

特集：信号通信技術

乗降遅延を推定する 列車内旅客行動シミュレーション

國松 武俊* 守谷 浩紀**

Passenger Behavior Simulation Inside Train Car
for Estimation of Train Delay Caused by Congestion

Taketoshi KUNIMATSU Hironori MORIYA

Train delay caused by congestion is a serious problem. Train operation companies try to decrease dwell time at stations, by installing wide train doors, or devising a way how passengers should be in an efficient alignment at platforms. However, there is no way to quantitatively estimate their effects in advance. In this research, we first devise the simulation method of passengers' behavior when boarding and alighting, reflecting passengers' preference of standing position in train car. Secondly, we combine the developed function with train operation and passenger flow simulator and realize to estimate the extent of reduction of train delay by taking counter-measures.

キーワード：列車遅延，混雑，旅客流動，乗降時間，シミュレーション

1. はじめに

大都市圏の通勤路線はラッシュ時間帯に旅客混雑に起因した停車時間の増加，慢性的な列車遅延が発生しやすいという課題がある¹⁾。この対策として，鉄道事業者は十分な停車時間となるよう列車ダイヤを変更する，列車のドア幅や列車内のレイアウト，ホームの整列乗車方法を工夫して乗降に要する時間を短縮するといった施策を立案，実行している。しかし，これらの施策により，駅での乗降時間が具体的にどの程度短縮し，列車遅延の改善がどの程度見込まれるのか，各駅での乗降時間の変化や，路線全体での列車遅延の変化を事前に定量的に見積もる方法が無いという課題があった。

そこで本研究では，乗降を円滑化するための施策の効果を事前に検証可能とする目的で，乗降状況を再現し，列車遅延への影響を推定する列車内旅客行動シミュレータを開発した。まず，Web アンケート調査を実施し，列車内における旅客の乗車位置（立ち位置）の嗜好を明らかにした。次に，ある1つの車両扉に対する乗降状況を模擬する乗降シミュレーションを構築し，乗降時間をより詳細に推定可能とした。また，旅客が列車乗車時に，何号車の何扉を利用する傾向にあるのか，乗車車両と扉を推定する手法を構築した。そして，ある列車ダイヤで運行させた場合の列車の混雑・遅延を推定する既開発の列車運行・旅客行動シミュレータ²⁾に対し，上記の機能を追加することで，ダイヤの変更や，車両のレイアウト

ト，乗降方式の変更が，路線全体の列車の遅延に及ぼす影響を，定量的に評価可能とした。

さらに，構築した手法の妥当性を確認するため，まず，乗降シミュレーションで推定される乗降時間を実測乗降時間と比較し，従来の回帰式を使用した場合と同等程度の精度であることを確認した。さらに，実在通勤路線を対象に，ドア幅拡大等の施策を実施した場合の列車遅延の変化を試計算し，提案手法の有効性を確認した。

2. 研究の背景，目的

2.1 混雑，旅客乗降に起因する列車遅延

大都市圏の通勤路線のラッシュ時間帯には，多くの旅客で列車や駅が非常に混雑するため，乗降に要する時間が増加してダイヤ上の停車時間を超過し，列車に遅延が発生しがちである。また，一度ある列車に遅延が発生すると，先行列車との間隔が増大し，当該列車に多くの旅客が集中するため，乗降時間と遅延が更に増加するといった増延現象も発生している。このような混雑，遅延による，快適性や定時性の低下が課題となっている。

鉄道事業者は，この課題に対処するため，多くの列車を運行し混雑を緩和する，停車時間に余裕を持たせ遅延を発生しにくくする等，ダイヤの工夫を行っている。また，乗降に要する時間を短縮するため，ドア幅を拡大する，車内の座席と座席の間の立ちスペースを極力広くとるといった，車両の構造，車内レイアウトの工夫や，ホーム上で列車を待つ旅客の待機位置，列数，移動タイミングを案内するといった，旅客同士の交錯を防ぐ工夫も行われている。本研究では，これら乗降時間短縮のための

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

** 株式会社ジェイアール総研情報システム

施策を、「乗降円滑化施策」と呼ぶ。

しかし、上記のダイヤ変更、乗降円滑化施策を検討する際に、それらによる遅延縮小効果を、事前に見積もるのは困難である。乗降時の旅客の挙動は複雑であり、旅客数だけでなく、各旅客が列車内やホーム上でどのように動くか、列車内のどの位置まで移動するのかにより、乗降時間が大きく異なるからである。さらに、仮にある列車のある駅での乗降時間や列車遅延を見積もることが出来ても、それが後続列車や周辺列車にどの程度波及するか、路線全体での影響は不明である。そのため、施策の効果を見積もることができない状態で、効果的と考えられる施策を選定しなければならない難しさがある。

2.2 関連研究

大都市圏の通勤路線を対象に、列車ダイヤに対する遅延を推定する研究として、鉄道総研では過去に列車運行・旅客行動シミュレータを開発した²⁾(図1)。これは、自動改札機で収集可能な「入場駅、出場駅、出場時間帯、旅客人数」を表す時間帯別 OD データと、列車ダイヤデータ、駅ホームの構造、階段位置を示すデータを使用し、各旅客の列車乗継や乗車する車両、扉を推定するものである。この各旅客の列車乗継経路を集約することで、列車の混雑度や遅延を推定する。遅延の推定には、各列車・駅の各号車・扉の降車人数、乗車人数、継続乗車人数の推定値を使用し、乗降に要する時間を算出して、それが計画ダイヤ上の停車時間を超過する場合には、その分だけ遅延が発生すると推定する。乗降時間の算出には、文献3で実験的に導出された乗降時間計算式(回帰式)を適用する。本手法により、ダイヤに対する遅延発生の事前検証が可能となる。しかし、乗降時間の算出は、旅客人数のみに基づいており、旅客の車内での位置や、混雑時にドア付近の旅客が一旦車外に出て、降車旅客に通路を開ける「再乗車行動」が反映されていない。すなわち、混雑時に乗降時間が長くなる要因となるような実際の複雑な乗降時の旅客挙動が十分に反映されず、実態に沿った乗降時間が推定できない課題がある。

一方、駅での乗降時の各旅客の挙動をシミュレーションし、遅延を推定する研究も報告されている⁴⁾。この研究では、旅客をエージェントとして扱い、各時刻での周辺状況に応じた振る舞いをエージェントシミュレーションで表現し、乗降時間を推定している。しかし、各旅客の列車内やホーム上の移動経路の推定にあたり、経路の距離、混雑の両方が加味されているわけではない。例えば、最初は混雑箇所を通過し時間がかかるが、その後は短時間で移動でき、最終的に目標位置に早く着く経路がある場合、旅客はその経路を歩く可能性は十分にあるものの、それが考慮されないという課題がある。また、再乗車についても、ドア付近の継続乗車旅客に限定してお

り、具体的に降車旅客の妨げになるか否かに基づいていない。さらに、旅客が列車内のどの位置に立ちやすい、または座りやすいか、乗車位置の傾向が反映されていない課題もある。

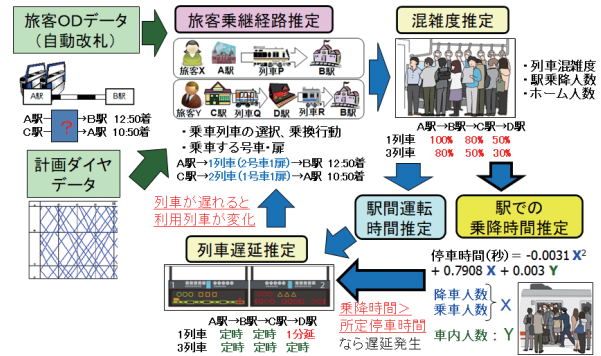


図1 従来の列車運行・旅客行動シミュレータの構成

2.3 研究の目的

以上を踏まえ、大都市圏の通勤路線において、ある列車ダイヤで運行した場合の列車遅延を事前に詳細に推定するために、本研究では以下の要件を満たす乗降時間推定手法と、その機能を搭載した列車運行・旅客行動シミュレータを構築することを目的とする。

- ✧ 再乗車や、周辺他旅客との近接を避けるなど、乗降時の実態に即した旅客挙動を推定する。
- ✧ 旅客が何号車を利用するのか、車内のどの位置に立ちやすいか等、乗車位置の傾向を反映する。
- ✧ 列車運行・旅客行動シミュレータと連成し、各列車、各駅、各扉での乗降時間の推定を実用的な計算時間で可能とする。

3. 列車内での旅客の立ち位置に関する調査

列車の乗降時における旅客の希望立ち位置の傾向を把握し、乗降時の旅客挙動推定に活用することを目的に、各旅客が嗜好する立ち位置について、列車の混雑状況や乗車時間、降車駅の開扉方向等による相違を明らかにし、それらを乗降シミュレーションに反映させる。

3.1 調査方法

(1) 対象者

首都圏の1都3県在住で、20m車4ドア車両が走行する首都圏の33路線・区間(都心方向)を、平日に週に1日程度以上利用している18歳以上の男女とした。

(2) 実施方法、回答者数

Web アンケート方式により、以下の期間に実施した。事前にスクリーニング調査で、平日の朝時間帯に、対象路線・区間を週1日以上、同行者無しで利用し、グリー

ン車、有料特急、ライナー以外の列車を利用する回答者を抽出し、本調査を依頼した。本調査の回答者は全体的に男性が多い傾向となった。

- ◇ スクリーニング調査：2018/01/19～2018/01/22
- ◇ 本調査：2018/01/29～2018/01/31
- ◇ 本調査の依頼数：1,748 件、有効回答数：1,047 件
- ◇ 性別の内訳：男性 73.6%、女性 26.4%

(3) 調査内容 (本調査)

まず、回答者の普段の鉄道利用状況として、利用時間帯、利用区間、所要時間、利用目的、時間的余裕、乗車車両 (号車)、列車の混み具合、着席の有無、乗車位置 (車内の立ち位置/着席位置) を質問した。乗車位置は、図 2 に示す 8 エリアから選択、回答を依頼した。次に、列車の混雑状況を仮想的に設定し、それを前提とした場合における、各乗車位置 (立ち位置) の忌避度 (避けたい度合い) を質問した。想定した車内混雑状況は、乗車時、降車時のそれぞれについて、図 3 の状況 A (混雑率 40%)、状況 B (混雑率 100%)、状況 C (混雑率 180%) の 3 種類について、回答者にランダムに提示した。また、列車内の乗車位置は図 2 に示した 8 つのエリアから選択する形で、忌避度は 7 段階 (1: とても望ましい, 2: 望ましい, 3: やや望ましい, 4: どちらでもない, 5: やや望ましくない, 6: 望ましくない, 7: とても望ましくない) で回答を依頼した。



図 2 列車内立ち位置の選択肢

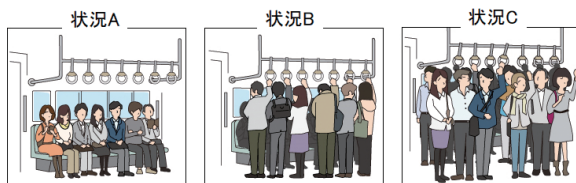


図 3 想定した列車内混雑状況

3.2 調査結果

まず、普段の鉄道利用時に回答者が選択した立ち位置を図 4 に、その選択理由を図 5 に示す。ドアの真横の①が最も多く、ドア付近のシートに面したつり革付近、ドアとドアの中間付近の順に選択された。また、乗車位置の選択理由として、降車時に早く降車できること、乗車中に周囲の旅客に押されないこと、途中駅停車時に乗降の妨げにならないことが多く選択された。これより、旅客は立ち位置が選択できる場合には、降車駅で降車が

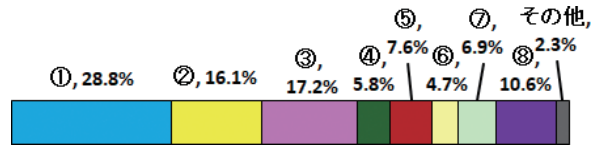


図 4 列車内立ち位置の回答結果

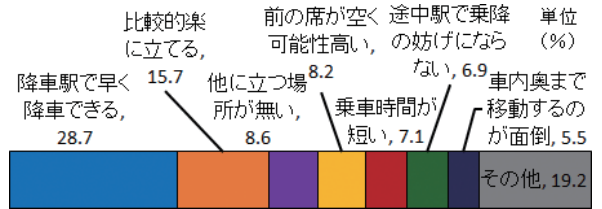


図 5 立席位置の選択理由 (最重要)

容易で、かつ途中駅で他旅客の乗降の妨げとならない箇所を選好しやすいと考えられる。

次に、仮想的な状況を想定した場合の各立ち位置の忌避度の平均値を表 1 に示す。ドアの真横の①や、③、②の忌避度が低い一方、⑦の忌避度が高い結果となった。降車駅での降車し易さから、ドアに近いエリアが選定されやすいこと、車内が混雑することから、つり革や手すりに掴まりやすい位置が選択されやすいことが確認できる。一方で、降車時の混雑度が高い場合には、⑥、⑦、⑧の忌避度が高い傾向にあった。これらの位置では、途中駅での旅客乗降の際に、自分自身が乗降の妨げとなるためと推定される。

表 1 想定状況における、各乗車位置の忌避度

混雑設定		乗車位置							
乗車時	降車時	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
状況A	状況A	3.28	3.60	3.33	4.18	4.07	4.06	4.29	4.12
状況B	状況A				4.05	4.03	4.04	4.30	4.12
状況C	状況A				3.93	4.04	4.04	4.28	4.15
状況A	状況B	3.52	3.68	3.38	4.23	4.18	4.14	4.37	4.35
状況B	状況B				4.15	4.08	4.09	4.39	4.36
状況C	状況B				4.01	4.06	4.27	4.30	
状況A	状況C	3.51	3.57	3.42	4.33	4.32	4.39	4.44	4.35
状況B	状況C				4.14	4.19	4.35	4.48	4.34
状況C	状況C					4.17	4.38	4.48	4.29

4. 乗降シミュレーション機能の構築

駅での乗降時の旅客の挙動をシミュレーションで模擬し、各車両・各扉の乗降に必要な時間をより詳細に推定することを目的とする。また、ドア幅の拡大、整列乗車方法の変更といった乗降円滑化施策により、同じ旅客数でも、乗降時間が変化する状況を模擬可能とする。

4.1 乗降シミュレーションの構成

開発する乗降シミュレーションの手順を図 6 に示す。図 7 のように、車内およびホーム上を格子状に区切ったマス目の上において、旅客が移動する挙動を推定する。

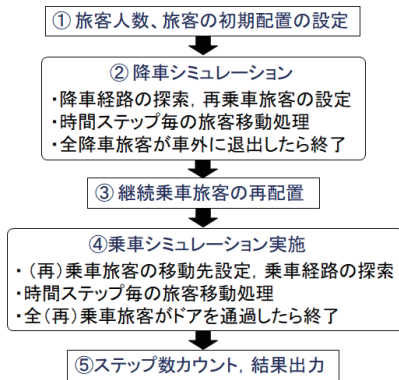


図6 乗降シミュレーション手順

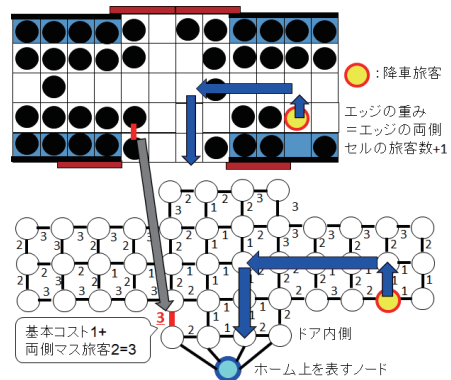


図7 旅客の歩行経路の決定に使用するグラフ構造

なお、各マス目上に、2人以上の複数旅客が同時に滞在する状況もありうる。

まず、①対象となる列車、駅、号車、扉での降車人数、継続乗車人数、乗車人数と、列車が駅に到着し、降車を開始する際の各旅客の位置（初期配置）を設定する。この際、3.2節の乗車位置の忌避度を参照し、望ましい位置の中で、周辺に他旅客が少ない場所に配置されるように設定する。また、乗車位置の設定は、各旅客を1人ずつ順次決定し、既に決定した旅客の位置も考慮することで、旅客の初期配置が車内の特定の場所に偏ることを防ぐ。

②降車シミュレーションでは、まず、各降車旅客が車内のどの地点を通り、ドアの外に出るのか、歩行経路を探索する。次に、その結果を集約し、各継続乗車旅客について、現在の立ち位置が一定人数以上の降車旅客の経路上となる旅客を抽出する。この場合、その継続乗車旅客は、降車旅客の妨げとなるため、再乗車するものと設定し、一度ホーム上に退出するための歩行経路を探索する。そして、マス目の大きさと旅客の歩行速度を考慮して設定する時間ステップ毎に、各降車旅客、再乗車旅客の経路探索と、探索された経路方向への1マス分の移動を行う。ここで、移動先の位置が他旅客と重複する場合、混雑による歩行速度の低下が想定される。これを表現するため、他旅客と重複時には「移動待ち」として、次の時間ステップでの移動を取りやめる。この推定を、全降車旅客、再乗車旅客が車外に退出するまで継続する。

降車終了後、車内の継続乗車旅客に対し、③車内位置の再配置を行う。再配置位置を決定する際には、乗車位置の忌避度と周辺他旅客数に加え、再配置前の現在位置からの移動距離も考慮する。これにより、降車旅客で空いた目の前の座席など、現在位置から近く、かつ他旅客の少ない場所に移動しやすい行動を表現する。

そして④乗車シミュレーションを開始する。まず、再乗車旅客について、その後、新規乗車旅客について、初期配置と同様の手法で、車内の目標乗車位置を決定する。次に、降車シミュレーション時と同様、時間ステップ毎

に旅客の移動を行う。全ての再乗車旅客、新規乗車旅客がドアを通過した時点で乗降完了とし、⑤時間ステップ数をカウント、乗降時間を計算する。

旅客の歩行経路は、各マスをノード、マスとマスの間をエッジとした無向グラフ上で、現在位置～目標位置まで最短経路を探索する（図7）。エッジのコストは1を基本に、エッジ両端のマス上の旅客数だけ値を加算することで、旅客が多い混雑箇所を避ける行動を模擬する。

4.2 乗降シミュレーションの実施例

降車7人、乗車19人、継続乗車22人の計48人のシミュレーション例を図8に示す。降車旅客を青色▼で、継続乗車旅客を白色◆で、再乗車旅客を橙色●で、新規乗車旅客を緑色■で表し、マス目の大きさは、1つの時間ステップが1秒となるように設定する。まず、旅客の初期配置と、再乗車旅客の決定を行った結果を図8①に示す。この例では、1人以上の降車旅客が通過する場合に再乗車とし、結果的に2人の継続乗車旅客が再乗車となった。次に、降車シミュレーション完了時点を図8②に示す。青色▼の旅客の車外への退出が完了している。

そして、継続乗車旅客の再配置後の車内状況を図8③に示す。降車旅客により空いた座席に継続乗車旅客が座り、配置が変更されている。その後、乗車シミュレーション

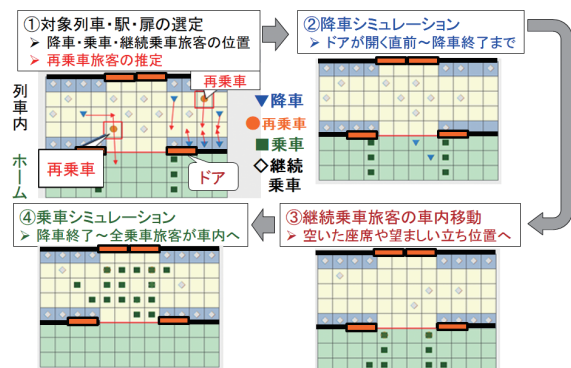


図8 乗降シミュレーションの例

ンが行われ、最後の乗車旅客がドアを通過した状態を図8④に示す。以上で乗降シミュレーションが完了し、降車開始～乗車終了の時間（ステップ数）は、26秒であった。

4.3 乗降時間の実測データとの比較

構築した乗降推定手法の妥当性を確認するため、モックアップ車体を使用し、実際の乗降人数と乗降時間の関係について実験を行ったデータ（文献3で取得）を使用し、実験時の乗降時間と、提案手法の乗降時間を比較した。この結果、提案手法による乗降時間推定値の約74%が、実験時の実測値±10秒以内に収まることがわかった。一方、実測乗降時間に対し重回帰分析を行い、導出された回帰式で乗降時間を推定した場合にも、同様に約74%が実測値±10秒以内に収まる結果となった。これより、提案手法による精度向上は達成出来なかったものの、回帰式と同等の精度を有することが確認された。

5. 列車運行・旅客行動シミュレータとの連成

列車運行・旅客行動シミュレータの列車遅延推定精度の向上を目的に、乗降シミュレーション機能を連成させ、列車・ホームの混雑の推定結果に基づき、乗降シミュレーションを行い、遅延を推定する構成とする（図9）。

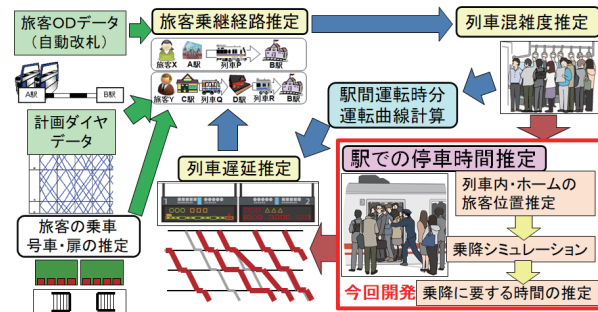


図9 列車運行・旅客行動シミュレータとの連成

5.1 旅客の乗車号車・扉の推定手法の改良

既開発の列車運行・旅客行動シミュレータにも、旅客の乗車号車・扉の推定手法が搭載されている。具体的には図10のように、各旅客の出場駅（降車駅）の出口位置を参照し、出場駅出口位置に近い号車・扉に乗車しやすいとの前提に基づき決定する。これは、実路線における各号車の混雑傾向にも見られ、不自然では無い。しかしこの手法には、①入場駅（乗車駅）の入口位置が考慮されていない、②入場駅の各乗車位置で、既に列車を待っている他旅客の人数が考慮されていない、③入場駅のホーム上の歩行移動時間が考慮されていない、といった課題がある。本研究では、文献5を参考に、以下の機能を有する新たな乗車号車・扉の推定手法を開発した。

まず、①入場駅階段位置の反映について、旅客を2つのグループに分割する。(a)従来手法と同様、出場駅の出口位置に基づき扉を決める旅客（図10）と、(b)入場駅の入口位置に基づき扉を決める旅客（図11）である。次に、②整列乗車する他旅客数の反映について、(b)入場駅の入口位置に基づく旅客に対し、旅客のホーム出現時に、整列乗車旅客数が多い扉の選択確率を下げる調整を行う（図12）。これにより(b)グループは、入場駅の入口位置に近く、かつ整列旅客数が少ない扉に乗車する傾向となる。さらに、③ホーム歩行時間は、両グループともに、乗車する扉を、ホーム出現～列車発車までの間に徒歩で到達可能な範囲に限定する（図13）。

5.2 乗降円滑化施策の評価例

大都市圏の通勤路線（駅数19駅、終日列車本数約1,000本）の初電～朝10時を対象に、乗降シミュレーションと連成した列車運行・旅客行動シミュレータを使用し、現状（①）の列車運行状況、および乗降円滑化施策を実

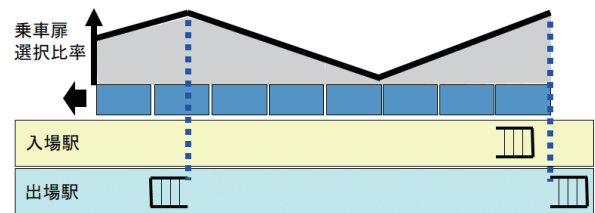


図10 出場駅出口に近い扉に乗る旅客の扉選択比率

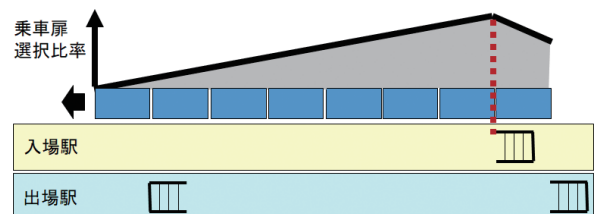


図11 入場駅入口に近い扉に乗る旅客の扉選択比率

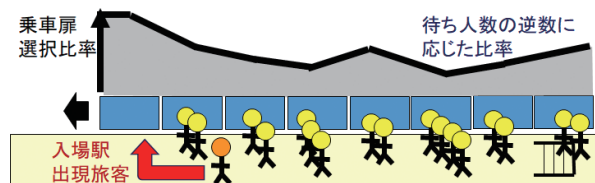


図12 整列旅客数を反映した選択比率の調整

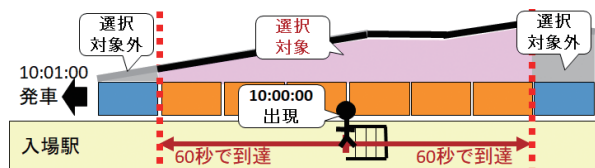


図13 入場駅で徒歩で到達可能な範囲の号車・扉

施時の列車運行状況を推定し、列車遅延を比較した。

評価対象の乗降円滑化施策として、②車両のドア幅を1.3m→1.8mに拡幅した場合、③全旅客が乗降に協力的になった場合の2つを想定した。③は具体的には、各駅での降車旅客は、列車の到着10秒前からドア付近に移動を開始し、また乗車旅客は、列車内の奥の位置に詰めると仮定した場合である。鉄道事業者が旅客の誘導を強化し、上記のような乗降協力が実現するケースを想定した。評価尺度には、列車運行・旅客行動シミュレータで推定される、列車遅延の最大値（初電～朝10時）を用いた。

その結果、①現状の最大遅延が102秒となるのに対し、②ドア幅の拡幅により77秒、③旅客の乗降協力により78秒となり、それぞれ25秒程度縮小する結果となった。また、最大遅延となる列車について、前後の駅を含む区間の遅延の推移を図14に示す。①現状では、A駅の遅延がF駅まで減少することなく推移するが、②および③の場合には、B～F駅の区間でも、遅延が相応に減少した。

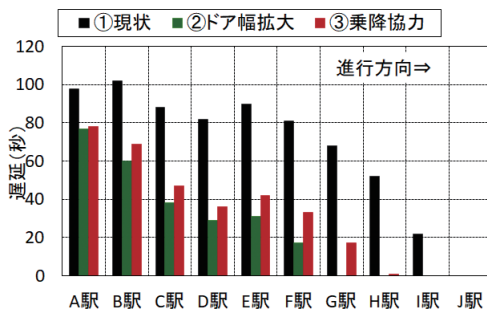


図14 最大遅延となる列車の遅延の推移

本シミュレータの乗降円滑化施策の検討への活用イメージについて説明する。②のドア幅拡大は、遅延縮小の効果はあるが、対象路線の全列車の扉を拡幅すると、相応な投資となる。一方③の旅客の協力は、マナー放送や案内の拡充により実現するもので、車両や駅設備といったハードの改修が伴わない点では、比較的实施しやすい。しかし、③は全旅客約28万人が協力的となった場合を仮定している。事業者が積極的に協力依頼した場合でも、全旅客が協力的になることは考えにくく、実際の効果はこの数値よりも限定的になると考えられる。一方で、旅客への協力依頼だけでは最大でもこの程度の効果のため、それ以上の改善を目指すには、別の施策とあわせた検討が必要である、と解釈することもできる。このように、提案する列車運行・旅客行動シミュレータを用いた評価により、路線全体の列車遅延の観点から、

施策の効果を定量的に見積もることが可能になる。

6. まとめ

本研究では、大都市圏通勤路線を対象に、乗降時間をより詳細に推定し、乗降方法の工夫による効果を評価可能とするため、乗降推定機能を有する列車運行・旅客行動シミュレータを構築した。まず、列車乗車時における旅客の乗車位置（立ち位置）の嗜好を、Webアンケート調査により明らかにした。次に、ある1つの列車・扉に対する乗降状況を模擬する乗降シミュレーション手法を構築した。そして、旅客の乗車車両・扉の推定手法を構築し、乗降推定機能を有する列車運行・旅客行動シミュレータを構築した。さらに、実在通勤路線を対象に、乗降円滑化施策の効果を試算し、提案手法の有効性を確認した。

本研究の成果の活用として、ホーム上の整列乗車方法や構造物の位置変更、列車停止位置変更、車両内のレイアウト変更、旅客への案内、誘導要員の増強といったハード、ソフト両面の乗降円滑化施策を、事前に定量評価することが挙げられる。また、これらの施策とダイヤ改正を組合せ、乗降による遅延が波及しにくいダイヤとした場合の複合的な効果も試算できる。

今後の方向性として、駅構内やコンコースを対象とした旅客流動シミュレーションと連成し、旅客行動に影響する駅構内、列車内、列車ダイヤの各要素を総合的に評価可能とすることが挙げられる。これにより、列車遅延や、旅客の快適性向上のための施策を検討するための総合的なツールを開発し、鉄道事業者における、より魅力的な輸送サービスの設計、実施を支援していきたい。

文献

- 1) 富井規雄：列車ダイヤのつくりかた、オーム社、2012
- 2) 國松武俊ほか：マイクロシミュレーションを用いた利用者の視点による列車ダイヤ評価手法、電気学会論文誌D、Vol.130、No.4、pp.459-467、2010
- 3) 大戸広道ほか：鉄道駅における旅客流動に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、E-1、pp.845-846、1999
- 4) 岩倉成志ほか：都市鉄道の遅延連鎖予測のためのエージェントシミュレーション、運輸政策研究、Vol.15、No.4、2013
- 5) Fang, J. et al., "A Model of Passenger Distribution on Metro Platforms Based on Passengers' Boarding Strategies," Proceedings of 8th International Conference on Railway Operation, Modelling and Analysis: RailNorrköping 2019, 2019.