

## シミュレーションによる高需要対応オンデマンド交通の効率性評価

小田急電鉄株式会社 藤垣 洋平、落合 康文  
株式会社構造計画研究所 小川 倫、玉田 正樹、  
北上 靖大、田中 琴音  
東京大学大学院 上条 陽

### 1. はじめに

日本国内の様々な地域で、居住者や観光客の移動ニーズに対応した新しい交通手段として、「オンデマンド交通」の導入が検討されている。オンデマンド交通とは、各利用者の発着希望地点にできるだけ近い点で乗降できるようにしつつ、同じ時間帯に近い方面に向かう利用者と乗り合うことができる経路を、需要に応じて柔軟に形成しながら運行する交通サービスである。自動車を用いたオンデマンド交通には約半世紀の歴史があり、欧米では1960年代から、日本でも1970年代から導入されていた<sup>1)</sup>。日本国内における初期の導入事例としては、路線バスの一部区間で需要に応じて迂回運行をするサービスとして、1970年代から東京都や神奈川県住宅地に導入された「東急コーチ」が挙げられる<sup>1)</sup>。2000年代に入ると、情報通信技術の進展を受け、対象地域内の任意の発着地点を利用者が選べる「フルデマンド方式」が普及し、路線バスが撤退した人口密度が低い地域を中心に導入が広がった。2000年代に開発され、日本国内において広く利用されているフルデマンド対応の配車システムとしては、順風路が提供しているコンベニクルなどが挙げられる<sup>2)</sup>。さらに2010年代後半には、都心部や都市圏郊外部を想定した、高密度の需要にリアルタイムで対応できるフルデマンド方式の配車システムが登場したことや、スマートフォンの普及によってスマートフォンアプリからの全自動配車が可能になったことを受け、大都市の中心部や郊外住宅地等においても導入を検討する動きがみられる。2010年代に導入が進んだ高密度需要に対応したシステムとしては、「SAVS」が挙げられる<sup>3)</sup>。これらのオンデマンド交通に関する技術革新などを背景として、小田急電鉄では二次交通の高度化策の一つとしてオンデマンド交通の活用可能性を検討している。その一環として、システムの技術検証および需要分析を目的として、2020年に新百合ヶ丘駅周辺の地区において、オンデマンド交通「しんゆりシャトル」の実証運行を実施した。

オンデマンド交通の本格導入にあたっては、路線バスやタクシー等の既存の交通サービス事業者が新規事業として取り組むケースや、自治体が計画を策定して既存事業者に運行を委託するといった形態が想定されるが、いずれの場合も、既存の交通サービス事業者との連携が必要になる。それらの事業者が新規サービスとして「オンデマンド交通」に積極的に取り組むにあたっては、既存の交通サービスと比較した場合の効率性などを確認することが望ましい。しかしながら、大都市圏の郊外住宅地等、需要密度が高い地域においては、本格導入や実証実験の事例が限られていることから、効率性を実際の需要分布に即して定量的に評価した事例は限られている。実際の利用実績や移動履歴等のデータを用いたシミュレーションとしては、静岡県静岡市を対象にした西田ら<sup>4)</sup>の研究や、茨城県常総市を対象にした長谷川ら<sup>5)</sup>の研究があるが、いずれも比較対象は鉄道・路線バスなどの定時定路線の交通手段であり、タクシーとの効率性比較はなされていない。

そこで本研究では、オンデマンド交通の効率性を、タクシー型の個別輸送を比較対象として、実データを用いて定量的に評価することを目的とする。具体的には、shotl社のオンデマンド交通シミュレータと、構造計画研究所が提供するartiscoc Cloud上で構築したタクシー型輸送のシミュレータを用いて、小田急電鉄が実施した実証運行時の利用データをもとにシミュレーションを実施し、車両数ごとの待ち時間を求める。その上で、一定のサービス水準を保つために必要な車両数を推計し、運行形態ごとに必要車両数を比較する。本稿では、まず2章において、本研究で用いるデータが取得された「しんゆりシャトル」

ル」実証運行の概要を紹介する。そのうえで、3 章ではシミュレーションに用いるデータ及び実行環境について述べたうえで、4 章において結果を、そして 5 章において本研究のまとめを示す。

## 2. しんゆりシャトル実証運行の概要

本研究におけるシミュレーション分析の対象地域とした新百合ヶ丘駅周辺エリア、及びシミュレーションに用いる需要データを取得した「しんゆりシャトル」の実証実験について、概略を紹介する

小田急小田原線・多摩線の新百合ヶ丘駅は、神奈川県川崎市麻生区にあり、新宿駅から快速急行・急行利用で 20～30 分ほどで到達できる。「しんゆりシャトル」実証運行の対象区域は、図 1 の青枠内の区域であり、新百合ヶ丘駅から南北それぞれに 2km 程度のエリアである。対象地域内は、1974 年の新百合ヶ丘駅開業以降に開発された住宅系の土地利用が中心であり、駅前には大規模商業施設や区役所が立地している。対象区域内では、小田急バス、東急バス、川崎市交通局の 3 社局が路線バスを運行しており、駅を中心とした放射状の路線網が形成されている。路線バスの運行頻度としては、毎時 6 本以上の運行がある区間もある一方で、日中に毎時 3 本程度となる区間もある。また、多摩丘陵に位置し、坂が多い地域であり、バス停までの間に高低差がある地区も存在する。

小田急電鉄では、オンデマンド交通の活用可能性検討の一環として、配車システムの技術検証および需要分析を目的とした、オンデマンド交通「しんゆりシャトル」の実証運行を実施した。実証運行の諸元は、表 1 の通りである。なお、「しんゆりシャトル」は 2021 年にも第 2 期の実証運行を実施しているが、本研究で用いるデータは第 1 期のものであるため、以降、「実証運行」とは第 1 期の実証運行のことを指すものとする。

一般的に、オンデマンド交通の乗降地点選択・設定方式としては、表 2 に示す通りのパターンがある。本実証運行では、日本国内では導入事例が少ない「ダイナミックミーティングポイント型」を採用した。ダイナミックミーティングポイント型は、利用者が任意の希望発着地点を発着地として指定でき、それをもとに、車両の運行効率も考慮して、システム側が乗降地点を提案し、利用者が提案を受け入れると配車が決定する形態である。



図 1 しんゆりシャトル実証運行の対象区域

表 1 実証実験の諸元

実証運行期間	2020 年 2 月 17 日～ 2020 年 4 月 8 日
運行時間帯	7 時～22 時
参加費用	無料
乗降箇所数	約 500 箇所
車両	トヨタ アルファード ※ 最大同時運行台数 4 台
配車システム	shotl (シャトル)

表 2 配車システムの乗降地点選択・設定方式

	乗降可能地点	乗降地点選択方法
ドア・トゥ・ドア型	対象範囲内の任意の地点	利用者が直接場所を指定
ミーティングポイント型	事前に定めた仮想バス停	利用者が直接仮想バス停を指定
ダイナミックミーティングポイント型	事前に定めた仮想バス停	利用者が発着地を指定、システムが仮想バス停を指定

実証運行の実績としては、延べ 5695 人、1 日当たり最大 199 人の利用があり、大きなシステムトラブルもなく、配車システムが高密度の需要に対しても問題なく稼働することを確認できた。また、アンケートによる満足度調査では、80%以上の方に「満足」または「やや満足」とご回答いただいた。

### 3. シミュレーション用データ作成及び実行環境の構築

しんゆりシャトルの実証運行が行われた区域を対象として、shotl を用いたオンデマンド交通のシミュレーションと、乗り合いを生じさせないタクシー型のシミュレーションを実施し、その効率性を比較する。本章では、分析の全体像、データ作成方法及びシミュレーション実行環境の構築方法・前提条件を示す。

#### (1) シミュレーション分析の全体像

本研究におけるシミュレーション分析全体の流れを、図 2 に示す。まず、実証実験時の利用実績データから 2 種類の需要データを生成する。そのうえで、各運行形態のシミュレータに需要データを投入し、各運行形態における待ち時間を求め、サービスレベル基準値を満たすような必要車両数を求める。

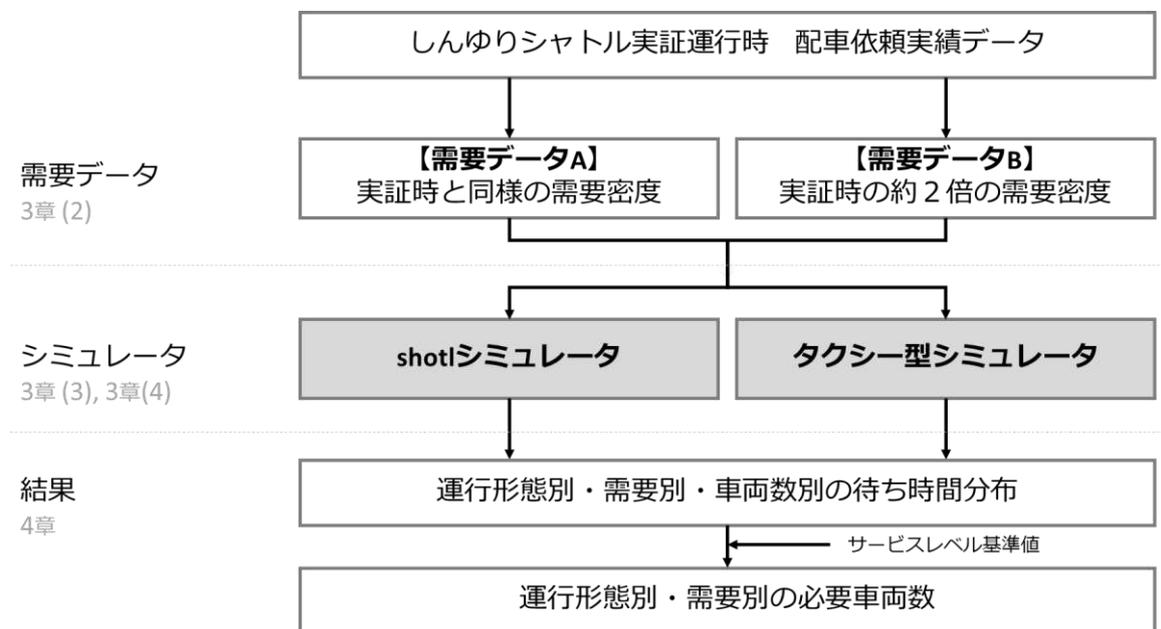


図 2 シミュレーション分析の流れ

#### (2) 需要データの作成

本研究における需要データとしては、実証運行期間中の需要密度である「需要データ A」と、実証運行期間中の約 2 倍の需要密度を想定した「需要データ B」の 2 種類を対象とする。需要データ B は、将来的にオンデマンド交通が広く普及した場合を想定した需要データである。

需要データ A は、実証運行期間中、配車依頼の件数が最大であった 2020 年 3 月 25 日の配車依頼の実績データを用いる。需要データ A における配車依頼件数は 141 件である。需要データ B は、実証運行全期間のデータを用いて、時間帯別の需要の傾向が反映できるよう、疑似的に作成した。具体的には、期間中 2 日以上利用したユーザーで、かつ利用日 1 日あたり平均の利用回数に最も近い利用回数の日のうち 1 日分の配車依頼を、無作為に合計 280 件となるよう取り出し、その取り出された各配車依頼の時刻・発着地点は維持しつつ、同じ日に実施されたものとみなしたものを、「需要データ B」とした。

### (3) shotl の運行シミュレータ

しんゆりシャトルで利用した配車システム shotl を用いた場合のシミュレーションは、shotl 社が保有する、shotl のシステムと連動したシミュレータを用いて実施した。シミュレーションでは、実際の運行時と同様のアルゴリズムで shotl が配車依頼に対して車両の割り当てや乗降順序を決めるものとした。乗客の定員は、しんゆりシャトル実証運行で使用した「アルファード」などのミニバンを想定し、5名としている。また、車両の走行速度としては、実証実験時の停車時間も含む車両の走行状況と合致するよう、時速 8.4km/h で走行するものとした。なお、この速度は乗降に伴う停車時間も含む、車両の移動時間全体を対象にキャリブレーションしたものであり、乗降に伴う停車時間を明示的に取る処理は行っていない。

### (4) タクシー型運行シミュレータ

タクシー型の運行形態のシミュレーションとしては、配車担当者などの人が介在する形で現在実施されている作業を、コンピューター上でシミュレーションする必要がある。そこで、タクシー型の運行形態における処理フローを仮定したうえで、「マルチエージェント・シミュレーション(MAS)」を独自に構築した。MAS とは、自律的に行動する主体(エージェント)の行動ルールおよび相互作用を定義し、システム全体の挙動をシミュレーションする手法である。本研究では独自にマルチエージェントシミュレータを、構造計画研究所が提供するシミュレーションプラットフォーム artisoc Cloud 上に実装した。

本研究で用いた artisoc Cloud とは、構造計画研究所が提供するクラウドベースの MAS プラットフォームである<sup>6)</sup>。シミュレーションを Web ブラウザ上で手軽に構築・実行・共有できるほか、クラウド上で複数のシミュレーションシナリオを並列で同時実行できるなどの機能を有している。シミュレーションシナリオの管理には、理化学研究所が開発しているシミュレーション実行管理フレームワーク OACIS を用いている<sup>7)</sup>。

構築したタクシー型運行シミュレータでは、「利用者」「タクシー車両・運転手」「配車係」の3種類の行動主体をエージェントとして設定した。そのうえで、各エージェントの生成および行動に関するロジックを表3に示す通り実装した。タクシー車両(定員4名と仮定)と運転手は、一体的に行動するものと、1つのエージェントとして定義した。運転手の休憩時間は考慮していない。また、配車作業は1つの配車窓口で実施するものとし、複数事業者の競合は想定していない。利用方法としては、空車で走行している「流しのタクシー」が通りかかった際に乗車する方法も現実のタクシーでは想定できるが、対象区域が郊外住宅地であり、「流しのタクシー」が必ずしも多くない地域であることを踏まえ、利用者は必ず配車依頼をするものと仮定した。以上の通り、人が関与するシステムをシミュレーションで表現するにあたっては、現在提供されているタクシーのサービスおよび利用実態とは異なる点があることには留意されたい。

表3 配車システムの乗降地点選択・設定方式

エージェント	生成方法	行動ロジック
利用者	需要データに基づき生成	<ul style="list-style-type: none"><li>生成され次第、配車依頼を配車係に出す</li><li>車両が到着したら乗車し、降車地点で降車する</li></ul>
タクシー車両・運転手	各シミュレーション試行における車両数の設定値の通り発生	<ul style="list-style-type: none"><li>配車係の指示を受け、利用者のもとへ走行する</li><li>利用者を乗せたら降車地点まで走行する</li><li>降車地点到着後は、配車係に空車であることを知らせたうえで初期位置に戻り、次の指示が入るまでその場で待機する</li><li>走行時の速度は時速 8.4km/h (shotl と同様)</li></ul>
配車係	1 エージェントのみ存在 ※タクシー事業者間の競合は対象としない	<ul style="list-style-type: none"><li>配車依頼が入った順に、空車に依頼を割り当てる</li><li>空車が無い場合は、依頼を待ち行列に入れて待機し、空車が発生し次第、待ち行列の中で最も早く依頼を出した利用者を空車に割り当てる</li></ul>

#### 4. シミュレーション結果

運行形態別のシミュレータに、2種類の需要データを投入して、車両数別に待ち時間を計測した。平均待ち時間の計測結果を、図3に示す。なお、シミュレーション対象の車両数は、概ね10～15分程度に収まるまでの車両数を対象としており、shotlのシミュレーションでは4台まで、タクシー型のシミュレーションでは需要データAで7台まで、需要データBで15台まで計測した結果を示す。また、1台の場合は、どの需要パターン・運行形態でも、営業時間内に全利用者の移動が完了しないため除外している。図3のプロットに当たっては、平均待ち時間60分を超えるケースについては実際のサービスレベルとして現実的な範囲ではないと考えられることから、60分未満の範囲のみをプロットの対象としている。

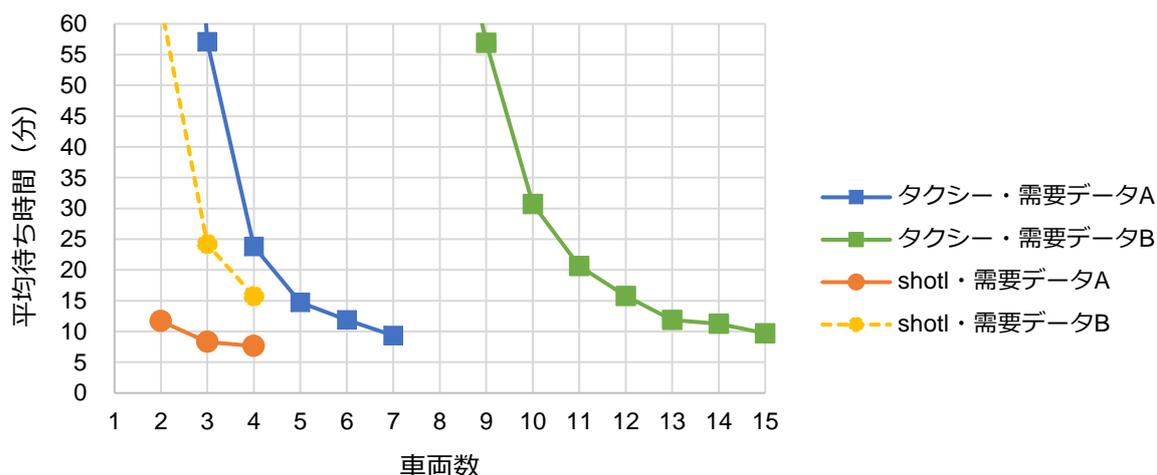


図3 シミュレーションから得られた平均待ち時間の値

全体を通して、車両数が少ない段階では、1台増やすごとに急速に平均待ち時間が減少するが、20分以内の領域では、車両数増加時の待ち時間減少幅が小さくなる傾向がみられる。また、平均待ち時間60以内に収まるケースを対象にした図3にはプロットされていないが、需要に対してサービス供給量が極端に少ないケースでは、利用者全員の移動を当日中に終わることができない結果となった。

効率性を評価するための指標として、費用に影響する「必要車両数」を、待ち時間の算出結果から求める。車両数を決定するためには、「平均待ち時間をどの程度に収めるか」というサービス運営上の閾値を決める必要がある。この閾値自体は、運営方針次第で様々な考え方を取ることができるが、ここでは、待ち時間別の実証運行期間中のキャンセル率を参考に、「15分」と仮定して必要車両数を求める。なお、1分未満の端数は切捨てとし、「15分台に収めるために必要な車両数」を求める。以上の仮定をもとに算出した必要車両数は表4の通りである。

シミュレーション結果より、同じ需要に対して、オンデマンド交通(shotl)の場合には、タクシー型の運行の4割程度の車両数で対応できることが確認できた。また、需要データBは、需要データAの約2倍であるが、タクシー型で需要データAに対応するために必要な車両数(5台)より少ない車両数(4台)で、オンデマンド交通(shotl)では需要データBに対応することができている。このことから、同じ車両数で約2倍以上の需要に対応できるケースがあることが示唆される。

	需要データ A	需要データ B
オンデマンド交通 (shotl)	2台	4台
タクシー	5台	12台

## 5. まとめ

本研究では、オンデマンド交通の効率性を、実データを用いたシミュレーションを通して定量的に評価した。シミュレータとしては、shotl 社のシミュレータと、構造計画研究所が提供する artisoc Cloud 上で構築したタクシー型輸送のシミュレータを用い、「しんゆりシャトル」実証運行時の利用データをもとに生成した 2 パターンの需要データを対象にシミュレーションを実施した。その結果、オンデマンド交通では、タクシー型の運行に比べて、同じ需要に 3 割～4 割程度の車両数で対応でき、また同じ車両数で約 2 倍以上の需要に対応できるという結果が得られた。

以上の結果から、運行効率に着目した場合には、タクシーと比べて効率化を見込めることが示唆される。オンデマンド交通の導入にあたっては、相乗りに適した車両の導入や配車システムの導入等の費用は生じるものの、タクシーに比べて料金を下げたサービスとして需要を喚起しつつ、少なめの車両・運転手でも需要に対応できることによって、運転手不足に対応しつつ増収を目指せる可能性もある。

ただし、タクシー・オンデマンド交通の双方のシミュレーションにて様々な仮定を置いている点や、利用者の需要がサービス内容に応じてどのように変わるかといったことは考慮していない点には、留意が必要である。シミュレーション上の仮定としては、詳細な道路状況や、乗降に必要な所要時間が状況によって異なる点などを個別には考慮せず、平均的な走行速度を仮定した。そのため、オンデマンド交通で用いる車両や道路環境によっては、効率性が低下する恐れもある。タクシーのシミュレーションでは、流しのタクシーをつかまえる利用方法や、複数のタクシー事業者間の競合などは考慮していない。また、実際の需要は、サービスの使いやすさや料金などによって大きく変わりうるが、今回の効率性評価は需要を一定のものとして仮定している。実際に有料で運行した場合に、実証運行時と同じか、それ以上の利用者数を得ることは容易ではないと考えられる。料金の設定や、サービス内容の工夫によって、需要を確保するための方策の立案は、オンデマンド交通の本格導入に向けた大きな課題の一つである。

今後の課題としては、需要分析とパフォーマンス評価の連動と、多様な配車システムへの対応が挙げられる。需要は、料金や待ち時間、乗降地点設定などのサービス変数に応じて変動すると考えられる。サービス向上と運行の効率化は、トレードオフ関係にある場合も考えられるため、それらのトレードオフ関係を含めて分析を行うことが望ましい。また、オンデマンド交通の配車システムとして、本研究では、しんゆりシャトルで使用した shotl のみを対象としたが、様々な配車システムが構築・提供されているため、導入検討をする事業者のためにも、多様なシミュレータを比較できることが望ましい。

謝辞: 本研究で用いた shotl の運行シミュレーションの実施に当たっては、shotl 社の Adrià Ramirez 氏、Victor Navas 氏にご協力いただきました。改めてご厚意に御礼申し上げます。

### 【参考文献】

- 1) 竹内龍介: デマンド型交通(DRT), 生活支援の地域公共交通, pp.140-172, 2009.4
- 2) 稗方和夫: オンデマンド交通への取り組みと将来への展望, システム/制御/情報, 61 巻, 12 号, pp.500-505 2017.2
- 3) 中島秀之, 野田五十樹, 松原仁, 平田圭二, 田柳恵美子, 白石陽, 佐野渉二, 小柴等, 金森亮: バスとタクシーを融合した新しい公共交通サービスの概念とシステムの実装, 土木学会論文集 D3(土木計画学), 71 巻, 5 号, pp.1.875-1.888, 2015.12
- 4) 西田 遼, 金森 亮, 野田 五十樹: 実データとシミュレーションを用いた MaaS の導入効果の評価, 人工知能学会全国大会論文集, 2021.6
- 5) 長谷川大輔, 鈴木勉: 運行シミュレーションによる地域公共交通の運行方式の比較, GIS-理論と応用, 21 巻, 1 号, pp. 9-18, 2013.6
- 6) 小川倫, 北上靖大: マルチエージェント・シミュレーション用ソフトウェア artisoc Cloud の紹介, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, 65, pp. 206-211, 2020.4
- 7) 村瀬洋介, 内種岳詞, 伊藤伸: パラメータ空間探索フレームワーク OACIS の紹介, アンサンブル, 20, pp. 247-252, 2018.10