

高頻度運行下の列車間隔に着目した 遅延回復方策の検討

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、列車の運行管理の視点から、列車間隔に着目した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、列車の運行管理の視点から、列車間隔に着目した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、列車運行シミュレーションの再現性を確認した。対象路線

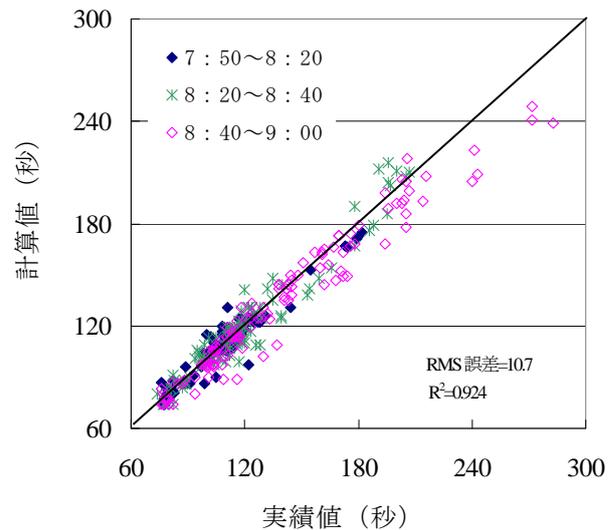


図-1 駅間走行時間の比較

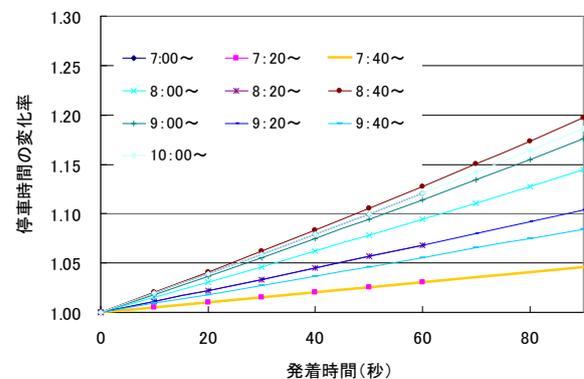


図-2 発着時間と停車時間の設定（三軒茶屋駅）

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) 駅間走行時間の再現性

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

列車の駅停車時間は、駅での旅客発生量や車内混雑率等の影響を受けることが知られている。これらの要素は、時間帯で異なるだけでなく、駅毎に、また列車種別などに起因して列車毎に異なることから、本モデルにおいて

は、駅別・列車別に平均停車時間を設定した。また、列車の到着遅れによる停車時間の増加をシミュレーションに反映するため、発着時間の増加に対する停車時間の変化率を、時間帯別に20分単位で設定した。これにより、列車運行挙動の変化に伴う停車時間の変化を内生化し、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ことを可能とするシミュレーションモデルを構築する。

東急田園都市線および東京メトロ半蔵門線の駒沢大学駅～半蔵門駅間（7駅間）において、平成22年11月15日（月）から平日9日間の通勤・通学時間帯7：00～10：20を対象とし、駅別、列車別に平均停車時間を設定した。なお、駆け込み乗車等の特異値の影響を緩和するため、集計に当っては上位10%のサンプルを削除した。同様の列車運行実績値を用いて、駅別、時間帯別の発着時間に対する停車時間の変化率を設定した。一例として、三軒茶屋駅における発着時間と停車時間の変化率の関係を図-2に示す。

(4) 遅延状況の再現

列車運行シミュレーションモデルに、列車運行挙動の変化に伴う停車時間の変化を内生化し、通勤・通学時間帯における遅延発生から回復までの一連の変化を本シミュレーションモデルで再現した。駅停車時間の設定において使用した平日9日間の列車運行実績値とシミュレーションによる再現値との比較を図-3に示す。なお、再現された推定結果は、特定の一日の遅延状況を再現しているのではなく、日々のラッシュ時間帯の混雑による平均的な遅延の発生、拡大および回復状況を再現するものである。推定結果は、駅別、列車別の平均停車時間の設定において、駆け込み乗車等の特異値の影響を緩和するため、上位10%のサンプルを削除しているため、実績値の下辺を沿うような結果となっている。

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・減速を繰り返し、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

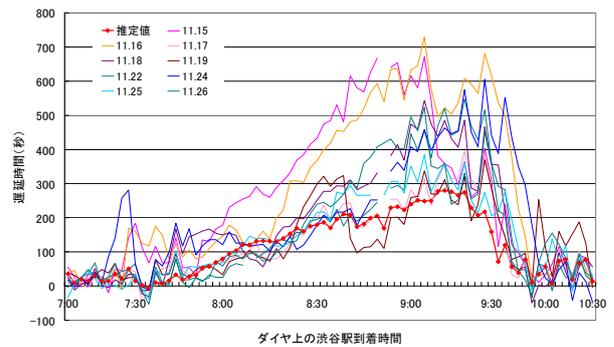


図-3 遅延状況の再現（駒沢大学駅～半蔵門駅）

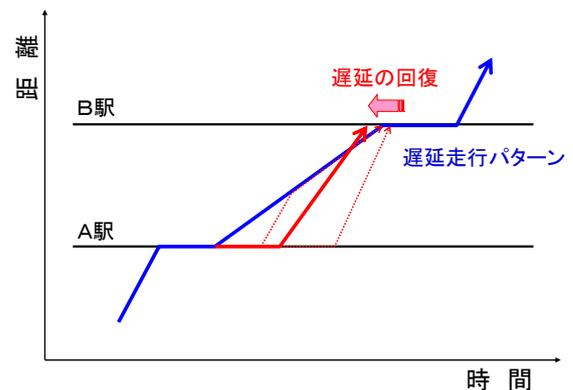


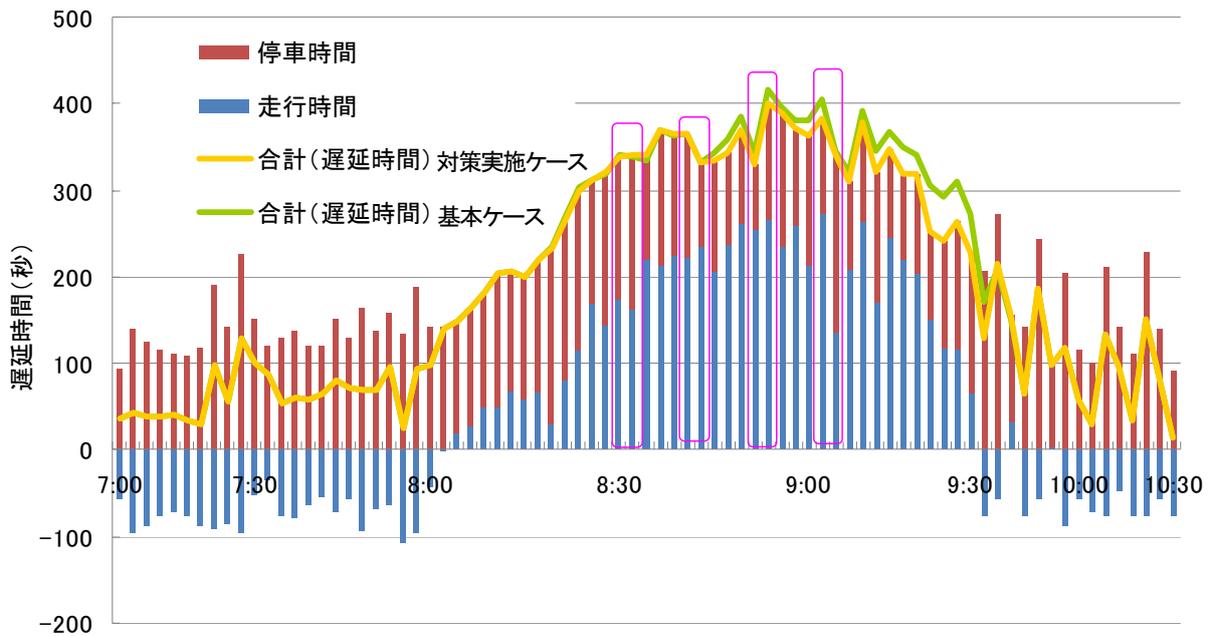
図-4 遅延回復方法のイメージ図

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で、発生した遅延の早期回復を試みる。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) シミュレーションの設定

ラッシュ時間帯の平均的な遅延状況を再現した図-3において、ダイヤ上で渋谷駅8：00到着の列車に遅延を発生させた。具体的には、駒沢大学駅で出発遅延2分を設定した。その結果、ダイヤ上で渋谷駅到着9：00頃の時間帯において駒沢大学駅～半蔵門駅間における遅延時間は約7分となる推定値を得た。このときの遅延時間の合計値は、図-5の緑線に示される。本稿では、この緑線に示される遅延状況を基本ケースとして、列車間隔に着目した遅延回復方策を実施することにより、遅延の早期回復を試みる。回復方策は、駅での出発時間調整の実施である。高頻度運行により、発生した遅延が回復することなく常態化している状況において、図-5の赤枠で囲む4本の列車について、池尻大橋駅で出発時間調整15秒を設



ダイヤ上の渋谷駅到着時刻

図-5 列車別のダイヤに対する遅延時間の構成 (駒沢大学駅～半蔵門駅)

定した。駅間の閉そく割に起因して、駅間毎に出発調整時間の適用可能範囲が存在することが分かっており⁴⁾、池尻大橋駅において、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出発調整時間15秒を設定した。

(3) 対策案の効果

出発時間調整の実施により、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、早期に遅延が回復する結果となった。対策実施後の遅延時間の合計値は、図-5の黄線に示される。準急時間帯の渋谷駅到着時間は、最大で約50秒の遅延回復が図られた。出発時間調整を実施した池尻大橋駅では、遅延が拡大する列車があり、池尻大橋駅での到着遅延は最大約70秒拡大する結果となったが、その列車においても、渋谷駅以降の各駅での到着遅延時間は回復する結果が得られた。全体の傾向としては、出発時間調整を実施した列車の後続列車において遅延が回復することとなった。したがって、出発時間調整の実施により、一時的な遅延が発生した場合においても、路線全体としては結果的に遅延の早期回復が図られる可能性が示唆される結果となった。

6. おわりに

本研究は、列車の運行管理の視点から、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、旅客の混雑に起因する日常的な遅延において、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.
- 4) 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂: 高頻度運行における列車運行遅延の回復方策の検討, 土木計画学研究・講演集, Vol.47, CD-ROM, 2013.