

# 都市鉄道の遅延連鎖予測のための シミュレーションモデルの再現精度の向上

川村 孝太郎<sup>1</sup>・角田 隆太<sup>2</sup>・岩倉 成志<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)  
E-mail:me13024@shibaura-it.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)  
E-mail:me13055@shibaura-it.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)  
E-mail:iwakura@sic.shibaura-it.ac.jp

東京圏の都市鉄道は混雑緩和のために、多くの対策を施してきた。しかし、一度遅延が発生すると、相互直通運転や高頻度運行により遅延の伝播や拡大など、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、高頻度運行時の列車遅延を再現する遅延連鎖シミュレーションモデルの開発を進めてきたが、遅延時間の過大推計が発生しており実務的検討に用いる段階には至っていなかった。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に、中核となる各サブモデルの改良とそれらを組み合わせた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。それにより、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ため、その結果を報告する。

**Key Words :** 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、岩倉ら<sup>1)</sup>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を目的とし、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。この改良により、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ため、その結果を報告する。

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.では本研究における成果と今後の展望を述べる。

## 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 *artisoc 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、1列車ごとの列車遅延を再現する。

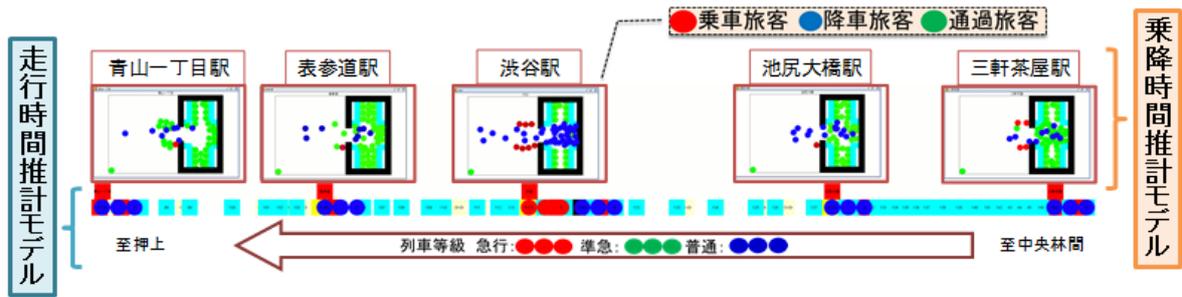


図-1 本シミュレーションモデルの様子

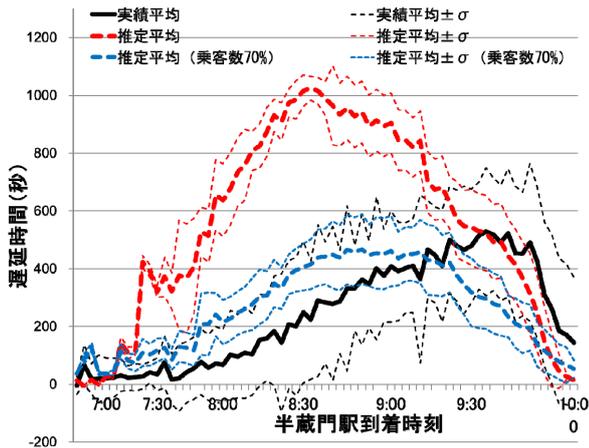


図-2 既存の統合モデルの半蔵門駅での遅延の再現性  
長津田駅～半蔵門駅の遅延時間

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。

## (2) 既存モデルの課題

### a) 乗降時間推計モデル

課題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日間の平均値と標準偏差(±1σ)を黒色で示し、推計した遅延時間は10回のシミュレーションの平均値と標準偏差(±1σ)を赤色で示している。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、青色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のが原因となっていた。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

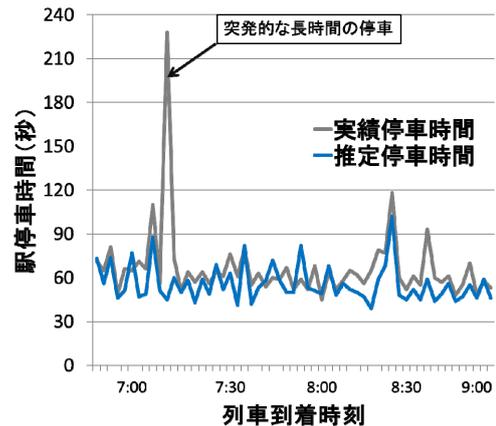


図-3 突発的な長時間の停車の一例(11月24日青葉台駅)

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、渋谷駅から永田町駅の各駅で乗降客数のカウント調査を実施し、実際の乗降客数をモデルに組み込んだ。

課題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、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、各駅・各時間帯別で算出し、対数正規分布にて近似を行い、モデルで再現できていない上位3～15%の停車について確率として組み込んだ。

### b) 走行時間推計モデル

課題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、大きい残差が発生していた。この問題は、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発生していた。そこで、東京急行電鉄株式会社から、朝混雑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適正した。なお半蔵門線の混雑時の運転曲線図は今後入手する予定である。

課題5：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、推計値が実績の停車時間に近い値となった。

突発的に発生する長時間の停車を再現できていない課題3について、駅停車時間を対数正規分布にて近似した結果、十分な再現性が得られなかった。表-1は2010年11月15日から12月17日の間の平日24日間の運行実績データの全列車のうち、遅延拡大に大きな影響を与える可能性が高い所定停車時間から60秒を超えて停車した列車の割合を示したものである。表-1のように60秒を超過する停車が極端に少ないこと、発生の分布に規則性が無いことから、60秒を超える停車は対数正規分布では近似出来ず、モデル正確に反映することができなかった。

#### 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5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

表-1 長時間の停車の発生頻度

駅	時間帯	時刻表設定上の停車時間を超過した時間(秒)		
		61~120	121~180	181~
二子玉川	6時台	0.00%	0.00%	0.27%
	7時台	1.33%	0.57%	0.19%
	8時台	0.53%	0.71%	0.00%
	9時台	6.19%	2.61%	0.00%
渋谷	6時台	6.92%	0.35%	0.00%
	7時台	0.00%	0.20%	0.00%
	8時台	0.92%	0.31%	0.00%
	9時台	2.06%	0.00%	0.00%
永田町	6時台	0.32%	0.00%	0.00%
	7時台	0.52%	0.00%	0.00%
	8時台	0.82%	0.16%	0.00%
	9時台	3.55%	0.84%	0.21%

表-2 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	

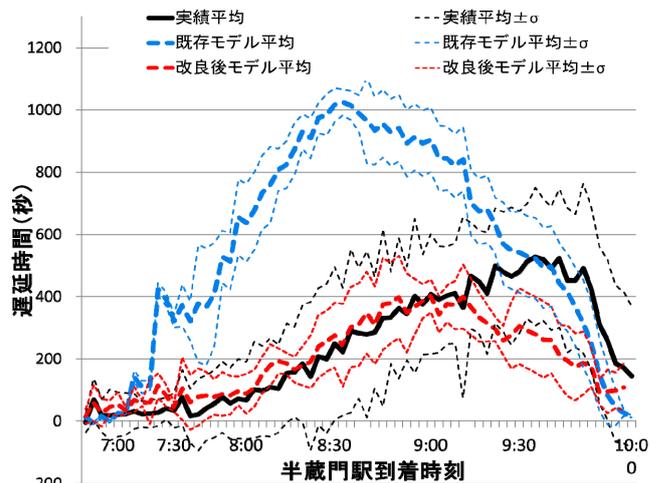


図-4 統合モデル改良後の再現性の変化  
長津田駅～半蔵門駅間の遅延時間

たに走行時間推計モデルを開発した。表-2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できた。

#### 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、全体的な再現性は向上したと考える。しかし、9:00までの遅延の傾向は再現できているものの、それ以降は遅延が収束し始め、遅延時間が過少に推計されている。この問題は突発的な停車時間の増加と半蔵門線区間内の実際の運行(実績の運転曲線図)の

反映が不十分なことに起因すると考える。発表時にはこうした点の改善も進めて報告したい。

#### 4. 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を目的とし、その課題の整理と改良を行った。その結果、中核となる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性は向上した。しかし、乗降時間推定モデルでは、突発的に発生する長時間の駅停車の再現が不十分であることや、走行時間推計モデルでは、誤差レベルではあるが過少推計が常時発生している区間があるなど、引き続き改良を進める必要がある。

今後より再現精度を向上させたいと、本シミュレーションモデルを用いて、遅延問題の解決のための対策案を反映させ、対策案の定量的な評価を行う。

**謝辞：**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心より感謝申し上げます。

本研究は、昨年度研究室に所属していた渡邊雄馬氏（榊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