鉄株式会社および東京地下鉄株式会社の方々には、データのご提供および研究に対する数多くのご意見をいただいた。ここに記して深謝の意を表する。

本研究は、昨年度研究室に所属していた渡邊雄馬氏(株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング)の尽力によるところが極めて大きい。

本研究は、科学研究費基盤研究B(課題番号:21360242)の一環で行われた研究である

参考文献

- 1) 岩倉成志, 高橋郁人, 森地茂: 都市鉄道の遅延連鎖予測のためのエージェントシミュレーション: 運輸政策研究, vol.15, No.4, pp.31-40, 2013 Winter