

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*

Simulation Analysis of Daily Service Delay focusing on Train Headway*

仮屋崎圭司**・日比野直彦***・森地茂****

By Keiji KARIYAZAKI**・Naohiko HIBINO***・Shigeru MORICHI****

1. はじめに

列車の運行遅延は、ターミナル駅等で利用者の乗降時間の増加に伴い発生することが多い。しかし、列車毎に遅延時間の増加要因をみると、駅停車時間の増加（利用者混雑に起因）と、駅間走行時間の増加（線路上の列車混雑に起因）の2つに分類される¹⁾。この主因の一つに、現在の都市鉄道の特徴である非常に短い列車間隔がある。これにより高密度運行による大量輸送が可能としているが、一方で、列車の線路上の混雑が発生し、これに起因して列車の駅間走行時間が増加している。線路上に密な状態で運行している列車は、先行列車の速度変化に応じて、加減速を繰り返すこととなり、それは自動車交通における渋滞現象と類似する。つまり、線路上において列車の渋滞が発生している。このため、列車遅延の発生および波及・拡大のメカニズムを究明し、その対策検討を行うには、駅での列車乗降に関わる旅客流動のみならず、列車1本1本の挙動とそれらが互いに与える影響を時系列的に捉えることが不可欠といえる。

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²⁾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³⁾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⁴⁾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置いており、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。

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. 列車の運行間隔

(1) 列車運行実績値

自動進路制御装置（PRC：Programmed Route Control）により得られる列車運行実績値から、駅間を走行する列車毎の運行状態の把握を行う。列車運行実績値は、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。なお、この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。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。

(2) 駅における列車の等間隔運行

列車運行実績値をもとに、準急運転時間帯の33本の列車において、溝の口駅から半蔵門駅までの13駅間の所要時間における遅延時間の内訳を図-1に示す。図-1の枠で囲ったA、B、Cの3本の列車の遅れの要因について着目する。列車Aはその大部分が駅停車時間の増加である。列車Bは駅停車時間の増加と駅間走行時間の増加の割合が半々。列車Cは駅間走行時間の増加が遅れの要因の大部分を占めている。ここから駅間の走行状態を想定すると、列車Aはダイヤ通りのスムーズな運行であったのに対し、列車Cは先行列車との間隔が詰まっていたため、速度低下や一時停止等が頻繁に発生していたと考えられる。しかし、各駅での運行間隔をみると、図-2のように先行列車が出発した後、後続列車が到着するまでの時間（ここでは発着間隔と定

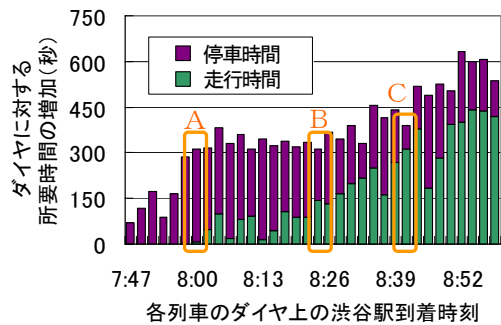
* キーワーズ：列車運行遅延、公共交通運用

** 正会員，修(工)，(財)運輸政策研究機構運輸政策研究所
(東京都港区虎ノ門3丁目18番地19号)

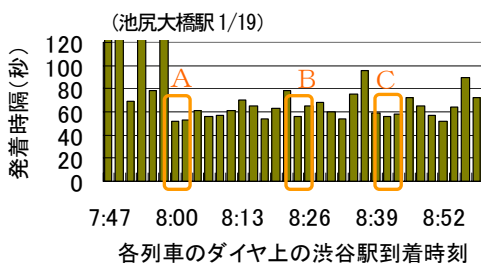
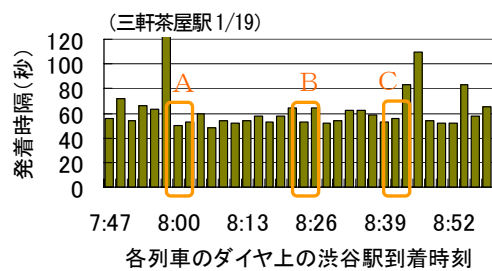
TEL:03-5470-8415、E-mail:kariyazaki@jterc.or.jp)

*** 正会員，博(工)，政策研究大学院大学 准教授

**** 名誉会員，工博，政策研究大学院大学 教授，
(財)運輸政策研究機構運輸政策研究所 所長



図ー1 列車毎の所要時間の増加量
(溝の口駅～半蔵門駅間)



図ー2 列車毎の発着時隔

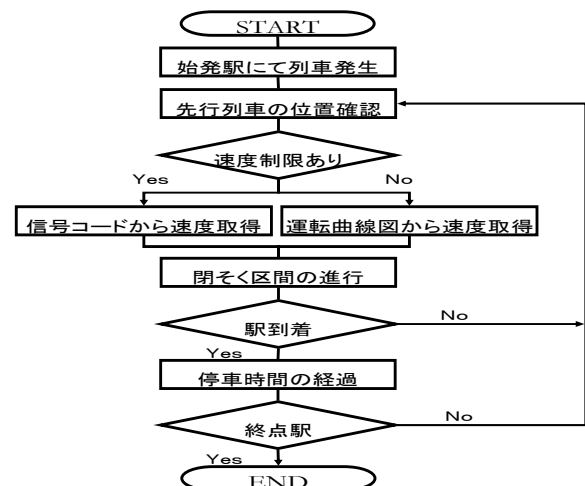
義する)に大きな差はなく、各列車とも同じ時間間隔で駅に到着していることが分かる。

朝ラッシュ時は、利用者の駅での待ち時間を最小にし、運転間隔の乱れによるダンゴ運転の発生を防ぐため、駅において等間隔運行を保つように列車運行が実施されている。日本の鉄道運行システムと鉄道事業者の技術が、現在の高密度な等間隔運行を可能としている。

このように各列車の駅間の運行状態が各駅での発着間隔に影響を与えないということは、列車Aのように先行列車との間隔が十分空いておりスムーズな駅間走行が可能な場合においても、列車Cのように先行列車との間隔が狭く各列車がその先行列車の運行挙動に左右されて運行している場合においても、どちらの場合も駅での発着間隔を一定に保つことが出来る。つまり、ある範囲においては列車の間隔に依らず狙った時刻に列車を到着させることが可能である。したがって、列車間隔の乱れに起因するダンゴ運転による遅延を発生させることなく列車間隔の最適性について議論することが可能であり、運行時の列車間隔に検討の余地があることを示唆している。

3. シミュレーションモデルの概要

そこで本研究のシミュレーションモデルは、遅延発生時の列車の運行状態といった現象再現に着目し、列車の駅到着時刻の遅れや、駅間の走行時間の増加の仕方を把握することを目的とする。運行ダイヤ、信号コード表、運転曲線図、列車性能から得られる情報を入力データとし、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の規則によりシミュレーションを実行する。図ー3にシミュレーションモデルのフローを示す。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、ホーム上の旅客の滞留等により値が変動するため、本来は列車の運行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、今回は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駅毎・列車毎の駅停車時間の実績値を適用する。



図ー3 シミュレーションモデルのフロー

4. シミュレーションの再現性

図ー4に列車運行実績値(平成21年1月19日)の駅間走行時間に対する計算値を示す。最大で約60秒の残差が発生しており、十分な再現性が確保されているとはいえない(サンプル数330:10駅間×列車33本、重相関係数0.91)。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いることが読み取れる(図ー5)。他の駅間についても同様な傾向を示したことから、今回はこのシミュレーションモデルを用いて、列車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。

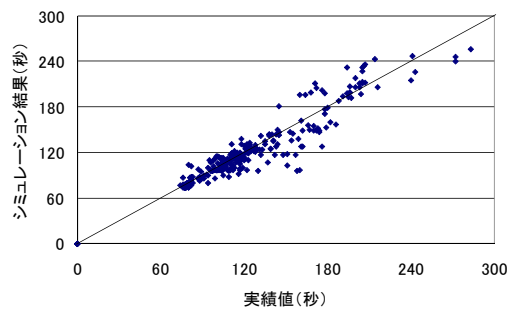


図-4 シミュレーション結果の再現性

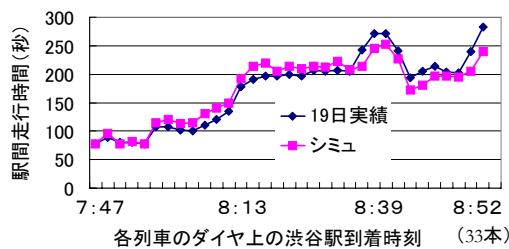


図-5 列車毎の駅間走行時間の比較
(三軒茶屋駅～池尻大橋駅)

5. 列車間隔の検討（走行速度の低下）

分析対象路線のターミナル駅である渋谷駅とその一駅下流の表参道駅間において、列車の走行速度を信号表示速度より20km/h低下して運行した場合の駅到着時刻の変化をシミュレーションで求める。信号表示速度よりあえて遅い速度で運行する区間は、表参道駅の手前500m（4閉そく区間）の範囲とする。駅間走行速度の実績値は、列車運行実績値（平成21年1月19日）を用いる。

当該区間における通常の駅間走行時間は約110秒であるが、分析対象日は遅延の発生に伴う列車間隔の狭まりにより、渋谷駅8:29発の列車で約20秒の駅間走行時間の増加が生じた。そこで、この列車および後続列車において走行速度を20km/h低下させた運行をシミュレーションで実施した。その結果、列車毎に先行列車との間隔が適度に空いたことで、減速および再加速による時間ロスが低減したことにより、速度低下を実施しないとときと比べ渋谷駅8:29発の列車で表参道駅に2秒早く到着する結果となった。さらに次の後続列車は5秒早く到着した（図-6）。先行列車の駅間走行時間の低減は、後続列車との列車間隔の確保において相乗的な効果を発揮するため、速度低下の運行を繰り返すことで、この区間における遅れの回復時間は短縮されることがシミュレーションにより示された。この結果は、必ずしも前へ前へと詰めるのではなく、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。

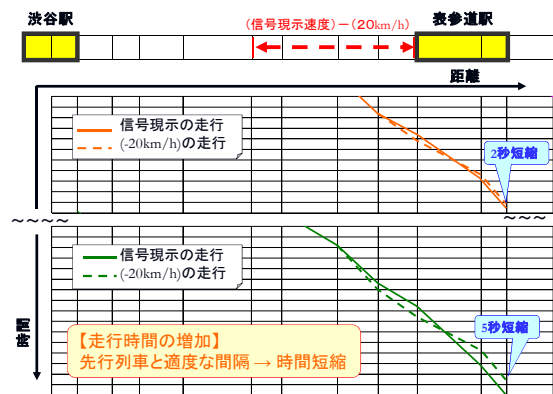


図-6 駅間のタイムスペース図

6. おわりに

本研究は、列車運行実績値を用いて駅間の列車間隔の検討の有意性を確認したうえで、各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た。またこれを用いて、遅延発生時の列車の運行間隔に着目した運行方法の検討を行い、遅延の早期回復の可能性について示唆を得た。

通常時と遅延発生時、あるいは遅延発生時も短時間の遅延と長時間の遅延とでは、駅での乗降や列車運行の状況が異なる。全て同様の運行方法ではなく、状況に合わせた運行方法により、遅延の抑制あるいは早期回復の可能性について検討を深めていきたい。そのため、シミュレーションモデルの精度向上および駅停車時間との一体的な推定を目指したシミュレーションの改良を進め、より詳細な分析を行うことを考えている。なお、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) 仮屋崎圭司：都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究，運輸政策研究，Vol. 45，pp. 73 -76，2009
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 宮崎信介，藤代隆正，岩倉成志：都市鉄道の線路内混雑に着目した列車速度の推定—エージェントモデルによるアプローチ—，J-RAIL2007 第14回鉄道儀技術連合シンポジウム講演論文集，pp. 365 -368，2007
- 5) 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