

# 高頻度運行される列車の遅延シミュレーションシステムの開発 —東急田園都市線を対象に—\*

## Agent model for estimating knock-on delays of high-frequency trains -Tokyu Denentoshi line-\*

高橋郁人\*\*・上松苑\*\*\*・辻井隆伸\*\*\*\*・岩倉成志\*\*\*\*\*

By Ikuto TAKAHASHI\*\*・Shigeru UEMATSU\*\*\*・Takanobu TSUJII\*\*\*\*・Seiji IWAKURA\*\*\*\*\*

### 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、到着乗車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。このような現象は社会的にも対策が求められる重要な問題である。

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。

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対象とする。ピーク時に2分間隔の高頻度運行を行い、東急田園都市線・東京メトロ半蔵門線・東武伊勢崎線の3路線との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. 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~23日であり、その中でも1月22日の長津田~渋谷駅間の列車ごとの遅延時間を図2に示す。7時以前から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、8時過ぎから停車遅延が増加し、ピークを過ぎて減少傾向になると走行遅延が増加している。これは、停車時間増加によって列車間隔が詰まり、走行遅延を引き起こしているためである。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。

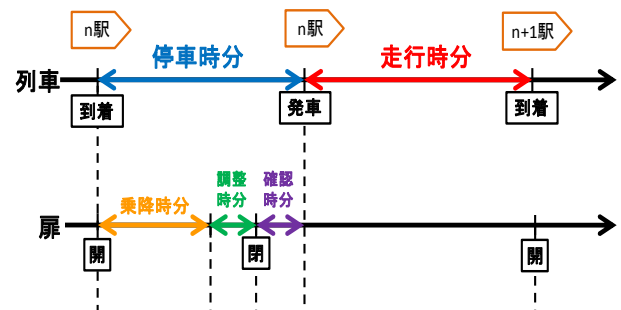


図1 時間の定義

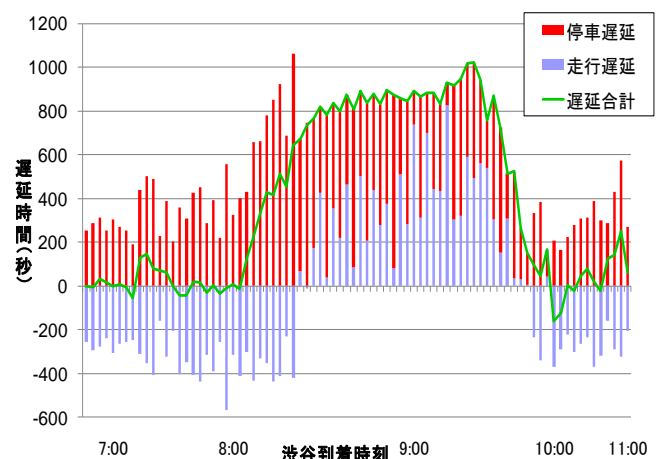


図2 長津田~渋谷駅間の実績遅延

\* キーワード: 鉄道計画, ターミナル計画, 公共交通運用

\*\* 学生員, 芝浦工業大学大学院工学研究科

(〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5 研究棟9階)

TEL: 03-5859-8354 E-mail: m510061@shibaura-it.ac.jp

\*\*\* 正会員, 工修, 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構

(〒020-0034 岩手県盛岡市盛岡駅前通1-41)

TEL: 019-626-9653 E-mail: shi.uematsu@jrnt.go.jp

\*\*\*\* 正会員, 工学, 足立区役所

(〒120-8510 東京都足立区中央本町1-17-1)

TEL: 03-3880-5015 E-mail: koji@city.adachi.tokyo.jp

\*\*\*\*\* 正会員, 工博, 芝浦工業大学

(〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5 研究棟9階)

TEL: 03-5859-8354 E-mail: iwakura@shibaura-it.ac.jp

また、列車到着時混雑率 170%以上の乗車旅客の速度分析結果を図3に示す。速度分布をみると、山なりの傾向を示している。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。このことから、旅客速度に車内の旅客密度が大きく影響していることがわかる。また、最後に扉を通過する場合、大きく速度が低下することがわかる。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。

### 3. 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、現時点では調整時分・確認時分については考慮できていない。

#### (2)シミュレーションシステム構築のためのデータ整備

長津田駅から渋谷駅までの延長25.6km区間を対象に、走行時分と停車時分の推定を行うモデルを用いるが、その際に整備したデータを表1に示す。

#### (3)停車時分推定モデルの構築

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

表1 各モデルに用いたデータ

停車時分推定モデル		走行時分推定モデル	
車両性能表	シミュレーションの車内構造の構築	車両性能表	列車加速度・減速度
駅ホーム図面	映像解析	発着時刻表	列車種別・行先・始発駅発車時刻
応荷重データ	シミュレーションの初期値 (乗降客数・車内混雑率)	信号コード表	信号位置・軌道回路長・ 速度信号現示・勾配座標・勾配値
ビデオ映像	乗車直前の速度抽出 シミュレーションの再現性の検証	運転路線図	駅位置・ シミュレーション再現性の検証
		運行実績データ	駅停車時分・ シミュレーション再現性の検証

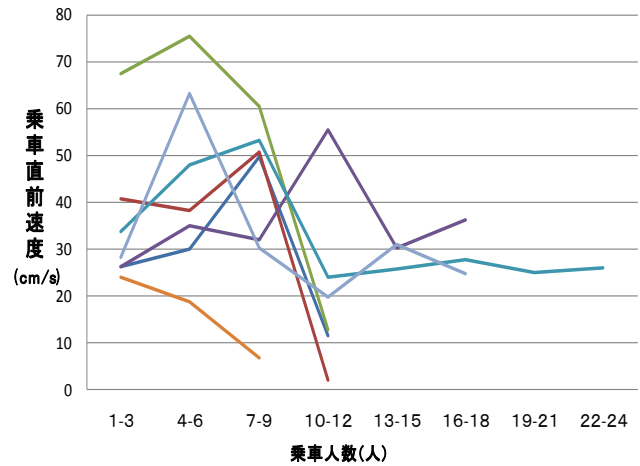


図3 乗車人数と乗車速度の関係性

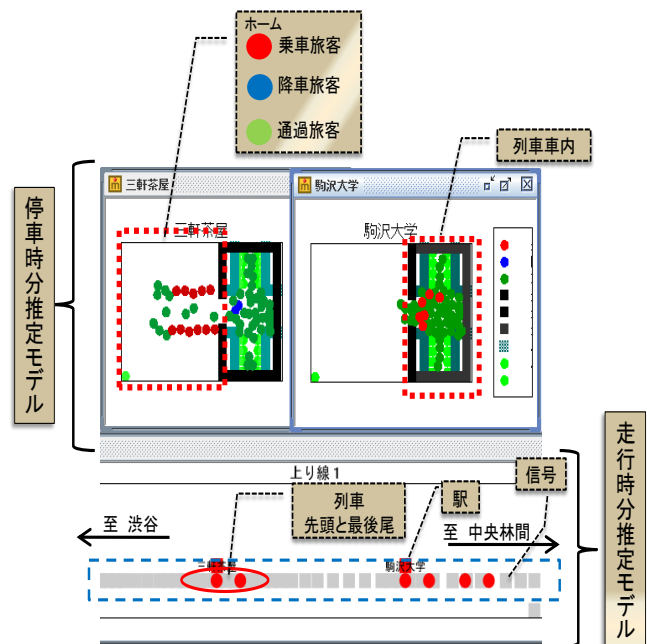


図4 列車運行シミュレーションシステムの実行画面

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。

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 10 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。

#### (4) 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。減速が必要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について検証する。まず、先行列車の制約を受けない自由走行時の列車挙動を視覚化した運転曲線図と比較した。その結果を図6に示す。運転曲線図には走行時分が記載されており、シミュレーション走行時分との誤差は普通・急行列車ともに 10 秒以内に収まっており、自由走行時での列車挙動は再現できたといえる。次に、運行実績データから実際の停車時分を各駅に与え、故意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、相関係数と残差平均を算出した。その結果を図7に示す。1 編成あたり最大約 250 秒の残差が発生したが、遅延が拡大するタイミングや回復運転などの傾向は再現できている。

#### 4. 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、乗降が終了すると走行時分推定モデルが稼働するようにしている。

再現性の検証は所要時間の比較で行い、図8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

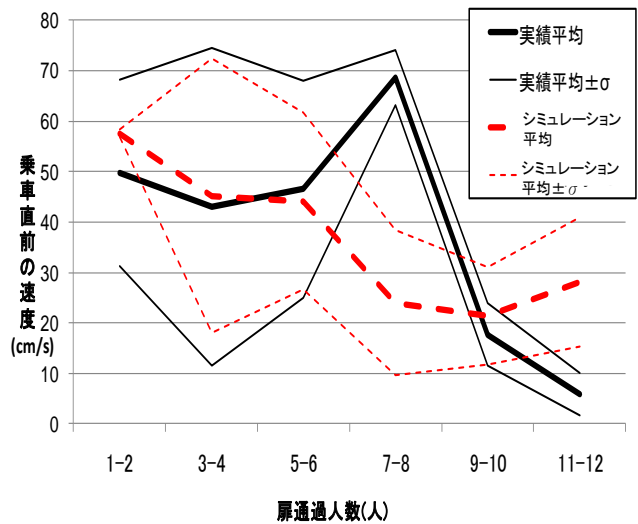


図5 乗車直前の速度による乗降モデルの再現性検証

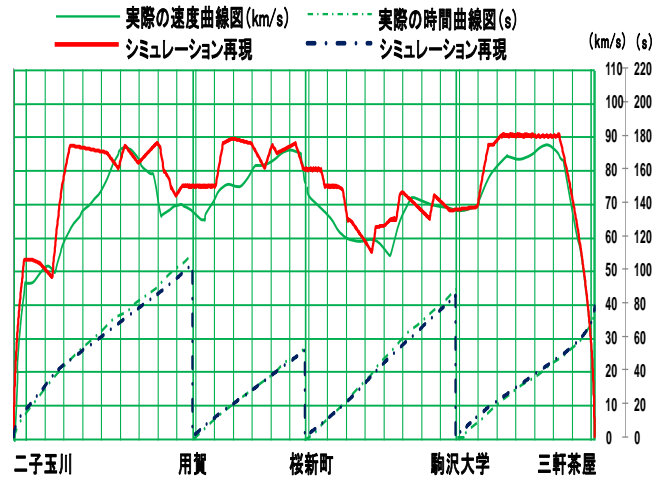


図6 自由走行時における走行モデルの再現性検証 (急行 二子玉川→三軒茶屋駅間)

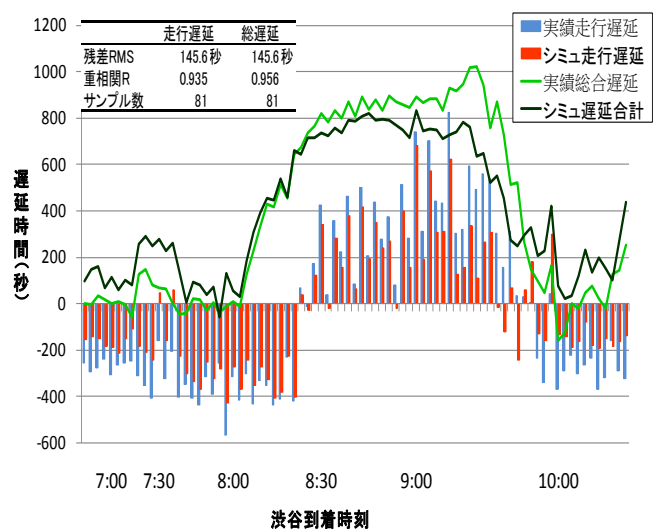


図7 長津田駅→渋谷駅間の走行モデルの再現性検証 (停車時分は実績値)

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調整時分や確認時分を考慮できていない事が起因していると考えられる。また、乗降旅客が多い場合の停車時分推定モデルの再現性が低いことも原因として考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、停車遅延の継続が走行遅延を招き、総遅延が発生するというメカニズムを実績データや現地調査によって究明し、列車運行シミュレーションシステムによって、再現可能性の高さを実証した。

課題として、停車時分推定モデルは再乗車する旅客が多い点や速度に影響のある要素が考慮しきれていない部分を改善する必要がある。走行時分推定モデルは先行列車近接時の加減速による細かい列車挙動を改善する必要がある。今後は、停車時分推定モデルにおいて旅客特性の細分化を行い、旅客特性によって停車時分に与える影響を検証する。また、両モデルの精度を向上し本システムを用いて、駅構造を改良した影響を検証し遅延問題の対策案を検討したい。

## 謝辞

本研究において、データを提供してくださった東京急行電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くだ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。

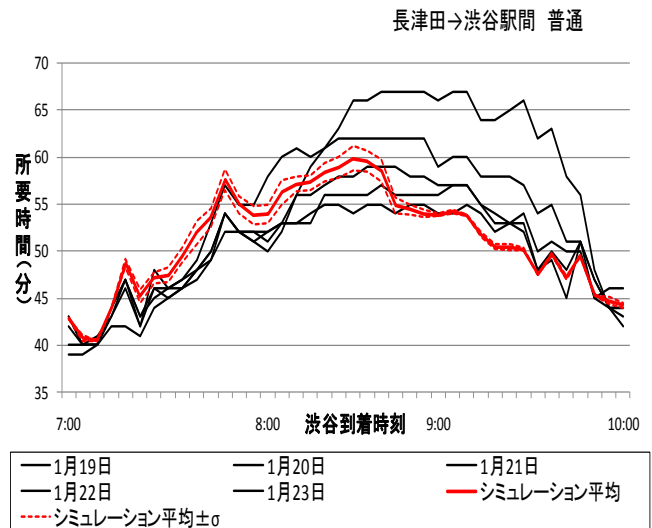


図8 列車運行シミュレーションシステムの再現性検証  
(普通 長津田→渋谷駅間)