

高頻度運行における 列車運行遅延の回復方策の検討

仮屋崎 圭司¹・日比野 直彦²・森地 茂³

¹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@jrtr.go.jp

²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

³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

東京都市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、より実効性の高い列車運転方法の改善の視点から、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

東京都市圏の鉄道は、輸送力増強や利便性向上のため、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あげた一方、その副作用として、通勤時間帯の慢性的な遅延、遅延の広域的な連鎖、遅延回復の長時間化が発生しており、東京都市圏の鉄道は新たな課題に直面している。

鉄道事業者のHPに掲載された遅延証明書の発行状況から概算すると、東京都市圏では、毎日約1600本の列車が遅延しており、300万人を超える人がその影響を受けていると推計される。発生した遅延の平均遅延時間を約10分とし、列車遅延の社会的費用を試算すると、10年間で約1兆9000億円と推計され、その経済的な損出の膨大さが伺われる。

列車遅延の対策方法としては、①高頻度運行および相互直通運転の中止、②路線容量の増強、③利用者意識の改革、④列車の運転方法の改善の4つが主に挙げられる。

高頻度運行および相互直通運転の実施は、顕在化した遅延の主な要因の一つであることから、これを中止することは最も簡単な方法であるが、車内および駅内の混雑が再発してしまい解決策とは言えない。東京都市圏鉄道が未だに混雑率190%以上の路線が多く存在することを鑑みると、路線容量の増強による抜本的な対策なくしては遅延の発生を抑制することは極めて困難な状況と考えられる。しかし、路線容量の増強は大規模投資を伴い、長期的な時間を要してしまうため、一部都心の限られた場所を除けば現実的な対策として考え難い。大規模投資が不要な施策として、利用者意識の改革による駆け込み乗車の抑制や旅客流動の円滑化が考えられるが、一朝一夕に達成されるものではない。その中で、列車の運転方法の改善は、大規模投資を伴わずに早急な効果が期待され、かつ利用者行動の変化を伴うことなく、事業者側の取り組みだけで実施可能であることから、最も実効性が高く、かつ確実な効果が期待される対策と考えられる。

なお、列車運転方法の検討においては、駅での列車到着間隔が、旅客発生量との相関性により駅停車時間に影響を及ぼすと考えられることから、双方の連動性を考慮

した分析が必要である。

そこで本研究では、駅停車時間の増減を内生化した列車運行シミュレーションモデルを用いた分析を行い、列車運転方法の改善の視点から、より実効性の高い対策を目指し、遅延発生後における遅延の早期回復方策について検討を試みる。

2. 遅延の定義と使用データ

(1) 遅延の定義

本研究は、遅延の発生や遅延発生時の列車の運行状態といった現象把握に着目し、列車の駅到着時刻の遅れや、駅の停車時間および駅間の走行時間の増加の仕方を把握するものである。そのため、ダイヤ上の時刻と実際の運行時刻との差分を遅延と定義して、列車間隔やダイヤとの比較により列車の運行状況の把握を行う。

(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。

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、本研究ではNagel-Schreckenberg¹⁾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。また、本研究はより列車運行に着目した分析を行うため、まず駅停車時間に列車運行実績値から得られる列車毎の実績値を適用し、列

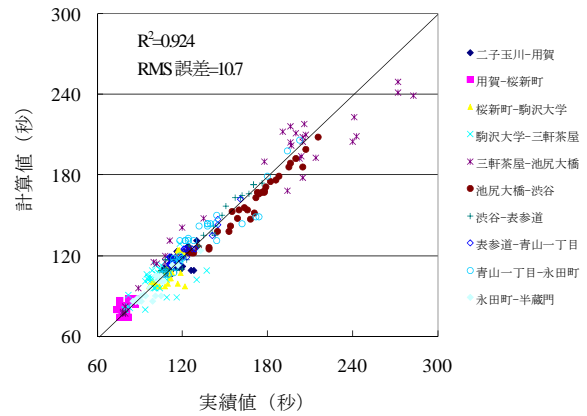


図-1 駅間走行時間の比較

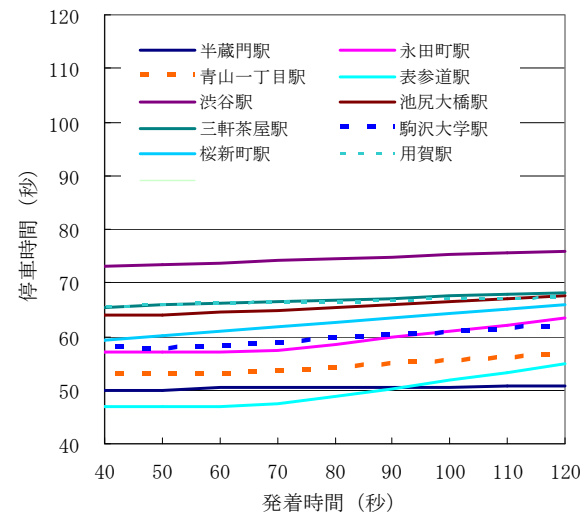


図-2 発着時間と停車時間の設定

車運行シミュレーションの再現性を確認した。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。

(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、更なる精度向上が必要であるものの（サンプル数330：10駅間×列車33本、重相関係数0.92）、列車毎の走行時間の比較において、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いることを確認したため²⁾、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った。

(3) 駅停車時間の設定

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-2のとおり設定する。発着時間と停車時間の関係は、平成22年11月15日（月）から平日

9日間の準急運転時間帯の列車33本を対象とし、列車運行実績値を集計して設定した。したがって、回帰式は、ある一日の発着時間と停車時間の関係を再現しているのではなく、ラッシュ時間帯の平均的な発着時間と停車時間の関係を再現していると言える。

駆け込み乗車等の特異値や、サンプル数の偏りの影響が大きいと考えられることから、特異値の影響を緩和するため、発着時間を60秒毎にランク分けし、各ランクの停車時間の平均値を算出した。この値と、60秒毎の発着時間のプロットから回帰式を算定した。なお、発着時間は安全上の離隔がとられるため、回帰式の適用範囲は駅毎に異なるが、発着時間の最小値以上となる。

5. 遅延回復対策の検討

(1) 対策案の概要

本稿では、遅延回復に焦点を当てたシミュレーションを行う。高頻度運行を実施している路線においては、通勤時間帯に遅延が発生すると、駅での断面輸送力を確保するため、到着した列車は乗降が完了し次第、次々に出発させるといった運行手法がとられることがある。このとき、列車毎の間隔は通常以上に狭まるため、列車は駅間で加速・減速を繰り返す、時には停車を強いられる。しかし、この方法は遅延時間を拡大させてしまい、列車毎の所要時間も増加することから、遅延の早期回復の妨げとなっており、結果的に輸送力を低下させていると考えられる。

そこで、旅客乗降と列車運行との連動性を考慮して、列車間隔を変化させ、当該列車および後続列車の運行状況が、遅延の回復時間に与える影響を分析する。具体的には、図-3に示すように、できるだけ駅で長く停車し、先行列車との距離をあげ、走行時間が短くできるような運行を探ることを試みる。この方法の要点は、列車を間引くことなく、A駅での停車時間を変数とし、B駅への到着時刻が最早となる運転パターンを見出す点にある。

(2) 後続列車の追込み時隔

図-4にシミュレーションから得た渋谷駅における先行列車と後続列車の時隔曲線を示す。池尻大橋駅～渋谷駅間の走行時間が約25秒増加している場合において、池尻大橋駅での停車時間を変化させた際の、運行挙動の違いを示している。意図的な停車時間の増加（出発時間の調整）を実施しない際の池尻大橋駅出発時刻を横軸0秒とした。

渋谷駅の発着においては、先行列車が渋谷駅を出発する時に、後続列車は池尻大橋駅から約1455m～約1485mの位置に在線している場合に、池尻大橋駅での出発調整

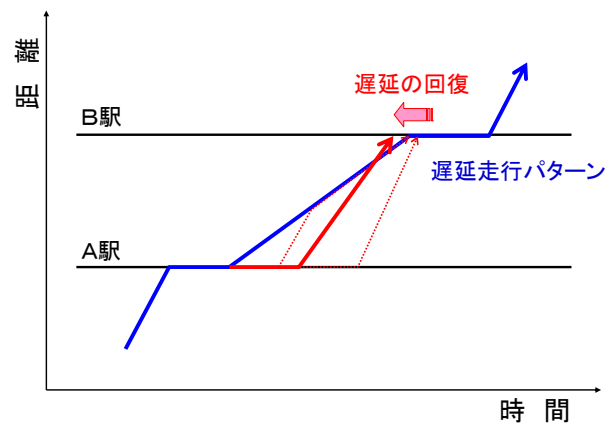


図-3 遅延回復方法のイメージ図

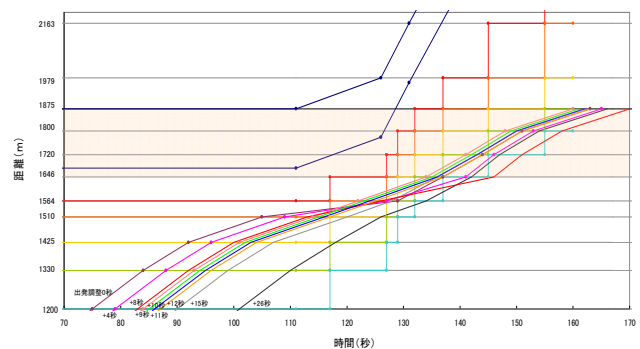


図-4 後続列車の追込み時隔（池尻大橋川駅～渋谷駅）

を実施しない場合と比べて、渋谷駅へより早く到着する結果となった。池尻大橋駅での出発調整時間においては、7秒間の時間幅である。この結果から、遅延の回復における出発時間調整の効果と、効果が期待できる範囲に幅があることが示唆される。

(3) 対策案の効果

田園都市線で駅間走行時間の増加が発生しやすい区間の一つが、池尻大橋駅～渋谷駅間である。平日9日間の運行実績値から、渋谷駅で5分以上の到着遅延が発生した際の準急運転時間帯における、この区間の走行時間の増加量は平均で約30秒であった。そこで、渋谷駅の停車時間増加に起因して、池尻大橋駅～渋谷駅間の走行時間の増加量が30秒で定常化した状態をシミュレーション上に設定し、池尻大橋駅で列車1本のみ出発時間調整を実施した場合の後続列車の運行状況の変化を計算した。最も回復効果が表れた池尻大橋駅での出発調整時間14秒のダイヤグラム図を図-5示す。池尻大橋駅での出発時間調整は、三軒茶屋駅～池尻大橋駅間を走行する後続列車に影響が波及し、この列車の池尻大橋駅の到着時間は、無対策の場合と比べて遅延している。このため、池尻大橋駅の出発遅延も拡大しているが、池尻大橋駅～渋谷間の走行時間が回復することにより、渋谷駅では遅延が回復している。また、これにより、以降の後続列車や、半蔵

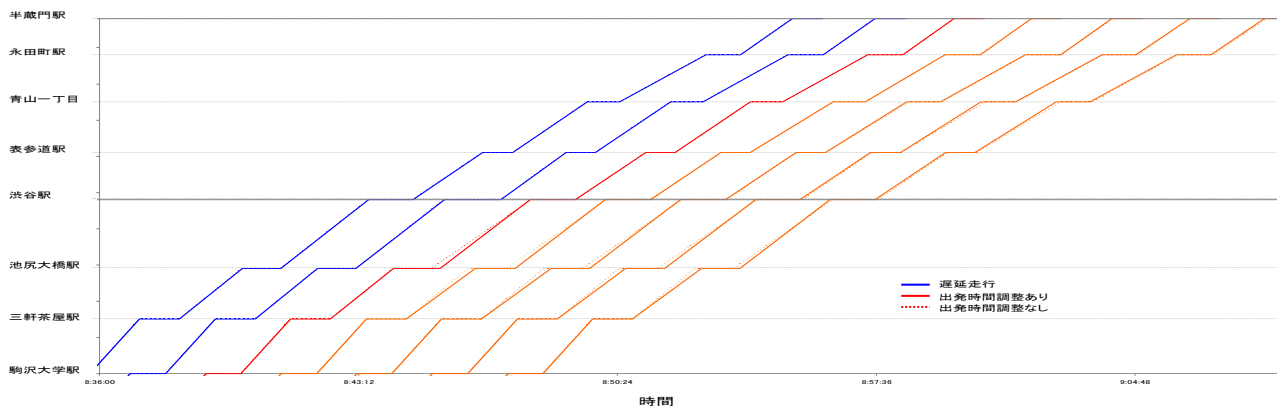


図-5 ダイアグラム図

門線内における遅延も回復傾向にあり、対策の効果が示されている。出発時間調整を実施した2本後ろを走行する後続列車では、無対策と比べて池尻大橋駅～渋谷駅間の走行時間が15秒短縮し、渋谷駅の到着時刻は4秒回復する結果となった。

(2) 対策案の適用範囲

池尻大橋駅での出発調整時間の実施について、池尻大橋駅～渋谷駅間の走行時間の増加量別による、効果の発現範囲を図-6に示す。後続列車2本目で遅延が回復していると、その後も回復が続くことが、過去のシミュレーション結果から分かっているため、渋谷駅到着時刻における後続2本目の回復状況を指標とする。点線に囲まれた範囲が、後続列車2本目で回復がみられた範囲である。

走行時間の増加量30秒の場合、池尻大橋駅での調整時間は、13秒～21秒で効果があることが分かる。最も効果が発揮されるのは14秒となっている。出発調整を実施した列車は、走行時間増加の大小に関わらず、図-4の最小追込み時隔の運転パターンで走行した場合が、最も遅延が回復することから、図は直線で示されている。後続列車2本目の回復範囲については、閉そく割りの影響により、不規則な線形となっている。

遅延の初期段階で見られるような、走行時間の増加量20秒～30秒程度の場合は、本対策の効果発現範囲に幅があるため、先行列車や当該列車の出発時間に多少の変動があった場合においても、回復効果が期待される。遅延の初期段階での出発時間調整は、効果的かつ遅延増加のリスクが小さいことから、実行可能性が高い考えられる。

6. おわりに

本研究は、実効性の高い列車運転方法の改善の観点から、駅間運行挙動を再現するシミュレーションモデルを用いて、旅客乗降と列車運行との連動性を考慮して、列車間隔を変化させた場合の、当該列車および後続列車の

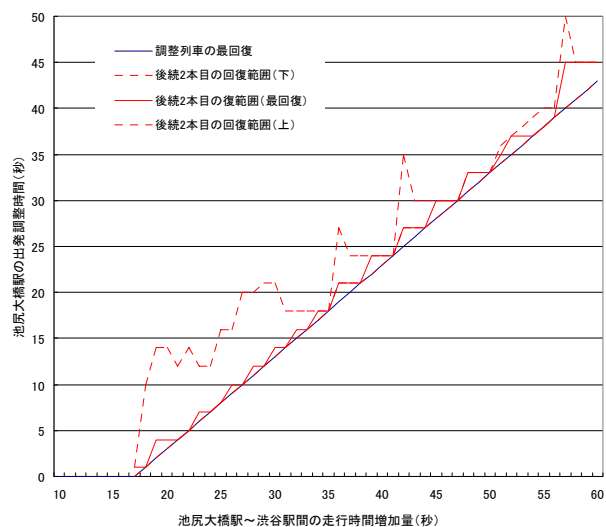


図-6 対策案の効果発現範囲

運行状況が、遅延の回復時間に与える影響の分析を行った。その結果、遅延時間が比較的大きくない場合において、出発調整時間の効果と実施可能性を示唆した。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、複数の列車において対策を実施した際の影響分析等を行うことを考えている。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、東京急行電鉄株式会社、東京地下鉄株式会社、東武鉄道株式会社からは協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。なお、本研究は科学研究費（課題番号:21360242, 25420536）の助成を得て行ったものである。

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) 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, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, pp.1001-1010, 2011.
- 3) 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.