

実都市を対象としたシミュレーションによるデマンドバス評価

Demand Bus Evaluation using Traffic Simulator based on Real Data

小柴 等*¹
Hitoshi KOSHIBA

野田 五十樹*^{1*2*3}
Itsuki NODA

山下 倫央*^{1*3}
Tomohisa YAMASHITA

*¹産業技術総合研究所サービス工学研究センター
AIST Center for Service Research

*²東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

*³科学技術振興機構
The Japan Science and Technology Agency (JST)

In this paper, we proposed demand-bus evaluation framework using traffic simulator based on real city (Hakodate, JAPAN) and real data. In this case, we use exist simulator of the Simulator of Urban MObility (SUMO). So, we developed only demand-bus's core parts simulator. There are demand generator and bus route re-locator. It is easy way of hi fidelity and quick evaluation of simulation using real data.

1. はじめに

本報では、実際の中規模都市を対象としたデマンドバス実運行のための導入効果検討を念頭に、現在構築を進めている評価環境と、当該環境上での試行結果について報告する。具体的には、北海道函館市を対象としたフルデマンドバスの運行を念頭に、既存の交通シミュレータである SUMO[Behrisch 11] を活用して構築した評価環境と、試行結果について報告する。

現在、我が国は他国に先駆けて超高齢化社会に突入している。このことは、労働人口の減少をはじめとする様々な社会問題発生を示唆している。労働人口の減少は介護・医療や飲食・小売りといった、サービスの提供と消費がその場で行われるような労働集約型サービスにおける負担の増加を意味するため、これらサービスの生産性向上は喫緊の課題であって、そのためこの研究も盛んに行われている。

ところで、高齢化などの問題は特に地方都市において顕著で、これにより、人の流れとモノの流れが停滞している。この停滞は、都市の経済的・文化的活動の低迷を招く原因のひとつといえる。

都市の活性化という課題を解決する簡易な施策としては、デマンドバスなどの交通機関を用いて人口過疎地域から都市部へ人口を移動させることにより、仮想的・一時的に人口密度を向上させることが挙げられる。

これまでデマンドバスは中山間部の過疎地域において導入効果検証などが行われてきた。しかしながら、上述した現状を鑑みるに、今後は地方の中規模都市でも同様の問題に直面する可能性が高い。そのため、これまで取り扱われてこなかった中規模都市におけるデマンドバスの運行についても、考慮してゆく必要がある。

本報は、これらの課題に対する取り組みの一つと位置づけられる。

2. デマンドバスシミュレーション

以下では現状のデマンドバスシミュレーションと、本報で用いる手法について述べる。

連絡先: 小柴 等, 産業技術総合研究所 サービス工学研究センター, 〒135-0064 東京都江東区青海 2-3-26 AIST 臨海副都心センター, hitoshi.koshiba@aist.go.jp

なお、デマンドバスには乗り合いタクシー的に任意の目的地間を運行するものから、基本的には路線バスと同様の形態をとりつつデマンドに応じて特定の停留所に立ち寄りようルートを変更して運行するものまで、様々な形態が存在するが、本報では特に断りを入れない限り、デマンドに応じて各地点を乗り合いタクシー的に移動するフルデマンドバスを指してデマンドバスと称する。

2.1 現状

現状のデマンドバスシミュレーションには大きく 2 つの種類が存在する。1 つはデマンドバスの配車戦略などアルゴリズムに関する研究、1 つはデマンドバスを実環境で運用した際の効果・影響を評価することに関する研究、である。本報は後者の“デマンドバスを実環境で運用した際の効果・影響を評価することに関する研究”に相当する。この分野における既存研究としては例えば、野田らは文献 [野田 08] において、逐次最適挿入法という配車アルゴリズムを提案し、さらに仮想の道路ネットワークを用いて路線バスとデマンドバスの比較評価を行っている。また、坪内らは市町村の役場担当者がデマンドバスの導入効果を検討できるシミュレータの開発と運用を行っている [坪内 10]、伊志嶺らはデマンドバス導入が自家用車など他交通機関に与える影響の評価を行っている [伊志嶺 10]。

一方、これらのデマンドバスシミュレーション上の課題には以下のようなものが挙げられる。まず、関連する要素が膨大かつ各要素の技術的難易度が高いことである。バスをはじめとする車両の物理的側面をシミュレータ上で運用するにも、右左折時や先行車両・バス停接近時の減速など考慮すべきパラメータは多い。つぎに、実環境を取り扱う場合は、道路ネットワークや信号機データを入力するコストも必要になるし、さらに、実際の交通量のデータ、バス停毎の乗降客データなどの収集・モデル化も必要である。

このように、実際の問題解決を考えた場合には様々な課題が存在し、それぞれの要素が互いに影響を及ぼし合うため評価は容易ではなく、作り込む部分とそうでない部分を目的に応じたトレードオフで定めることが多い。また、これらの評価環境は基本的に研究・開発者がそれぞれのプロジェクトにおいて自前で開発することも多く、したがって、環境が異なるために複数の評価結果を単純に比較検討することも難しい。

シミュレーション以外の課題としては、従来のデマンドバス

は基本的に中山間地域など、過疎地域における運行を目指したものが多く、都市部でのデマンドバス運行について評価、検討しているものは見当たらないことなども挙げられる。

2.2 本論文の取り組み

以下では、本報の既存研究との差異などについて述べる。

2.2.1 対象

1. 章および 2.1 節でも述べたとおり、これまでデマンドバスは中山間部の過疎地域において導入効果検証などが行われてきた。しかしながら今後は中規模都市におけるデマンドバスの運行についても、考慮してゆく必要がある。

そこで、本報では中規模の地方都市として北海道函館市を設定し、デマンドバスの導入効果を検証する。デマンドバス導入の比較対象としては、現状実際に運行されているバス路線を設定する。

また現在、他の研究者や企業と連携して以下のデータの収集・蓄積・モデル化も行っている。

- バス運行実績データ（全路線、数年分）
- バス乗降データ（整理券ベース、数年分）
- 被験者実験ベースのパーソントリップ調査 [佐野 13]（数十人規模、数ヶ月分）
- 携帯電話に基づく数十 m 粒度の平常時移動データ（数千人規模、数週間分）

これらのデータはまだ収集のフェーズにあるため、本報の内容には反映できていないが、ある程度蓄積された時点で、評価に反映することを考えている。

2.2.2 手法

従来の評価では、交通系の物理シミュレーション部分についても、各研究・開発者が独自に開発したものが使われていたが、近年ではオープンソースで安定的に稼働する交通系物理シミュレータも登場してきた。

実環境を意識したシミュレーションでは、現実をどれだけ模倣できているか、といった点も重要な要素であり、この部分の差異が結果に大きな影響を及ぼすことも多い。したがって、配車戦略その他が同じであっても、交通系物理シミュレータの違いによって結果が異なる可能性があり、既存研究の結果を単純に比較しにくい状況があった。

これらの現状を鑑みて、本報では交通系物理シミュレータについては、オープンソースで公開されている既存のものを用いて信頼性・可用性を確保するとともに、配車戦略やデマンドの発生条件など、デマンドバスの評価に強く関わる部分のみに注力する、という方針で開発を行う。

この交通系物理シミュレータには、SUMO (Simulation of Urban MObility) [Behrisch 11] を用いることにした。SUMO はドイツ航空宇宙センター (DLR) を中心に開発されているオープンソースの交通シミュレータで、ミクロレベルの交通を連続的なモデルで取り扱うことができる。シミュレータ自体の特徴は以下の通りである。車両のモデルとしては乗用車の他、救急車や路線バスなどが用意されており、Open Street Map^{*1}の道路ネットワークなどを取り込むことで、容易に実ネットワーク上での交通をシミュレートできる。また、信号のない交差点で減速したり、事前に設定した停止地点に近づくにつれて徐々に減速して、安全に停止したりといったことをデフォルトのままでも、ある程度実現している。そのほかの特徴は以下の通りである。

*1 <http://www.openstreetmap.org/>

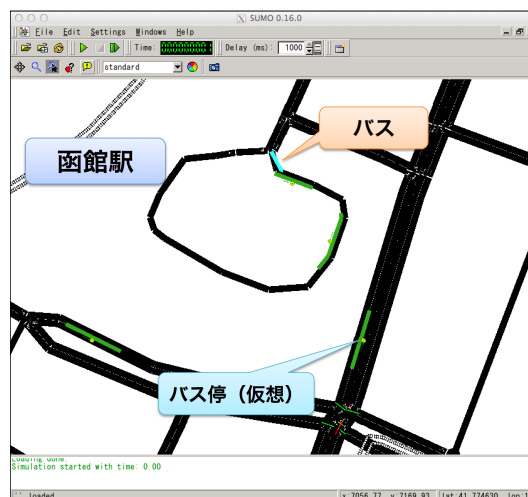


図 1: SUMO による GUI 出力の例

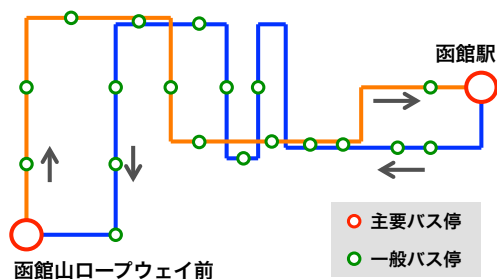


図 2: LCSA 元町路線概形

まず、オープンソースで外部連携用の API も整備されているなど利活用が容易である。また、活発に開発がなされており事例も豊富である。基本的に CUI で動作するが GUI も備えており、画面上に道路ネットワークとその上で稼働する各種の車両とその状態を視認することができる。図 1 に Open Street Map から取得した函館市の道路ネットワーク（一部）を取り込んで、GUI 上で表示した様子を示した。

3. 実験

以下では、2.2 節で述べた方法により、実験を行った結果について述べる。

3.1 条件

ここでは、函館市の市街地を走る観光バス路線 LCSA (レクサ) 元町について、現状を模した路線バスと、デマンドバスの比較・検討を行う。

LCSA 元町は函館の観光名所である朝市や函館ベイ、函館山などを 35 分程度で巡る路線で、ループ路線となっている。往路と復路で完全に同一のバス停を利用する箇所は路線の始点・終点となる函館駅のみで、その他のバス停は名称が同一であっても車線が異なる。路線の概形を図 2 に示す。

現状、路線は函館駅を起点に一周約 35 分で設計されており、バスの運行間隔は 20 分（冬期 35 分）ごととなっている。

本報ではこの路線を対象に、路線バスとデマンドバスの比較を行う。なお、今回の試行では、信号機は導入せず、一般車両などの背景交通なども排除して実験を行うこととした。また、乗客がバスの乗降に要する時間は固定となっているほか、バスの搭乗可能人数については制限を設けなかった。

3.1.1 一般条件設定

バスの速度および、乗客の乗降時間については路線バスとデマンドバスを問わず以下の通り設定した。

まず、バスの条件は以下の通りである。バスの最高速度は $8.0m/s$ とした。これは、路線バスが乗客の乗り降りが一切ない場合に約 25 分程度で規定の路線を巡ることのできる速度である。加速性能、減速性能はそれぞれ $0.6m/s^2$, $1.5m/s^2$ を設定した。車間距離については最低 $3.0m$ を確保するように設定してある。乗客の乗降については、一人あたり 20 秒を設定した。

つぎに、徒歩移動の条件は以下の通りである。徒歩の場合も経路としてはバスと同じものを利用することとした。また、移動にかかる時間は、2 地点間をバスが乗客の乗降やバス停付近で減速をしない理想状態で走行した場合に要する時間の 10 倍を設定した。

最後に、その他の条件は以下の通りである。バス停や停止位置の判定などは SUMO の外側に用意する我々のスクリプトで行うものとした。すなわち、我々のスクリプトによって、デマンドの発生とアサイン、コスト（移動時間）の計算、最適移動経路の探索、バスの停止・発車コントロール、などを行う。その際、SUMO 上の状態についてはシミュレータ内部時間で $1.0sec$ 毎に監視した。

3.1.2 路線バスの設定

路線バスは 20 分ごとに函館駅を出発し、実際の路線と同じルートを巡るものとした。

バスは上述した間隔で 4 台までが順次投入されるものとした。

デマンドはバス停以外の地点を含めた路線上の任意の 2 点をそれぞれ出発地点、目的地点としてランダムに発生する。ただし、路線上で出発地点より前の地点が目的地点に設定されることはない。その上で、(1) 出発地点から到着地点までを徒歩で移動した場合のコストと、(2) 出発地点の最寄りバス停まで徒歩で移動し、バスを待って、バスで目的地点の最寄りバス停に移動し、さらに徒歩で目的地まで移動した場合のコストをそれぞれ算出し、(1) と (2) のコストを比較して徒歩で移動した方が早い場合は、徒歩でデマンドを達成したものとしてコスト計上する。

なお、出発地点の最寄りバス停が今回の最大バス投入数である 4 台目のバスが通過した後であれば、徒歩でデマンドを達成したものとしてコスト計上する。また、函館バスではバスロケーションシステムが採用されているため、(2) のバスの待ち時間に際しては、バスロケーションシステムの存在を考慮してバスの遅延も考慮して見積もる。さらに、将来バスロケーションシステムでバスの混雑度合いが提供されると仮定して混雑度合いに応じた遅延^{*2}も考慮して見積もる。

そのほか、乗降者の有無にかかわらず停留所に近づくと、一時的に速度を $1.0m/s$ 以下にまで制限するように設定した。また、先行する路線バスが遅延している場合でも、後発のバスが先行するバスを追い越すことはしないものとした。

3.1.3 デマンドバスの設定

上述した路線バスの設定をベースにして、20 分ごとに函館駅を起点として順次 4 台まで投入されるものとした。また、各バスは出発から 30 分を経過すると新規のデマンドを受け付けられないものとした。

デマンドは路線バスと同様の条件で発生するものとし、運行のコスト・スケジュール決定には文献 [野田 08] でも採用さ

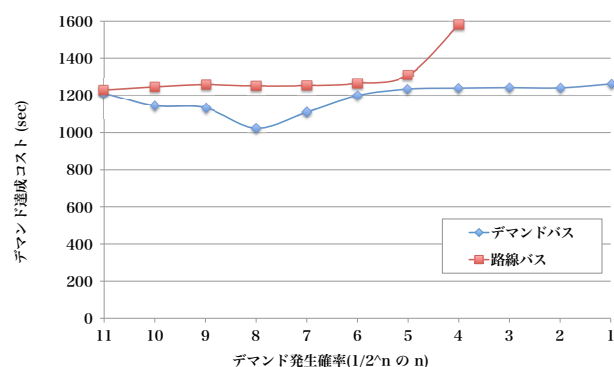


図3: デマンドバスごとの達成コスト (速報値)

れている、逐次最適挿入法を採用した。

そのほか、路線バスとの相違点として、デマンドバスは規定の路線を考慮せず、ルートを自由に設定できるものとした。

3.2 結果

実験の結果を以下に示す。

前述した条件に従って、路線バス・デマンドバスそれぞれでデマンドの発生確率を変化させて達成コストを求めた。デマンドの発生確率は式 (1) に示した範囲で、各 n についてそれぞれ 1024 回試行して平均を求めた^{*3}。

$$P = 1/2^n \quad (n = 1, 2, 3, \dots, 11) \quad (1)$$

結果を図 3 に示す。

4. 考察

以下では 3.2 節に示した結果について考察する。

4.1 路線バスの試行結果について

まず、路線バスの結果について考察する。

文献 [野田 08] では、設定条件により路線バスのコストは一定であったが、今回の試行では、図 3 に示したとおりデマンドが一定数を超えるまではほぼ一定のコストを示し、従来の評価結果と近い結果となっているものの、デマンドの増加に伴ってコストが増加していく傾向が見られる。これは、主に乗客の乗降時間を導入したことに起因すると考えられる。乗降にかかる時間分遅延が発生するが、その間にもデマンドが発生し続け、次のバス停での乗客が増え、更に遅延が増える。さらに、後続のバスは先行するバスを追い抜けないために、場合によっては先頭のバスにデマンドが集中し、乗降時間が爆発的に増加する。といった状況が生じているものと考えられる。

また、路線バスのコストがデマンドバスに比べてやや高くなっており、今回の条件ではデマンドバスの方が良い結果を示している。これは、路線の形状が横長の楕円のようなループを描いており歩いた方が早いケースが多いと考えられること、乗降時間によるバス到着遅延の予測が十分ではないために当初の見込みを大きく上回る待ち時間が発生していると考えられること、後発のバスが先行するバスを追い抜けないこと、などにより、路線バスにとってアンフェアな設定になっていることが考えられる。

実際の評価への活用を考えると、デマンドバスとのフェアな比較ができるよう、路線バスの運行条件については見直しをする必要があるといえる。

*2 ここでは、デマンド発生時のバス乗車人数の半分に乗降時間を掛け合わせたものとして設定

*3 n が大きいほど、デマンドの数は少なくなる

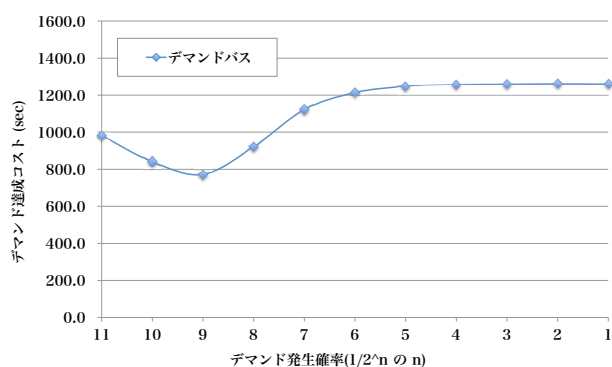


図 4: デマンドバスを 1 台だけ運行した場合の達成コスト

4.2 デマンドバスの試行結果について

次に、路線バスの結果について考察する。

こちらは文献 [野田 08] ではデマンドが少ないほど達成コストも少なかったのに対して、今回の試行では、デマンドが少なすぎても達成コストが高く、ある程度のデマンドがある場合に最も効率が良いという結果が得られた。

これは今回、路線バスの条件に準じて路線の端に位置する函館駅のバスプールをデマンドバスの出発地点に設定したことが理由に考えられる。つまりプールからデマンドの地点まで移動するコストが大きいため、初期状態ではデマンドが成立しにくい上に、デマンド自体の数が少ない、ということから徒歩で移動が選択されやすくなり、結果として、デマンドが少ない場合に効率が悪化しているものと理解できる。なお、線がいびつになっているのは 4 台のバスの重ね合わせになっていることが考えられる。そこで、デマンドバスを 1 台のみで運行させ、結果を図 4 に示した。この結果を見ると、“デマンドが少なすぎても効率が悪い” という今回の知見を除いて、概ね文献 [野田 08] と同等の結果が示しているといえる。

5. おわりに

本報では、中規模都市での実運用を意識した、オンデマンドバスの導入効果の評価環境と、試行結果について報告した。

評価環境については、交通系物理シミュレーション部分に既存のシミュレータを用い、信頼性や評価の容易性をはかり、かつ、類似のプロジェクトとの比較・検証を容易にした。試行については、函館市を対象として実際の道路ネットワーク網を導入し、路線バスについても、実在のバス路線を採用し、諸条件もそれに合わせるように設定した。デマンドバスの運行条件などは文献 [野田 08] に準じて設定し、簡易な評価を行った。

結果として、概ね文献 [野田 08] と同様に、路線バスは基本的にはコストが一定であること、一定量以上のデマンドが生じた場合にデマンドバスの効率は上がらないこと、などが確認できた。しかしながら、道路ネットワークの形状やその他の条件の違いにより、単にデマンドが少ないほどデマンドバスの効率が良くなるというわけではないこと、路線バスもデマンドが大量に発生した場合は乗降コストによってコストがかさんでいくこと、などが確認できた。

ただし、路線バスについては定員に制限がない、遅延発生時のコスト予測が十分でない、など設定が現実的ではない点があるほか、路線がループ状になっているなど、本質的に不利な点もあり、十分に評価を行えていない。また全般的に、道路ネットワークについて坂道などは考慮できていない、デマンドは単純にランダムに発生している、乗降時間、徒歩時間の設定が不

十分、といった問題があり、この点においても十分に評価を行えていない。

今後は、実際のバス運行データに基づいて走行速度などのパラメータを調整するほか、バス停ごとにデマンドの発生確率を変化させるなどの調整を行う。また、デマンドバスの出発地点を分散させるなど条件の見直し、バス台数が増加した場合のコストの算出なども行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構社会技術研究開発センター (JST-RISTEX) の問題解決型サービス科学研究開発プログラム “IT が可能にする新しい社会サービスのデザイン” の研究助成によって行われた。記して感謝する。また、バス路線データなどについて函館バス株式会社に協力をいただいた。記して感謝する。

参考文献

- [Behrisch 11] Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J., and Krajzewicz, D.: SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview, in *SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, pp. 63–68, Barcelona, Spain (2011)
- [伊志嶺 10] 伊志嶺 拓人, 赤嶺 有平, 遠藤 聡志: マルチモーダル交通シミュレータを用いたデマンドバス需要予測シミュレーション, 情報処理学会研究報告. MPS, 数理モデル化と問題解決研究報告, Vol. 2010, No. 14, pp. 1–6 (2010)
- [坪内 10] 坪内 孝太, 大和 裕幸, 稗方 和夫: オン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, Vol. 25, No. 3, pp. 400–403 (2010)
- [野田 08] 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)
- [佐野 13] 佐野 涉二, 金森 亮, 平田 圭二, 中島 秀之: スマートシティはこだてプロジェクト: 人流シミュレータ構築に向けた交通行動調査結果の速報, 人工知能学会「社会における AI」研究会 第 16 回研究会 (2013)