

NAIST-IS-MT1651097

修士論文

徒歩移動を含む
オンデマンドバスルートスケジューリング

政野 博紀

2018 年 2 月 1 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

政野 博紀

審査委員：

伊藤 実 教授	（主指導教員）
藤川 和利 教授	（副指導教官 1）
柴田 直樹 准教授	（副指導教官 2）
Gao Juntao 助教授	（副指導教官 3）

徒歩移動を含む オンデマンドバスルートスケジューリング*

政野 博紀

内容梗概

近年、オンデマンドバスは交通空白地域の移動手段や、自動運転を用いた公共交通として注目を集めている。しかし、デマンドバスはユーザの送迎のために迂回が必要で、現状の多くのデマンドバスで採算性が確保されていない。本研究ではデマンドバス事業者の負担軽減を目的とし、徒歩移動を含むオンデマンドバスのスケジューリングを提案する。従来は1組の乗降するバス停や乗降地点をユーザが選んでいたことに対し、提案手法は他の乗客の予約やバスの現在地に合わせて最適な乗降地点を動的に計算し、乗客の出発地・目的地と乗降地点間の徒歩経路を案内する。これにより、デマンドバスの迂回を削減し、限られた時間制約の範囲内で多くのユーザを輸送することでデマンドバス事業者の収益を増加させる。シミュレーションによる評価実験で従来のフルデマンド式およびセミデマンド式のデマンドバス、タクシーとの事業者収益の比較を行った結果、提案手法は比較対象と同等またはそれ以下のバスの走行で、より多くのユーザを受理することができた。提案手法の収益は、クエリ件数800件に対して塊村や散村の場合平均で、フルデマンド式と比較した場合約33–40%、セミデマンド式と比較した場合約18–100%増加した。

キーワード

デマンドバス, 徒歩移動, 逐次挿入法, DARP, リアルタイム処理

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1651097, 2018年2月1日.

On Demand Bus Route Scheduling with User Walking*

Hiroki Masano

Abstract

On demand bus has been increasingly attractive for many applications, such as transportation in sparsely populated areas and self-driving vehicle based public transport services. However, most on demand bus systems are not good at providing transport services and making profit, due to inefficient detours for picking up and dropping off customers. In this research, we propose a cost-efficient algorithm for on demand bus route scheduling with user walking, which greatly reduces bus detours and increases profit. Different from other on demand bus systems, where customers determine pick-up and drop-off points, our algorithm dynamically determines proper pick-up and drop-off points to reduce detours by considering user queries and bus locations. Customers need to walk to pick-up points from their starting location and walk from drop-off points to their destinations. To verify the effectiveness of our algorithm, we conduct simulations to compare our algorithm with full demand, semi demand and taxi systems. Simulation results show that our algorithm serves more customers with less bus travel distance and time. The average profit of our proposed algorithm is 33–40% higher than that of full demand system and 18–100% higher than that of semi demand system in case of 800 queries in cluster village and dispersed village.

Keywords:

On Demand Bus, Walking, Insertion Method, DARP, Real Time Processing

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651097, February 24, 2018.

目次

図目次	vii
表目次	viii
第 1 章 序論	1
第 2 章 デマンドバスの現状	3
2.1 デマンドバスとは	3
2.2 デマンドバス導入の経緯	4
2.2.1 地方における路線バスの衰退	4
2.2.2 コミュニティバスの代替手段としてのデマンドバス	4
2.3 デマンドバスの分類	5
2.3.1 経路による分類	5
定路線型	6
迂回ルート・エリアデマンド型	6
自由経路ミーティングポイント型	7
自由経路ドアツードア型	7
2.3.2 ダイヤによる分類	7
2.4 デマンドバスの法的位置づけ	8
2.5 導入事例	8
2.5.1 和歌山県みなべ町「みなベコミバス」	8
運行形態	8
利用者数および収支	9
2.5.2 茨城県神栖市「神栖市デマンドタクシー」	9
運行形態	9
利用者数および収支	10
2.5.3 千葉県酒々井町「しすいふれ愛タクシー」	10
運行形態	10
利用者数および収支	10

2.5.4	群馬県前橋市（旧大胡町・宮城村・粕川村）「ふるさとバス」	11
	運行形態	11
	利用者数および収支	11
2.5.5	デマンドバスの課題	11
2.6	デマンドバスの将来像	12
第 3 章	関連研究	14
3.1	デマンドバスのアルゴリズムに関する研究	14
3.2	デマンドバスに関する実証実験	16
3.3	デマンドバスのシミュレーションに関する研究	17
	3.3.1 デマンドバスの採算と利便性に関する研究	17
	3.3.2 徒歩移動を含むライドシェア	19
3.4	本研究の位置づけ	20
第 4 章	問題設定	23
4.1	提案システム概要	23
4.2	想定環境	24
	4.2.1 ユーザに対する仮定	24
	4.2.2 デマンドバスに対する仮定	24
	4.2.3 サーバに対する仮定	25
4.3	問題定義	26
	4.3.1 入力	26
	地図入力	26
	ユーザクエリ	26
	バス車載端末からの入力	28
	4.3.2 出力	29
	4.3.3 制約	30
	4.3.4 目的関数	32
第 5 章	徒歩移動を含むスケジューリング	33
5.1	ユーザの乗降地点候補の算出	35
5.2	バススケジュールの算出	36

5.3	降車地点の調整	41
第 6 章	評価実験	46
6.1	評価項目	46
6.1.1	ユーザの利便性に関する項目	46
6.1.2	バスのスケジューリングに関する項目	46
6.1.3	クエリ棄却率	47
6.1.4	事業者の利益	47
	運賃収入	47
	運行支出	48
6.2	比較手法	49
6.3	実験環境	50
6.3.1	道路の設定	50
	地図の特徴	52
	制限速度の設定	52
	駅および営業所の設定	52
	バス停の設定	53
	エッジ上の代表点	53
6.3.2	クエリの設定	53
6.3.3	シミュレータ	54
6.3.4	パラメータ	54
6.4	クエリ件数を固定した場合の実験結果および考察	56
6.4.1	待ち時間および徒歩移動時間	56
6.4.2	提案手法におけるユーザの旅行時間	57
6.4.3	クエリ棄却率および収益	60
6.4.4	バス走行距離および走行時間	63
6.4.5	平均乗車人数	65
6.4.6	収益と利便性の関係性について	67
6.4.7	提案手法の計算時間	67
6.5	クエリ件数を変化させた場合の実験結果および考察	69

第 7 章 総括	74
謝辞	76
参考文献	77

図目次

2.1	デマンドバスの運行イメージ	3
2.2	大都市部とその他地域における路線バスの経常支出率の推移（国土交通省データより作成）	5
2.3	デマンドバスの経路による分類模式図	6
3.1	ADARTW における時間制約幅	15
3.2	逐次挿入法によるスケジュール挿入例	16
4.1	提案システムの模式図	23
5.1	乗降地点の設定例	37
5.2	降車地点の調整例	43
6.1	実験に用いる地図 赤点:営業所 緑点:駅 青点:バス停	51
6.2	クエリの乗降地点のプロット例	55
6.3	ユーザの待ち時間	58
6.4	ユーザの徒歩移動時間	59
6.5	提案手法におけるユーザの平均旅行時間と平均制約時間	60
6.6	クエリ棄却率	62
6.7	バス事業者の収益	63
6.8	バス走行距離の合計	64
6.9	バス走行時間の合計	65
6.10	平均乗車人数	66
6.11	提案手法の収益と利便性（待ち時間）の比較	68
6.12	提案手法における 1 クエリあたりの平均計算時間	69
6.13	クエリ棄却率（クエリ件数非固定）	70
6.14	バス事業者の収益（クエリ件数非固定）	72
6.15	1 クエリあたりの収益（赤字）額	73

表目次

2.1	デマンドバスのダイヤによる分類	7
3.1	関連研究における仮定および評価方法	21
4.1	地図入力	27
4.2	ユーザクエリ	27
4.3	バス車載器からの入力	29
4.4	出力	30
6.1	地図の詳細	50
6.2	道路のランクと制限速度の対応	53
6.3	パラメータ	56

第 1 章 序論

地方都市の過疎地域では、バスなどの不採算路線が廃止され、ますます公共交通が衰退していく現状にある。地方自治体が住民の移動手段確保のために運行するコミュニティバスも財政負担を招き、その維持が困難になりつつある [1]。これに対し、より効率的なバスの運行形態としてデマンドバスが注目されている。デマンドバスは、定時的な固定ダイヤを持たず、乗客の需要に合わせて動的にダイヤや経路を設計する、より柔軟なバス運行形態である。従来の路線バスやコミュニティバスよりも運行地域を面的に網羅することができるため、交通空白地域の解消を目的にデマンドバスを導入する自治体があるが、依然として運行コストの多くを自治体の財政支出に依存する現状である [2]。このような地域では元々公共交通の利用率が低く、またデマンドバスは通常の固定路線のバスよりも迂回が多くなる。そのため、乗客 1 人あたりの運行コストが大きくなることが考えられ、スケジューリングの効率化が求められる。

従来自治体で実用化されていたデマンドバスの多くがオペレータによる予約の受付と経路設計であったが、近年はコンピュータを用いて自動で予約と経路設計を行うシステムの研究が行われている。デマンドバスの経路設計問題は Dial-A-Ride Problem (DARP) [3] として定式化され、タイムウィンドウを用いて経路設計を行うアルゴリズム、Advanced Dial-A-Ride with Time Windows (ADARTW) が Jaw らにより提案されている [4]。この ADARTW に類似する手法を用いて経路設計を行うデマンドバスシステムの研究および実証実験が行われ、デマンドバスがコンピュータの制御により運行可能であることが実証されている [5][6]。さらに、デマンドバスの効率化についても研究が行われており、デマンドバス同士で乗り換えを行うもの [7] や、デマンドバスを中型バスに集約するもの [8]、乗客をクラスタリングし複数の乗降車地点を 1 つにまとめ徒歩移動を案内するもの [9] などがある。これらの効率化の研究では、需要や車両のリソースがある程度見込める中規模都市以上が想定されており、需要が類似する複数ユーザのグループを形成できることが前提であるが、低需要な場合や車両台数が少ない場合はデマンドバスの効率化手法の有用性が低いことが報告されている。またこれらのクラスタリング手法では、複数ユーザとまとめるために一定時刻までデマンドを蓄積し、デマンドバスの経路設

計を行うバッチ処理型を採用している。

本研究では、ユーザの徒歩移動を含むデマンドバスのスケジューリングを、リアルタイム処理型で行うことを提案する。本提案手法は、システムが提案したバスの迂回が少なくなる地点でユーザは乗降車し、ユーザの出発地・目的地と乗降車地点間は徒歩移動を行う。これにより、バスの細街路への迂回を削減するだけでなく、ユーザの待ち時間の有効活用、乗降車が困難である地点の考慮が可能であると考ええる。本手法はクラスタリングが前提ではなく、トリップが類似するユーザ同士のグループが形成できない場合でも徒歩移動を案内するため、需要が少ない小規模都市を前提とした場合でもある程度のデマンドバスの効率化が可能であると考ええる。また、予約を必要とせずユーザのデマンドがある度にスケジューリングを行うリアルタイム型の処理が可能である。徒歩移動を含むデマンドバスの問題点として、ドアツードアのデマンドバスよりも旅行時間が増大する問題点も存在するが、本手法ではユーザの時間制約と乗合状況に合わせて降車後の徒歩移動の距離を動的に変動させることで、ユーザの旅行時間を調整する手法を取り入れる。

評価実験では小規模都市を想定し、人口 10 万人以下の異なる村落形態を持つ 3 か所の地図を OpenStreetMap[10] から取得のうえ、ミクロ交通流シミュレータ SUMO[11] によってバスと徒歩移動の動きを再現してシミュレートする。バス事業者の支出および運賃収入は政府データをもとに算出し、バス事業者の採算性、クエリ棄却率、バスの走行距離および時間、平均乗車人数およびユーザの利便性について、従来のセミデマンド式とフルデマンド式のオンデマンドバスおよびタクシーとの比較を行う。クエリ件数を 800 件に固定して評価した結果、提案手法のクエリ棄却率はバス台数 5–60 台の平均で 36–58% 程度減少した。また、提案手法の収益は、フルデマンド式に比較すると 3 つの地図の平均で 29–40% 程度増加する結果となった。セミデマンド式に対しては、同手法が比較的良好な結果を示す塊村においても、提案手法は約 18% の増加を示し、散村においては約 100% の増加となった。

また現状のデマンドバス利用者を参考にクエリ件数 50 件に対してバス台数を 5 台と一定の比率で確保した場合の評価では、フルデマンド式でクエリ棄却率が 20% 程度であったことに対し、提案手法のクエリ棄却率は 4% 以下に減少した。収益では従来のフルデマンド式との差異は見られなかったものの、提案手法の受理できたクエリ 1 件あたりの赤字額は 8–20% 程度改善した。

第 2 章 デマンドバスの現状

2.1 デマンドバスとは

デマンドバスとは、予約や需要に応じて運行経路やダイヤ、乗降地点を柔軟に対応する形態のバスである。デマンドバスの模式図を図 2.1 に示す。デマンドバスは、固定経路・ダイヤで多くのユーザが乗り合いする路線バスと、ドアツードアで乗り合いを行わないタクシーの中間にあたる輸送手段で、国内では主に地方都市や過疎地における交通空白地域を中心に運行される。Demand Responsive Transport (DRT) やオンデマンドバス、タクシー車両を用いて乗合運行されることもあることからデマンド乗合タクシーと呼称される場合もあり、それらを総称してデマンド型交通と呼ばれる場合もある。

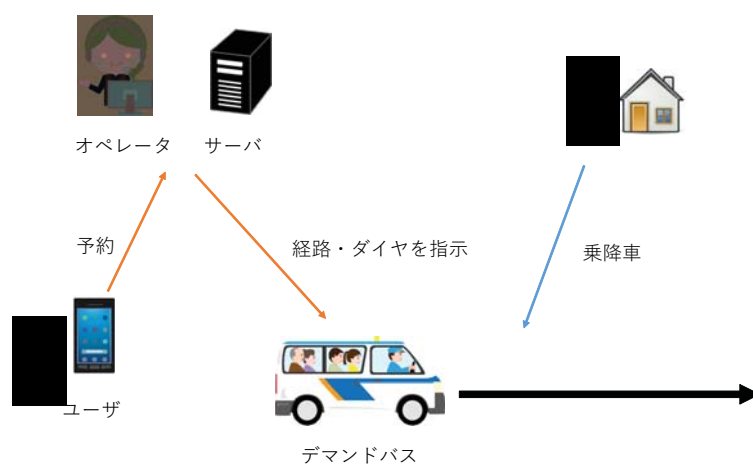


図 2.1: デマンドバスの運行イメージ

デマンドバスの運行形態は路線バスに近い運行形態からタクシーに近い運行形態まで様々であるが、およそその運行の流れは次の通りである。まず、ユーザは電話や web システムを通じて希望乗降車地点（またはバス停）や乗車時刻をもとに予約を行う。予約を受け付けるシステムやオペレータが、経路やユーザを運ぶ順番、運航時刻を決めドライバに指示する。ユーザの需要によって適宜経路やダイヤを対応し、乗合運行を行う。

路線バスとの相違点は、予約がない場合は運行せず「空気バス」を抑止すること

ができる点である。また、経路や乗降地点を柔軟に対応できる運行形態では、路線バスよりも広いエリアをカバーすることができ、交通空白地域の解消や高齢者等バス停までの徒歩移動が困難なユーザへの対応が可能である。

タクシーとの相違点は、乗合運行により低価格な運賃を実現可能である点である。ただしタクシーとの競合問題も発生する場合があることから、完全にドアツードアにするのではなく、乗降地点やエリアを限定して運行する形態がみられる。

2.2 デマンドバス導入の経緯

2.2.1 地方における路線バスの衰退

近年は自家用車の普及が進み、地方都市や山間部の住民にとって自家用車は生活に欠かすことのできない足となった。一方で自家用車の普及は公共交通衰退を招き問題となっている。路線バスの輸送人員は昭和 43 年をピークに半分以下に減少し、近年は横ばい傾向にある [12]。また、バス事業者の財務状況は厳しい状況にある [13]。図 2.2 に大都市部とその他地域におけるバス事業者の経常収支率の推移を示す。大都市部においては近年経常収支率が改善傾向にあるが、その他地域では 10 年以上の長きにわたり経常収支率 100 以下で横ばいになっており、その改善傾向もない。平成 27 年度において、大都市部では 82 のバス事業者のうち 23 事業者が赤字、その他地域においては 166 事業者のうち 138 事業者が赤字となっている。こうしたバス事業者の財務状況は、利用者の少ないバス路線の廃止をまねくと考えられる。

2.2.2 コミュニティバスの代替手段としてのデマンドバス

コミュニティバスは廃止されたバス路線の代替手段や高齢者福祉を目的として、近年導入する自治体が増加している。一方で、元々路線バスを維持するのが困難な地域で運行されることなどから、コミュニティバスの収支率は 40.1% と低く、運行にかかるコストの大半を自治体による財政支出や補助金で補う必要がある [14]。

そこでコミュニティバスの財政負担を軽減することや、公共交通空白地域の解消を目的として、近年デマンドバスを導入する自治体が増加している [1]。デマンドバスは、利用者が存在しないときに空車のバスを運行することがないことから、従

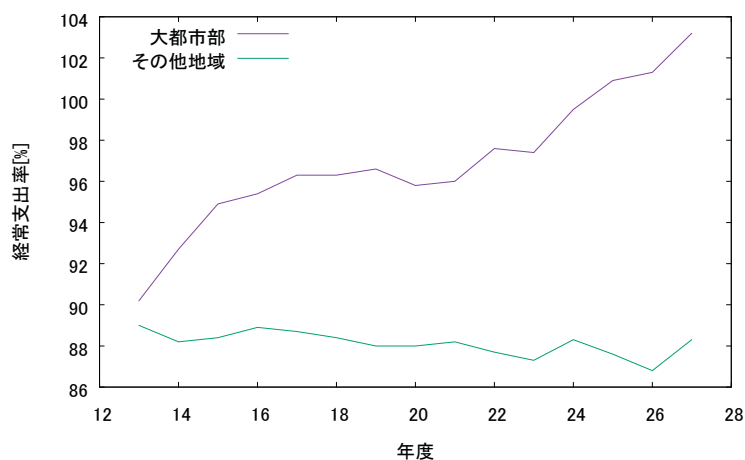


図 2.2: 大都市部とその他地域における路線バスの経常支出率の推移（国土交通省データより作成）

来の路線バスやコミュニティバスよりも効率的な運行ができることが期待される。

2.3 デマンドバスの分類

デマンドバスの運行形態による分類方法は様々であるが、国土交通省が発行するデマンド型交通の手引き [1] では経路、ダイヤ、発着地のそれぞれを自由度から段階分けし分類している。手引きのうち、本章では以下に示す経路とダイヤの分類を用いて、後述するデマンドバスの導入事例を紹介する。

2.3.1 経路による分類

デマンド型交通の手引きでは、デマンドバスの経路の自由度をバス停の有無と経路の固定・非固定をもとに 4 段階に分類している。ここでは従来の路線バスの運行形態に近く自由度の低い運行形態から順に述べる。それぞれの運行形態の模式図は図 2.3 に示す。

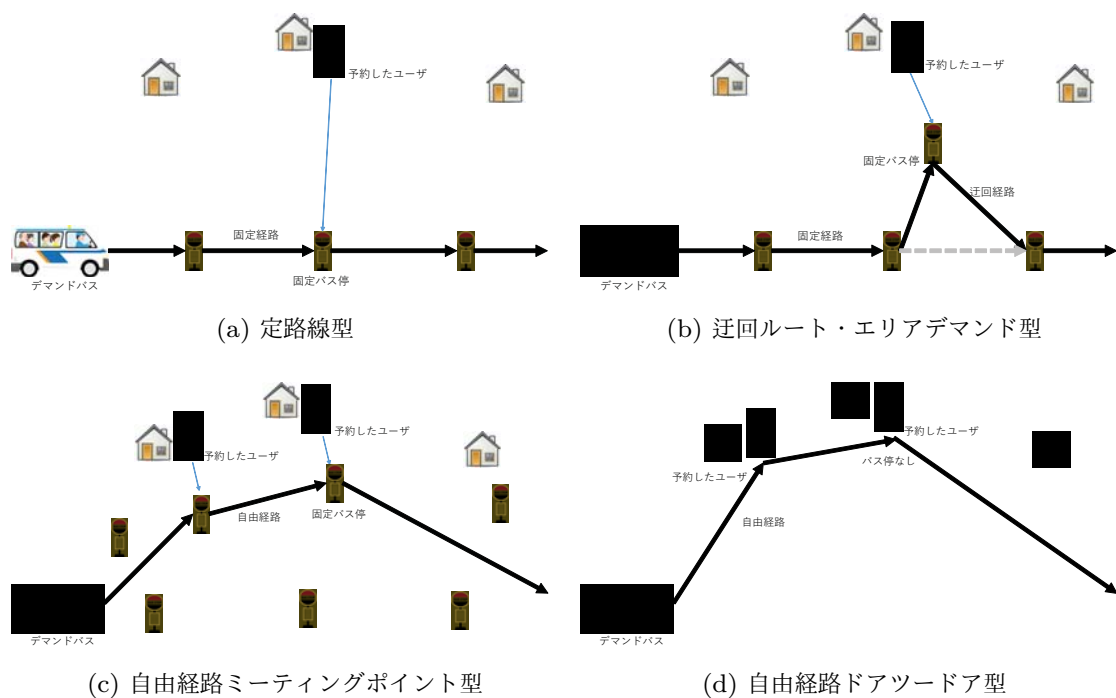


図 2.3: デマンドバスの経路による分類模式図

定路線型

定路線型は、従来の路線バスのように経路を固定しバス停で乗降を行うが、ユーザから予約があった場合のみ運行する方式である。この方式により、乗客のいない「空気バス」の運行を抑止することができる。

迂回ルート・エリアデマンド型

迂回ルート・エリアデマンド型は、定路線型のようにバス停を設置し基本的には決められた経路を走行するが、基本経路とは別に予約があった場合にのみ迂回する経路およびバス停も定めておく方式である。これによりより広いエリアをカバーすることができ、交通空白地域の解消を図ることが可能である。

自由経路ミーティングポイント型

自由経路ミーティングポイント型は、バス停のみあらかじめ設定しておき、バス停間の経路は自由に設定する方式である。この方式では、バス停間を最短経路で走行することにより所要時間を短縮することが可能である。また、バス停を多数設置した場合には、ユーザ徒歩移動距離を削減し利便性の高いサービスを提供できる。セミデマンド式とも呼称される。

自由経路ドアツードア型

自由経路ドアツードア型は、バス停と経路の両方をあらかじめ設定せず、エリア内の予約があった地点で乗降し、それぞれの地点間を最短距離で経路を設定する方式である。最もタクシーに近い運行方式でユーザに対して高い利便性を提供できる一方、他の方式に比較し運行エリアのタクシーとの競合問題も発生する可能性が高い。フルデマンド式とも呼称される。

2.3.2 ダイヤによる分類

デマンド型交通の手引は、デマンドバスのダイヤの自由度を3段階に分類している。その分類をより路線バスのダイヤ形態に近く自由度の低いものから順に表2.1に示す。また、曜日や需要によって表2.1の複数のダイヤ形態を使い分ける運行形態も存在する。先述した経路による分類と、ここに述べるダイヤによる分類の組み合わせにより、様々なデマンドバスの運行形態が導入されている。

表 2.1: デマンドバスのダイヤによる分類

分類	概要
固定ダイヤ型	予めダイヤを決めておき、予約があった場合に運行
基本ダイヤ型	運行の頻度と主要バス停の概ねの発着時刻を予め決め、予約に応じ運行
非固定ダイヤ型	ダイヤを決めず、運行時間内であれば予約に応じて自由に運行

2.4 デマンドバスの法的位置づけ

我が国において有償で運行するデマンドバスは、道路運送法において乗合旅客輸送の区域運行として定義されている [15]。一般事業者が運行する場合は、定員が 11 人未満、市町村が運行する場合は交通空白地域や過疎地、福祉目的の輸送に限定される。またデマンドバスを運行するにあたっては地域公共交通会議において既存の交通との競合を調整する必要がある。

2.5 導入事例

本項では、実際に自治体で運行されているデマンドバスの事例のうち、地域公共交通支援センターの web データベース [2] に直近（平成 26 年度以降）の収支状況が掲載されている 4 例について述べる。

2.5.1 和歌山県みなべ町「みなベコミバス」

みなべ町は和歌山県中部に位置する人口 13,755 人（平成 26 年）、面積 120.28km² の町である。町域は南部川河口付近の平地と山間部にまたがり、集落は沿岸部と南部川沿岸に多い。町では高齢化が進行しており、交通空白地域の解消と高齢者活動支援を目的に平成 19 年からデマンド乗合タクシーの運行を開始した。デマンドタクシーは路線バスの一部を代替し、導入前とほぼ同じ予算額でより広いエリアの交通手段の確保に成功した。

運行形態

町がタクシー事業者に運行を委託している。町内の対象エリアを 3 つに分割し、それぞれで運行時間帯や予約方法が異なる。運行方法はシステムを使わない方式で、オペレータとタクシー事業者のノウハウをもとに運行されている。

経路の設定方法 迂回ルート・エリアデマンド型。

ダイヤの設定方法 約 1 時間半～2 時間間隔で設定されたダイヤに基づき運行（基本ダイヤ型）。

予約方法 オペレータによる電話予約。中心部ルートは発車時刻直前まで予約可能。その他ルートは前日までに予約。

運賃 大人 300 円，小人 150 円。

運行車両 ジャンボタクシー（10 人乗り）2 台。

利用者数および収支

利用者数 637 人/月（平成 26 年度平均）。

収支 平成 27 年度は 660 人/月の利用者を見込み，運行費用を 1080 万円/年と設定した。不足分の 840 万円/年を町が負担している。よって収支率は 22.2% となる。

2.5.2 茨城県神栖市「神栖市デマンドタクシー」

神栖市は茨城県南東部に位置する人口 94,638 人（平成 27 年），面積 146.94km² の市である。市域は鹿島灘と利根川に挟まれた南北に長い平地で，鹿島臨海工業地帯および南部と北部を中心に住宅地を形成している。市内に旅客鉄道が存在せず，南北に縦貫する路線バスを補完する役割で市が循環バスを運行していた。循環バス利用者減少のためにデマンド乗合タクシーが平成 20 年より運行を開始した。

運行形態

市商工会がタクシー事業者に運行を委託している。システムオリジン社方式の一般タクシー電話受付，顧客管理システムを用いて運行されている。送迎の順序，経路，到着時刻は運転者が判断している。市域を 4 つのエリアに分割して運行している。

経路の設定方法 自由経路ドアツードア型（運転者が経路を判断）。

ダイヤの設定方法 毎正時に営業所を出発（基本ダイヤ型）。

予約方法 オペレータによる電話予約または FAX による予約。出発の 1 時間前まで予約可能。

運賃 大人 300 円，小人 150 円。

運行車両 セダntaxシー 9 台.

利用者数および収支

利用者数 30174 人/年（平成 27 年度）.

収支 平成 24 年度から 26 年度の 3 年間の平均で，支出が 5200 万円/年，収入が 900 万円/年で，差額の 4300 万円を市が負担した． よって収支率は 17.3% となる．

2.5.3 千葉県酒々井町「しすいふれ愛タクシー」

酒々井町は千葉県北中部に位置する人口 21,189 人（平成 28 年），面積 19.01km² の町である． 成田市と佐倉市に挟まれた町域は概ね平地で， JR 成田線および京成酒々井駅付近に住宅が集中している． 路線バスの一部撤退に伴い， 交通空白地域の解消・高齢者等の交通弱者の補助およびスクールバスの代替を目的に， 平成 16 年よりデマンド乗合タクシーの運行を開始した．

運行形態

町社会福祉協議会がバス事業者に運行を委託している． NTT 東日本方式のシステムを利用している．

経路の設定方法 町内の全域および町外の特設施設（一部を除き自由経路ドアツードア型） ．

ダイヤの設定方法 非固定ダイヤ型．

予約方法 オペレータによる電話予約． 30 分前まで予約可能．

運賃 町内 300 円， 町外 150 円．

運行車両 ジャンボタクシー（10 人乗り） 2 台， 小型バス（13 人乗り） 2 台．

利用者数および収支

利用者数 17068 人/年（平成 27 年度）.

収支 平成 27 年度の支出が 3640 万円/年，運賃収入が 600 万円/年で，1970 万円を行政が負担した．よって収支率は 30.5% となる．

2.5.4 群馬県前橋市（旧大胡町・宮城村・粕川村）「ふるさとバス」

前橋市の旧大胡町・宮城村・粕川村は人口 21,189 人（平成 28 年），面積 93.88km² の地域である．この地域を運行する路線バスの収支率は 20% 前後と低く，また高齢化が進む地域であった．高齢者の移動手段確保を目的として平成 18 年よりデマンド乗合タクシーの運行を開始した．

運行形態

市がタクシー事業者に運行を委託している．エイブイプランニングセンター株式会社方式のシステムを利用している．

経路の設定方法 自由経路ミーティングポイント型．

ダイヤの設定方法 非固定ダイヤ型．

予約方法 オペレータによる電話予約．当日予約・予約期限なし．

運賃 大人 210 円，小人 100 円．

運行車両 ジャンボタクシー（10 人乗り）4 台．

利用者数および収支

利用者数 16,169 人/年（平成 27 年度）．

収支 平成 27 年度の運賃収入が 550 万円/年で，2806 万円を行政が負担した．よって収支率は 16.3% となる．

2.5.5 デマンドバスの課題

鈴木 2012[16] では，デマンドバスにおける課題を次のようにまとめている．

1. 乗合率が低い．

2. ユーザの心理的抵抗がある.
3. 時間制約が大きい所要には不向き.
4. 予約に即時性がない場合利用者が限られる.
5. 非固定ダイヤ型ではユーザが分散し、ユーザの予約を十分に受け付けるためには車両が相当数必要.
6. 財政負担が大きい.
7. 利用登録制の場合地元住民以外が利用できない.

これらの課題の中で本研究では特に財政負担の軽減に取り組む。本章で述べたデマンドバスの導入事例においても利益率は高々 30% 程度と、コストのほとんどを自治体等の財政に依存する状況である。デマンドバスの利益率が低い要因としては、元々路線バスの採算が成り立たない地域で運行されている他に、ドアツードアに近い運行形態の場合にバスの走行距離が長くなることや、走行距離あたりの利用者が低い点が挙げられる。この問題を解決するために、デマンドバスに求められる広いエリアをカバーし柔軟に運行することと、少ない運行経路・少ない車両台数でより多くのユーザのデマンドを満たすことの両立が求められると考える。また、少ない車両台数で多くのユーザを輸送するためには、乗合率を向上し、時間制約を満たすように短い時間でデマンドを処理していく必要があると考えられる。

2.6 デマンドバスの将来像

近年、スマートフォンの普及やセンシング技術の向上により新しい交通形態が提唱され始めている。国外においては都市部においても Uber や Lyft 等のスマートフォンを用いたライドシェアサービスが使われ始めている。規制問題やタクシーとの競合問題は依然解決されていないものの、クルマの自由度の高さとライドシェアの低価格を両立したサービスが実現しつつある。

また、自動運転バスや自動運転タクシーの実現により、デマンド型交通の普及が加速することも考えられる。フランスにおいては、Easymile 社や Navya 社が自動運転バスの開発をしており、これらの車両を用いた実証実験が行われている。国内においても 2016 年に秋田県仙北市において Easymile 社の車両による自動運転バスの公道実験走行が行われた [17]。また、自動運転バスやタクシーによる自家用車

の置き換えについても研究されている。ベルリンにおけるシミュレーションでは、110 万台の自家用車を 10 万台の自動運転タクシーに置き換えることが可能であることが示された [18]。ニュージャージー州におけるシミュレーションでは、160 万台から 280 万台の自動運転タクシーを用いて州全体の自家用車による交通需要を置き換えることができることを示した [19]。またこの研究において、自動運転タクシーによる一人当たりの一日のコストは 1.6 ドルから 23.50 ドルであると試算されている。

これらのライドシェアサービスや自動運転タクシーによる大規模な自家用車の置き換えにおいても、コストや運賃は課題の 1 つとして挙げられる。本研究におけるデマンドバスの効率化は、ライドシェアサービスや自動運転タクシーを少ない車両台数で運行するために応用可能であると考ええる。

第 3 章 関連研究

本章では，デマンド型交通のスケジューリングについて，それぞれの関連研究の特徴をまとめる．そのうえで本研究における位置づけについて述べる．

3.1 デマンドバスのアルゴリズムに関する研究

デマンドバスのように呼び出しに応じて乗車するバスのスケジューリング問題は，Dial a Ride Problem (DARP) [3] として定式化されている．DARP は巡回セールスマン問題や車両配送問題の拡張で，これらの問題に対して次のような追加の制約を持つ．(i) 1 台ないし複数台の車両は，乗客の要求があった全ての地点を巡回する．(ii) 車両は乗客の乗車地点・降車地点の順番に巡回しなくてはならない．(iii) 車両は車庫（営業所）から出発し最後に帰還する．一定時間蓄えられたデマンドに対して，以上のような条件を満たす最小コストの巡回経路を計算する問題である．DARP は一般に NP 困難であると考えられている [20]．DARP を解く場合，一定時間蓄えられたデマンドに対しての解を求めるバッチ処理を用いて，遺伝的アルゴリズム等の発見的手法を適用することができる [21]．

DARP にタイムウィンドウと呼ばれる乗降の時間制約幅を設けた問題として Advanced Dial-A-Ride with Time Windows (ADARTW) [4] がある．ADARTW ではタイムウィンドウによって設定される時間制約幅に乗降時刻が収まるように巡回経路を計算する．ユーザは乗車希望時刻 (DPT) もしくは降車希望時刻 (DDT) を指定する．ユーザが指定した DPT または DDT に対して，ユーザの乗降時刻のタイムウィンドウは，図 3.1 に示すように直接移動にかかる時間 (DRT) と最大乗車時間 (MRT) を計算したうえで設定される． MRT は例えば以下の式 (3.1.1) のような関数として定義できるが，別の関数で代替してもよい．

$$MRT = A + B \times DRT \quad (3.1.1)$$

ADARTW を解くアルゴリズムとして逐次挿入法 [22] があり，比較的高速で計算可能かつ解の精度も良いとされる．逐次挿入法は，既に決定しているユーザの乗降スケジュールを変更することなく，新たなユーザのスケジュールを挿入し準最適

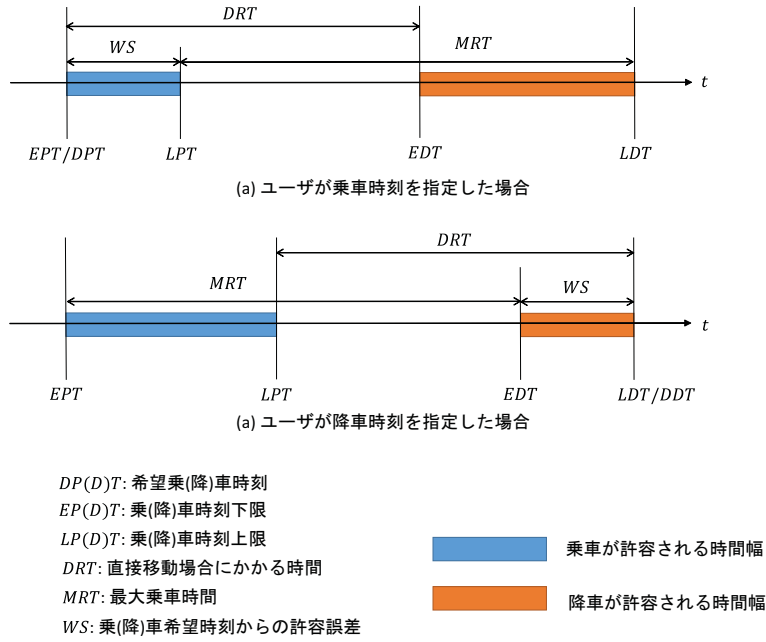


図 3.1: ADARTW における時間制約幅

解を得る手法である．DARP はバッチ処理であったのに対し，ADARTW と逐次挿入法を用いた手法は，その都度ユーザの乗降スケジュールを計算するリアルタイム処理が適用できる．

逐次挿入法では，新たにデマンドが発生したユーザの乗降車スケジュールを挿入可能箇所に挿入する．新規ユーザの乗降車スケジュールを挿入後に，既にスケジュール済みのユーザを含む全てのユーザの乗降車時刻がタイムウィンドウの制約を満たす場合，その挿入箇所は挿入可能箇所となる．図 3.2 に既定のユーザ a のスケジュールに対しユーザ b のスケジュールを挿入する例を示す．新たなスケジュールの挿入により車両は迂回が生じるため，迂回後に既定のスケジュールには遅延が生じる．この遅延により既定のユーザの乗降時刻がタイムウィンドウの制約を満たさなくなる場合，新たなスケジュールは挿入不可となる．また新たに挿入するユーザ自身もタイムウィンドウの制約を満たす必要がある．全ての車両の挿入箇所に対し試行を行った後，それぞれの評価値を比較し最も評価が良い挿入箇所を出力として採用する．評価値にはスケジュールに対する時間や距離などのコストの他，ユーザの希望乗降車時刻と予想乗降車時刻との誤差などが考えられる．

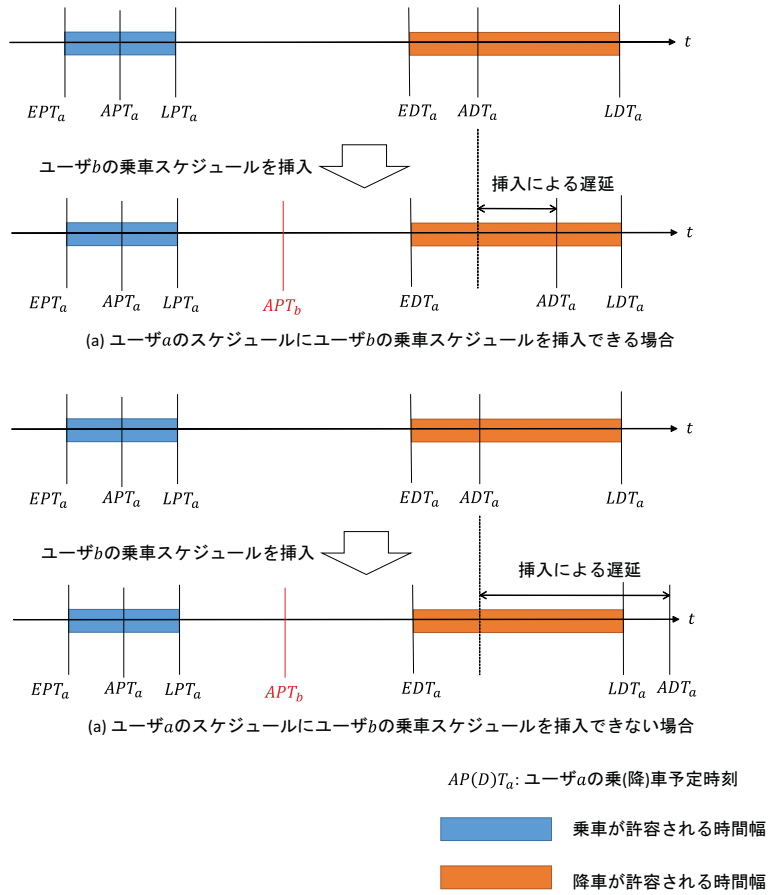


図 3.2: 逐次挿入法によるスケジュール挿入例

3.2 デマンドバスに関する実証実験

東京大学では、バス停が固定されたデマンドバスにおいて、「ゆとり時間」と呼ばれるタイムウィンドウを設定したデマンドバス運行方式（コンビニクル）を提案している [5]。これまでオペレーターの手作業や運転手のノウハウをもとにデマンドバスが運行されてきたが、コンビニクルではコンピュータによってスケジューリングおよび運行制御を行うデマンドバスが開発され、実証実験および実用化がなされている。実証実験としては千葉県柏市において固定バス停 88 ヶ所を用いて運行されたほか、2017 年 12 月現在、国内で 19 の自治体において実用化されている。例えば山梨県甲州市における運行では、市内の 6 つのエリアに設置された 457 のバス

停を用いて事前予約を前提としたデマンドバスが運行されており、バスの空きがあれば直前まで予約が可能である。これらの実証実験や実用化を通じて、ADARTWのような時間制約幅を用いたデマンドバスが、コンピュータの制御により実際に運行可能であることが示されている。

公立はこだて未来大学の SAVS プロジェクトでは、平常時は通常のタクシーとして運用している車両を、ある一定の時刻のみ乗合型のデマンド型交通として運用を行うことを提案している [6]。デマンド型交通としてのスケジューリング手法は、時間制約と逐次挿入法を用いた手法となっている。SAVS では固定のバス停を持たないドアツードアの運行が可能で、さらに事前に予約するのではなくリアルタイムに配車を行う。函館市中心部における実証実験も行われており、ユーザの乗車要求の送信から約 5 分で乗車可能であったことが報告されている。これにより、ドアツードア型かつリアルタイム処理のデマンド型交通が、コンピュータの制御により実際に運行可能であることが示された。

3.3 デマンドバスのシミュレーションに関する研究

3.3.1 デマンドバスの採算と利便性に関する研究

Noda ら [23] は、フルデマンド式のデマンドバスの利便性と採算性について、シミュレーションにより路線バスとの比較を行っている。Noda らの研究では、 11×11 のグリッド地図において、乗客のデマンドが一様にランダムに発生すると仮定し、バス路線を遺伝的アルゴリズムにより生成、デマンドバスは逐次挿入法のスケジューリング手法をとっている。採算性を単位時間におけるバス 1 台当たりのデマンド処理数、利便性を目的地到着までの時間として定義している。実験の結果、バス台数を固定した場合、デマンド数が増えるにつれてデマンドの受理率（制限時間内に目的地まで送迎できるデマンドの割合）が急速に悪化し、利便性も低下することが示されている。つまり、バス台数が固定の場合、多くの需要があれば採算性が確保される訳ではないことが分かる。一方で、採算性を一定に保つ（バス台数とデマンドの発生頻度を比例させる）場合、高い利便性を確保するためには運行規模を大きくする（高いデマンド頻度と多くのバス台数の確保をする）と利便性の観点から良い結果となることが示されている。また、駅前や商店街などを想定し

デマンドが一極に集中してる場合ではフルデマンド式のデマンドバスが利便性が高く、駅前と郊外のショッピングセンタを想定しデマンドが二極集中してる場合には路線バスの利便性が高い結果となった [24].

また、小柴ら [25] は、Noda らと同様の手法を中規模の実都市（函館市）に適用してシミュレートしている．ミクロ交通流シミュレータ SUMO[11] を用いてフルデマンド式デマンドバスと路線バスの利便性を比較した結果、実都市を想定したシミュレーションにおいても Noda らの実験結果と同様の利便性の傾向が得られることを示した．

これらの文献から考えられる結論は、高い需要がある地域ではある程度採算性を確保しつつ利便性の高いフルデマンド式のデマンドバスが運行できる一方、バス台数を十分に確保できず需要が少ない地域では採算性と利便性を両立したフルデマンド式デマンドバスの運行が困難になる可能性があることである．よって現状デマンドバスが運行されているような少ないバス台数で低需要な地域では、より採算性を確保できるデマンドバスの運行方式が求められる．

デマンドバスに近い運行形態として、タクシーのライドシェアが研究されている．Ma ら [26] は、タクシーの走行距離の最小化を目的として、タクシーのライドシェアをシミュレーションにより検証している．スケジューリング手法はタイムウィンドウと用いた逐次挿入法である．Ma らは、相乗りによって「ユーザ 1 人にあたりの運賃は削減し、ドライバは通常のタクシー輸送より損しない」という料金モデルを設定したうえで、走行距離と相乗り率から採算性について検証している．タクシーの GPS 軌跡と実際の乗車履歴を用いた北京のシミュレーションにおいて、11% のタクシー走行距離の削減と、7% のユーザの運賃削減が報告されている．また、多くのタクシーを短時間で探索するためにシミュレーション領域をグリッドで分割し、ユーザと同じセル内のタクシーを優先して探索している．

また、大型バスとデマンドバスの乗り換えについても研究されている．上原ら [8] は、小型のデマンドバスによってユーザを近くのデポまで輸送し、デポで集約したユーザは大型バスによって中距離の輸送を行うクラスタリング手法を提案している．上原は、バスが無限に存在すると想定し、那覇市および周辺部の実際の地図とパーソントリップ調査の旅行需要を用いたシミュレーション評価を行っている．評価実験で、バッチ処理型の提案手法と ADARTW を用いた通常のデマンドバスを

運行コストで比較した結果，上原らの提案手法ではバスの運行台数は増加したものの，トータルのバスの運行距離は削減されたことを報告し，現状の路線バス以上の十分な利用が見込める場合，ADARTW よりも優位性が高いことが示された。

デマンドバス間の乗り換えを含む問題は，DARP を発展させた Dial-A-Ride Problem with Transfers (DARPT) として定式化され，その評価がシミュレーション実験により行われている [7]。DARPT は ADARTW と同様にタイムウィンドウを用いて逐次挿入するスケジューリング手法が用いられているが，デマンドバス間で乗り換えができる点が異なる。文献 [7] では Pickup and Delivery Problem with Transfers (PDPT) [27] に用いられる Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) を拡張したうえで DARPT に適用し，焼きなまし法に類似する手法でスケジューリングを行っている。評価実験では，乗り換え地点が固定された運用方式で，デマンドバス間の乗換により運用コストが 8.25% 削減されることが報告されている。この評価実験では，乗降地点は自宅と特定施設間の移動をするセミデマンド式の運行となっている。

3.3.2 徒歩移動を含むライドシェア

ライドシェアにおいて，乗客をドアツードアで送迎するのではなく，ミーティングポイントまで徒歩移動を行う効率化手法が研究されている。ミーティングポイントでの乗降は，複数の乗客の乗降の集約による車両停車回数の削減，送迎による車両の迂回の削減，ドライバと乗客のマッチングの増加によるライドシェアの効率運用が期待できる。Stiglic ら [28] は，動的なライドシェアのスケジューリング手法 [29] をミーティングポイントまで徒歩移動する手法に拡張しシミュレーション評価を行っている。Stiglic らの手法では，一定範囲内に最大 4 か所のマッチングポイントをランダムに設定し，ドライバと乗客のトリップの時間制約を満たすようマッチングとスケジューリングを行っている。アトランタのトリップ需要モデルを使用した実験の結果，ミーティングポイントを 4 か所設定した場合，ドライバと乗客のマッチング率は約 6.8% 増加し，車両の移動距離も削減できることを示した。ライドシェアとデマンドバスの大きく異なる点は，車両の行動パターンである。ライドシェアの場合，車両と乗客がともに 1 組の出発地と目的地を持ち，ともに時間制約

を持つことに対して、デマンドバスは営業所で待機・出発しエリア内を巡回する。またデマンドバスの場合、車両に時間制約はない。

また、徒歩移動を含むデマンド型交通は、DRT の乗客の類似するトリップ同士のクラスタリングとして研究されている。Czioska ら [9] は、DRT において複数ユーザを再帰的にクラスタリングと共通の乗降地点を計算することにより、徒歩移動により複数のユーザがまとめて乗降する DRT のスケジューリングを行うことを提案している。ドイツの中規模都市ブラウンシュヴァイクの実際の道路ネットワークを用いたシミュレーションにおいて、10,000 人の乗客がいる場合に従来の徒歩移動を含まない DRT と比較し、バス停車回数、走行距離、走行時間、必要台数、空車走行距離が 30% 程度減少することが示された。一方で、ユーザ数が少ない場合には従来の DRT との差は少ない結果となった。本研究における提案手法と Czioska らの手法の主な違いは、バッチ処理かリアルタイム処理かの違いである。Czioska らの手法は複数のユーザのクラスタリングがベースであるので、スケジュールの段階で複数のユーザのトリップが既知である必要があり、一定時間クエリを蓄積するバッチ処理となる。一方、本研究ではユーザのクラスタリングは行わず、個々のユーザにバスの迂回が少なくなる乗降地点と徒歩移動を案内するため、他のユーザのトリップは既知である必要はない。そのためリアルタイム処理を適用でき、ユーザが 1 人の場合でも徒歩移動を適用するため、ユーザの数が比較的少ない場合でもある程度有効であると考えられる。

3.4 本研究の位置づけ

本項では、これまで述べてきた関連研究について表 3.1 にまとめ、そのうえで本研究の位置づけについて述べる。なお、表 3.1 に示された関連研究のうち文献中に対象規模の明記がない文献 [26][28][9] は、実験の評価に使われた都市を表中に明記している。それらの都市の人口を鑑みた場合、北京については大都市、アトランタは中規模都市または大都市、ブラウンシュヴァイクは中規模都市に該当すると考えられる。

これまで述べてきた関連研究において、そのほとんどは中規模都市以上を対象としており、バス台数を十分に確保することや、ある程度の需要が見込める場合にデ

表 3.1: 関連研究における仮定および評価方法

	運航方式	対象規模	デマンド発生地点	処理方式	実証実験	乗換	徒歩	車両数	デマンド数
コンビニクル [5]	デマンド型		バス停	リアルタイム ^{※1}	○			4	2482
SAVS[6]	デマンド型	中規模都市	任意	リアルタイム	○			20	320
Npda ら [23]	デマンド型		任意					※2	※2
小柴ら [24]	デマンド型	中規模都市	任意					※2	※2
Ma ら [26]	乗合タクシー	北京	任意	リアルタイム				7088	
上原ら [8]	併用型	中規模都市圏	任意	バッチ処理		○		無限	※3
DARPT[7]	デマンド型		主要施設/自宅			○		3-13	21-114
Stiglic ら [28]	ライドシェア	アトランタ	任意	リアルタイム			○	1425.8	1423.6
Czioska ら [9]	デマンド型	ブラウンシュヴァイク	任意	バッチ処理			○	2000	1000-40000
提案手法	デマンド型	小規模都市	任意	リアルタイム			○	数-数十	数十-数百

※1 予約が前提

※2 デマンド数に対するバス台数の比率を設定

※3 那覇都市圏のトリップのうち数十%のデマンド数を想定

マンドバス等のスケジューリングの効率化手法が有効であることが示されている。一方で、バス台数が十分に確保できない場合や低需要である場合は、スケジューリングの有効性が損なわれることも報告されている。実際にデマンドバスが望まれる地域は路線バス等が衰退した低需要である地域であるため、そのような場合においても少ないバス台数でデマンドバスのスケジュールの効率化を行うことが求められる。

本研究では、リアルタイム処理型のデマンドバスにおいてユーザの徒歩移動を含むスケジューリングを提案する。ユーザの乗車要求を受けて、サーバがユーザの徒歩移動範囲内のデマンドバスの迂回が少なくなる乗降地点を探索し、ユーザにその乗（降）地点まで（から）の徒歩移動を案内する。これを ADARTW の拡張手法を用いて行う。

関連研究で行われている、中型バスとの乗換や徒歩移動によるクラスタリング手法との違いは、バッチ処理かリアルタイム処理であるかの処理方法の違いが挙げられる。クラスタリングのようなバッチ型処理は、あるユーザの乗車要求に対して、それより後の他のユーザの存在が既知であるから有効であることに対して、提案手法は他のユーザとのクラスタリングが前提ではないので、ユーザが1人の低需要な場合でも多少はデマンドバスの迂回が削減されと考えられる。また、今後他のユーザが現れるか未知であっても乗車要求の処理することができるため、リアルタ

イム型のデマンドの処理となる.

第 4 章 問題設定

4.1 提案システム概要

デマンドバスでは新たなユーザをバスに乗車させるために現在の経路から迂回が生じる。本システムは、バスの迂回が削減される地点で乗降車を行うことで、ユーザに多少の利便性の低下を許容してもらう代わりに、より少ないリソースでより多くのユーザの乗車要求を受理することでデマンドバスの運行コストを削減する。提案システムの模式図を図 4.1 に示す。ユーザがシステムに入力した出発地・目的地に対し、システムはユーザ制約を満たす範囲内でバスの迂回が削減される乗降地点を提示し、ユーザ希望地点と乗降地点間の徒歩経路と乗降時間を案内する。また、バスの迂回による遅延の状況に合わせて降車後の徒歩移動距離を調整し、制約を満たすように目的地到着時刻を調整することで、乗車中のバスに他のユーザも同乗するスケジュールの余裕を持たせる。

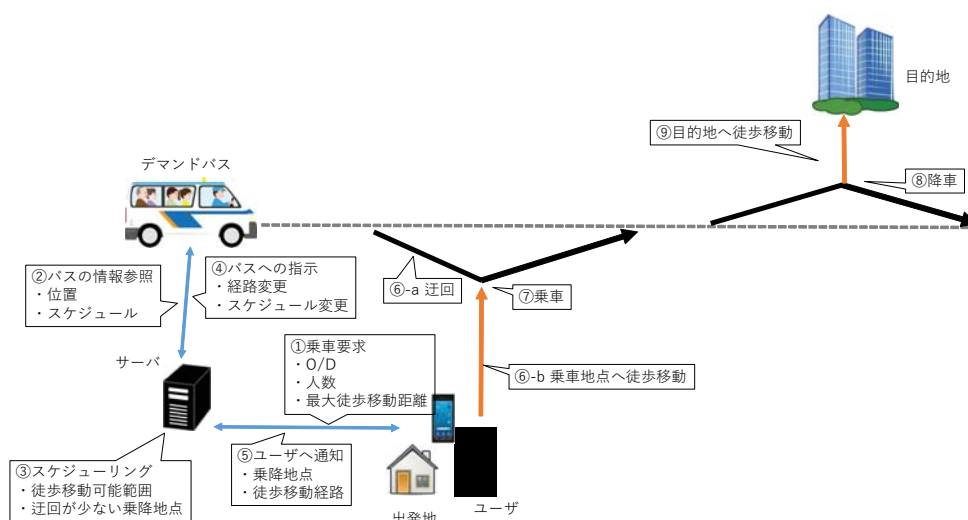


図 4.1: 提案システムの模式図

4.2 想定環境

4.2.1 ユーザに対する仮定

本システムではユーザは予約を必要とせず、ユーザが乗車したい時刻にネットワークに接続された端末等を用いて乗車要求を発行する。乗車要求には、任意の出発地、任意の目的地、乗車人数が含まれる。スケジュールの計算後、乗車するバスと乗降地点をシステムから通知を受け、ユーザは乗車地点に向かって即座に徒歩移動を開始する。乗車地点に到着後バスが到着するまで待機した後、スケジュールされたバスに乗車する。

ユーザの乗車要求に対して乗車するバスが決定した時点で、ユーザの降車地点も決定しユーザに通知されているが、バスの迂回の遅延の状況によって降車地点が変更される場合がある。降車地点の変更があった場合には、ユーザが携帯する端末またはバス車内の何らかの設備を通じ、ユーザに新たな降車地点と目的地までの徒歩経路を案内する。降車後は即座に目的地までの徒歩移動を開始する。

ユーザは出発地と目的地の距離に応じて目的地到着時刻の制約を持つ。予想される目的地到着時刻が制約満たさないスケジュールリングは行わず、制約を満たすスケジュールがない場合はユーザは乗車を諦める。

4.2.2 デマンドバスに対する仮定

デマンドバスには無線通信機能を持つ車載器が搭載されているものとし、バスの位置情報は逐一サーバに送信されるものとする。この車載器により経路や乗降するユーザの情報を受信する。近年はタブレット等の端末が普及し、専用の車載器を用いずともこれらの機能は安価に実現可能であると考えられる。

デマンドバスは車庫（営業所）から出発し、営業所に戻ることで業務を終了する。デマンドバスは自治体が運行することを想定し、営業所は市役所やその支所に設置することを仮定する。営業所は1つまたは複数存在し、各営業所に収容可能台数が設定されている。それぞれ営業所に設定された収容可能台数を全て合計すると運行するバスの台数に一致するように設定し、全てのバスがいずれかの営業所に収容できるものとする。

また、営業所以外にバスが待機できる場所として駅前のバスターミナルを想定する。バスターミナルにおいてもバスの収容可能台数が設定され、それを超えない範囲で空車のバスが待機する。駅付近はユーザの需要が高いと考えられるため、営業所の空車のバスは駅に向けて回送し、駅で待機する。また駅で待機しているバスが偏ることを防ぐため、待機しているバスの数が均等になるよう、空車のバスが多く待機している駅からバスが待機していない駅に対して一部のバスを回送する。

ユーザの乗車要求があった空車は、即座に営業所または駅を出発する。また営業運転中のバスの経路に変更があった場合は、車載端末を通じてドライバに通知し、即座に経路変更を行うものとする。全てのユーザを降車させ空車となったバスは、現在地点から最も近い空きのある営業所また駅まで回送し、ユーザ待機状態に戻る。ユーザの乗車要求受付時刻終了後、すべてのバスは営業所に帰還させ業務を終了する。

本システムではバス停は設置せず、地点で乗降できるものとする。バスの乗降にはユーザの数に比例して時間を要するものとする。乗車するユーザが乗車地点に到着していない場合、バスはその場で待機する。

4.2.3 サーバに対する仮定

サーバはユーザの乗車要求を受信するごとにユーザの乗降地点の候補を計算し、それぞれに対してスケジュールの逐次挿入法を実行するリアルタイム処理を行う。制約を満たすスケジュールが存在する場合は乗車要求を受理し、その中で最もコストの低いスケジュールを採用する。

スケジュールの計算には数秒から数分程度の時間がかかることが考えられるが、本研究では簡易的にスケジュールの計算には時間を必要とせず、即座にユーザにスケジュール結果を通知できるものと仮定する。複数のバスと複数の乗降地点について、それぞれの逐次挿入法の計算を並列で実行した場合には、高々数秒程度で計算が終了できると考えられる。

乗降地点の候補は、最大徒歩移動距離を設定し、これを超えない範囲内にある任意の地点とする。最大徒歩移動距離はユーザの身体能力に合わせて個々に設定するか、全てのユーザに一律に設定する方法がある。

4.3 問題定義

4.3.1 入力

入力は、道路と営業所・駅に関する地図入力、ユーザの乗車要求に関するユーザクエリ、バスの状態やスケジュールに関するバス車載端末からの入力の3つがある。それぞれで入力のタイミングが異なる。

地図入力

地図入力は道路ネットワークと営業所・駅に関する入力がある。道路ネットワークは有向グラフ $G(V, E)$ として与えられる。それぞれのエッジには、速度制限 $e_{ij}.speedLimit$ 、距離 $e_{ij}.dist$ 、バスと徒歩それぞれ通過するのにかかる予測時間 $e_{ij}.time, e_{ij}.walkTime$ が設定されている。本研究では $e_{ij}.time$ を式 4.3.1 に示すように、エッジを法定速度で移動した場合の k_{speed} 倍とするが、別の関数で定義することも可能である。徒歩移動に法定速度は存在しないため、 $e_{ij}.walkTime$ はエッジの距離に比例した時間を設定する。これらの地図入力は短時間では不変であるため、最初のユーザのスケジューリング前に1回だけ入力し、以後それぞれのユーザのスケジューリングで繰り返し用いる。

$$e_{ij}.time = \frac{e_{ij}.dist}{k_{speed} \times e_{ij}.speedLimit} \quad (0 < k_{speed} < 1) \quad (4.3.1)$$

営業所と駅の位置はともに XY 座標で与えられるが、 E のいずれかのエッジ上の座標を割り当てるものとする。実際の地図に基づいて座標を設定する場合、 E のいずれかのエッジ上の最も距離が近い座標を割り当てる。また営業所と駅にはそれぞれバスの収容可能台数が設定される。

ユーザクエリ

全ユーザの集合を U として、あるユーザ $u \in U$ はクエリ q_u を入力する。クエリ q_u は表 4.2 に示す項目を持つ。クエリ発生時間 $q_u.t$ はユーザが乗車要求を出す時刻で、リアルタイム処理の場合ユーザが移動を開始する時刻でもある。ユーザの出発地 $q_u.start$ および $q_u.goal$ は任意の地点の XY 座標で与えられるが、システム側で E のいずれかのエッジ上の最も近い座標を割り当てる。 $q_u.num$ は q_u の乗車

表 4.1: 地図入力

表記	定義
V	交差点を表すノードの集合
E	道路を表すエッジの集合
$G(V, E)$	道路ネットワーク
$v_i \in V$	交差点ノード
$e_{ij} \in E$	交差点間のエッジ
$e_{ij}.speedLimit$	ノード間の法定速度
$e_{ij}.dist$	ノード間の距離
$e_{ij}.time$	ノード間のバスによる予測移動時間
$e_{ij}.walkTime$	ノード間の徒歩による予測移動時間
$Depot = \{depot_0 \dots depot_m\}$	バス営業所の地点の座標
$depot_i.c$	バス営業所の収容可能台数
$Station = \{station_0 \dots station_n\}$	駅の地点の座標
$station_i.c$	駅の収容可能台数

人数で、1 クエリで複数人が乗車するグループ乗車に対応する。最大徒歩移動距離 $q_u.mwd$ はクエリごとに設定し徒歩移動が困難なユーザに対しては値を低く設定することができるが、後述する評価実験では全てのユーザに一律に設定している。

ユーザクエリはユーザが乗車したいタイミング ($t = q_u.t$) でその都度入力し、後述するアルゴリズムを用いてバスのスケジュールを計算する。最終的には全てのユーザのクエリを入力し、それぞれのクエリに対してスケジューリングを行う。

表 4.2: ユーザクエリ

表記	定義
U	ユーザの集合
$q_u \in Q$	任意のユーザ $u \in U$ の乗車要求
$q_u.t$	クエリ発生時間
$q_u.start$	出発地の座標
$q_u.goal$	目的地の座標
$q_u.num$	乗車人数
$q_u.mwd$	最大徒歩移動距離

バス車載端末からの入力

バス車載器からサーバへの入力 B は、表 4.3 にまとめる．バスの位置情報 $b.pos$ は XY 座標で与えられるが、 E のいずれかのエッジ上の地点である．初期値はいずれかの営業所の座標が与えられる． $b.num$ は現時点でバスに乗車中の人数である．また、それぞれのバスには定員 $b.c$ が設定されている．

走行中のバスはそれぞれ 1 つのスケジュール S_b を持つ． S_b は停車予定の集合 $\{s_0, s_i, \dots, s_{n_b}\}$ で構成され、 s_0 はバスの現在地に一致し逐次更新される．それぞれの停車予定は停車地点 $s_i.pos$ 、到着予定時刻 $s_i.time$ 、停車する時間 $s_i.stopTime$ 、乗降車するユーザ $s_i.p, s_i.d$ 、および停車予定 s_{i-1}, s_i 間の経路 $route(s_{i-1}, s_i)$ の項目を持つ．

$s_i.stopTime$ は式 4.3.2 のように設定する．式 4.3.2 で乗降時間は、乗降車するユーザの人数 $s_i.p.num, s_i.d.num$ および係数 $k_{stop}(> 0)$ を用いて乗降人数に応じた時間を最低限確保する．一方でバスが乗車するユーザの徒歩移動終了を待つ場合、最も遅く乗車地点に到着するユーザ $\alpha \in s_i.p$ の到着時刻 $+k_{stop}$ の停車時間を確保する．このときのユーザ α の乗車地点までの徒歩移動経路を $\alpha.d = \{\alpha.d.e_{01}, \alpha.d.e_{12}, \dots, \alpha.d.e_{m_\alpha-1 m_\alpha}\}$ (表 4.4 に定義) として徒歩移動に要する時間を計算する．

また、停車予定 s_{i-1}, s_i 間の経路が $route(s_{i-1}, s_i) = \{s_i.e_{01}, s_i.e_{12}, \dots, s_i.e_{n_i-1 n_i}\}$ のように存在した場合、 s_i の到着予定時刻 $s_i.time$ は 4.3.3 のように設定する．スケジュールのコストは $S_b.cost$ 別途定義されたコスト関数 $cost()$ により設定する．コストはスケジュールにおけるバスの走行時間や走行距離によって設定する方法があるが、本研究においては事業者の収益によって設定する．事業者の収益の設定方法は 6 章で後述する．

これらのバス車載端末からの入力は、逐一入力される．本研究ではシミュレーションのタイムステップ (1 秒) ごとに入力されるものとする．

$$s_i.stopTime = \max\{k_{stop} \times (s_i.p.num + s_i.d.num), \max(\forall u \in s_i.p \ q_u.t + \sum_{k=0}^{m_\alpha} \alpha.d.e_{k-1 k}.walkTime - s_i.time + k_{stop})\} \quad (4.3.2)$$

$$s_i.time = \sum_{k=1}^i (s_k.stopTime + \sum_{l=1}^{n_i} s_k.e_{l-1} \ l.time). \quad (4.3.3)$$

表 4.3: バス車載器からの入力

表記	定義
B	バスの集合
$b.pos$	バス $b \in B$ の現在地点の座標
$b.num$	乗車中の人数
$b.c$	バス定員
S_b	バス $b \in B$ のスケジュール
$\{s_0, s_i, \dots, s_{n_b}\}$	S_b における停車予定の集合
$s_i.pos$	i 番目の停車予定 s_i における停車地点の座標
$s_i.time$	s_i の到着予定時刻
$s_i.stopTime$	s_i で停車する時間
$s_i.p \subset U$	s_i で乗車するユーザ
$s_i.d \subset U$	s_i で降車するユーザ
$route(s_{i-1}, s_i) = \{s_i.e_{01}, s_i.e_{12}, \dots, s_i.e_{n_i-1} \ n_i\}$	停車予定 s_{i-1}, s_i 間の経路
$S_b.route \subset E$	スケジュール S_b における経路
$S_b.cost$	スケジュール S_b のコスト

4.3.2 出力

出力は、それぞれのユーザの乗車要求に対する乗車スケジュールの出力と、バス業務終了時のバス走行履歴に大別される。それぞれの乗車要求に対するスケジュールの出力は、乗車要求を出したユーザ u の乗車するバスの b の乗降車挿入後のスケジュール S'_b と、ユーザ u の徒歩経路 $u.p, u.d$ である。出力された S'_b をもとにバスは経路を変更及び巡回し、ユーザは $u.p$ および $u.d$ をもとに徒歩移動を行う。

バス業務終了時のバス走行履歴は、全てのバスの走行距離 $b.dist$ と走行時間 $b.time$ を出力し、最後のバスが営業所に帰還した時刻 $endTime$ も出力する。これらの値と後述するコスト関数 $cost()$ を用いてバス事業者の収益を評価する。

表 4.4: 出力

表記	定義
S'_b	ユーザ u のバス b のユーザ挿入後のスケジュール
$u.p = u.p.e_{01}, u.p.e_{12}, \dots, u.p.e_{n_u-1} \quad n_u \subset E$	ユーザ u の乗車地点までの徒歩経路
$u.d = u.d.e_{01}, u.d.e_{12}, \dots, u.d.e_{n_u-1} \quad n_u \subset E$	ユーザ u の降車地点からの徒歩経路
B'	ユーザ挿入後のバス情報
$b.dist$	任意のバス b の走行距離
$b.time$	任意のバス b の走行時間
$endTime$	最後のバスが営業所に帰還した時刻

4.3.3 制約

まず、最大徒歩移動距離について考える。最大徒歩移動距離は個々のユーザの状況に合わせて個別に設定する方法と、すべてのユーザに一律に設定する方法があるが、いずれにしてもユーザの徒歩移動経路の距離が乗車側・降車側の両方で最大徒歩移動距離を超えてはならない。つまり最大徒歩移動距離に対する制約条件は式 4.3.4 のように表すことができる。

$$\forall u \in U \quad \sum_{k=0}^{n_u} u.p.e_{k-1} \quad k.dist < u.mwd, \quad \sum_{k=0}^{m_u} u.d.e_{k-1} \quad k.dist < u.mwd \quad (4.3.4)$$

次に、バスの定員についての制約について述べる。バスに乗車中のユーザの数は常にバスの定員を超えてはならない。停車予定 s_i 終了時におけるバスに乗車中のユーザの数 $s_i.num$ は、 s_i における乗車人数 $s_i.p.num$ 、降車人数 $s_i.d.num$ 式 4.3.5 のように表すことができる。この $s_i.num$ を用いて、式 4.3.6 のようにバス定員の制約を表すことができる。

$$s_i.num = \sum_{k=0}^i (s_k.p.num - s_k.d.num) \quad (4.3.5)$$

$$\forall b \in B \quad \forall s'_i \in S'_b \quad s'_i.num \leq b.c \quad (4.3.6)$$

次に駅および営業所に待機するバスの台数について考える。時刻 t において営業所および駅で待機するバスの台数をそれぞれ $depot_i.num(t)$ 、 $station_j.num(t)$ と

すると、このとき最大収容台数を超えない制約は次のように表される.

$$\forall depot_i \in Depot \ \forall t \ depot_i.num(t) \leq depot_i.c \quad (4.3.7)$$

$$\forall station_j \in Station \ \forall t \ station_j.num(t) \leq station_j.c \quad (4.3.8)$$

また、営業所および駅で待機するバスの台数に偏りがないように、時刻 t において最も多くバスが収容されている営業所および駅をそれぞれ $depot_{max}(t)$ および $station_{max}(t)$ として、次のような制約を設ける.

$$\forall depot_i \in Depot \ \forall t \ depot_{max}(t).num(t) - depot_i.num(t) \leq 1 \quad (4.3.9)$$

$$\forall station_j \in Station \ \forall t \ station_{max}(t).num(t) - station_j.num(t) \leq 1 \quad (4.3.10)$$

最後にユーザの到着時刻について考える. ユーザの乗車要求に対するスケジューリング時, ユーザの目的地予想到着時刻 $u.goal.expect$ はユーザの目的地到着制限時刻 $u.goal.limit$ を超えてはならない. このとき $u.goal.expect$ は, ユーザの降車地点を s_i として, 式 4.3.11 のように定める. また $u.goal.limit$ は, $u.start$ と $u.goal$ 間を直接移動した場合の経路を $route(u.start, u.goal) = \{u.e_{0-1}, u.e_{1-2}, \dots, u.e_{n_v-1-n_v}\}$ とした場合, 係数 k_{limit} および定数 C を用いて式 4.3.12 のように定める. $u.goal.expect$ および $u.goal.limit$ を用いてユーザの目的地到着時刻に対する制約は以下の式 4.3.13 のように表すことができる.

$$u.goal.expect = s_i.time + \sum_{k=0}^{m_u} u.d.e_{k-1-k}.walkTime \quad (4.3.11)$$

$$u.goal.limit = C + k_{limit} \sum_{k=0}^{n_v} u.e_{k-1-k}.time \quad (4.3.12)$$

$$\forall u \in U \ u.goal.expect \leq u.goal.limit \quad (4.3.13)$$

4.3.4 目的関数

本研究の目的は，できるだけ多くのユーザを受理しつつ，バス事業者の利益を最大化することである．バス事業者の利益は，ユーザから得た運賃収入とバス事業者の運行支出の差と定義する．ユーザ u の支払う運賃は，乗車地点 $u.p.pos$ および降車地点 $u.d.pos$ と運賃関数 $u.fare = fare(u.p.pos, u.d.pos)$ によって決定する．全てのユーザを運搬し，バスの運行終了時の事業者の収益の最大化の目的関数は次の通りである．本研究における $fare()$ および $cost()$ は 6 章で後述する．

$$Maximize\{\sum_{u \in U} u.fare(u.p.pos, u.d.pos) - \sum_{b \in B} cost(b)\} \quad (4.3.14)$$

第 5 章 徒歩移動を含むスケジューリング

本章では、徒歩移動を含むデマンドバスのスケジューリングを行うためのアルゴリズムと手法について述べる。本手法は基本的には ADARTW および逐次挿入法を徒歩移動に拡張したものである。ここでは処理をユーザの乗降地点候補の算出、バススケジュールの算出、降車地点の調整の 3 つに分割し、それぞれの詳細を後述する。

リアルタイム処理のデマンドバスのスケジューリングでは、ユーザのデマンドが入った時点でその都度スケジューリングを行う。ユーザのデマンドが入った時点のスケジューリングの処理の全体をアルゴリズム 1 に示す。アルゴリズム 1 では、それぞれのバスのスケジュールを参照し、スケジュールの中の何番目に割り込むかを逐次挿入法により決定する、あるいは空車のバスを手配する。新規ユーザの送迎により追加で発生するコストが最も少ないスケジュールを採用し、ユーザに通知する。

バスの経路の計算では A*探索を用いる。以下、本手法において A*探索のヒューリスティック値は断りのない限りゴールまでのユークリッド距離を利用する。また本手法におけるグラフでは、エッジが規模に応じてラベル付けされていることが前提である。A*探索の高速化として、まずエッジの規模が一定以上のもののみを利用して探索を行い、ゴールまでの経路が見つからない場合のみすべてのエッジを利用して探索を行う。

Algorithm 1 新規ユーザ乗車要求発行時の処理

Require: 乗車要求 q_u , バスのステータス情報の集合 B .

Ensure: ユーザ u の乗車予定を含むスケジュール S'' .

```
1:  $b_{min} \leftarrow null, S_{b_{min}} \leftarrow null$ 
2: for  $b \in B$  do
3:   if 任意の  $s_i \in S_b$  に対して  $s_i.num == 0$  then
4:      $S' \leftarrow newSchedule(), s'_0.pos \leftarrow b.pos, s'_1 \leftarrow q_u.start, s'_2.pos \leftarrow q_u.goal$ 

5:      $P \leftarrow getMP(q_u.start, s'_0.pos, s'_2.pos)$  //乗車地点候補の取得 (5.1 節を参照)
6:     for  $p \in P$  do
7:        $route(s'_0.pos \rightarrow p)$  を A*探索
8:        $route(p \rightarrow s'_2.pos)$  を A*探索
9:       if  $(route(s'_0.pos \rightarrow p).cost + route(p \rightarrow s'_2.pos).cost < route(s'_0.pos \rightarrow s'_1.pos).cost + route(s'_1.pos \rightarrow s'_2.pos).cost)$  then
10:         $s'_1 \leftarrow s'_p$ 
11:      end if
12:    end for
13:     $D \leftarrow getMP(q_u.goal, s'_1.pos, nearestDepot(q_u.goal))$  //降車地点候補の取得 (5.1 節を参照)
14:    for  $d \in D$  do
15:       $route(s'_1.pos \rightarrow d)$  を A*探索
16:      if  $(route(s'_0.pos \rightarrow s'_1.pos).cost + route(s'_1.pos \rightarrow d).cost < route(s'_0.pos \rightarrow s'_1.pos).cost + route(s'_1.pos \rightarrow s'_2.pos).cost)$  then
17:         $s'_2 \leftarrow s'_d$ 
18:      end if
19:    end for
20:  else
21:     $S' \leftarrow changeSchedule(q_u, S_b)$  //バス  $b$  のスケジュールに挿入 (アルゴリズム 2 を使用)
22:  end if
23:  if  $(b_{min} == null || S'.cost - S_b.cost < S''.cost - S_{b_{min}}.cost)$  then
24:     $S'' \leftarrow S', b_{min} \leftarrow b, S_{b_{min}} \leftarrow S'$ 
25:  end if
26: end for
27:  $u.d \leftarrow setPreliminaryMP(q_u.goal, S'')$  //降車地点の変更候補をユーザ情報に保持 (5.1 節および 5.3 を参照)
28: return  $S''$ 
```

- 1 行目: 挿入するバスを決めるための変数の初期化
- 2 行目: スケジューリングを行うバスを選択する.
- 3 行目: 空車を手配する場合のスケジュールを計算を開始する. $s_i.num$ は停車予定 s_i の客扱い終了時の乗車人数を表す.
- 4 行目: バスの現在地を始点 s'_0 として新しいスケジュール S' を設定する. s'_1 に対する迂回後の地点 s'_2 は暫定的にユーザの直接の目的地を設定する.
- 5 行目: 徒歩移動後に乗車する地点の候補を計算する. 詳しくは 5.1 節に示す.
- 6–12 行目: 乗車地点候補に対しそれぞれの迂回路を計算し, 乗車地点 p 前後の迂回の経路コストと, 乗車による停車 s'_p のコストの和が最も小さいスケジュールを保持する.
- 13 行目: 降車地点の候補を計算する. s'_2 に対する迂回前の地点は 5–11 行目で決定した乗車地点 s'_1 , 迂回後の地点は暫定的に降車地点から最も近い空きのあるバス待機所 $nearestDepot(q.goal)$ に設定する.
- 14–20 行目: 降車地点候補に対しそれぞれの迂回路を計算し, 乗降車地点の迂回の経路コストと, 乗降車地点の停車 s'_1, s'_d のコストの和が最も小さいスケジュールを保持する.
- 21–22 行目: 既に他のユーザの乗降地点があるバスに逐次挿入法を適用する場合の処理を行う. 詳細はアルゴリズム 2 に示す.
- 23–26 行目: スケジュールのコストを比較し, 変更前のスケジュール S_b からコストの増加が最も少ないスケジュールを保持する.
- 27 行目: ユーザ u のスケジュール決定後に, スケジュールの余裕時間に合わせて降車地点を調整するための候補地点をユーザ情報に登録する.
- 28 行目: スケジュールをユーザに通知する.

5.1 ユーザの乗降地点候補の算出

ユーザの乗降地点の候補は, ユーザの出発地および目的地からそれぞれ最大徒歩移動距離 $q_u.walk$ 以内の地点のうち, 道路の規模が一定以上の地点と, ユーザの出発地・目的地に直接迂回した場合に経由する地点を選択する. 候補を道路規模が一定以上の地点に限定する理由は, スケジューリングの計算の高速化を図ることと,

バスが細街路に迂回するのを防ぎ大通り沿いで乗降するのが望ましいと考えられることの2点である。また、道路の規模が一定以下であった場合もユーザの出発地・目的地に直接迂回した場合に経由する地点を候補に含める理由は、徒歩移動がバスの移動よりも時間を要することで、スケジュールが逼迫することである。例えば、バスが大通り沿いでユーザが乗車地点まで徒歩移動するのを停車して待つことに比較し、バスが細街路に侵入しバスの停車時間とユーザの徒歩移動距離が少なくなるようにスケジュールする方が全体の時間が短くなる場合が考えられる。また、ユーザの目的地到着の制限時刻が逼迫するスケジュールの場合、同じくバスが細街路に侵入し、ユーザの徒歩移動距離が短くなるよう降車地点を設定する必要がある場合もある。

乗降地点の候補はダイクストラ法とA*探索により経路探索を行い決定する。乗降地点の候補の設定例を図5.1に示す。まず、ダイクストラ法により最もコスト（距離）が少ないノードがユーザの最大徒歩移動距離 $q_u.walk$ を超えるまで計算を行う。距離が $q_u.walk$ 以内のノードに至る経路上のエッジのうち道路の規模が一定以上にラベル付けされたエッジ上の地点は大通り沿いとして乗降地点の候補に選択する（図5.1の赤色の範囲）。また、A*探索により、バスの前後の停車予定地点やバスの現在地からユーザの出発地・目的地に直接迂回した場合の経路を計算する。この経路に含まれるエッジ上の地点も乗降地点の候補として選択する（図5.1の橙色の範囲）。選択されたエッジ上の地点は無限に存在するため、それぞれのエッジに1つまたは複数の代表点を設定し、そのエッジにおける乗降地点とする。

5.2 バススケジュールの算出

乗車要求 q_u を既に他のユーザの乗降予定を持つバス b のスケジュール S_b への挿入するには、ユーザ u の乗車および降車の予定を S_b の何番目に割り込ませるのがコストが低いか、計算・比較する。このとき、バスの最大乗車人数や既にスケジュールされているユーザの時間制約、ユーザ u の時間制約をそれぞれ満たす必要がある。また、既に i 個の停車予定があるスケジュール S_b への挿入する最適な順番を得るためには、ユーザ u の乗車 $\Rightarrow$ 降車の順番を満たす順序対を全て $i!$ 通りの挿入パターンを試行する必要がある。一方で本手法においては、高速化のためユー

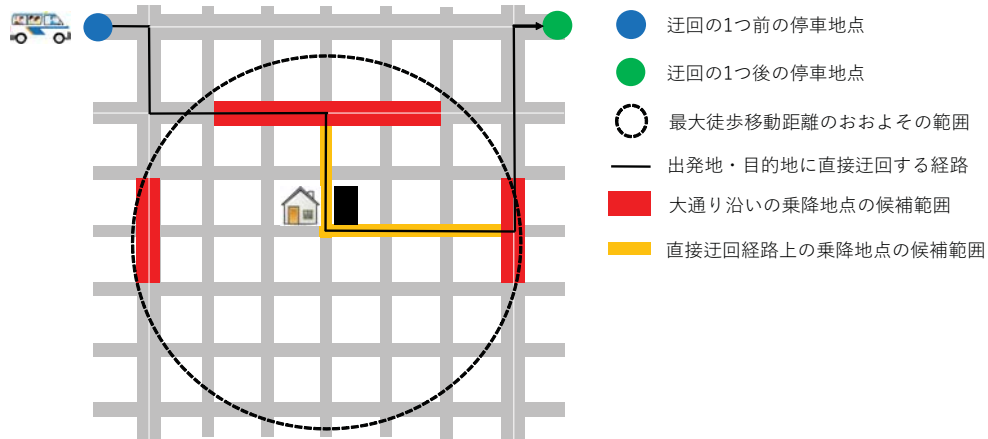


図 5.1: 乗降地点の設定例

ザ u 乗車スケジュールのみ挿入するスケジュールの中で最適なスケジュール S_p を計算し、 S_p に対してユーザ u の降車スケジュールを挿入することで、準最適解を得る。本手法における徒歩移動を含むデマンドバスのスケジューリングは、1 ユーザが複数の乗降地点の候補を持ち、そのそれぞれに対してスケジュールの計算を試行する必要があるため、乗車の挿入と降車の挿入を切り分けてスケジューリングを行う。挿入アルゴリズムはアルゴリズム 2 およびアルゴリズム 3 に示す。

Algorithm 2 バスの既存のスケジュールを変更する場合の処理 (changeSchedule)

Require: 乗車要求 q_u , バススケジュール S_b .

Ensure: 挿入後のスケジュール S'' (挿入成功時), *False* (挿入失敗時).

```
1: for  $i = 0 \dots S_b \text{ length}$  do
2:   if  $s_i.num + q_u.num > b.capacity$  then
3:     return False
4:   end if
5:   if  $slackTime(S_b, i) < k \cdot delayTime(s_i, s_{i+1}, q_u.start)$  then
6:     return False
7:   end if
8:    $P \leftarrow getMP(q_u.start, s_i.pos, s_{i+1}.pos)$  //乗車地点候補の取得 (5.1 節参照)
9:   for  $p \in P$  do
10:     $S_p \leftarrow insertion(p, S_b, i)$  //順序  $i$  に逐次挿入 (アルゴリズム 3 参照)
11:    if ( $S_p.cost < S'.cost$ ) then
12:       $S' \leftarrow S_p$ 
13:       $minIndex \leftarrow i$ 
14:    end if
15:  end for
16: end for
17: for  $j = minIndex \dots S' \text{ length}$  do
18:   if  $slackTime(S', j) < k \cdot delayTime(s'_j, s'_{j+1}, q_u.goal)$  then
19:     return False
20:   end if
21:    $D \leftarrow getMP(q_u.goal, s'_j.pos, s'_{j+1}.pos)$  //降車地点候補の取得 (5.1 節参照)
22:   for  $d \in D$  do
23:     $S'_d \leftarrow insertion(d, S', j)$  //順序  $j$  に逐次挿入 (アルゴリズム 3 参照)
24:    if ( $S'_d < S''.cost$ ) then
25:       $S'' \leftarrow S'_d$ 
26:    end if
27:   end for
28: end for
29: return  $S''$ 
```

- 1 行目: 乗車スケジュールを挿入する順番を選択する.
- 2-4 行目: スケジュールの i 番目でバスの定員に空きがあるかをチェックする.
- 5-7 行目: 時間制約に対してユーザの乗車を挿入できる見込みがあるかを計算する. $slackTime(S_b, i)$ は S_b の i 番目以降に降車するユーザのうち, 目的地到着時刻の制約と目的地到着予定時刻の差が最も小さいユーザの値 (余裕時間) を表す. また, $delayTime(s_i, s_{i+1}, q_u.start)$ はスケジュール s_i と s_{i+1} の間で $q_u.start$ まで迂回した場合のスケジュールの増加時間を表す. ユーザを出発地まで直接迎車した場合の増加時間の k 倍の余裕時間を確保できない場合, スケジュールの計算を行わない. これにより, 挿入見込みがない順序での計算を回避し高速化を図る.
- 8-16 行目: それぞれの乗車候補地点に対して迂回スケジュールを計算し, 最もコストの低い地点のスケジュールを保持する.
- 17 行目: 乗車スケジュールを挿入した順序以降で降車予定を挿入する順番を選択する.
- 18-20 行目: 乗車の挿入時と同様に, 時間制約に対してユーザの降車を挿入できる見込みがあるかを計算する.
- 21-29 行目: それぞれの降車候補地点に対して迂回スケジュールを計算し, 最もコストの低い地点のスケジュールを選択する.

Algorithm 3 徒歩移動を含む逐次挿入法 (insertion)

Require: 挿入する乗車地点または降車地点 pd , バススケジュール S_b , 乗車地点の挿入順序 i .

Ensure: Return 挿入後のスケジュール S' (挿入成功時), Flase (挿入失敗時).

```
1:  $S' \leftarrow S_b$ 
2:  $route(s'_i.pos \rightarrow pd)$  を A*探索
3:  $route(pd \rightarrow s'_{i+1}.pos)$  を A*探索
4: for  $j = i + 1 \dots S'$  length do
5:    $s'_{j+1} \leftarrow s'_j$ 
6: end for
7:  $s'_{i+1} \leftarrow s'_{pd}$ 
8:  $k = 0$ 
9: for  $j = i \dots S'$  length do
10:  if  $s'_j.pos == s'_{j+1}.pos$  then
11:     $merge(s_j, s_{j+1})$ 
12:     $k++$ ,  $j--$ 
13:  end if
14:   $s'_j \leftarrow s'_{j-k}$ 
15:  if  $s'_j.num + q_u.num > b.capacity$  then
16:    return False
17:  end if
18:   $s'_j.time \leftarrow s'_{j-1}.time + s'_{j-1}.stopTime + route(s'_{j-1}.pos \rightarrow s'_j.pos)$ 
19: end for
20:  $adjustment(S', i)$  //迂回による遅延の調整 (アルゴリズム 4 を使用)
21: for  $j = i \dots S'$  length do
22:   $q_{ipd} \leftarrow impendingQuery(s_j)$  //最も制限時刻が逼迫しているユーザの取得
23:  if  $q_{ipd}.goal.limit - time(s'_j \rightarrow q_{ipd}.goal) > s_j.time$  then
24:    return False
25:  end if
26: end for
27:  $setCost(S')$ 
28: return  $S'$ 
```

- 1 行目: 変更前のスケジュールを退避.
- 2-3 行目: 迂回経路の計算.
- 4-7 行目: スケジュールの i 番目に割り込む処理.
- 8-14 行目: 前後のスケジュールで同じ停車地点であった場合, 同時に乗降するように設定.
- 15-17 行目: バスの定員超過をチェック.
- 18-19 行目: 迂回挿入後の書く停車スケジュールの予想到着時刻を再設定.
- 20 行目: 目的地到着制限時刻に間に合わないユーザの徒歩移動距離を調整 (5.3 を参照)
- 21-26 行目: 目的地到着制限時刻に間に合わないユーザのチェック.
 $impendingQuery(s_j)$ は停車予定 s_j で降車するユーザのうち, 目的地到着時刻の制約と目的地到着予定時刻の差が最も小さいユーザを表す.
- 27-28 行目: コストを設定して挿入終了.

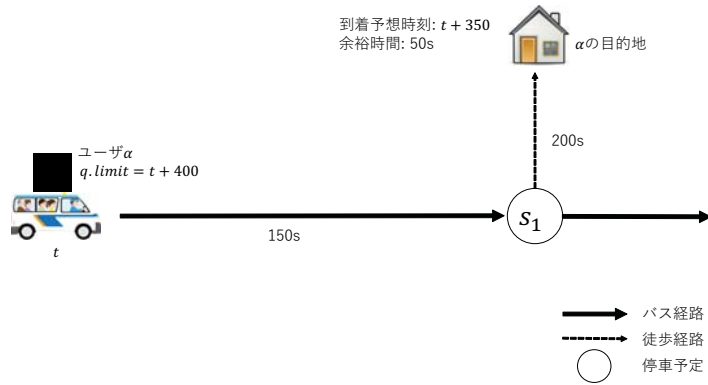
5.3 降車地点の調整

徒歩移動の案内によりデマンドバスの迂回は削減されるものの, 降車後にユーザの目的地まで徒歩移動する場合, 目的地までドアツードアで直接送り届ける場合よりも目的地到着時刻が遅くなることがある. これは, 降車後に徒歩移動する速度がバスに乗り込んでいる速度よりも遅いためである. この到着時刻の遅れにより, 乗車中のユーザの目的地到着時刻の制約と目的地到着予想時刻の差が少なくなり, 他のユーザを迂回して迎車し相乗りの機会を損失する場合があります, ドアツードア型の輸送よりもかえって非効率になってしまう場合がある.

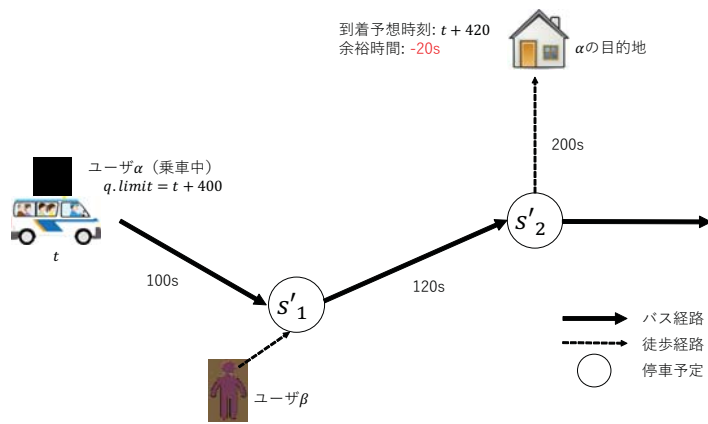
逐次挿入法によるリアルタイム処理では, 既に受理されたユーザのスケジュールは変更しない. 一方で本手法では, 乗車中のユーザの目的地到着時刻の制約が逼迫し他のユーザをスケジュールに挿入する余裕がない場合に, 乗車中のユーザの降車後の徒歩移動距離を短くし目的地到着時刻に余裕を持たせるように徒歩移動経路を変更することで, 他のユーザが相乗りした方が効率がいい場合のスケジュールの損失を防ぐ. 降車後の徒歩移動経路の調整例を図 5.2 に示す. 図 5.2(a) は, ユーザ β のスケジュール挿入前のユーザ α のスケジュールを表す. 現在時刻 t から 150 秒

乗車後に停車予定 s_1 で降車し、200 秒かけて徒歩移動により目的地に到着する予定となっている。ユーザに設定された目的地到着制限時刻は $t + 400$ 秒で、目的地到着予想時刻に対して 50 秒の余裕がある。図 5.2(b) は、ユーザ β のスケジュール挿入後のユーザ α のスケジュールを表す。ユーザ β の挿入によりユーザ α は降車前に迂回が発生し、目的地到着制限時刻を 20 秒オーバーしてしまう。逐次挿入法の既受理されたユーザのスケジュールは変更しない手法では、ユーザ β はリジェクトまたは他のバスのスケジュールに挿入され、ユーザ β 付近を通過するバスに乗車する効率の良いスケジューリングの機会を損失してしまう可能性がある。そこで、図 5.2(c) では、ユーザ α の徒歩移動距離が短くなるように降車地点を変更することで目的地到着制限時刻に間に合うようにし、ユーザ β を迎車することができるようにスケジューリングしている。

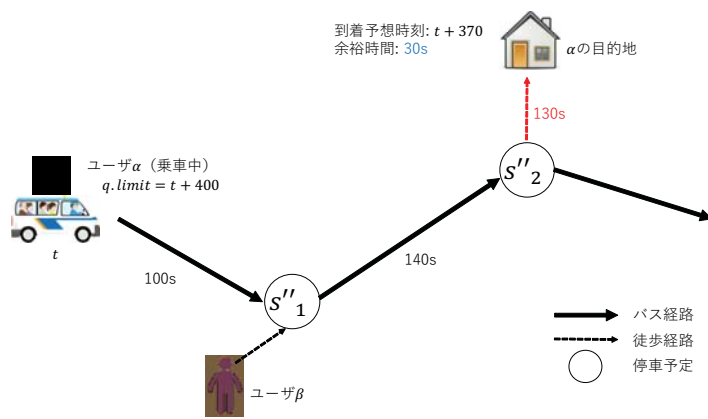
また、降車地点の調整の詳細なアルゴリズム 4 に示す。ユーザは乗車要求が受理された時点で、バスの前後の停車予定からユーザの目的地までの迂回経路上の地点の集合を保持しており、これを用いて降車地点の再計算を行っている。計算をバスの前後の停車予定からユーザの目的地までの迂回経路上の地点に制限することにより、計算回数の削減を行っている。



(a) ユーザβ挿入前



(b) ユーザβ挿入後



(c) ユーザα降車地点調整後

図 5.2: 降車地点の調整例

Algorithm 4 降車後の徒歩移動距離の調整 (adjustment)

Require: バススケジュール S , 乗車地点の挿入順序 i .

```
1: for  $j = i \dots S$  length do
2:    $q_{ipd} \leftarrow impendingQuery(s_j)$ 
3:   if  $q_{ipd}.limit - time(s_j \rightarrow q_{ipd}.goal) > s_j.time$  then
4:     if  $getDeliverNum(s_j) > 1$  then
5:       for  $k = j \dots S$  length do
6:          $s_{k+1} \leftarrow s_k$ 
7:       end for
8:        $s_j \leftarrow divide(s_{j+1}, q_{ipd})$ 
9:     end if
10:    for  $d' \in 1, 2 \dots q_{ipd}.D'$  length do
11:       $S' \leftarrow S$ 
12:       $route(s'_{j-1} \rightarrow d')$  を A*探索
13:       $route(d' \rightarrow s'_{j+1})$  を A*探索
14:       $s'_j \leftarrow s_{d'}$ 
15:      if  $q_{ipd}.limit - time(s'_j \rightarrow q_{ipd}.goal) \leq s'_j.time$  then
16:         $setCost(S')$ 
17:        if  $(S'_d < S''.cost)$  then
18:           $S'' \leftarrow S'_d$ 
19:        end if
20:      end if
21:    end for
22:     $S \leftarrow S''$ 
23:  end if
24: end for
```

1-2 行目: 目的地到着時刻の制約と目的地到着予定時刻の差が最も小さいユーザを取得.

3-9 行目: 目的地到着時刻の制約を満たさないユーザを停車予定から分離.

10-24 行目: 目的地到着時刻の制約を満たさないユーザの他の降車地点地点の候補を用いてスケジュールを再計算し, 制約を満たすスケジュールを作成, 最もコストの低いスケジュールを保持.

第 6 章 評価実験

評価実験では，シミュレーションにより徒歩移動を含むデマンドバスの利便性，スケジューリング性能，クエリ棄却率および事業者の利益を評価する．実際の地図にもとづくシミュレーション環境において，従来のデマンドバスの方式であるフルデマンド式およびセミデマンド式に加え，タクシーとの比較を行う．

6.1 評価項目

評価項目はユーザの利便性に関する項目，バスのスケジューリングに関する項目，クエリ棄却率とバス事業者の利益が考えられる．そのそれぞれについて述べる．

6.1.1 ユーザの利便性に関する項目

ユーザの利便性に関する項目として，待ち時間と徒歩移動時間が挙げられる．待ち時間は，ユーザが乗車地点に到着してからバスに乗車するまでにかかる時間とする．徒歩移動を伴わない場合は，乗車要求を発行した時間からバスに乗車するまでにかかる時間とする．待ち時間が短いほどユーザの利便性が高いといえる．

徒歩移動時間は，出発地から乗車地点まで歩いた時間と降車地点から目的地まで歩いた時間を合算する．徒歩移動時間が短いほどユーザの利便性が高いと言える．

6.1.2 バスのスケジューリングに関する項目

バスのスケジューリングに関する項目として，バスの走行距離および走行時間と，平均乗車人数が挙げられる．バスの走行距離および走行時間が短いほどユーザの乗降地点へ向かう迂回が少なく，スケジューリングの柔軟性が高いと言える．走行時間には営業所や駅において空車の状態で待機する時間は含まないものとする．

平均乗車人数は，シミュレーション終了時刻 $endTime$ までの各時刻 t における全ての走行中のバスの乗車人数を加算し，その平均を求める．平均乗車人数の計算は回送中のバスに対しても行う．平均乗車人数が高いほど短い迂回で多くのユーザ

を輸送することができ、スケジューリングの性能が高いといえる。

6.1.3 クエリ棄却率

クエリ棄却率は、すべての乗車要求に対して制約を満たす範囲内でスケジュールを見つけることができなかった乗車要求の割合とする。例えば 100 件の乗車要求に対して 20 件の乗車要求に対して制約を満たす乗車スケジュールを計算できなかった場合、クエリ棄却率は 20% となる。クエリ棄却率が低いほどユーザの利便性が高くスケジューリングの性能が高いといえる。

6.1.4 事業者の利益

事業者の利益は、式 4.3.14 に示すように乗客から得た運賃収入の総和とバス事業者の運行支出の差として定義する。本評価実験における運賃収入とバス事業者の支出の設定方法について述べる。

運賃収入

運賃収入はわが国で運行されている路線バスで適用されている計算方法に準じて設定する [30]。本評価実験で採用する運賃形態は、初乗り運賃と距離に応じた運賃の合計によって運賃を決定する。また、2km 以下の短距離の利用には 2 倍の割増運賃を適用する。ここで初乗り運賃を $Bsc[\text{円}]$ 、距離に応じた基準運賃を $Std[\text{円/km}]$ 、ユーザ u の運賃を適用する距離を $Dist_i[\text{km}]$ とすると、ユーザ u が支払う運賃 $u.fare()$ は式 6.1.1 のように表すことができる。

本研究では $Bsc = 150, Std = 30$ とする。またデマンドバスの場合路線バスとは異なり、他の乗客のスケジューリングによって乗車中のユーザの乗車距離が増加し、 $Dist_u$ を乗車距離としてしまうとユーザにとって不利益となることが考えられる。よって本研究では $Dist_u$ を乗車地点から降車地点まで直接移動した場合の経路の距離とする。また、本提案手法では降車地点がアルゴリズム 4 によって変更される場合があるが、クエリ発行時に決定した乗降地点に対し運賃を決定し、後から運賃が増減することはないものとする。

$$\begin{aligned} u.fare() &= Bsc + Std \times Dist_u \times 2 \quad (Dist_u \leq 2000) \\ u.fare() &= Bsc + Std \times 2 \times 2 + Std \times Dist_u \quad (Dist_u > 2000) \end{aligned} \quad (6.1.1)$$

運行支出

バスの事業者の運行費用は実際にバスを動かすための費用の他に、税金や保険料、管理費など様々なものがある [31]. そのうち、本研究でバス事業者の運行支出は、バスの台数、走行距離、走行時間、スケジューリングによって大きく影響を受けると考えられる燃料油脂費、車両費、人件費の 3 つを考慮する.

燃料油脂費 $cost_{fuel}$ は、バスの走行距離およびバスの単位走行距離あたり燃費と燃料価格によって決定する. 走行距離を $dist[km]$, 燃費を $FC[L/km]$, 燃料価格を $P_{fuel}[\text{円}/L]$ として、バス b が消費する燃料油脂費は式 6.1.2 に示すように計算することができる.

$$b.cost_{fuel}(dist) = \frac{dist}{FC} \times P_{fuel} \quad (6.1.2)$$

本研究で使用を想定する車両は 10 人乗りのマイクロバスを想定している. 燃費の参考値は $FC = 9.5$ であり、本研究ではこれを用いる [32]. また、1L あたりの軽油の産業用価格は、資源エネルギー庁のデータによると 2017 年 9 月時点の全国平均は 98.604 円である [33]. 本研究ではこれを切り捨て、 $P_{fuel} = 98$ とする.

次に車両費 $cost_{vehicle}$ について考える. 車両費は購入にかかる費用 $P_{vehicle}[\text{円}]$ を耐用日数 $L[\text{日}]$ として日割りした 1 日分とする. よって、バス b の車両費 $b.cost_{vehicle}$ は式 6.1.3 のように表すことができる.

$$b.cost_{vehicle} = \frac{P_{vehicle}}{L} \quad (6.1.3)$$

本研究で想定する 10 人乗りマイクロバスの参考価格は 3,521,782 円である [32]. 耐用年数は 10 年と仮定する. よって $P_{vehicle} = 3,521,782$, $L = 3652$ とする.

人件費はバスの運転手に支払われる給与 $cost_{slr}$ を考える. 運転手はバス 1 台につき 1 人必要であるものとし、勤務時間に応じて給与を支払う. よって、バス b

の運転手に支払う給与は、単位時間当たりの給与を Slr [円/h]、給与が支払われる時間を t として、次の式 6.1.4 のように表すことができる。本研究で全てのバス運転手は始業時間に一齐に集合し、最後のバスが営業所に帰還した時点で一齐に解散するものとする。集合から解散までの時間全てに給与を支払うものとする、 $t = endTime$ である。

$$b.cost_{slr}(t) = Slr \times t \quad (6.1.4)$$

総務省が実施した平成 28 年賃金構造基本統計調査によると、営業用バス運転者の 1 時間当たりの給与額は男女平均で 1240[円/h] である [34]。本研究においても $Slr = 1240$ とする。

これらの燃料油脂費、車両費、人件費を考慮すると、バス b の終業時の運行支出 $cost(b)$ は次の式 6.1.5 のように表される。また、逐次挿入法の計算に用いられるそれぞれのスケジュールのコスト $S_b.cost$ は式 6.1.6 のように定義することができる。 $S_b.cost$ では、ユーザの挿入の有無によって変化しない車両費は考慮しない。

$$cost(b) = b.cost_{fuel}(b.dist) + b.cost_{vehicle} + b.cost_{slr}(endTime) \quad (6.1.5)$$

$$S_b.cost = b.cost_{fuel}(S_b.route.dist) + b.cost_{slr}(s_n.time - s_0.time) \quad (6.1.6)$$

6.2 比較手法

提案手法 (With Walk: WW) に対して、以下の 3 つの比較手法を考える。

タクシー (TX) タクシーのように他のユーザと乗合を行わず、経路は自由である運行方式。ドアツードアによりユーザを輸送するため、乗車地点と降車地点はユーザの出発地と目的地と一致する。

セミデマンド (Semi Demand: SD) デマンドバスのうち、経路は自由だが乗降地点をバス停に限定する方式。ユーザは出発地・目的地と最も距離が近いバス停との間を徒歩移動する。

フルデマンド（Full Demand: FD） デマンドバスのうち，経路は自由だが，ドアツードアの輸送で乗降地点が出発地と目的地と一致する運行方式．

それぞれの比較手法は，逐次挿入法を用いた提案手法のアルゴリズムに対し，制約を加えることで実現できる．提案手法では乗降地点の候補は一定距離以内の範囲のあらゆる地点であるが，これを出発地と目的地のみに制限することでフルデマンド式となる．さらに最大乗車人数の制約に関して，同時に乗車できる人数を 1 クエリに制限することで，タクシーの運行方式となる．一方で乗降地点の候補を最も近いバス停に相当する地点に置き換えると，セミデマンド式の運行方式になる．

6.3 実験環境

6.3.1 道路の設定

実験に用いる地図は，散村，塊村，山間部の 3 つの異なる典型的な村落形態を持つ 10km 四方の地図を，OpenStreetMap（OSM）[10] から取得する．それぞれの地図に関する情報は表 6.1 にまとめる．地図と駅，営業所，バス停をプロットした図は図 6.1 に示す．

表 6.1: 地図の詳細

村落の形態	散村	塊村	山間部
中心地	砺波駅（富山県砺波市）	河毛駅（滋賀県長浜市）	南条駅（福井県南越前町）
中心座標	(36.6366, 136.9537)	(35.4485, 136.2495)	(35.8323, 136.1934)
ノード数	4,394	4,040	1,203
バス用エッジ数	13,219	11,540	3,056
徒歩用エッジ数	12,985	11,607	2,827
駅数	5	4	3
営業所設定場所	砺波市役所	長浜市役所湖北支所	南越前町役場
バス停数	114	190	41
建物数	44,503	51,493	10,490

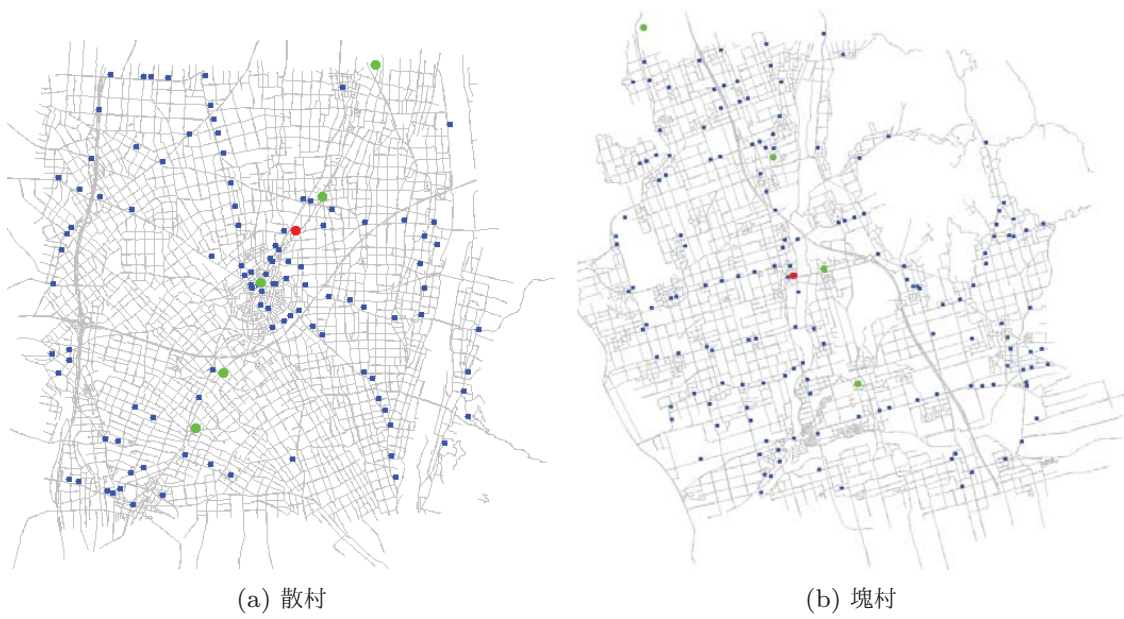


図 6.1: 実験に用いる地図
赤点:営業所 緑点:駅 青点:バス停

地図の特徴

それぞれの地図に該当する地域は、いずれも小規模な地方都市や過疎地域であるが、それぞれ異なる村落の形態を持つ。散村に該当する地域は、富山県砺波駅を中心とするエリアである。地図全体は平地で、地図の中心部は建物が集中する。一方で地図の周辺部は国内最大の散村地帯に該当する。散村は、耕地の中に孤立荘宅が点在する村落携帯で、家々が一軒一軒離れていることが特徴である。

塊村に該当する地域は、滋賀県河毛駅を中心とする旧湖北町のエリアである。塊村は民家がひとかたまりに集合している村落の形態である。この地域では、数十件単位の集落が耕地の中に点在している。地図のほとんどは平地であるため、この地域は塊村の中でも可住域が2次元的に広がっているのが特徴である。また、地図中心部への建物の集中はない。

山間部に該当する地域は、福井県南条駅を中心とするエリアである。砺波市と旧湖北町の地域では平地が広がり可住地が2次元的に広がっていたのに対し、この山間部では可住地はエリアを縦断する川沿いに限られるため、1次元的な広がりを持つ。集落は住居が数十件単位のものが川沿いに点在しているほか、地図北側の越前市にまたがる部分に規模の大きい集落が見られる。

制限速度の設定

OSM より取得した地図には、道路の規模に応じてランク分けがなされている。本研究ではそれぞれのランクに応じてバスの制限速度を決定する。道路のランクと制限速度の対応は表 6.2 に示す。なお、徒歩移動に関しては道路の規模にかかわらず、一律に 5km/h が最高速度とする。

駅および営業所の設定

デマンドバスは市町村などの地方自治体が運営することを想定し、営業所は地図内で市町村の庁舎や支所に該当する地点に設定する。10km 四方の地図の大きさでは市町村の庁舎や支所の数が少ないため、手動で該当する地点をエッジ上の地点と対応させ割り当てる。

駅は OSM 内の情報を用いて設定する。OSM の地図情報には一部のノードに対し鉄道駅のタグが付けられている。それらのノードに対し、最も距離が近いエッジ

表 6.2: 道路のランクと制限速度の対応

OSM によるタグ	該当する道路	制限速度 [km/h]
motorway	自動車専用道路	100
trunk	motorway 以外の国道	60
primary	主要地方道	50
secondary	一般都道府県道	50
tertiary	市町村道	40
unclassified	市町村道 (1 車線)	30
residential	居住地域内道路	20
service	敷地内道路	10

上の地点を鉄道駅として割り当て，バスが待機する場所とする．

バス停の設定

比較対象であるセミデマンド式の乗降地点となるバス停は，実際の地点の情報を
用いる．国土交通省は実際のバス停のデータを公開している [35]．本研究ではこの
データから対象地図内のバス停の緯度経度を抽出し，地図内の最も距離が近いエッ
ジ上の地点を割り当てる．

エッジ上の代表点

乗降地点の候補を選択する際エッジ上の地点は無数にあるため，そのエッジの代
表点を設定する必要がある．本研究では，エッジの中間点を代表点とし乗降はいず
れかのエッジの中間点で行うものとする．また，駅，営業所，バス停および建物は，
それらが位置する座標に最も距離が近いエッジの代表点である中間地点に割り当て
るものとする．

6.3.2 クエリの設定

本研究では，それぞれの地図の特徴的な村落の形態をクエリの出発地および目的
地に反映することで現実性を持たせている．国土地理院が公開している基盤地図情
報 [36] の建築物の外周線の緯度経度を抽出し，建物の中心座標を計算することで建

物の代表点の緯度経度を得る．クエリの出発地および目的地はそれぞれ建物の1つをランダムに選択し，建物の座標に最も近いエッジ上の地点を割り当てる．これにより村落の形態に応じた建物分布を反映したクエリを生成可能である．それぞれの地図におけるクエリの乗降地点のプロット例を図 6.2 に示す．散村ではクエリの乗降地点が分散し，塊村では乗降地点が集中しているため，それぞれの特徴を反映できていることが分かる．山間部では乗降地点が1次元的に分散している．

乗車要求を出す時刻 $q_u.t$ は，クエリ件数 Q ，平均 λ のポアソン分布により決定する．1 クエリの乗車人数 $q_u.num$ は，1 から 1 クエリあたりの最大乗車人数 num_{max} までの一様分布に従いランダムに決定する．

それぞれのユーザの目的地到着制限時刻は式 4.3.12 のように，定数 C および係数 k_{limit} を用いて定める．路線バスの表定速度は 10km/h から 15km/h 程度であることに対し，車両全体での平均速度は 34.3km/h で 3 倍前後の開きがある [37][38]．また，バスに乗車するためにはバス停まで移動する時間と待ち時間で 5 分程度は必要であると仮定し，本研究では $C = 300$ ， $k_{limit} = 3.0$ とする．

6.3.3 シミュレータ

バスの走行および徒歩移動のシミュレートは交通流シミュレータ SUMO[11] により行う．SUMO はドイツ航空宇宙センターが開発したミクロ交通流シミュレータで，個別の車両や徒歩移動の動きを信号等を考慮して地図上で再現できる．

本研究では OSM より取得した地図データを SUMO に入力し，提案手法により計算したスケジュールの経路と停車予定を逐次 SUMO に入力することで，外部からバスをリアルタイムに制御する．徒歩移動についても外部で計算した経路を SUMO に入力する．バスの位置および徒歩移動中のユーザの位置は 1 タイムステップ (1 秒) ごとに監視し，SUMO から出力する．

6.3.4 パラメータ

本研究では，表 6.1 に示すそれぞれ地図およびバス台数およびクエリ件数を変化させ評価実験を行う．まず初めにクエリ件数を従来研究の中規模都市よりも低需要

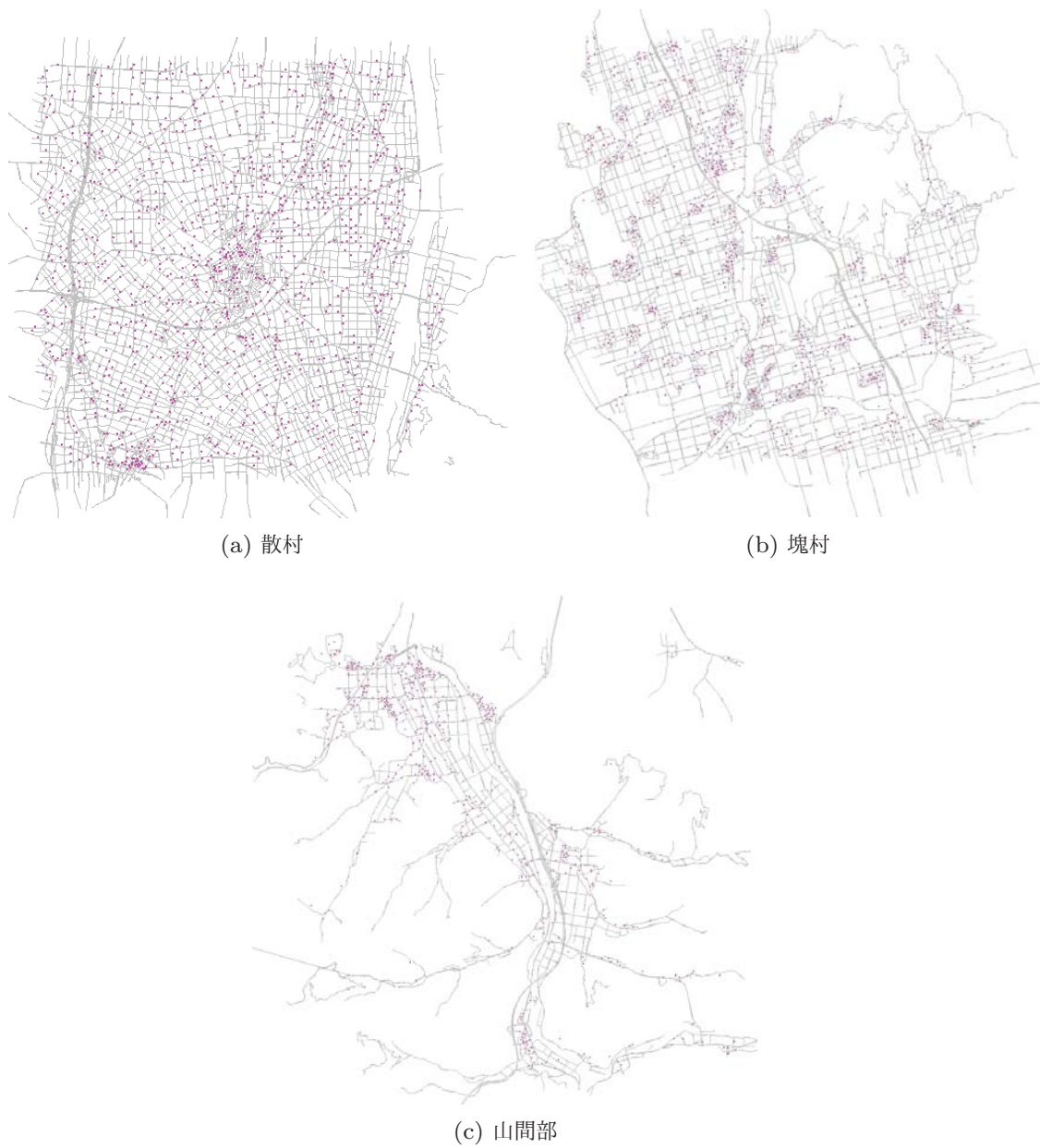


図 6.2: クエリの乗降地点のプロット例

であるがある程度の需要は確保できる場合を想定し，クエリ件数を 800 件/約 3 時間に固定し，バス台数を 5-60 台の間で変化させて評価を行う．次に現状の国内の

デマンドバスの利用人数を参考に、クエリ 50 件/10 時間に対してバス台数 5 台の場合の評価を行う。この評価ではクエリ 50 件/バス 5 台の比率でクエリ件数およびバス台数を変化させる。

その他固定するパラメータは表 6.3 に示す値を用いる。クエリ件数固定の場合と非固定の場合で値が異なる場合は、(クエリ件数固定/非固定)の順に掲載する。いずれの評価実験においてもそれぞれのパラメータにおける試行回数は 30 回とし、その平均値を出力する。

表 6.3: パラメータ

パラメータ	値	パラメータ	値
バス台数 $B.num$	5-60 台 / 5-40 台	駅のバス容量 $station_i.c$	20 台
バス客員定員 $b.c$	9 人	バスの移動速度係数 k_{speed}	0.33
クエリ件数 $Q.num$	800 件 / 50-400 件	初乗り運賃 $B.sc$	150 円
ポアソン分布平均 λ	12.5s / 720-90s	基準運賃 Std	30 円/km
1 クエリの最大人数 num_{max}	4 人 / 3 人	燃費 FC	9.5L/km
最大徒歩移動距離 $q_u.mwd$	1000m	燃料価格 P_{fuel}	98 円/L
目的地到着制限時刻 定数 C	300s	車両価格 $P_{vehicle}$	3,521,782 円/台
目的地到着制限時刻 係数 k_{limit}	3.0	車両耐用日数 L	3652 日
1 人あたりの乗降時間 k_{stop}	10s		

6.4 クエリ件数を固定した場合の実験結果および考察

初めにクエリ件数を 800 件に固定しバス台数を 5-60 台で変化させた場合の結果と考察について述べる。

6.4.1 待ち時間および徒歩移動時間

ユーザの乗車までの待ち時間 (図 6.3) は、バス台数が増えるにつれて減少し、散村および山間部において提案手法は、フルデマンド式と比較し 2 分から 3 分程度、タクシーと比較し 6 分から 8 分程度短縮される結果となった。またセミデマンド式は提案手法よりも 2 分から 3 分程度短いことが分かった。セミデマンド式の待ち時間が提案手法より短い結果となったのは、セミデマンド式の徒歩移動時間が散村と山間部で極端に長いため (図 6.4)、バスがユーザの徒歩移動終了を待つことにな

り、ユーザの待ち時間が短くなっていると考えられる。

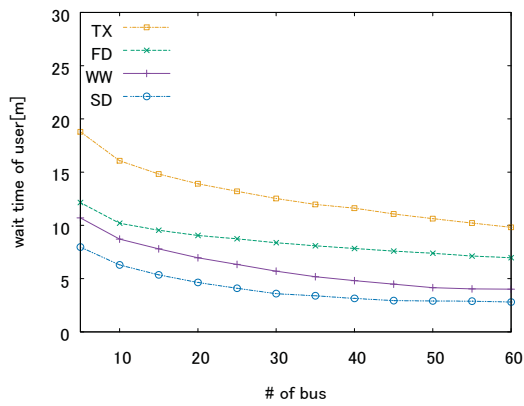
一方で塊村においては、バス台数が少ない場合に提案手法とセミデマンド式の待ち時間が長くなる傾向にあった。そのため、バス台数が 15 台以下の場合フルデマンド式の待ち時間が最も短く、台数が増えるにつれてセミデマンド式および提案手法の待ち時間のほうが短くなった。塊村ではバス停と集落の位置がおおよそ一致すると考えられ、長い距離を歩かずともバス停やバスの迂回が少なくなる乗車地点に辿り着くことができるため、特にバス台数が少ない場合に散村よりも待ち時間が長くなったと考える。

次にユーザの乗車前と降車後の徒歩移動時間の合計について述べる（図 6.4）。提案手法は、おおむねどのバス台数においても散村では 16 分程度、塊村では 19 分程度、山間部で 12 分程度の徒歩移動時間となり、散村および山間部ではセミデマンド式よりも徒歩移動時間を削減した。散村ではクエリが分散するにもかかわらず塊村よりも徒歩移動時間が短い理由は、クエリが分散していることにより $q_u.goal.kimit$ の制約を満たしにくく、アルゴリズム 4 に示す降車後の徒歩移動を短くする処理を行う回数が増えるためであると考えられる。

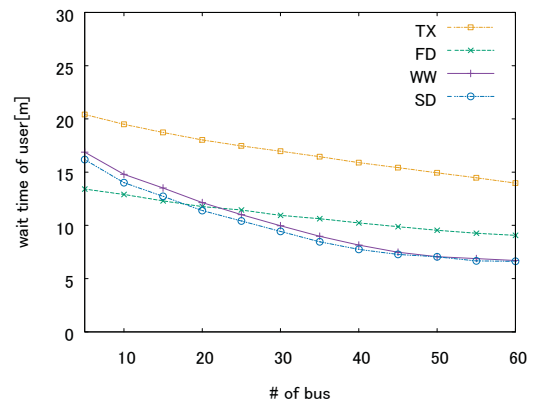
特に散村および山間部では、提案手法の待ち時間はセミデマンド式よりも長い結果になったが、徒歩移動時間を含めると乗車要求から乗車するまでの時間はセミデマンド式よりも提案手法の方が短かった。一方で提案手法よりもフルデマンド式およびタクシーは待ち時間が長いものの、徒歩移動時間がないため実際に乗車するまでの時間は提案手法よりも短いことが分かった。よって、利便性では提案手法はタクシーやフルデマンド式よりも劣るが、セミデマンド式と比較すると同等、ないしはより優れていると考えられる。

6.4.2 提案手法におけるユーザの旅行時間

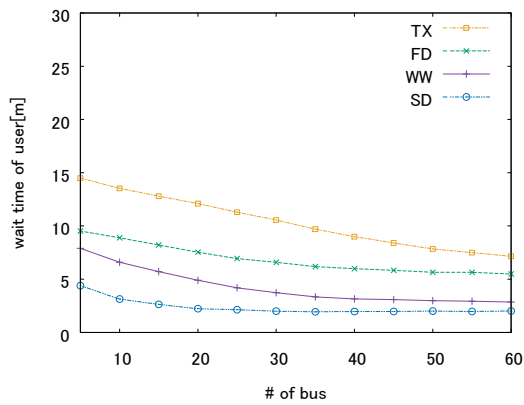
提案手法における乗車要求の発行から目的地到着までにかかるユーザの平均旅行時間と、出発地から目的地までの直接移動時間をもとに計算される目的地到着時刻の平均制約時間を図 6.5 に示す。バス台数を増加させた場合、1 台のバスに乗車するユーザの数が減少しスケジュールに余裕が生じるため、待ち時間と乗車時間が減少する。一方で、本手法ではスケジュールに余裕がある場合でもバスの運行コスト



(a) 散村



(b) 塊村



(c) 山間部

WW: 提案手法
FD: フルデマンド式
SD: セミデマンド式
TX: タクシー方式

図 6.3: ユーザの待ち時間

が少なくなるように乗降地点を設定するため、バス台数を増加させた場合でも徒歩移動時間は変化しない結果となった。

平均制約時間は乗車要求の発行から散村、塊村、山間部でそれぞれ 64.1 分、68.6 分、49.9 分となっている。いずれの地図においても、ユーザの平均旅行時間は平均制約時間と比較し 55% – 91% 程度となっている。本評価実験ではユーザの目的地到着時刻は出発地から目的地までの移動時間の 3 倍 +300 秒と固定しているが、塊村のバス台数が少ない場合を除きユーザの旅行時間は制約時間に対して余裕がある

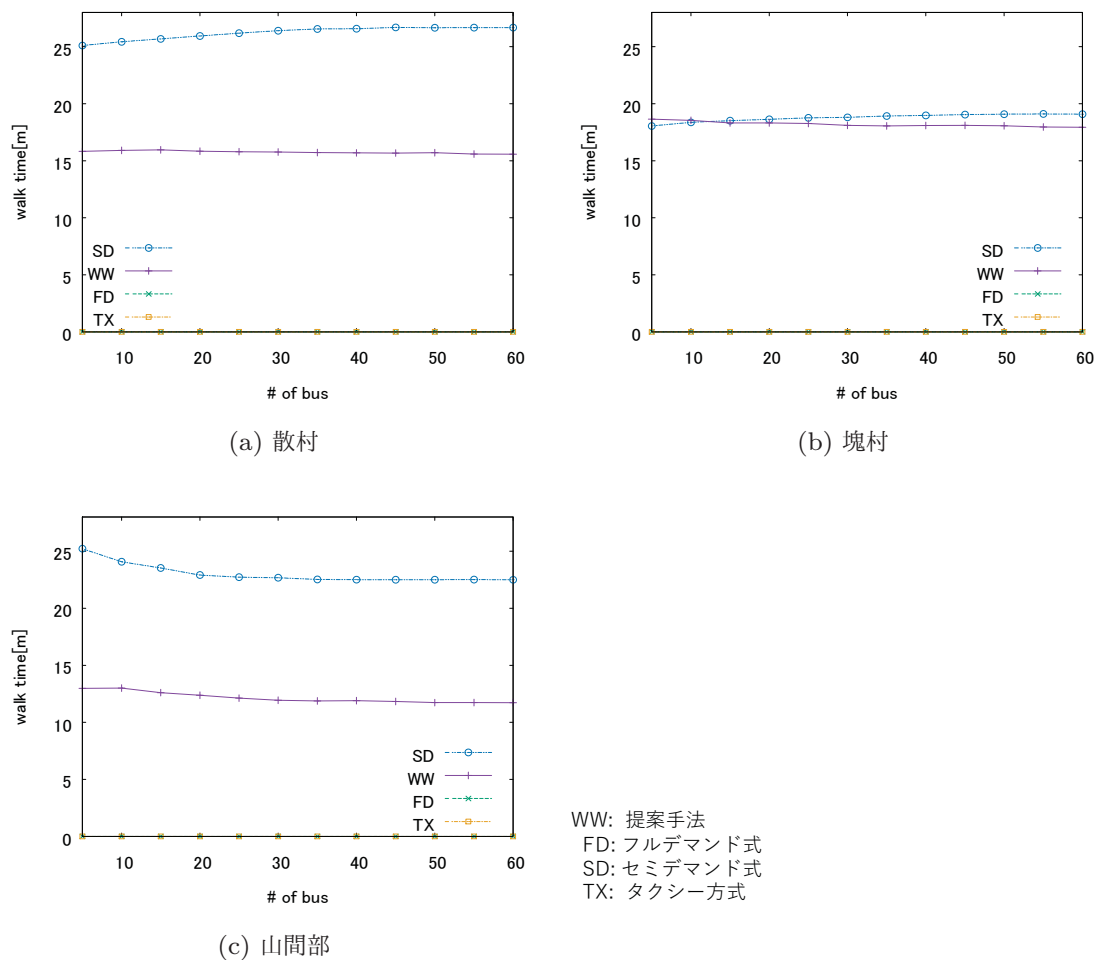


図 6.4: ユーザの徒歩移動時間

結果であるため、時間制約を大きく短くしない限りは結果にあまり変化は生じないと推測する。一方で、バス台数を増加させた場合にはクエリ棄却率は減少し（後述，図 6.6），ユーザの旅行時間も減少することから，ユーザをより多く受理するためには十分なバス台数を確保しユーザの出発地付近にバスが巡回していることが重要であると考えられる。

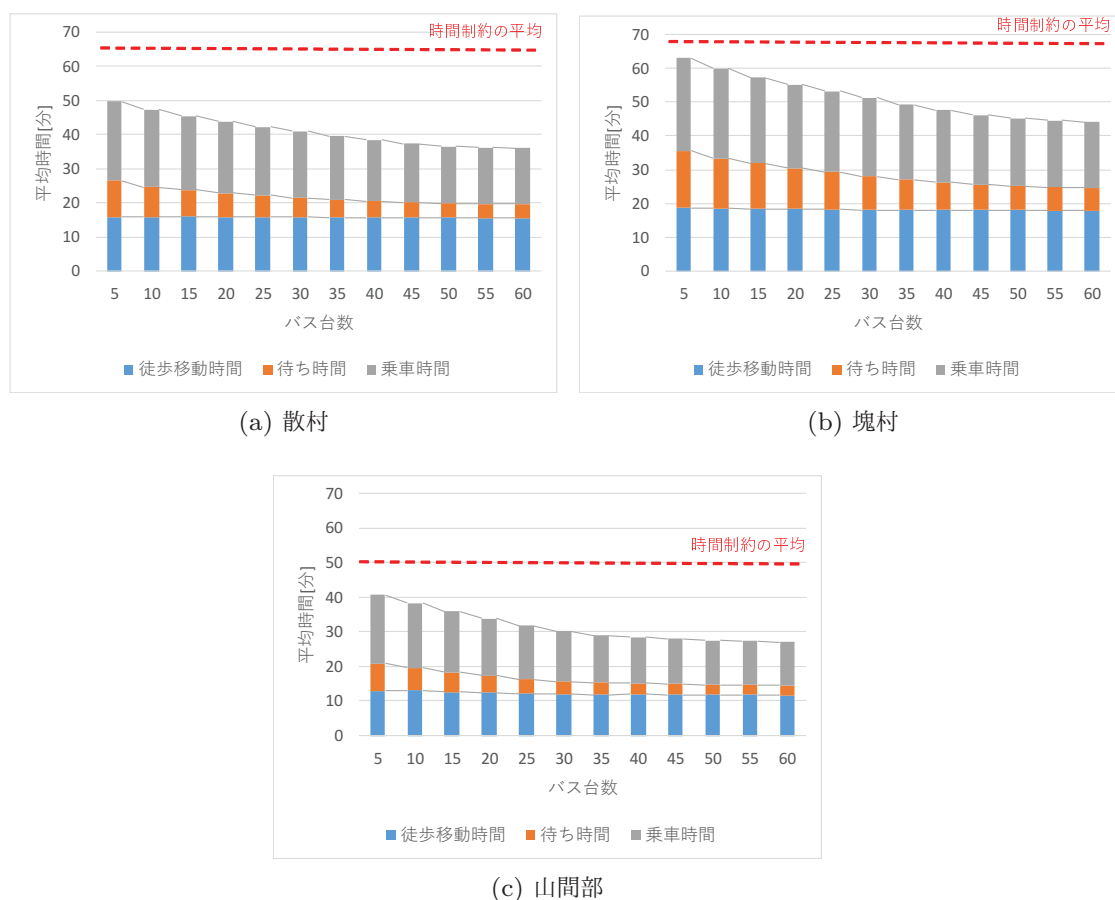


図 6.5: 提案手法におけるユーザの平均旅行時間と平均制約時間

6.4.3 クエリ棄却率および収益

提案手法のクエリ棄却率は、比較手法より低い結果となった（図 6.6）。提案手法、フルデマンド式、タクシーについてはいずれの地図においても同様の傾向を示し、バス台数が 60 台の場合においてタクシーはクエリ棄却率が 40–50% 程度あることに対し、フルデマンド式では 13–17% 程度、提案手法では 3–9% 程度となっている。山間部において提案手法は、散村・塊村よりも数 % 程度クエリ棄却率が高い結果となったが、山間部は道路に 2 次元の広がり少なく、徒歩移動できる範囲が小さいためであると考えられる（図 6.4）。

セミデマンド式のクエリ棄却率は、それぞれの地図で差異がみられた。塊村においては、バス台数が 45 台以下の場合にフルデマンド式よりも低いクエリ棄却率を示したことに対し、散村ではいずれのバス台数においてもフルデマンド式よりも高いクエリ棄却率を示した。散村においてセミデマンド式のクエリ棄却率が高い理由として考えられることは、散村に該当する砺波市付近では塊村が見られる旧湖北町付近よりもバス停の数が少ないことと、散村地帯でクエリが分散しているためバス停まで歩く距離が長くなることにより旅行時間が長くなり（図 6.4）、 $q_u.goal.limit$ の制約を満たしにくくなることが考えられる。またセミデマンド式では、ユーザの指定したバス停がバスの現在地や他のユーザの乗降地点に対して適切とは限らず、多少遠いバス停でも制約の範囲内で乗車要求を受理しやすい地点が見逃されている可能性も考えられる。一方で提案手法の場合、乗降はバス停に限定しておらず、 $q.goal.limit$ の制約を満たしにくいユーザに対してアルゴリズム 4 に示す降車後の徒歩移動距離を短くする処理を行い、またシステム側で乗車要求を受理できる乗降地点を提案するため、クエリが分散する散村においても低いクエリ棄却率を示したと考えられる。山間部に該当する南越前町付近はバス停の数が少なく、特に地図中心部にバス停が存在しなかったため、セミデマンド式で高いクエリ棄却率を示した。

提案手法の収益は、特に道路の 2 次元的広がりがある、散村および塊村において比較手法よりも高い結果を示した。これらの地域で収益のピークはクエリ 800 件に対してバス台数 45 台の場合であり、このときフルデマンド式に対して散村で約 39%、塊村でも約 26% の運行による収益が増加した。セミデマンド式と比較した場合、セミデマンド式がフルデマンド式よりも良好な結果を示す塊村においても、提案手法は約 21% の収益が増加した。一方で、道路の 2 次元的広がりが少ない山間部においては、フルデマンド式と比較した収益の増加率は散村・塊村よりも少ないものの、収益のピークのバス台数 35 台の場合で 12% 程度の増加となった。

次に、提案手法の収益の増加率をすべてのバス台数の場合の平均でみると、3 つの地図の平均でフルデマンド式と比較して 29–40% 程度増加する結果となった。また、セミデマンド式と比較して提案手法は塊村で約 18% 収益を増加させ、散村においては約 100% の収益増加率を示した。

特にセミデマンド式はバス停を用いるためユーザの乗降を集約でき一見すると効率が良い一方、村落の形態に大きな影響を受ける。一方で提案手法は、システム側

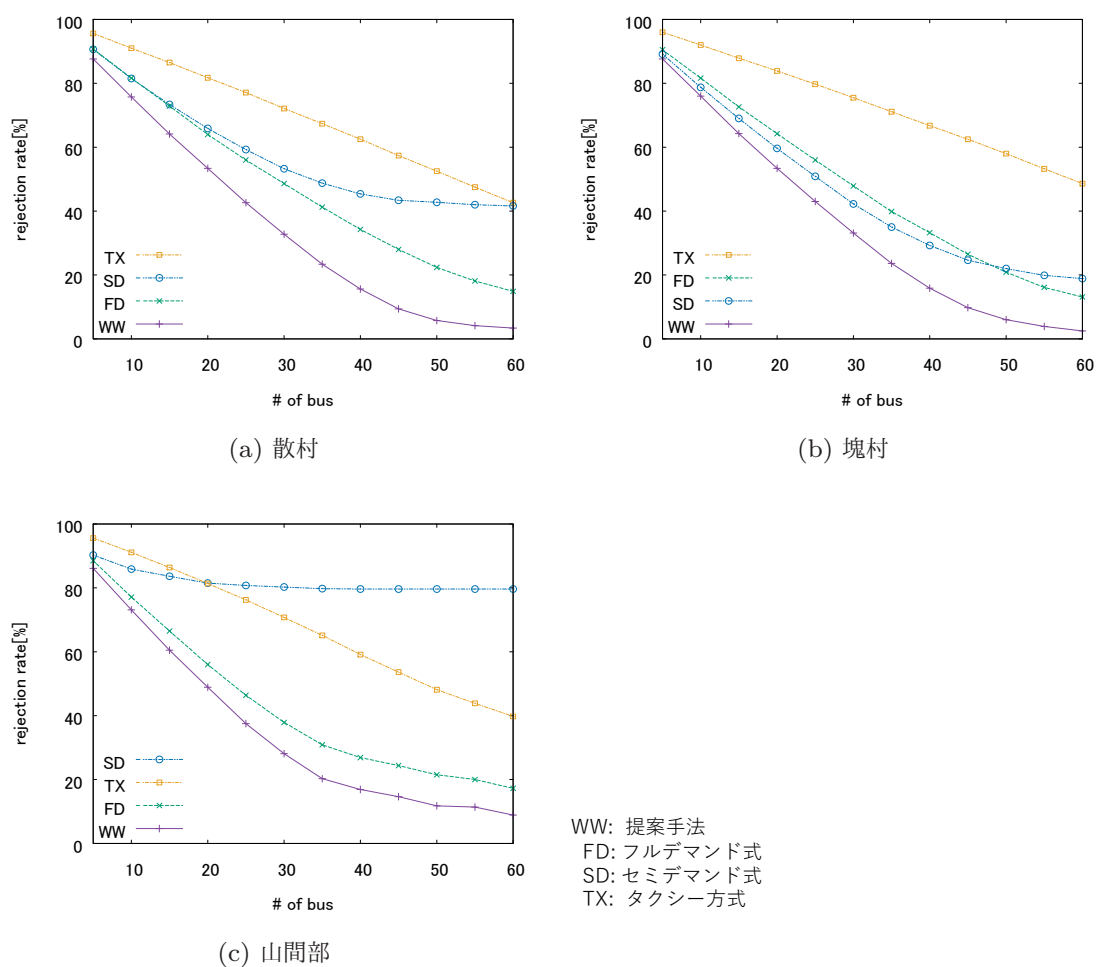
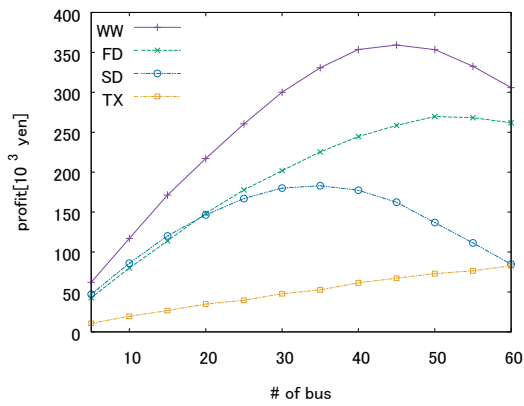
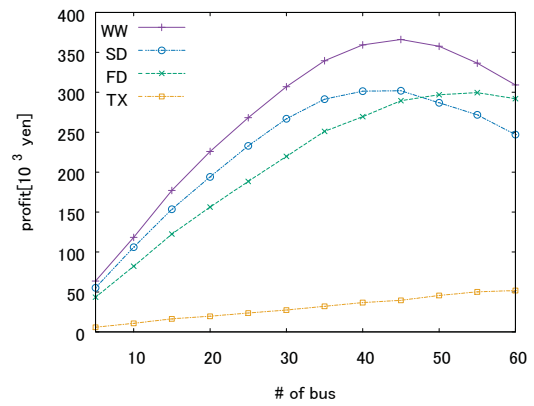


図 6.6: クエリ棄却率

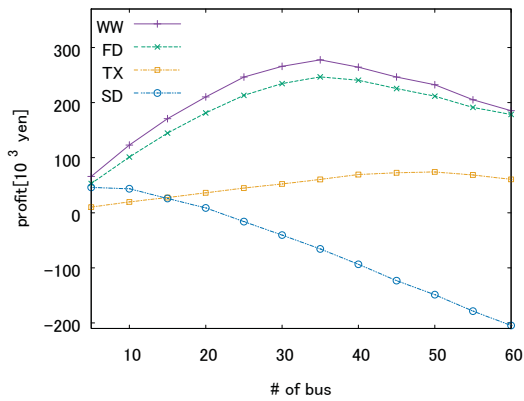
が状況に合わせて乗降地点を柔軟に設定する。そのため、フルデマンド式の村落の形態による影響の受けにくさと、セミデマンド式の乗降の集約のそれぞれの利点を両立し、クエリ棄却率の低下と迂回の削減によって既存手法よりも高い収益性を示した。



(a) 散村



(b) 塊村



(c) 山間部

WW: 提案手法
FD: フルデマンド式
SD: セミデマンド式
TX: タクシー方式

図 6.7: バス事業者の収益

6.4.4 バス走行距離および走行時間

バス走行距離（図 6.8）は，提案手法，フルデマンド式，タクシーについては散村と塊村で同様の傾向にあり，バス台数が多い場合僅かに提案手法の走行距離が短くなった．提案手法の方がクエリ棄却率が低いがバス走行距離がタクシーおよびフルデマンド式と同じかそれ以下であるため，ユーザ送迎のための迂回が削減されていると考えられる．

セミデマンド式の場合，塊村では提案手法と同様の傾向にあることに対し，散

村で提案手法よりも走行距離が短い結果となった。これは、散村においてセミデマンド式のクエリ棄却率が高いためと考えられる。

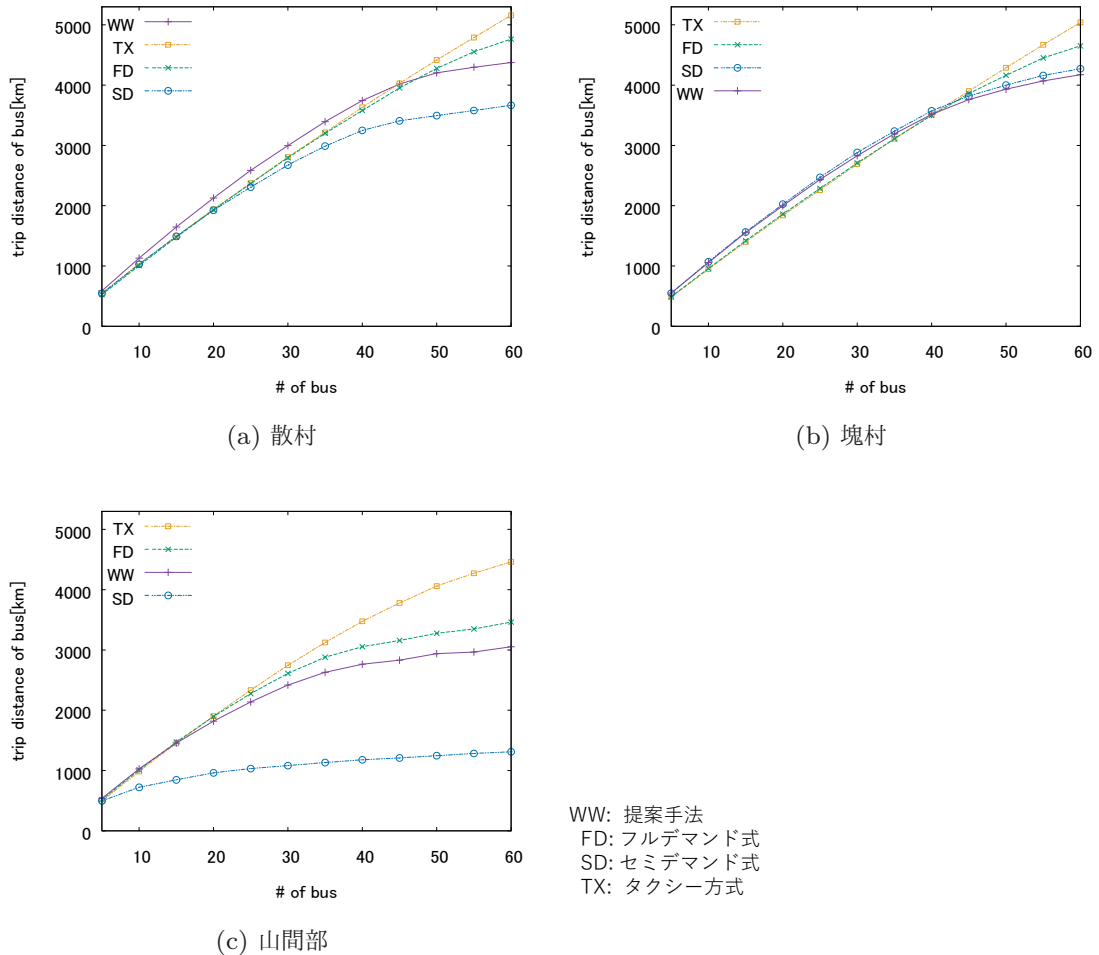


図 6.8: バス走行距離の合計

走行時間（図 6.9）においても、提案手法、フルデマンド式、タクシーについては散村と塊村で同様の傾向にある。しかし、バス台数が多い場合にのみ提案手法の走行距離がタクシーとフルデマンド式に比較しわずかに短くなるのみであったのに対し、走行時間はバス台数が 60 台の場合、散村で約 23% 削減され、走行距離より走行時間の削減率が高い結果となった。ユーザの徒歩移動を含めることで、バスが細

街路に侵入し速度が低下することを防いでいると考えられ、提案手法は走行距離よりも走行時間に対して効果が高いことが示された。

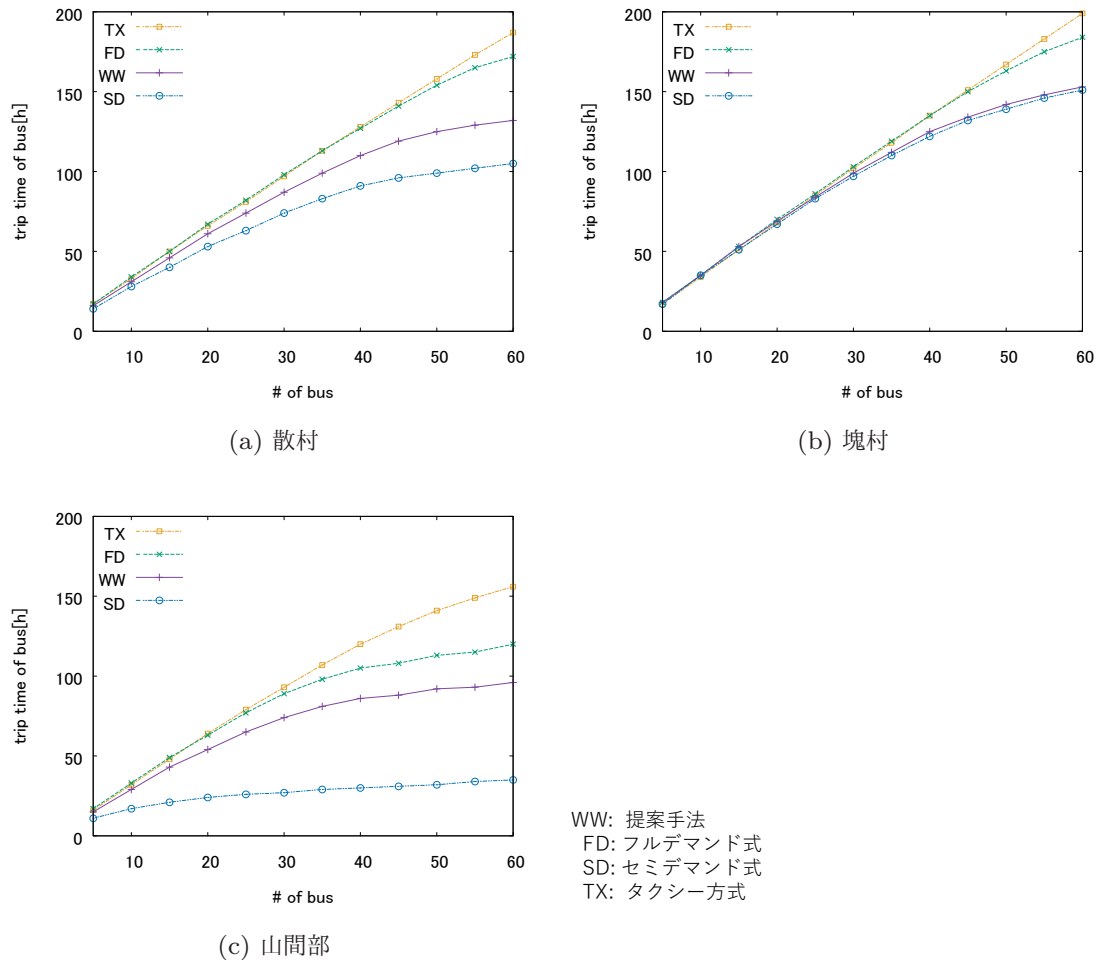


図 6.9: バス走行時間の合計

6.4.5 平均乗車人数

平均乗車人数（図 6.10）では、いずれの地図においてもバス台数が増加するにつれて下がるが、提案手法以外では地図によって下がり方に違いが見られた（図

6.10). 散村と塊村を比較した場合、散村は散村でクエリが分散しているため、フルデマンド式の平均乗車人数が塊村よりも低い値を示したが、提案手法では大きな差異がみられなかった。徒歩移動によってクエリが分散する散村においても、乗降するユーザが集約されていると考えられる。セミデマンド式の平均乗車人数は塊村・散村・山間部の順に高く、他の評価指標同様に塊村で最も良い結果となった。

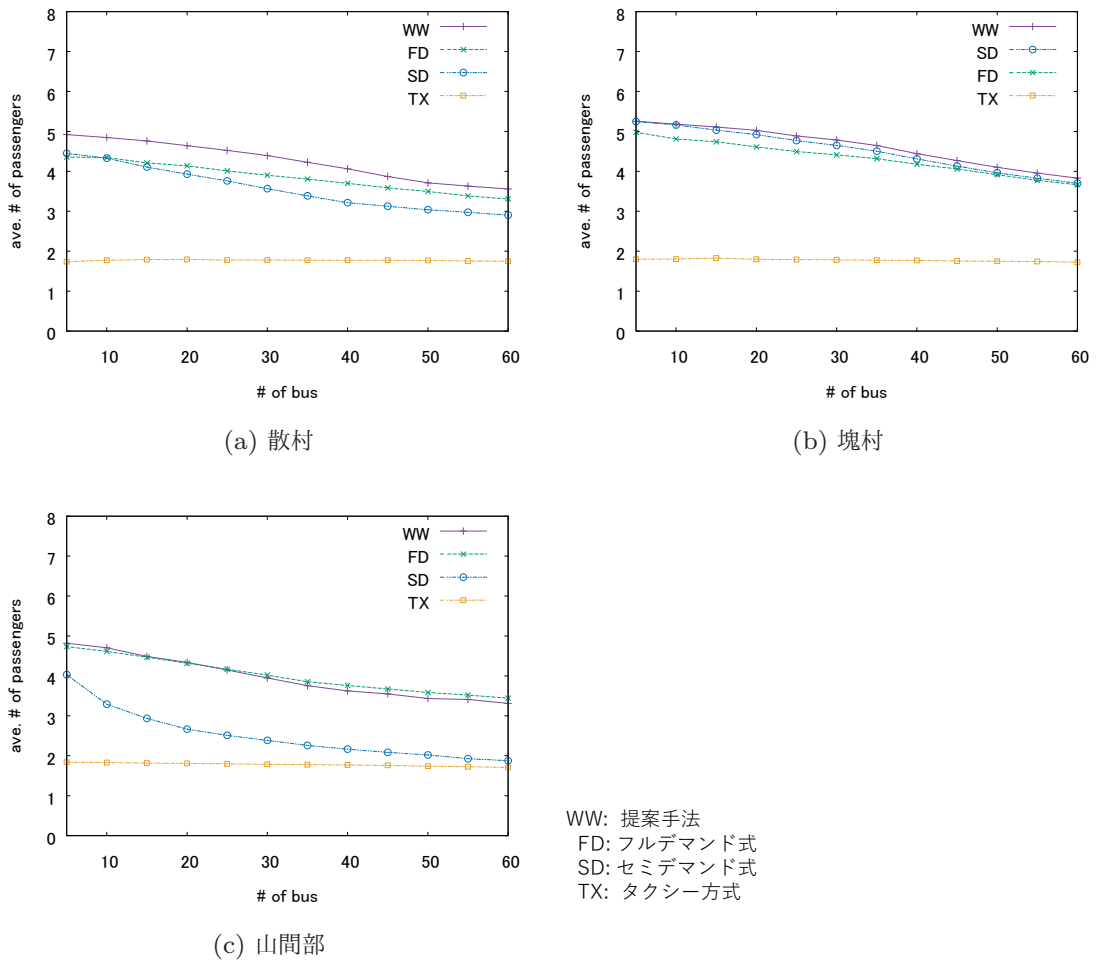


図 6.10: 平均乗車人数

6.4.6 収益と利便性の関係性について

提案手法の収益と利便性については、厳密にトレードオフの関係にはない。本評価実験における利便性の指標としてユーザの待ち時間と徒歩移動時間が挙げられるが、徒歩移動時間はバス台数を変化させた場合に大きな変化がないため、待ち時間と収益について比較を行う（図 6.11）。いずれの地図においても、バス台数を増加させるにしたがって一定のバス台数までは収益および利便性ともに上昇する。散村および塊村の場合はバス台数が 45 台の場合が収益のピークで、山間部の場合はバス台数が 35 台の場合が収益ピークである。バス台数を増加させた場合、増加する運行コストよりもクエリ棄却率が減少することによる運賃収入の増加が大きい。よって待ち時間およびクエリ棄却率いずれの視点からも利便性と収益はトレードオフの関係にならない。

一方で、収益がピークとなるバス台数を超えてバス台数を増加させた場合、スケジュールに余裕が生じ始めるため、クエリ棄却率が減少することによる運賃収入の増加よりも運行コストの増加が大きく、収益が減少する。待ち時間およびクエリ棄却率はバス台数の増加によって減少し続けるため利便性は増加し、収益と利便性はトレードオフとなる。

約 3 時間で 800 件程度のクエリを処理する場合、散村および塊村ではバス 45 台程度、山間部ではバス 35 台程度を確保する場合が最も収益が高くコスト効率が良い。一方で、実際の運行を考えると、収益がピークであるバス台数よりも多くのバスを確保した場合さらに利便性が確保されるため、適切なバス台数の決定は運行ポリシーに依存すると考えられる。自治体等が運行する場合、収益がピークとなるバス台数のみを確保しクエリが棄却されてしまうユーザを無視することは、住民サービスの観点から望ましくないと考えられる。一方で、将来的に大都市の交通混雑緩和のために自家用車や他交通の一部を代替する等の目的で民間事業者が運行する場合、収益がピークとなるバス台数のみ用意する運行方法も考えられる。

6.4.7 提案手法の計算時間

並列化を行わない本研究のアルゴリズムにおいても、提案手法に拡張した逐次挿入法の 1 クエリあたりの計算時間（図 6.12）は高々 200 秒程度となっている。本研

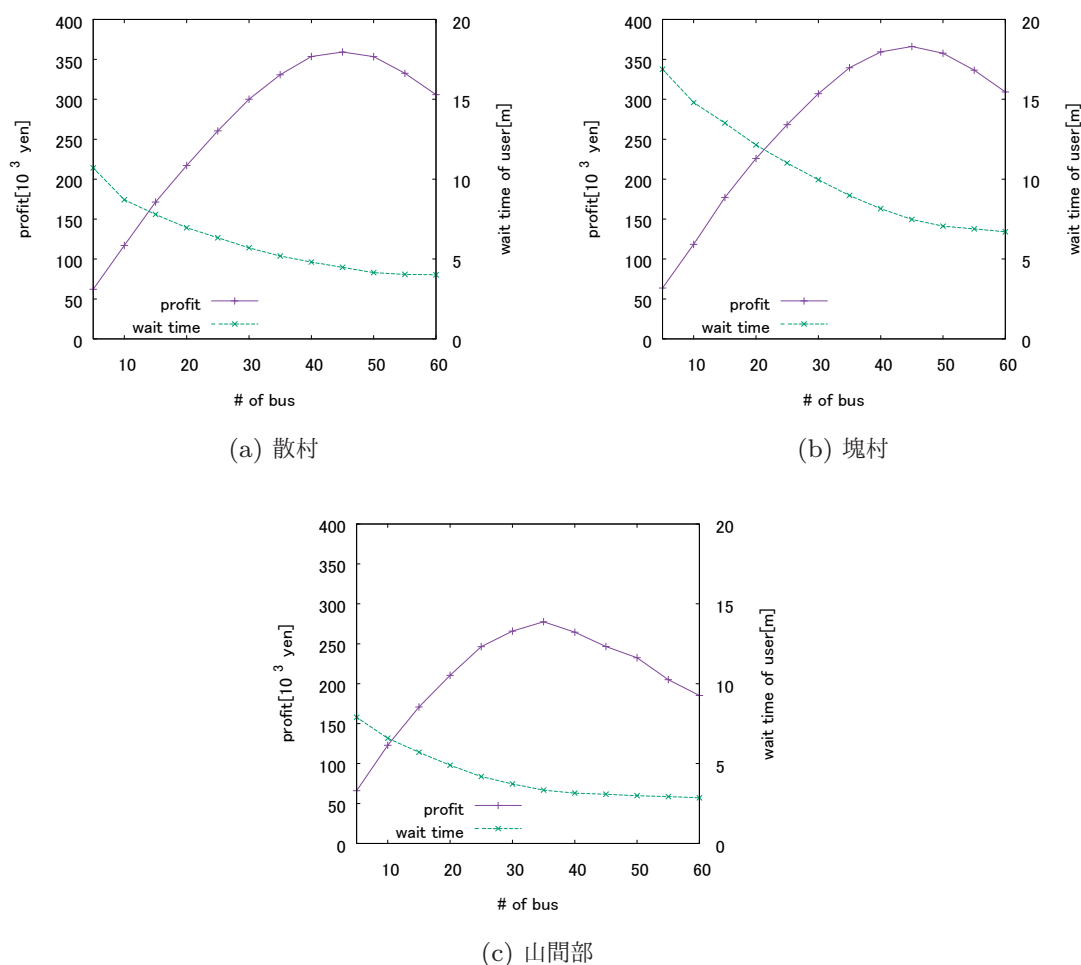


図 6.11: 提案手法の収益と利便性（待ち時間）の比較

究のシミュレーションでは，リアルタイム処理におけるそれぞれのクエリに対する逐次挿入法の計算にかかる時間は考慮しているが，現在国内で一般に運行されているデマンドバスは 30 分以上前に予約を締め切ることが多く，そのような予約を前提とするシステムでは十分に実用的な計算時間でスケジューリング可能である．本手法においては，新たな乗車要求の乗降の挿入について，その挿入箇所をそれぞれのバス，スケジュール内の順序，乗降地点の組み合わせで原則網羅的に探索しているが，それらを並列して計算した場合は予約しなくとも十分に実用的な計算時間で

スケジューリング可能であると考えられる。

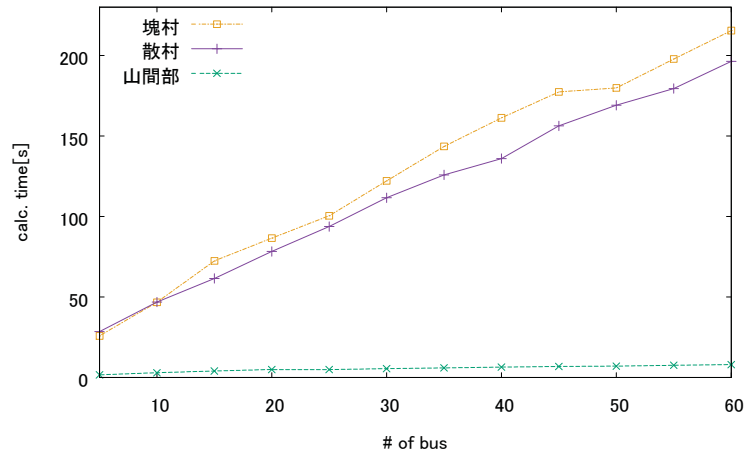


図 6.12: 提案手法における 1 クエリあたりの平均計算時間

6.5 クエリ件数を変化させた場合の実験結果および考察

次に、クエリ件数を 50–400 件で変化させ、クエリ 10 件に 1 台の一定の比率でバス台数を確保した場合のクエリ棄却率と収益について結果と考察にを述べる。

図 6.13 に示すように、変化するクエリ件数に応じて一定の比率でバス台数を確保した場合、クエリ件数によらずクエリ棄却率はほぼ一定になる。いずれの地図においても提案手法のクエリ棄却率は他の比較手法よりも低い。セミデマンド式およびタクシー方式ではクエリ棄却率が 20% 前後あることにに対し、提案手法のクエリ棄却率は 1.5%–4% 程度である。

また、図 6.13 に示すクエリ件数は現在国内で運行されているデマンドバスの利用人数を参考にしており、先述したクエリ件数を 800 件/約 3 時間に固定した場合の評価に比較し少ないクエリ件数となっている。このように少ないクエリ件数の場合、クエリ件数を固定した評価でセミデマンド式が比較的良好な結果を示した塊村においても、セミデマンド式のクエリ棄却率がフルデマンド式やタクシー方式よりも高い結果になっている。セミデマンド式ではユーザが乗降するバス停を指定するため、バスの現在地や他の予約状況を考慮できない。クエリがある程度見込まれバ

ス台数を多く確保できる場合には、いずれの乗降地点を選択してもバスが付近を巡回している場合が多い。一方で、クエリ件数もバス台数も限られる場合には指定したバス停付近にバスがおらず、徒歩移動も含むためかえってフルデマンド式よりも所要時間が長くなり、セミデマンド式のクエリ棄却率が高くなると考えられる。

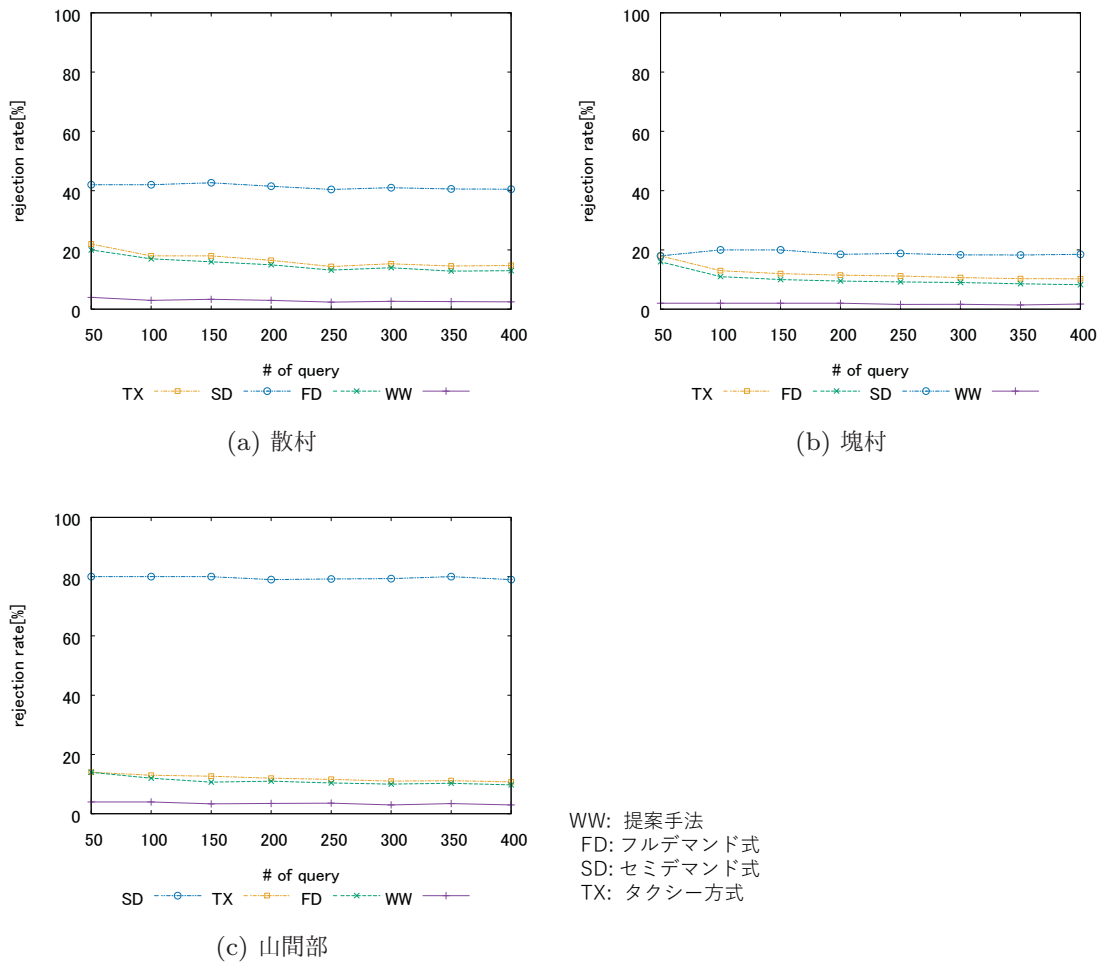
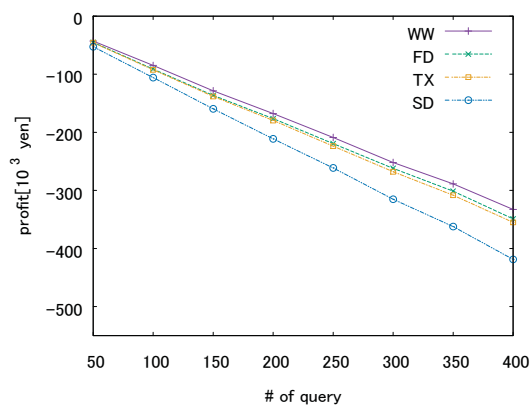


図 6.13: クエリ棄却率（クエリ件数非固定）

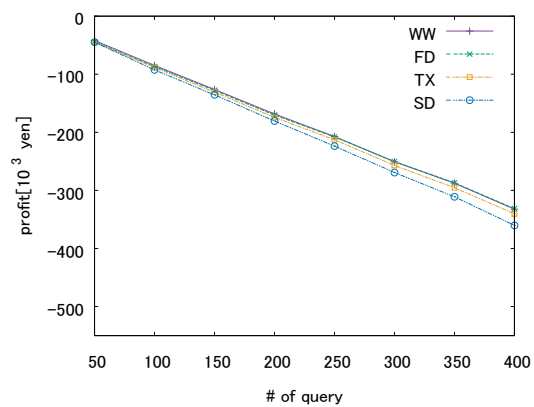
バス事業者の収益については、図 6.14 に示すようにクエリ件数を増加させるにつれてバス事業者の収益が減少し赤字額が増大する結果となった。クエリ 10 件につきバス台数を 1 台確保する状況では平均乗車人数が低く、ユーザを受理するほど

赤字が増大することが分かった。クエリの増加に対してバス台数を固定した場合には収益は改善されると見込まれるが、クエリ棄却率も増大するため実際の運行を考えた場合不適である。

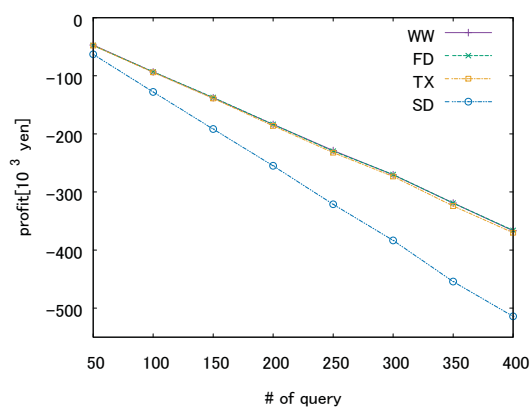
提案手法の収益はフルデマンド式およびタクシー方式と大きく差はみられなかった。一方で図 6.15 に示すように 1 クエリあたりの赤字額を見た場合、提案手法はフルデマンド式と比較しても 8-20% 程度収益を改善している。クエリ件数が比較的少なく、ユーザを受理するほど赤字額が増加するため、クエリ棄却率が低い提案手法は徒歩移動によりバスの迂回を削減しても収益は改善されなかったと考えられる。



(a) 散村



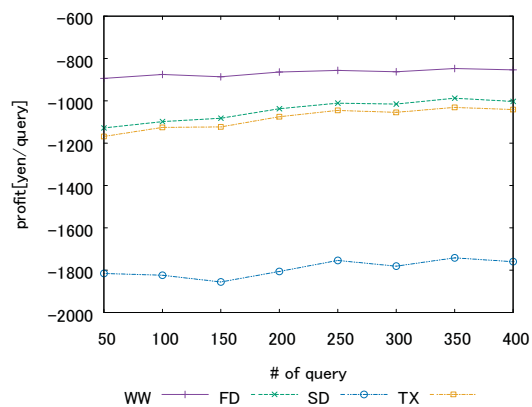
(b) 塊村



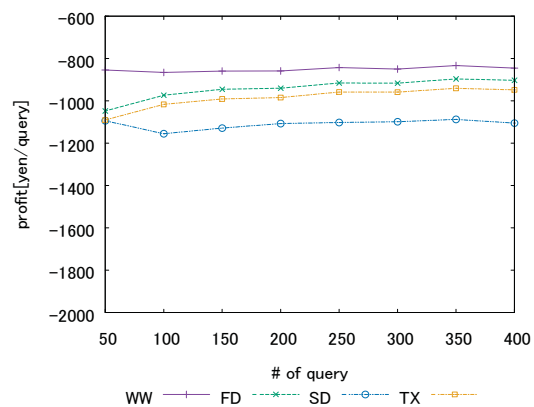
(c) 山間部

WW: 提案手法
 FD: フルデマンド式
 SD: セミデマンド式
 TX: タクシー方式

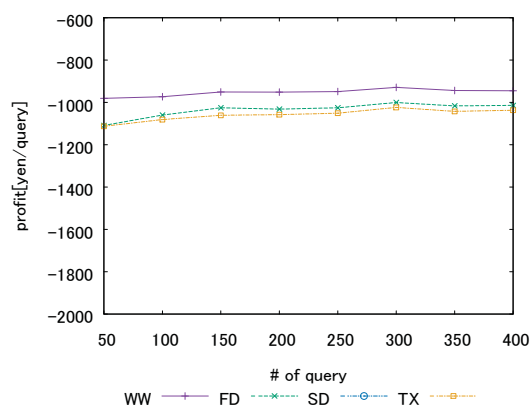
図 6.14: バス事業者の収益（クエリ件数非固定）



(a) 散村



(b) 塊村



(c) 山間部

WW: 提案手法
 FD: フルデマンド式
 SD: セミデマンド式
 TX: タクシー方式

図 6.15: 1 クエリあたりの収益（赤字）額

第 7 章 総括

本項では、オンデマンドバス事業者の収益増加を目的として、徒歩移動を含むオンデマンドバスのスケジューリング手法について提案した。従来のデマンドバスでは、ユーザが 1 組のバス停や乗降地点を選択するか、ドアツードアでの輸送であることに対し、提案手法ではシステムがバスの迂回が削減され乗車要求を受理しやすい乗降地点を計算し、ユーザに出発地・目的地と乗降地点間の徒歩移動を案内する。これによりバスの迂回を削減しスケジュールに余裕を持たせることで、限られたバス台数で多くの乗車要求を受理することができるため、事業者の収益を増加させることができる。本手法では、DARP と 1 組の乗降地点を持つ逐次挿入法を、徒歩移動圏内の複数の乗降地点に対する逐次挿入法に拡張した。また、バス乗車中のユーザの目的地到着制限時刻に余裕がなく他のユーザを乗合させることができない場合に、乗車中のユーザの降車後の徒歩移動距離を短くし他のユーザを受理しても乗車中のユーザが間に合うようにする手法を提案した。

シミュレーションによる評価実験で従来のフルデマンド式およびセミデマンド式のデマンドバス、タクシーとの事業者収益の比較を行った結果、提案手法は比較対象と同等またはそれ以下のバスの走行で、より多くのユーザを受理することでバス事業者の収益が増加することが分かった。クエリ件数を 800 件に固定した場合、クエリ棄却率はバス台数を 60 台確保した場合でも、フルデマンド式で約 13–17%、セミデマンド式で 19–80% 程度あったことに対し、提案手法では 3–9% 程度であった。従来手法と比較し提案手法の収益の増加率は、フルデマンド式と比較すると 3 つの地図の平均で 29–40% 程度増加する結果となった。クエリが分散せずバス停と集落の位置がおおよそ一致すると考えられる塊村においては、セミデマンド式も比較的良好な結果を示したが、提案手法はさらに約 18% 収益を増加させ、クエリが分散する散村においてはセミデマンド式に比較し提案手法は約 100% の収益増加率を示した。

セミデマンド式はバス停と徒歩移動を用いる手法で、一見すると乗降を集約できるため高効率であるが、実際には村落の形態に大きく影響を受ける。一方で提案手法は、システム側が状況に合わせて乗降地点を柔軟に設定するため、フルデマンド式の村落の形態による影響の受けにくさと、セミデマンド式の乗降の集約のそれぞ

れの利点を両立し、いずれの村落形態においても高い収益性を示した。

また、現状のデマンドバス利用者を参考にクエリ件数 50 件に対してバス台数を 5 台と一定の比率で確保した場合の評価では、フルデマンド式でクエリ棄却率が 20% 程度であったことに対し、提案手法のクエリ棄却率は 4% 以下に減少した。現状のデマンドバスのように極端に低需要である場合、収益では従来のフルデマンド式との差異は見られなかったものの、提案手法の受理できたクエリ 1 件あたりの赤字額は 8–20% 程度改善した。

本研究ではユーザの徒歩移動可能距離は一律に設定したが、お年寄りなど徒歩移動が困難なユーザの存在も考えられる。今後はそのようなユーザを含めた場合の評価も必要になると考える。また、今後の課題として、集客施設やラッシュ時などのクエリも考慮し現実性を高めることや、クエリ件数は変化させるがバス台数は固定する場合の評価などが考えられる。また、バスの収益は運行に関わる項目のみ評価を行ったが、実際には事務所などの支出も考えられ、実際の収益よりも評価結果が高くなっている。今後はさらなる収益性増加のために、デマンドバス同士の乗換を含めるなどして、さらにスケジューリングの効率を高めることで、より一層収益の増加を見込んでいる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多くのご指導およびご助言を頂きました伊藤実教授に心より感謝申し上げます。

柴田直樹准教授におかれましては，本研究を進めるにあたり指導の中心的役割をお引き受けいただき，数多くのご助言，ご指導をいただきました。謹んで感謝申し上げます。

Gao 助教授には，アルゴリズムや数学的な分野においてご指導いただき，研究を進めるうえで非常に有用な知識を得ることができました。心より感謝申し上げます。

統計数理研究所 南和宏准教授には終始研究にご協力いただき，ITS とはまた違った分野からのご意見も含め，大変貴重なご助言を賜りました。厚く御礼申し上げます。

藤川和利教授には，ご多忙の中論文審査員をお引き受けいただき，貴重なご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

最後に，研究においても学生生活においても，数多く相談にのって頂きお世話になった，モバイルコンピューティング研究室諸氏に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 国土交通省中部運輸局：デマンド型交通の手引き：http://www.tb.mlit.go.jp/hokkaido/bunyabetsu/tiikikoukyoukoutsuu/31manyuaru/09demandotebiki_tyuubu.pdf (2017.12.08 取得).
- [2] 地域公共交通支援センター：地域公共交通活性化事例：<http://koutsu-shien-center.jp/index.html> (2017.11.21 取得).
- [3] Wilson, N. H. M., Sussman, J. M., Goodman, L. A. and Hignnet, B. T.: Simulation of a Computer Aided Routing System (CARS), in *Proceedings of the Third Conference on Applications of Simulation*, pp. 171–183 (1969).
- [4] Jaw, J.-J., Odoni, A. R., Psaraftis, H. N. and Wilson, N. H.: A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 20, No. 3, pp. 243 – 257 (1986).
- [5] Tsubouchi, K., Hiekata, K. and Yamato, H.: Scheduling Algorithm for On-Demand Bus System, in *2009 Sixth International Conference on Information Technology: New Generations*, pp. 189–194 (2009).
- [6] Nakashima, H., Sano, S., Hirata, K., Shiraishi, Y., Matsubara, H., Kanamori, R., Koshiha, H. and Noda, I.: One Cycle of Smart Access Vehicle Service Development, in *Serviceology for Designing the Future: Selected and Edited Papers of the 2nd International Conference on Serviceology*, pp. 247–262 (2016).
- [7] Masson, R., Lehuédé, F. and Péton, O.: The Dial-A-Ride Problem with Transfers, *Computers & Operations Research*, Vol. 41, No. Supplement C, pp. 12 – 23 (2014).
- [8] 上原和樹, 赤嶺有平, 當間愛晃, 根路銘もえ子, 遠藤聡志：デマンドバスと大型車両による協調型交通システムの提案, 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 1, pp. 46–56 (2015).
- [9] Czioska, P., Kutadinata, R., Trifunović, A., Winter, S., Sester, M. and Friedrich, B.: Real-world Meeting Points for Shared Demand-Responsive

- Transportation Systems, *arXiv:1709.08488 [physics.soc-ph]* (2017).
- [10] Haklay, M. and Weber, P.: OpenStreetMap: User-Generated Street Maps, *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 7, No. 4, pp. 12–18 (2008).
 - [11] Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J. and Krajzewicz, D.: SUMO ? Simulation of Urban MObility: An Overview, in *The Third International Conference on Advances in System Simulation*, pp. 23–28 (2011).
 - [12] 公益社団法人日本バス協会：バス事業の現状と取り組みについて：<http://www.mlit.go.jp/common/001127098.pdf> (2017.11.21 取得).
 - [13] 国土交通省：平成 27 年度乗合バス事業の収支状況について：http://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha03_hh_000249.html (2017.11.21 取得).
 - [14] 国土交通省近畿運輸支局：地域公共交通の現状：<http://www.tb.mlit.go.jp/kinki/kansai/program/02.pdf> (2017.11.21 取得).
 - [15] 宮城県：道路運送法について：<https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/205915.pdf> (2017.11.21 取得).
 - [16] 鈴木文彦：地方におけるオンデマンド交通の可能性と課題, オペレーションズ・リサーチ：経営の科学 = [O]perations research as a management science [r]esearch, Vol. 57, No. 3, pp. 124–129 (2012).
 - [17] 内閣府地方創生推進事務局：仙北市国家戦略特別区域における公道での自動走行実証実験（平成 28 年 11 月 13 日）：https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tiiki/kokusentoc/senbokushi/20161113_jissyuu.html (2017.11.21 取得).
 - [18] Bischoff, J. and Maciejewski, M.: Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin, *Procedia Computer Science*, Vol. 83, No. Supplement C, pp. 237 – 244 (2016).
 - [19] Brownell, C. and Kornhauser, A.: A Driverless Alternative: Fleet Size and Cost Requirements for a Statewide Autonomous Taxi Network in New Jersey, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2416, pp. 73–81 (2014).
 - [20] Hauptmeier, D., Krumke, S., Rambau, J. and Wirth, H.-C.: Euler is stand-

- ing in line dial-a-ride problems with precedence-constraints, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 113, No. 1, pp. 87 – 107 (2001).
- [21] Cubillos, C., Rodriguez, N. and Crawford, B.: A Study on Genetic Algorithms for the DARP Problem, in *Bio-inspired Modeling of Cognitive Tasks: Second International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation, IWINAC 2007, La Manga del Mar Menor, Spain, June 18-21, 2007, Proceedings, Part I*, pp. 498–507 (2007).
 - [22] Solomon, M. M.: Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints, *Operations Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 254–265 (1987).
 - [23] Noda, I., Ohta, M., Shinoda, K., Kumada, Y. and Nakashima, H.: Evaluation of Usability of Dial-a-Ride Systems by Social Simulation, in *Multi-Agent-Based Simulation III: 4th International Workshop, MABS 2003, Melbourne, Australia, July 14, 2003. Revised Papers*, pp. 167–181 (2003).
 - [24] Noda, I., Ohta, M., Shinoda, K., Kumada, Y. and Nakashima, H.: Evaluation of Usability of Dial-a-Ride Systems by Social Simulation, in *Multi-Agent-Based Simulation III: 4th International Workshop, MABS 2003, Melbourne, Australia, July 14, 2003. Revised Papers*, pp. 167–181 (2003).
 - [25] 小柴等, 野田五十樹, 山下倫央 : 実都市を対象としたシミュレーションによるデマンドバス評価, 人工知能学会全国大会論文集, Vol. 27, No. 1D4-3 (2013).
 - [26] Ma, S., Zheng, Y. and Wolfson, O.: Real-Time City-Scale Taxi Ridesharing, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 27, No. 7, pp. 1782–1795 (2015).
 - [27] Masson, R., Lehuédé, F. and Péton, O.: An Adaptive Large Neighborhood Search for the Pickup and Delivery Problem with Transfers, *Transportation Science*, Vol. 47, No. 3, pp. 344–355 (2013).
 - [28] Stiglic, M., Agatz, N., Savelsbergh, M. and Gradisar, M.: The benefits of meeting points in ride-sharing systems, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 82, No. Supplement C, pp. 36 – 53 (2015).
 - [29] Agatz, N., Erera, A., Savelsbergh, M. and Wang, X.: Optimization for dy-

namic ride-sharing: A review, *European Journal of Operational Research*, Vol. 223, No. 2, pp. 295 – 303 (2012).

- [30] 国土交通省中部運輸支局：中運局公示第 61 号一般乗合旅客自動車運送事業の運賃及び料金に関する制度について：https://www.tb.mlit.go.jp/chubu/jidosya/ryokaku_kouji/61_noriai.pdf (2018.01.16 取得).
- [31] 国土交通省：バス事業者の経営状態、経費構成等：<http://www.tb.mlit.go.jp/kinki/kansai/program/column01.pdf> (2017.12.04 取得).
- [32] トヨタ自動車株式会社：ハイエースグランドキャビン価格・グレード：<http://toyota.jp/hiacewagon/grade/grade1/> (2017.12.04 取得).
- [33] 経済産業省資源エネルギー庁：石油製品価格調査産業用価格（軽油・A 重油）：http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/pl007/results.html#headline3 (2017.12.04 取得).
- [34] 総務省：平成 28 年賃金構造基本統計調査：https://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020103.do?_toGL08020103_&tcID=000001062197&cycleCode=0&requestSender=estat (2017.12.04 取得).
- [35] 国土交通省：国土数値情報バス停留所データ：<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-P11.html> (2018.01.19 取得).
- [36] 国土地理院：基盤地図情報：<http://www.gsi.go.jp/kiban/> (2017.11.21 取得).
- [37] 国土交通省都市・地域整備局都市計画課都市交通調査室：まちづくりと一体となった L R T 導入計画ガイダンス：<http://www.mlit.go.jp/crd/tosiko/guidance/pdf/00all.pdf> (2018.02.09 取得).
- [38] 公益社団法人日本交通政策研究会：統計・資料：http://www.nikkoken.or.jp/pdf/publication/2014j/2014j_80.pdf (2018.02.09 取得).