

配車計画モデルを用いた自動運転型デマンド 公共交通システムの検討と評価

大勝 友貴¹・杉木 直²・松田 真宜³・松尾 幸二郎⁴

¹学生会員 豊橋技術科学大学大学院 建築・都市システム学専攻

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:daikatus.yuki.tc@tut.jp

²正会員 豊橋技術科学大学准教授 建築・都市システム学系

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:sugiki@ace.tut.ac.jp

³正会員 株式会社ドーコン 交通事業本部

(〒004-8585 北海道札幌市中央区北1条西1丁目6番地)

E-mail:mm1700@docon.jp

⁴正会員 豊橋技術科学大学助教 建築・都市システム学系

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:k-matsuo@ace.tut.ac.jp

モータリゼーションが進行し、高齢化によるバス運転手の不足や路線バスの採算性の低下から、中山間地域における公共交通の維持が困難となっている。課題解決には、自動運転による運転手不足の解消と、デマンド交通による効率の向上が有効と考えられる。デマンド交通は、需要に対してどのような運行によって送迎を行うかが効率性を高める上で重要である。本研究では、需要に対して効率的な配車経路を求めするために、配車計画モデルを構築した。本モデルを用いて、過疎化が進む北海道大樹町を対象に、自動運転型デマンド公共交通システムの運行形態について検討を行い、有効性を評価する。具体的には、需要分布の偏り、通学による需要ピーク時を考慮した上で、運行形態とエリア分割を定義し、各ケースにおける採算性、効率性などを評価する手法を検討する。

Key Words: *Autonomous Driving, Demand Responsive Transport, Vehicle Allocation Plan, GA*

1. はじめに

我が国では、高齢化の進行から自家用自動車を持たない高齢者が増加し、地域における公共交通の役割が重要となっている。そのような状況において、自動車の普及からバスの利用者は減少し、大都市を除く地域では、一般乗合バス事業の約 89%が赤字¹⁾である。地域の公共交通手段の確保には、補助金を利用した運営や、市町村の直営または運営委託によるバス事業が存在する。しかし、需要が疎な地域において、従来の定時定路線バスによる運行では、採算性を成り立たせることが困難である。

需要に応じて運行するデマンド交通は、需要が疎な地域において公共交通の採算性を高めることが考えられる。また、現在、法整備や開発が進められている自動運転技術は、バス事業における運転手不足を解決する可能性が

あり、デマンド交通の運転手への高い負荷を無くすことが期待できる。そのため、デマンド交通の導入には、自動運転車両が有効だと考えられる。しかし、デマンドサービスは、サービス形態や、配車がどのように行われるかなど、運行計画によって採算性と利便性が大きく変動する。そのため、適切な運行計画を検討し、効率的なサービスを提供するデマンドの配車問題を解く必要がある。

そこで、本研究では、実地域への自動運転型デマンド公共交通システムの導入に向けて、デマンドモデルの構築と、エリア分割による各ケースの利便性、採算性といった総合的な評価方法の検討を行う。対象地域は、全国の中でも高齢化の進行や公共交通サービスレベルの低下が深刻な北海道大樹町とする。適用には、顧客の利便性に着目したデマンドモデルを構築し、分割された大樹町の各サービスエリアの配車計画を解く。エリア分割には、

分割数を変化させた 3 ケースを検討することで、最適な運行計画を検討する。最後に、各ケースの結果と、運行計画の評価手法について示す。

2. 既往研究の整理

デマンド交通の配車問題を扱う研究には、計算手法やゾーニングに着目した論文が多く蓄積されている。

山田ら²⁾は需要分布がデマンド交通の輸送効率に与える影響を明らかにし、需要のグルーピングが輸送効率を向上させる一方で、利用者への配慮が必要になると示した。Wei ら³⁾はデマンド交通のサービス範囲が分割された際における、需要の各ゾーンへの担当配分に着目し、輸送効率を高める需要配分手法を提案した。境ら⁴⁾はデマンドバスの運用範囲を分割し、面積規模を縮小させることで、走行距離や顧客の所要時間が減少することを示した。

これらの研究では、地域の需要に着目し、需要の扱いに工夫を行うことで運行効率を高める結果を残している。しかし、運行効率を高める際、顧客の不便さの総量を最小化するため、顧客の利便性に偏りが生じる可能性がある。そのため、本研究では、顧客間で不便さの偏りが平均化される手法を検討する。配車計画には、先行研究⁵⁾におけるデマンドモデルを改良して使用する。

先行研究モデルでは、顧客の希望内容が出発地と目的地、目的地への希望到着時刻に限られ、アルゴリズム上の問題から顧客の利便性を損う可能性が存在した。本研究では、顧客の希望内容に希望時刻を加え、アルゴリズムの修正により、顧客の利便性が高い状態の解が導出されるようにする。さらに、地域の移動需要を分析し、デマンドサービス形態の変化による、運行効率、顧客の利便性への影響を把握する。

3. 配車計画モデルの構築

(1) 前提条件

本研究では、自動運転型デマンド交通による公共交通システムを想定する。サービス内容は、顧客が希望出発地と目的地、出発地からの希望出発時刻または目的地への希望到着時刻を前日までに予約し、その内容をシステムが管理することで最適な送迎ルートを作成する。その際、顧客の送迎時刻が決定され、自動運転型デマンド交通車両によって送迎が行われる。

最適な送迎経路を求めるには、複数の目的を持つ DARP (Dial-A-Ride-Problem) を解く必要がある。最適な経路に求められる条件は、出発地から目的地までの余分な乗車時間が短く、実際の送迎時刻と希望時刻の差が小さ

くなることである。しかし、この条件では、顧客の時間違反を最小化する際に、1 人の顧客に偏った不便さを与える可能性がある。そのため、本研究では、顧客の利便性の差が小さくなるように留意する。

(2) モデルの定式化

本研究では、DARP を解くためのモデルを構築する。定式化と制約条件を以下に示す。

$$t_i = b_i - a_i \quad (1)$$

$$e_i = t_i - d_i \quad (2)$$

顧客 i の希望が希望時刻の場合、 $E_i = 0$

$$L_i = a_i - A_i \quad (3)$$

顧客 i の希望が到着時刻の場合、 $L_i = 0$

$$E_i = B_i - b_i \quad (4)$$

$$\min \sum_{m=1}^M PC^m = w_1 \cdot x^m + w_2 \cdot \sum_{i=1}^I e_i + w_3 \cdot \sum_{i=1}^I L_i + w_4 \cdot \sum_{i=1}^I E_i + w_5 \cdot \sigma_e \cdot I + w_6 \cdot \sigma_L \cdot n_L + w_7 \cdot \sigma_E \cdot n_E \quad (5)$$

制約条件

$$a_i < b_i \quad (6)$$

$$f^m < R^m \quad (7)$$

$$a_i \geq A_i \quad (8)$$

$$B_i \geq b_i \quad (9)$$

ただし、

$m = \{1, \dots, M\}$: 車両のサフィックス

$i = \{1, \dots, I\}$: 顧客のサフィックス

a_i : 顧客 i の出発時刻

b_i : 顧客 i の到着時刻

A_i : 顧客 i の希望出発時刻

B_i : 顧客 i の希望到着時刻

d_i : 顧客 i の最小乗車時間

x^m : 車両 m の走行距離

σ_e : 超過乗車時間の標準偏差

σ_L : 希望出発時刻に対する遅発の標準偏差

σ_E : 希望到着時刻に対する早着の標準偏差

n_L : 車両 m の出発時刻希望者数

n_E : 車両 m の到着時刻希望者数

p^m : 車両 m の総乗車人数

R^m : 車両 m の最大同時乗車可能人数

f^m : 車両 m の最大同時乗車人数

$$C_i^m = \begin{cases} 1, & \text{顧客 } i \text{ を車両 } m \text{ で送迎を行う} \\ 0, & \text{顧客 } i \text{ を車両 } m \text{ で送迎しない} \end{cases}$$

評価パラメータ、

w_1 : 車両の走行距離パラメータ

w_2 : 超過乗車時間パラメータ

- w_3 : 希望出発時刻に対する遅発パラメータ
- w_4 : 希望到着時刻に対する早着パラメータ
- w_5 : 超過乗車時間の標準偏差パラメータ
- w_6 : 希望出発時刻に対する遅発の標準偏差パラメータ
- w_7 : 希望到着時刻に対する早着の標準偏差パラメータ

顧客の乗車時間 t_i は、出発時刻 a_i と到着時刻 b_i の差であり、式(1)で表される。顧客が目的地まで寄り道をせずに送迎された時間を最短の乗車時間 d_i とし、実際の乗車時間との差を超過乗車時間 e_i とする。

送迎コストは式(5)で表され、走行距離が短く、顧客にとっての不便さが最小であるほど最適な送迎経路と考える。コストは多目的関数で表され、各目的に重みづけを行う評価パラメータ w_i を与える。第1項は車両の総走行距離を表し、経路の最短化を図る。第2項は超過乗車時間を表し、顧客を最短経路で送迎した場合の乗車時間と実際の乗車時間の差である。第3項と第4項は、それぞれ遅発と早着によるコストを表し、希望時刻と実際の時刻の差によって表現される。第5~7項は、第2~4項の各項目における標準偏差を表し、顧客間で不便さの偏りを最小化する。

送迎コストの最適化では、式(6)から式(9)の制約を満たす。式(6)は車両が出発地を訪れた後に目的地に向かうことを示し、式(7)は車両の乗車人数が、車両容量を超えないように定義している。

本研究における時間制約は、顧客が希望出発時刻と希望到着時刻のいずれを選ぶかによって変化する。出発地からの希望出発時刻を選んだ場合は、希望出発時刻より実際の出発時刻が早まらないことを式(8)で示す。目的地への希望到着時刻を選んだ場合は、実際の到着時刻が希望到着時刻より遅くならないことを式(9)に示す。また、希望出発時刻に対する遅発と希望到着時刻に対する早着は、最小化されるものとする。

(4) 解法

モデルの計算を行うために、車両分担の最適化にはGA（遺伝的アルゴリズム）、送迎経路の最適化にSA（焼きなまし法）を使用する。はじめに、車両が送迎を行う顧客を「1」、送迎を行わない顧客を「0」とする。

図-1のように「0, 1」で染色体を作成する。図-1における車両①は、顧客No.1, 4, 5を送迎することを示す。

車両①の各顧客の出発地と目的地を巡る順番は、SAによって2-optを繰り返し、式(5)で算出される送迎コストが最も低い経路に決定される。GAでは、式(5)によって得られた送迎コストが低い個体ほど優れた個体とする。

顧客No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
車両①	1	0	0	1	1	0	0	0	0
車両②	0	1	0	0	0	1	1	0	0
車両③	0	0	1	0	0	0	0	1	1

図-1 個体の表現例

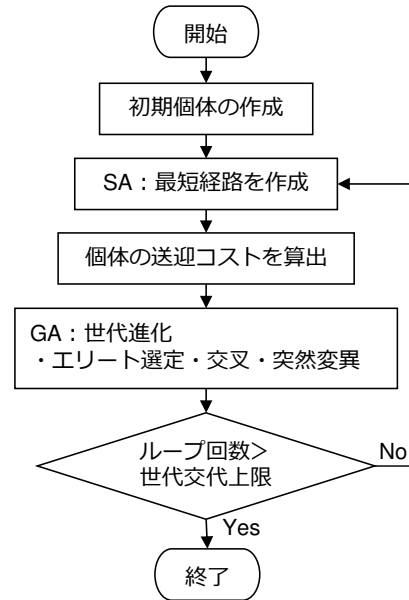


図-2 解探索のフロー

4. 大樹町への適用

(1) 大樹町の需要

本研究の対象地域は北海道南西に位置する大樹町である。2015年において、総人口は5,738人、人口密度は7.0人/km²、人口増減率は-4.0%、高齢化率は33.9%⁹⁾と、高齢化と過疎化が深刻な地域である。大樹町は酪農者が多いため、生産空間としての機能を有している。しかし、酪農業は土地面積を大きく要するため、地域構造は散居型であり、人口減少から低密度化が進み、公共交通の利便性が低下している。

大樹町の需要データは信夫ら⁷⁾の研究において生成された2030年の将来予測交通需要に関する1日のODデータのうち、デマンド交通または送迎によって移動するODを用いる。配車サービスは大樹町内の需要を対象とし、送迎範囲も大樹町内に限定する。モデル内における大樹町は、人口が存在する244の4次メッシュで構成される。配車の拠点は、大樹町の中心に位置する道の駅「コスモール大樹」とする。送迎サービスはドア to ドアを想定するが、本研究では4次メッシュの中心点を発着地とすることで、大樹町の需要を簡易的に扱う。

需要における傾向を把握するために、OD を空間的に表現する。図-3 は、メッシュ別にトリップ発生数を表したものであり、大樹町の中心で多くトリップが発生し、周辺は発生数が低く散布的であることがわかる。

図-4 は、メッシュ間の OD 分布であり、大樹町内の移動の多くが町の中心に偏っていることが確認できる。また、図-5 にトリップ発生数を時間帯別に表現する。通勤・通学時間帯である 8 時台に最も集中し、次いで、10 時台、16 時台が多くなっている。大樹町の需要は、空間的かつ時間的に偏った傾向を持つ。

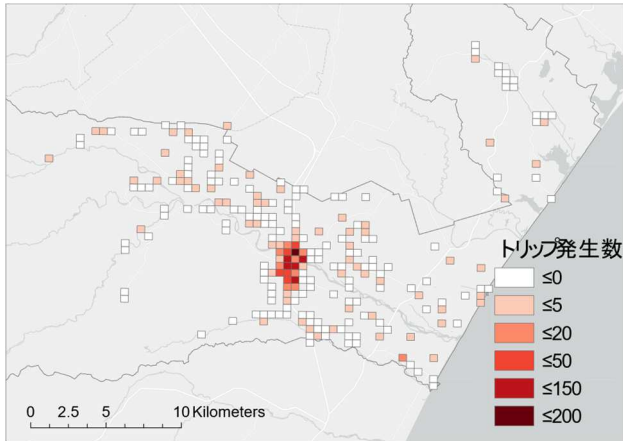


図-3 大樹町のトリップ発生分布

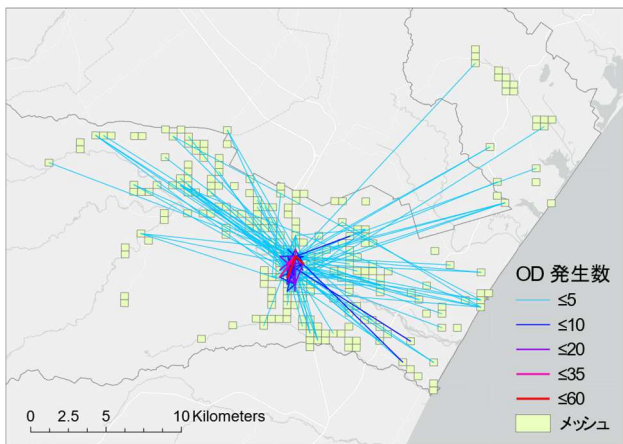


図-4 大樹町の OD 分布

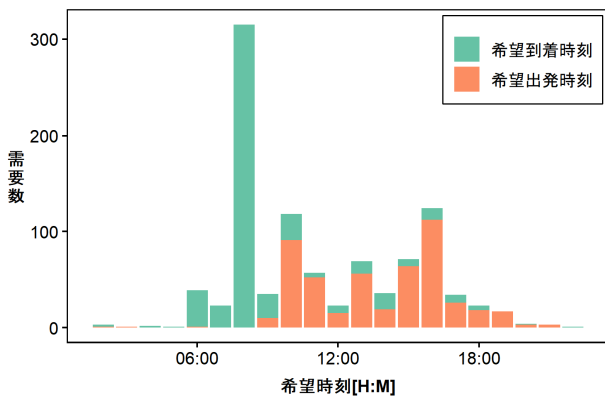


図-5 大樹町の時間帯別需要数

(2) エリア分割

本研究では、大樹町を 3~5 分割のデマンドサービスエリアに分け、計 3 ケースの運行計画を検討する。大樹町のデマンドサービスエリアの分割パターンを図-6~図-8に示す。ケース 1 は、中心に位置するエリアと、東西に両断された 2 つのエリアで構成される(図-6)。ケース 2 は、ケース 1 における東側を南北に両断した 4 つのエリ

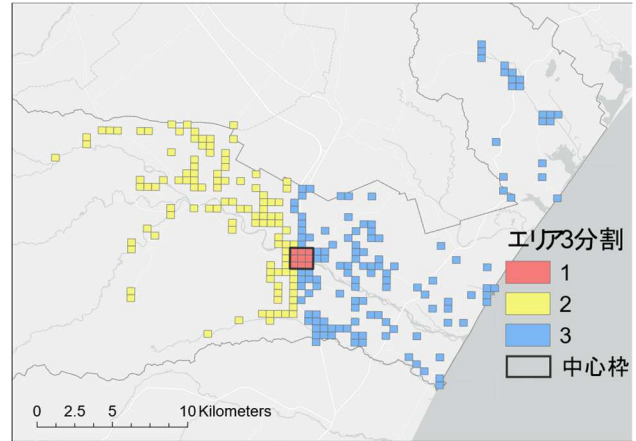


図-6 ケース 1 : エリア 3 分割

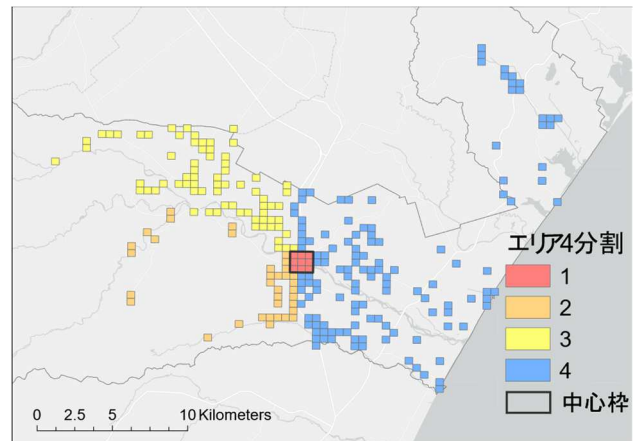


図-7 ケース 2 : エリア 4 分割

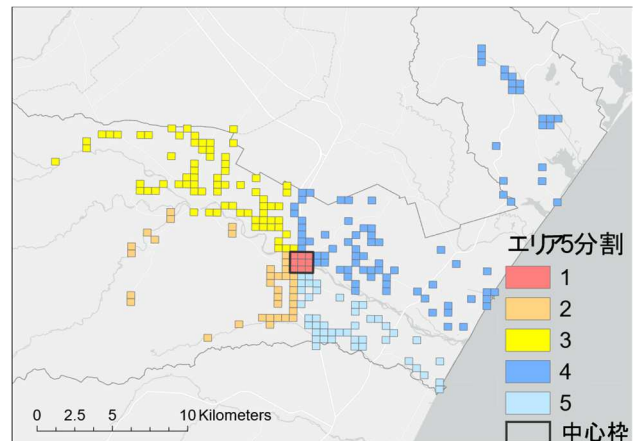


図-8 ケース 3 : エリア 5 分割

アで構成される(図-7). ケース 3 は, ケース 2 における西側を南北に分けた5つのエリアで構成される(図-8).

大樹町を分割した際に, 特に需要が集中している道の駅「コスモール大樹」周辺の市街地エリアを中心エリアと定義し, 需要の密度が低く, 分散的な他のエリアを郊外エリアとする. したがって, 各エリア分割においては, エリア 1 が中心エリア, 周囲のエリアが郊外エリアとして定義される. また, エリアをまたぐ運行は, 需要が多い中心エリアを発着地とする場合は可能とし, 移動需要が少ない郊外エリア間の場合は不可とする. 運行の可否について詳細を表-1に示す.

表-1 エリア間の運行可否

出発地	目的地	運行可否
中心エリア	同じエリア内	○
	郊外エリア	○
郊外エリア	同じエリア内	○
	中心エリア	○
	他の郊外エリア	×

(3) パラメータの設定

式(5)を使用した最適化の過程において, 走行距離や顧客の不便さに関する各項目はトレードオフ関係にある. これらの項目を比較するには単位が異なるため, 各項目を貨幣換算し, 単位を統一する. 走行距離は日本バス協会が公表する日本のバス事業⁹⁾から, 走行キロ単位あたりの燃料油脂費, その他諸経費など走行費用にあたる項目を使用する. 超過乗車時間や希望時刻の違反など顧客の不便さに関する項目は, 顧客の時間損失に繋がると考える. そのため, 毎月勤労統計調査地方調査⁹⁾から, 北海道における勤労者の所得を労働時間で除した単位時間あたりの価値を使用する. 各パラメータ値を表-2に示す.

表-2 評価パラメータ

項目	値	単位
w ₁ 車両の走行距離	206.1	円/km
w ₂ 超過乗車時間	34.4	円/分
w ₃ 希望出発時刻に対する遅発		
w ₄ 希望到着時刻に対する早着		
w ₅ 超過乗車時間の標準偏差		
w ₆ 希望出発時刻に対する遅発の標準偏差		
w ₇ 希望到着時刻に対する早着の標準偏差		

(4) 結果

3 ケースをデマンドモデルで解いた結果を以下に示す. 図-9~図-11は, 各ケースにおける顧客の希望時刻対

する違反時間と超過乗車時間を, 希望時刻帯別に表している. 表-3は, 車両の走行距離や違反時間, 需要の捕捉率などをケース別に示している.

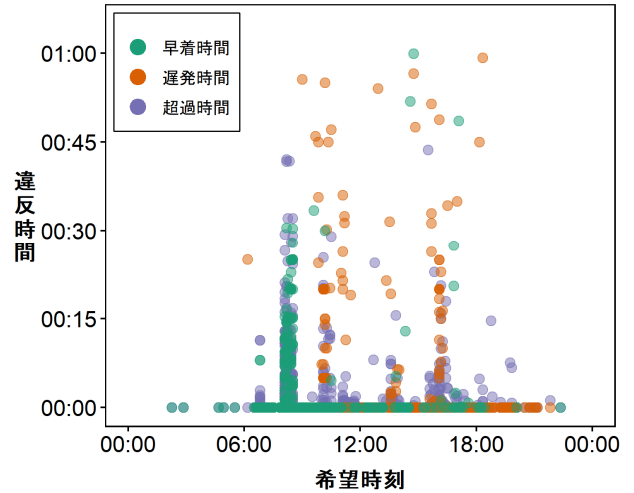


図-9 ケース 1: 希望時刻と違反時刻の分布

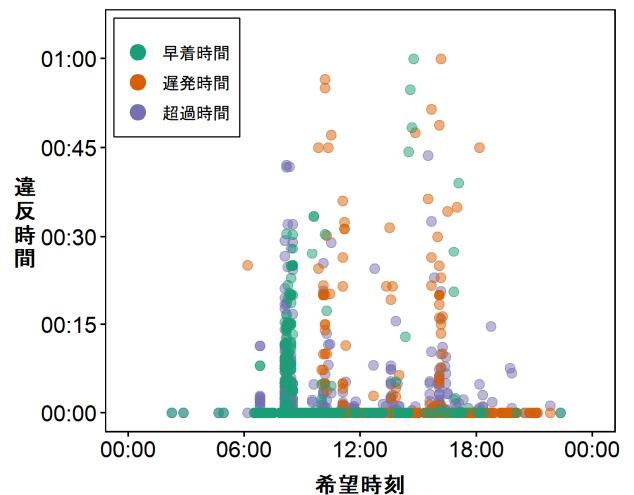


図-10 ケース 2: 希望時刻と違反時刻の分布

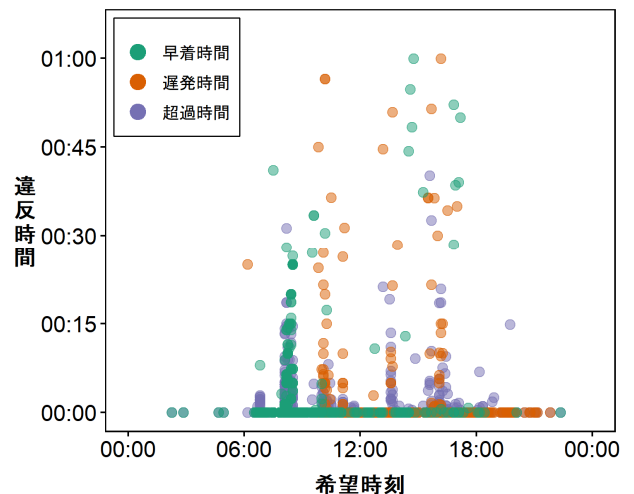


図-11 ケース 3: 希望時刻と違反時刻の分布

表-3 各ケースの結果

ケース	1	2	3
総走行距離 [km]	3958.9	3723.3	3385.5
超過時間の合計	36:52:34	30:48:04	18:22:58
遅発時間の合計	29:35:18	26:26:37	18:54:16
早着時間の合計	31:47:55	36:02:12	29:38:12
超過時間の平均	0:02:28	0:02:05	0:01:16
遅発時間の平均	0:04:09	0:03:44	0:02:44
早着時間の平均	0:04:06	0:04:39	0:03:52
超過時間の標準偏差	0:05:31	0:05:20	0:03:27
遅発時間の標準偏差	0:10:57	0:10:09	0:08:58
早着時間の標準偏差	0:07:31	0:08:21	0:08:47
車両台数 [台]	50	50	50
需要捕捉率 [%]	88.4	88.0	86.5

表-3 において各ケースを比較した場合、エリア分割が増えるほど各値が改善されている。しかし、需要捕捉率も減少するため、エリア分割による効果だけでなく、郊外間エリア運行をキャンセルし、対応する需要が減ったことによる影響も含まれる。また、早着時間に関する項目において、値が悪化する箇所が見られる。ケース 2 で悪化し、ケース 3 でケース 1 以上に改善される箇所もあるため、解探索における挙動の不安定さが原因と考えられる。

図-9～図-11 の分布図において、10時～17時の違反時間が散布的であり、違反時間の差が大きい。顧客間の利便性に偏りが生じている可能性がある。表-3 の各標準偏差は小さい値を示すが、希望時間帯によってばらつきに差があり、16 時台が全てのケースにおいて最もばらつく傾向にある。16 時台は需要が最も集中する 8 時台よりもばらつくため、需要数よりも、トリップの OD 位置が原因になっていると考えられる。本研究では、顧客間の利便性を平均化するために、違反時間の標準偏差をコストに考慮しており、評価パラメータは時間価値を使用している。しかし、標準偏差はばらつきを表す値のため、標準偏差に対するパラメータを再検討する必要があると考えられる。

5. 評価方法

本研究で検討した 3 ケースの比較には、サービスを受ける需要者と、サービスを提供する供給者の 2 者の視点から評価する必要がある。本章では、結果の値を使用した評価方法の構築について説明する。

4 章の結果は、解探索において使用した項目を示しており、その多くが利便性の評価を目的とした時間に関連するコストや走行距離等である。これらの項目では、デマンドサービスの採算性といった供給者の視点からケースを評価することができない。

そのため、1 トリップあたりの利用価格を設定した場合に求められる運賃収入、車両の運行費用や人件費等の支出を走行距離や利用者人数から算出し、収支を求める必要がある。しかし、超過乗車時間といった顧客の損失時間が小さく、採算性に優れた場合であっても、地域の限られた需要にしか対応できないサービスは、利便性が高いとは考えにくい。公共交通手段として機能するには、地域の広い需要に対応し、利便性と採算性の双方に優れる必要がある。

そこで、地域に適したデマンドサービスの料金設定を行うとともに、自動運転型デマンド車両にかかる費用を、類似事例や実証実験を基に推計し、採算性について評価する。利便性については、顧客がデマンドサービスを利用する際に発生する所要時間を時間損失と捉え、貨幣換算によって顧客が負担する不便さを明らかにする。地域需要の捕捉率については、現存する路線バスによる輸送量を、自動運転型デマンド交通による輸送量が上回ることを確認する必要がある。大樹町における適用事例について、以上の評価方法を検討し、その妥当性について検証する予定である。

6. おわりに

本研究は、北海道大樹町を対象に自動運転型デマンド交通システムの導入に関する、デマンドモデルの構築とエリア分割によるケース間比較、評価方法の検討を行った。

結果として、エリア分割による顧客の利便性、運行効率の改善効果を示した。しかし、効果の要因には、需要数が減少したことも含まれるため、さらなる考察が求められる。また、解探索において挙動を安定させることが必要なため、GA と SA における適切なパラメータ値を検討する。5 章で示した自動運転型デマンド交通システムの具体的な評価手法や、デマンドモデルの改良については、今後の課題とする。

謝辞：本研究は国土交通省新道路会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の助成を受け実施しました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 30 年度乗合バス事業の収支状況について 経営収支, 2019.
- 2) 山田稔, 塩濱慶之：地域内の需要分布特性と DRT 運行方式が輸送効率に及ぼす影響, 土木学会論文集 D3, Vol.69, No.5, 2013.
- 3) Wei Lu, Chung-Wei Shen, and Luca Quadrifoglio. : Innovative Operating Strategies for Paratransit Services with Zoning, Transportation Research Record: Journal of

- the Transportation Research Board. JAN., Vol 2469, Issue 1, pp.120-128, 2014.
- 4) 境周平, 若林竜太, 内村圭一: デマンドバスの運用面積に関する考察, 情報処理学会研究報告高度交通システム, 第 83 号, pp.19-24, 2000.
 - 5) 大勝友貴, 杉木直, 松田真宜, 松尾幸二郎: デマンド型自動運転公共交通システムのための配車計画モデルの検討, 第 60 回土木計画学研究発表会・講演集, 2019.
 - 6) 日本医師会, 地域医療情報サイト (<http://jmap.jp/cities/detail/city/1641>). 2020/09/26. (2020. 10. 2 受付)
 - 7) 信夫 柁人, 杉木直, 松尾幸二郎: 交通行動の相互依存性を考慮したアクティビティベースモデルによる自動運転型地域公共交通システム導入の評価, 第 60 回土木計画学研究発表会・講演集, 2019.
 - 8) 公益社団法人日本バス協会: 2019 年度版日本のバス事業, 2020.
 - 9) 厚生労働省: 毎月勤労統計調査地方調査 令和元年平均分結果概要, 2020.

Examination and Evaluation of Demand Responsive Autonomous Driving Public Transportation System by Vehicle Allocation Planning Model

Yuki DAIKATSU, Nao SUGIKI, Masanori MATSUDA and Kojiro MATSUO