

# 高頻度運行に伴う列車遅延の回復方策に向けた シミュレーション

仮屋崎 圭司<sup>1</sup>・日比野 直彦<sup>2</sup>・森地 茂<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構（〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1）

E-mail:kei.kariyazaki@jrnt.go.jp

<sup>2</sup>正会員 政策研究大学院大学 准教授 大学院政策研究科（〒106-8677 東京都港区六本木7-22-1）

E-mail:hibino@grips.ac.jp

<sup>3</sup>名誉会員 政策研究大学院大学 教授 大学院政策研究科（〒106-8677 東京都港区六本木7-22-1）

E-mail:smorichi.pl@grips.ac.jp

我が国の首都圏鉄道は輸送力増強や利便性向上のため、高密度ネットワーク、高頻度運行、相互直通運転等の施策を実施してきたが、その副作用として朝ラッシュ時に慢性的な列車遅延が発生し、新たな課題が生じている。高頻度運行を行う都市鉄道は、駅での旅客流動に起因して停車時間の増加が発生し、これに伴う駅間の列車間隔の縮小により走行時間が増加している。それらは各々の要因で遅延時間が拡大するだけでなく、相互に影響を与えて波及・拡大する。そこで本研究では、これまでに構築した運行挙動を再現するシミュレーションモデルについて、列車運行挙動の変化に伴い停車時間を内生的に設定するモデル改良を行い、駅での停車時間の増加と駅間の列車走行時間の増加を一体的に再現するシミュレーションモデルを構築する。また、このモデルを用いて、遅延発生後における遅延時間の早期回復方策について検討を試みる。

**Key Words :** train delay, delay propagation, high frequency operation, simulation

## 1. はじめに

首都圏の鉄道は、高密度な鉄道網整備、列車の長編成化、高頻度運行、相互直通運転の実施、ホームドアの設置等の施策により、世界に誇れる都市鉄道システムを構築している。しかしながら、これらの施策は大きな成果を上げた一方、その副作用として、①通勤時間帯の慢性的な遅延、②人身事故、車両故障等により発生した遅延の広域的な連鎖、③一度発生した遅延の回復に数時間も要してしまうといった回復困難性の問題等が顕在化し、首都圏鉄道に新たな課題が生じている。

鉄道の運行遅延に関しては、近年、研究や調査が行われており、遅延の現象把握および原因究明、さらに発生抑制方策の検討が進められているが、駅の停車時間と駅間の列車走行を一体的に分析した既往研究は少ない。また、一度発生した遅延の早期回復方策に関する検討についても、十分に成されているとは言い難い。高頻度運行を行う都市鉄道は、駅での旅客流動に起因して停車時間の増加が発生し、これに伴う駅間の列車間隔の縮小により走行時間が増加している。それらは各々の要因で遅延

時間が拡大するだけでなく、相互に影響を与えて波及・拡大するため、個々の対策は必ずしも効果的に機能せず、十分な解決に至らないことも懸念される。

そこで本研究では、これまでに構築した列車運行挙動を再現するシミュレーションモデルについて、列車運行挙動の変化に伴い駅停車時間を内生的に設定するモデル改良を行い、駅での停車時間の増加と駅間の列車走行時間の増加を一体的に再現するシミュレーションモデルの構築を行う。さらに、これを用いて、遅延発生後における遅延時間の早期回復方策について検討を行うことを目的とする。

## 2. 遅延の定義と使用データ

### (1) 遅延の定義

列車種別や運行区間が単純な路線では、ダイヤ上の遅延が発生しても、利用者がその影響を殆ど意識しない場合がある。個々の利用者は、自分が実際に利用する列車の駅での待ち時間と駅間の所要時間の増加に対し遅れを

意識するためである。つまり、利用者にとっての遅延とは、期待した時刻と実際の目的地到着時刻との差を意味する。一方で、事業者にとっての遅延とは、ダイヤ上の時刻と実際の運行時刻との差を意味し、路線の列車運行状況を示すものである。

本研究は、利用者にとってのサービス改善を目指すものであるため、前者の利用者にとっての遅延を扱うものとし、駅間の所要時間の増加量を運行遅延と定義して、以下の検討を進める。

## (2) 使用データ

本研究の分析は、列車運行実績値を用いて行う。列車運行実績値は、自動進路制御装置（PRC：Programmed Route Control）により得られるデータの一つであり、駅毎に各列車の到着時刻、出発時刻が秒単位で記録されている。これにより各列車の運行状況を時系列に把握することが可能である。対象路線は、東急田園都市線および東京メトロ半蔵門線とする。データ取得日は平成21年1月19日（月）、時間帯は7:00～11:00である。なお、東急田園都市線は渋谷駅到着7:50～9:00の急行を、二子玉川駅～渋谷駅（6駅間）の区間で各駅停車とする準急運転を実施しており、列車毎の混雑を平準化し遅延の抑制を図っている。準急運転時間帯における渋谷駅での最大到着遅延時間は約9分であった。

列車運行実績値は列車1本1本の運行状況を、駅および駅間で連続的に把握できるため、発生した遅延が路線に波及する様子を捉えることが可能である。しかし、駅停車時間の構成や駅間の速度変化についての情報を得ることは出来ないため、駅間の列車挙動については別途の分析が必要である。

## 3. 列車運行シミュレーションモデル

### (1) モデルの概要

運行ダイヤ、信号コード表、運転曲線図、列車性能を入力データとし、列車1本1本の駅間の運行挙動を再現するシミュレーションモデルを構築する。モデルはセルオートマトン理論を適用し、列車間の相互作用と列車信号方式により時系列で変化する走行速度を、列車毎に決定する。なお、駅における列車の停車時間は、列車の発着間隔、車内混雑率、ホーム上の旅客滞留などにより値が変動するため、本来は列車の駅間運行挙動と利用者行動による駅停車時間の推定とを一体的に再現するシミュレーションモデルが必要である。しかし、本研究はより列車運行に着目した分析を行うため、列車運行実績値から得られる列車毎の駅停車時間の実績値を適用した。対象路線は、東急田園都市線および東京メトロ半蔵門線の二

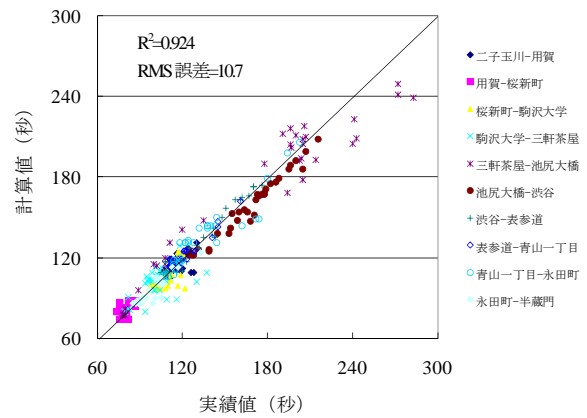


図-1 駅間走行時間の比較

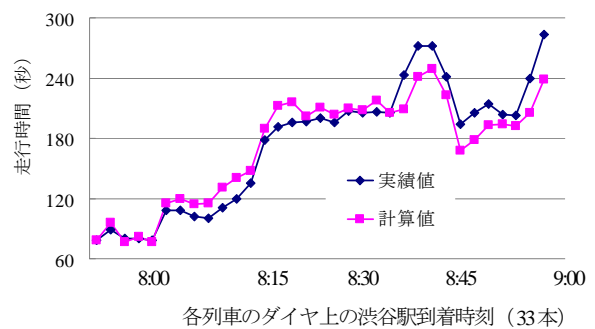


図-2 駅間走行時間の比較  
(三軒茶屋駅～池尻大橋駅)

子玉川駅～半蔵門駅間（10駅間）とし、平成21年1月19日（月）の準急運転時間帯7:50～9:00頃（列車33本）のデータを用いた。

なお、本研究ではNagel-Schreckenberg<sup>1)</sup>の1次元のセルオートマトンモデルを適用し、列車の相互作用に基づく列車の運行挙動を再現している。セルは対象路線の線路閉そく割と同様に分割した。

### (2) モデルの再現性

図-1に駅間走行時間の実績値とシミュレーションモデルによる計算値の比較を示す。最大で約50秒の残差が発生しており、十分な再現性が確保されるに至らず、更なる精度向上が必要である。（サンプル数330：10駅間×列車33本、重相関係数0.92）。しかし、分析対象区間において最も駅間走行時間の増加量が大きくなった三軒茶屋駅～池尻大橋駅間（図-2）について、列車毎に走行時間の増加量を比較すると、遅延の発生および回復のタイミングの傾向は概ね再現されており、他の駅間についても同様な傾向を示した。そこで本稿はこのシミュレーションモデルについて、駅停車時間の設定に関する改良を行うこととする。

## 4. 駅停車時間の設定

駅毎の停車時間と発着時間を各々に合計し、1駅当たり割戻した際の発着時間と停車時間の関係を図-3に示す。対象駅は多くの列車で車内混雑率が180%を超える二子玉川駅から渋谷駅までの7駅とした。また、停車時間が増加する要因は、発着時間の他に車内混雑率、乗降客数、ホーム上の旅客滞留、駅構造など様々な要因が影響することが知られている。このため、それらの影響を鑑みて、図の停車時間は、発着時間を60秒毎にランク分けし、各ランクに属する列車の停車時間を平均した値を記している。両者には正の相関関係があることから、先行列車の出発後に後続列車の到着時隔が大きくなると、駅の乗客が増加して後続列車の停車時間が増加するといった一般的に知られる事象を読み取ることができる。

そこで、前節のシミュレーションモデルにおいて駅毎に発着時間と停車時間の関係を図-4のとおり設定する。駅毎列車別の停車時間は、運行ダイヤで設定された停車時間を最小値とし、運行ダイヤ上の発着時間を超過した場合に増加する。旅客の発生率は駅毎に一定と仮定し、運行ダイヤで設定された発着時間に対する必要停車時間がダイヤ上の停車時間となるように、駅毎に停車時間の増加率を設定した。図の傾きは停車時間の増加率を示しており、ターミナル駅である渋谷駅や三軒茶屋駅の傾きが大きくなっていることが読み取れる。

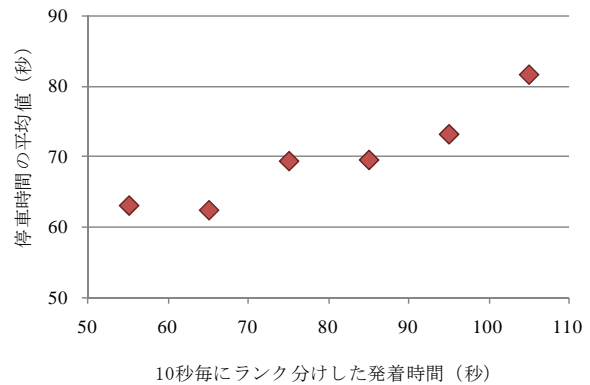


図-3 発着時間と停車時間の関係（二子玉川駅～渋谷駅）

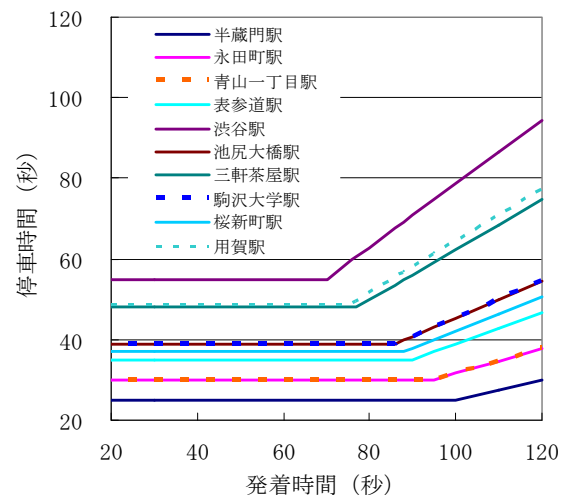


図-4 発着時間と停車時間の設定

## 5. 遅延回復対策の検討

### (1) シミュレーション設定

朝のラッシュ時間帯（8：00～10：30）を想定し、開始の約2時間（8：00～10：00）は125秒間隔で列車を運行させ、その後の約30分間（10：00～10：30）は運行間隔を30秒増加し、155秒間隔で列車を運行させる。区間は、二子玉川駅から半蔵門駅までとし、優等列車の追越しはないものとする。駅毎列車別の停車時間は前節の図-4で示したとおり、発着時間の増加による停車時間の増加を考慮する。この様な設定のもと、ある列車が二子玉川駅で30秒の発車遅れが生じたとして、シミュレーションを実施した。結果を図-5のダイヤグラム図に示す。

二子玉川駅で30秒の発車遅れにより、先行列車との離れによる発着時間の増加が生じ、下流の各駅で停車時間の増加が発生している。上流方の後続列車は、列車間隔が縮小して線路上に密な状態で在線しており、駅間の走行時間の増加が発生し、遅延の影響が波及している様子が読み取れる。

運行ダイヤ上の停車時間や走行時間には若干の余裕分が含まれていることから、遅延時間が最大となる20本

目以降は所要時間が緩やかな回復傾向を示す。その後、列車の運行が155秒間隔となると、余裕時間が増加し予め列車間隔が広がるため、急速に回復へ向かい、155秒間隔の8本目の列車で遅延が概ね解消され収束傾向にあることが分かる。なお、155秒間隔の運行の場合、列車間隔に乱れが生じていない状態においても、125秒間隔運行に対して発着時間30秒分の停車時間の増加が生ずるため、駅間の所要時間は125秒間隔と比べて大きな値を示す。

### (2) 対策の検討

125秒間隔と155秒間隔で運行する各々の列車本数は変えずに、155秒間隔で運行する列車（12本）の発車時刻を変更したケースについて、シミュレーションを行う。

遅延発生後に直ちに、155秒間隔の列車を運行することが、遅延を最も早期に回復する手法と考えられるが、輸送量低下の視点からラッシュ時の適用は非現実的と考えられる。そこで、表-1のように、155秒間隔の列車を3本毎に4分割して介入する場合と、1本毎に交互に介入する場合との計3ケースについてシミュレーションを実施する。交互運行の結果は図-6のダイヤグラム図に、また

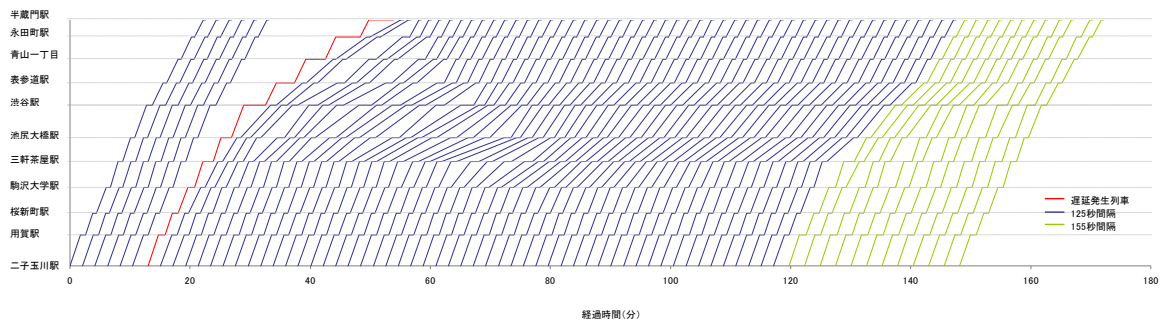


図-5 ダイアグラム図 (基本ケース)

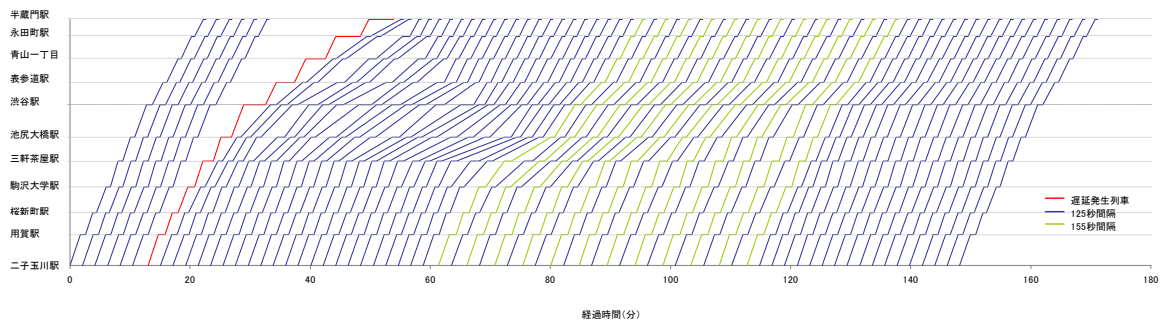


図-6 ダイアグラム図 (③交互ケース)

表-1 シミュレーションの設定条件と結果

| 検討ケース | 設定条件   | 計算結果               |                |            |
|-------|--|--------------------|----------------|------------|
|       |  | 最終列車(No.69)の渋谷駅発時刻 | No.30以降の平均所要時間 | 遅延回復時間の合計値 |
| 基本ケース | No.57~No.69(計12本)  | 2:42:39            | 19:57          | -          |
| ①連続   | No.30~No.41(計12本)  | 2:42:03            | 15:58          | 2:39:27    |
| ②4分割  | No.30~No.32, No.39~No.41, No.48~No.50, No.57~No.59(計12本)                                 | 2:43:08            | 18:02          | 1:16:41    |
| ③交互   | No.30, No.32, No.34, No.36, No.38, No.40, No.42, No.44, No.46, No.48, No.50, No.52(計12本) | 2:42:02            | 16:52          | 2:03:16    |

(二子玉川駅～渋谷駅間)

各ケースにおける所要時間の変化を図-7に示す。

運行間隔上の余裕時間をもって、先行列車との間隔が保持されることにより、各駅間の走行時間の回復が図られ、特に、交互ケースの場合は、早期に遅延が回復する結果となった。交互運行開始後の平均所要時間は、基本ケースと比べて約3分/本の遅延回復となっており、全体では約2時間の遅延回復が図られている。なお、4分割ケースにおける経過時間120分頃の所要時間の増加は、遅延回復後の155秒間隔の運行により、発着時間の増加に伴う停車時間の増加が生じたことに起因する。

## 6. おわりに

本研究は、列車の相互作用により列車1本1本の駅間運行挙動を再現するシミュレーションモデルについて、列車運行挙動の変化に伴い停車時間を内生的に設定するモデル改良を行い、駅での停車時間の増加と駅間の列車走行時間の増加を一体的に再現するシミュレーションモデルを構築した。また、このモデルを用いて列車運行間隔の乱れによる遅延の波及現象の把握を行った。さらに、運

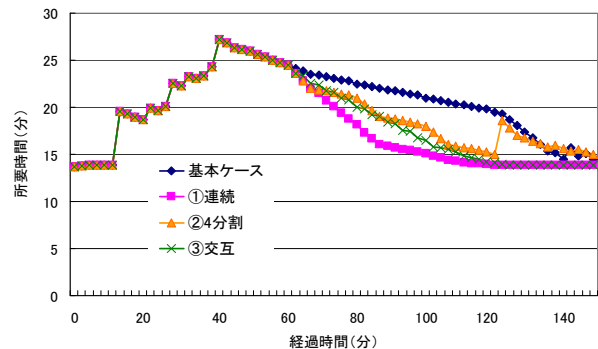


図-7 列車毎の所要時間 (二子玉川駅～渋谷駅間)

行間隔が異なる列車を計画的に配置することにより、発生した遅延を早期に回復できることを確認した。今後の課題としては、停車時間の設定方法について詳細な検討を行い、分析結果の精査を行うことを考えている。

**謝辞:** 本研究は科学研究費助成金(課題番号:21360242)ならびに東京急行電鉄株式会社, 東京地下鉄株式会社, 東武鉄道株式会社の協力のもとで行われた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) Nagel, K. and Schreckenberg, M. : A cellular automaton model for freeway traffic, Journal de Physique I France 2, 2221-2229, 1992.
- 2) 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, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, pp.879-886, 2011.
- 3) 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂 : 列車間隔に着目した運行遅延に関するシミュレーション分析, Vol.67, No.5, pp.1001-1010, 2011.