

オンデマンド交通の運行実績データによる 公共交通計画の検討手法

松尾 康平¹・稗方 和夫²・本多 建³

¹非会員 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5 環境棟)
E-mail:kmatsuo@s.h.k.u-tokyo.ac.jp

²非会員 東京大学大学院准教授 新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5 環境棟)
E-mail:hiekata@edu.k.u-tokyo.ac.jp

³非会員 東京大学大学院研究員 新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5 環境棟)
E-mail:honda@is.k.u-tokyo.ac.jp

近年、高齢者比率の増加による移動需要変化に対し交通システム全体での対応が求められている。一方、多様な需要に対応できるオンデマンド交通は、運用を通じ個人の詳細な移動データを蓄積するため、交通システム全体の設計、または需要マネジメントへ利用可能であると考えられる。本研究では、運行実績データに基づく利用者の移動パターンの分析と、これらの結果を利用し、オンデマンド交通を含む地域公共交通システム全体の計画を検討する手法を提案する。提案手法の適用可能性と有効性評価のため、千葉県成田市のオンデマンド交通に対し、交通シミュレータを使用し本手法を適用した。分析からは通院および買物目的での利用が多く、片道のみの場合と往復の場合がおよそ半数ずつである等の知見が得られ、シミュレーションによって運賃の引き下げ・引き上げに伴う収支への影響を評価して、その有効性を確認した。

Key Words : On-demand bus, Log data, Traffic demand analysis, Traffic simulation, System design

1. 緒言

(1) 背景

日本では高齢化の急速な進行¹⁾への対応が、様々な分野で喫緊の課題となっている。特に地方部においては、過疎化の進行²⁾も伴い、急速な高齢化率の上昇が見られており、移動需要に大きな変化が生じている。この移動需要の変化に対し、路線バスや鉄道といった従来の公共交通手段の運用改善だけでは応じきれず、地方部における移動困難者の増加を招いている³⁾。このような社会的変化を発端とする移動需要の変化に対し、個々の交通手段に限らず、交通システム全体での変化・対応が求められている。

本章では、高齢化に伴う個人の移動特性に生じた変化を概観し、公共交通システムの課題を整理した上で、地方部にて導入例の多いオンデマンド交通の概要と、その運行実績データについて説明する。

a) 高齢化に伴う移動需要の変化

現役世代(15歳~64歳の方)と高齢者(65歳以上の方)の間での移動需要の様子は、移動目的の違いに起因して大きく異なる³⁾。

現役世代の移動需要は、通勤通学を目的とする、自宅と勤務先(通学先)など個人毎に決まった場所の往復が

大多数を占める。勤務先となる事業所や学校は、市街地域に集中していることが多く、発生頻度もほぼ毎日であり、発生時間帯も始業と終業に合わせて朝と夕方に集中する傾向がある。

一方で高齢者の移動は、買い物や通院、その他私用での外出が多く、公共交通利用頻度が月に1回程度と少なく、その目的地、発生時間帯も多様という傾向がある。実際に、奈良県香芝市の事例⁴⁾では、朝9時から16時にかけて、全体に対し数%範囲で均等に分布し、利用発生頻度も月に1日から数ヶ月に1日といった事例が多い傾向が見られている。

このような現役世代と高齢者の移動特性の違いから、近年の高齢化の進行に伴い、発生頻度が極めて高い、朝夕に集中した決まった場所間の移動需要が減少する一方で、発生頻度が低く、目的地や発生時間帯も多様な移動需要が増加している。

b) 公共交通システムの課題

鉄道や路線バスといった従来の公共交通サービスは、朝夕を中心とした通勤通学需要に代表される、移動方向と発生時間帯の揃った移動需要を、路線定期運行によって満たすことで成立してきた。また逆に、事業所や学校の立地が、これらの大量輸送に向く公共交通サービスの

有無を考慮して決められる場合もしばしばある。特に郊外部、地方部においては、人口の少なから鉄道採算が見込めない場合も多く、より低コストな路線バスが地域の公共交通の主体として成立してきた経緯がある⁹⁾。

しかしながら、前項に述べたような移動需要の変化に対し、路線定期運行のままでは、小利用者に対して多様な路線を一定の運行間隔で走らせる必要があり、サービス水準を維持すると収支の悪化は避けられなくなってしまう。さらに、事業の経営悪化は、資金補填がなければサービス水準のさらなる低下につながり、さらに利用者が減少するという悪循環に陥り易い。このような悪循環により、経営が成り立たず事業者が撤退し、交通不便地域となっている自治体は地方部に多数見られる⁹⁾。

また、これまで路線バスが衰退した地域で、車両規模を小さくしたコミュニティバスや乗合タクシーを路線定期運行させた事例は複数あるが、最終的に利用者の減少により廃止となる場合が多い。その原因は、上記に述べたような悪循環を抜け出せないためであると考えられる。

c) オンデマンド交通とは

需要総数が少なく、目的地の分散した移動が多い地域では、あらかじめ利用者の移動需要を把握し、その移動に対応した運行を行うことが有効であると考えられる。そこで、利用者に事前に移動の予約をしてもらい、その予約に応じて車両の運行ルートを決定する乗合型バス交通システムは、オンデマンド交通・ディマンドバスなどと呼ばれている。

初期のオンデマンド交通では、ルート決定や予約プロセスを人手に頼っていたため、ルート決定者やオペレータの勘と経験に依存する部分も多く、利用者にとっても、正確な移動時間が分からない等の不便が生じていた。この問題に対応するため、運行ルート決定を全て自動化し、利用者に対して予約時点で乗降時刻を明示し、他の予約によりその時刻が変わらないように運行ルートを生成する、情報システムの研究が複数行われている。現に、東京大学で開発されたオンデマンド交通システム「コンビニクル」(図-1)など、全国の自治体で実際に導入され運行が行われている事例も多い⁷⁾。

d) オンデマンド交通の運行実績データ

情報システムの導入に伴う利点として、オンデマンド交通の運行実績が、システムのログデータとして記録される点がある。多くのシステムでは、関連するユーザーデータを登録し、それに紐付ける形で予約処理などを行う。これは、詳細な属性の判明している個人の、長期に渡る移動データと捉えることができる。

人の移動に注目した交通調査としては、抽出された市民の一日の行動についてWebや紙ベースでのアンケートなどを行う、パーソントリップ調査が一般的であり、公共交通計画などに一般的に用いられている⁹⁾。パーソン

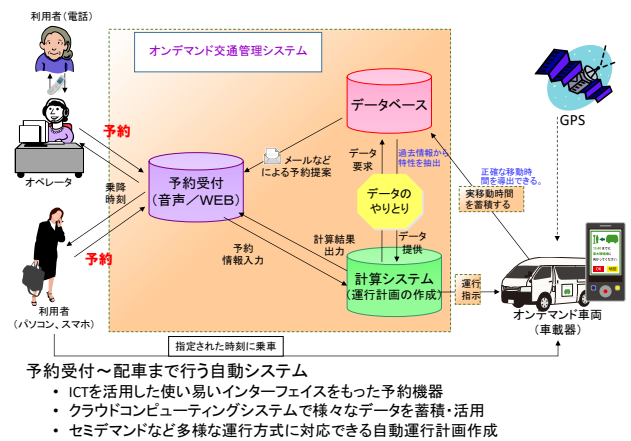


図-1 オンデマンド交通「コンビニクル」の概要⁷⁾

トリップ調査から得られるデータは、サンプルの偏りも小さく、移動目的が詳細に分かるという利点はあるものの、ある単一の日のデータであり、ゾーン単位での移動情報になってしまう。また、調査に多額の費用が必要であり、データの高頻度での更新は難しく、特に地方部ではサンプル数が少ない傾向がある。

一方で、オンデマンド交通の運行実績データは、個人のバス停間の詳細な移動が長期的に記録される上、オンデマンド交通の運用に伴い自動的に蓄積される。例えば、オンデマンド交通協議会が研究機関向けに提供している「コンビニクル」のログデータには、ユーザーの予約記録、実際の運行情報のほか、性別や年齢といったユーザーの詳細な属性、乗降場の位置や分類が含まれている⁴⁾。これらの情報は、交通システム全体への設計のほか、移動需要マネジメントへも利用可能であると考えられる。

(2) 本研究の目的

以上に述べた背景から、高齢者比率の増加による移動需要変化に対し、複数の交通手段を総合的に考慮した公共交通計画の検討手法が求められている。一方で、オンデマンド交通の運行実績データには、属性が明確な個人の詳細な移動データが蓄積されることから、交通システム全体の計画検討、または需要マネジメントへ利用可能であると考えられる。そこで本研究では、オンデマンド交通の運行実績データに基づく、市民の移動パターンの分析と、これらの結果を利用して、オンデマンド交通を含む地域公共交通システム全体の計画を検討する手法を提案することを目的とする。

特に本論文では、オンデマンド交通の運行実績データの分析手法、及び交通システムの設計空間の表現手法を、千葉県成田市のオンデマンド交通に対して適用し、簡易な交通シミュレータを用いて一部の設計案を評価した結果を中心に報告する。

2. 提案手法

本研究における提案手法の概要図を、図-2に示す。
提案手法は、以下に示す3段階からなる。

- (1) オンデマンド交通の運行実績データの分析
- (2) 交通システムの設計空間構築
- (3) 交通シミュレータを用いた設計解の探索

(1) オンデマンド交通運行実績データの分析

この段階では、オンデマンド交通の運行実績データを分析し、市民の移動需要、移動パターンを把握することを目的とする。この段階は、システム設計⁸⁾⁹⁾における要求分析とシステムの現状分析に相当する。ここの分析の結果から、交通システムの設計空間の選択肢を選定する。

a) 運行実績データの前処理

適切な分析のため、以下のデータの前処理を行う。

まず、住所・氏名・生年月日での一致を基に、二重登録者のデータ統合を行う。

続いて、システム運用の実態に即し、利用者番号、希望する乗車日や乗降場の情報をもとに検索履歴をグループ化し、以下の3つのケースを想定し、検索履歴データの統合を行う。続いて、システム運用の実態に即し、利用者番号、希望する乗車日や乗降場の情報をもとに検索履歴をグループ化し、以下の4つのケースを想定し、検索履歴データの統合を行う。

- ・ 1回の検索で予約成立した場合
 - ・ 1回の検索で予約不成立になった場合
 - ・ 複数回検索を行い、最終的に予約成立した場合
 - ・ 複数回検索を行い、最終的に予約不成立となった場合
- 上記のうち、複数回の検索を行ったと判断された場合については、最終的な予約成立・不成立の記録のみを集計

に用いる。

b) 評価指標の算出

続いて、前処理した運行実績データを用いて、オンデマンド交通の現状の運行状況を知るために、以下に示すような指標を集計・計算する¹⁰⁾。

- ・ 利用状況に関する指標
システムへの登録者・利用者の属性、登録者の利用頻度、高利用頻度の出発・到着乗降場
 - ・ サービス水準に関する指標
予約成立率、平均の希望と予約の差分時間
 - ・ 運用効率に関する指標
実車時間率、乗合率、1人・1kmあたりの運行コスト、1人・1kmあたりに必要な移動時間
- 上に示したような評価指標をもとに、今後の計画において改善を目指す指標を検討する。

c) 利用者の移動パターンの解析

最後に、運行実績データから、利用者の一日の利用回数と、乗車が往路、復路、それ以外のいずれに該当するかをクロス集計し、利用者がどのような移動パターンでオンデマンド交通を利用しているかを把握する。さらに、移動パターンごとに利用頻度の高い出発・到着乗降場を分析し、乗降場の名称・カテゴリなどから移動目的の推定を行い、利用者の交通行動パターンを分析する。

(2) 設計空間の構築

この段階では、公共交通に関し、自治体の取り得る選択肢を列举することで設計空間を構築する。

a) モルフォロジカル・マトリックスでの設計空間表現

モルフォロジカル・マトリックスとは、システムの設計可能な項目と、その項目について取り得る選択肢を表形式で表現し、システム設計案を網羅的に明示する手法

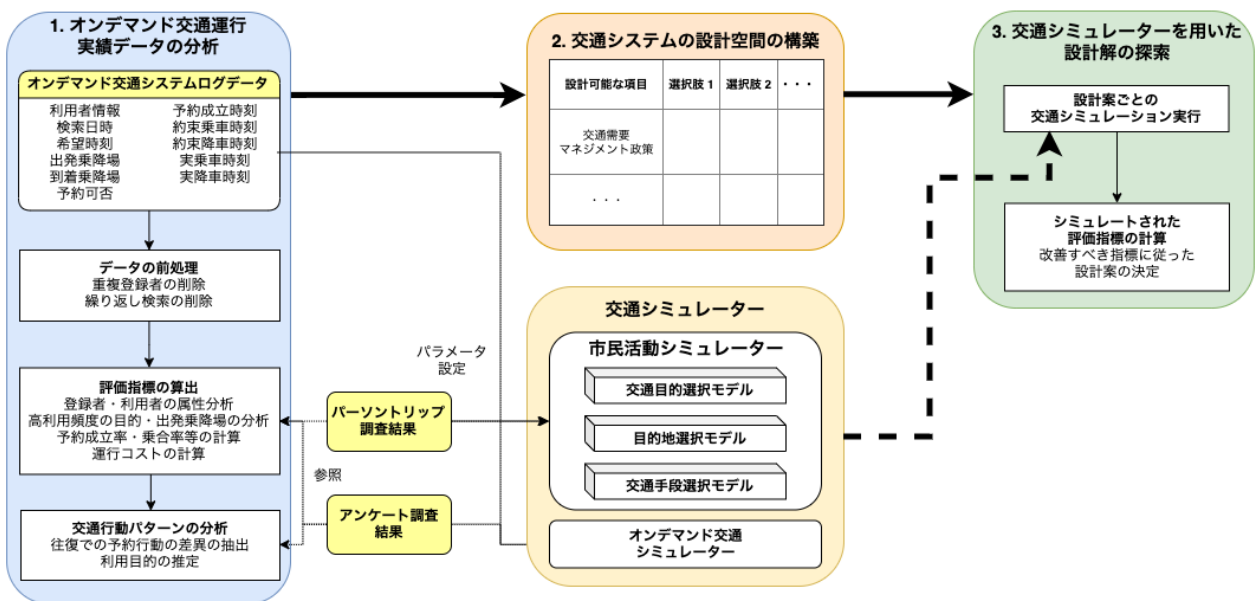


図-2 提案手法の概要図

である¹¹⁾(図-3)。各意思決定項目についての選択の組み合わせが、システムの1つの設計案を表現する。

この手法を用いて、自治体が公共交通に関して設計可能な項目を、利用者の交通行動へと影響を与える交通需要管理政策を含めて列挙し、実現可能性が高いものについて整理することで、公共交通システムの設計空間を構築する。

(3) 交通シミュレーターを用いた設計解の探索

本提案手法では、利用者の交通行動の変化も主眼に含めた公共交通システムの計画を狙う。そのため、利用者の交通行動の詳細なモデル、シミュレーションを含む、交通シミュレーターを使うことが望ましい。そこで本研究では、先行研究¹²⁾に則り、一般的な非集計ロジットモデルを用いた、交通目的・目的地・交通手段の3段階から構成される市民の交通行動シミュレーションと、オンデマンド交通の配車部分の2つから成る、交通シミュレーターを用いることとした。

a) 交通シミュレーターの概要

本手法で用いる交通シミュレーターは、ある時間帯における個人の交通行動に関する様々な選択の同時選択確率を、交通目的-目的地-交通手段の3段階に分解して扱う(図-4)。この分解に関しては、金森らの提案した統合モデルの選択ツリー構造¹³⁾を参照しているが、オンデマンド交通の導入地域が交通不便地域であるため、配分に関しては範囲外とした。

各段階における個人の選択は、下位段階の合成効用を含めたロジットモデルとして定式化する。モデルにおける特性変数ベクトルとしては、5歳ごとの年齢・自動車や自転車の保有・職業についてのダミー変数といった個人属性の他、交通手段に関しては運賃・所要時間・アクセス距離・イグレス距離など、また目的地選択においては、大字町丁目をゾーン単位として、面積・各産業の従業者密度人口・最寄りバス停との距離・全交通手段から計算される最小期待費用など、さらに交通発生に関しては、1時間帯ごとのダミー変数や、目的ごとのアクセシビリティ指標を用いる。

本モデルのパラメータ決定は、下位の段階から逐次、最尤推定によって行う。用いる実データとしては、国勢

| | 選択肢1 | 選択肢2 | 選択肢3 | 選択肢4 | ... |
|---------|------|---------|------|------|-----|
| 意思決定項目1 | ✓ | | | | |
| 意志決定項目2 | | | ✓ | | |
| 意志決定項目3 | | ✓ | | | |
| 意思決定項目4 | | | | ✓ | |
| ... | | システム設計案 | | | |

図-3 モルフォロジカル・マトリックスの概要図

調査やパーソントリップ調査、経済センサス、国土制作局のバス停位置情報、さらにオンデマンド交通の運行実績データなどを用いる。

また、坪内ら¹⁴⁾の提示したオンデマンド交通の配車アルゴリズムに基づき構築する、オンデマンド交通シミュレーターを用いて、市民の交通行動シミュレーションにより生成された利用需要が、実際に利用可能かどうかを判定する。ここで利用可能と判断されたものを、オンデマンド交通の予想需要とする。

b) 設計案ごとのシミュレーション実行

前節で作成した、モルフォロジカル・マトリックスで表現された設計空間を基に、設計案1つ1つについて、前項で説明した交通シミュレーターを用いたシミュレーションを実行し、将来のオンデマンド交通の運用結果を模擬する。

c) 設計案の評価

シミュレーションの結果をもとに、各設計案について、改善を目指す評価指標についての予測を行う。その予測値や、その他の評価指標の予測値などを見ながら、許容される範囲なども考慮しつつ、最終的に採用する設計案を決定する。

3. ケーススタディ

ケーススタディでは、千葉県成田市のオンデマンド交通に対して提案手法を適用し、本手法が実事例に対して適用可能であること、また、実事例に対して交通施策の評価を行うことで、本提案手法が有効であることを確認する。本稿ではオンデマンド交通の運行実績データの分析手法、及び交通システムの設計空間の構築手法を千葉県成田市におけるオンデマンド交通に対して適用した結果、また、設計空間で表現される設計案のうち、簡易的な交通シミュレーターを用いて、運賃のみを変更する設計案について、収支の面から評価した結果を中心に報告する。

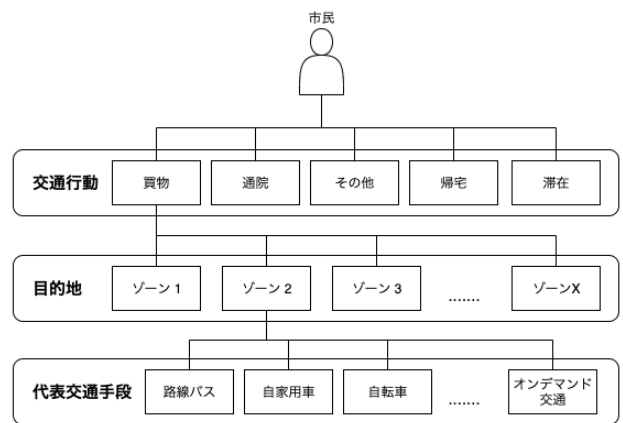


図-4 個人の交通行動選択モデルの概要図

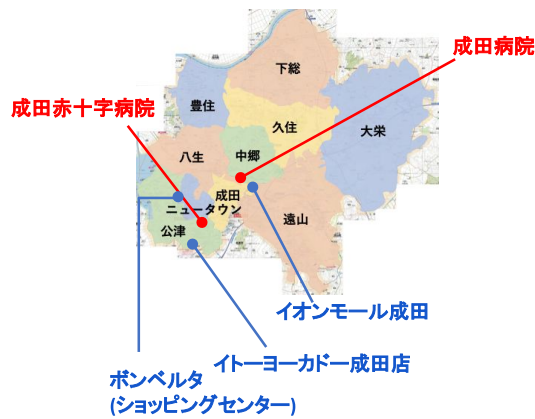


図-5 成田市の10行政地区と代表的な医療・商業施設

※国土地理院地図を使用

(1) 対象事例紹介¹⁵⁾¹⁶⁾

千葉県成田市は人口約13万人（平成30年度末）、面積213.8 km²の地方自治体であり、成田、公津、中郷、久住、豊住、遠山、ニュータウン、下総、大栄と呼ばれる10行政地区で構成されている（図-5）。市の南東部（遠山地区東部）に成田国際空港があり、その西側に、JR成田駅を中心とする市街地（成田地区、ニュータウン地区、公津地区）が広がっている。この3地区だけで人口のうち約6割を占めており、病院施設や大規模商業施設も市街地近辺に集中している。遠山、大栄の2地区も人口は比較的多いが、地区面積が大きく、首都圏への鉄道などへアクセスする場合には、（成田空港を除けば）成田の中心市街地まで行く必要がある。一方、市の面積の半分以上を占める北部地域では、丘陵と田畑が広がる中に集落や工場が点在しており、中心市街地との間の移動需要が広いエリアに存在している。市全体での高齢者人口は約3万人（高齢化率22.5%）であり、生活や通院のために成田市街地への移動が不可欠であることから、公共交通に対する需要は一定数見込まれる。しかし、路線バスは運行本数が少なく、利用者の時間的制約が極めて強い形となっている。このため、コミュニティバスやオンデマンド交通での移動需要充足が不可欠な状態となっている。

成田市では2011年より、一人で乗降可能な70歳以上の成田市民を対象として、市内全域でオンデマンド交通の実証実験を行っている。運行システムとしては、東大型オンデマンド交通システムが用いられており、4人乗りセダン型車両7台により運行されている。運行時刻は年末年始および祝日を除く平日の7時30分から17時30分までであり、利用料金は1回1人乗車につき500円となっている。利用に際し電話での予約が必要であり、予約は乗車希望日の1週間前から30分前の間となっている。

(2) 運行実績データの分析結果

本ケーススタディでは、2018年度（2018年4月1日～2019年3月31日）における運行実績データを用いた。本節では、提案手法に則ったデータの分析結果を示す。

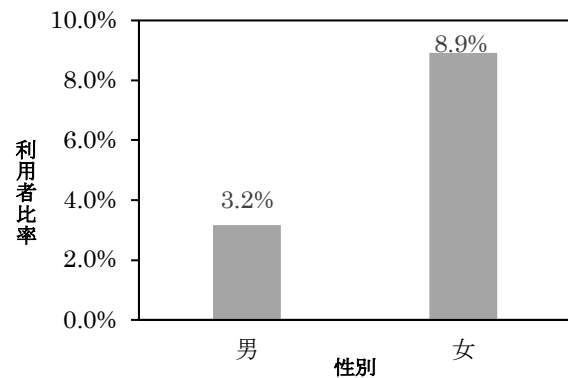


図-6 性別での対象者人口に対する利用者比率

a) 利用者の属性分析

オンデマンド交通利用者の属性に関して分析したところ、利用者の8割が女性であり、対象者人口に対する利用者比率としても、男性に比べ女性の方が2倍近く高くなっていることが明らかになった（図-6）。また、市街地から遠い豊住、大栄、下総といった郊外地区においては、利用者数自体は少ないものの、対象人口に対する利用者比率が高くなっていた。一方で市街地の成田、公津、ニュータウンといった地区では、利用者数自体は多いものの、対象人口に対する利用者比率は郊外地区に比べ低くなっていた（図-7）。また、利用者の年齢としては、80代の方で54%を占め、対象人口に対する比率でも80代の方が一番多いという結果となった（図-8）。

b) 登録者の利用頻度

オンデマンド交通システムへの登録者の利用頻度について分析してみると、2018年度中の総登録者4,227人に対し、1年に1回以上利用した人数は1,357人であり、登録者の32%となった。また、利用者の利用頻度について分析すると、23%の人は年に1度のみの利用であり、その他の人について、平均の利用間隔を計算すると、月に数日から2ヶ月に1回の利用者が多いことが判明した（図-9）。このような利用頻度分布は他の自治体の事例と類似しており、高齢者の移動頻度の少なさを示す事例である。

c) 利用頻度の高い乗降場

利用頻度の高い到着・出発乗降場を集計すると、目的地としては、成田病院や成田赤十字病院などの大型医療施設や整形外科が中心である一方、出発地としては、目的地に比べ相対的に商業施設が上位となっていることが分かった（表-1および表-2）。

d) 予約成立率・平均の希望と予約の差分時間

2018年度における平均予約成立率は91.3%であり、オンデマンド交通を運行している他の自治体の事例に比べて高いことが分かった（表-3）。しかし、昼食休憩により運行車両台数が7台から4台まで減少している昼間の時間帯（11～13時台）には、検案件数も少ないものの予約成立率の低下が見られている（図-10）。また、先行研究に

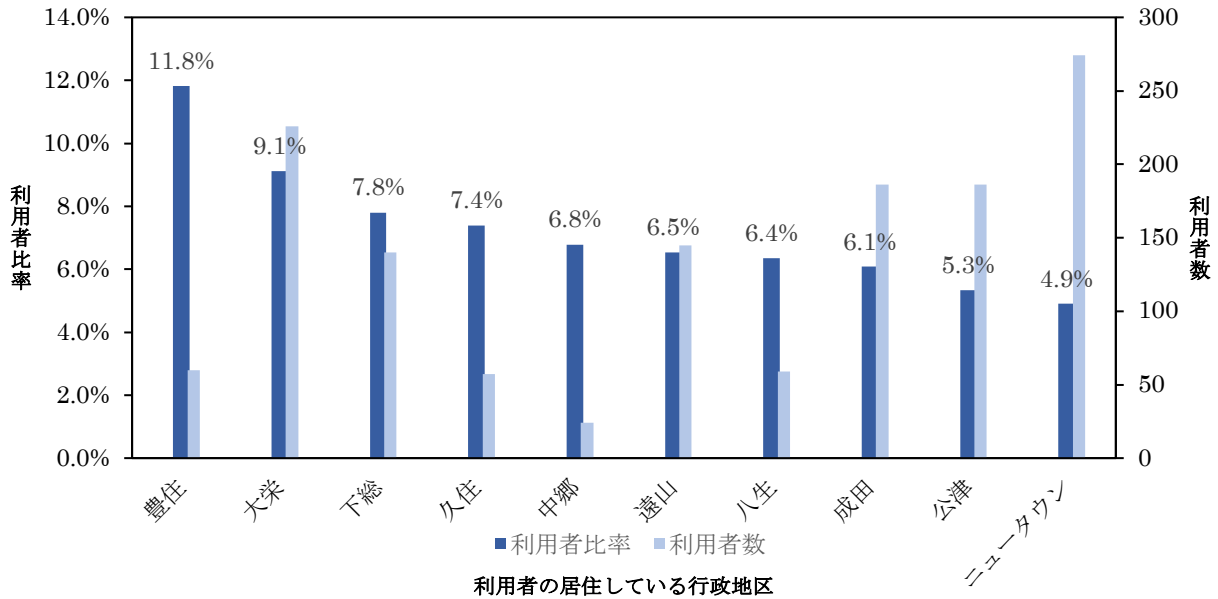


図-7 居住している行政地区別での対象者人口に対する利用者比率

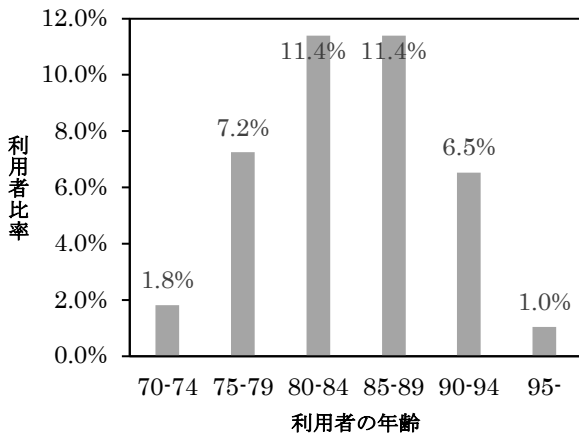


図-8 年齢別での対象者人口に対する利用者比率

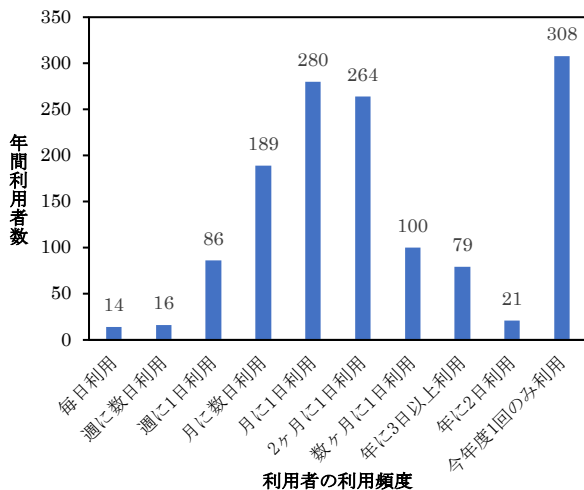


図-9 年間利用者の利用頻度分析

表-1 利用頻度が高い到着乗降場

| 目的地 | 利用回数 |
|----------|------|
| 成田病院 | 1865 |
| 成田赤十字病院 | 1522 |
| 川島整形外科 | 1023 |
| イオンモール成田 | 525 |

表-2 利用頻度が高い出発乗降場

| 出発地 | 利用回数 |
|-------------|------|
| 成田病院 | 1207 |
| イオンモール成田 | 658 |
| 成田赤十字病院 | 593 |
| イトーヨーカドー成田店 | 469 |

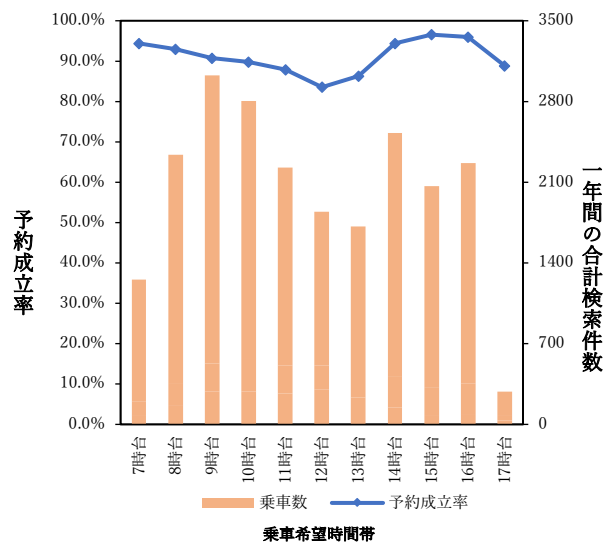


図-10 時間帯別の予約成立率

則り、乗客の希望した時間と、実際予約時間の差分の平均時間を計算した結果を示す(図-11)。予約成立率と同じく、運行車両台数が減少している昼間の時間帯には、

予約件数自体は少ないものの、5分以上の差が見られる場合が増加している。また、利用者の希望した時間と予

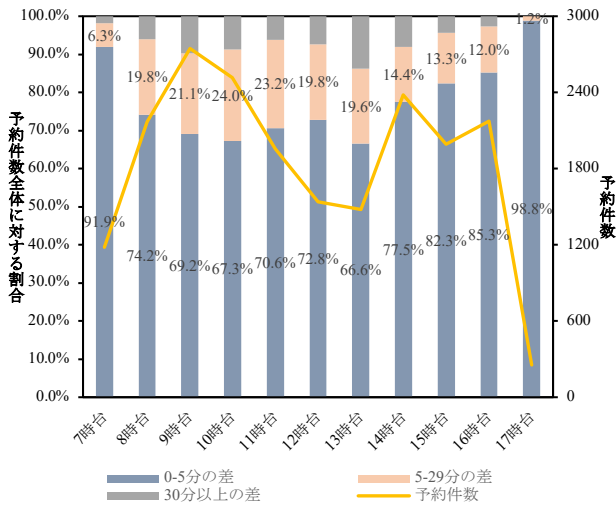


図-11 利用者が希望した時刻と予約時刻の差分の分析結果

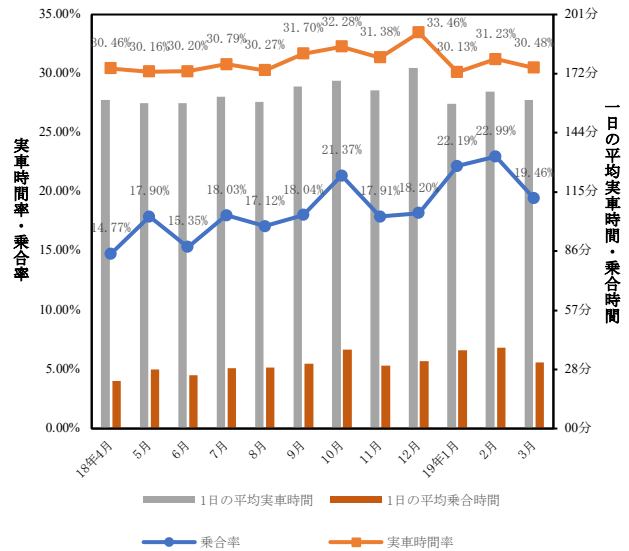


図-12 実車時間率・乗合率の分析結果

表-3 2018年度の運行に伴う実績値

| | |
|--------|---------------|
| 予約成立率 | 91.3% |
| キャンセル率 | 11.4% |
| 実車時間率 | 31.0% |
| 乗合率 | 18.6% |
| コスト効率性 | ¥542 / 人・km |
| 速度効率性 | 2.31 分 / 人・km |

表-4 移動パターンについての分析結果

| | 1回の利用 | 往復利用 | その他 | 合計 |
|-----|-------|-------|------|-------|
| 往路 | 6611 | 4628 | 71 | 11310 |
| 復路 | 1830 | 4628 | 62 | 6520 |
| その他 | 214 | 0 | 36 | 250 |
| 合計 | 8655 | 9256 | 169 | 18080 |
| 全体比 | 47.8% | 51.2% | 0.9% | |

約時間に、1時間以上の差がある場合は見られなかった。このことは、1時間以上の差が生じる場合には、利用者が予約を諦めているものと考えられる。

e) 実車時間率・乗合率

車両運行時間に対する、乗客を乗せている時間（実車時間）の割合である実車時間率は31%であり、乗客を載せていない、バス停間での移動が多いことが判明した（図-12）。また、実車時間に対する、2人以上の乗客を乗せている時間の割合である乗合率は18.6%であり、実車時間のうち約8割は乗客1人で運行していることが分かった（表-3）。

f) コスト効率と速度効率

最後に、乗車距離の情報をもとに、運行事業者である成田市高齢者福祉課からの情報と合わせてコスト効率性・時間効率性を計算した（表-3）。現在の運賃から計算される平均収入は、¥66.0 / person・kmであり、運行コストのおよそ8分の1であることが分かった。運行コスト効率は路線バスよりも向上しているものの、収支としては赤字であり、さらなる収益性の改善が求められることが判明した。一方、速度効率としては、市街地を走る自家用車に近い値となっていることが分かった。ただし、ここでは予約するための電話連絡・バス停での乗車までの待ち時間など、オンデマンド交通特有の時間的非効率性を考慮していない点に注意する必要がある。

(3) 利用者の移動パターンの解析

続いて本節では、利用者の移動パターンを分析した結果を示す。

a) クロス集計による移動パターンの分析

分析にあたり、登録者ごとに設定された自宅最寄乗降

場のデータを元に、自宅最寄乗降場から別の乗降場に向かう移動を往路、自宅最寄乗降場へ向かう移動を復路、その他の移動をその他、と分類した。また、1日に2回以上利用している人のうち、往路・復路を1回ずつ利用している人を往復利用と分類した。

以上の定義に基づいて、一日のオンデマンド交通の利用パターンについて集計した結果を示す（表-4）。一日の移動のうち、片道だけオンデマンド交通を利用する人が48%いることが分かった。特に、往路だけの利用者は復路のみの3.6倍にのぼることが明らかになった。

一方で、利用者の51%は往復利用をしており、さらに往復利用者のうち7%は、往路の目的地と、復路の出発地が異なっていることが分かった。これらの移動の詳細については、続いての乗降場集計に基づく移動目的推定から明らかにする。

表-5 利用頻度が高い1回利用往路の到着乗降場

| 目的地 | 利用回数 |
|---------|------|
| 成田病院 | 1068 |
| 成田赤十字病院 | 998 |
| 川島整形外科 | 585 |

表-6 利用頻度が高い1回利用復路の出発乗降場

| 出発地 | 利用回数 |
|------------|------|
| 成田病院 | 463 |
| イオンモール成田 | 257 |
| イオンタウン成田富里 | 207 |

表-7 利用頻度が高い往復利用での出発・到着乗降場

| 出発地 | 利用回数 |
|----------|------|
| 成田病院 | 698 |
| 成田赤十字病院 | 462 |
| 川島整形外科 | 366 |
| イオンモール成田 | 238 |

b) 乗降場集計に基づく移動目的の推定

表-4 に示したような、1日1回の移動利用に関し、到着・出発乗降場の集計を行なった結果のうち一部を示す(表-5及び表-6)。分析の結果から、往路だけの利用の場合は、総合病院や整形外科など医療施設への通院に、復路のみの利用の場合は大型商業施設での買物からの帰宅に用いる人が多いことが判明した。このことから、1日1回往路だけの場合の利用目的は医療施設への通院であると推測される。また、1日1回復路だけの場合の利用目的は、買物からの帰宅であると推測される。

一方、1日に往復での利用に関し、到着・出発乗降場の集計を行なった結果のうち一部を示す(表-7)。往復利用している場合には、ほぼ全て自宅と医療・大型商業施設間での往復であることが分かった。また、乗降場から判断して、通院目的での利用は、買物目的での利用に対し約半分滞在時間に関しては、全て1時間以上であったが、その長さは様々であった。

一方、往復での利用者のうち、往路の目的地と、復路の出発地が異なっている場合について利用頻度が高い到着・出発乗降場を集計した結果を示す(表-8及び表-9)。その結果から、これらの利用者は殆どの場合「自宅→医療施設→大型商業施設→自宅」という移動を行なっていることが判明した。医療施設から大型商業施設への間の移動としては、徒歩もしくは路線バスなどを使用していると推測される。

(4) 設計空間の構築

本節では、公共交通システムの設計空間を、モルフォロジカル・マトリックスで構築した事例を示す。成田市高齢者福祉課と協議の上で検討している、オンデマンド交通及び交通需要マネジメント政策についての設計空間

表-8 利用頻度が高い往復が一致しない場合の到着乗降場

| 目的地 | 利用回数 |
|---------|------|
| 川島整形外科 | 57 |
| 成田赤十字病院 | 35 |
| 成田病院 | 35 |

表-9 利用頻度が高い往復が一致しない場合の出発乗降場

| 出発地 | 利用回数 |
|-------------|------|
| イトーヨーカドー成田店 | 160 |
| イオンモール成田 | 149 |
| ボンベルタ | 85 |

表-10 成田市オンデマンド交通に関する設計空間事例

| | 選択肢1 (現状) | 選択肢2 | 選択肢3 |
|-------|--------------|-------------------------|---------------|
| 交通施策 | ✓なし | ワンショッTFP ¹⁷⁾ | 病院・商業施設での広告 |
| 登録者 | ✓70歳以上 | 制限なし | 免許非保有者 |
| 運行エリア | ✓制限なし | 特定エリア間のみ | エリア内+特定エリア間のみ |
| 運行形式 | ✓フルデマンド | 定路・時刻可変式 | |
| 利用者料金 | ✓1回の乗車¥500 | 1回の乗車¥300 | 1回の乗車¥800 |
| 予約期限 | ✓乗車30分前まで | 乗車日の前日 | |

を示す(表-10)。あくまでこの設計空間は研究活動上の検討事例であり、成田市の正式な所信を表したものではないことを付記する。

(5) 交通シミュレータを用いた設計解探索

最後に本節では、簡易的な交通シミュレータを用いて、現状から利用者料金の変更だけを行なった設計案について分析した結果を示す。

a) ケーススタディで用いる交通シミュレーション概要

提案手法で述べた交通シミュレータは、その構築にあたり、個人属性が明らかで、移動需要を捉えるのに十分な詳細なパーソントリップ調査結果が、十分なサンプル数存在することが前提となっている。しかし、当該自治体においては平成22年度首都圏パーソントリップ調査に伴う小ゾーン単位でのサンプルしか存在せず、また、当該自治体もわずか7ゾーンで構成されるため、市内を走るオンデマンド交通の需要を考慮するために十分な精度では移動需要を捉えきれていないと考えられる。また、当該調査が行われた当時では、オンデマンド交通は運行されておらず、オンデマンド交通の選択を考えるにあたり、モデルパラメータ移転の段階を踏む必要がある。以上の理由により、当該自治体での交通行動モデルの作成に問題が生じた。

そこでケーススタディでは、70歳以上の人口を対象とした原単位法に基づき、買物・通院・その他私用・帰宅の4種類で需要を発生させ、各大字ごとに従事者数および70歳以上の人口比率に基づいて、大字単位で出発地と目的地を配分する簡易的なOD需要推定モデルを用いる

こととした。

一方、交通選択モデルに関しては、まず、路線バス・自転車・自家用車・タクシー・徒歩の5つについて、ロジットモデルを構築する。その後、森地ら¹⁸⁾の提案する、集計データに基づく交通手段選択モデルの移転方法を参考に、オンデマンド交通に特有の非効用 β_{odb} の値を以下の式にて設定する。

$$S_{odb} = \frac{\exp(\theta_t \bar{X}_{odb} + \beta_{odb})}{\sum_i \exp(\theta_t \bar{X}_i + \beta_i)} \quad (\beta_i \text{は} odb \text{を除き} 0) \quad (1)$$

ただし、 \bar{X}_i は各交通手段*i*の交通手段選択モデルにおける特性変数ベクトルの平均を示し、地域のパラメータベクトル θ_t は、はじめに推定したものをを用いる。また、オンデマンド交通のシェア S_{odb} は、パーソントリップ調査の拡大トリップ数と、オンデマンド交通運行実績データの分析から得られた乗車数をもとに計算する。

最後に、70歳以上の人口から予想された交通需要に対して、 β_{odb} を用いてオンデマンド交通も考慮した交通手段選択モデルを適用し、オンデマンド交通の交通需要を求める。

b) 交通手段選択モデルの詳細

交通手段選択モデルにおいて用いる、交通手段ごとの特性変数の一覧と、その特性変数の値を示す(表-11)。特性変数の値は、先行研究など¹²⁾¹⁹⁾をもとに設定した。

平成 20 年度首都圏パーソントリップ調査・平成 26 年経済センサス・平成 27 年国勢調査のデータをもとに、最尤推定法にて求めた、パラメータの平均値を示す(表-12)。推定にあたり、パーソントリップ調査の小ゾーン単位から各大字ごとへの配分を行い、粒度の補完を行なった上で用いた。粒度の補完にランダム性が残るため、10回推定を行いその平均を用いた。尤度比は0.414、的中率は77.4%となり、再現状況は良好であると言える。

表-11 交通手段選択モデルで用いる特性変数一覧表

| 区分 | 路線バス | 自転車 | タクシー | 徒歩 | 自家用車 | オンデマンド交通 |
|--------------|--------------|--|-------------|---|--|----------|
| 運賃(1000円単位) | 0.16 + 0.03d | 0.1 | 0.71 + 0.3d | 0 | 0.01d | 0.5 |
| 乗車時間(10分単位) | 0.4d | 0.6d | 0.2d | 2d | 0.2d | 0.3d |
| アクセス距離(km単位) | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.05 |
| イグレス距離(km単位) | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.05 |
| 待ち時間(10分単位) | 5 | 0 | 0.5 | 0 | 0 | 0.5 |
| 徒歩圏ダミー | 0 | 0 | 0 | $d \geq 0.75 \Rightarrow 1$ それ以外 $\Rightarrow 0$ | 0 | 0 |
| 自転車圏ダミー | 0 | $d \geq 1.5 \Rightarrow 1$ それ以外 $\Rightarrow 0$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 自動車非保有ダミー | 0 | 0 | 0 | 0 | 有 $\Rightarrow 0$ それ以外 $\Rightarrow -1$ | 0 |
| 自転車非保有ダミー | 0 | 有 $\Rightarrow 0$ それ以外 $\Rightarrow -1$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 免許保有ダミー | 0 | 0 | 0 | 0 | 有 $\Rightarrow 1$ それ以外 $\Rightarrow 0$ | 0 |

※ d: トリップの距離(km単位), 出発地と目的地の大字の重心間距離で代用

また、式(1)を用いて、オンデマンド交通に特有の非効用 β_{odb} を求めた結果を示す(表-13)。シェアの計算には、70歳以上の成田市民の、成田市内部における、買物・病院・その他私用・帰宅の4種類の拡大トリップ数と、2018年におけるオンデマンド交通利用者の平均乗車時間が15.36分であることを用いた。この推定値は、デマンド交通に関する非集計モデルの推測を行なった森山らの先行研究²⁰⁾と比較しても、同等の値となっている。

c) 検討する設計案と評価指標の設定

表-3のコスト効率の値からも分かるように、当該自治体のオンデマンド交通は、高齢者福祉の観点も考えて、対象者を70歳以上に絞った上で赤字での運営が行われている。本ケーススタディでは収支改善を目指し、表-10

表-12 推定された交通手段選択モデルのパラメータ

| 区分 | 推定値 | (t値) |
|--------------|----------|----------|
| 運賃(1000円単位) | -0.556 | -2.34 |
| 乗車時間(10分単位) | -0.112 | -4.88 |
| アクセス距離(km単位) | -0.671 | -4.39e-5 |
| イグレス距離(km単位) | -0.671 | -4.39e-5 |
| 待ち時間(10分単位) | -1.05 | -1.19 |
| 徒歩圏ダミー | 0.286 | 0.529 |
| 自転車圏ダミー | 0.293 | 1.11 |
| 自動車非保有ダミー | 0.210 | 1.40 |
| 自転車非保有ダミー | 0.741 | 3.50 |
| 免許保有ダミー | 2.64 | 18.2 |
| サンプル数 | 1272 | |
| 最尤値 | -1188.90 | |

表-13 推定されたオンデマンド交通特有の非効用パラメータ

| 区分 | 推定値 |
|-------------|--------|
| オンデマンド交通シェア | 0.893% |
| 推定値 | -1.53 |

に示した設計空間のうち、他の設計項目を現状維持して利用者料金のみを変更した場合の3つの設計案について検討を行う。設計案は、選択肢の番号と同じく設計案1,2,3と呼ぶ(表-14)。

d) 設計解の探索結果

先に述べた交通シミュレータを用い、平成30年度末時点での住民基本台帳の人口データをもとに書く設計案について5回交通シミュレーションを行なった結果の平均値を示す(表-15)。コストについては、2018年度の予約成立率、キャンセル率、平均の乗車距離をもとに、実際に乗車すると考えられる人数を簡易的に計算して算出した。

現状と同じ設計案1については、現在のオンデマンド交通での一日の平均移動希望数が91.6件であることから、現状をよく再現していると考えられる。

一方の設計案2については、運賃の低下によりオンデマンド交通の選択率は上昇しているものの、利用者の増加はわずかであり、運賃低下による収入の減少から逆にコスト効率という点では悪化することが想定される結果となった。

また設計案3については、運賃の引き上げによりオンデマンド交通の選択率が減少し、利用希望者の低下につながっている。また、運賃引き上げによる収入増加に比べ、利用希望者の減少の影響が大きく、設計案2よりもコスト効率という点では悪化することが想定される結果となった。

以上のシミュレーションの結果を踏まえるならば、収支という点では現状維持の設計案1が最良であり、運賃の引き上げや引き下げにより、コスト効率面での改善は難しいと予測される。このようにして、設計案の評価を行うことができる。

以上、ケーススタディとして千葉県成田市のオンデマンド交通に対して本適用手法を適用して運行実績データの分析を行い、実際の事例でオンデマンド交通利用者の交通行動パターン分析ができることを示した。また、簡易的な交通シミュレータを用いて、実際に設計空間のうち一部の設計案について収支の面から評価を行い、現状に比べて運賃引き上げや引き下げによる改善は見込みにくいという結果が得られた。

4. 結言

a) 本論文の結論

本研究では、オンデマンド交通の運行実績データに基づく、市民の移動パターンの分析と、これらの結果を利用して、オンデマンド交通を含む地域公共交通システム全体の計画を検討する手法を提案することを目的とした。特に本報告では、千葉県成田市のオンデマ

表-14 検討する3つの設計案

| 設計項目 | 設計案1 (現状) | 設計案2 | 設計案3 |
|-------|-----------|---------|---------|
| 利用者料金 | 運賃 ¥500 | 運賃 ¥300 | 運賃 ¥800 |
| 他の項目 | 現状維持 | 現状維持 | 現状維持 |

表-15 シミュレーションによる予測結果

| 指標 | 設計案1 (現状) | 設計案2 | 設計案3 |
|-------------------------|-----------|--------|--------|
| オンデマンド交通の選択率 | 0.819% | 0.840% | 0.733% |
| 1日の利用希望者数 | 92.5人 | 94.3人 | 83.5人 |
| コストと運賃の差分 (1人1kmあたり) | ¥533 | ¥548 | ¥558 |

ンド交通に対し運行実績データの分析を行い、実際の事例でオンデマンド交通利用者の交通行動パターン分析ができることを示した。また、簡易的な交通シミュレータを用いて、現状からオンデマンド交通の利用者料金の変更だけを行なった設計案について検討し、現状に比べて運賃引き上げや引き下げによるコスト効率の改善は見込みにくいという結果を得た。

b) 今後の課題

本論文のケーススタディでは、提案手法で言及したものに比べ簡易的な交通シミュレータを用いている。推定されたシミュレータのパラメータについては、その符号は効用の増減を考慮して妥当なものであるが、t値についてはアクセス距離・イグレス距離について特に低くなってしまっている。これは全ての路線バstriップについて単一の値を割り振っているため、市街地や郊外地区でのバス停数や路線数の違いを全く反映できておらず推定が不十分になっているためと考えられる。今後、バス停位置のGISデータなどを用いての補正などが必要である。

また、本提案手法で示した交通シミュレータには、十分なサンプル数のある個人の交通行動の詳細なデータが欠かせない。本論文ではデータサンプルの少なから簡易的な交通シミュレータを使用した。今後は、交通発生・交通目的地のモデル構築に必要な、個人の属性や交通選択についての詳細な情報を収集するために、当該自治体での追加のアンケート調査を行う必要があると考えられる。

本論文のケーススタディでは、提案手法で言及したものに比べ簡易的な交通シミュレータを用い、設計空間で表現される多数の設計案のうちわずか3つのみの検証に留まっている。今後は、提案手法で述べた統合型の段階選択モデルを持つ交通シミュレーターを構築し交通発生・目的地選択等の面も含めた検証を行った後、交通施策による需要発生のパラメータ変更なども考慮して設計案の評価を実施することで、本手法の有効性の検証を続けていく。

謝辞：本研究にあたり、支援頂いた成田市高齢者福祉課の皆様、学術発展のためのデータ公開をご理解、ご支援頂いている関係各位に対し、ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府：令和元年版高齢社会白書，pp.1-4，2019.
- 2) 総務省：平成 29 年度版過疎対策の現況，pp.4，2018.
- 3) 国土交通省：公共交通政策の現状と課題，2018.
- 4) 稗方和夫，本多建，松尾康平：第 58 回土木計画学研究発表会・講演集，71，pp.1-8，2018.
- 5) 新谷洋二，原田昇：都市交通計画第 3 版，技報堂出版，2017.
- 6) 国土交通省：地域公共交通の現状，pp.12，2017.
- 7) 坪内孝太：オンデマンドバスシステムの開発と地域への導入設計の研究，2010.
- 8) NASA: Systems Engineering Handbook, Rev.2, 2007.
- 9) 和中真之介：東京大学新領域創成科学研究科人間環境学専攻博士論文，pp. 26，2018.
- 10) 柳澤龍：東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻修士論文，2012.
- 11) Fritz Zwicky：The Morphological Approach to Discovery, Invention, Research and Construction, *New Methods of Thought and Procedure*, pp.273-297, 1966.
- 12) 長谷川嵩：東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻修士論文，2013.
- 13) 金森亮，森川高行，山本俊行，三輪富生：土木学会論文集 D，pp.503-518，
- 14) 坪内孝太，大和裕幸，稗方和夫：人工知能学会論文誌，Vol.3，25，2010.
- 15) 成田市：平成 30 年度版成田市統計書，2018.
- 16) 成田市：成田市オンデマンド交通，<https://www.city.narita.chiba.jp/kenko_fukushi/page127700.html>，2019年7月22日閲覧>
- 17) 藤井聡，谷口綾子，松村暢彦：モビリティをマネジメントするコミュニケーションによる交通戦略，学芸出版社，2018.
- 18) 森地茂，屋井鉄雄，田村亨：土木学会論文集，4-3，Vol.359，pp.107-115，1985.
- 19) 原田昇：交通機関選択問題への応用，『非集計行動モデルの理論と実際』，pp.187-204，土木学会，1995.
- 20) 森山昌幸，藤原章正，張峻屹，杉恵頼寧：土木学会論文集 (786)，pp.39-51，2005.

(2019. 10. 4 受付)

PLANNING METHOD FOR PUBLIC TRANSPORTATION SYSTEMS USING LOG DATA OF ON-DEMAND BUS

Kohei MATSUO, Kazuo HIEKATA and Ken HONDA

As recent progress of aging, the pattern of traffic demands is changing especially in the Japanese countryside, then public transportation systems are faced with pressure to change considering the whole system. Also, on-demand bus, which is a kind of demand response transport, has been introduced in the countryside and it's collecting log data of personal detail movement during its operation.

In this paper, we propose a planning method for public transportation systems in the municipality using log data of on-demand bus system. The method reveals personal movement patterns through analysis of log data, builds a design space of transport systems with a morphological matrix referring demand patterns, then evaluates design space with a general transport simulator with personal activity models.

To validate the proposed method, we adapted the proposed method to the actual on-demand bus system operating in Narita City, Chiba prefecture, Japan. It reveals that users ride on-demand bus for going to hospital or shopping, and someones use for a one-way trip. Also, we estimate the impact on an operational income by a change of fee, using a transport simulator having a transportation choice logit model. These case study shows how to adapt the proposed method to actual cases and it's effectiveness to plan transportation systems.