

# バスの実運行情報と乗客数情報を活用した 運行シミュレーションと可視化

新井 雄大<sup>1</sup> 廣井 慧<sup>2,3</sup> 河口 信夫<sup>1,2,3</sup>

**概要：**バスは、通勤・通学・高齢者の移動手段として重要な交通機関であるが、遅延が多く、通勤・通学時間に混雑しやすいという課題が存在する。運行ダイヤの変更は、これらの課題を緩和できる可能性があるが、最適な変更は明確でなく、試行錯誤が必要となる。ダイヤの変更が多くなれば、利用者への周知が何度必要になり、利用者・事業者の双方にとって大きな負担となる。そこで本研究では、バス運行データを用いて、停留所における乗客出現をモデル化し、様々な運行状況をシミュレーションする環境を構築する。その際、バスの待ち時間や混雑率から、乗客のバス利用に対する”不満足度”を定義する。これにより、運行状況が変化した場合の不満足度を測定し、定量的に評価を行う。さらに、運行状況を可視化し、利用者における利便性の向上と、バス事業者における利用効率の向上の両方を考慮した運行方法の提案を目指す。

## Simulation and Visualization of Bus Operation with Passengers using Actual Bus Management Information

TAKEHIRO ARAI<sup>1</sup> KEI HIROI<sup>2,3</sup> NOBUO KAWAGUCHI<sup>1,2,3</sup>

### 1. はじめに

バスは、通勤・通学・高齢者の移動手段として重要な交通機関であるが、遅延が多く、通勤・通学時間に混雑しやすいという課題が存在する。運行ダイヤの変更は、これらの課題を緩和できる可能性があるが、最適な変更は明確でなく、試行錯誤が必要となる。ダイヤの変更が多くなれば、利用者への周知が何度必要になり、利用者・事業者の双方にとって大きな負担となる。そこで本研究では、この混雑・遅延・無駄な運行の緩和に、バスの実運行データを用いたシミュレーションを用いることを考える。この際、乗客の一人一人が、自覚・不覚問わず、乗車したバスに対して不満がどの程度あるかを指標化した“不満足度”を定義する。不満足度は、乗客がバス運行に求めることが季節・時間帯・地域など様々な要因によって変化することが考えられるので、それぞれの乗客によって価値基準が変化する。これに従い、利用効率を向上しつつ、この不満足度が

向上されるような運行を検討し、それぞれの乗客にとってより快適になるバス運行を目指す。さらに、deck.gl(URL: <https://uber.github.io/deck.gl/>)を用いた可視化ライブラリを用いることにより、バスの運行本数などシミュレーションの条件を変更した際に、運行状況がどう変化するかを視覚的に確認できるツールを構築した。

### 2. 関連研究と課題

#### 2.1 関連研究

バスの運行を改善する研究は、最適化問題の解決手法として多くの研究がなされてきた。部分最適化問題により、バスが走行する道路網から決定する手法 [1] や、運行可能バス台数と所要時間を制約条件とする組み合わせ最適化問題として定式化する手法 [2] などである。また、コンピュータシミュレーションを用いてバスの運行を再現する研究もなされてきた。[3] ではミクロな交通状況を考慮し、バスの優先施策を実行した場合の影響をシミュレーションで算定している。また、乗客の需要をリアルタイムで観測し、運行をその都度決定するデマンドバスの研究も、シミュレー

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院工学研究科

<sup>2</sup> 名古屋大学未来社会創造機構

<sup>3</sup> NPO 法人位置情報サービス研究機構 (Lisra)

ションと組み合わせた手法で盛んになされてきた。[4]では、デマンドバスと固定路線バスの利便性をシミュレーションによって比較し、遺伝的アルゴリズムとマルチエージェントによるオークションという手法を用いて各々の最適運用を求めている。[5]では、シミュレーションによるデマンドバスのリアルタイム運行経路設定によって、実証実験を行い、有効性を示している。[9]や[8]でも、独自のデマンドバス経路決定シミュレーションを行い、[8]では、それによる社会実験を行なっている。デマンドバスに関する研究においても、最適化問題やシミュレーションを用いて最適な運行を目指す試みがなされてきた [9], [10]。

## 2.2 課題

上記の研究では、バス運行の混雑・遅延解消を目指して最適化・デマンドバスを提案しているが、ユーザの要求の違いによる適切な最適化は行われていない。例えば、通勤・通学時間帯においては、多少の混雑を許容してもなるべく早く目的地に着きたいと考える人が多いと予想され、ショッピングモールから帰宅する人は、多少時間がかかっても良いからなるべく座って移動したいと考えると予想される。そこで本研究では、バス事業者目線で運行を効率化することに加え、利用者の目線を追加して最適化の検討を行う。季節・時間帯・地域によって、利用者がバス運行に求めるものが変化することを考慮し、それぞれの時点において最適なバス運行を行うようなシステムを提案・検討する。

## 3. 提案システム

### 3.1 シミュレーション概要

前章の課題を踏まえて、本研究では、まずバス事業者・利用者両方の考え方を考慮し、時間帯や地域によって利用者の求めるものと現状の運行に対する差異を指標化した“不満足度”を定義する。シミュレーションによって様々な運行状況を再現し、利用効率を向上しつつ不満足度が減少するような運行を検討する。

### 3.2 不満足度の定義

不満足度は、季節・時間帯・地域など様々な要因によって変わると考えられる。本研究では、不満足度を測る評価項目として、停留所に到着してから乗車するまでの時間  $T_{wait}$ 、乗車してから降車するまでの遅延時間  $T_{delay}$ 、バスの運行間隔  $I$ 、乗車中の混雑率  $C$  を定義する。季節・時間帯・地域などによってこれらの評価項目に対する重みが変わり、それによって全体での不満足度が決定される。本研究では、全体での不満足度が、評価項目とその要因からなる重みの線形結合によって決定されるとした。つまり、それぞれの評価項目に重み  $\omega_i$  が乗算され、全体での不満足度  $S$  が重みづけされた評価項目の和となる。それぞれの重

みは季節・時間帯・地域などの要因で変化する。これを式に表現すると

$$S = \omega_1 T_{wait} + \omega_2 T_{delay} + \omega_3 C + \omega_4 I \quad (1)$$

となる。

### 3.3 シミュレーション設計

シミュレーションがどのようなデータ・構成で行われるかを示す。本研究では、シミュレーションを行う際のデータに、バス運行データ・乗客出現率のデータ・乗客の目的地に関するデータの三種類を用いる。これらは、株式会社メイトツコムから提供されたバス運行データを基に抽出・算出したデータである。また、シミュレーションには停留所・バス・人の三種類の要素を定義し、これらが相互に作用してシミュレーションが行われる。まず頂いたデータ・シミュレーションに用いるデータの概要を示し、次にシミュレーションを行う際のそれぞれの要素の動きを示す。

#### 3.3.1 使用データ

使用するデータは、株式会社メイトツコムから提供されたバス運行データである。このうち、バス発着データと乗客の乗降に関するデータの2種類を使用している。バス発着データは、日時・路線(運行地域)・系統・上下・始発時刻ごとにバスの運行が分類されたものである。それぞれのバスが、何時に停留所を出発する予定で、実際には何時に停留所を出発したのかを記録している。乗客の乗降に関するデータは、バスを乗客が利用した時、何時にどの停留所から乗車し、どの停留所で降車したかを記録したものである。現在は、2016年7月1日から16日の中で乗車人数が最も多かった7月8日のデータのみを用いて、7月8日の運行の再現を行った。

#### 3.3.2 停留所の挙動

停留所は、それぞれの停留所を識別する個別の番号を保持する。この番号により、バスがどの停留所に向かえば良いのかを判断する。また、各停留所は、データから算出した、停留所ごと・時間ごとの乗客出現率を、定数の系列として保持する。

#### 3.3.3 バスの挙動

図1にフロー図を示す。それぞれのバスは、それぞれの停留所の発時刻になると停留所に移動し、そこで待機している乗客を乗車させ、目的地が各停留所と一致している乗客を降車させる。発時刻以外は移動中であるため、必ず停留所と被らないような場所に移動する。そして次の発時刻になるとまた停留所に移動し、乗客の乗降を行う。混雑率を測定するため、それぞれの移動中に、自身の乗車数を記録する。

#### 3.3.4 人の挙動

図2にフロー図を示す。人は、停留所ごとの出現確率により出現する。例として、シミュレーションの1ステップ

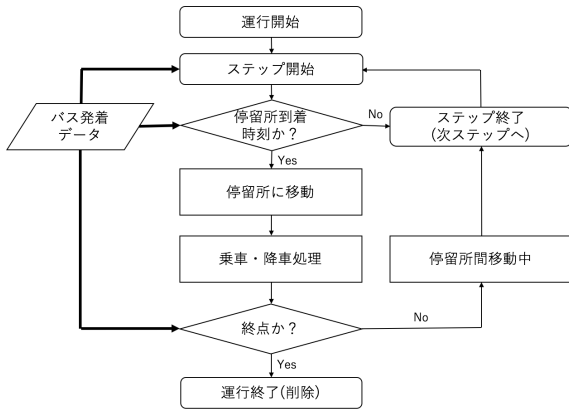


図 1 シミュレーション中のバスの挙動

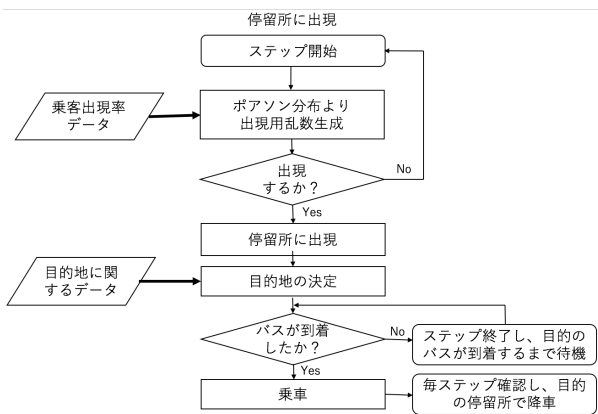


図 2 シミュレーション中の人の挙動

を 1 秒とする。そしてシミュレーションの 1 ステップごとに、1 秒ごとの出現確率を平均とするポアソン分布に従って、1 秒間の出現数 (つまり、ポアソン分布の x 軸) を返す乱数を取得する。1 秒ごとの出現率は小さいので、ポアソン分布に従った乱数はほぼ全てが 0 か 1 となる。これが 1 となった場合に、該当の停留所において人が出現する。バスが停留所に到着した段階で、バスの行き先に自分の目的地が存在するかどうか判断し、存在すれば乗車する。目的地の停留所に到着すると、降車する。この際、自身の乗車時間を記録する。

### 3.4 可視化設計

可視化には、deck.gl を用いている。これは、Uber 社が開発・公開している、WebGL ベースのビッグデータ視覚化フレームワークである。GPU ベースで分析・描画することができ、視覚化されたデータを複数のレイヤで組み合わせることも可能である。ここに、バス運行のシミュレーション結果をそれぞれのデータに基づき可視化する。我々が本研究で開発しているバス運行可視化ライブラリを、BusDataVisualizer と呼称する。

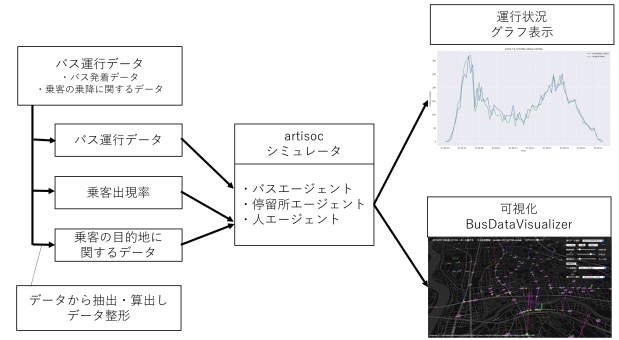


図 3 システム図

## 4. 実装

本研究で実際に実装したシステムを図 3 に示し、内容を以下に示す。

### 4.1 シミュレーション用データの整形

まず、株式会社メイトツコムから提供されたデータをシミュレーションに用いるデータに整形する。これは Python を用いたプログラミングによって行う。本研究ではシミュレータとして MAS(マルチエージェントシミュレーション、以降 MAS) である artisoc を用いているため、それぞれのエージェントを動作させるということを考慮してデータを作成する。バス発着データ、乗客の出現率に関するデータ、乗客の目的地に関するデータの三種類のデータを用いている。以下に詳細を示す。

#### 4.1.1 バス発着データ

バス発着データを用いて、シミュレーションにおけるバスエージェントの停留所移動タイミングを記述したデータを作成する。シミュレーション時に、バスエージェントはこのデータを参考に動作を決定する。

#### 4.1.2 乗客の出現率に関するデータ

乗客の出現率に関するデータは、停留所ごと・時刻ごとに、どれくらいの割合で乗客が出現するかを記述したデータである。これは乗客の乗降に関するデータから算出した値である。乗降データを乗車停留所ごとにまとめ、さらに 15 分ごとのデータにまとめる。そして停留所ごと・15 分ごとの乗車人数を算出し、それを 15 で割ることによって 1 分ごとの出現割合を算出する。そしてこれを 15 分ごとの乗客出現率とする。

#### 4.1.3 乗客の目的地に関するデータ

乗客の目的地に関するデータは、停留所に出現した乗客がそれぞれこの停留所で降りるかを、確率で求めたものである。乗客の乗降に関するデータを乗車停留所ごとにまとめ、そこからどの停留所に向かったのかを割合として算出する。例えば、停留所 1 から停留所 A、B、C の三箇所にそれぞれ 2 人、3 人、4 人の人が向かったとすると、停留

所 1 から A へは  $\frac{2}{2+3+4} \approx 0.22$ 、B へは  $\frac{3}{2+3+4} \approx 0.33$ 、C へは  $\frac{4}{2+3+4} \approx 0.44$  となる。目的地の割合は時間帯によって変わる場合があるが、今回は考慮していない。

## 4.2 シミュレーション

次に、本研究で用いたシミュレータと、シミュレーションにおけるそれぞれのエージェントの動作を示す。

### 4.2.1 使用シミュレータ

本研究では、バスの運行を再現するためのシミュレータとして、構造計画研究所開発の MAS である artisoc(URL: <http://mas.kke.co.jp/>) を用いた。MAS とは、定義した空間内にそれぞれの物体を表すエージェントを配置し、エージェントはステップごとに決められた行動規則に乗っ取って動作をしていくものである。本研究では、“停留所エージェント”、“バスエージェント”、“人エージェント”の三種類のエージェントを定義する。これらのエージェントがステップごとに決められた動作を行う。本研究では 1 ステップ=1 秒として扱う。

また、本研究においては、シミュレーションの結果を BusDataVisualizer によって可視化する。従って、シミュレーションの結果としては、それぞれのバスが何時に、どの停留所において、何人乗降を行ったかの情報のみを必要とする。なので、シミュレーション時に道路状況や地図上の経路を再現するのではなく、停留所エージェントは互いに被らないようにランダムに配置し、バスエージェントは発時刻になったら停留所に瞬間移動し乗降を行う、というモデルとした。以下にそれぞれのエージェントの動作を示す。

### 4.2.2 停留所エージェントの挙動

それぞれの停留所エージェントは、乗客の出現率に関するデータをもとに、1 ステップごとに乗客を出現させるかどうかの判断を行う。この判断は、artisoc 内の既定関数である、ポアソン分布に対し、それに従って出現数の乱数を返す関数をもとに行う。本研究では 1 ステップ=1 秒としているので、この関数の引数には、乗客出現率 [人/分] として算出した値をさらに 60 で割り、1 秒ごとの出現率とした値をとる。引数の値がとても小さいので 0 か 1 のみが返り値として得られるものとし、返り値が 1 となった場合に乗客を出現させる。さらに乗客の目的地に関するデータから、出現した乗客の目的地を決定する。

### 4.2.3 バスエージェントの挙動

それぞれのバスエージェントは、それぞれの停留所の発時刻になると停留所に移動し、そこで待機している乗客を乗車させ、目的地が各停留所と一致している乗客を降車させる。発時刻以外は移動中であるため、必ず停留所と被らないような場所に移動する。そして次の発時刻になるとまた停留所に移動し、乗客の乗降を行う。

### 4.2.4 人エージェントの挙動

それぞれの人エージェントはバスエージェントと同じ座標に出現する。バスが停留所に到着した段階で、バスの行き先に自分の目的地が存在するかどうか判断し、存在すれば乗車する。目的の停留所に到着すると、降車し、自身を削除する。

### 4.2.5 不満足度の導出

本研究において現在、不満足度を導出する際の指標となる運行時間と混雑率が、時間・場所によってどう変化するののかについての検討がなされていない。これについては、今後の課題とする。

## 4.3 シミュレーション結果のグラフ表示

シミュレーションの結果をもとに、時間に対する乗車人数のグラフ表示を行い、実運行データとシミュレーションの結果を比較する。比較例として、図 5 と図 6 を挙げる。これについての詳細は次章に示す。

## 4.4 可視化

次に、可視化における実装について述べる。シミュレーション結果は、前述の通り、それぞれのバスが何時に、どの停留所において、何人乗降を行なったかの情報である。この情報をもとに可視化を行なった。

### 4.4.1 データ形式

シミュレーション結果は、それぞれのバスがどの停留所で何人乗降を行なったかのデータである。これを、BusDataVisualizer で使用している json ファイル形式に整形する。

### 4.4.2 可視化仕様

現在の BusDataVisualizer の仕様を表した図が図 4 である。この図において、薄紫色の円はバスを表し、緑・黄・赤の円はバスを表している。色の違いは、そのバスにおける遅延の度合いを表現している。遅延分数による色の変化を図 4 の横に示す。このとき、何分以上で色が赤になるかは、表示画面において可変である。また、それぞれのバス・停留所に縦棒を表示することにより、バスはその時点での乗車人数を、停留所はその時刻での乗車待ち人数を示している。この縦棒はバス・停留所それぞれに 4 本ずつ表示することができ、それぞれに別のデータを割り当てることができる。

## 5. シミュレーション結果

artisoc を用いて作成したシミュレーションの結果を示す。シミュレーション結果は、時間に対する乗客数の推移と、時間に対する停留所における乗車待ち人数の推移の二種類の形式で表すことができる。

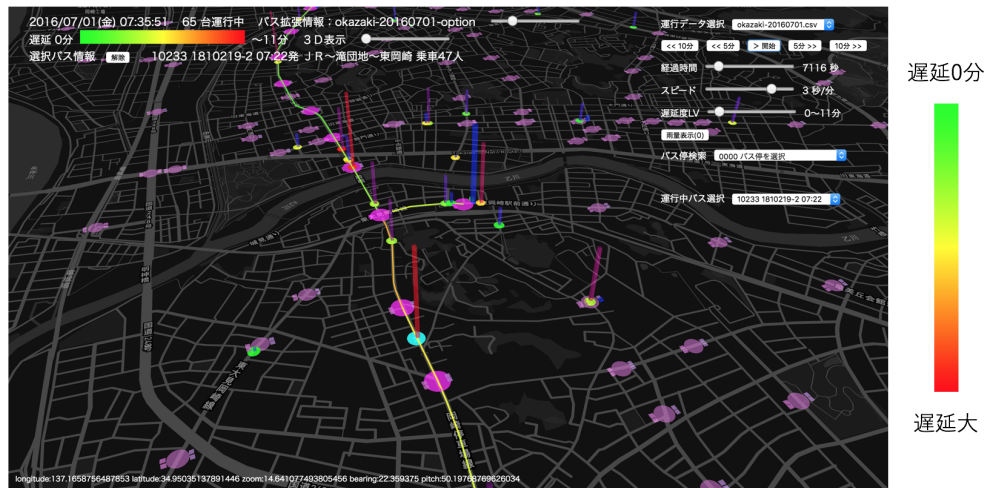


図 4 BusDataVisualizer の表示画面と  
画面内のバスアイコンにおける遅延分数による色表示

## 5.1 時間に対する乗客数の推移

時間に対する乗客数の推移を図 5 に示す。これは、横軸が時間、縦軸が乗車人数であり、すべての停留所において、バスが到着するごとに乗車した人数を示したものである。また、一回ごとの乗車を表すと粒度が細かすぎて視認性に欠けるため、15 分ごとの乗車人数にまとめている。このように、乗車人数については、実データに近づけられていることがわかる。また、実データとシミュレーション結果間の相関係数は 0.94 となった。次に、ある停留所において、同様に時間に対する乗客数の推移をグラフにしたものが図 6 である。停留所単位においても、全体と同様に、乗車人数の推移を再現できていることがわかる。

## 5.2 時間に対する停留所における乗車待ち人数の推移

それぞれの停留所において、乗車待ちをしている乗客の人数の変化を図 7 に示す。通勤時間に人が集中し、午後に緩やかなカーブを描いて様々な人が乗車していることから、ある程度の再現性を得られていると思われる。これがどの程度再現性を持っているかの検討は、今後の展開として挙げられる。また、このデータは、停留所“東岡崎”、“岡崎駅前”における変化を除いた結果となっている。これらの停留所を加えると、正確な結果を得られることができなかった。これらの停留所は、岡崎市内における最も主要な停留所であり、様々な目的地を持った人が集まる。乗客の目的地に関する確率は 1 日通しての確率となっているので、目的地へ向かう予定のバスが存在しないのに乗客が出現してしまっている可能性が考えられる。

## 6. 可視化の現状・課題

シミュレーションを可視化する目的は、シミュレーションの条件を変更した場合に、乗客の流れがどう変わっていくのかを視覚的に確認するためである。シミュレーション

の条件とは、バスの運行時間・運行本数と、乗客の出現率のことである。様々な運行状況(曜日・季節など)を再現したり、定義した不満足度が向上するように様々な変更を加えていく。

現状において、図 4 で示した通り、地図上に、バスと停留所を表す円と、乗車人数・乗車待ち人数を表す棒が表示されている。現在では、バスにおける乗車人数を表す棒は 1 本のみ使用しており、停留所における乗車待ち人数を表す棒は上下で分割し、2 本を利用する。

この仕様における課題として、バスの運行本数を変更した時に、それぞれのバスがどちらのシミュレーション結果を表示しているのかわかりづらい。さらに、乗客全体の流れの変化が現状ではわかりづらくなっている。視認性をより向上するために、デザインをより改良する必要がある。

## 7. まとめ・今後の展開

本研究では、バス運行をシミュレーションによって最適化する際に、それぞれの利用者ごとに運行の評価基準が変わるような指標である“不満足度”という概念を取り入れた。これにより、バス事業者目線での運行効率化だけでなく、それぞれの利用者目線での快適なバス運行を目指す。株式会社メイテツコムから提供された実運行データを利用し、MAS である artisoc を用いてバス運行を再現するシミュレーションを構築した。時間ごとのバス乗車人数が、シミュレーションと実運行データ間で相関係数が 0.94 になる程度に近づけ、シミュレーションが正しく行われていることを確認した。また、deck.gl を用いた可視化ライブラリ BusDataVisualizer により、それぞれの停留所・バスにおける乗車待ち人数・乗車人数をマップ上で表示する可視化ライブラリを利用可能にした。

今後の展開としては、まず不満足度の明確な定義が挙げられる。地域・時間などの状態と運行時間・混雑率との相



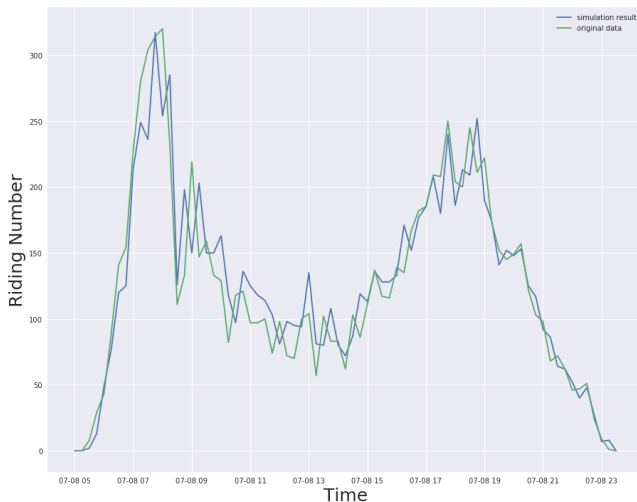


図 5 すべての停留所における時間に対する乗客数の推移

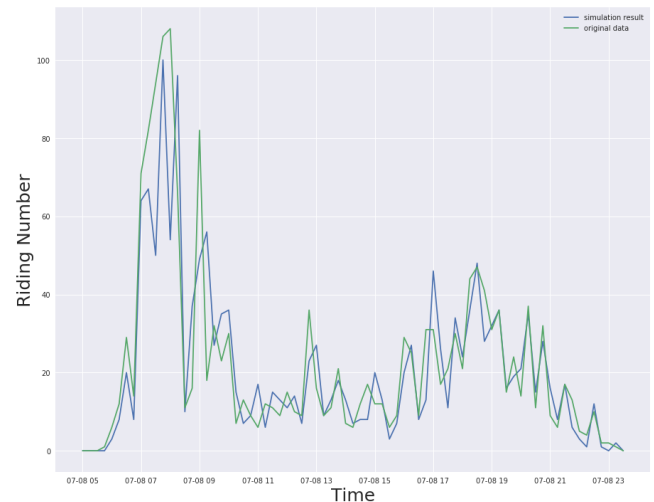


図 6 “岡崎駅前”における時間に対する乗客数の推移

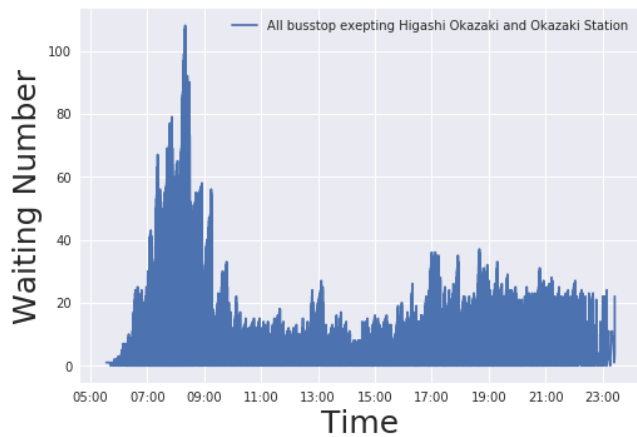


図 7 “東岡崎”、“岡崎駅前”を除いた、時間に対する乗車待ち人数の推移

関や、運行時間・混雑率が全体の不満足度にどのような影響を持っているかの検討が必要となる。次に、乗客の目的地に関する確率を時間ごとに分けて算出し、より正確な確率にした上で、時間に対する乗車待ち人数が実際にどの程度再現しているかを検討する必要がある。また、現在のシミュレーションでは、バスの挙動が完全に時間で決定されており、シミュレーション中に遅延をするようなモデルになっていない。従って、この点を解決する必要がある。その上で、運行ダイヤを様々に変更した場合の不満足度への影響を検討する。

**謝辞** バス運行データを提供いただいた名鉄バス(株)及び株式会社メイテツコムに感謝します。また、本研究はJST OPERAの支援を受けて実施した。

## 参考文献

- [1] 枝村俊郎, 森津秀夫, 松田宏, 土井元治: 最適バス路線網構成システム, 土木学会論文報告集, 300号, pp.95-107, 1980.
- [2] 高山純一, 宮崎耕輔: バスダイヤを用いた最適バス路線

- 網再編計画策定に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.827-836, 1996.
- [3] 佐野可寸志, 松本昌二, 野沢徹, 尾羽根幸: 交通シミュレーションモデルを用いたバス優先施策の評価, 土木計画学研究・論文集, No.17, pp.933-940, 2000.
- [4] 野田五十樹, 篠田孝祐, 太田正幸, 中島秀之: シミュレーションによるデマンドバス利便性の評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No.1, pp.242-252, 2008.
- [5] 坪内孝太, 大和裕幸, 稗方和夫: デマンドバスの導入設計シミュレータの開発と評価, 人工知能学会論文誌, 25巻, 3号, TS09-E, pp.400-403, 2010.
- [6] 大堀耕太郎, 青島親年, 高橋真吾: エージェントベース社会シミュレーションを用いたフロントオフィスにおける知的探索支援のシナリオ分析, 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), Vol.133, No.9, pp.1701-1708, 2012.
- [7] 北上靖大, 森俊勝, 坂平, 文博, 志村泰知, 杉浦哲平: 都市課題の解決に向けたマルチエージェントシミュレーションの活用, 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), Vol.133, No.9, pp.1640-1644, 2013.
- [8] 小柴等, 野田五十樹, 平田圭二, 佐野涉二, 中島秀之: Smart Access Vehicles の社会実装-シミュレーションを通じた分析と実証-, 情報処理学会研究報告, Vol.2014-ICS-174, No.1, pp.1-8, 2014.
- [9] 政野博紀, 柴田直樹, Juntao Gao, 南和宏, 伊藤実: デマンドバスのための乗り換えを含むリアルタイムルートスケジューリング, 第24回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp.9-16, 2016.
- [10] Konstantinos GKIOTSAITIS, Nitin MASLEKAR: REFLEXによるバス運行の動的最適化, NEC 技報, Vol. 69, No.1, AIによる社会価値創造特集, pp.68-72, 2016.
- [11] Erilda Duzha, Igli Hakrama: Public Transportation Simulation by Using Agent Based Simulation: Case of Tirana, Conference Paper, 2015.
- [12] David Meigan, Olivier Simonin, Abderrafiaa Koukam, Simulation and evaluation of urban bus-networks using a multiagent approach, Simulation Modelling Practice and Theory 15, pp.659-671, 2007.