

# 列車遅延連鎖のシミュレーションの構築と遅延対策案の評価

小林 渉<sup>1</sup>・川村 孝太郎<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建設工学専攻 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)

E-mail: me15045@shibaura-it.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 前芝浦工業大学大学院建設工学専攻 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)

E-mail: me13024@shibaura-it.ac.jp

<sup>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

複数の列車種別が高頻度で運行し、遅延が発生しやすい東急田園都市線と東京メトロ半蔵門線を対象に、突発的な停車発生時の運転整理を内生化した、列車遅延連鎖シミュレーションシステムを構築した。加えて確認時間や走行時間に関するルールの見直しをおこなった。このシミュレーションを行った結果、現況再現性は運転整理による停車時間を外生させていた従来のシミュレーションモデルと比較し、大幅に外生値を削減させた上で、再現性の低下も抑制できた。本論文では、このモデル精度について説明する。なお、このシステムにハードおよびソフトの幅広い遅延対策案を実施した際の遅延減少効果については発表時に報告する。

**Key Words :** Knock-on train delay, Agent simulation, High frequency operation, Improvement effects

## 1. はじめに

都市鉄道は朝ラッシュ時の高頻度運行に伴う列車間の余裕時間の減少により、列車遅延問題を引き起こしている。筆者らは、従来より列車1本ごとの駅間の走行と駅での停車を再現する、列車遅延連鎖シミュレーションシステムを開発し、遅延対策の検討を行ってきた<sup>1)</sup>。

このシステムは、全体で見ると実際の運行を非常に高い精度で再現している反面、区間別に見ると再現できていない状況であった。また、突発的な停車（本研究では車内急病人やドア引き込まれなど突発的に発生する支障時間が10分以下の停車をあつかい、人身事故などの長時間停車は対象外とする）など、時刻表の所定の停車時間に加えて60秒以上停車をした場合、停車時間を外生的に与えていた。これは再現性を向上させる一方、施策を講じた時の予測値の感度が低下する問題があった。

本研究では、運行実績データを解析した上で、運転整理を内生化したモデルの構築を行う。また列車の停車時間や走行時間に関するルールの見直しを行い、最新データを用いて実際の運行ルールをシミュレーションで再現

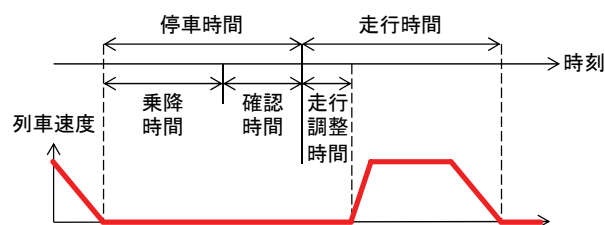


図1 本研究における用語の意味合い

する。その後、様々な施策実施時の遅延減少効果を示す。

本研究における用語の定義を以下に記す（図1参照）。

- ・乗降時間：列車の扉が開いている時間を指す。旅客の乗降並びに時刻表発車時刻までの時間調整を行う。
- ・確認時間：列車の扉を閉めてから、発車までの時間を指す。
- ・停車時間：乗降時間と確認時間を合わせた時間を指す。
- ・走行時間：確認時間終了後から次駅停車までの時間を指す。
- ・走行調整時間：シミュレーションと実際の走行時間のずれを補正するための時間を指す。例えば、実際の走行での運転士の認知・確認に要する時間や、緩やかな加減速などである。

## 2. 対象路線と遅延実態

本研究の対象路線は、東急田園都市線と東京メトロ半蔵門線の中央林間→渋谷→押上駅間の計40駅、48.3km区間とする。この路線は相互直通運転を実施している。最混雑時間帯の混雑率は池尻大橋→渋谷駅間で183%、渋谷→表参道駅間で175%である。また、列車は2分10秒間隔で運行している。使用したデータの一部を表1に示す。なお、運行実績データは、取得時刻に誤差を含むため、期間内に現地調査を行い補正をしたものを用いる。

遅延実績データの取得期間全328日で発生した、突発的な停車の有無による渋谷駅での最大遅延時間の分布を図2に示す。突発的な停車は取得期間全体の62%にあたる204日で発生している。突発的な停車の有無により、渋谷駅での最大遅延時間が平均3.2分異なる。また、突発的な停車が発生していない日も平均2.9分の遅延が発生している。

遅延実績データを集計し、1日あたりの要因別の突発的な停車の発生確率と発生時の最混雑車両の平均混雑率を図3に示す。図3のその他は対象路線のうち図中に記載のない26駅での平均発生確率である。突発的な停車は渋谷駅から溝の口駅での発生確率が高く、混雑率も高い傾向にある。発生要因に着目すると、渋谷駅や溝の口駅ではドア引き込まれの発生確率が高く、三軒茶屋駅や用賀駅では非常停止の発生確率が高い。駅により突発的な停車の発生要因の分布が異なる。この背景には混雑率や駅設備の違いなどがある。

長津田→清澄白河駅間の遅延時間を停車時間と走行時間に分けて示したのが図4である。図4は対象日のうち、典型的な遅延が発生している2014年10月28日の分布である。図4について、停車遅延はダイヤ上の停車時間と実績の停車時間との差を長津田→清澄白河駅間で集計したものである。走行遅延はダイヤ上の走行時間と実績の走行時間との差を長津田→清澄白河駅間で集計したものである。総遅延は停車遅延と走行遅延を合わせたものである。

停車遅延は全時間帯において100~200秒発生している。渋谷駅に8:00頃までに到着する列車は走行遅延がマイナスとなっている。これは走行時間に余裕時間が含まれているためである。この余裕時間が停車遅延を吸収している。時間の経過とともに走行遅延がプラスに転じ遅延が発生する。これは突発的な停車の発生による遅延や乗降人員の多い駅での停車時間の増加と高頻度運行が、機外停車(駅間での停車)を起きやすくさせ、走行時間を増加させた結果、余裕時間で遅延を吸収できなくなるためである。渋谷駅に9:30頃に到着する列車から、列車間隔に余裕が生まれ、遅延が収束に向かう。

表1 使用データ一覧

データ名	期間
発着時刻表	2014.11で最新のもの
運行実績データ	2014.7~11のうち平日20日分
遅延実績データ	2013.4~11, 2014.4~11の16か月
応荷重データ	2010.11~12, 2013.2~3のうち平日28日, 1日3本程度
ビデオ映像	2010.11~12のうち平日15日分
信号コード表	2014.11で最新のもの

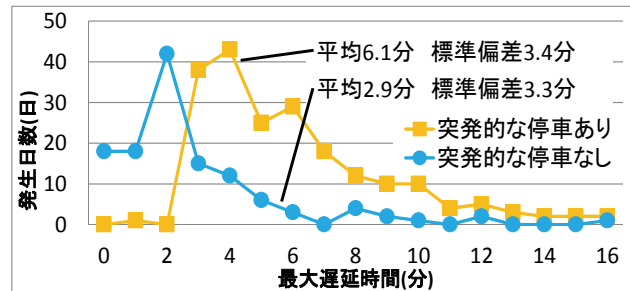


図2 渋谷駅での最大遅延時間

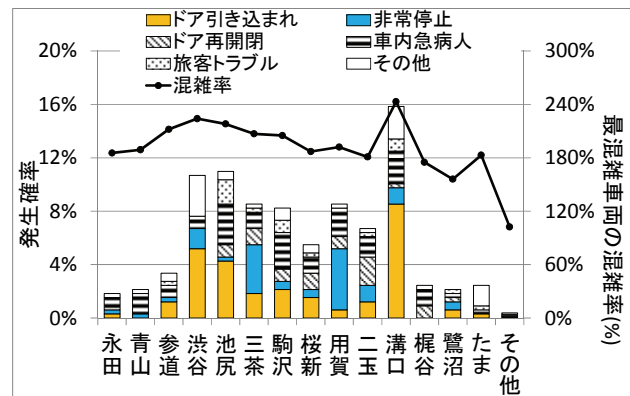


図3 突発的な停車の発生駅と混雑率

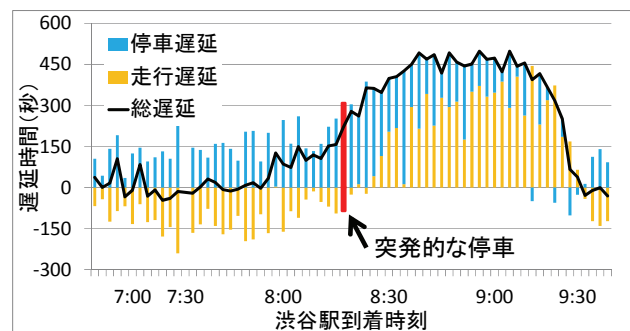


図4 長津田→清澄白河駅間の遅延発生状況

## 3. 従来のシミュレーションの課題と対応

従来のシミュレーションシステムの課題とその対応方法を以下に列挙する。

### (1) 長時間停車を外生的に与えている

従来のシミュレーションでは、突発的な停車やそれに伴う運転整理など、所定の停車時間に加えて60秒以上の停車が発生した場合、発生理由に関わらず停車時間を直

接与えている。本研究では運行実績データや遅延実績データを用いて、突発的な停車の発生駅、停車時間そして運転整理範囲を抽出する。その後、互いの関係をルール化し、運転整理を内生化したモデルの構築をする。

### (2) 半蔵門線内の確認時間が過小推計されている

従来の確認時間推計モデルは田園都市線の駅ホーム上のビデオ映像を基に構築し、全線に適用していた。半蔵門線の確認時間は、従来のモデルでは5~10秒過小に推計されることが現地調査から明らかになった。本研究では、新たに半蔵門線確認時間推計モデルを構築する。

### (3) 田園都市線内の走行時間が過小推計されている

本シミュレーションの列車走行は、発車および速度変化の指示を受けると、0.2秒後に最大加減速度で加速または減速を行うものである。しかし実際の運行では、運転士の確認作業や、旅客の快適性を考慮した緩やかな加減速など、シミュレーション上で再現できていない部分が存在する。シミュレーション上では走行時間が過小に推計され、遅延の波及を十分再現できていない。従来から全駅に走行調整時間を5秒間としているが、田園都市線内の走行時間が過小に推計され、課題が残る。本研究では、運行実績データを解析し走行調整時間を路線別に設定する。

## 4. シミュレーションの構築と再現性

### (1) 運転整理を内生化したモデルの構築

突発的な停車と運転整理の範囲および停車時間を示したものが図5である。本研究における運転整理は、突発的な停車発生直後に、前後の駅で所定の停車時間に加えて60秒以上の停車をしていた場合とする。図から運転整理に関し以下3つのオペレーションが判明した。

- ・郊外の駅で発生すると停車時間に関わらず運転整理が広範囲である。
- ・都心側で発生すると後方駅でも運転整理を行う傾向がある。
- ・渋谷駅および渋谷駅を跨ぐ運転整理が少ない。

突発的な停車発生後の運転整理範囲と停車時間の決定ルールを、図6のフローチャートに示す。図中の運転整理指示の駅数は、記載の範囲内でランダムに与える。また、発生箇所がたまプラーザ以西の場合、前方の運転整理端部は用賀、桜新町、駒沢大学のいずれかの駅をランダムに与える。運転整理指示駅数をランダムに与える理由として、運転整理範囲は運転指令員の経験知により判断が異なると考えたためである。運転整理による各駅での停車時間は、突発的な停車による停車時間を与え、前

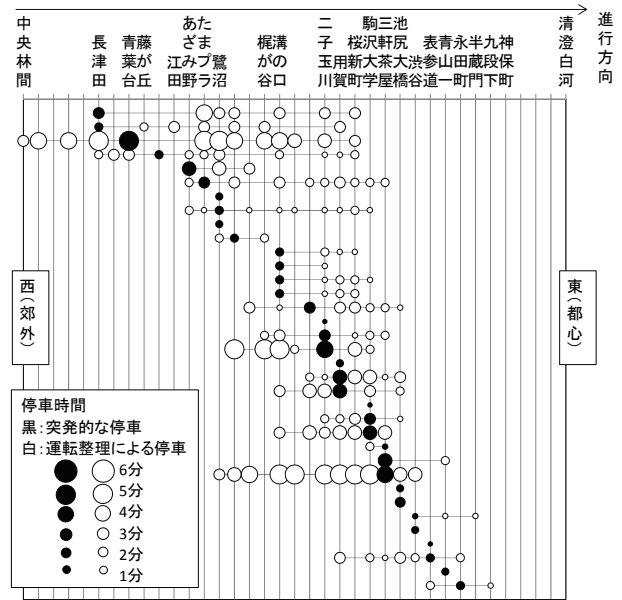


図5 突発的な停車の発生と周辺への影響

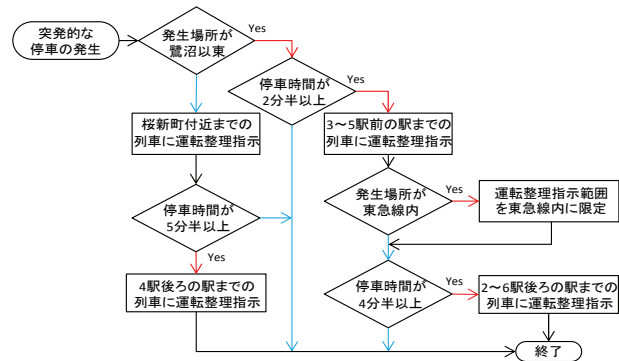


図6 運転整理ルールを内生化したモデルのフロー

表2 外生的に与える停車回数

	全停車回数	77640 停車/20日
長時間停車を全て外生的に与えた停車回数	1263 停車/20日	
全停車に対する割合	1.6 %	
運転整理を内生したモデルで与えた停車回数	27 停車/20日	
全停車に対する割合	0.035 %	

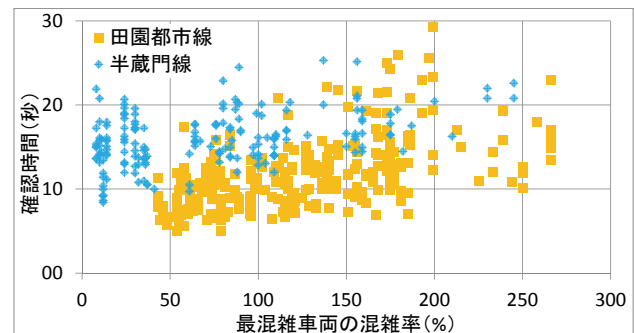


図7 確認時間と混雑率の関係

方の運転整理端部の駅のみ、その1/2の値とした。

シミュレーションで外生的に与える停車数を表2に示す。ルール化を行うことで外生的に与える停車数を98%削減できた。

## (2) 半蔵門線確認時間推計モデルの構築

各駅で取得した確認時間とそのときの混雑率の関係を図7に示す。混雑率を50%ずつ区切ったときの、確認時間の平均と標準偏差を表3に示す。田園都市線確認時間推計モデルは、従来の研究で全線にわたり用いられている。図7、表3から田園都市線と半蔵門線では確認時間の分布が異なることが分かる。本研究では、半蔵門線確認時間推計モデルを、現地調査で得た平均値と標準偏差を用い構築する。なお、田園都市線については、現地調査で得た値と田園都市線確認時間推計モデルの値に、統計的に有意な差が存在しないため、従来の値を使用する。

## (3) 列車発車時指示後の停車時間設定

列車間隔が広く、列車が自由走行していると考えられる早朝時間帯を対象に、シミュレーションと実際の走行時間を比較した。結果として半蔵門線では5秒程度、田園都市線では10秒程度過小に推計されることが分かった。この結果から半蔵門線は5秒間、田園都市線は10秒間を、走行調整時間として与える。

## (4) 九段下駅確認時間に関する特別ルールを削除

従来のシミュレーションは2010年のデータで構築していた。九段下駅と神保町駅間が駅間距離が短く、当時の九段下駅では、神保町駅停車中の列車が発車後、ドア閉めアナウンスやドア閉め操作、確認作業を行っていた。乗降終了後の確認時間が他駅よりも長くなるため、九段下駅に限って確認時間を20秒延ばしていた。

本研究で用いる2014年時点で、神保町駅の旅客乗降中に九段下駅のドア閉めを行えるように作業を変更し、他駅と確認時間の違いが見られないことを確認したため、このルールを削除する。

## (5) モデルの統合、実行条件の設定

新たに作成したモデルと、既存のモデルとの統合を行う。シミュレーション全体のフローチャートを図8に示す。走行時間推計モデルと乗降時間推計モデルは従来のルールをそのまま用いる。本研究では2014年7～11月の平日20日間を対象とし、各日との残差RMSを比較することで再現性の確認を行う。実行条件の違いから表4に示す4種類のモデルでシミュレーションを行った。

## (6) シミュレーションの再現性

シミュレーションを行った結果を図9、図10に示す。図9、図10の平均値と標準偏差の算出方法を以下に記す。

- ・実績値：20日間の平均値と標準偏差。
- ・推計値：各日10回（モデル1,2は各日5回）のシミュレーションを平均し、一番平均に近い1回の結果を当該日

表3 路線別確認時間の平均値と標準偏差

確認時間 (秒)	田園都市線確認 時間推計モデル		田園都市線 現地調査		半蔵門線現地調査 (半蔵門線確認時間 推計モデル)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
~49%	7	2	7.9	1.6	15.1	4.3
~99%	9	2	10.0	5.0	16.5	2.9
~149%	11	4	11.4	3.1	16.3	2.8
~199%	14	4	14.3	6.2	17.6	2.5
200%~	15	5	17.4	6.1	20.5	2.0

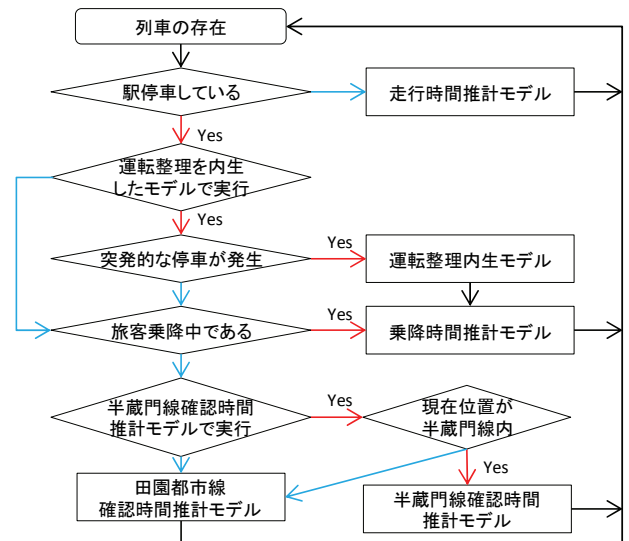


図8 モデル全体のフロー

表4 4種類のモデルの実行条件

	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
運転整理を 内生化したモデル	×	○	×	○
半蔵門線確認 時間推計モデル	×	×	○	○
田園都市線 走行調整時間	5秒	5秒	10秒	10秒
九段下確認ルール	○	○	×	×

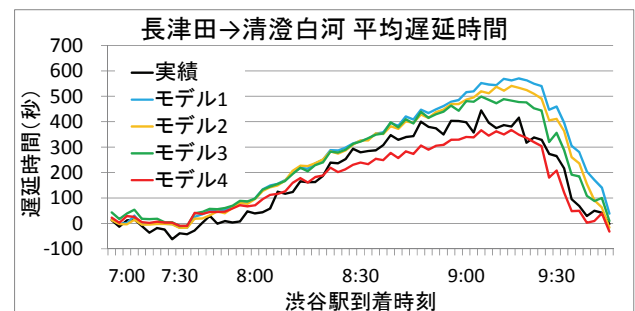


図9 モデルの現況再現性 (平均遅延時間)

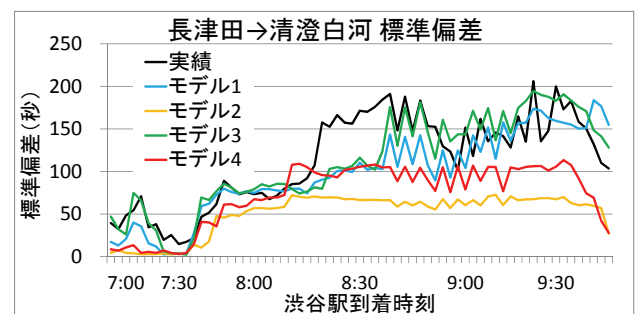


図10 モデルの現況再現性 (標準偏差)

の代表とする20日間の平均値と標準偏差。

運転整理を内生化したモデルでも、大きな精度の低下は見られなかった。

遅延時間に着目すると、モデル3,4の方が実績値に近い値を推計した。これはモデル1,2に含まれる九段下駅の確認時間のルールを削除したことで、推計遅延時間が小さくなったためと考えられる。

続いて標準偏差に着目する。モデル2,4はモデル1,3と比べ実績値に近い標準偏差を推計できなかった。これは停車時間のばらつきを再現できなかったためと考える。モデル2とモデル4を比較すると、モデル4の方が実績値に近い推計結果となった。要因として、半蔵門線確認時間推計モデルの構築により、後続列車への遅延波及が従来より再現できたためと考える。

次に主要駅間の残差RMSを表5に示す。モデル3,4の渋谷→半蔵門駅間および半蔵門→清澄白河駅間の残差RMSが、モデル1,2と比較して減少した。これは、半蔵門線確認時間推計モデルの構築により、停車時間を精度良く推計できたためである。停車時間を精緻に推計でき、前方列車との間隔が確保された結果、過度に列車間隔を詰めることがなくなり、走行時間の再現性も改善された。走行時間については、田園都市線についても走行調整時間を変更したことで、駅間の走行時間は改善された。一方で一部区間においては、設定時間が長く後続列車へ影響する区間も見受けられたため、改善の余地がある。

## 5. おわりに

本研究では、突発的な停車と運転整理に関し、運行実績データを用い解析を行い、運転整理を内生化したモデ

表5 主要区間別残差RMS

20日平均 残差RMS(秒)	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4	区間長
長津田⇒清澄白河	104.4	84.6	66.5	47.4	38.1km
長津田⇒鷺沼	38.4	28.0	47.9	39.0	9.9km
鷺沼⇒二子玉川	36.3	37.6	68.4	50.9	5.3km
二子玉川⇒渋谷	43.2	85.8	50.2	80.3	9.4km
渋谷⇒半蔵門	111.3	167.1	40.2	61.5	5.1km
半蔵門⇒清澄白河	88.1	89.4	51.4	60.0	7.4km
長津田⇒半蔵門	60.7	53.9	43.3	87.9	30.7km

ルの構築を行った。このモデルを組み込みシミュレーションを実行した結果と、長時間停車を外生的に与えたモデルでは再現性に大きな差異がなかった。次に、路線別に確認時間が異なることから、半蔵門線確認時間推計モデルの構築を行った。シミュレーションを実行した結果、半蔵門線内の列車運行をより再現できるようになった。

発表時には施策導入時の遅延変化について報告する。本研究で対象とする施策は、確認時間の短縮化、閉そく区間の分割、移動閉そくシステムの導入、2面3線化、ホームドアの設置等である。

**謝辞：**データのご提供並びに研究に対する数多くのご意見を頂いた、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ご心より感謝申し上げます。なお、本研究は科学研究費基盤B（課題番号 70334539、代表：福田大輔東京工大准教授）の助成を受けて実施している。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 川村孝太郎, 神田大輔, 岩倉成志: 複数の列車遅延対策案の効果分析～東急田園都市線と東京メトロ半蔵門線を対象に～, 第21回鉄道技術・政策連合シンポジウム, S9-1, 2014