

高頻度運行下での都市鉄道の遅延連鎖シミュレーションにもとづく 遅延改善策の試案

高橋 郁人* (芝浦工業大学) 上松 苑 (鉄道建設・運輸施設整備支援機構)
辻井 隆伸 (足立区役所) 岩倉 成志 (芝浦工業大学)

An agent model and improvement plan for knock-on delays of high-frequency trains
Ikuto Takahashi*(Shibaura Institute of Technology)
Shigeru Uematsu(Japan Railway Construction,Transport and Technology Agency)
Takanobu Tsujii(The Adachi Ward Office)
Seiji Iwakura (Shibaura Institute of Technology)

This paper proposes a multi agent model for the railway traffic, which estimates the knock-on delays of trains caused by high-frequency train operation and huge ridership. Using the proposed agent model, we analyze the trajectory of train movement and the space time diagram of observed traffic flow. A simulation result demonstrates that the proposed model can estimate effect of train delay improvement plan for Tokyu denentoshi line.

キーワード：列車遅延，高頻度運行，マルチエージェントシミュレーション
(Keywords : delay time , high-frequency trains , multi-agent simulation)

1. はじめに

東京圏の都市鉄道では，列車車内混雑を低減する取り組みが実施されてきた．具体的には，列車の運行間隔を2～3分とする高頻度運行や乗り換え旅客数を削減する相互直通運転などである．しかし，副作用としてピーク時間帯の慢性的な遅延問題を引き起こしている．遅延が発生すると運転間隔が開き，到着駅の乗車旅客が増加することで，さらに遅延が大きくなるという負の連鎖が生じている．発生した遅延が他路線にも影響を及ぼすことが多く，遅延の回復に相当な時間を要することもある．鉄道各社では，旅客の乗降を円滑化するためにワイドドア車を導入し，線路内の列車混雑を解消するため複々線化するなど様々な対策を講じてきている．しかしながら完全に遅延が解消されたとは言えず，社会的にもより有用な対策が求められている．

本研究の目的は，列車遅延問題の対策の第一歩として，遅延がどのように発生・波及するのかを究明し，対策の効果を事前に評価できるマルチエージェントシミュレーションシステムを開発することである．そして，本シミュレーションシステムに遅延改善策の適用し，その効果を分析する．

本研究では，ピーク時の平均混雑率が193%（H20・渋谷-池尻大橋間）と高い東急田園都市線と，その相互直通運転先である東京メトロ半蔵門線を対象とする．ピーク時に2分間隔の高頻度運行を行い，上記2路線に東武伊勢崎線を加えた3路線間で相互直通運転を実施し，遅延の発生や波及を引き起こしやすい路線である．

2. 研究フローと対象範囲

本研究は，東急田園都市線長津田駅から東京メトロ半蔵門線半蔵門駅までの全長30.7kmを対象とする．はじめに遅延の実態分析を行い列車遅延発生メカニズムを明確にする．そして，シミュレーションモデルを用いて実際の列車運行を再現する．シミュレーションモデルの再現性がある程度得られたら，対策案をシミュレーションモデルに反映し，その効果を検証する．その際に，本研究に用いたデータを表1に示す．

表1 本研究に用いたデータ

データ名	詳細	用途
発着時刻表	各駅の列車の発着時間	遅延実態分析
運行実績データ	各駅の実績発着時間	走行時分推定モデル構築
信号コード表	制限速度	走行時分推定モデル構築
	軌道回路長	
	勾配値	
運転曲線図	自由走行時の列車の加減速	停車時分推定モデル構築
車両性能表	列車の最高速度	
	加速度・減速度	
	車両の寸法	
映像データ	旅客の移動速度	停車時分推定モデル構築
H17年度大都市交通センサス	各駅の乗降人員	

3. 分析対象路線の遅延実態

本研究では、遅延が発生している部分をわかりやすくするために、駅へ到着し次の駅に到着するまでの所要時間に対して図1に示すように分割し定義する。停車時分内に遅延が発生したならば「停車遅延」、走行時分内に遅延が発生したならば「走行遅延」とする。

分析に用いたデータは2009年1月19日～21日であり、その中でも1月19日の長津田～半蔵門駅間の列車ごとの遅延時間を図2に示す。7時付近からすでに停車遅延は発生していたが、回復運転によって総合的な遅延は発生していない。しかし、7時30分過ぎから停車遅延が増加し、8時～8時30分の停車遅延のピークを過ぎて減少傾向になると走行遅延が発生し増加している。これは、停車時間増加によって列車間隔が詰まり、列車が駅間で速度を出せないため走行遅延を引き起こしているためである。また、8時付近の突発的な停車遅延の増加によって走行遅延に波及している様子も見てとれる。遅延発生 の 主 な 要 因 として、需要増加に伴う旅客の集中などの旅客行動が関係していることが現地調査から得られている。他の日においても同様の傾向がみられたことから、列車運行と旅客行動が密接に関係していることが判明している。

また、渋谷駅列車到着時混雑率140%以下と170%以上の乗車旅客の乗車速度分析結果を図3に示す。速度分布を見ると、混雑率170%以上は上に凸の曲線を描いているが、混雑率140%以下は下に凸の曲線を描いている。混雑率170%以上については、6人目までは降車旅客が降車したスペースが空いているため、余裕を持って乗車することができるため速度が上昇しているが、7人目以降は車内の旅客密度が上昇し、スペースが空いていないため大きく速度が低下していることがわかる。また、最後に扉を通過する場合大きく乗車速度が低下している。これは、扉通過人数の増加に伴って車内の混雑率が上昇した影響によって速度が低下したと考えられる。一方混雑率140%以下では、6人目までは車内に余裕があることからゆっくりと乗車しているため乗車速度が減少し、7人目以降は列車の発車ベルが鳴るため急いで乗車しようとするため乗車速度が上昇したと考えられる。これらのことから、旅客速度は車内の旅客密度や旅客自身の心理的状況が大きく影響していることがわかる。さらに、混雑率140%～170%の間に旅客の乗車速度の転換期が存在すると考えられる。

4. 開発したシミュレーションシステム

(1)シミュレーションシステムの概要

本研究では、図1に示す停車時分と走行時分を推定するモデルをそれぞれ構築する。そして、それらを統合した上で調整時分・確認時分を外生的に与え、駅間の列車所要時分を再現し検証する。しかし、現時点では確認時分については考慮できていない。

(2)停車時分推定モデルの構築

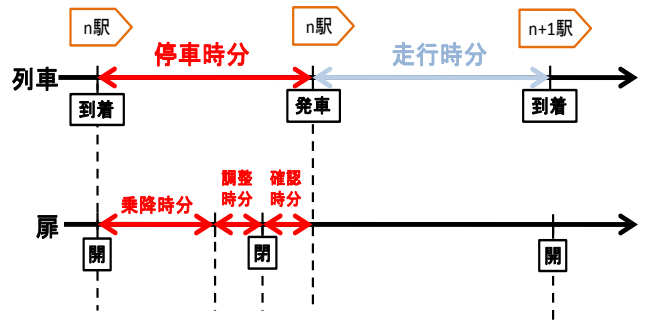


図1 時間の定義

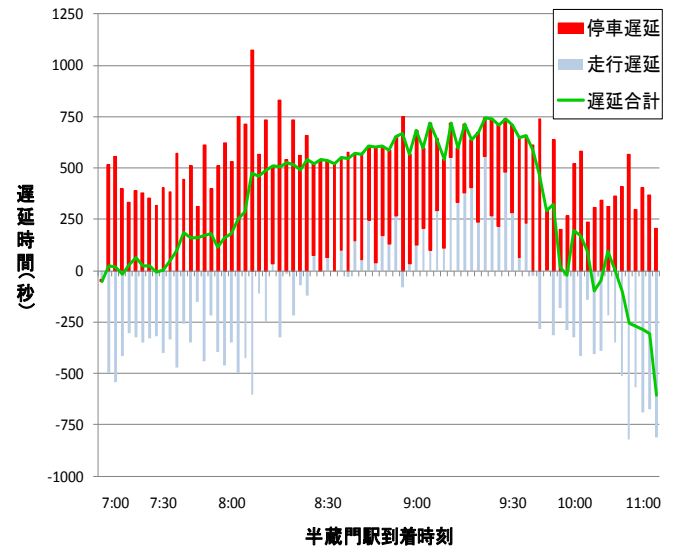


図2 遅延時間の内訳 (2009. 1. 19)

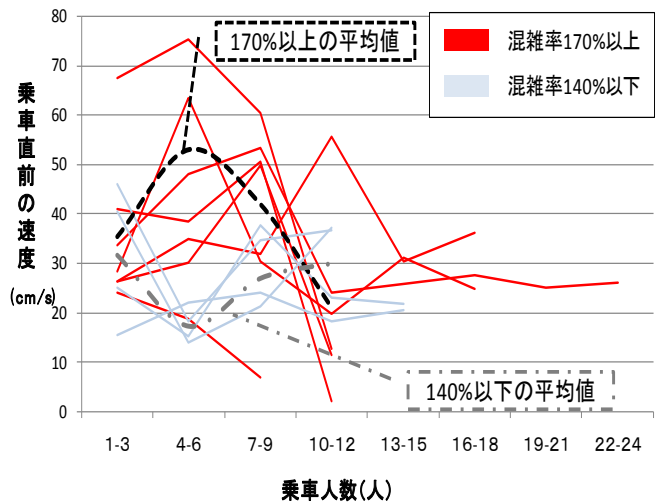


図3 乗車旅客の速度分析 (4 駅 11 停車)

図4に示すように、本モデルは停車時分を推定するモデルであるが、調整時分・確認時分についてはモデル統合時に外生的に与えるため考慮しない。そのため、本モデルは乗降時分を推定するモデルとなっている。

降車・乗車・車内の旅客をエージェントとし、列車の扉が開いてから乗降が終了するまでの時間を推定する。初期設定は、1扉 1/4 車両の空間で、旅客 1 人を直径 40cm の

円で表現している。また、シミュレーション上の時間経過を 1step=0.2 秒と設定した。

本モデルは、降車旅客が降車したら乗車旅客が乗車し、ホームに旅客がいなくなるとシミュレーションを終了する。旅客行動ルールは、前方左右の混雑具合で判断し、最も混雑していない方向に進む。進行速度は、混雑や押し込み、パーソナルスペース、回避行動で増減する。

押し込みとは、扉付近の滞留に伴い旅客同士が押しあって乗車する事を指す。本モデルでは、車内と前方の混雑具合によって押し込みの発生の有無を決定している。

パーソナルスペースとは、他人がそのスペース内に進入すると不快に感じる距離と定義している。パーソナルスペースの大きさは初期値を各エージェントの周囲半径 40cm として、各エージェントは 1step 毎に周囲の混雑状況を確認する。混雑時は 1.6cm/step でパーソナルスペースが減少し、エージェントは空いたスペースへ任意の速度で進行する。

シミュレーションの再現性の検証は、1 列車のうち最も開閉時間の長い扉を対象に、映像データとシミュレーションの乗車直前の速度を比較して行った。その結果を図5に示す。実績平均は混雑率 175%~200%の 3 データの平均であり、シミュレーション平均は混雑率 175%で 15 回計算した平均である。6 人目までは誤差が小さいので再現できたといえるが、7-12 人目の通過速度に大きな差が発生した。これは、旅客の速度決定要素が考慮しきれていないため、扉付近の旅客滞留が解消した際の旅客流動の再現ができていないことが影響している。また、実績値とシミュレーション値ともに標準偏差の値が 5-6 人目から徐々に小さくなっている。このことから、扉通過人数が増加すると旅客が整然とした動きをしていることがわかる。

(3) 走行時分推定モデルの構築

図4に示すようにシミュレーション空間の中に駅や列車、ATC 信号情報などのエージェントを発生させ、それぞれにルールを与えて相互作用しながら運行させる。列車の運転ルールは、ATC 信号の速度情報と前方停車駅までの距離を取得し、減速が必要か不要かを判断させる。前方で列車が詰まっているなどの減速が必要な状況であれば停車駅の停止線または制限速度区間に合わせて減速する。減速が不要であれば、惰行運転か加速・再加速すべきかを速度によって判断し、勾配の影響を受けて進行させる。

シミュレーションの再現性の検証は、運行実績データから実際の停車時分を各駅に与え、意図的に停車遅延を発生させながら走行シミュレーションを行い、その際に発生した走行遅延と遅延合計を比較する。2009 年 1 月 19 日の再現結果を図6に示す。1 編成あたり最大約 300 秒の残差が発生したが、8 時付近の遅延が拡大するタイミングや 9 時 30 分付近の回復運転などの列車運行における諸要素の傾向を再現することはできている。発生している走行遅延時間も実績の走行遅延と同様の傾向を示している。

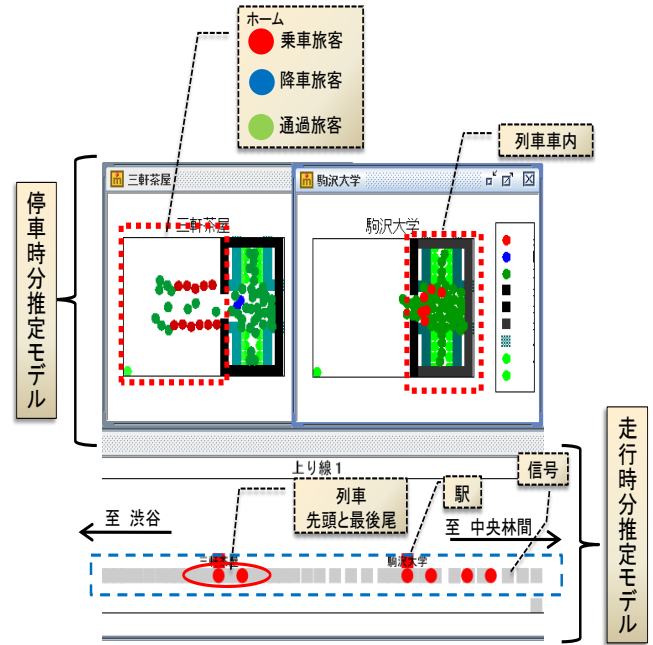


図4 列車運行シミュレーションモデルの実行画面

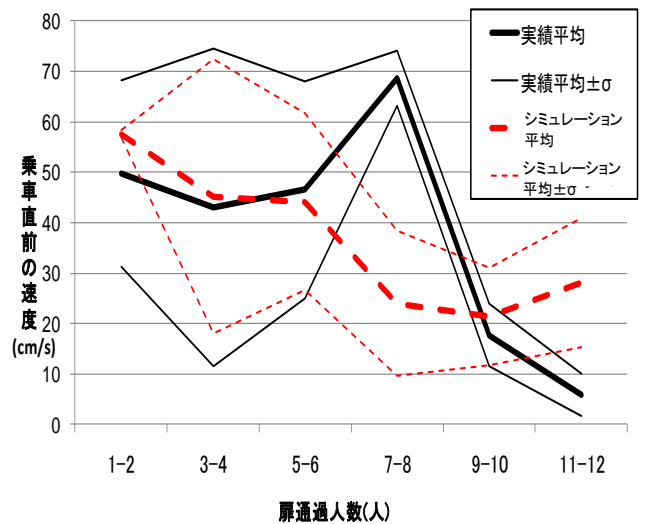


図5 停車時分推定モデルの再現性

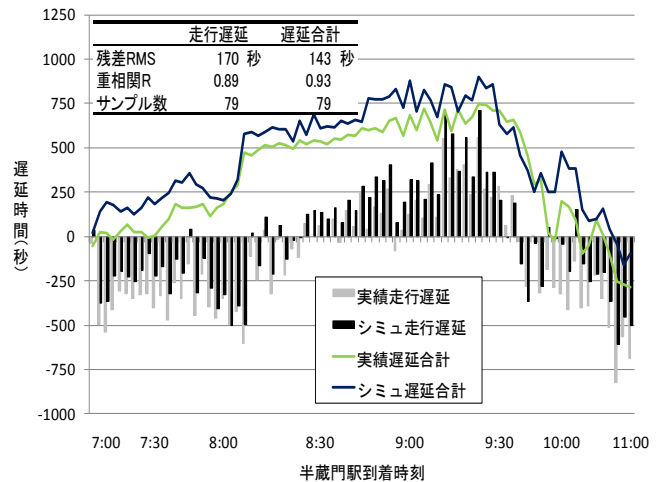


図6 走行時分推定モデルの再現性 (2009. 1. 19)

5. モデルの統合

停車時分推定モデルと走行時分推定モデルを連動させ、列車運行シミュレーションシステムを構築した。走行時分推定モデルをベースとして、駅停車の際に停車時分推定モデルが稼働し、乗降が終了し時刻表の発車時刻を過ぎていると走行時分推定モデルが稼働するようにしている。

再現性の検証は実績の所要時間との比較で行い、図7に示す。シミュレーション平均は、H17 大都市交通センサスから算出した 30 分ピッチ乗降人員と混雑率を入力してシミュレーションを 20 回計算させた平均である。概形は再現できたが、推定値の分散は小さく、実績値の遅延時分の変動特性まで反映できていない。今後、データ数を増やし、かつ確率的な変動特性を分析する必要がある。また、8 時 30 分以前は所要時間を過大推定する傾向があり、それ以後は過小推定する傾向がある。これは列車運行シミュレーションシステム内で確認時分を考慮できていない事や遅延が発生した際に各駅の乗降人員の変動を反映できていないことが原因として考えられる。

6. 渋谷駅での両側開扉の効果

三軒茶屋駅や表参道駅は、時刻表で設定されている停車時間は 25～35 秒であるが、渋谷駅の停車時間は 50 秒～1 分 20 秒と他の駅よりも長い。これは渋谷駅から運行会社が東急電鉄から東京メトロに切り替わるため、この停車時間内に乗務員交代を行う必要があるため長く停車時分をとっていると考えられる。しかし、渋谷駅の特徴としてターミナル駅であるがために特に乗車旅客・降車旅客が非常に多いことも大きく関わっていると考えられる。

そこで 5 章で構築した列車運行シミュレーションシステムに、旅客の乗降が円滑になるように渋谷駅のホームを新たに 1 面設置して扉が両側開閉するようにした場合、列車遅延の動向がどのようになるか検証した。停車時分推定モデルだけで両扉開閉と片側扉開閉を計算した場合、5 秒程度の乗降時間が短縮されていたが、列車運行シミュレーションシステムに反映した場合、ピーク時間帯の所要時間が最大 2 分程度短縮されていた。これは渋谷駅の乗降時間が短縮されただけでなく、線路内で波及していた遅延の解消の可能性が定量的に把握できた。しかし、この計算結果は未だ十分精査されず試算値に留まる。

7. おわりに

本研究は、遅延の発生と波及のメカニズムを究明する中で旅客行動が大きく関わっていることを解明した。そして列車遅延シミュレーションシステムを構築し遅延対策効果の検証をおこなった。課題として、座席旅客が降車しないなど停車時分推定モデルの基礎的な部分を考慮と修正を行い再現性の向上を行う。そして列車運行シミュレーションの再現性を向上させ、渋谷駅の改良の効果をより正確に算出していきたい。

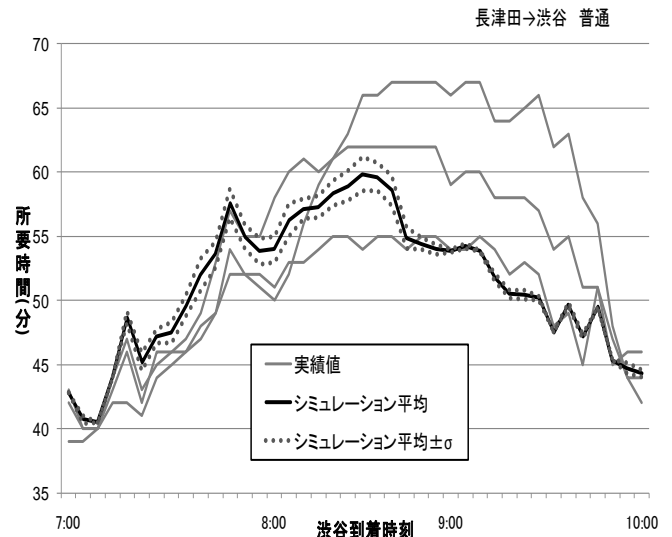


図7 列車運行シミュレーションモデルの再現性

謝辞

本研究において、データを提供して下さった東京急行電鉄株式会社ならびに東京地下鉄株式会社の方々に心より感謝申し上げます。また、ご多忙の中指導して下さった政策研究院大学院大学森地茂教授・日比野直彦准教授・運輸政策研究所仮屋崎圭司研究員には心より感謝申し上げます。

本研究は、平成 21 年度科学研究費基盤研究 B (課題番号：21360242) の一環で行われた研究である。

参考文献

- (1) 上松 岩倉：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, pp312,2009.11