

デマンドバスを用いた協調型交通システムにおける 経路計画手法の検討

上原 和樹^{1,a)} 赤嶺 有平² 當間 愛晃² 根路銘 もえ子³ 遠藤 聡志²

概要：地方都市郊外においては、公共交通機関の利便性が低いため自家用車が多く利用される。特に、通勤時間は郊外から都心部に向けての交通需要が高まり、都心部の周辺道路において交通渋滞が多く発生する。このような問題に対し、公共交通機関の利便性を高めて公共交通利用者の増加を促すことが求められる。本稿では、筆者らが提案した協調型デマンドバスシステムにおける有効な経路計画手法について検討する。また、実都市における道路ネットワーク及びパーソントリップ調査を用いたシミュレーション実験により評価を行う。

1. はじめに

交通渋滞は全国各地で発生する重大な社会問題であり、経済損失に加えて騒音やCO₂排出などの環境問題を引き起こす要因となっている。地方都市郊外においては、軌道交通などが十分に供給されないため陸上移動の大部分は道路に依存している。そのため、通勤時や退勤時のような地域間を接続する道路の需要が急激に高まる時間帯には渋滞が慢性化しており、深刻な問題となっている。交通渋滞緩和策の一つとして、公共交通機関の利用を促進し自家用車の利用を抑える方法があげられる。一般に、公共交通機関の利用を促進するためには自家用車による移動に比べて公共交通機関による移動の利便性が高い必要がある。しかし、地方都市郊外においては近くにバス停や駅がない、利用したい時間帯に運行していないなどの理由により利便性が低く、自家用車が多く利用されているのが現状である。これは、地方都市郊外における交通需要が空間的に分散していることで公共交通機関の収益性が悪く、交通手段を十分に供給できていないことが原因だと考えられる。このような現状の中、デマンドバスが有効な交通手段として注目されている。デマンドバスは、利用者のデマンド（希望した乗

降位置、時間）に応じて経路やスケジュールを柔軟に作成・変更できるバスの運行形態であり、デマンド発生地点及び発生時のみ走行することができるため運行の効率化が望める。さらに、近年ではスマートフォンやカーナビゲーションシステムなどの情報端末も多く普及しており、これらの端末から得られる情報（渋滞情報やリアルタイム予約）を活用したデマンドバス配車戦略や経路作成などへの応用も期待できる。

筆者らは地方都市郊外における公共交通機関の利便性を改善・向上するため、デマンドバスを用いた協調型交通システムを提案している [1]。提案システムは、地方都市郊外から都心部へ向けたデマンドに対して、複数のデマンドバスを用いて地方都市郊外のデマンドを集約し、LRT(Light Rail Transit) や基幹バスといった大型車両への乗り継ぎを協調的に達成する交通システムである。デマンドバスを階層的に他の輸送機関と組み合わせることでそれぞれの利用範囲を限定し、車両を効率よく運行できると考えられる。さらに、乗り継ぎによりデマンドが集約されるため、経路生成の難しさのある程度緩和することができる。

本稿では、提案システムのデマンドバスにおける有効な経路計画手法について検討する。また、有効性を評価するため、実データを用いたシミュレーション実験を行う。対象地域モデルは、交通渋滞が深刻な社会問題となっている沖縄県那覇市及びその通勤圏をモデルに作成した。沖縄県は軌道交通がほとんどないため、都心部における渋滞が深刻な問題となっており、交通渋滞の緩和策が強く求められている。県民一人あたりの渋滞損失額は全国4位となっており、那覇都市圏の混雑時平均旅行速度は、大都市以下となっている。また、バス路線が不便なため利用率が低く、

¹ 琉球大学 大学院理工学研究科
Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyus

² 琉球大学 工学部
Faculty of Engineering, University of the Ryukyus

³ 沖縄国際大学 経済学部
Department of Economics, Okinawa International University

^{†1} 現在、情報処理大学
Presently with Johoshori University

^{a)} e065709@eva.ie.u-ryukyu.ac.jp

県民の62%が自動車通勤である。さらに、車両1台あたりの道路面積が全国平均の約半分である上、依然として車両台数は増加傾向にある。そのため、常に道路整備が追いつかない状況にあり公共交通機関の利便性向上によるモーダルシフトが望まれる。一方、島根県のため県外からの車両の流入がなく、大都市圏より交通網の規模が小さいためシミュレーション実験に適している。

2. 関連研究

デマンドバスに関する研究は、スケジューリングアルゴリズムに関するものや実際に運用した際の影響や効果を評価するシミュレーション、実証実験など様々である。

デマンドバスのスケジューリングはDial-a-Ride問題(DARP)に分類[2]されており、現実的な時間で最適解を求めることが困難であるため、短時間で準最適解を得るアルゴリズムが多く提案されてきた[3], [4]。Jawら[5]はタイムウィンドウの制約を用いて、複数台車両における挿入法を提案した。挿入法は様々な解法の中でも計算効率が高く、この手法を用いた応用などもよくなされている[6], [7]。これらの応用においては解の精度(利用車両数、旅行距離)が改善したものの、それに応じて計算コストが大きくなることも報告されている。

運用における評価や導入検証に関する研究として、野田ら[8]は、都市においてデマンドバスの運行を適用した場合の運行規模や採算性に関して固定路線バスとの比較をシミュレーション実験により示した。これより、デマンド頻度とバス台数が一定比率で比例する場合、デマンド頻度が高いほどデマンドバスの方が固定路線バスより利便性が高くなるとし、都市における運行規模の大きなデマンドバス運用の可能性を示した。小柴ら[9]は、中規模都市におけるデマンドバスの実運用に焦点をあて、オープンソースを用いて物理的な側面を考慮しながら北海道函館市を対象にデマンドバスのシミュレーションを行った。その結果、デマンド数の上昇に従い、渋滞に起因して利便性が悪化するという野田ら[8]のシミュレーションとは異なる結果を示し、交通の物理面を考慮することの重要性を示した。坪内ら[10]は、自治体担当者とシステム管理者が互いに長所を活かして効率的にシミュレーションできる枠組みを示し、そのシステムを用いたシミュレーションと実証実験との比較を行い提案システムを評価した。

本研究と類似したデマンドバスと他の交通を連携させた研究として、内村ら[11]の提案する階層的な公共交通システムが挙げられる。内村らは、最も下層のレベルにおいてコミュニティ内の移動手段を確保するためにデマンドバスを用いるとし、デマンドバスの経路計画に遺伝的アルゴリズムを用いることで良好な経路が得られることを示したが、デマンドバスと他の交通機関との連携についての評価は行われていない。また、シミュレーションの規模も比較

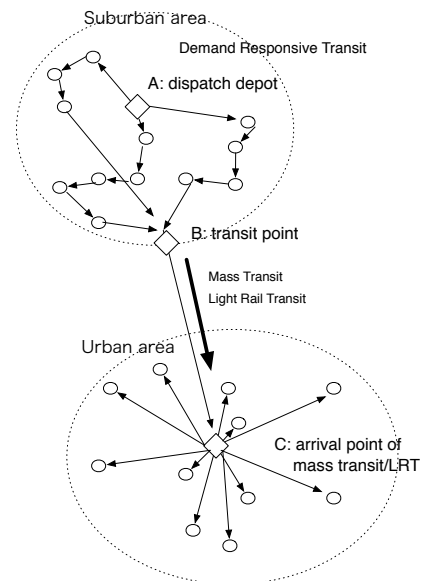


図1 提案手法イメージ

Fig. 1 The simple image of proposed system

的小規模であり、このような交通システムの効果については不明である。

本稿では、提案システムに有効なデマンドバスの経路計画アルゴリズムについて検討し、システムの連携まで含めて評価を行う。

3. 提案システム概要

本節では、提案システム[1]の概要について述べる。筆者らの提案するシステムは、デマンドバスと大型車両の連携によりアクセス性及び輸送効率を高めることに焦点を当てている。具体的には、地方都市郊外の地域では出発地点までシステム利用者を迎えることで提案交通システムへのアクセス性を高め、大型車両によって多くの乗客を一度に輸送することで道路の利用需要を抑えることができると考えられる。

提案システムの概要を図1に示す。ここで、説明を簡単にするため出勤時のみについて述べる。まず、都市郊外におけるデマンドは郊外地域に配置されたデポ(図1:A)を起点とするデマンドバスによって集約された後に乗り継ぎ地点(図1:B)へと輸送される。乗客は、乗り継ぎ地点から大型の基幹バスやLRTなど(以下、大型車両とする)によって都心部(図1:C)に輸送される。ただし、都心部においては公共交通機関が充実しており、都心部内は自由に移動できる状況を想定している。

サービスの提供方法として、利用者が事前に出発地、目的地、希望到着時刻といったデマンド情報を入力することを想定している。システム運営側は集まったデマンド情報に基づいてバスの経路と乗客の割り当てを行い、求めた経路から各乗客の出発時刻を算出して通知する。一般的なデマンドの処理方式は、主にバッチ方式とリアルタイム方式

とに分けることができるが、本手法は通勤時に焦点を当てておりリアルタイム性を要するケースは少ないと考えられることから、バッチ方式を採用する。これにより全体のデマンドを考慮した上でより有効な経路設計及びスケジューリングが可能になると考えられる。

3.1 デマンドバス経路計画

提案システムにおいて、デマンドバスの乗客は乗り継ぎのため各地域ごとで一箇所に集約される。そのため、通常のデマンドバスと比較して降車について考慮する必要がなく、車両配送問題 (Vehicle Routing Problem, VRP)[12], [13] のためのアルゴリズムを適用することができる。本稿では、提案システムに適用する経路計画手法として以下の三つのアルゴリズムを検討した。

- ベクトルクラスタリング [1]
- ベクトルクラスタリング + VRP アルゴリズム
- ADARTW[5]

以下、各アルゴリズムの概要を述べる。

3.1.1 ベクトルクラスタリング

ベクトルクラスタリングは、地方都市郊外におけるデマンドを出発地点ごとに分類し、その分類結果ごとに経路を作成する。乗り継ぎデポから各デマンドへの乗車地点及び希望到着時刻に基づいた方向ベクトルを算出し、各クラスタの基準ベクトルとの距離に応じて分類する。処理手順は以下の通りである。

- (1) デマンドを到着締切時刻 DL^{*1} の昇順でソートする。
- (2) 郊外地域に配置された出発デポ (図 1:A) から放射状にクラスタリングを行う。
- (3) それぞれのクラスタにおいて、クラスタに属するデマンドをデマンドバスに割り当てる。この時、デマンドの数がバスの定員を超えた場合、もしくは、クラスタに属するデマンドの希望到着時刻が一定時間 WS を超えた場合、利用している車両数が上限に達していなければ新たなバスを追加してデマンドの割り当てを継続する。
- (4) 各デマンドバスに割り当てられたデマンドについて、乗り継ぎデポ (図 1:B) から遠いデマンドから順に出発地点を辿り経路を作成する (図 2)。

3.1.2 VRP アルゴリズム

VRP アルゴリズムとして、貪欲法と近傍探索を適用した。3.1.1 節における処理手順 2 までは同様にクラスタリングを行い、各クラスタ内部において貪欲法による解構築及び近傍探索による最適化を行う。貪欲法による解構築の評価基準は、構築している経路の最終地点からの距離と希望到着時刻の差に基づく以下の式により表現され、評価値の低いデマンドから順に構築する。

*1 希望到着時刻までに目的地へ到着するために、乗り継ぎデポ (図 1:B) に到着できる最も遅い時刻

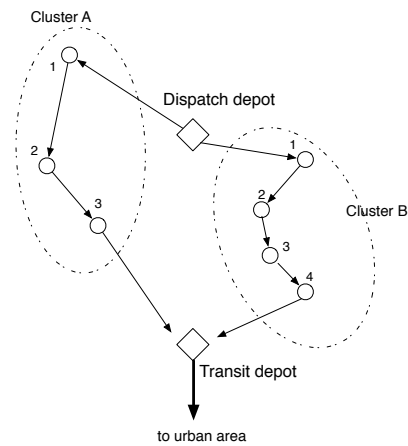


図 2 経路作成手順

Fig. 2 Procedure of route designing

$$E_{ij} = C_1 \cdot D(P_i, P_j)^2 + C_2 \cdot (DAT_i - DAT_j)^2 \quad (1)$$

$D(a, b)$ は a 地点から b 地点までの最短移動時間を表し、 DAT は希望到着時刻を表す。 C_1, C_2 はウェイトである。

近傍探索には、代表的な以下の四つを用いた [14]。

- 2-opt
- or-opt
- route exchange
- route relocate

図 3 はそれぞれの概要を示す。2-opt は同一経路内において、二本のエッジをつなぎ替える。or-opt は、同一の経路内において、ある一人または複数人の乗客の訪問順を入れ替える。route exchange は二つの経路間において乗客の入れ替えを行う。route relocate は二つの経路間において一方の乗客を他方に移し替える。

3.1.3 ADARTW

ADARTW[5] は DARP アルゴリズムの中でも比較的容易に実装でき、計算効率と解の精度が良いため多くの手法で応用されている [6], [7]。本実験では通勤時における地方都市郊外から都心部への移動を対象とするため、比較的多くのデマンドを処理する必要がある。そこで本稿ではこれらの手法の中でも、計算コストの観点から ADARTW による経路生成手法を適用した。ここで、提案システムのデマンドバスはデマンドを乗り継ぎデポへ輸送するため、一時的に降車地点と到着時刻を設定し直す必要がある。

3.2 大型車両スケジューリング

乗り継ぎデポに到着した乗客は、大型車両に乗り継ぐ必要がある。ここで、それぞれのデマンドバスが乗り継ぎデポに到着する時刻に差がある場合大型車両への乗車時刻に時間差が生じる。そのため、同一の大型車両に割り当てられるデマンドバスはできるだけ到着時刻に近い方が望ましい。本研究では、このような時間差をなくすために、同一の大型車両に割り当てられるデマンドバスのスケジュール

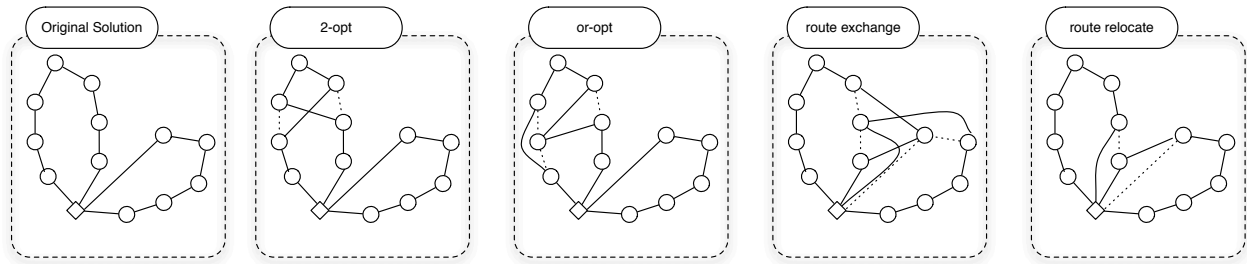


図 3 VRP における近傍探索法
Fig. 3 Local search for the VRP

時刻及びその車両に乗車する乗客の出発時刻を調整する。出発時刻の調整を行った際、利用者の旅行時間が長くなるが、サービスレベルを保証するため Time Window[5]における最早出発時刻 (EPT) よりも出発時刻が早くなる場合は出発時刻を早めず、新たな車両に割り当てる。

具体的には以下のように行う。

- (1) デマンドバスを到着締切時刻 (DL) 順にソートする
- (2) 各デマンドバス $j(j = 1, 2, \dots, M)$ について
 - (a) デマンドバス j を大型車両 l に割り当てる。この時、大型車両 l にデマンドバス j の乗客全てが乗れなければ新たな大型車両にバス j を割り当てる ($l = l + 1$)。また、大型車両 l に割り当てられたデマンドバス j が最初に割り当てられたバスであれば、デマンドバス j の到着締切時刻 DL_j を大型車両の出発時刻とする。
 - (b) 大型車両の出発時刻とデマンドバス j の到着締切時刻 DL_j の差分 dif を求め、デマンドバス j のタイムスケジュールを全て dif だけ早める。
 - (c) デマンドバス j の乗客全員の出発時刻が EPT よりも遅ければ割り当てを行う。そうでなければ割り当てを中止し、新たな車両にデマンドバス j を割り当てる ($l = l + 1$)。

4. シミュレーション実験

それぞれの経路計画手法の有効性について検証するためシミュレーション実験を行った。有効性について評価する際、様々な指標が考えられるが、本稿では利用者の旅行時間と利用した車両台数によりアルゴリズムの有効性を評価する。実験の対象地域は沖縄県中南部とし、パーソントリップ調査報告書 (PT 調査報告書) [15] に基づき通勤時間帯に那覇市外から那覇市へ向かうトリップを用いた。

4.1 実験設定

以下、実験の設定について述べる。

4.1.1 道路モデル

シミュレーションに用いた地域データは、那覇通勤圏の市町村をモデルとして構築した。本論文では、那覇市内へ

表 1 道路網データのパラメータ

Table 1 Specifications of the road model used by the traffic simulation

ノード数	639
リンク数	2006
リンク総延長	376 km

のトリップ数が比較的多いうるま市以南の沖縄本島中南部の市町村を那覇通勤圏と表現している。道路網データは、国土地理院発行の数値地図 1/25000 を基に構築し、道路幅などの情報を基に手作業で通勤に影響が少ないと思われる小路を削除したものを用いた。道路網データのパラメータを表 1 に示す。

4.1.2 OD からの距離補正

トリップの OD はゾーン内のいずれかのノードを出発地・目的地とするため旅行時間が過小評価される傾向がある。特に、郊外ではゾーンが大きく設定されているため、ゾーン内の距離における誤差が大きくなる。そこで、本実験では移動距離を以下の式により推定して補正した。

$$d = k\sqrt{S} \quad (2)$$

ここで、 S はゾーンの面積、 k はゾーン内移動距離の調整係数であり、本実験では $k = 2/\pi$ とした。筆者らは上記の推定移動距離の補正によって OD 間旅行時間の良好な相関が得られることを確認した [16]。

4.1.3 リンク所要時間

道路ネットワーク上の各リンクにおける所要時間は、BPR 関数により推定を行った。リンクにおける推定交通量は利用者均衡配分 [17] に基づく。本稿では、デマンドバスと大型車両が道路ネットワークを利用するため、両者の旅行時間は BPR 関数により算出可能である。また、都心部に到着した乗客はモノレールと徒歩で目的地へ移動することを想定した。モノレールの移動については、道路ネットワークにおける交通量の影響を受けないため、時刻表及び駅間の距離よりそれぞれの駅間を 30km/h で移動するものとした。徒歩での移動については、4.3km/h [19] とした。

4.1.4 シミュレーション条件

デマンドバスの乗車定員は 20 人、乗り継ぎに利用する

大型車両の乗車定員は60人とした。これは、それぞれマイクロバス*2、大型バスを想定した定員である。大型車両の到着地はモノレール駅の中で最も旅行時間が短くなる駅とし、降車地点から目的地へはモノレールを利用して移動するものとする。ここで、モノレールを利用する際、乗り継ぎに待ち時間がかかると考えられ、この待ち時間は時刻表の時刻間隔から平均をとり2.5分とした。対象とするトリップは那覇市外から那覇市へ向かうトリップのうち、ピーク時である午前7時30分から午前8時30分の間に那覇市へ到着するものとし、システムを利用する際に入力として必要となる希望到着時刻は、PT調査マスターデータにおける到着時刻を用いた。車両の出発デポと乗り継ぎデポは同一の地点とし、各デマンドは最も旅行時間が短くなるデポを乗り継ぎデポとして利用する。

4.2 固定路線バスサービスとの置き換え

本節では、PT調査報告書における代表交通手段がバス、すなわち既存の固定路線バス利用者が提案システムを利用した場合を想定したシミュレーション結果を示す。

4.2.1 平均旅行時間

各アルゴリズムにより経路計画を行った提案システムを利用した場合の平均旅行時間を図4に示す。比較を行ったアルゴリズムは、ベクトルクラスタリング [1](Clustering)、ベクトルクラスタリングにより分類後、VRPによる解の構築と最適化 (Clustering + VRP, CVRP), ADARTWの三種類で比較を行った。CVRPに関しては、最適化の際に二種類の評価基準を検討した。一つは経路に改善が合った場合に更新を行う方法、もう一方 (CVRP2) は経路と対象乗客の旅行時間に改善があった場合に更新を行う方法である。グラフ中における Demand bus はデマンドバス車両による旅行時間、Trunk Bus は大型車両による旅行時間をそれぞれ表す。また本実験では、提案システムにおける都心部での移動はモノレールを想定したため、グラフ中にモノレールによる旅行時間 (Monorail) を示した。通常、目的地に希望到着時刻より早く到着した場合は空き時間 (Extra time) が生じる。この空き時間もコストとして考慮するため、乗客の旅行時間は出発地を出発した時刻から希望到着時刻までの時間とした。

結果より、CVRP2が最も旅行時間が短くなった。各ケースにおいて、大型車両、モノレール、歩行時間に差はないが、デマンドバスの移動時間と空き時間においてそれぞれに違いが生じた。

4.2.2 運行コスト

本節では運行コストとして、各ケースにおいて利用された車両台数及び総走行距離をそれぞれ表2、表3にまとめ

*2 公共交通へのアクセス時間を短縮するためには出来る限り出発地点まで迎えられる車両が良く、機動性と乗車人数の観点から本実験ではデマンド交通としてマイクロバスを想定した。

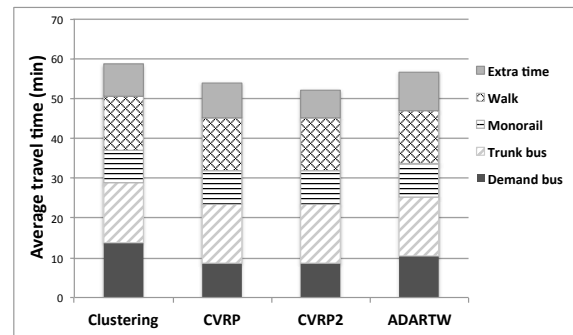


図4 乗客の平均旅行時間 (min)

Fig. 4 Average travel time (min) of passengers

た。表2より、利用した車両台数はADARTWが最も少なく、次いでCVRP、CVRP2が同順となった。総走行距離においても同様にADARTWが最も短い結果となったが、CVRP間においては、経路と旅行時間で最適化を行ったCVRP2の方が短くなった。

4.3 普及に伴う変化

本節では、提案システム利用者が増加 (普及) した場合を想定したシミュレーション結果を示す。対象のトリップは、前節と同様PT調査報告書に基づくが、固定路線バス利用者に限定せず、全てのモードのトリップからランダムで10%、30%、50%、70%を抜き出して試行した。比較には、前節で良い結果を示したCVRP2とADARTWを用いた。

図5は、各手法における利用割合の変化による旅行時間の推移を示す。利用者が少ない場合、CVRP2は旅行時間が長く、利用者の増加に伴い旅行時間が減少する。一方、ADARTWは利用者の割合によらずほぼ同程度の旅行時間で推移していることがわかる。

図6は、各手法における利用割合ごとで利用した車両台数を示す。利用した車両台数はどちらも同程度要していることがわかるが、30%の利用者以降は若干CVRP2が少ない。各車両に着目すると、4.2.2節の結果と同様にCVRP2はADARTWに比べデマンドバスの利用台数が少なく、大型車両の利用台数が多い。

4.4 考察

4.4.1 固定路線バスサービス置き換えに対する考察

平均旅行時間に着目すると、今回比較を行った4手法の内ではクラスタリングを行った上でVRPによる経路生成アルゴリズムを適用した結果が最も良い結果となった。ベクトルによるクラスタリングは方向により分類を行うため、クラスタ内で経路を構築した場合、直線上にある地点の乗客についてのみ経路を考慮することで旅行時間が短くなったと推測される。また、同手法は他のアルゴリズムと比較してデマンドバスの旅行時間、空き時間も短

表 2 利用車両台数

Table 2 The number of used vehicles

	クラスタリング	CVRP	CVRP2	ADARTW
デマンドバス	75	68	69	72
大型車両	61	55	54	34
計	136	123	123	106

表 3 総走行距離 (km)

Table 3 Total traveled distance (km)

	クラスタリング	CVRP	CVRP2	ADARTW
デマンドバス	1208.86	1001.83	953.18	1162.59
大型車両	644.36	582.89	558.98	354.87
計	1853.22	1584.72	1512.16	1517.46

表 4 条件排除時の大型車両割り当て結果

Table 4 The result of vehicle assignment without EPT condition

	CVRP2	ADARTW
旅行時間 (分)	55.13	58.61
デマンドバス	69	71
大型車両	28	27

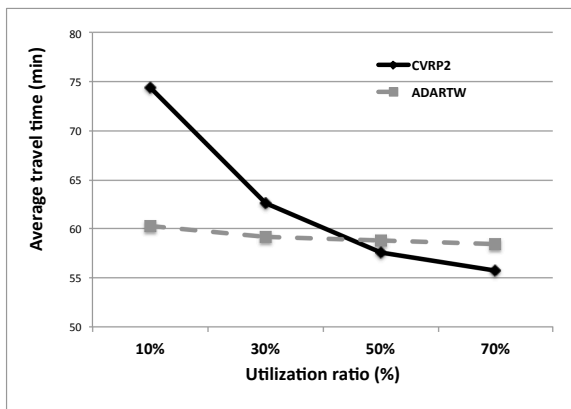


図 5 乗客の平均旅行時間の推移 (min)

Fig. 5 Transition of average travel time (min) of passengers

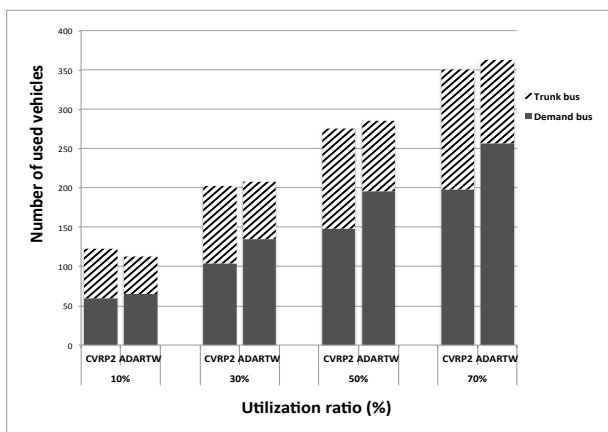


図 6 普及率ごとの利用車両台数 (台)

Fig. 6 Number of used vehicles on each utilization ratio

くなっていることから、効率的に経路計画がなされていると考えられる。一方、利用した車両台数に着目すると、ADARTW が最も少ない結果であった。車両台数の内訳において、CVRP2 は ADARTW と比較してデマンドバスの使用台数が少ない。つまり、郊外地域におけるデマンドバスの経路計画は ADARTW よりも効率よく行えている

が、大型車両への乗り継ぎの際に多くの車両を要していることがわかる。本実験で適用した大型車両割り当ては、デマンドバス単位で行っており、デマンドバス車両内で条件に合わない乗客がいた場合は新たな大型車両が追加されることが原因と考えられる。そこで、大型車両の割り当てアルゴリズムにおける (c) についての条件を排除した際の、CVRP2 と ADARTW の旅行時間、車両使用台数について表 4 にまとめた。

条件を排除した場合、旅行時間は図 4 より若干増加したものの、使用した大型車両の台数が両者とも同程度であることがわかる。これより、大型車両が多くなる要因は、大型車両への配車アルゴリズムにおける EPT に関する条件であるといえる。これについては、車両単位の割り当てではなく到着したデマンドバス車両間で適切な配分が行われるようなアルゴリズムを今後検討する必要がある。

CVRP 間で総走行距離を比較すると、使用した車両台数は同数であったが、総走行距離は CVRP2 が少なくなった。これより、近傍探索による最適化には、CVRP2 に適用した乗客の旅行時間と車両の走行経路双方を評価することが有効である。

4.4.2 普及に関する考察

図 5, 図 6 より、利用者数が少ない場合は ADARTW の方が旅行時間、車両台数ともに有利であることが示された。これは、CVRP はクラスタ内について経路作成を行うため、利用者が少ない場合、クラスタ内のデマンドも比例して少なくなるため、希望到着時刻の離れた乗客同士が一つの車両に割り当てられ易くなると考えられる。しかしな

から、利用者数が増加した場合は CVRP の方が旅行時間、利用者数ともに少ない。本研究で提案するクラスタリングは、デマンドへの方向に対して分類するため、車両の取り得る経路が比較的直線状*3になりやすいことで効率的な経路が作成されたと考えられる。これらの結果より、クラスタリングを用いた経路生成手法は利用者数が少ない場合は効率的ではないものの、利用者数が多い場合は有用であると思われる。今後、利用者が少ない場合の有効な分類手法や利用者数に応じた適切なアルゴリズムの選択方法について検討が必要である。

5. おわりに

本稿では、筆者らの提案した協調型交通システムにおけるデマンドバスの経路計画手法について検討を行った。PT 調査報告書に基づく評価実験においては、クラスタリング後に VRP アルゴリズムを適用した手法が旅行時間について有用であり、また、車両台数についても大型車両への割り当て手法を改善することで同手法が有効であることを示した。今後は、大型車両割り当てアルゴリズムの改善や利用者が少ない場合に有効となるクラスタ分類方法について検討が必要である。

謝辞 本研究は、科研費 若手研究 (B) (26730160) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Uehara, K., Akamine, Y., Toma, N., Nerome, M., and Endo, S.: A Proposal of a Transport System Connecting Demand Responsive Bus with Mass Transit, ICCE-TW, pp143-144 (2014).
- [2] Paepe, W.E., Lenstra, J.K., Sgall, J., et al.: Computer-Aided Complexity Classification of Dial-a-Ride Problems, *INFORMS Journal on Computing* Vol.16, No. 2, pp120-132 (2004).
- [3] Cubillos, C., Rdriguez, N., and Crawford, B.: A Study on Genetic Algorithms for the DARP Problem, *Springer Berlin-Heidelberg LNCS*, vol.4527, pp. 498-507 (2007).
- [4] Cordeau, J.F., and Laporte, G.: The dial-a-ride problem: models and algorithms, *Annals of Operations Research* Vol. 153, No. 1, pp. 29-46 (2007).
- [5] Jaw, J.J., Odoni, A.R., Psarafits H.N. and Wilson, N.H.M.: A Heuristic Algorithm for The Multi-Vehicle Advance Request Dial-a-Ride Problem with Time Windows, *Transportation Research Part B*, Vol. 20, No. 3, pp. 243-257 (1986).
- [6] Diana, M, and Dessouky, M.M.: A new regret insertion heuristic for solving large-scale dial-a-ride problems with time windows, *Transportation Research PartB*, Vol. 38, No. 6, pp539-557 (2004).
- [7] Luo, Y., and Schonfeld, P.: A rejected-reinsertion heuristic for the static Dial-A-Ride Problem, *Transportation Research PartB*, Vol. 41, No. 7, pp736-755 (2007).
- [8] 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, pp242-252 (2008).
- [9] 小柴等, 野田五十樹, 山下倫央, 中島秀之: 実環境を考慮したバスシミュレータ SAVSQUID による実運用に向けたデマンドバスの評価, コンピュータソフトウェア, Vol.31, No.3, pp141-155 (2014).
- [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, TS09-E, pp400-403 (2010).
- [11] 内村圭一, 齊藤隆司, Hiro Takahashi: 公共交通サービスにおける Dial-a-Ride 問題, 電子情報通信学会論文誌 A, J81-A(4), pp599-606 (1998).
- [12] Lau, H.C., Sim, M., and Teo, K.M.: Vehicle routing problem with time windows and a limited number of vehicles, *European Journal of Operational Research*, Vol. 148, No. 3, pp559-569 (2003).
- [13] Kumar, S.N., and Panneerselvam, R.: A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants, *Intelligent Information Management*, Vol.4, No. 3, pp66-74 (2012).
- [14] 永田裕一, 小林重信, 東条敏: 効果的な局所探索制限による Memetic Algorithm の高速化, 人工知能学会論文誌, Vol.25, No.2, pp299-310 (2010).
- [15] 沖縄本島中南部都市圏総合都市交通協議会: 第 3 回沖縄本島中南部都市圏 パーソントリップ調査報告書 (2009).
- [16] 赤嶺有平, 遠藤聡志, 上原和樹, 根路銘もえ子: 時間的交通分散を目指した旅行計画提示手法の提案, 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 1, pp438-447 (2014).
- [17] 土木学会: 道路交通需要予測の理論と適用 (2006).
- [18] バス運行時刻表: 社団法人 沖縄県バス協会 (2006).
- [19] 松本直司, 清田真也, 伊藤美穂: 街路空間特性と歩行速度の関係, 日本建築学会計画系論文集, Vol.74, No.640, pp1371-1377 (2009).

*3 利用者の乗車に伴う迂回が比較的少ない経路