

高頻度運行に伴う都市鉄道の遅延対策の検討

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@jrnt.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。しかし、都市鉄道の特徴である高頻度運行が及ぼす遅延の影響など、列車運行と遅延の伝播に関する現状分析は未だ十分になされておらず、その分析の不足が上述の深刻な問題を引き起こしていると言える。そこで本研究では、列車の相互作用によって列車毎の運行挙動を再現するシミュレーションモデルを構築し、それを用いて列車運行の視点から遅延の伝播について現象の把握を試みる。また、遅延の改善に向けた分析を行い、遅延発生後における遅延拡大の抑制方法および遅延の早期回復方法について、対策の可能性と方向性の検討を試みる。

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。そのため、首都圏鉄道は「概成された」と言われることがある。しかし、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、遅延をネットワーク構造の変化として扱い利用者均衡配分を行った研究¹⁾や、列車の運行と利用者行動による駅停車時間の推定を一体的に再現するシミュレーションモデルの構築²⁾がなされている。また、駅での利用者行動と駅間の列車運行挙動をマルチエージェントモデルを用いて推定し、遅延の発生および波及の現象を再現するシミュレーションモデルの開発³⁾などの研究が行われている。それに伴い、遅延の発生抑制や早期回復方策の検討が成されているが、その多くが駅における列車停車時間の増加に対する抑制方法に主眼をおいており、駅間の列車運行方法に着目した対

策の検討を行っている研究は少ない。

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、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。

そこで本研究は、列車の相互作用により線路上の列車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。さらにそれを用いて、列車の運行方法の工夫による遅延の早期回復方策の可能性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が、そのための現状分析として、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を試みる。そこで本報告では、後者の事業者にとっての遅延を扱うものとし、ダイヤからの遅れ時間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

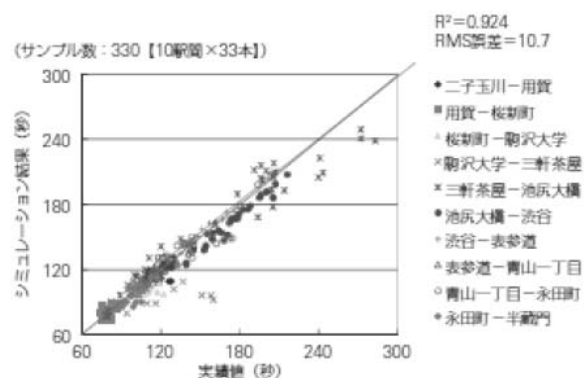


図-1 駅間走行時間の比較

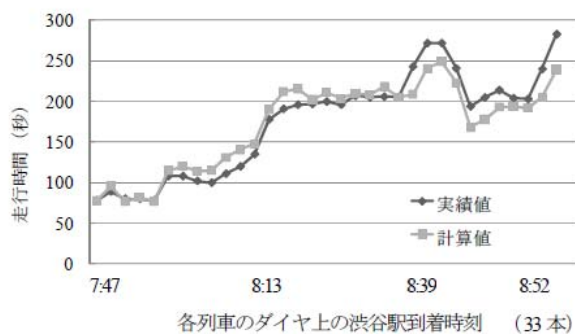


図-2 駅間走行時間の比較
(三軒茶屋駅～池尻大橋駅)

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-Schreckenberg⁵⁾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を用いて、列車運行の視点から遅延の伝播についての分析と、遅延の改善に向けた列車運行方法の対策検討を行う。

4. 遅延の伝播

上記のシミュレーションを用いて、駅停車時間と駅間走行時間の関係から、遅延時間の伝播・波及の仕方について分析を行う。駒沢大学駅～三軒茶屋駅間において、列車運行間隔を125秒で一定とし、三軒茶屋駅の停車時間の増加量と、各停車時間における列車毎の駅間走行時間の変化を図-3に示す。停車時間は5秒単位で増加させ、停車時間毎に14本の列車を運行させた。

三軒茶屋駅では、ダイヤで設定された停車時間に対して、15秒以上の増加が生じると、後続列車の駅間走行時間に影響が及ぶことが読み取れる。ダイヤに対する停車時間の増加量が15秒以上～30秒以下の場合は、走行時間の増加量が比較的小さく、増加率も一定の規則性はみられない。またNo.9以降の列車については、増加率が0でありNo.8列車の走行時間を維持している。一方で、ダイヤに対する停車時間の増加量が35秒以上の場合は、No.9以降の列車においても列車毎に走行時間が増加しており、その増加率は停車時間の増加量に比例している。これは、三軒茶屋駅での停車時間の増加に伴い、後続列車で駅間の一時停車が生じ、追い込み時隔と停車時間の合計時間が一定値となったためである。これによって、先行列車の停車時間の増加量が、後続列車の走行時間の増加量として付加され、後続列車の走行時間が増幅している。したがって、駅停車時間の増加に伴う遅延時間の拡大を抑制するためには、駅間を走行する列車の一時停車を回避することが有効であると言える。

5. 遅延対策の検討

(1) 列車間隔の保持

駅間を走行する列車の一時停車は、先行列車との離隔が縮小することにより発生する。先行列車の駅停車時間が増加し、後続列車において駅間の一時停車が予測される場合、これを回避するには、後続列車が停車中の駅において出発を遅らす、あるいは、駅間の走行速度を低下する、といった手法が考えられる。前者の出発を遅らす手法は、それを機に新たな遅延の発生が懸念されるため、本報告では後者の駅間走行速度の低下を扱うものとし、この運転手法による駅間停車の回避について検討を行う。

(2) 駅までの距離と到着時間

駅間の走行速度を低下させた際に先行列車が予測以上に早く駅を出発すると、後続列車の駅到着が遅れてしまう、つまり追い込み時隔が大きくなることが懸念される。しかし、追い込み時隔がほぼ等しくなる走行パターンは複数存在するため、より駅に接近している方が追い込み時

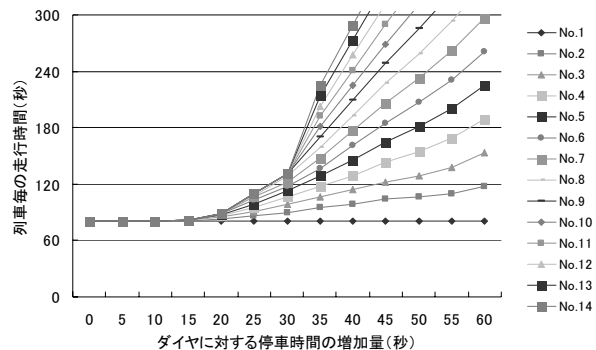


図-3 停車時間と走行時間の関係

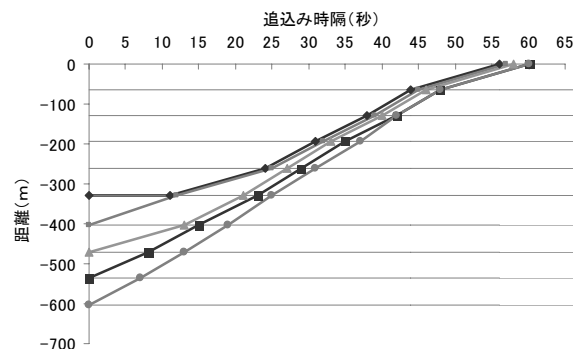


図-4 駅までの距離と追い込み時隔
(三軒茶屋駅～池尻大橋駅)

が小さくなるとは限らない。図-4は、先行列車が駅を出発する際の、後続列車の在線（閉そく）位置とそこから駅到着時間（追い込み時隔）の関係を示している。縦軸の補助線は、閉そく区間を示している。後続列車が駅手前で停車している場合、先行列車が出発しても最後尾の車両が閉そくを移動するまで信号現示が変わらないため、駅から離れた位置から進入した場合と比べ、双方の追い込み時隔は殆ど等しくなる。他の駅間など閉そく割りによっては、離れた位置からの進入した方が追い込み時隔が小さくなる場合もある。このため、三軒茶屋駅～池尻大橋駅間では先行列車が出発する際に、後続列車は駅まで約500mの位置に在線していると、先行列車の挙動に関わらず追い込み時隔に大きな遅れが生じない。つまり、駅間の走行速度を低下しても、それによる新たな遅延が生じない範囲が存在し、駅間の一時停車を回避する手法として運転速度の検討の有用性が示唆される。

(3) 運転手法の工夫（駅間走行速度の低下）

列車は先行列車との相互作用による速度制限と、線形や勾配から区間毎に制約される区間速度制限（ATCコード）の双方から信号現示を受けて運行されている。そこで遅延発生時において、先行列車との間隔を保持し、駅間の一時停止を回避する運転方法を支援するために、

通常の区間制限速度と異なる遅延発生時用の区間制限速度を設定し、それを適用した際の列車運行挙動の変化を確認した。対象区間は三軒茶屋駅～池尻大橋駅とし、平成21年1月19日の実績値において当該区間で走行時間が約1分増加した列車（ダイヤ上の渋谷駅到着8：11）に適用した。図-5はその結果であり、異なる区間制限速度による運転曲線と時間曲線を示している。駅出発から400m付近までは、後続列車の駅進入速度に影響がないよう減速を行っていない。その後、遅延発生時用の区間制限速度による運転（図-5 下図）は、速度低下により先行列車との間隔が保持され、一時停車を回避したことで通常の運転パターンと比べて走行時間が5秒短縮した。

後続の列車にも同様に遅延発生時用の区間制限速度を適用したところ、走行時間が15秒短縮する結果となった。これは先行列車の走行時間の短縮が、後続列車との列車間隔の保持において相乗的な効果を発揮するためであり、この様な速度低下の運転を繰り返すことで、この区間の遅延時間（走行時間の増加量）が連鎖して回復することを示している。しかし、この運転手法は先行列車の駅停車時間に大きく依存するため、大幅な停車時間の増加が生じた場合には効果がない。ただし、これらの結果は列車の運転において、必ずしも前へ前へと詰めるだけではなく、遅れが生じている場合は、あえて速度を低下させ、適度な間隔を保つことが遅延の早期解消につながることを示唆するものである。

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を構築し、これを用いて列車運行に着目した遅延現象の把握を行った。駅停車時間の増加に伴い後続列車において駅間の一時停車が発生すると、列車毎の走行時間が増幅し、遅延時間が拡大する。このため、遅延の拡大抑制手法の一つとして、駅間の一時停車を回避する運転方法の有効性を確認し、その検討を実施した。具体的には、駅間の列車走行において速度低下を実施する方法について検討を行い、遅延の回復を図るべくATCコードの変更による運転支援手法を提案した。しかし、その適用範囲および効果については更なる詳細な分析が必要であり、今後の課題である。他方で、本報告の結果は、遅延を回復するために、前へ前へと列車を進めるこれまでの運転思想に対して問題提起をするものであり、遅延改善に向けた施策の方向性と可能性を示唆するものである。

謝辞：本研究にあたっては、運輸政策研究所 伊東誠主

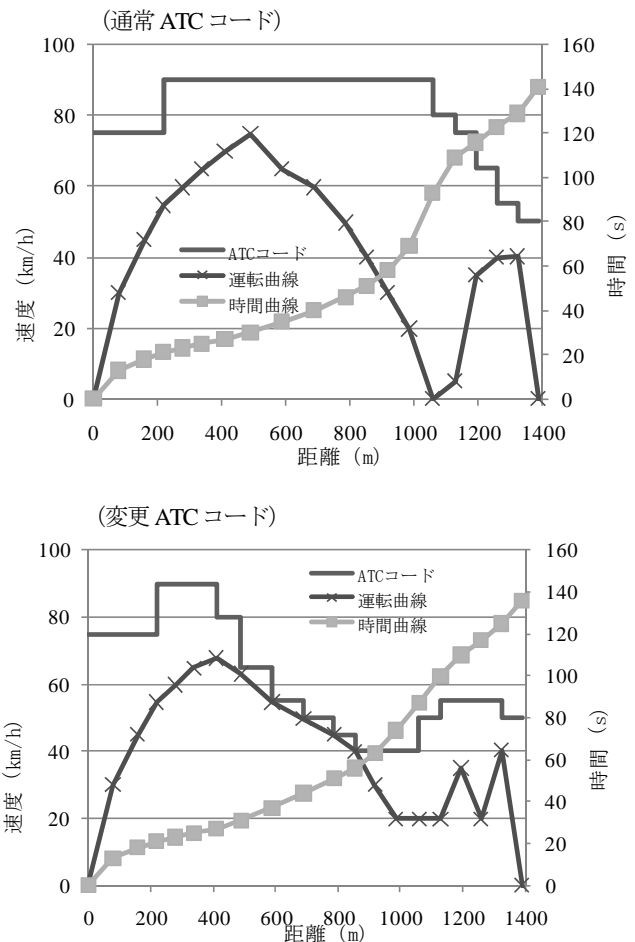


図-5 区間制限速度（ATCコード）と運行挙動

席研究員ならびに各研究員から貴重な意見を頂いた。また、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。

参考文献

- 1) 鳥海重喜, 中村幸史, 田口東: 通勤電車の遅延計算モデル, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, 50(6), pp.409-416, 2005
- 2) 國松武俊, 平井力, 富井規雄: 列車運行・旅客行動シミュレーションシステムの開発, 鉄道総研報告, Vol.21, No.4, pp.5-10, 2007
- 3) 上松苑, 岩倉成志: エージェントモデルによる東京圏都市鉄道の遅延連鎖シミュレーションの構築, 土木計画学研究・講演集, Vol.40, 5page, 2009
- 4) 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂: 都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.27, pp.871-879, 2010
- 5) Nagel, K. and Schreckenberg, M.: A cellular automaton model for freeway traffic, Journal de Physique I France 2, 2221-2229, 1992