

デマンド交通の導入による地方のモビリティ向上に関する研究

人口減少・少子高齢化が進む中で、地方部においては公共交通の空白・不便さや、路線バスの廃止・減便などによる更なる公共交通サービス水準の低下が大きな課題となっている。本研究では、地方部におけるモビリティ向上のためデマンド交通の適用を検討し、既存のデマンド交通の課題を考察したうえで、最新のICTを用いた新しいデマンド交通システムの開発を行った。そして、開発したデマンド交通システムを用いてシミュレーションを行い、開発したシステムの地域における適用性を示した。

キーワード | デマンド交通, シミュレーション, 最適化

尹 鍾進 YOON, JongJin



博士 (工学)
株式会社建設技術研究所
副参事

堀口拓未 HORIGUCHI, Takumi



株式会社建設技術研究所
主任

森地 茂 MORICHI, Shigeru



工学博士
政策研究大学院大学
客員教授

1—はじめに

公共交通が充実していない地方部においては公共交通の空白・不便さや、路線バスの廃止・減便などによる更なる公共交通サービス水準の低下が大きな課題となっている。

60歳以上の高齢者が買物に行く際の交通手段を都市規模別にみると、自分で自動車などを運転する割合は中都市では57.7%、小都市では68.1%、町村では67.1%として、大都市（東京都23区と政令指定都市）の32.9%と比べて、非常に高くなっている¹⁾。内閣府により2016年12月に実施された公共交通に関する世論調査によると²⁾、70歳以上の高齢者は自動車などを利用する理由として、自動車の利便性以外に、「駅やバス停が遠いから」「利用できる鉄道やバスが地域にないから」など、公共交通の空白や不便さを理由として挙げている。特に大都市と比べて中都市・小都市・町村において公共交通の空白や不便さに対する不満が高くなっている。

一方、近年ICTの活用によるカーシェアやライドシェアの普及が目ざされており、さらにMaaSや自動運転の普及によりモビリティ市場は大きく変化することが予想されるなど、ICTを用いてシームレスに移動できるスマートモビリティの時代が到来している。

本研究においては、地方部における交通課題を解決するため、スマートモビリティとして最新のICTを用いたデマンド交通の適用について検討を行う。また、本研究における地方部とは、公共交通のサービス水準や人口の集積、

地理的特性などによって地域の交通事情は異なるが、上記において示した都市規模別の交通の状況を考慮し、中都市（大都市を除いた人口10万人以上の市）・小都市（人口10万人未満の市）・町村を、地方部として想定する。

2—デマンド交通へのニーズと課題

デマンド交通は、「DRT (Demand Responsive Transport: 需要応答型交通システム)」とも呼ばれており、路線バスとタクシーの中間的な位置にある交通機関として、主に予約により運行する方式である。運行ダイヤや発着地 (OD)、路線の自由度の組み合わせにより、多様な運行形態が存在する³⁾。国内のデマンド交通については、国土交通省の地域公共交通活性化事例⁴⁾において示されているように、交通不便地域を中心に電話により事前予約を受けつけ、オペレーターによる配車などで運行されているケースが多い。

デマンド交通について、稗方⁵⁾は、その導入の課題として、オペレーターによる配車、予約という障壁、サービシステムの整備、運転手への指示といった4つの課題を示したうえで、その課題に対応するデマンド交通システムを紹介している。また、中島ら⁶⁾は、従来のデマンド交通がオペレーターによる人的な配車に依存しているため、一定の量を超えた乗客への対応や、配車途上でのリアルタイム対応などに制約があったことを述べた上で、コンピューターにより複数台の車輛をリクエストに応じてリアルタイム処理方式

で自動配車するデマンド交通システムを紹介している。

一方、海外においては、地方部の交通不便地域だけではなく、都心部においてもデマンド交通が運行されており、BRIDJやLiftango、Chariot、Viaなどが代表的である。これらは都心部において面的に広がっている交通需要に対して、同方向に向かう複数の乗客を瞬時に結びつけることで、シームレスな移動サービスを提供する。タクシーより遥かに安い料金で、バスより遥かに高品質のサービスとして人気を集めている。Frost & Sullivan⁷⁾は、2017年において28億ドルだったDRTのグローバル市場規模は、2030年には5,516億ドルまで増加すると予測している。

本研究では、地方におけるデマンド交通の導入に向け、国土交通省の地域公共交通活性化事例⁴⁾の分析結果及び、筆者によるヒアリング調査結果（群馬県A市・B市：2018年12月実施、茨城県C市：2019年12月実施）に基づき、デマンド交通へのニーズと課題についてまとめ、以下に示す。

1) ファーストマイル対応

内閣府により2016年12月に実施された公共交通に関する世論調査によると²⁾、70歳以上の高齢者が自動車などを利用する理由の一つとして、「駅やバス停が遠いから」をあげており、国土交通省においても公共交通空白地域をバス停及び鉄道駅からの距離として定義しているように、交通の利便性を決める要因として大事なのがファーストマイル（自宅からバス停・駅まで）であり、ファーストマイルに心理的・肉体的な負担を感じると、当然公共交通の使い勝手は悪くなる。これに対して、北海道の帯広市やニセコ町などでは、ファーストマイルに対するニーズに応じてdoor to doorのデマンド交通を導入し利用者の利便性を向上させている⁴⁾。

一方、移動の入口であるファーストマイルに対するニーズに応じた運行サービスを提供することは、利用者の利便性の向上には寄与するが、乗車時間（移動距離）が長く乗合が少ない場合にはその分車両を占有し運行効率を低下させる可能性もある。そのため、デマンド交通の導入においては、ファーストマイルサービスを考慮しながらも、地域の状況（地形条件、道路条件、施設立地など）や地域住民の移動需要を把握した上で、運行エリア・運行形態について十分検討するのも重要である³⁾。

2) スマート予約

国内の殆どのデマンド交通において、利用者がデマンド交通を利用するためには、乗車の1週間前などから、1日前や1時間前、30分前までなど、設定された予約期限の中で事前に乗車予約を行う必要がある。即ち、利用者が事前

に乗降場所や希望出発日時、乗車人数などを電話で伝えることで予約を行う「電話による事前予約受付」の形で運行が行われている。また、予約のみならず予約のキャンセルも多く発生しているが、キャンセルも電話で行われている。そのため、茨城県C市では、利用者から、オペレーターへの電話が混みあってなかなかつながらず、またオペレーターが勤務していない時間帯では予約もキャンセルもできないなどの不満が多くなっている。さらに電話での予約は、予約内容の確認ができないこともあり、予約及びキャンセルを忘れる場合も一部発生している。デマンド交通の導入においては、いつでも予約が可能なユーザーフレンドリーでかつスマートな予約システムの構築も検討すべき課題であると考ええる。

3) 配車最適化

デマンド交通は、オペレーターが配車・送迎の順番などを判断するオペレーターによる人的配車に依存しているケースが多く、そのため中島ら⁶⁾が指摘したように、一定量を超えたリクエスト及びリアルタイムへの対応には限界がある。

オペレーターによる配車を行っている群馬県B市及び茨城県C市においても、利用者からは予約が取りにくいとの不満が多く、運行効率をあげることが課題となっている。

デマンド交通の導入においては、予約件数は勿論、運行効率などが向上できる配車最適化システムも検討すべき課題であると考ええる。

4) 運行情報の共有

群馬県A市・B市及び茨城県C市のヒアリング結果によると、デマンド交通は乗合方式であるため、予約及び乗合の状況により迎えの時間を正確に把握することが難しく、そのため、利用者はいつ迎えに来るか分からず長く待つ場合も多い。特に、デマンド交通の利用者は高齢者が多く、暑い日や寒い日、雨などの天候不良時にも外で待つことになる。

利用者の利便性向上及び利用者の増加を図るためには、迎えの到着の通知や運行状況の見える化など、運行情報を利用者と共有できるシステムの構築も重要であると考ええる。

5) 運転手の負担軽減

デマンド交通の運行においては、茨城県神栖市のよう

ポイント)などがナビで明確に示されていないため、利用者の待っている場所とずれが生じ、利用者と車両のマッチングがうまくいかず、遅延が発生するケースもある。

デマンド交通の運転手の多くが高齢であり、また運転手の確保も厳しくなっている状況である。デマンド交通の導入においては、運転手の負担を軽減するため、送迎の順番や運行経路、送迎時間、ミーティングポイントなどの細かい運行計画について指示を出せるシステムの構築も重要であると考えられる。

3— デマンド交通システムの構築

以下では、2章において示したデマンド交通へのニーズと課題を解決し、デマンド交通の利便性及び運行効率性を向上させるため、最適アルゴリズムとICTを用いてデマンド交通システムを開発した。図—1に開発したシステムの構成を示す。

利用者用の予約システムは、電話のみならずアプリやWEBなどの多様な予約方法を設けており、利用者のデバイスからはデマンド交通の運行状況が確認できる。ドライバー用のアプリでは、運転手の負担軽減のため、送迎の順番や出発地、目的地、運行経路などの運行案内を行う。オペレーティングダッシュボードでは、予約受付や配車支援、利用者情報管理、データ管理などを行う。コアエンジンにおいては、利用者の予約と車両をマッチングしており、その際に車両の効率的な運行を実施するため配車最適化を行っている。

以下では、本研究において構築した配車最適化モデル及びそのモデルの適用について示す。

3.1 配車最適化モデル

利用者からの出発地や目的地、希望乗車時刻などの予約リクエストに対して、制約条件の下で可能な限り多くの利用者を乗合させるとともに車両の総走行時間を最小化する問題は、いわゆるDARP (Dial a Ride Problem) と呼

ばれるものであり、デマンド交通サービスにおいて多く活用されている。

Jaw (1986) et al.⁸⁾やCordeau & Laporte (2007)⁹⁾, Hu & Chang (2013)¹⁰⁾などがレビューしたようにDARPのモデルやアルゴリズムについては数十年前から多くの研究がなされており、国内においても内村ら¹¹⁾や松本ら¹²⁾, 吉野・羽藤¹³⁾などがデマンド交通にDARPの適用を試みている。ところが、DARPはNP困難な組合せ最適化問題であるため、ネットワークや車両数、予約リクエスト数などによって計算量が膨大になり予約リクエストに対してすぐ返事ができない、即ちリアルタイム処理ができない課題が発生する。そのため、実際の適用においては、挿入法を活用した準最適解を求める手法なども適用されている⁶⁾。

上記の課題に対して、筆者らは、挿入法を用いて利用者からの予約リクエストに対するリアルタイム処理を行い、その後システム内でオペティマイゼーションを行うことにより、より多くの利用者がデマンド交通を利用できるよう車両運行の効率化を図っている。

筆者のうち尹と森地が以前の研究において構築した共同輸送によるMulti-vehicle & Single-depotの総費用最少化の配車配送計画モデル (Yoon & Morichi (2012))¹⁴⁾に基づき、DARP with time windowとして開発したMulti-vehicle & Multi-depotの配送最適化モデルを以下に示す。

Minimize

$$f(x) = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{v \in V} c_{i,j}^v x_{i,j}^v \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{j \in N} \sum_{v \in V} x_{i,j}^v = 1 \quad \forall i \in S \quad (2)$$

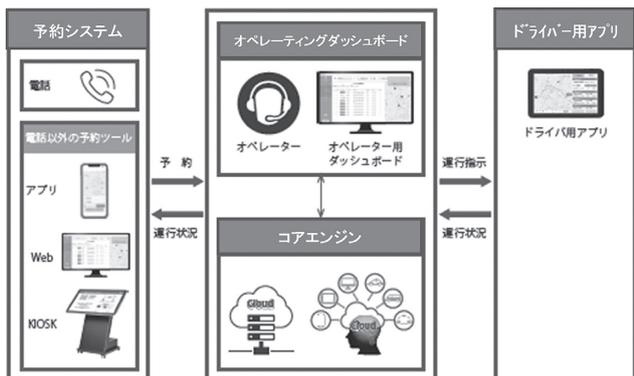
$$\sum_{j \in N} x_{i,j}^v - \sum_{j \in N} x_{j,n+i}^v = 0 \quad \forall i \in S, \forall v \in V \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} q_j x_{i,j}^v \leq Q_v \quad \forall v \in V \quad (4)$$

$$x_{i,j}^v (b_i^v + s_i + c_{i,j}^v - b_j^v) \leq 0 \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall v \in V \quad (5)$$

$$b_{n+i}^v \geq b_i^v + s_i + c_{i,n+i}^v \quad \forall i \in S, \forall j \in E, v \in V \quad (6)$$

$$l_i \geq b_i^v \geq e_i \quad \forall i \in C, \forall v \in V \quad (7)$$



■図—1 デマンド交通システムの構成

$$DRT_{i,n+i}^v \leq b_{n+i}^v - b_i^v \leq MRT_{i,n+i}^v \quad \forall_i \in S, \forall_j \in E, \forall_v \in V \quad (8)$$

$$MRT_{i,n+i}^v = \min \left\{ \omega_1 DRT_{i,n+i}^v, \omega_2 + DRT_{i,n+i}^v \right\} \quad \forall_i \in S, \forall_j \in E, \forall_v \in V \quad (9)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{v \in V} x_{d_k, j}^v \leq V_{d_k} \quad \forall_{d_k} \in D \quad (10)$$

$$\sum_{d_k \in D} \sum_{j \in C} x_{d_k, j}^v = \sum_{d_k \in D} \sum_{i \in C} x_{i, d_k}^v \leq 1 \quad \forall_v \in V \quad (11)$$

$$\sum_{i \in C} x_{d_k, i}^v (b_i^v - c_{d_k, i}^v) \geq TS_v \quad \forall_v \in V, \forall_{d_k} \in D \quad (12)$$

$$\sum_{i \in C} x_{i, d_k}^v (b_i^v + s_i + c_{i, d_k}^v) \leq TE_v \quad \forall_v \in V, \forall_{d_k} \in D \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in C} x_{i, d_k}^v (b_i^v + s_i + c_{i, d_k}^v) - \\ \sum_{i \in C} x_{d_k, i}^v (b_i^v - c_{d_k, i}^v) \end{array} \right\} \leq TW_v \quad \forall_v \in V, \forall_{d_k} \in D \quad (14)$$

$$x_{ij}^v \in \{0, 1\}, \quad \forall_{(i,j)} \in A, \forall_v \in V \quad (15)$$

$$R = \{1, 2, \dots, n\} \quad (16)$$

$$S = \{1, 2, \dots, n\} \quad (17)$$

$$E = \{n+1, \dots, 2n\} \quad (18)$$

$$V = \{1, 2, \dots, v\} \quad (19)$$

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\} \quad (20)$$

$$C = \{S \cup E\} \quad (21)$$

$$N = \{D \cup S \cup E\} \quad (22)$$

$$A = \{(i, j) | i, j \in N\} \quad (23)$$

ただし、

$c_{i,j}$: ノード i からノード j までの移動時間、

$x_{i,j}^v$: 車両 v が (i, j) 経路を利用する場合には1, 利用しない場合には0、

q_j : ノード j における乗客数、 Q_v : 車両 v の定員、

b_i^v : ノード i における車両 v のサービス開始時刻、

s_i : ノード i におけるサービス時間、

e_i : ノード i におけるtime windowのearliest pickup time、

l_i : ノード i におけるtime windowのlatest pickup time、

$DRT_{i,n+i}^v$: 乗車ノード i から降車ノード $n+i$ までの車両 v

の最短移動時間、

$MRT_{i,n+i}^v$: 乗車ノード i から降車ノード $n+i$ までの車両 v の最大許容移動時間、

ω_1, ω_2 : パラメータ、

V_{d_k} : デポ d_k における車両数、

TS_v : 車両 v の営業開始時刻、

TE_v : 車両 v の営業終了時刻、

TW_v : 車両 v の最大営業時間、

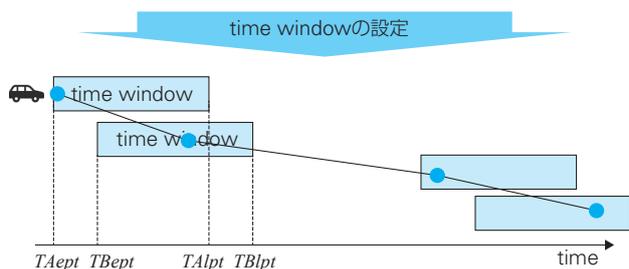
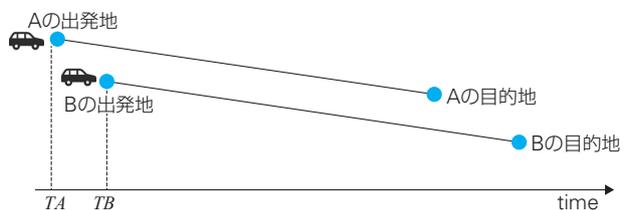
R : 予約リクエスト i は乗車ノード i と降車ノード $n+i$ により構成 (ノード番号が異なっても同一地理的位置を示すことも可能)、

S : 乗車ノード、 E : 降車ノード、 V : 車両、 D : デポ、 C : 乗車及び降車ノード、 N : 全ノード

ここで、目的関数である式 (1) は「車両の総移動時間」を最小化することを示している。

式 (2) は各予約リクエストに対して1回訪問されること、式 (3) は乗車と降車は同じ車両により行われること、式 (4) は乗客数が車両の定員を超えないことを表している。式 (5) は車両の送迎の順番及び経路とスケジュールとの間の制約条件を表しており、式 (6) は車両 v が必ず乗車ノードの訪問後降車ノードを訪問しなければならないことを表している。式 (7) はtime windowの制約条件、式 (8) は予約リクエスト i の所要時間の制約条件、式 (9) は最大許容移動時間の制約条件、式 (10) はデポ d_k を出発する車両数は許容台数を超えないこと、式 (11) は各車両がデポ d_k を出発しデポ d_k に戻ることを表している。式 (12)・式 (13)・式 (14) は営業開始時間・営業終了時間・最大営業時間に関する制約条件を表している。

上記において示したモデルの中で、利用者を乗合させることに対して特に重要な概念が式 (7) のtime windowである。図一2の上段において示しているように、利用者Aと



■図一2 time windowの設定と乗合

利用者Bがそれぞれ時刻 TA 、時刻 TB に出発しなければならない場合には、利用者Aと利用者Bのためには合計2台の車が必要となる。これに対して、図-2の下段において示しているように、出発する時間に対して時間幅 (time window) を設けた場合には、即ち、利用者Aは $TA_{ept} \sim TA_{lpt}$ の間、利用者Bは $TB_{ept} \sim TB_{lpt}$ の間の出発でよい場合には、この時間幅 (time window) を利用することで乗合させることができる。利用者からの予約リクエストに対して、車両が利用者の乗車時間幅 (time window) の間に向かうことができ、式 (8) などの他の制約条件を満足できる場合には予約は成立することができる。

3.2 モデルの適用

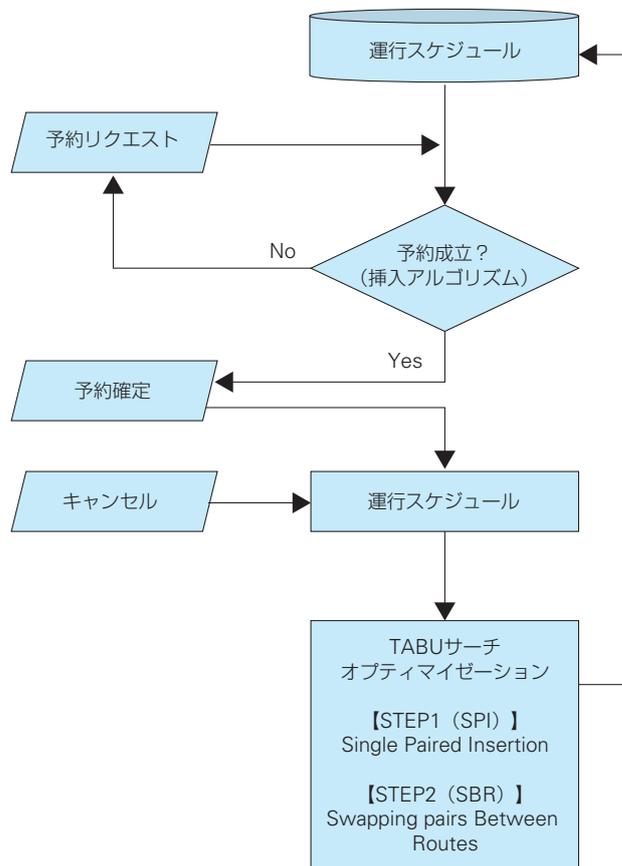
デマンド交通システムの運用においては、利用者の予約リクエストに対して早く返事するとともに、多くの利用者が利用できるような乗合率や配車の効率も向上させる必要がある。そのため、本研究においてはCarotenuto & Martis (2017)¹⁵⁾の研究成果を参考とし、利用者からの予約リクエストに対して、まず前節3.1において構築したモデルに基づき、式 (1) を最小とする挿入を選択する挿入アルゴリズムを用いてリアルタイムで処理を行い、その後最適化を行う方式を構築している。

また、本研究においては、最適化として、Nanry & Barnes (2000)¹⁶⁾の研究を参考とし、TABUサーチデザインを構築している。

Nanry & Barnes (2000)¹⁶⁾は、初期解 (initial solution) の生成においてシンプルな挿入アルゴリズムを適用し、TABUサーチとしては、①Single Paired Insertion(SPI)、②Swapping pairs Between routes (SBR)、③Within Route Insertion (WRI) の、3つのステップを構築しており、TABUサーチの最後のステップであるWRIにおいて各ルートにおける望ましい訪問順序を決定するデザインとなっている。

これに対して、本研究においては、初期解の生成においては、前節3.1において構築したモデルに基づき、式 (1) を最小とする挿入を選択する挿入アルゴリズムを適用している。TABUサーチとしては、①Single Paired Insertion(SPI)、②Swapping pairs Between routes (SBR) の2つのステップを構築している。ただし、Nanry & Barnes (2000)¹⁶⁾が、最適化の最後のステップで各ルートにおける望ましい訪問順序を決定するWRIを適用していることに対して、本研究においては、より望ましい最適解を求めため、初期解の生成も含め、SPI及びSBRの全てのステップにおける挿入においてWRIを適用している。

図-3に予約リクエスト処理及び最適化のプロセスを示す。



■図-3 予約リクエスト処理及び最適化のプロセス

4 シミュレーション

本研究では、door to door型のデマンド交通 (乗合いタクシー) を運行している石岡市及び社会福祉法人石岡市社会福祉協議会から、デマンド交通利用者の利用時間・OD、車両の運行形態などに関するデータの協力をいただき、デマンド交通サービスのシミュレーションを行った。

シミュレーションにおいて、利用者の利用時間や出発地、目的地などの予約に関するデータは石岡市からいただいたデータを用いた。また、石岡市における現行の運行通り、車両台数はデポ d_1 に5台 (定員8名)、デポ d_2 に4台 (定員12名) として合計9台、全ての車両の営業開始時刻 (TS_v) は8時、営業終了時刻 (TE_v) として5台は18時30分、3台は17時30分、1台は16時30分と設定した。ドライバーの休憩も、現行の運行と同様に、全ての車両に対して1時間のランチ休憩を設定した。

一方、現行の運行においては1時間ごとの定時運行便として運行されていたことに対して、シミュレーションにおいては利用データに基づき利用者が乗りたい希望乗車時間を設定できるようにした。例えば、現行の運行においては、第8時便 (車両は8時にデポを出発し9時前にはデポに戻る)、第9時便 (車両は9時にデポを出発し10時前にはデポに戻る) などとして、利用者は乗れる時間帯のみ選択で

きた。

これに対して、シミュレーションでは、例えば、8時40分などとして、利用者が具体的に乗りたい希望乗車時間を設定できるようにするとともに、利用者が乗りたい希望乗車時間を出発地におけるtime windowの*earliest pickup time* (e_i)として設定した。8時40分の希望乗車時間に対してtime windowを10分として設定した場合、即ち、time window[0,10]の場合には、*earliest pickup time* e_i =希望乗車時間+0分、*latest pickup time* l_i =希望乗車時間+10分となり、time windowは8時40分～8時50分となる。

本研究では、time windowの変化による「乗合い」と「利用者の待ち時間」との変化を検討するため、time windowについて10分 (time window[0,10])、15分 (time window[0,15])、20分 (time window[0,20])、25分 (time window[0,25])、30分 (time window[0,30])、40分 (time window[0,40])、50分 (time window[0,50]) の7つのケースを検討した。

なお、シミュレーションにおけるパラメータとして、最大許容移動時間 $MRT_{i,n+i}^v$ のパラメータである ω_1 は1.7、 ω_2 は15分、乗車ノード S 及び降車ノード E におけるサービス時間 s_i は0分と設定した。ただし、実際の運行計画の際には、ドライバーの年齢や交通状況、利用者の特性などを考慮して、ドライバーの休憩やパラメータ、サービス時間 s_i などを設定する必要がある。

以下にシミュレーションの実施結果を示す。

表一1は、各車両の運行状況及び各利用者の利用状況の出力結果を評価指標としてまとめたものであり、time windowを30分として設定したケース (time window[0,30]) を示している。また、図一4は、その際の車両の運行軌跡を示す。

利用者が自宅から病院に行く際に、例えば、自宅からの希望乗車時刻を8時40分としてリクエストした場合、time window[0,30]は8時40分～9時10分までとなり、車両は利用者の自宅に8時40分～9時10分までの間に向かいに行かなければならない。利用者のリクエストに対して車両がそのtime windowの間に向かうことができ、また3章のモデルで示した他の制約条件を満足した場合には予約成立となる。しかし、車両が他の予約などによりそのtime windowの間に向かうことができない場合には、例えば、time windowを超えて、利用者の自宅まで向かう時間が9時15分などの場合には予約は成立できないこととなる。

表一1に示す通りシミュレーションの結果、予約リクエスト275件に対して237件が予約成功、車両が走行した時間に対して乗客を乗せて移動した時間の割合、即ち「サービス時間率」は76.4%の結果を示した。表一1の評価指標のうち、「乗合い」を表している「座席占有率 (サービス移動

■表一1 シミュレーション結果 (time window=[0,30])

評価指標 (KPI)	内容	結果
予約件数 (件)	予約できた件数	237
総走行時間 (h)	車両が走行した全ての時間の合計	68.6
平均走行時間 (h/台)	車両1台当たりの平均走行時間	7.6
総走行距離 (km)	車両が走行した全ての距離の合計	1441.1
平均走行距離 (km/台)	車両1台当たりの平均走行距離	160.1
総サービス移動時間 (h)	車両が乗客を乗せて移動した時間の合計	52.4
総サービス移動距離 (km)	車両が乗客を乗せて移動した距離の合計	1094.9
サービス時間率 (%)	総サービス移動時間÷総走行時間	76.4
サービス距離率 (%)	総サービス移動距離÷総走行距離	76.0
座席占有率 (%)	サービス移動時間における定員に対する乗車人数の割合	19.0
希望乗車時刻に対する乖離時間 (分)	希望乗車時刻と実際乗車時刻の平均偏差	8.4



出典：国土地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp/#10/35.851213/140.383987/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1>) をもとに作成

■図一4 車両の運行軌跡 (time window=[0,30])

時間 (車両が乗客を乗せて移動した時間) における定員に対する乗車人数の割合」は19.0%、利用者の待ち時間を表す「希望乗車時刻に対する乖離時間 (希望乗車時刻と実際乗車時刻との平均偏差)」は8.4分の結果となっている。ここで、「座席占有率」は19.0%として低くなっているが、これは予約時の乗車人数をすべて一人として設定したことや予約の時間的・空間的分布の影響で乗合いが多くなかったことが原因として考えられる。

一方、上記において示したように、予約リクエスト275件に対して予約件数は、石岡市における現行の予約件数 (約180件/日) の約1.3倍の237件/日の結果を示した。石岡市の現行の運行は1時間ごとの定時運行便として運行されているため、本研究のモデルのtime windowとして考えた場合、time windowは30分以上として設定でき、time window面では大きな差はないと考えられる。シミュレーションと現行の運行における予約件数の乖離の理由としては、以下の3つの点が考えられる。

① 人的配車とシステムによる配車

シミュレーションでは、3章で示した配車最適化モデルに基づき、利用者の予約リクエストに対する予約可能有無

の判断をシステムで自動的に行っている。これに対して、石岡市における現行のデマンド交通の運営においては、オペレーターが利用者の予約リクエストに対して予約可能有無の判断を行っている。中島ら⁶⁾が指摘したように、オペレーターによる人的配車は、一定量を超えたリクエスト及びリアルタイムへの対応には限界が生じる可能性がある。人的配車とシステムの配車による違いが、予約件数の乖離の一つの原因であると考えられる。

②運行形態

シミュレーションでは、営業開始時と営業終了時以外には、ランチ休憩時間のみデポを訪問するようにしてある。これに対して、石岡市におけるデマンド交通は、1時間ごとの定時運行便として運行されているため、例えば、第9時便の場合、車両は9時にデポを出発し10時前にはデポに戻るようになっている。即ち、1時間ごとにデポに戻らなければならないことにより時間のロスが生じることとなる。このような運行形態の違いも、予約件数の乖離に影響を及ぼしていると考えられる。

③乗車及び降車の際のサービス時間

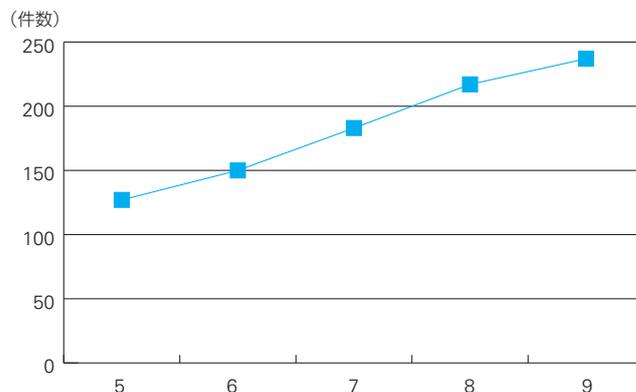
シミュレーションにおいては、乗車ノードS及び降車ノードEにおけるサービス時間 s_i は0分と設定した。ただし、実際のデマンド交通の運行においては高齢者の利用が多く、乗車及び降車時には少し時間がかかることが多いため、実際の運行においてはそのような時間も考慮し、予約の受付を行っている。このような時間設定の違いが、予約件数の乖離の一つの原因であると考えられる。

図一五には、車両台数の変化による予約件数の変化を示している。車両が5台から9台まで増加することにより予約件数が増加していることが確認できる。

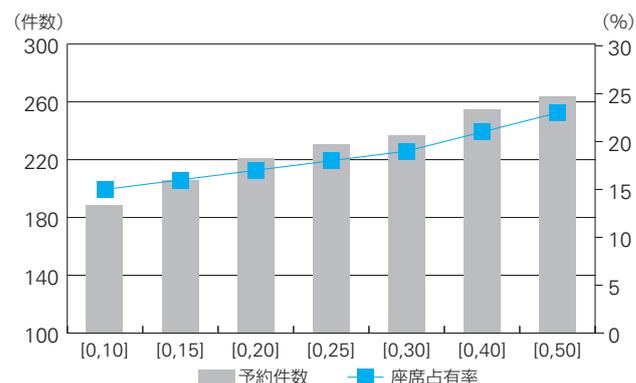
図一六は、time windowの変化による「予約件数」と「座席占有率」の変化を示しており、time windowが増加することにより、座席占有率、即ち乗合いも増加し、最終的に予約件数も増加することが示された。

ところが、図一七に示すように、time windowの増加は希望乗車時刻に対する乖離時間も増加させている。即ち、図一六及び図一七は、デマンド交通を考慮する際に、乗合いと予約件数の増加のみを考慮しtime windowを増大させると、利用者の待ち時間が長くなり利用者の利便性は低くなる可能性があることを示している。利用者の利便性が低くなると、さらにデマンド交通の利用が少なくなる可能性もあるので、デマンド交通の導入の際には、利用者のOD分布や運行エリアなどを考慮しながら、その地域に望ましいtime windowと利用者の待ち時間について十分検討すべきである。

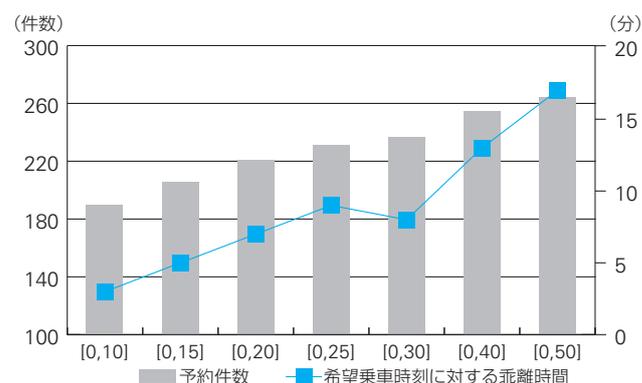
一方、time window以外の方法で乗合いを増加させる方法についても検討すべきであると考えられる。例えば、デマン



■図一五 車両台数の変化による「予約件数」の変化



■図一六 time windowの変化による「予約件数と座席占有率」の変化



■図一七 time windowの変化による「予約件数」と「希望乗車時刻に対する乖離時間」の変化

ド交通の場合には1週間前などから事前予約を受け付けている場合が多いため、出発地や目的地、希望乗車時間などの予約情報に基づき、同じ方面・同じ時間帯の移動については乗合いさせることが可能である。3.2において示したように、本研究で開発したシステムでは事前に予約された予約情報に基づき、予約が少ない時間（例えば、23時）にTABUサーチ最適化を実施し、乗合いを最大化させている。

なお、利用者の待ち時間が長くなることが予想される場合には、利用者の利便性を向上させるため、2章において示したように、迎いの到着の通知や運行状況の見える化など、運行情報を利用者と共有できるシステムの構築についても検討すべきであると考えられる。

5—まとめ

本研究では、地方部における交通課題を解決するため、スマートモビリティとして最新のICTを用いたデマンド交通の適用について検討した。

デマンド交通へのニーズと課題について検討したうえで、開発したデマンド交通システムによりシミュレーションを実施し、開発したシステムの地域における適用性について検討を行った。その結果、シミュレーション結果は、設定した条件に応じて、利用者の予約リクエストに対する予約状況及び車両の運行状況を的確に表しており、シミュレーションとしては地域におけるシステムの適用性を十分示していると考えられる。

なお、4章において示したように、運行の効率性のみを考慮すると利用者の利便性が低くなる可能性もあり得る。より多くの方に利用され地域に定着できるデマンド交通にするためには、導入段階から地域状況や利用者特性などに応じて、運行効率性と利用者の利便性のバランスを考慮したデマンド交通の運行形態を定量的に検討すべきであると考えられる。

一方、石岡市の現行における予約件数とシミュレーションによる予約件数に乖離が生じたように、シミュレーションと実際地域におけるシステムの運用結果が異なる可能性は十分あり得る。

今後、構築したデマンド交通システムを実際の地域において適用し、シミュレーション結果との違いやデマンド交通システムを運用する際の課題などについて検討を進めたい。

謝辞: 本研究の遂行にあたり、石岡市及び社会福祉法人石岡市社会福祉協議会から貴重なデータの提供をいただいた。また、一般財団法人運輸総合研究所の伊東誠主席研究員と日本大学の金子雄一郎教授からは貴重なコメントをいただいた。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府 [2017], 『平成29年版高齢社会白書』, 内閣府.
- 2) 内閣府 [2018], “公共交通に関する世論調査”, <https://survey.gov-online.go.jp/h28/h28-kotsu/index.html>, 2018/6/22.
- 3) 国土交通省中部運輸局 [2013], 『デマンド型交通の手引き』, 国土交通省中部運輸局.
- 4) 国土交通省 [2018], “地域公共交通活性化事例”, <http://koutsu-shien-center.jp/jirei/index.php#top>, 2018/10/2.
- 5) 稗方和夫 [2017], “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』, Vol. 61, No. 12, pp. 500~505.
- 6) 中島秀之・野田五十樹・松原仁・平田圭二・田柳恵美子・白石陽・佐野涉二・小柴等・金森亮 [2015], “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)』, Vol. 71, No. 5, pp. I_875~I_888.
- 7) Frost & Sullivan [2018], “Demand-Responsive Shuttles to Account for 50% of Global Shared Mobility Market by 2030”, <https://ww2.frost.com/news/press-releases/demand-responsive-shuttles-account-50-global-shared-mobility-market-2030/>, 2018/11/30.
- 8) Jaw, J., Odoni, A.R., Psaraftis, H.N., and Wilson, N.H.M. [1986], “A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows”, *Transportation Research B*, Vol. 20, pp. 243-257.
- 9) Cordeau, J-F. and Laporte, G. [2007], “The dial-a-ride problem : models and algorithms”, *Annals of Operations Research*, Vol. 153(1), pp. 29-46.
- 10) Hu, T.Y. and Chang, C.P. [2013], “Exact algorithm for Dial-A-Ride problems with time-dependent travel cost”, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 10, pp. 916-933.
- 11) 内村圭一・若林竜太・境周平 [2002], “Dial-a-Ride問題におけるリアルタイム乗客輸送”, 『システム制御情報学会論文集』, Vol. 15, No. 8, pp. 413~421.
- 12) 松本修一・国府方久史・清水洋一郎・川嶋弘尚 [2009], “デマンドバス配車配送計画の実用的解法”, 『土木計画学研究・論文集』, Vol. 26, No. 1, pp. 59~65.
- 13) 吉野大介・羽藤英二 [2016], “ゼロサプレス型二分決定グラフを用いたデマンド交通の運行経路の高速列挙手法の提案”, 『土木学会論文集D3(土木計画学)』, Vol. 72, No. 5, pp. I_1229~I_1239.
- 14) Yoon, J. and Morichi, S. [2012], “Improving Transport Efficiency in Reverse Logistics for Waste Management”, *Proceedings of the Ninth World Congress of Regional Science Association International*, CD-ROM.
- 15) Carotenuto, P. and Martis, F. [2017], “A double dynamic fast algorithm to solve multi-vehicle Dial a Ride Problem”, *Transportation Research Procedia*, Vol. 27, pp. 632-639.
- 16) Nanry, W.P. and Barnes, J.W. [2000], “Solving the pickup and delivery problem with time windows using reactive tabu search”, *Transportation Research B*, Vol. 34, pp. 107-121.

(原稿受付2021年1月26日, 受理2021年9月17日)

Smart Mobility for Rural Areas: On-demand Mobility

By JongJin YOON, Takumi Horiguchi, Shigeru Morichi

This study examines the implementation of on-demand mobility solutions in rural areas in order to improve rural mobility. Also, this study presents the on-demand mobility system developed using TABU search algorithm for multi-vehicle dial a ride problem. The simulation results using the system showed that the system can be effectively used in the region.

Key Words : **On-Demand Mobility, DRT, Optimization, Simulation**
