

輸送力を保持した遅延発生時の 運転再開手法の検討

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

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。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を用いて、輸送力保持の視点から時間信頼性の高いダイヤ設定について検討を行う。またトラブル等に起因する遅延について、路線特性を考慮した運転再開時の工夫による遅延拡大の抑制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

高頻度運行を実施している路線においては、一度遅延が発生すると、ダイヤを回復させる余裕時間が殆どないため、駅での列車到着間隔こそ等間隔でダイヤどおりであったとしても、列車間隔の縮小による駅間の走行時間の増加により、目的地までの所要時間の増加が発生する。これはラッシュ時間を過ぎて、ダイヤの運行間隔に余裕時間が生ずるまで継続する。このような状態がまさに定常化しているのであれば、そもそものダイヤ設定を見直すべきではないかという議論がある。

また、ある列車への利用者の集中等により遅延が発生した場合、運行する列車間隔の乱れにより、ダイヤで計画された単位時間当たりの列車本数を運行できず、輸送力の低下が生じている場合がある。その一例が、トラブル等により一時的に運行を見合わせた後に、再開した場合の運行状態である。運行見合わせ中に発生した大量の利用者が、駅に停車中の列車に集中するため、当該駅の出発時だけでなく、次駅以降においても乗降時間の増加が生じる。

そこで、本稿では、まず、輸送障害に至らない短時間の遅延について、早期回復を可能とする時間信頼性の高い運行ダイヤを検討し、設定したうえで、ラッシュ時

間帯の輸送力への影響を考察する。次に、輸送障害やトラブル等に起因する遅延についても、一定程度の頻度で発生していることから、比較的長時間の遅延について、運行見合わせ後の運行再開時を対象に、遅延拡大の抑制策について検討を試みる。

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。

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-Schreckenberg⁴⁾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。

(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。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。

5. 輸送力と所要時間の検討

(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

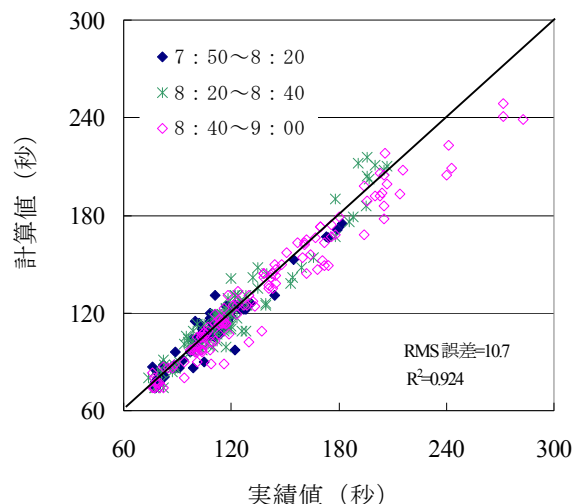


図-1 駅間走行時間の比較

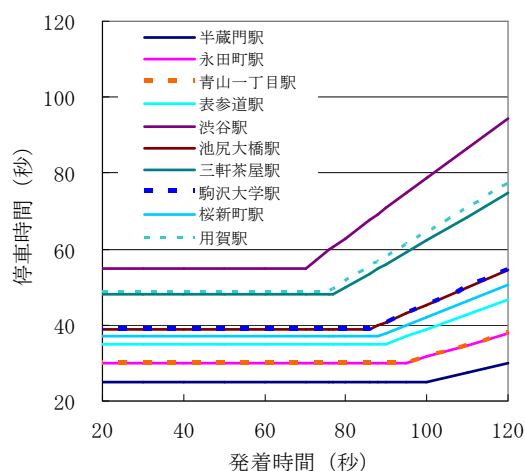


図-2 発着時間と停車時間の設定

図-2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。このような設定のもと、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-3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時間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

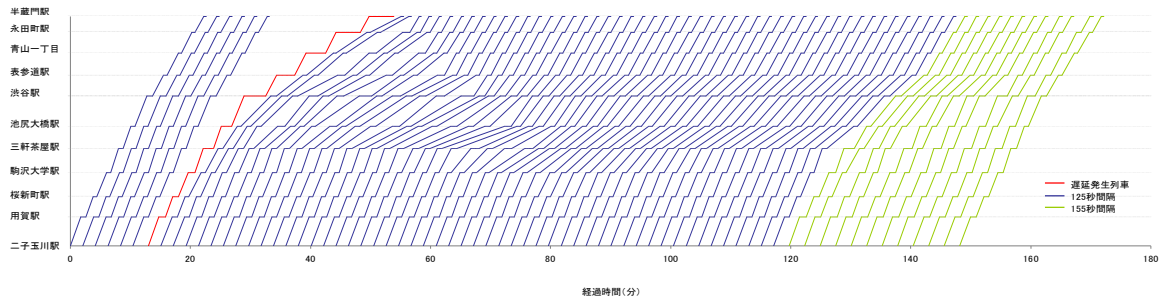


図-3 ダイヤグラム図（基本ケース）

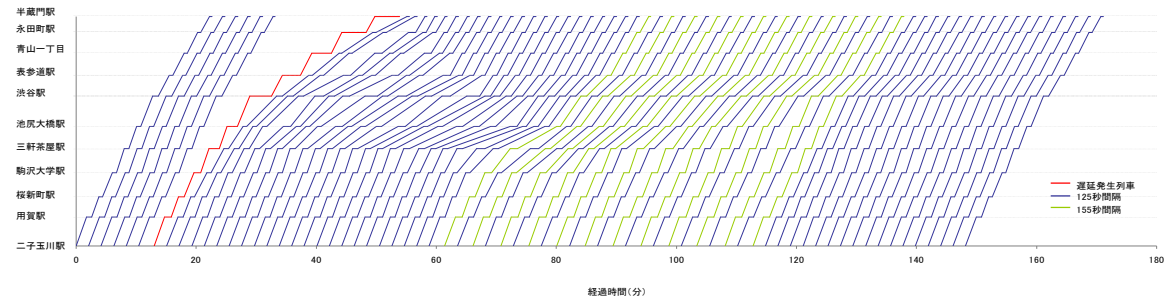


図-4 ダイヤグラム図（交互ケース）

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.58～No.69(計12本)	2:42:39	19:57	-
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

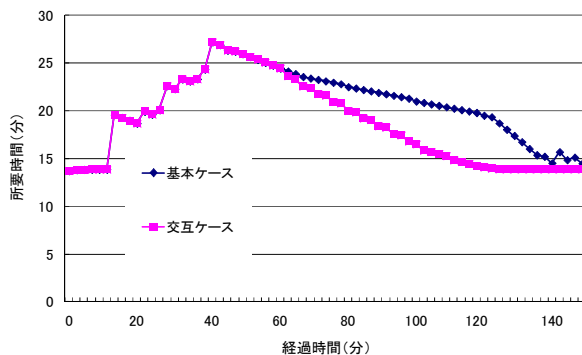


図-5 列車毎の所要時間（二子玉川駅～渋谷駅間）

示す。

(2) ダイヤの設定の検討

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、輸送量低下の観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、1本毎に交互に介入する場合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-4のダイヤグラム図に、また所要時間の変化を図-5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、交互ケースの場合は、早期に遅延が回復する結果と

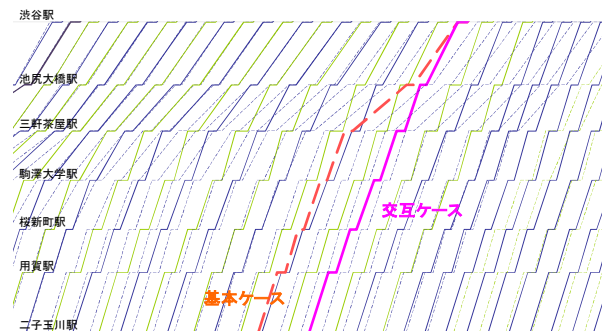


図-6 ダイヤグラム図の比較（二子玉川駅～渋谷駅）

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。

(3) 輸送力の考察

東京都市圏の鉄道を利用した鉄道トリップの約半数は朝8:00～9:00に集中しており¹⁾、また、東京都内にある事業所の就業規則上の始業時間は、約半数が8:30～9:00となっている²⁾。したがって、朝ラッシュ時における鉄道利用者行動は、所定の時刻に到着可能な列車を選択しているものと考えられる。また、東急田園都市線の駅別乗降客数は、渋谷駅の乗降客数が全駅合計の3割を占めており、乗降客数が渋谷駅に次いで2番目に多い溝の口駅のそれと比べて約4.5倍の乗降客数となっている³⁾。渋谷駅に向けて混雑率が上昇することから、田園都市線の利用者の多くが、ターミナル駅である渋谷駅を乗降の目的駅としていることが推察される。

これらを踏まえると、朝ラッシュ時において、9:00までに、渋谷駅に、何本の列車が到着するかが、利用者サービスの観点から輸送力を議論するうえで、重要な要素となる。

図-4について計算時間100～120分付近の拡大図を図-6

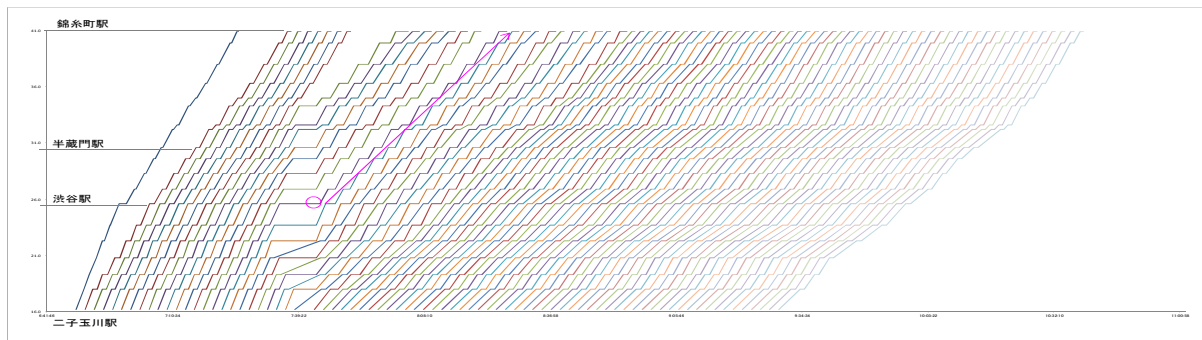


図-7 運転再開後の運行状況（二子玉川駅～錦糸町駅半蔵門駅）

に示す。基本ケースを点線で、交互ケースを実線で表記している。双方のケースの渋谷駅における列車到着本数は同じであり、交互ケースは基本ケースと比べて、渋谷駅の到着時刻が列車2本を見送った場合と同時刻の到着となっている。また、基本ケースの二子玉川駅～渋谷駅間の所要時間は、途中駅の到着時間は異なるが、遅延が発生していないときの所要時間とほぼ同じとなっている。したがって、交互ケースの赤線を渋谷駅到着時刻を9:00の列車と仮定した場合、交互ケースの設定は、渋谷駅において輸送力が確保されており、かつ、遅延の早期回復、時間信頼性の向上が期待されるダイヤとなっている。

遅らせて、池尻大橋駅発の列車との間隔調整を行った。調整時間は、ダイヤ設定における両列車の出発時間を鑑みて45秒を設定した。図-7にシミュレーション結果を示す。渋谷駅で出発調整を実施した列車の錦糸町駅到着時間は143秒増加したが、池尻大橋駅発の列車の渋谷駅到着は6秒短縮、錦糸町駅の到着時間は62秒短縮した。後続列車については、最終的に錦糸町駅の到着時間が206秒回復しており、出発調整を実施した列車の所要時間は増加したが、路線全体の遅延回復に貢献する結果を得た。

6. おわりに

6. 運転再開手法の検討

(1) シミュレーション設定

前述のシミュレーション対象区間を拡大した仮想ネットワークを構築し、運転再開における留意点を検討する。仮想ネットワークの複数の列車において、トラブル等の遅延発生に伴う一時的な運転見合わせを実施し、その後、運転を再開するシミュレーションを実施した。駅に停車中の列車は、発着間隔に対する停車時間の増加率を2倍に設定し、駅間に停車した列車については、先の設定と同様とした。振り替え輸送等による旅客の経路変更は想定しない。長時間の遅れの場合、前から順にはがすこともあるが、遅延の回復が遅くなるため、ここでは、一斉に運転再開するものとした。

(2) 再開方法の検討

シミュレーションの結果、池尻大橋駅に停車していた列車の遅延の増加率が高くなる結果となった。同時に発車させた場合、池尻大橋駅～渋谷駅間は、他の駅間と比べて駅間が長いので、駅での到着間隔が遅れてしまう。さらに、渋谷駅は他の駅よりも発着間隔に対する停車時間の増加率が高いため、停車時間が増加し、新たに遅延を拡大する列車となってしまったことが要因である。

そこで、当該列車について渋谷駅到着時の発着間隔の増加を防ぐため、渋谷駅停車の列車のみ、出発時間を

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を用いて、短時間の遅延の早期回復を可能とする、運行ダイヤと輸送力について考察し、目的地駅側の輸送力の視点から、輸送力を維持し、時間信頼性の高いダイヤ設定の可能性を示唆した。次に、トラブル等に起因する遅延について、路線特性を考慮した運転再開時の工夫により、遅延拡大の抑制について検討を行った。今後の課題として、遅延時間を変化させた感度分析等により、分析結果の精査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る。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) 第5回東京都市圏パーソントリップ調査
- 2) 労働時間管理等に関する実態調査，東京都労働相談センター，H21.3.
- 3) <http://www.tokyu.co.jp/railway/railway/west/gaiyou/jouko.html>
- 4) Nagel, K. and Schreckenberg, M. : A cellular automaton model for freeway traffic, Journal de Physique I France 2, 2221-2229, 1992.
- 5) 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.