

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システムの開発と

遅延対策の分析

○ [土] 高橋 郁人 (芝浦工業大学大学院) 大木 徹憲 (芝浦工業大学)

[土] 岩倉 成志 (芝浦工業大学)

Prediction of knock-on delays of high frequency trains using multi agent simulation

○Ikuto Takahashi, (Shibaura Institute of Technology),

Akinori Ogi, (Shibaura Institute of Technology)

Seiji Iwakura, (Shibaura Institute of Technology)

On the urban railway network system in Tokyo metropolitan area, the number of operating trains is set close to the capacity of the line at peak times so that the standard speed of the trains is markedly decreased and recovery takes a long time in the case of an incident that disturbs the operation. Therefore, we observed knock-on train delay on Tokyu Denentoshi line and Tokyo metro Hanzomon line, and a knock-on delay model was developed using multi-agent simulation. This paper presents some prediction results of improvement programs of knock-on train delay.

キーワード：列車遅延，マルチエージェントシミュレーション，高頻度運行，都市鉄道

Key Words：knock-on delay，multi agent simulation，high frequency trains operation，urban railway

1. はじめに

東京圏の都市鉄道は、長年にわたり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、その副作用としてピーク時間帯に遅延が発生すると列車の運転間隔が開き、到着駅の乗車旅客が増加することで旅客の乗降時間が増加し、そして後続列車の遅延が大きくなるという遅延の伝播と拡大が生じている。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数線化するなど様々な対策を講じてきている。しかしながら遅延が解消されたとは言い難く、より効果的な対策が社会的に求められている。

本研究の目的は、高密度に運行される都市鉄道の遅延問題の対策として、遅延がどのように発生し波及するのかメカニズムを明らかにする。また、旅客の乗降行動を含めた列車運行を忠実に再現したシミュレーションシステムを開発する。そしてシミュレーションシステムに様々な遅延対策案を反映することで、その効果を事前に把握することができ、多くの対策案の検討を行うことを目的とする。

本研究の対象路線は、東急田園都市線上り線全区間（中央林間駅→渋谷駅）と東京メトロ半蔵門線 A 線全区間（渋谷駅→押上駅）の全長 48.3km を対象とする。これらの路線に東武伊勢崎線を加えた 3 路線で 2003 年より相互直通運転が行われており、また朝の通勤通学時間帯は最短で 2 分 10 秒間隔の高頻度運行を実施していることから、遅延の発生と波及が起りやすい路線といえる。

以降は 2 章で既往研究の整理を行い、3 章で遅延の実態分析から遅延のメカニズムを明らかにする。4 章で遅延連鎖シミュレーションシステムの概要と、列車運行を再現した際の再現性の確認を行う。5 章で遅延対策案として渋谷駅 2 面 3 線化の効果を分析し、6 章で本研究の成果と課題をまとめる。

2. 既往研究のレビュー

筆者ら¹⁾は、線路内混雑に着目し小田急線を対象としてマルチエージェントシミュレーションを用いて列車種別ごとの走行速度を推定した。その結果、運転曲線図と時刻表の上の走行速度を精度高く推定できる可能性を示した。

仮屋崎ら²⁾は、線路上の列車挙動に着目しセルオートマトンを用いて列車運行モデルを構築し遅延対策の検討している。列車運行モデルは、信号コードなど実際の列車運行

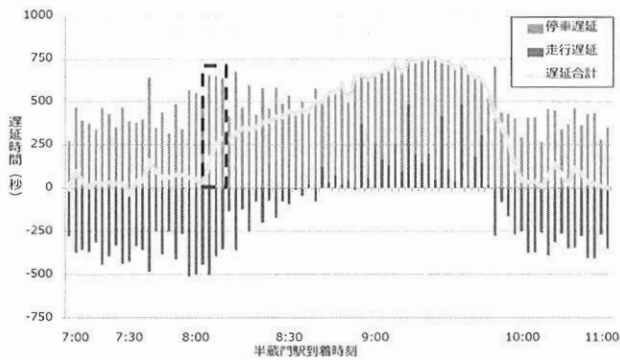


図 1 2010 年 11 月 15 日の遅延状況

で使用されているものを用いて構築している。その結果、遅延の発生と回復のタイミングを再現することに成功し、遅延対策の検討を行っている。

また稲木ら³⁾は、旅客流動が遅延に大きく影響していることからマルチエージェントシミュレーションを用いて駅ホーム上の旅客流動の再現を行っている。旅客歩行の再現にポテンシャルモデルを用いて旅客行動を表現している。

以上の研究成果の課題を総括すると、高頻度な列車運行モデルと旅客流動を再現したシミュレーションモデルは別々に開発されているが、これらを相互作用させ一体的に構築されたシミュレーションモデルは開発されていない。

筆者ら⁴⁾は昨年から旅客の乗降行動も含めた列車運行モデルを構築しているが、その再現性が低いなどの問題点が存在した。そこで本研究では、各シミュレーションモデルの再現性を向上させ、それらを統合した「遅延連鎖シミュレーションシステム」を用いて、遅延対策案の検証を行う。

3. 遅延の実態分析

本研究では、列車が駅停車中に発生した遅延時間を「停車遅延」、列車が駅間を走行中に発生した遅延時間を「走行遅延」とする。また停車遅延と走行遅延を加算した値を「遅延合計」とする。なお遅延時間とは、実績発着時間と時刻表発着時間との差分である。分析に用いたデータは 2010 年 11 月 15 日から 12 月 17 日の平日 24 日間である。

2010 年 11 月 15 日の長津田→半蔵門駅間の遅延状況を図 1 に示す。停車遅延が常時発生しているが、走行遅延がマイナスを示す回復運転によって 8 時以前は大きな列車遅延は発生していない。しかし 8 時以降から黒枠のような大きな停車遅延が連続して発生すると、遅延合計が増加していることがわかる。そして停車遅延が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、遅延の波及を引き起こしているためである。以上から慢性的な列車遅延を引き起こすメカニズムは、ピーク時間帯に大きな停車遅延が連続して発生すると、列車が高密度に運行しているために正常のダイヤに回復しにくくなり、遅延を後続の列車へ拡大することだといえる。

また区間別で遅延の実態分析を行った結果、二子玉川→大手町駅間では連鎖的な遅延の波及が見られた。特に三軒

表 1 モデルに用いたデータ概要

データソース		詳細	対象モデル
ルール構築データ	ビデオ映像データ	最混雑駅付近の旅客の乗降光景を撮影したデータであり、旅客一人一人の位置座標を取得し、旅客速度データを取得した	乗降時間 推定モデル
	応加重データ	各駅の各列車の各車両の混雑率を取得したデータであり、映像データから得られた速度データを混雑率別に分類した。 ※混雑率100%は、座席が吊り革につくかドア付近の柱に当たる状態の事を指す	
	運転曲線図	自由走行時の列車の速度曲線と時間曲線を表した図であり、加速減速のタイミングや惰行運転を行うべき場面を取得	走行時間 推定モデル
	運行実績データ	各日の発着時刻を表した表であり、外生的にモデルに与えるため停車時間を取得	
システムインプット	駅ホーム図面	各駅の平面図からシミュレーション再現範囲の駅のホーム幅を取得	乗降時間 推定モデル
	H17年度大都市交通センサス	H17年度大都市交通センサスから東急田園都市線区間の各駅の乗降人員取得し、統合モデルに反映	
	東急5000系車両性能表	東急5000系車両の車両性能の表であり、シミュレーション再現範囲の車両の寸法・列車の加速度・減速度・最高速度を取得	走行時間 推定モデル
	発着時刻表	計画時における発着時間を10秒単位で表した表	
	信号コード表	ATC信号コードや勾配値とうが記載された表であり、制限速度・信号間の閉塞長・勾配値を取得	

茶屋→半蔵門駅間においてはすべての日を通じて走行遅延の値が大きく、遅延を拡大させている要因となる区間であることが判明している。また半蔵門→大手町駅間が大手町→清澄白河駅間のいずれかで、停車遅延が慢性的に発生する傾向が見られている。

4. 遅延連鎖シミュレーションの開発

4.1 シミュレーションシステムの概要

本研究では、旅客の乗降に要する「乗降時間」と、列車の駅間走行時間に要する「走行時間」を推定するモデルをそれぞれ構築する。この他に、旅客乗降の完了時点から列車の扉が閉まるまでの「調整時間」と、列車の扉が閉まった時点から列車の発車時間までの差分である「確認時間」が存在する。そして、乗降時間推定モデルと走行時間推定モデルを統合した上で調整時間・確認時間を外生的に与え、駅間の列車所要時間を再現し検証する。

シミュレーションの開発は、株式会社構造計画研究所によるマルチエージェントシミュレーションの汎用性プログラミングソフト *artisoc academic ver3.0* を用いて行った。

シミュレーションの開発に用いたデータを表 1 に示す。ビデオ映像データは 2 次元動画計測ソフトの *Move-tr/2D 7.0* を用いて 1 秒毎に旅客の位置座標を取得し旅客の乗車速度を抽出した。その解析の際に性別・年代・乗車の際の携帯電話の操作など付随行動も取得した。この乗車速度と応加重データから取得した混雑率を用いて混雑率別の乗車速度データを作成した。これらのデータから旅客行動の変化や、旅客属性による乗車速度の増減を把握した。

4.2 乗降時間推定モデルの構築

図 2 に示すように、乗降時間推定モデルは降車・乗車・車内の旅客をエージェントとして、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

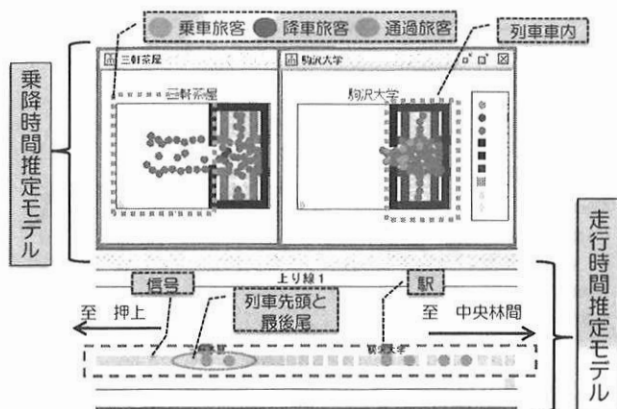


図2 遅延連鎖シミュレーションシステムの実行画面

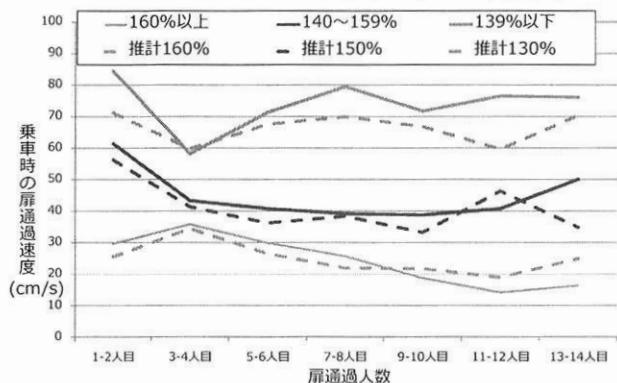


図3 乗降時間推定モデルの再現性

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。また筆者⁵⁾の研究より、旅客属性が乗降時間に大きく影響を与える要素であると考えられている。そこで映像データの解析に基づいて属性設定を行い、男女比を7:3ながら乗車は10%の確率で発生するとした。

本モデルは乗車旅客が整列乗車した状況から開始し降車旅客の降車を行う。その際に車内の扉付近の旅客は一度降車を行う(以後、再乗車旅客と呼ぶ)。降車旅客が降車を終わると、乗車旅客と再乗車旅客が乗車を行う。乗車の際に前方の混雑具合によってパーソナルスペースの減少や押し込みが発生する。乗車旅客と再乗車旅客の乗車が完了し、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。

乗車するまでの旅客行動ルールは、進行方向が周囲の混雑状況を調べ最もエージェント数の少ない方向へ移動する。進行速度は乱数で与えており、20cm/sから80cm/sの速度で離散的に上昇していく。本研究のパーソナルスペースとは、他者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。その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し、混雑に応じてその半径を縮小するように設定した。

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ことを指す。本モデルでは車内の中心部の混雑具合によって押し込みが発生の有無を判断し、発生すると速度が4.0cm/sで減速して速度低下を再現した。以上の設定値は、乗降時間推定モデルの再現性が最も高い値である。

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

表2 走行時間推定モデルの再現性(2010年11月15日)

駅間	長津田ー青葉台	青葉台ーあざみ野	あざみ野ー鷺沼
残差RMS(秒)	9.9	6.8	6.9
推定平均	8.4	2.9	6.6
実績平均(秒)			
駅間	鷺沼ー溝の口	溝の口ー二子玉川	二子玉川ー三軒茶屋
残差RMS(秒)	10.4	13.8	14.4
推定平均	0.9	-0.9	-3.6
実績平均(秒)			
駅間	三軒茶屋ー渋谷	渋谷ー表参道	表参道ー青山一丁目
残差RMS(秒)	18.8	12.7	13.7
推定平均	-5.4	-8.9	-12.9
実績平均(秒)			
駅間	青山一丁目ー永田町	永田町ー半蔵門	(全体)長津田ー半蔵門
残差RMS(秒)	11.2	10	63.8
推定平均	-9.6	2.7	30.4
実績平均(秒)			

ンの乗車直前の速度を比較して行った。各混雑率別の旅客一人一人の乗車直前の速度を比較したものを図3に示す。

乗車直前の速度とは、扉を通過した1秒前の速度を表している。実績平均は各混雑率別の乗車直前の速度の平均であり、推計平均は実績データと同じ乗車旅客数・降車旅客数・混雑率を代入し計算した平均である。各混雑率別に見ても高い再現性が得られた。しかし全体的に過小推計の傾向がみられた。これは速度分散を一樣確率で与えているために、低速な値を多く取得した影響だと考えられる。また11-14人目で実績値との誤差が大きくなることについては、駆け込み乗車や荷挟まりが未再現であるためだと考えられる。

4.3 走行時間推定モデルの構築

図2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設定し、それぞれにルールを与えて相互作用しながら運行する。列車は駅からの発車合図を受けて発車し、速度はATC信号の先行列車の位置による速度情報と勾配の影響、前方停車駅までの距離により増減する。また前方の信号コードによって惰行運転か再加速か減速を行う。列車の駅間走行において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。停車駅が近付くとATC信号の速度情報に従い減速し、駅に停車し発着時刻表に定められている発車時刻まで停車する。10秒単位で定められた発着時刻表の発車時刻を過ぎていれば発車合図を出し列車は駅を発車する。ただし各駅の最小停車時間である標準停車時間の確保のために、発着時刻表を過ぎていても30秒~45秒は停車する。

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得られた駅間走行時間とシミュレーションの駅間走行時間から残差RMSを算出し比較をする。また相関係数を用いて分布系の相関も見る。2010年11月15日の再現結果を表2に示す。相関係数は0.99であり遅延の発生と収束のタイミングを再現することができた。しかし残差RMSが63.8秒と正確な再現を行うことができたとは言えない。特に区間別にみると列車本数が増加し駅間が狭くなる鷺沼以降での推定結果が悪いことから、列車が詰まると制限速度よりも低速で運行し駅間で停車しないようにするなど、他の運行に関わる要素を反映しなければならないと考えられる。

4.3 遅延連鎖シミュレーションシステムの構築

乗降時間推定モデルと走行時間推定モデルを連動させ、調整時間・確認時間を外生的に与えて列車運行を再現した遅延連鎖シミュレーションシステムを構築した。本システムは駅停車の際に乗降時間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ると走行時間推定モデルが稼働するようにしている。これらを各駅、各列車で繰り返すことで駅間の所要時間を推定することができる。

本システムは列車の遅延時間によって、駅の乗車旅客数が増加する。現状は駅の特性に関係なく 30 秒毎に 1 人ずつ乗車旅客数が増加するように設定している。本来ならば駅別に増加量を設定すべきだが、今後の課題とする。遅延連鎖シミュレーションシステムの再現性を図 4 に示す。実績平均は平日 24 日間の遅延合計の平均であり、推計平均は時刻表を入力し 5 回計算した平均を用いている。遅延の発生と拡大のタイミングは再現できている。しかし、遅延の発生段階の分散値が小さく、遅延発生時の規模を正しく推定できず、過小な推定結果になったと考えられる。

5. 渋谷駅 2 面 3 線化の効果分析

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。この要因としては、渋谷駅の需要が大きく他の駅よりも乗降時間を要するという事実と、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に乗務員交代を行う必要があるためだと考えられる。しかし停車時間を長く設定しているために、後続の列車は制限速度より低速で走行することや、駅間で停車しなければならない事態となっている。

そこでホーム 1 面新設しドアを両側開閉して旅客の乗降を円滑化し、さらに副本線を新設して交互発着ができるように改良した場合の所要時間の変化を検証し図 5 に示す。8 時付近の遅延発生時は推定や実績よりも大きい値となった。これは半蔵門線区間の閉塞長が他よりも長いこと、渋谷駅の線路容量を増加させた結果、列車は半蔵門線区間の乗降量の多い駅で遅延発生し、閉塞長が長いこと列車を詰めることができずに線路上で停車する。それが繰り返され渋谷駅に入線できず、遅延の発生量が大きくなったと考えられる。このことから 8 時付近の運行管理が特に重要であると言える。一方 8 時 30 分付近の大きな遅延の拡大は抑制している。これは乗降の円滑化と交互発着によって、線路上で列車が停車せずに運行できたためだと考えられる。

6. おわりに

本研究は列車遅延のメカニズムを究明し、旅客の乗降行動を含めた列車運行を再現した遅延連鎖シミュレーションシステムの開発を行った。そしてそれを用いて列車遅延の対策案として渋谷 2 面 3 線化の分析を行った。その結果、対策案による効果と課題を事前に把握できることを実証した。

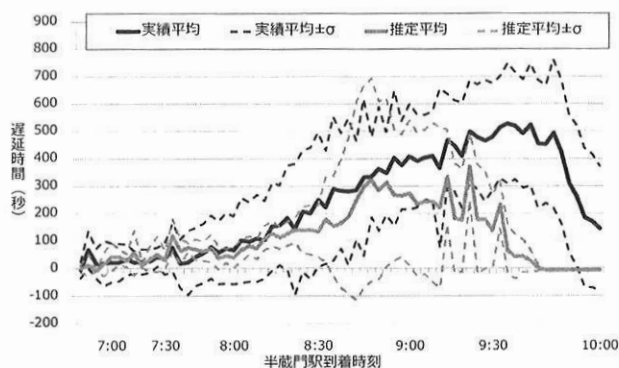


図 4 遅延連鎖シミュレーションシステムの再現性

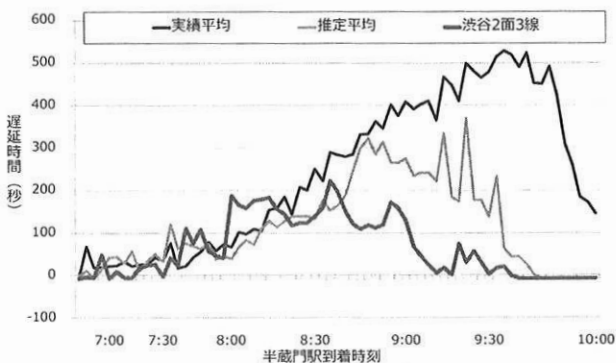


図 5 遅延対策案の効果

今後の課題として、特に遅延連鎖シミュレーションシステムの遅延発生時の再現性向上させた後に、様々な遅延対策案の効果を分析していく。

参考文献

- 1) 宮崎信介, 藤代隆正, 岩倉成志: マルチエージェントシミュレーションを用いた都市鉄道の列車速度の推定手法, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol36, CD-ROM, 2007.
- 2) 仮屋崎圭司, 日比野直彦, 森地茂: 高頻度運行に伴う都市鉄道の遅延対策の検討, 第 43 回土木計画学研究発表会, pp.314, 2011.
- 3) 稲木達哉, 富井規雄: 駅ホーム上の旅客流動のマルチエージェントによるシミュレーション, 第 17 回鉄道技術連合シンポジウム, pp507-510, 2010.
- 4) 高橋郁人, 上松苑, 辻井隆伸, 岩倉成志: 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, 第 17 回鉄道技術連合シンポジウム, pp257-260, 2010.
- 5) 高橋郁人, 武井千亜生, 岩倉成志: 旅客属性を考慮した列車乗降シミュレーションモデルの構築—東急田園都市線を対象に—, 平成 23 年度土木学会全国大会, IV-049, 2011.

謝辞

データを提供して頂いた東京急行電鉄株式会社および東京地下鉄株式会社の方々に心より感謝申し上げます。本研究は、平成 21 年度科学技術研究費基盤研究 B (課題番号: 21360242) として行った研究である。